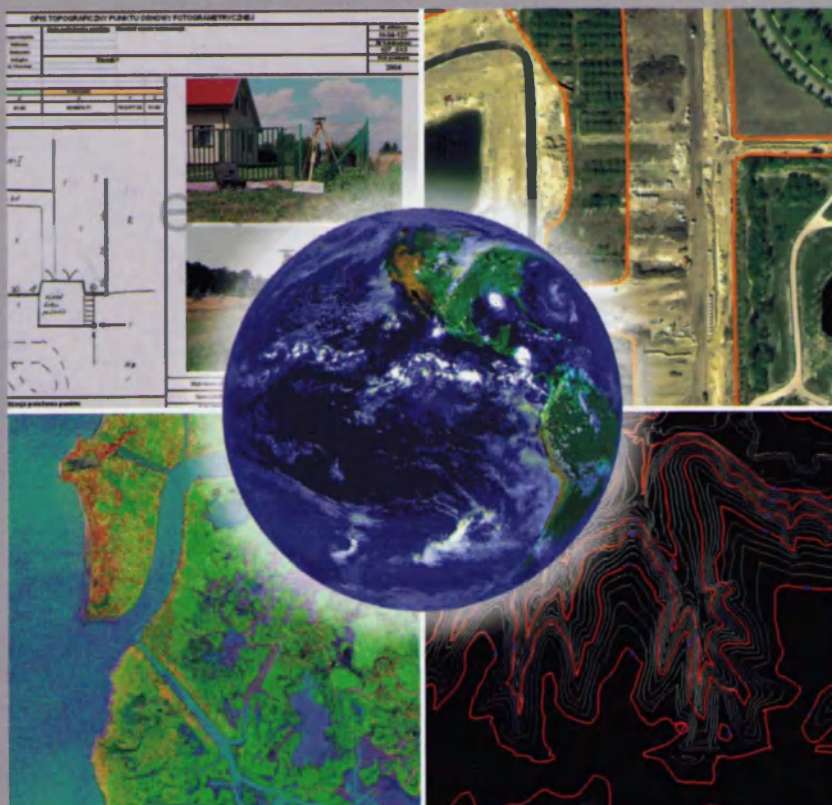


О. Л. Дорожинський, Р. Тукай



ФОТОГРАММЕТРІЯ



Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Львівська політехніка”

**О.Л. ДОРОЖИНСЬКИЙ
Р. ТУКАЙ**

ФОТОГРАММЕТРІЯ

*Затверджено Міністерством освіти і науки України
як підручник для студентів вищих навчальних закладів*

Львів
Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”
2008

*Затверджено Міністерством освіти і науки України
як підручник для студентів вищих навчальних закладів
(лист № 1-4/18-Г-1118 від 19.05.2008)*

Рецензенти:

Бурштинська Х.В., доктор технічних наук, професор кафедри фотограмметрії та геоінформатики
Національного університету “Львівська політехніка”;

Войтенко С.П., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерної геодезії
Київського національного технічного університету будівництва і архітектури;

Карпінський Ю.О., доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри геоінформатики і фотограмметрії
Київського національного технічного університету будівництва і архітектури

Дорожинський О.Л., Тукай Р.

Д 692 **Фотограмметрія: Підручник.** – Львів: Видавництво Національного університету
“Львівська політехніка”, 2008. – 332 с.

ISBN 978-966-553-688-8.

У підручнику подано теорію аналітичної фотограмметрії та розв’язання основних фотограмметричних задач, що становить основу цифрової фотограмметрії. Висвітлено питання цифрового оброблення зображень, зокрема формування образів, покращання якості, способи стиснення та ін. Детально описано технології цифрової фотограмметрії, зокрема побудова цифрових моделей рельєфу і поверхні, аеротріангуляції, кореляції зображень, створення ортофотокарт. Подано теоретичне розв’язання задач космічної фотограмметрії, розглянуто сучасні підходи до технологій космічного картографування поверхонь Землі і планет.

Підручник призначений для студентів ВНЗ з базового та магістерського рівнів підготовки напряму “Геодезія, картографія та землевпорядкування”, а також для аспірантів, докторантів та фахівців, що займаються використанням фотограмметрії та дистанційного зондування у різних галузях науки і практики.

ББК 26.12я73

З М І С Т

Від авторів	7
1. ВСТУП	9
1.1. Концепція цифрової фотограмметрії та чинники її розвитку	9
1.2. Коротка історична довідка	18
2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОТОГРАММЕТРІЇ	25
2.1. Види проєкцій, в яких отримується зображення	25
2.2. Знімок як центральна проєкція	26
2.3. Системи координат, що використовуються у фотограмметрії	29
2.3.1. Системи координат знімків	29
2.3.2. Просторові фотограмметричні системи координат, кути Ейлера та напрявні косинуси	31
2.3.3. “Геодезична” (абсолютна) та геоцентрична системи координат	33
2.4. Елементи внутрішнього та зовнішнього орієнтування знімка	34
2.5. Математичні залежності між координатами точок знімка та місцевості	37
2.5.1. Визначення координат точки об’єкта з використанням одного знімка	37
2.5.2. Визначення координат точки знімка за відомих координат точки об’єкта	38
2.5.3. Залежність між координатами точок горизонтального і нахиленого знімків	42
2.6. Елементи орієнтування пари знімків і геометричної моделі об’єкта	44
2.6.1. Елементи зовнішнього орієнтування пари знімків	44
2.6.2. Елементи взаємного орієнтування (ЕВО)	45
2.6.3. Елементи зовнішнього орієнтування фотограмметричної моделі об’єкта	46
2.7. Аналітичне розв’язання основних фотограмметричних задач	47
2.7.1. Пряма фотограмметрична засічка	47
2.7.2. Обернена фотограмметрична засічка для одного знімка	49
2.7.3. Подвійна обернена фотограмметрична засічка	53
2.7.4. Розв’язання задачі взаємного орієнтування	56
2.7.5. Сумісне визначення елементів взаємного орієнтування та передавання масштабу для двох суміжних моделей	60
2.7.6. Геодезичне орієнтування фотограмметричної моделі	62
2.8. Геометричні перетворення, вживані у фотограмметрії	63

2.9. Математичні моделі похибок фотограмметричних вимірів. Вплив кривини Землі...	69
2.9.1. Моделі похибок фотограмметричних вимірів	69
2.9.2. Відхилення реальної центральної проекції від ідеальної	70
2.9.3. Похибки вимірювання фотокоординат	73
2.9.4. Фактори нестрогого математичного опрацювання	74
2.9.5. Вплив кривини Землі	75
3. КОМП'ЮТЕРНЕ ОПРАЦЮВАННЯ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ.....	78
3.1. Основи перетворення образу у цифрову форму	78
3.1.1. Сприйняття зображень	78
3.1.2. Кольорове охоплення та моделі кольору.....	82
3.2. Візуалізація цифрових образів на екрані комп'ютера.....	95
3.3. Збереження цифрових зображень.....	106
3.4. Компресія цифрових образів.....	112
3.4.1. Кодування без втрат.....	113
3.5. Оптимізація яскравості та контрасту	120
3.6. Методи кольорової компресії	124
3.7. Прилади із зарядовим зв'язком – основні відомості	126
4. ЦИФРОВИЙ ФОТОГРАММЕТРИЧНИЙ ЗНІМОК	131
4.1. Вступ.....	131
4.2. Сканування фотографічних зображень.Фотограмметричні сканери.....	131
4.3. Визначення плоских прямокутних координат точок цифрового зображення.....	141
4.4. Цифрові фотограмметричні знімальні системи	143
4.5. Методи покращання характеристик цифрових знімків.....	151
4.5.1. Методи просторової області	151
4.5.2. Методи частотної області.....	155
4.5.3. Поліпшення зображення модифікацією гістограми	157
4.5.4. Згладжування зображень.....	163
4.5.5. Підкреслення країв у зображенні	165
4.5.6. Поліпшення зображень за допомогою частотних фільтрів	167
4.6. Специфічні операції опрацювання цифрових знімків	172
4.7. Методи автоматичної ідентифікації образів у цифровій фотограмметрії.....	176
5. ПОБУДОВА ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ ОБ'ЄКТІВ	181
5.1. Поняття про цифрові моделі об'єкта (ЦМО, ЦММ, ЦМР).....	181
5.2. Методи збирання даних для побудови моделі об'єкта.....	182
5.2.1. Загальні відомості	182
5.2.2. Наземне лазерне сканування.....	184
5.2.3. Лазерні сканувальні системи повітряного базування.....	189

5.2.4. Радарні методи	196
5.3. Математичні моделі відтворення та інтерполяції ЦМР	204
6. АНАЛІТИЧНА ФОТОТРІАНГУЛЯЦІЯ.....	214
6.1. Класифікація способів аналітичної фототріангуляції	214
6.2. Фототріангуляція методом в'язок.....	215
6.3. Фототріангуляція методом моделей	217
6.4. Фототріангуляція за відомих координат центрів проєкцій.....	218
6.5. Маршрутна фототріангуляція.....	221
6.5.1. Спосіб частково залежних моделей	222
6.5.2. Спосіб повністю залежних моделей.....	223
6.5.3. Спосіб незалежних моделей.....	223
6.6. Фототріангуляція із самокалібруванням	224
6.7. Деформація фототріангуляційної мережі. Точність фототріангуляції	227
7. ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОЇ ФОТОГРАММЕТРІЇ.....	231
7.1. Цифрові фотограмметричні станції та основні види продукції	231
7.1.1. Системи стереоспостереження у ЦФС.....	231
7.1.2. Характеристики деяких ЦФС.....	232
7.2. Технологія побудови мереж аеротріангуляції з цифрових знімків.....	241
7.3. Технології взаємного та абсолютного орієнтування моделі	250
7.4. Технології побудови цифрової моделі рельєфу (ЦМР) з цифрових аерознімків	253
7.5. Цифрові ортофотокарти.....	259
7.5.1. Визначення і теоретичні основи	259
7.5.2. Генерування ортозображень	261
7.5.3. Генерування ортозображень з виправленням оптичної щільності.....	264
7.5.4. Визначення лінії “склеювання” мозаїки	265
7.5.5. Вирівнювання кольорів для створених ортофотокарт.....	266
7.5.6. Створення ортофотокарт з обрізанням по рамках секцій з одночасним тональним вирівнюванням	267
7.5.7. Виправлення похибок ЦМР та похибок знімків на створених ортофотокартах.....	270
7.6. Сумісне опрацювання даних лазерного сканування з літака та цифрових знімків.....	272
7.7. Сучасні технології у картографуванні територій (на прикладі Швейцарії).....	275
8. КОСМІЧНА ФОТОГРАММЕТРІЯ.....	283
8.1. Предмет космічної фотограмметрії. Об'єкти досліджень	283
8.2. Картографічні супутникові системи високої точності та роздільної здатності	284

8.2.1. Супутникові системи світу	284
8.2.2. Значення роздільної здатності	289
8.2.3. Космічні системи високої роздільної здатності	293
8.2.4. Ціна картографічних супутникових зображень	294
8.2.5. Картографічні супутникові системи та Україна	295
8.3. Теоретичні основи космічної фотограмметрії	296
8.3.1. Завдання космічної фотограмметрії	296
8.3.2. Відомості про орбітальний рух	296
8.3.3. Системи координат, вживані у космічній фотограмметрії	299
8.3.4. Визначення планетоцентричних координат точок планети із застосуванням кадрових систем	303
8.3.5. Визначення планетоцентричних координат точок планети із використанням сканерних систем	304
8.3.6. Визначення планетоцентричних координат точок планети з даних радіолокаційного знімання	306
8.4. Космічна фототріангуляція	309
8.4.1. Математичні моделі космічної фототріангуляції	309
8.4.2. Відомості про створені опорні мережі на об'єктах Сонячної системи	313
8.5. Космічна фотограмметрія для картографування територій	315
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	323
АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК	326

ВІД АВТОРІВ

Фотограмметрія як наукова дисципліна, що вивчає кількісні та якісні характеристики різноманітних природних та штучних об'єктів, час від часу зазнає певних змін. Передусім це стосується технологій опрацювання зображень цих об'єктів. Такі зміни коротко можна окреслити трьома етапами розвитку фотограмметрії: аналогова фотограмметрія – аналітична фотограмметрія – цифрова фотограмметрія.

Перші два розділи вивчаються в університетських курсах з фотограмметрії на рівні бакалавра. Аналітична фотограмметрія як теоретична база цифрової фотограмметрії вивчається як на рівні бакалавра, так і магістра. Цифрова фотограмметрія як сучасна технологія опрацювання зображень сьогодні є провідною гілкою фотограмметрії. Саме тому в цій роботі їй надано таку увагу, щоб читач зміг самостійно вивчити основні методи і технології цифрової фотограмметрії; передусім способи отримання інформації про об'єкти на основі опрацювання зображень на т. зв. цифрових фотограмметричних станціях.

Наша робота містить вісім основних розділів, кожний з яких дає певну інформацію про математичні підходи, фізичні засади і технологічні аспекти виконуваних фотограмметричних операцій.

У розділі 1 (вступ) проаналізовано сучасний стан фотограмметрії та описано основні історичні етапи розвитку цієї дисципліни.

У розділі 2 автори подають математичні основи фотограмметрії так, як це прийнято в курсі з аналітичної фотограмметрії. Ці фундаментальні теоретичні знання є основою для реалізації фотограмметричної складової цифрової фотограмметрії, і передовсім опрацювання зображень, які отримані на підставі центральної проєкції.

У розділі 3 викладений матеріал тісно перегукується з дисципліною, яка доволі часто фігурує під назвою “цифрове опрацювання зображень”. Тут зосереджено увагу на можливостях покращання яскравості та контрасту зображення, корекції кольорів, а також запису великих масивів інформації, якими є цифрові образи, у стисненому вигляді. Автори також подають відомості, як отримати стереоефект на екрані комп'ютера, які існують підходи до розв'язання складної задачі виконання стереовимірів без участі людини-оператора, тобто в автоматичному режимі.

Розділ 4 стосується способів отримання цифрового знімка. У ньому висвітлено принципи геометричної (кількісної) та радіометричної (якісної) оцінки зображення. Наведено способи покращання обох характеристик та форми (формати) запису образів на носіях даних, які придатні для подальшого комп'ютерного опрацювання.

Одним із найчастіше вживаних видів продукції, отриманої засобами цифрової фотограмметрії, є ортофотокарта. Напевне, читачеві відомо, що для її побудови потрібна цифрова модель рельєфу (ЦМР) території (об'єкта). Тому в розділі 5 описано способи побудови цифрових моделей об'єктів, зокрема ЦМР, методи відтворення та інтерполяції ЦМР.

Фотограмметрія як науково-прикладна дисципліна завжди була скерована на скорочення обсягів польових геодезичних та топографічних робіт, переміщаючи центр ваги з поля у вигідніші та дешевші камеральні умови побудови топографічних або тематичних карт. Аеротріангуляція саме для того і виникла, щоб замінити геодезичне згущення планово-висотної мережі (роботу в польових умовах) на фотограмметричні способи, що ґрунтуються на камеральному опрацюванні знімків. У розділі 6 подано теоретичні основи аеротріангуляції, які спираються на класичні засади аналітичної фотограмметрії. Окрім цього, описано підходи до автоматичної (без участі оператора!) побудови аеротріангуляційних мереж.

Розділ 7 стосується описання технологій цифрової фотограмметрії. Тут подано відомості про цифрові фотограмметричні станції (ЦФС), які складаються з двох основних частин: технічної бази (комп'ютер) та програмного забезпечення (пакет прикладних програм). Описано технології реалізації трьох головних задач – побудови мереж аеротріангуляції, створення моделі об'єкта, виконання операцій для створення цифрових ортофотокарт.

У розділі 8 подано відомості з космічної фотограмметрії, що стосуються математичних і технологічних аспектів. Оскільки проблематика космічної фотограмметрії є доволі об'ємною і може бути предметом окремої праці, то автори обмежились висвітленням найважливіших питань з цієї галузі.

Список літератури містить далеко не повний перелік виданих за останнє десятиліття монографій, підручників, статей тощо. Проте ті джерела, що нами подано, завжди можуть і повинні слугувати читачеві тим дороговказом, який приведе його до повного розуміння предмета ФОТОГРАММЕТРІЯ.

Ця праця розрахована на коло читачів, які ознайомлені з основами фотограмметрії. До них зараховуємо студентів, докторантів, аспірантів, викладачів та інженерів, які займаються питаннями теорії і практики фотограмметрії та застосуванням її методів у різних галузях науки і практики.

Магістр Р. Тукай написав розділ 7 та параграфи 4.2, 4.6, 5.2.3, а також підготував значну кількість ілюстрацій до цієї роботи.

До написання окремих підрозділів цієї книги залучені:

професор, доктор технічних наук Х.В. Буришинська (параграфи 5.1, 5.2.1, 5.3), доцент, кандидат технічних наук О.В. Тумська та доцент, кандидат фізико-математичних наук В.Я. Янчак (розділ 3, параграф 4.5). Магістр О.О. Дорожнинська написала параграфи 8.2, 8.5 та підбрала ілюстративний матеріал до розділу 8. Параграф 7.7 написав магістр Т. Грюненфельдер на підставі власного досвіду.

Решта матеріалу підручника написав професор, доктор технічних наук О.Л. Дорожнинський (розділи 1, 2, 6, 8, параграфи 3.7, 4.1, 4.3, 4.4, 4.7, 5.2.2, 5.2.4, 8.1, 8.3, 8.4).

Загальне редагування книги виконав О.Л.Дорожнинський.

Сподіваємося, що ця праця допоможе читачеві зрозуміти та освоїти теорію і практику сучасної фотограмметрії.

О. ДОРОЖИНСЬКИЙ
Р. ТУКАЙ
Львів, 2008

1. ВСТУП

1.1. Концепція цифрової фотограмметрії та чинники її розвитку

Ще в 1988 р. на XVI Конгресі Міжнародного товариства з фотограмметрії та дистанційного зондування (ISPRS) цим науковим дисциплінам дано таке визначення: *це галузь технічних наук, яка займається отриманням достовірної інформації про фізичні об'єкти та їхнє оточення за допомогою реєстрації, вимірювання та інтерпретації образів або цифрових образів, одержаних за допомогою сенсорів, які не контактують безпосередньо з цими об'єктами.*

Можна, з позицій сьогодення, критикувати таке визначення, можна його сприймати повністю або ж частково, проте важливо усвідомити, що воно було дано майже 20 років тому. Безперечно, техніка і технології за цей час істотно розвинулись, і це вплинуло на фотограмметрію та дистанційне зондування (ДЗ).

У цьому розділі подаємо узагальнений погляд на фотограмметрію, що є предметом нашого багаторічного зацікавлення, і лише подеколи торкнемося ДЗ – цієї величезної сфери наукової та прикладної діяльності спеціалістів з різних галузей – геологів, екологів, архітекторів, гірників, будівельників тощо.

Фотограмметрія як наукова і прикладна дисципліна тісно пов'язана з іншими галузями знань, причому цей зв'язок має як теоретичну, так і технічну компоненту.

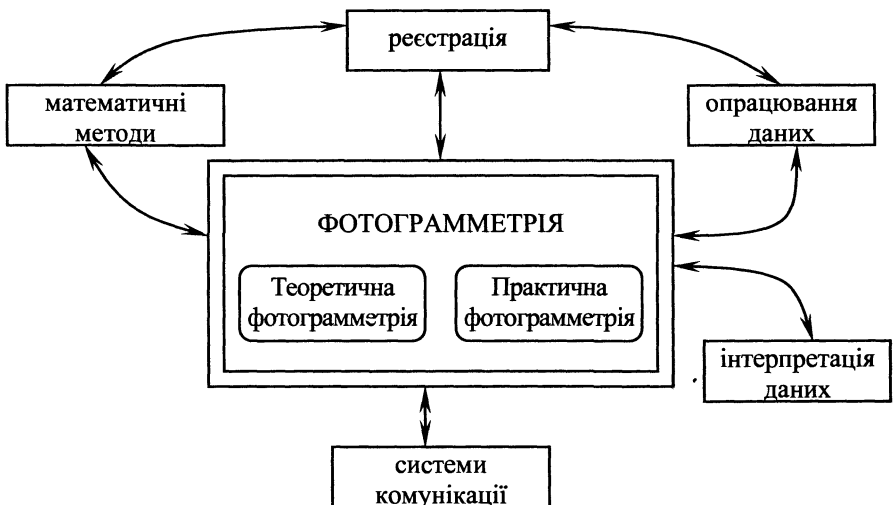


Рис. 1.1. Основні чинники, пов'язані з функціонуванням фотограмметрії як наукової дисципліни

На рис. 1.1 показано основні чинники, які створюють “обличчя” фотограмметрії на певному історичному етапі. А вже сам загальний рівень науки і техніки визначає як конкретні риси, так і зміни цього “обличчя”, формує технологічні лінії, за якими отримують той чи інший продукт фотограмметричної діяльності. Саму фотограмметрію поділено на теоретичну і практичну.

Теоретична фотограмметрія формується у вигляді сукупності ідеологічних підходів (аналогова, аналітична або цифрова) та відповідних математичних моделей, а практична фотограмметрія, ґрунтуючись на відповідних теоретичних засадах, скерована на отримання кінцевого продукту із застосуванням конкретних технологій. Така схема відтворює як попередній стан фотограмметрії, так і її сьогодення. За допомогою прискіпливого аналізу і наукового пошуку можна знайти безліч чинників, які впливатимуть на стан фотограмметрії в майбутньому.

А тепер зосередимо свою увагу на тих змінах, що відбулися у фотограмметрії наприкінці ХХ століття і які зумовили появу **цифрової фотограмметрії**. Вкажемо на кілька причин.

По-перше, це величезне зростання можливостей комп’ютерної техніки. Якщо раніше, застосовуючи обчислювальну техніку, ми мали на увазі лише реалізацію числових методів, то тепер комп’ютер бере на себе все нові й нові функції. У фотограмметрії ці можливості реалізовано у кількох сферах.

Стало можливим, завдяки великим обсягам зовнішньої та внутрішньої пам’яті та високій швидкодії, опрацьовувати величезні масиви даних та виконувати обчислювальні операції надскладного характеру. Наприклад, стало можливим будувати мережі фототріангуляції з тисячами пунктів мережі, розв’язуючи системи лінійних рівнянь з десятками тисяч невідомих.

Але принципово інша річ – комп’ютер став приладом для фотограмметричних вимірювань (монокулярних або ж стереоскопічних), замінивши дорогі аналогові чи аналітичні фотограмметричні прилади. На комп’ютері можна виконувати різноманітні графічні операції, і що принципово важливо – з’явилась реальна можливість частково, а подекуди повністю автоматизувати фотограмметричні вимірювальні операції. Це означає, що оператор-фотограмметрист звільняється від обтяжливої ремісницької роботи.

По-друге, фотографічний знімок, отриманий як результат фотографування об’єкту, вже не є домінуючим інформаційним носієм. На зміну фотоемульсії прийшли нові засоби, серед яких найцікавішими з позицій геометричної якості є сенсори типу “Прилад із зарядовим зв’язком” (ПЗЗ). Фотокамери і, зокрема, аерофотоапарати замінюються цифровими камерами та цифровими знімальними системами. Цей перспективний метод вже увійшов в аматорський світ і дещо повільніше у фотограмметричну практику (переважно через високу вартість аерознімальних цифрових систем). Натомість інший спосіб отримання цифрового фотограмметричного знімка – скануванням фотознімка – доволі поширений. Так чи інакше, тепер фотограмметрія опрацьовує цифровий образ.

По-третє, глобальні позиційні системи (GPS), які викликали справжню революцію у навігації та геодезії, кардинально вплинули на фотограмметричні технології. Зокрема, GPS встановлюють на літаку, і це дає змогу з високою точністю у поєднанні з наземною станцією визначити просторові координати центрів фотографування з точністю від одиниць до десятків сантиметрів. Такі дані стають вже не допоміжними (як це було в 70-ті роки XX століття із застосуванням радіогеодезичних систем), а основними для подальшого використання у фотограмметричних технологіях.



Рис. 1.2. Чинники, що впливають на розвиток і стан цифрової фотограмметрії та сфери застосування

Існують й інші чинники, інтегральний вплив яких на фотограмметрію, а точніше, на цифрову фотограмметрію, є дуже істотним. Саме вони в сукупності зображені на рис. 1.2.

Розглянемо коротко суть кожного з чинників, які показано на рис. 1.2.

Математичну суть фотограмметрії становлять векторна алгебра та аналітична геометрія. Фундаментальними для аналітичної фотограмметрії (а вона є базою для цифрової фотограмметрії) є умова колінеарності та умова компланарності векторів [2, 3, 4].

Математичні методи, які застосовуються у фотограмметрії, традиційно можна поділити на дві групи:

- методи попереднього опрацювання зображень, отриманих за допомогою різних сенсорів;
- методи фотограмметричних побудов моделей досліджуваних об'єктів.

Попереднє опрацювання зображень має на меті усунення деформацій образу, що спричинені дією зовнішніх або внутрішніх чинників (рефракція атмосфери, дисторсія оптичної системи, деформація фотографічного матеріалу, похибки під час сканування фотографічного зображення тощо). Саме тоді виміряний образ (знімок) буде поданий у вигляді сукупності плоских прямокутних координат (x, y) , які з найбільшою ймовірністю відповідали б їхнім істинним значенням (x^0, y^0) . Інша задача попереднього оброблення зображень стосується покращання якості зображення (контраст, оптична щільність, кольорова гама тощо – все це в сукупності називають радіометричними характеристиками), а також, у разі необхідності, їхнього компактного (ущільненого) запису, оскільки обсяг інформації навіть для одного цифрового знімка є доволі великим.

Методи фотограмметричних побудов – це класичні задачі аналітичної фотограмметрії:

- визначення просторових координат точок об'єкта з поодинокого знімка та стереопари;
- перехід від нахилоного знімка до горизонтального у заданому масштабі (трансформування поодинокого знімка);
- пряма та обернена фотограмметричні засічки;
- взаємне орієнтування пари знімків;
- зовнішнє (абсолютне) орієнтування фотограмметричної моделі об'єкта;
- побудова опорних мереж способами фототріангуляції;
- цифрове ортофототрансформування (створення цифрових ортофотокарт);
- побудова цифрових моделей об'єктів, цифрових моделей рельєфу місцевості;
- деякі інші.

Усі ці задачі достатньо опрацьовані і становлять базу аналітичної фотограмметрії. А чи є тут можливість подальших наукових пошуків? Безперечно, так. І вкажемо лише на один аспект.

Під час вирівнювання аналітичної фототріангуляції (і взагалі в аналітичній фотограмметрії) приймають за базову модель таку, в якій похибки вимірювань

мають випадковий характер і розподіляються за законом Гаусса. Тоді є всі підстави застосовувати для математичного опрацювання метод найменших квадратів (МНК). Але ж у цифровій фотограмметрії ми прагнемо до автоматичного вимірювання стереопари. І тому можна допустити, що внаслідок такого автоматичного процесу в несприятливих місцях зображення (ліс, забудова, водна поверхня тощо) цей процес буде супроводжуватися грубими похибками. Тоді варто застосувати інші підходи, які опрацьовані в математичній статистиці, зокрема в оцінюванні параметрів – робастний спосіб або спосіб неквадратичної функції втрат.

У фотограмметричних вирівнювальних операціях робастний спосіб досліджував проф. С. Могильний, а використання неквадратичної функції втрат – проф. О. Дорожинський [5]. Але це стосувалось фотозображень, а яка реальна картина у разі використання автоматичних фотограмметричних вимірів – це мають показати дослідження.

Програмні засоби

Програмні засоби, що використовуються в цифровій фотограмметрії, умовно можна поділити на дві групи. До першої зараховують ті, що реалізують суто задачі аналітичної фотограмметрії (перелік основних задач наведено раніше). До другої групи належать ті програми, які стосуються радіометричного опрацювання зображень – оптична щільність, контраст, колір, вирівнювання густини і контрасту на стиках кількох образів, визначення (допасування) радіометричних характеристик для новоутворених елементарних частинок образу (пікселів) тощо. Такі програми дають змогу стискати і розгортати цифрові зображення, а також подавати їх у таких стандартних форматах, з якими можуть оперувати інші програми, передусім CAD-програми.

Програмні продукти, що використовуються у цифрових фотограмметричних станціях, є доволі різноманітними, і їхня наявність (відсутність) залежить від фірми-виробника. Безперечно, що розширення програмних засобів є неперервним. Більшість фірм намагаються зробити пакет універсальним, застосовуючи модульний принцип нарощування програм. Іноді відчувається певна орієнтація на оброблення зображень (знімків) конкретного типу (радіолокаційних, сканерних, кадрових, телевізійних тощо). До найпотужніших пакетів можна зарахувати розробки фірм LH-Systems (Швейцарія) та Intergraph (США).

Які головні завдання тут виникають? Це розширення можливостей програмних засобів, надання їм універсальності стосовно опрацювання зображень, отриманих з різних сенсорів. Інше завдання – це створення програмних засобів, що даватимуть змогу автоматично виконувати вимірювальні фотограмметричні операції (пошук стандартних зображень, пошук зв'язкових точок, пошук спільних точок у міжмаршрутному перекритті тощо). Окремою великою проблемою є автоматизація інтерпретації зображень, що колись було відомо як “автоматизація дешифрування знімків”. Ця проблема досі не вирішена, і можливо, з появою

новітніх систем “штучного інтелекту” ми наблизимось до її хоча б часткового вирішення.

Комп’ютерна техніка

Це насамперед сам комп’ютер, що характеризується найважливішими параметрами: об’єми зовнішньої та внутрішньої пам’яті, швидкодія, розміри та площинність екрана, можливість працювати з графікою, наявність широкої гами периферійних пристроїв (система стереоспостереження, друкарські пристрої, засоби створення мережевих систем, плотери великих форматів та ін.). Вимоги до технічних засобів, як і рекомендації до потрібних операційних систем, найчастіше подає виробник цифрових фотограмметричних станцій.

Відомо, що кожні два–три роки потужність комп’ютерів істотно зростає. Наприклад, у пресі з’явилися повідомлення, що на початку 2005 р. в Японії розроблено зовнішню пам’ять, яка перевищує в 10 000 разів можливості сучасних “твердих” дисків. Зрозуміло, що загальний науково-технічний поступ у цій сфері зумовлений розквітом як фундаментальних досліджень у галузі фізики, так і практичними здобутками у сфері мікроелектроніки. На щастя, цей процес має позитивну тенденцію, а це означає неминуче зростання можливостей цифрової фотограмметрії.

Цифрова фотографія та знімальні системи

Цифрова фотографія стрімко увірвалась в нашу діяльність, і її аматорське, професійне та наукове застосування невинно зростає. У фотограмметрії це уможливилось завдяки появі на ринку лінійок та матриць ПЗЗ з високою роздільною здатністю.

Порівняно з аматорськими цифровими камерами фотограмметрія висуває значно вищі вимоги до цифрових знімальних систем. Вони зводяться до такого:

- оптика таких систем повинна бути дуже високої якості, практично “бездисторсійною”;
- сенсори типу ПЗЗ повинні передавати (фіксувати) образ з високою роздільною здатністю та якісними радіометричними характеристиками;
- бажано (але не обов’язково), щоб одномоментно така система давала змогу отримувати мультиспектральний образ;
- такі системи повинні мати блоки зовнішньої пам’яті для запису багатьох знімків, обсягом від сотень до тисяч гігабайтів;
- у таких системах повинні бути GPS-приймачі, що синхронно працюють зі знімальною камерою та дають змогу фіксувати просторові координати центрів проєкцій у момент знімання, а також інерціально-навігаційні системи (INS) для фіксації кутів нахилу камери у момент знімання.

Сьогодні лише кілька фірм (Швейцарія, Німеччина – США, Австрія, Україна) продукують такі знімальні системи. Найвідомішими та технічно досконалими

(відповідно до тільки що описаних вимог) є системи ADS40 (Airborne Digital Sensor) виробництва швейцарської фірми LH-Systems та Німецького центру DZLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt), а також DMC 2001 (Digital Modular Camera) виробництва фірми Z/I Imaging. В україномовній літературі дані про ці системи можна знайти в підручнику [4].

Принципова відмінність між цими двома системами полягає в тому, що в DMC використовується ПЗЗ-матриця (що дає змогу класифікувати отримане зображення як таке, що є аналогом аерофотознімка – центральної проекції). Натомість у системі ADS40 використано ПЗЗ-лінійки, і тому тільки кожний рядок окремо можна вважати центральною проекцією.

Забезпечуючи високу якість отримання цифрового зображення, системи такого класу поки що є доволі дорогими. І це є фактором, що гальмує широке впровадження їх у практику, бо не кожна фірма середнього достатку може придбати апаратуру за 1,5 млн. доларів.

Проте широке застосування систем такого типу є перспективним. Вже простежується тенденція до зниження вартості як за рахунок здешевлення базових компонентів (ПЗЗ-сенсор, програмні продукти, GPS, INS тощо), так і завдяки появі конкурентоспроможних пропозицій від інших виробників (з України, Австрії та ін.).

Сенсори та дистанційне зондування

У дистанційному зондуванні, коли йдеться про дослідження великих територій, отримання даних з невисокою точністю, зате оперативно, надійно і недорого, використовують апаратуру, що сприймає випромінювання в інших діапазонах, аніж у фотографії. Тоді і сенсори відповідно налаштовані на приймання певних сигналів.

Нижче подаємо характеристики діапазонів електромагнітного випромінювання та відповідних типів апаратури, що дає змогу реєструвати такі хвилі :

- видиме світло, 400–700 нм (нанометрів) – фотографія;
- ближнє інфрачервоне світло, 700–1500 нм – фотографія;
- середнє і дальнє інфрачервоне випромінювання, 1500 нм – 1 мм – як приклад: тепловізор;
- мікрохвилі, 0,1 см – 30 см – як приклад: мікрохвильовий радіометр;
- радіохвилі, 7,5 мм – 1 м – як приклад: радар $\lambda=2,5$ см;
- радіохвилі, 10 см – 10 км – як приклад: радар бокового огляду.

Закономірним є те, що зі збільшенням довжини хвилі точність визначення місцезнаходження об'єкта знижується. Проте у космічній фотограмметрії це не є перешкодою, бо йдеться не про карти великих масштабів, а про інтерпретацію та визначення координат об'єктів та явищ відповідно до вимог, співзвучних з точністю географічних карт.

Нові технологічні рішення завжди пов'язані з новою апаратурою. Саме до цього напрямку можна зарахувати радарну інтерферометрію. Радар, встановлений на супутнику, надсилає в мікрохвильовому діапазоні потужні короткотривалі імпульси (а для них атмосфера Землі, хмари або задимленість – не перешкоди) та приймає відбиті від поверхні імпульси. Утворюється голограма, яка після спеціального комп'ютерного опрацювання дає видиме зображення. У лютому 2003 р. космічний корабель Endeavour (США) відзняв 94,5 % поверхні Землі. Геометрична точність в плані 20 м, по висоті 16 м, а роздільна здатність становить 30 м. Детальніші відомості про цей перспективний напрям подано у п. 5.2.4.

Такий, на перший погляд, контраст між фотограмметрією та дистанційним зондуванням в останні роки відчутно стирається. Зростає взаємна зацікавленість фахівців обох напрямків, оскільки напрямки космічної фотограмметрії і ДЗ зближаються та взаємно доповнюються. Ця позитивна тенденція, безперечно, буде посилюватись і розвиватись.

Лазерне сканування об'єкта

Лазерне сканування об'єкта дає змогу отримати його просторову модель у вигляді густої сітки точок з визначеними просторовими координатами.

Сьогодні реалізовано декілька типів лазерних сканерів, які встановлюють на літаку (LIDAR – Light Detection And Ranging) або ж на землі (наприклад, сканер CYRAX 2500, концерн Leica Geosystems).

З літератури відомо, що існують два види лазерних систем, які відрізняються геометричною схемою визначення віддалі. У першому випадку віддаль обчислюють, визначаючи час проходження сигналу до об'єкта і назад, або ж фазовим методом – порівнянням фаз висланого та прийнятого сигналів.

У другому випадку віддаль отримують з трикутника, утвореного точкою розташування відхиляючого дзеркала лазерного променя, точкою на поверхні об'єкта та оптичним центром приладу, встановленого на певній віддалі від об'єкта. Це так званий “триангуляційний” метод, і порівняно з попереднім у ньому точність визначення віддалі понижується пропорційно до квадрата віддалі “прилад–об'єкт”.

Надзвичайно великою перевагою літакового лазерного методу над фотограмметричним методом побудови цифрової моделі рельєфу (ЦМР) є висока швидкість сканування (від 5000 до 100000 Гц) та повна автоматизація отримання просторових координат точок об'єкта під час комп'ютерного опрацювання.

Є й певні недоліки такого способу побудови цифрової моделі об'єкта. Лазерний промінь може відбиватись не від поверхні Землі, а від об'єктів на ній (дерева, будинки, автомобілі тощо); тому таку реальну ЦМР треба “почистити”, щоб отримати модель поверхні Землі. Потужність лазера має певні параметри; тому максимальна висота польоту є обмеженою і залежить фактично від цього параметра. На краях об'єкта відбиття променя не є чітким, тому відбитих сигналів буде кілька, що сприймається як розмитість об'єкта. У таких умовах точність визначення координат є гіршою.

Лазерна в'язка (пучок) у разі проектування на об'єкт стає плямою, розмір якої залежить від віддалі "прилад-об'єкт". Чим більша віддаль, тим більша пляма на об'єкті та нижча точність позиціонування.

Одним з типових літакових сканерів є канадський сканер ALTM 1225 (Airborne Laser Terrain Mapper) фірми Optech. Кут сканування (перпендикулярно до лінії польоту) – 20°, згенерована частота сигналу 25000 Гц (25000 вимірів за 1 секунду), діапазон висоти польоту від 300 до 2000 м.

Лазерна пляма при висоті польоту 1000 м становить 25 см, а точність побудови ЦМР становить 15 см. Якщо вибрати для опрацювання останній відбитий сигнал, то отримаємо ЦМР поверхні землі, якщо перший – то одержимо висоти дерев, будинків тощо.

Що стосується наземних лазерних систем, то станом на 2006 рік практичними дослідженнями встановлено, що одним з кращих приладів є згаданий вище Сугах 2500: при віддалі до об'єкта від 10 м до 50 м точність визначення координат становить 0,5 мм.

Детальніші відомості подано у п. 5.2.2 та 5.2.3.

Геоінформаційні системи (ГІС) і технології

Вони теж докорінно змінили погляд на фотограмметрію. Відомо, що в ГІС оперують з метричними, графічними та описовими даними. Отож і метрику, і графіку (образ) для ГІС-технологій доволі ефективно поставляє фотограмметрія. І безперечно, що оскільки головним інструментом для ГІС є комп'ютер, то необхідно мати цифрове зображення.

Конкретні приклади використання фотограмметричної інформації подано у обширній літературі з ГІС.

Збирання та опрацювання даних

Ці процеси в цифровій фотограмметрії тісно пов'язані та орієнтуються на конкретного споживача. Тому те, що показано на рис. 1.2 під назвою "застосування", треба трактувати як "систему комунікації" між цифровою фотограмметрією та конкретними користувачами. Спектр такої комунікації дуже широкий.

У картографії (зокрема і у цифровій картографії) використовується топографічна і спеціальна інформація у цифровому вигляді, що є основою для створення топографічних і тематичних карт.

Для геоінформаційних систем вихідною є інформація, зібрана під час фотограмметричного опрацювання зображень, у вигляді тематичних шарів (наприклад, гідрографія, рельєф, рослинний покрив, інженерні споруди тощо).

Для розв'язання управлінських задач залежно від їхнього змісту можна використовувати цифрові ортофотокарти, цифрові схеми, просторові моделі поверхні тощо.

Моніторингові задачі займають все важливіше місце в діяльності суспільства. Такі природні катаклізми, як землетруси, повені, зсуви тощо, перебувають під постійним спостереженням спеціалістів. А для них і карти, і зображення на екрані монітора, і просторові моделі є надзвичайно корисним матеріалом, причому не тільки для візуальної оцінки. У моніторингові задачі все активніше проникають методи математичного опрацювання, а тут без дискретних просторових моделей не обійтися. Тому цифрова фотограмметрія є незамінним інструментом для отримання таких даних.

Прикладне застосування

Таке застосування цифрової фотограмметрії ввібрало в себе усі попередні досягнення класичної фотограмметрії з одного боку, а з іншого – відкрило нові можливості як з технічного погляду, так і з інформаційного.

Коли говоримо про прикладне застосування, то маємо на увазі багато різних галузей науки і народного господарства. Вкажемо тут лише на приклади. З 50-х років ХХ століття існує напрям, що має назву “архітектурна фотограмметрія”. Засобами фотограмметричного опрацювання зображень розв’язують задачі реставрації, реконструкції, архівації споруд, інтер’єрів тощо, що мають культурну та інженерну цінність для суспільства. Цифрова фотограмметрія, що оперує з цифровими образами та просторовими моделями, підняла класику на новий рівень, бо застосування комп’ютерного опрацювання 3D-моделей архітекторами, будівельниками, істориками, археологами дало змогу дуже ефективно розв’язувати їхні задачі.

Інший приклад стосується нашого досвіду з використання цифрової фотограмметрії для дослідження утворення льодовиків в Антарктиді. Застосування цифрових образів дало змогу будувати засобами цифрової фотограмметрії оперативні карти берегової лінії на островах та материковій частині, а відтак прогнозувати зміни у льодовій ситуації цієї суворої, але привабливої частини нашої Землі.

Висновок

Цифрова фотограмметрія використовує новітні досягнення комп’ютерних наук, геоінформатики, розбудови нових технічних засобів дистанційного зондування, що забезпечує її подальший розквіт та широке практичне застосування.

1.2. Коротка історична довідка

Фотограмметрія – наукова дисципліна, що динамічно розвивається і надзвичайно легко вбирає в себе найновіші досягнення науки і техніки. Доказом цього є аналіз пройденого нею шляху – від перспективних зображень,

намальованих відомими майстрами пензля, до отримання цифрових знімків з космічних апаратів. Такою стрімкою дорогою пройшла фотограмметрія в своєму науково-технічному прогресі, і цей поступ є невинним, бо немає перепон творчому злету людського розуму та фантазії.

Спробуємо визначити найвагоміші віхи у розвитку фотограмметрії.

ЕТАП 1. Вивчення законів перспективи та використання їх у мистецтві і топографії.

Ще до зародження фотограмметрії видатні художники знали про закони перспективи та використовували їх для творіння своїх шедеврів; це насамперед Леонардо да Вінчі та Альбрехт Дюрер. У 1725 р. А. Carreler (Швейцарія) створив дві панорамні картини “Перспективи”, а використовуючи щось подібне до прямої фотограмметричної засічки, отримав карту Пілати (Pilatus). Вже тоді він зазначав, що такий метод вдесьтеро швидший від топографічного знімання. Трохи пізніше до справи взявся швейцарський математик І.Н. Lambert, який опублікував у Цюриху в 1759 р. працю “Вільна перспектива”. У ній він розвинув теорію перспективи та показав, як можна з перспективних зображень відновити форму об’єкта.

У 1791–1793 рр. Beautems-Beauprè викреслює абрис острова Vera Cruz, а з них створює карту.

М. Ломоносов (1764 р.) в “Примерной инструкции отправляющимся обсерваторам для определения астрономическими наблюдениями долготы и широты нужнейших мест для географии Российского государства” рекомендує використовувати камеру-обскуру та виконувати перспективні зарисовки “в городах, где учинятся наблюдения”.

ЕТАП 2. Виникнення фотографії та отримання перших фотограмметричних наземних та повітряних знімків.

1839 рік – це винахід фотографії французами Ніерсе і Дагьє та публікація про це Arago. Вже не рисунки, а фотознімки є джерелом топографічної інформації. Більшість дослідників вважають, що зародилась фотограмметрія у Франції: там полковник А. Lossedat опублікував свою фундаментальну працю “Метротопографія”, де виклав спосіб фотограмметричних засічок (1859 р.), який сам же втілював у 1864–1868 рр. у Франції під час топографічного знімання на площі близько 72 тис. гектарів. Незалежно від нього в Німеччині А. Maydenbauer застосовував цю теорію для вивчення та обмірів архітектурних об’єктів.

Вже тоді дослідники зрозуміли, що чим складніші у сенсі доступності об’єкти, тим ефективнішим є метод фотограмметричних засічок. Кінець XIX століття відзначається створенням фототеодоліта (Ротто, Італія, 1865; Корре, Німеччина, 1896), що знаменувало інструментальне розв’язання засічок. Ефективність методу в гірських районах одразу стала відчутною; були здійснені значні роботи з картографування гір: в Італії – Ferrero і Paganini, у Німеччині – W. Jordan (1878 р.), у Канаді – Deville, в Австрії – Віденський військово-географічний

інститут. У 1888 р. німецький професор S. Finsterwalder виконує знімання льодовиків фотограмметричним методом.

Перші фотографії з аеростата були отримані в 1858 р. паризьким фотографом F. Nadar. Пізніше (1886 р.) А. Кованько фотографує з повітряної кулі гирло Неви.

Варто особливо зазначити, що на цьому історичному етапі йшлося лише про поодинокі знімки, тобто про фотограмметрію у вузькому розумінні, а не про стереофотограмметрію.

У 1892 р. Штольц відкрив принцип вимірювальної марки, яку можна суміщати з будь-якою точкою знімка.

У цей період розвиваються теоретичні основи фотограмметрії, формується технічна база – знімальна апаратура (фототеодоліти, аерофотокамери), носії апаратури (аеростати, дирижаблі, повітряні кулі), виконуються конкретні інженерні роботи.

ЕТАП 3. Відкриття стереоскопічного принципу вимірювань, розвиток аерофотознімання, створення оптико-механічної бази для опрацювання фотознімків.

У 1901 р. С. Pulfrich запропонував новий метод фотограмметричних вимірів, що ґрунтується на стереоскопічному розгляданні пари знімків.

Сконструйований ним стереокомпаратор повністю усунув труднощі ідентифікації однойменних точок об'єкта на лівому та правому знімках. Точність стереофотограмметричних вимірів була доведена до 0.01 мм. Це був дуже важливий крок для розвитку фотограмметричних технологій, а стереокомпаратор впродовж майже сотні років домінує як основний прилад аналітичної фотограмметрії.

Через істотні складнощі з обчисленнями на практиці найчастіше використовували нормальний випадок знімання, бо тоді обчислення є найпростішими. Щоб уникнути такого обмеження, на початку XX століття починають з'являтися стереофотограмметричні прилади оптичного, механічного або оптико-механічного типу, які дають змогу розв'язувати фотограмметричні задачі за допомогою механічних пристроїв. 1908 рік – створено фірмою Роста (Відень) стереоавтограф – прилад для опрацювання фототеодолітних знімків. 1911 рік – фірма Zeiss (Німеччина) виготовляє свій прилад, значно досконаліший та високотехнологічний. Ці роботи стали фундаментом для створення величезної гами стереоприладів для опрацювання аерофотознімків та фототеодолітних знімків з метою побудови топографічних карт.

Розвиток авіації зумовив появу нового ефективного способу отримання інформації про земну поверхню – аерофотознімання та методу опрацювання знімків – аерофотограмметрії. У роки Першої світової війни аерофотознімання використовується для військових потреб. У літературі є згадка про фотографування з літака 1 листопада 1914 р. росіянами оточеного Перемишля.

Цей етап, аж до Другої світової війни, характеризується величезним розмахом теоретичних досліджень, появою нових приладів (це вплив точної механіки та оптики), виконанням у різних країнах Європи значних за обсягом практичних робіт. Наведемо лише деякі факти.

1883 р. – G. Hauck створює теорію побудови об'єкта за перспективними зображеннями та вводить поняття kern-точки.

1898 р. – Scheimpflug (Австрія) висуває ідею подвійного оптичного проектування, що пізніше лягла в основу універсальних стереофотограмметричних приладів.

1903 р. – S. Finsterwalder розділяє задачу побудови та орієнтації моделі об'єкта на дві: взаємне орієнтування проектувальних в'язок променів та побудова моделі; зовнішнє орієнтування просторової моделі.

1897 – 1911 рр. – Scheimpflug сформулював оптичні та геометричні умови фототрансформування.

1922 р. – виготовлено перший стереофотограмметричний прилад універсального типу – автограф Гугерсгоффа.

1931 р. – в СРСР М. Русінов сконструював ширококутний аерооб'єктив Ліар (кут поля зору 100°), а пізніше об'єктив Руссар (кут 122°), що значно розширило захоплення території на один кадр аерофотознімка.

1935 р. – фірмою Zeiss створено універсальний прилад оптичного типу аеропроектор-мультиплекс – з багатьма проектувальними камерами (3, 6, 9, 12 або 24), що давало змогу відтворювати модель території у межах аерознімального маршруту.

Провідними фірмами в світі з виготовлення фотограмметричних приладів на цьому етапі були Zeiss (Німеччина) та Wild (Швейцарія).

У 30-х роках в СРСР розвивається інший напрямок фотограмметричного картографування – диференційований спосіб складання карт. Контурну частину карти отримували на фототрансформаторі, а рельєф рисували на контактних знімках на простому і дешевому приладі – топографічному стереометрі, автором якого був проф. Ф. Дробишев. Потім за допомогою оптичного проектора горизонталі з контактних відбитків переносили на фотоплан. Розробниками цього методу були Ф. Дробишев, М. Коншин та Г. Романовський.

У ці роки доволі активно здійснюється підготовка інженерів та техніків. Серед відомих вищих навчальних закладів світу вагомі здобутки мала Львівська політехніка, в якій працювали польські професори К. Вайгель, Е. Вільчківіч та інші. У Радянському Союзі (Москва та Ленінград) працювала велика група науковців та професорів – Н. Алексапольський, Н. Келль, Ф. Дробишев, В. Дейнеко, М. Коншин, Г. Романовський, М. Русінов та багато інших.

У повоєнні роки в усьому світі фотограмметричний метод картографування територій став чи не найголовнішим завдяки своїй об'єктивності, швидкості та істотному скороченню польових робіт.

ЕТАП 4. Фотограмметрія стає не тільки наземною та аеро-, але й космічною фотограмметрією.

Із запуском першого супутника Землі 4 жовтня 1957 р. (СРСР) настав новий етап в історії фотограмметрії: опрацювання зображень, отриманих з космічних апаратів.

Одним з найбільших досягнень було фотографування зворотного боку Місяця 7 жовтня 1959 р. з автоматичної станції “Луна-3” та створення карти цієї невидимої з Землі поверхні.

Новою сторінкою не тільки у фотограмметрії, але й у знаннях людства було радіолокаційне знімання поверхні Венери двома станціями: “Венера-15” (2 червня 1983 р.) та “Венера-16” (7 червня 1983 р.). Подальше фотограмметричне опрацювання дало надзвичайно цікавий та унікальний продукт – картографічний матеріал поверхні Венери, зокрема фотоплани на окремі її ділянки. Вперше в історії людства можна було побачити, як виглядає поверхня загадкової планети, недоступної для візуальних телескопічних спостережень із Землі. Один із співавторів цих досліджень проф. Ю. Тюфлін (Москва) отримав найвищу нагороду Американського фотограмметричного товариства – Золоту медаль Брока (Відень, 1996).

ЕТАП 5. Перші спроби автоматизації фотограмметричних вимірювань. Бурхливий розквіт аналітичної фотограмметрії, зокрема аналітичної фототріангуляції.

Вчені та практики постійно прагнули до того, щоб знімки стереоскопічно міряла не людина, а автоматичний пристрій. Перші спроби використати фотоелектричний ефект для такої автоматизації належать проф. А. Скірідову та датуються 1937 р. Але лише повоєнний розвиток електронної техніки дав змогу у 1958 р. Г.Л. Хаброу (Канада) створити прилад – стереомат. Перша модель була виготовлена на базі оптичного проектора, а пізніші моделі – із застосуванням базового універсального стереофотограмметричного приладу – фотокартографа Nistri (Італія). У моделі приладу А-2000, яку випускала фірма Wild (Швейцарія), використано Авіограф В8 Вільда. У стереоматі оптичні щільності перетворювались на електричні сигнали, а далі їх аналізували на корельованість: ті дві точки вважаються ідентичними, для яких коефіцієнт кореляції є максимальним.

Проте тоді цей напрямок через недостатні технічні спроможності електронних пристроїв не набув широкого застосування. Натомість з середини 60-х років ХХ ст. потужно розвивається аналітична фотограмметрія, бо у той час вже функціонували електронно-обчислювальні машини. З одного боку, провідні фірми світу продукують аналітичні автографи (по суті, це поєднання стереокомпаратора з обчислювальною машиною), а з іншого боку – розвивається теорія аналітичної фототріангуляції як методу згущення опорної планово-висотної мережі з використанням фотознімків. Створюється програмне забезпечення для побудови мереж фототріангуляції. Перший аналітичний автограф був

запропонований у Канаді Helava, який у той час працював у фотограмметричному відділі Канадського дослідницького центру. Керував цим відділом доктор Теодор Блахут, якому належить багато оригінальних ідей та конкретних реалізацій. У 60-ті роки ХХ ст. Центр був чи не найпотужнішим науковим фотограмметричним осередком у світі.

У СРСР ведуться активні дослідження з фототріангуляції. У Москві дослідницьким колективом керував проф. А. Лобанов, до нього входили Ф. Лисенко, В. Дубіновський, Р. Овсянніков, М. Булушев та інші. У Львові авторський колектив очолював проф. В. Фінковський, а до складу групи входили О. Дорожинський, Х. Бурштинська, І. Міщенко, В. Мельник, Р. Рудий та інші. Оригінальні дослідження виконали І. Антіпов (Новосибірськ), В. Павлов (Ленінград), І. Куштин (Ростов-на-Дону), В. Сердюков (Київ), С. Могильний (Донецьк).

З-поміж широкої плеяди дослідників фототріангуляції варто виокремити автора фототріангуляції методом в'язок доктора Schmid (США), який першим використав математичну модель колінеарності для знаходження просторових координат точок фототріангуляційної мережі.

ЕТАП 6. На зміну попереднім технологіям прийшла цифрова фотограмметрія.

Коли електронно-обчислювальна техніка почала оперувати неймовірною швидкістю опрацювання величезних масивів даних, то реальністю стало давнє прагнення фотограмметристів максимально перекласти монотонну вимірювальну та обчислювальну роботу на автоматичні пристрої та засоби, домогтись автоматизованого, а ще краще автоматичного виконання фотограмметричних побудов. Саме комп'ютерна техніка відкрила нові горизонти та можливості.

У середині 80-х років ХХ століття з'являються перші варіанти цифрових фотограмметричних станцій (ЦФС), які у сучасних технологіях є основним фотограмметричним засобом, на якому здійснюються фотограмметричні вимірювання та необхідні обчислення. На ЦФС розв'язують всі основні фотограмметричні задачі, що становлять зміст аналітичної фотограмметрії, а також отримують різноманітну продукцію: цифрові ортофотоплани, цифрові фотосхеми (фотомозаїки), каталоги координат точок фототріангуляційних мереж, цифрові моделі місцевості і рельєфу тощо.

Серед найвідоміших фірм, що випускають ЦФС, є такі: Intergraph, Huntsville (США); Leica, Heerbrugg (Швейцарія); Matra (Франція); Zeiss, Oberkochen (Німеччина); Геосистема, Вінниця (Україна).

Становлення та розвиток цифрової фотограмметрії тісно пов'язані з отриманням зображення у цифровій формі: перший спосіб – це сканування як перетворення фотозображення у цифрову форму з використанням фотограмметричного сканера, другий спосіб – це безпосереднє знімання об'єкта цифровою камерою.

Серед фірм, що випускають фотограмметричні сканери, найвідомішими є Leica (Швейцарія), Intergraph (США), Zeiss (Німеччина), Геосистема (Україна).

Випуском малоформатних цифрових камер для аматорських та професійних робіт займаються багато фірм, серед них Kodak, Minolta тощо.

Але ж створити цифрову аерокамеру, яка б замінила аерофотокамеру – завдання непросте. І тому приємною несподіванкою на Міжнародному фотограмметричному Конгресі в Амстердамі (липень, 2000 р.) стала демонстрація таких двох камер: одна з них виготовлена фірмою LH-Systems (Швейцарія), інша – фірмою Z/I Imaging (Німеччина – США). Про них йтиметься в розділі 4.

Сучасний технічний прогрес відкриває подальші широкі можливості для застосування фотограмметрії у дослідженні та картографуванні довкілля.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОТОГРАММЕТРІЇ

2.1. Види проєкцій, в яких отримується зображення

З геометричного погляду знімальні системи, що формують зображення (знімки, образи – це термінологічні синоніми), які застосовують в фотограмметрії, можна поділити на дві групи:

- формування зображення відбувається у межах усього кадру одно-моментно, що відповідає принципам центральної проєкції (рис. 2.1);
- формування зображення відбувається у вигляді смуги, перпендикулярної до напрямку польоту літака чи супутника (носія знімальної апаратури); таке зображення є ортогональною проєкцією у напрямку польоту носія та центральною проєкцією у напрямку, перпендикулярному до траєкторії польоту (рис. 2.2). Іноді таку проєкцію називають ортогонально-центральною проєкцією. Сукупність смуг у сканерній системі дає цілісне неперервне зображення об'єкта (місцевості), який ми знімаємо.

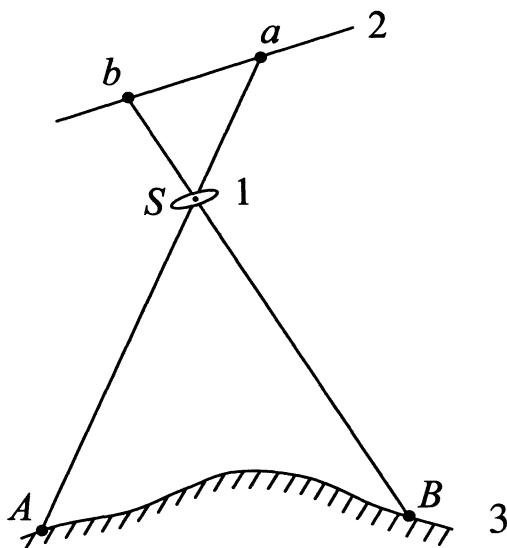


Рис. 2.1. Формування зображення як центральної проєкції:

- 1 – оптична система з центром проєкції S ;
2 – знімок із зображенням точкових об'єктів a, b ;
3 – місцевість з точками A, B

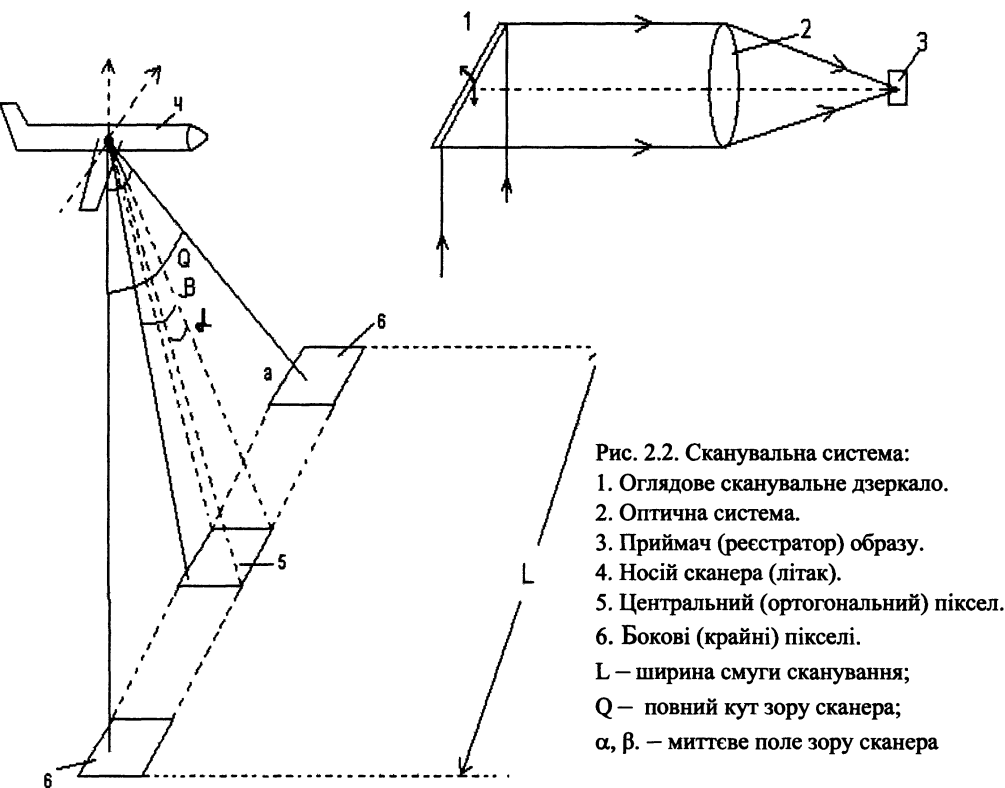


Рис. 2.2. Сканувальна система:

1. Оглядове сканувальне дзеркало.
 2. Оптична система.
 3. Приймач (реєстратор) образу.
 4. Носій сканера (літак).
 5. Центральний (ортогональний) піксел.
 6. Бокові (крайні) пікселі.
- L — ширина смуги сканування;
 Q — повний кут зору сканера;
 α, β — миттєве поле зору сканера

Для опрацювання знімків першого типу найчастіше застосовують теорію центральної проєкції (див. п. 2.2–2.7). Для опрацювання сканерних зображень теж можна застосовувати математичний апарат центральної проєкції, але це стосується опрацювання кожної смуги окремо. Так роблять, опрацьовуючи зображення, отримані цифровим фотограмметричним сканером ADS40 (див. розділ 4). У космічній фотограмметрії, де сканери особливо поширені, через певні спеціальні умови отримання зображення (стабільність польоту, велика висота польоту – віддаль до Землі тощо) часто використовують теоретичні основи проєктивного перетворення. Поняття про це подано у п. 2.8.

2.2. Знімок як центральна проєкція

Знімок (фотознімок) – це зображення об'єкта, отримане за допомогою оптичної системи. Ідеальна оптична система (вільна від спотворень – фізичних вад) буде зображення за правилами геометричної оптики і розглядається як центральна проєкція. Основними елементами центральної проєкції є (рис. 2.3): S – центр проєкції, який ототожнюється з центром об'єктива, площина предмета \bar{E} та площина

зображення \bar{P} , яку ототожнюємо з площиною знімка. Всі промені, які входять у центр проєкції S від точок об'єкта A, B, D, \dots та перетинають площину знімка в точках a, b, d, \dots , називають проєктувальними променями.

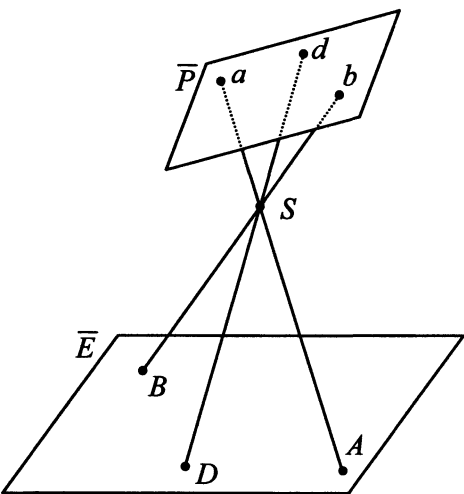


Рис. 2.3. Основні елементи центральної проєкції

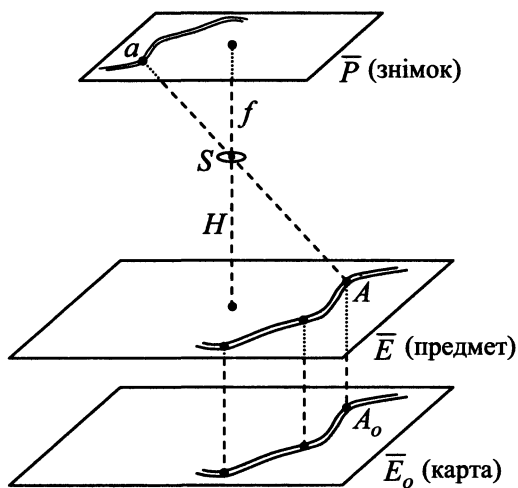


Рис. 2.4. Зображення предмета в ортогональній та центральній проєкціях

В аерофотограмметрії ставиться завдання одержати зі знімка топографічну карту, яка, як відомо, є ортогональною проєкцією об'єкта на площину. Отримання двох різних проєкцій – центральної та ортогональної – показано на рис. 2.4.

Аналізуючи геометричну побудову зображень на площинах знімка і карти, можна зробити висновок, що ці зображення є подібними лише тоді, коли площина знімка є ненахиленою, тобто $\bar{E} // \bar{P}$ (бо \bar{E} завжди паралельна до \bar{E}_o) і об'єкт є плоским, тобто розміщений у площині \bar{E} .

Строго кажучи, зображення на площині \bar{E}_o будується в зменшеному масштабі стосовно предмета на площині \bar{E} , тобто карта – це зменшене в M -разів зображення предмета. Зображення на знімку теж будується у певному масштабі, і якщо площини \bar{E} і \bar{P} паралельні, то з рис. 2.5 маємо формулу для масштабу знімка

$$\frac{1}{m} = \frac{l}{L} = \frac{f}{H}, \quad (2.1)$$

де l – відрізок на знімку; L – відрізок на місцевості; f – фокусна віддаль знімка; H – висота фотографування.

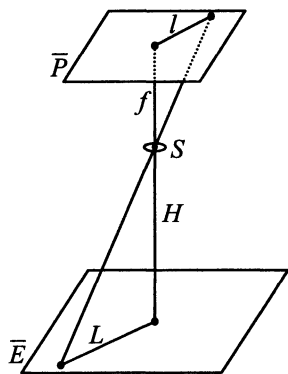


Рис. 2.5. До визначення масштабу горизонтального аерофотознімка

Реально знімок є нахиленим, тому (2.1) матиме значно складніший вигляд.

Тепер розглянемо площини, лінії, точки та їхню побудову у центральній проекції, вважаючи знімок нахиленим, а всі площини, як прийнято в математиці, без обмеження розмірів. Тоді отримаємо елементи центральної проекції, показані на рис. 2.6. Тут:

S – центр проекції; \bar{E} – площина предмета; \bar{P} – площина знімка; \bar{Q} – вертикальна площина, що проходить через S перпендикулярно до \bar{E} ; \bar{G} – горизонтальна площина, що проходить через S паралельно до \bar{E} ; $LHЗ$ – лінія напрямку знімання, одержується на перетині площин \bar{E} і \bar{Q} ; vv – головна вертикаль знімка, одержується на перетині площин \bar{P} і \bar{Q} ; tt – вісь перспективи, пряма на

перетині площин \bar{E} і \bar{P} ; $h_i h_i$ – лінія істинного горизонту, отримана на перетині площин \bar{P} і \bar{G} ; SN – промінь, що виходить з S перпендикулярно до \bar{E} , перетинає знімок в точці n , а площину предмета у точці N ; n, N – точки надиру знімка та місцевості; SO – головний промінь, виходить з S перпендикулярно до \bar{P} ; o, O – головні точки знімка та місцевості; SI – промінь, що виходить з S паралельно до $LHЗ$; I – головна точка сходу знімка; α_o – кут нахилу знімка; Sc – бісектриса кута нахилу в точці S ; c, C – точки нульових спотворень знімка та місцевості; So – фокусна віддаль знімка; SN – висота фотографування (позначається як H); K – точка перетину $LHЗ$ з прямою, паралельною до лінії vv , що виходить з точки S .

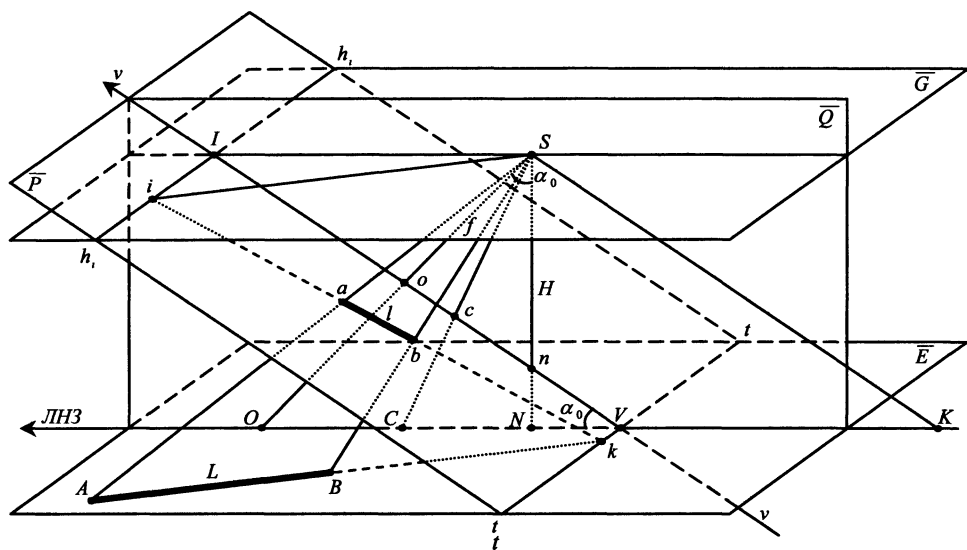


Рис. 2.6. Елементи центральної проекції та побудова зображення на знімку

Віддалі між основними точками центральної проекції можна отримати з рис. 2.6:

$$on = f \operatorname{tg} \alpha_o, \quad (2.2)$$

$$oc = f \operatorname{tg} \frac{\alpha_o}{2}, \quad (2.3)$$

$$oI = f \operatorname{ctg} \alpha_o, \quad (2.4)$$

$$SI = \frac{f}{\sin \alpha_o}, \quad (2.5)$$

$$IV = \frac{H}{\sin \alpha_o}. \quad (2.6)$$

Лінія істинного горизонту $h_i h_i$ є геометричним місцем всіх точок предметної площини, які розташовані в нескінченності. Цю властивість використовують для побудови зображення. Наприклад, побудуємо зображення відрізка AB на знімку. Для цього продовжимо лінію AB до перетину з віссю перспективи tt , отримаємо точку k . Далі проведемо з S пряму, паралельну до AB і на перетині з $h_i h_i$ одержимо точку сходу i ; отже, ik – це зображення прямої L . Для побудови зображень точок A і B на знімку проводимо з S проєктувальні промені, які перетнуть їх відповідно у точках a і b .

Паралелограм $SIVK$ має важливе значення в теорії перспективного перетворення, а сторони SI та IV називають інваріантами перспективи.

2.3. Системи координат, що використовуються у фотограмметрії

2.3.1. Системи координат знімків

Для фіксації координат x, y будь-якої точки, наприклад, точки a , на знімку (рис. 2.7) використовується права прямокутна система координат $o_o x y$.

Якщо виконати паралельне перенесення системи $o_o x y$ у головну точку знімка o (рис. 2.8), то координати точки a будуть такими: $x - x_o, y - y_o$. Якщо початок просторової системи координат розміщений у точці S (рис. 2.8), то точка a матиме координати: $x - x_o, y - y_o, -f$. Якщо точки o_o та o збігаються, що часто використовується у практичній фотограмметрії, то точка a матиме координати: $x, y, -f$. Тут і надалі f – фокусна віддаль знімка.

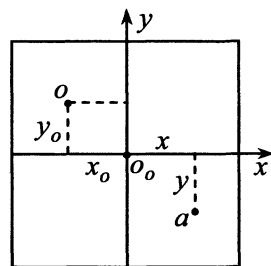


Рис. 2.7. Система координат аерознімка

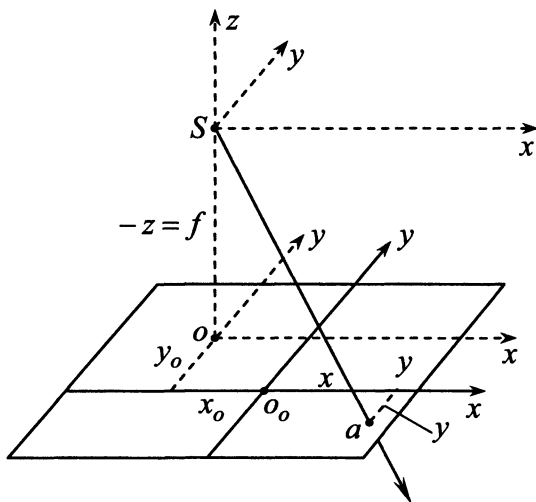


Рис. 2.8. Системи координат аерознімка з початком у точці O_o та у центрі проєкції S

Для наземного знімка використовується права прямокутна система координат $O_o x z$ (рис. 2.9).

Якщо початок координат є в точці O_o , то для точки знімка a маємо координати x, z . Якщо початок координат перенести в головну точку знімка O , то точка a матиме координати $x - x_o, z - z_o$. Просторова права прямокутна система координат $Sxyz$ з початком в центрі проєкції S (рис. 2.10) дає змогу зафіксувати для точки a координати: $x - x_o, y = f, z - z_o$.

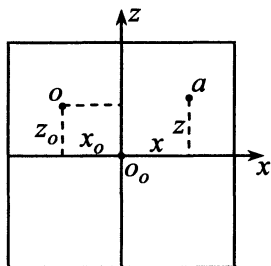


Рис. 2.9. Система координат наземного знімка

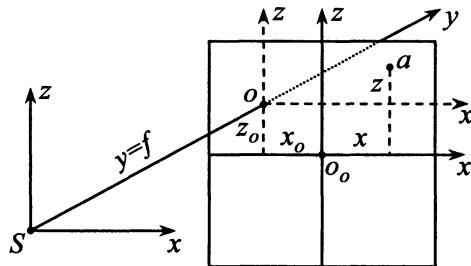


Рис. 2.10. Системи координат наземного знімка з центром у точці O_o та у центрі проєкції S

Якщо ж головна точка знімка o та початок координат o_0 збігаються, то для точки a матимемо координати $x, y = f, z$.

2.3.2. Просторові фотограмметричні системи координат, кути Ейлера та напрямні косинуси

Нехай маємо просторову прямокутну праву систему координат $OXYZ$ (рис. 2.11), в якій точка A має координати X, Y, Z . Також маємо іншу просторову систему координат $SX'Y'Z'$, яка не є паралельною до попередньої системи, і в ній точка A має координати X', Y', Z' . Перехід від однієї системи координат до іншої часто називають задачею “повороту простору” за умови, що початки систем координат O та S збігаються.

Непаралельність цих двох систем координат описується трьома кутами Ейлера α, ω, κ (вперше ввів це поняття відомий математик Леонард Ейлер).

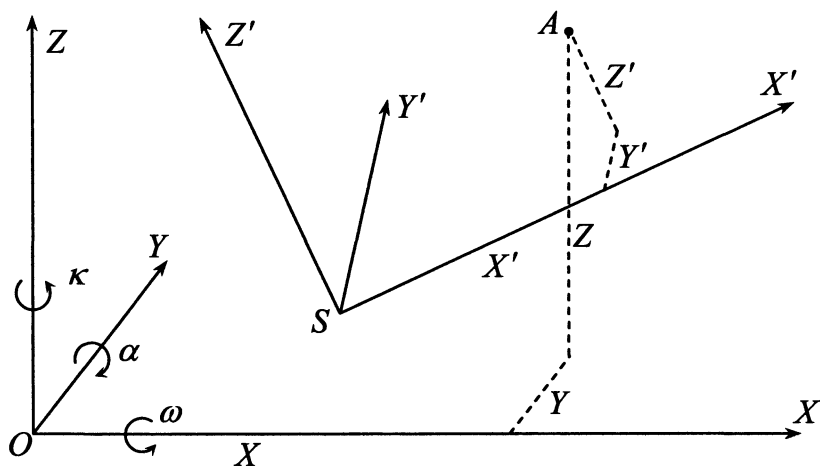


Рис. 2.11. Дві просторові системи координат та задача “поворот простору”

Взаємне розташування координатних осей X, Y, Z та X', Y', Z' описується т. зв. *напрямними косинусами* – дев'ятьма числами, що утворюють таблицю (матрицю) напрямних косинусів (рис. 2.12). Розміщення осі X стосовно осей X', Y', Z' фіксується трійкою чисел a_1, a_2, a_3 ; положення осі Y відносно X', Y', Z' – числами b_1, b_2, b_3 , і розташування осі Z відносно X', Y', Z' – трійкою чисел c_1, c_2, c_3 .

Осі першої системи	Осі другої системи		
	X'	Y'	Z'
X	a_1	a_2	a_3
Y	b_1	b_2	b_3
Z	c_1	c_2	c_3

Рис. 2.12. Таблиця напрямних косинусів

У математиці та аналітичній геометрії подаються такі формули для обчислення напрямних косинусів:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \cos \alpha \cos \kappa - \sin \alpha \sin \omega \sin \kappa ; \\
 a_2 &= -\cos \alpha \sin \kappa - \sin \alpha \sin \omega \cos \kappa ; \\
 a_3 &= -\sin \alpha \cos \omega ; \\
 b_1 &= \cos \omega \sin \kappa ; \\
 b_2 &= \cos \omega \cos \kappa ; \\
 b_3 &= -\sin \omega ; \\
 c_1 &= \sin \alpha \cos \kappa + \cos \alpha \sin \omega \sin \kappa ; \\
 c_2 &= -\sin \alpha \sin \kappa + \cos \alpha \sin \omega \cos \kappa ; \\
 c_3 &= \cos \alpha \cos \omega .
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Якщо відомі напрямні косинуси, то кути Ейлера визначають так:

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \arctg \left(-\frac{a_3}{c_3} \right), \\
 \omega &= \arcsin(-b_3), \kappa = \arctg \frac{b_1}{b_2}.
 \end{aligned}$$

Поняття про напрямні косинуси та поворот простору мають важливе значення у фотограмметрії. Матрицю напрямних косинусів позначають так:

$$A_{\alpha, \omega, \kappa} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}. \tag{2.8}$$

2.3.3. “Геодезична” (абсолютна) та геоцентрична системи координат

Для фіксації положення точки A (передусім точки земної поверхні) застосовують, як правило, прямокутну ліву систему координат $O_G X_G Y_G Z_G$ (рис. 2.13). Ця точка A має координати X_G, Y_G, Z_G . Найчастіше координати X_G, Y_G фіксуються у проекції Гаусса – Крюгера, а Z_G – це висота точки над рівневою поверхнею. Цю систему використовують, якщо кривиною Землі можна знехтувати – невелика територія, знімання з малої висоти польоту літака. В іншому випадку використовують геоцентр

У системі (рис. 2.13) вісь X_G скерована вздовж осевого меридіана, а вісь Y_G збігається з великою піввіссю екваторіального еліпса і спрямована на схід. Висота Z_G визначається відносно поверхні моря; наприклад, для України прийнята Балтійська система висот. Взагалі кажучи, згадана система може бути загальнодержавною системою координат.

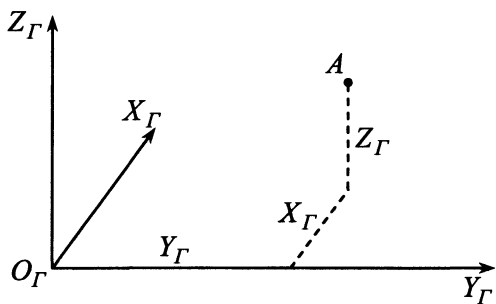
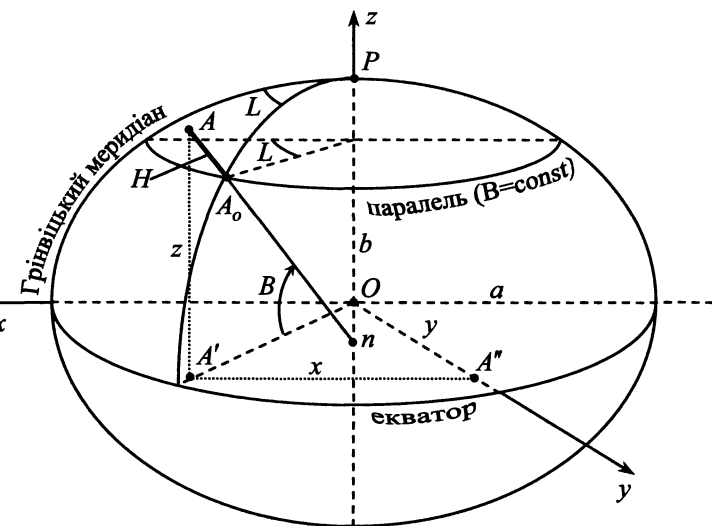


Рис. 2.13. “Геодезична” (абсолютна) система координат



$$\begin{aligned}x &= (N + H) \cos B \cos L, \\y &= (N + H) \cos B \sin L, \\z &= [N(1 - e^2) + H] \sin B, \\N &= \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 B)^{1/2}}, \\e &= \frac{a^2 - b^2}{a^2}.\end{aligned}$$

Рис. 2.14. Геоцентрична система координат, взаємозв'язок геоцентричних та геодезичних координат

Геоцентрична система координат $Oxyz$ показана на рис. 2.14. Математичною моделлю Землі є еліпсоїд з великою піввіссю a та малою піввіссю b , центр якого O збігається з центром маси Землі, а вісь z – з віссю обертання Землі. Тоді P – Північний полюс. Екватор та площина початкового (Грінвіцького) меридіана фіксують вісь x , а вісь y скерована перпендикулярно до площини xz .

Провівши з точки A земної поверхні нормаль Ap до поверхні еліпсоїда, отримаємо на його поверхні точку A_0 . Спроектувавши точку A на площину екватора, одержимо точку A' , подальше проектування на вісь y дає A'' . Тому отримаємо геоцентричні координати $A'A'' = x$, $OA'' = y$, $AA' = z$. Геодезичні координати цієї самої точки згідно з побудовою є такі: B – геодезична широта, L – геодезична довгота, $H = AA_0$ – геодезична висота.

У фотограмметрії найчастіше застосовують таку схему розв'язання задачі: від B, L, H переходять до геоцентричних координат x, y, z , і у системі $Oxyz$ виконують фотограмметричні побудови. Потім виконують зворотний перехід від геоцентричних координат x, y, z до геодезичних координат B, L, H .

Формули прямого та зворотного переходу наведено у підручниках з вищої геодезії.

2.4. Елементи внутрішнього та зовнішнього орієнтування знімка

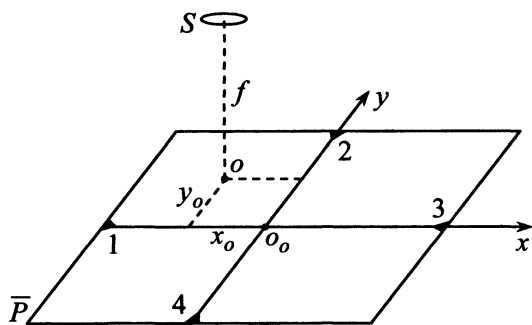


Рис. 2.15. Елементи внутрішнього орієнтування знімка

Елементами внутрішнього орієнтування (ЕВ_нО) називають величини x_o, y_o, f , які однозначно визначають розміщення центра проекції S відносно площини знімка \bar{P} (рис. 2.15).

Головна точка знімка o отримується як перетин площини знімка \bar{P} з перпендикуляром, опущеним з центра проекції S на цю площину. Головна точка o в прийнятій системі координат o_oxy матиме координати x_o, y_o , а довжина перпендикуляра S_o є

фокусною відстанню камери f .

Як зазначалось раніше, доволі часто вважають, що точки o та o_o збігаються.

Для фіксації системи координат на знімку слугують координатні позначки 1, 2, 3, 4. Їх може бути чотири або більше, вони можуть мати вигляд механічних

У фотограмметрії завдання визначення елементів внутрішнього орієнтування називають *калібруванням знімка*. Якщо окрім ЕВ_{нО} визначають параметри дисторсії оптичної системи, то таке завдання називають *повним калібруванням знімка*.

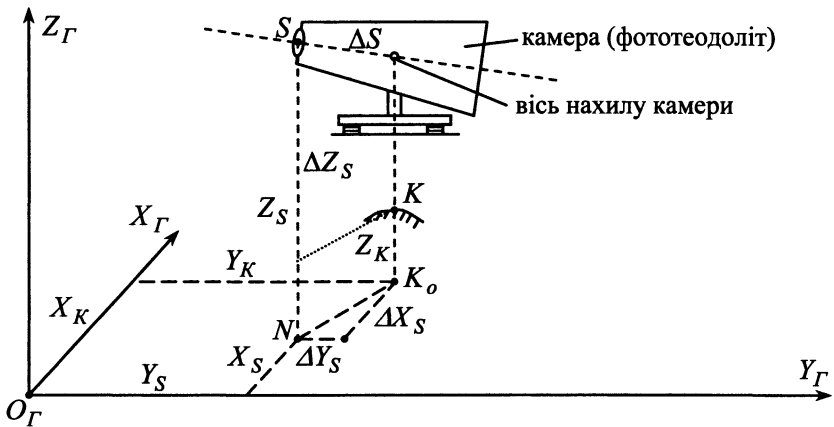


Рис. 2.17. Лінійні елементи зовнішнього орієнтування при наземному фотограмметричному зніманні

У теорії поодинокого знімка використовують кути: α_0 – кут нахилу знімка; A – кут напрямку знімання; κ_0 – кут розвороту знімка.

У наземній фотограмметрії положення центра проєкції S та лінійні ЕЗО – це координати X_S, Y_S, Z_S центра об'єктива S у системі $O_G X_G Y_G Z_G$ (рис. 2.17). Під час виконання практичних робіт фототеодоліт центрують над фотостанцією, яка має координати X_K, Y_K, Z_K , визначені, як правило, з геодезичних вимірів.

Тому перехід від координат фотостанції X_K, Y_K, Z_K до координат X_S, Y_S, Z_S є таким. Перевищення фотокамери (фототеодоліта) ΔZ_S над фотостанцією вимірюють звичайно рулеткою. Величина позацентровості ΔS вимірюється безпосередньо, а її складові $\Delta X_S, \Delta Y_S$ розраховують, але для цього треба знати дирекційний кут лінії NK_0 . Тоді

$$X_S = X_K \pm \Delta X_S, Y_S = Y_K \pm \Delta Y_S, Z_S = Z_K \pm \Delta Z_S.$$

Якщо прийняти, що точки N і K_0 збігаються (наприклад, фотокамера центрується над фотостанцією K), то

$$\Delta X_S = \Delta Y_S = 0, \Delta Z_S = h,$$

де h – перевищення центра об'єктива S над фотостанцією.

Кутові ЕЗО під час наземного знімання можна зафіксувати за допомогою циліндричних рівнів та орієнтирного пристрою, що є істотною відмінністю від аерофотознімання. Точність фіксації здебільшого є доволі високою і достатньою для виконання фотограмметричних завдань.

2.5. Математичні залежності між координатами точок знімка та місцевості

2.5.1. Визначення координат точки об'єкта з використанням одного знімка

Нехай дано знімок \bar{P} з відомими елементами внутрішнього орієнтування x_o, y_o, f , отриманий з центра проєкції S (рис. 2.18). На знімку зобразилась точка a з координатами X', Y', Z' у системі $SX'Y'Z'$. Необхідно знайти координати X, Y, Z точки A у системі $OXYZ$.

Згідно з геометрією побудови зображення вектори r і R' колінеарні, тобто

$$r = kR', \quad (2.9)$$

де k – скаляр (коефіцієнт пропорційності).

Розташування точки A в системі $OXYZ$ визначається вектором R , а центра проєкції S – вектором R_o .

Оскільки

$$R' = R - R_o, \quad (2.10)$$

то підставляючи в (2.9), отримаємо

$$r = k(R - R_o). \quad (2.11)$$

Спочатку допускаємо, що системи XYZ і $X'Y'Z'$ паралельні (дещо пізніше це припущення знімемо).

Спроектуємо вектори (2.11) на осі координат X, Y, Z . Якщо вектори пропорційні, то пропорційні і його компоненти

$$\frac{X'}{X - X_S} = \frac{Y'}{Y - Y_S} = \frac{Z'}{Z - Z_S} \quad (2.12)$$

$$\text{або } X = X_S + (Z - Z_S) \frac{X'}{Z'}, \quad Y = Y_S + (Z - Z_S) \frac{Y'}{Z'}. \quad (2.13)$$

Якщо замість системи $SX'Y'Z'$ взяти паралельну до неї систему координат знімка $Sx(-f)$, тобто коли знімок горизонтальний, то (2.13) запишуться так:

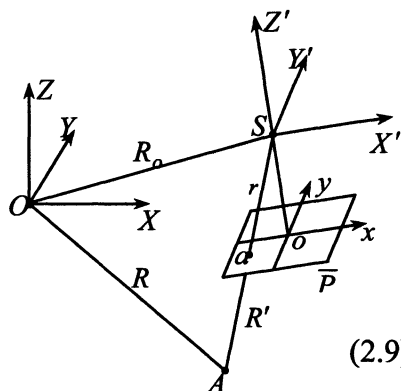


Рис. 2.18. Визначення положення точки об'єкта з одного фотознімка

$$X = X_S - (Z - Z_S) \frac{x - x_o}{f}, \quad Y = Y_S - (Z - Z_S) \frac{y - y_o}{f}. \quad (2.14)$$

На підставі (2.13) та (2.14) доходимо важливого висновку: використовуючи один знімок з відомими елементами внутрішнього орієнтування, можемо визначити тільки планові координати точки об'єкта.

Якщо системи XYZ та $x, y, -f$ не паралельні, тобто коли знімок нахилений, то треба виконати операцію повороту простору і тоді скористатись (2.13):

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = A_{\alpha, \omega, \kappa} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

або

$$\begin{aligned} X' &= a_1 x + a_2 y - a_3 f, \\ Y' &= b_1 x + b_2 y - b_3 f, \\ Z' &= c_1 x + c_2 y - c_3 f. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Тому (2.13) запишуться так:

$$\begin{aligned} X &= X_S + (Z - Z_S) \frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f}, \\ Y &= Y_S + (Z - Z_S) \frac{b_1 x + b_2 y - b_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

2.5.2. Визначення координат точки знімка за відомих координат точки об'єкта

Нехай точка A має відомі координати X, Y, Z у системі $OXYZ$ (рис. 2.18). У системі $SX'YZ'$ позначимо її координати через $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$. Знайдемо залежність між координатами в обох системах, а потім визначимо координати точки a на знімку.

Перехід від системи $OXYZ$ до системи $SX'YZ'$ передбачає дві операції: паралельне перенесення початку координат з точки O в точку S , а також "поворот простору" за допомогою кутів Ейлера α, ω, κ та напрямних косинусів. Отже, отримаємо

$$\begin{bmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{bmatrix} = A_{\alpha, \omega, \kappa} \begin{bmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

де $A_{\alpha,\omega,\kappa}$ – матриця напрямних косинусів

$$A_{\alpha,\omega,\kappa} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

З математики відомо, що матриця $A_{\alpha,\omega,\kappa}$ є матрицею ортогональною, тому транспонована та обернена матриці рівні, тобто

$$A_{\alpha,\omega,\kappa}^T = A_{\alpha,\omega,\kappa}^{-1}. \quad (2.20)$$

Тому з (2.18) маємо

$$\begin{bmatrix} \overline{X} \\ \overline{Y} \\ \overline{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{bmatrix}, \quad (2.21)$$

і

$$\begin{aligned} \overline{X} &= a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S), \\ \overline{Y} &= a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S), \\ \overline{Z} &= a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S). \end{aligned} \quad (2.22)$$

На підставі пропорційності векторів (2.9) та їхніх компонентів маємо

$$\frac{X'}{\overline{X}} = \frac{Y'}{\overline{Y}} = \frac{Z'}{\overline{Z}}, \quad (2.23)$$

або

$$\frac{x - x_o}{\overline{X}} = \frac{y - y_o}{\overline{Z}} = \frac{-f}{\overline{Z}}. \quad (2.24)$$

З урахуванням (2.22) остаточно отримаємо

$$x - x_o = -f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}, \quad (2.25)$$

$$y - y_o = -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)}.$$

Ці рівняння часто називають **рівняннями колінеарності**.

Одержимо тепер формули, що описують взаємозв'язок координат точок знімка та місцевості в деяких окремих випадках.

Для горизонтального знімка $\alpha = \omega = \kappa = 0$, тому матриця напрямних косинусів є одиничною

$$A_{\alpha, \omega, \kappa} = E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Тому формули (2.17) і (2.25) матимуть вигляд при $x_o = 0$, $y_o = 0$, $X_S = Y_S = 0$, $Z_S = -H$:

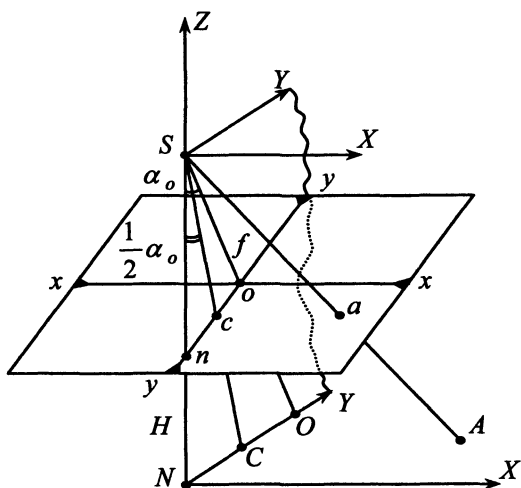


Рис. 2.19. Зображення точок на нахиленому на кут α_o знімку

$$X = H \frac{x}{f}, \quad Y = H \frac{y}{f}, \quad (2.26)$$

$$x = \frac{f}{H} X, \quad y = \frac{f}{H} Y. \quad (2.27)$$

Для нахилоного знімка на кут α_o в площині ZOY (рис. 2.19)

$$\alpha = \kappa = 0, \quad \omega = \alpha_o.$$

Тому напрямні косинуси матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 & a_2 &= 0 & a_3 &= 0 \\ b_1 &= 0 & b_2 &= \cos \alpha_o & b_3 &= -\sin \alpha_o \\ c_1 &= 0 & c_2 &= \sin \alpha_o & c_3 &= \cos \alpha_o. \end{aligned}$$

Тоді (2.17) та (2.25) запишуться так:

$$X = H \frac{x}{f \cos \alpha_o - y \sin \alpha_o}, \quad (2.28)$$

$$Y = H \frac{f \sin \alpha_o + y \cos \alpha_o}{f \cos \alpha_o - y \sin \alpha_o},$$

$$x = f \frac{X}{H \cos \alpha_o + Y \sin \alpha_o}, \quad (2.29)$$

$$y = f \frac{H \sin \alpha_o + Y \cos \alpha_o}{H \cos \alpha_o + Y \sin \alpha_o}.$$

Ці формули отримані для випадку, коли початок координат на знімку розташований у точці o , а на місцевості – у точці N (рис. 2.19).

Початок координат у точках надіру знімка n та місцевості N .

Оскільки $on = -f \operatorname{tg} \alpha_o$, то $x_n = 0$, $y_n = -f \operatorname{tg} \alpha_o$. Виконаємо паралельне перенесення початку координат і підставимо ці значення у (2.28); отримаємо

$$X = H \frac{x}{f \cos \alpha_o - (y - f \operatorname{tg} \alpha_o) \sin \alpha_o},$$

$$Y = H \frac{f \sin \alpha_o + (y - f \operatorname{tg} \alpha_o) \cos \alpha_o}{f \cos \alpha_o - (y - f \operatorname{tg} \alpha_o) \sin \alpha_o}.$$

Після простих перетворень маємо

$$X = H \frac{x \cos \alpha_o}{f - y \sin \alpha_o \cos \alpha_o}, \quad Y = H \frac{y \sin \alpha_o}{f - y \sin \alpha_o \cos \alpha_o}. \quad (2.30)$$

Для (2.29) після перетворень одержимо

$$x = f \frac{X}{H \cos \alpha_o + Y \sin \alpha_o}, \quad (2.31)$$

$$y = f \frac{Y}{(H \cos \alpha_o + Y \sin \alpha_o) \cos \alpha_o}.$$

Початок координат у точках нульових спотворень знімка c та місцевості C .

Оскільки $oc = -f \operatorname{tg} \frac{\alpha_o}{2}$, то $x_c = 0$, $y_c = -f \operatorname{tg} \frac{\alpha_o}{2}$

та

$$NC = H \operatorname{tg} \frac{\alpha_o}{2}, \quad X_c = 0, \quad Y_c = H \operatorname{tg} \frac{\alpha_o}{2}.$$

Після паралельного перенесення точки N в точку C і точки o у точку c отримаємо

$$X = H \frac{x}{f - y \sin \alpha_o}, \quad (2.32)$$

$$Y = H \frac{y}{f - y \sin \alpha_o}.$$

$$\begin{aligned}x &= f \frac{X}{H + Y \sin \alpha_o}, \\y &= f \frac{Y}{H + Y \sin \alpha_o}.\end{aligned}\quad (2.33)$$

Початок координат на знімку у головній точці сходу I , у предметній площині – у точці K (рис. 2.6). Формули мають вигляд

$$\begin{aligned}X &= -H \frac{x}{y \sin \alpha_o}, \\Y &= H \frac{-f}{y \sin^2 \alpha_o}.\end{aligned}\quad (2.34)$$

$$x = f \frac{X}{Y \sin \alpha_o}, \quad y = -f \frac{H}{Y \sin^2 \alpha_o}.\quad (2.35)$$

2.5.3. Залежність між координатами точок горизонтального і нахиленого знімків

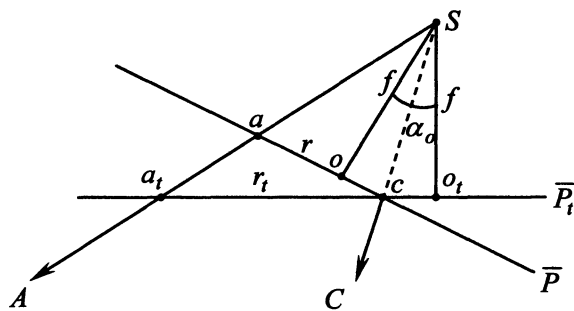


Рис. 2.20. Зображення точки місцевості на нахилому та горизонтальному знімках

Горизонтальним називають знімок, кут нахилу якого дорівнює нулю (рис. 2.8), або ж якщо маємо справу з кутами Ейлера (рис. 2.16), то $\alpha = \omega = \kappa = 0$.

Геометричний зміст задачі показано на рис. 2.20: від нахилоного знімка \bar{P} необхідно перейти до горизонтального \bar{P}_t (тут для простоти показано не площину в просторі, а лише їхні зображення у площині аркуша).

Припустимо, що з центра проєкції S отримано два знімки – горизонтальний \bar{P}_t та нахилений \bar{P} , причому їхні фокусні віддалі однакові. Точка місцевості відповідно на обох знімках має зображення a_t та a . Обидва знімки перетинаються у деякій точці c . Неважко довести, що $\Delta Soc = \Delta So_t c$, бо обидва трикутники прямокутні, мають спільну гіпотенузу Sc та рівні сторони $So = So_t = f$. Тому у цих трикутниках рівні всі відповідні кути, і зокрема

$$\angle oSc = \angle o_tSc = \frac{1}{2} \alpha_o.\quad (2.36)$$

Це означає, що точка c лежить на бісектрисі кута α_o і тому є точкою нульових спотворень (рис. 2.6). З рис. 2.20 видно, що точка C і на нахиленому, і на горизонтальному знімках зображається в тій самій точці c , тобто саме в цій точці зміщення (спотворення) за нахил знімка відсутнє. Звідси і назва точки c – точка нульових спотворень. Для будь-якої іншої точки, наприклад, A , навіть “на око” видно, що $ac \neq a_t c$.

Але розглянемо поставлену задачу переходу від координат точки a нахилоного знімка до координат точки a_t горизонтального знімка.

Використаємо формули (2.12), зважаючи на те, що треба ввести заміну

$$X = x_t, \quad Y = y_t, \quad Z = -f, \quad X_S = Y_S = Z_S = 0. \quad (2.37)$$

Тоді отримаємо

$$\frac{X'}{x_t} = \frac{Y'}{y_t} = \frac{Z'}{-f}. \quad (2.38)$$

“Поворот простору”, тобто перехід від нахилоного знімка до горизонтального за аналогією з (2.16) дає

$$\begin{aligned} X' &= a_1 x + a_2 y - a_3 f, \\ Y' &= b_1 x + b_2 y - b_3 f, \\ Z' &= c_1 x + c_2 y - c_3 f. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Остаточно маємо

$$x_t = -f \frac{a_1 x + a_2 y - a_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f}, \quad y_t = -f \frac{b_1 x + b_2 y - b_3 f}{c_1 x + c_2 y - c_3 f}. \quad (2.40)$$

Якщо координати головної точки знімка o не дорівнюють нулю, то формули (2.40) матимуть вигляд

$$\begin{aligned} x_t &= -f \frac{a_1(x - x_o) + a_2(y - y_o) - a_3 f}{c_1(x - x_o) + c_2(y - y_o) - c_3 f}, \\ y_t &= -f \frac{b_1(x - x_o) + b_2(y - y_o) - b_3 f}{c_1(x - x_o) + c_2(y - y_o) - c_3 f}. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Ці формули свідчать, що для перетворення нахилоного знімка у горизонтальний необхідно знати:

- елементи внутрішнього орієнтування;
- кутові елементи зовнішнього орієнтування знімка.

2.6. Елементи орієнтування пари знімків і геометричної моделі об'єкта

2.6.1. Елементи зовнішнього орієнтування пари знімків

Пара знімків – це два знімки, отримані з двох різних центрів проєкцій (рис. 2.21) у такий спосіб, що і на лівому, і на правому знімках зобразилась та сама частина об'єкта (території). Таку пару ще називають стереопарою, бо розглядаючи знімки під простим приладом – стереоскопом, можна побачити просторову модель об'єкта, тобто відчуті його об'ємність, побачити гори, долини, висоти будинків, дерев. Такі знімки перекриваються між собою, як правило, на 60 % або більше.

Елементи зовнішнього орієнтування (рис. 2.21) – це величини, що визначають розташування лівого і правого центрів проєкцій S_1 та S_2 і відповідних площин лівого \bar{P}_1 та правого \bar{P}_2 знімків у вибраній просторовій системі координат $OXYZ$. Цими елементами (за аналогією з рис. 2.16) є: $X_{S_1}, Y_{S_1}, Z_{S_1}$ – просторові координати лівого центра проєкції S_1 ; $\alpha_1, \omega_1, \kappa_1$ – повздовжній, поперечний кути нахилу лівого знімка \bar{P}_1 та кут його розвороту; $X_{S_2}, Y_{S_2}, Z_{S_2}$ – просторові координати правого центра проєкції S_2 ; $\alpha_2, \omega_2, \kappa_2$ – повздовжній, поперечний кути нахилу правого знімка \bar{P}_2 та кут його розвороту.

Вектор B називають базисом фотографування.

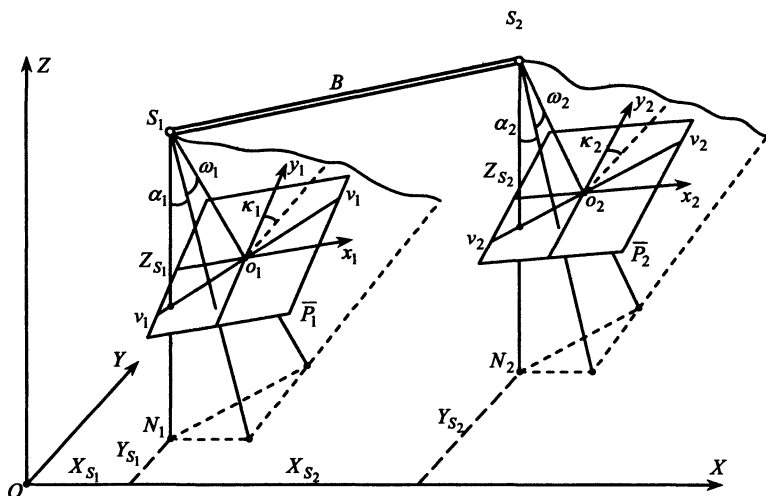


Рис. 2.21. Елементи зовнішнього орієнтування пари знімків

2.6.2. Елементи взаємного орієнтування (ЕВО)

ЕВО – це величини, які фіксують те взаємне положення базису фотографування та пари знімків, яке існувало під час фотографування.

Залежно від вибраної просторової системи координат розрізняють дві найпоширеніші системи ЕВО:

- лінійно-кутову, в якій лівий знімок вважається горизонтальним;
- базисну, в якій базис вважається горизонтальним.

Лінійно-кутова система показана на рис. 2.22. Елементами взаємного орієнтування є:

τ – дирекційний кут базису фотографування;

ν – кут нахилу базису;

$\Delta\alpha$ – поздовжній кут нахилу правого знімка;

$\Delta\omega$ – поперечний кут нахилу правого знімка;

$\Delta\kappa$ – кут розвороту правого знімка.

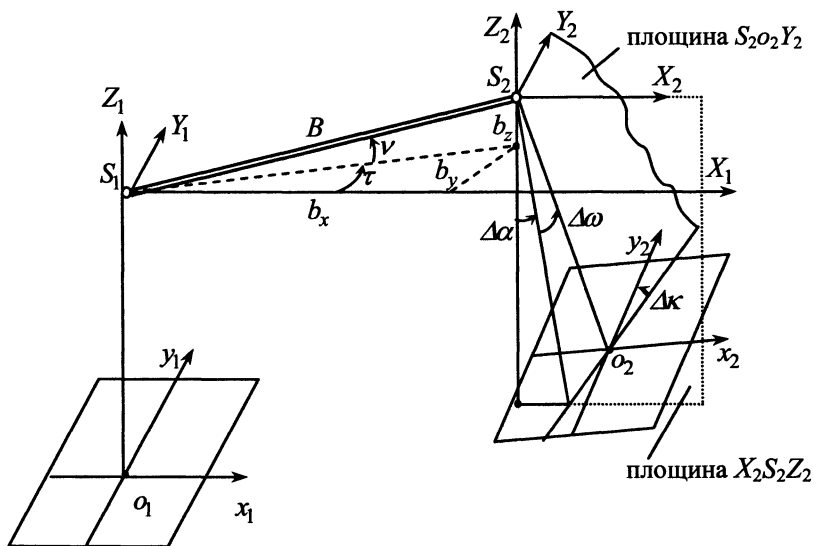


Рис. 2.22. Лінійно-кутова система елементів взаємного орієнтування

Базисна система ЕВО показана на рис. 2.23. Елементами взаємного орієнтування є:

α_n, α_n – поздовжні кути нахилу лівого і правого знімків;

ω_n – поперечний кут нахилу правого знімка;

κ_n, κ_n – кути розвороту лівого і правого знімків.

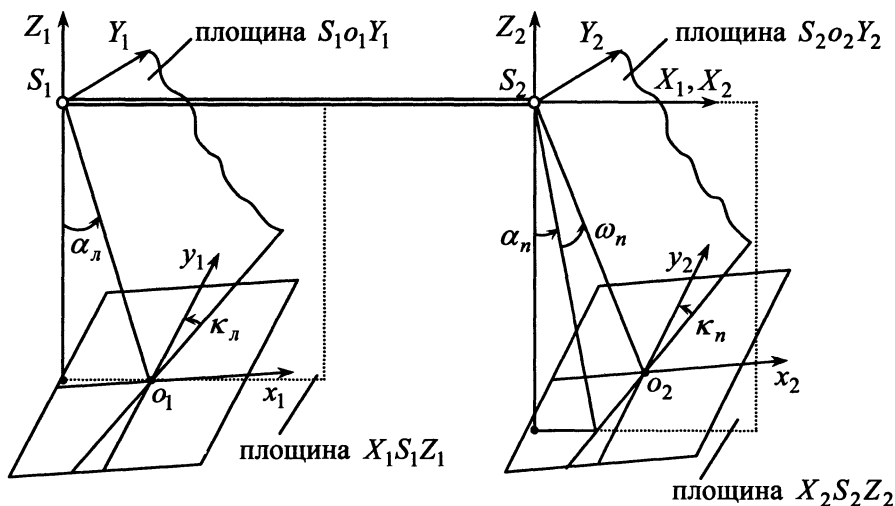


Рис. 2.23. Базисна система елементів взаємного орієнтування

Доречно зауважити, що кут $\Delta\kappa$ в лінійно-кутовій системі та аналогічно кут κ_n у базисній системі не є рівними. Чому? Тому що система $X_2Y_2Z_2$ в першому випадку та система $X_2Y_2Z_2$ в другому випадку не збігаються, отже, площини $S_2o_2Y_2$ в обох випадках є різними.

Правильно відтворене взаємне орієнтування пари знімків на фотограмметричному приладі дає змогу отримати (побудувати) геометричну просторову модель об'єкта, як правило, у довільній фотограмметричній системі координат та у довільному масштабі.

2.6.3. Елементи зовнішнього орієнтування фотограмметричної моделі об'єкта

Побудована внаслідок розв'язання задачі взаємного орієнтування модель об'єкта має невизначене (довільне) положення в абсолютній (геодезичній) системі координат. Масштаб цієї моделі теж довільний, оскільки величина базису проектування S_1S_2 (рис. 2.22 і рис. 2.23) була вибрана довільно.

Нехай $O_3X_3Y_3Z_3$ (рис. 2.24) – деяка зовнішня система координат, яку в західній літературі називають абсолютною системою координат: цій системі відповідає геодезична система координат $O_GX_GY_GZ_G$ з позначенням осей відповідно до прийнятого у п. 2.3.3. Орієнтування моделі M в зовнішній (геодезичній) системі координат визначають такі параметри (рис. 2.24):

$X_{O_\Phi}, Y_{O_\Phi}, Z_{O_\Phi}$ – перенесення початку системи координат $O_\Phi X_\Phi Y_\Phi Z_\Phi$ в початок системи координат $O_3 X_3 Y_3 Z_3$;

$\alpha_o, \omega_o, \kappa_o$ – кути Ейлера, що визначають нахил осей координат двох просторових систем координат;

$1:t$ – масштаб моделі (який після взаємного орієнтування довільний або невідомий), який необхідно визначити або змінити до заданої величини, наприклад, до масштабу карти.

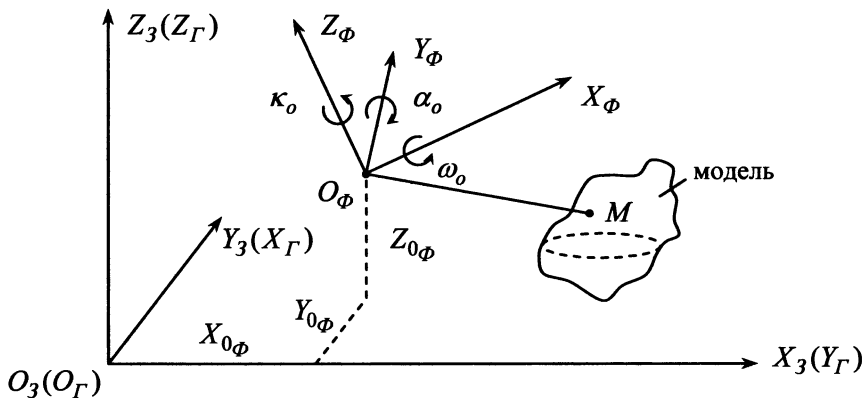


Рис. 2.24. Орієнтування моделі в абсолютній (геодезичній) системі координат

2.7. Аналітичне розв'язання основних фотограмметричних задач

2.7.1. Пряма фотограмметрична засічка

Завдання полягає у визначенні просторових координат точки об'єкта за відомих координат зображень цієї точки на двох знімках (рис. 2.25).

Точка A визначається в системі $SXYZ$ вектором R .

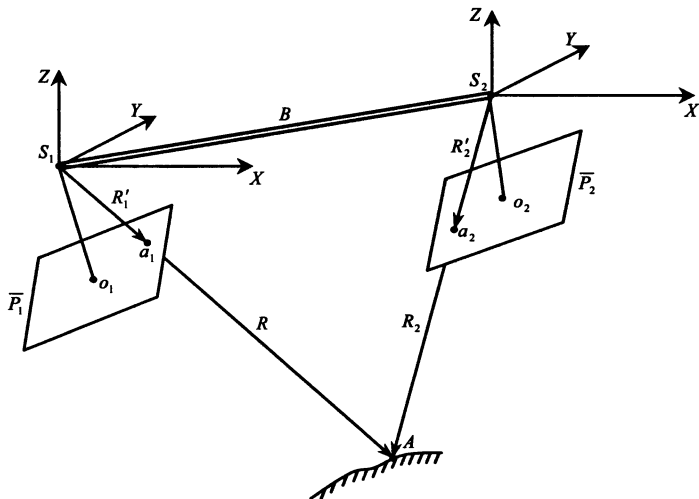


Рис. 2.25. Пряма фотограмметрична засічка

Оскільки вектори R_1' та R колінеарні, то

$$R = NR_1'. \quad (2.42)$$

Вектори R_2 та R_2' теж колінеарні. Їхній векторний добуток дорівнює нулю:

$$R_2 \times R_2' = 0. \quad (2.43)$$

Але

$$R_2 = R - B.$$

Тому

$$(R - B) \times (R_2') = 0,$$

або

$$R \times R_2' - B \times R_2' = 0;$$

з урахуванням (2.42) маємо:

$$NR_1' \times R_2' = B \times R_2'. \quad (2.44)$$

Формули (2.42), (2.44) вперше запропонував проф. Н. Урмаєв [11]. Шлях розв'язання задачі такий. З (2.44) визначають коефіцієнт N , а з (2.42) – шуканий вектор R .

Оскільки нас цікавлять просторові координати точки A , то після проектування векторів на осі координат отримаємо:

$$X = NX_1', \quad Y = NY_1', \quad Z = NZ_1'. \quad (2.45)$$

Використовуючи правило векторного добутку двох векторів при проектуванні їх на осі X, Y, Z , отримаємо:

$$N = \frac{B_y Z_2' - B_z Y_2'}{Y_1' Z_2' - Z_1' Y_2'} = \frac{B_z X_2' - B_x Z_2'}{Z_1' X_2' - X_1' Z_2'} = \frac{B_x Y_2' - B_y X_2'}{X_1' Y_2' - Y_1' X_2'}. \quad (2.46)$$

Якщо на знімках виміряні плоскі прямокутні координати x_1, y_1 на лівому знімку та x_2, y_2 – на правому знімку, то послідовність розв'язання задачі така:

1. Обчислюють напрямні косинуси a_i, b_i, c_i для лівого і правого знімків за кутами (α, ω, κ) лівого та правого знімків за (2.7).

2. Обчислюють для точок лівого і правого знімків просторові координати X', Y', Z' за (2.16).

3. Обчислюють коефіцієнт N за (2.46).

4. Обчислюють просторові координати точки об'єкта (2.45).

Пряма фотограмметрична засічка ідеального випадку знімання розв'язується так.

Якщо знімки \bar{P}_1 та \bar{P}_2 , а також базис B є горизонтальними, матриці напрямних косинусів (2.8) для лівого і правого знімків стають одиничними, а $B_y = B_z = 0$, $B = B_x$.

Вводячи ці спрощення у вищенаведені формули, отримаємо:

$$X = B \frac{x_1}{p}, \quad Y = B \frac{y_1}{p}, \quad Z = -B \frac{f}{p}, \quad (2.47)$$

де x_1, y_1 – плоскі прямокутні координати точки a_1 на лівому знімку, p – поздовжній паралакс ($p = x_1 - x_2$).

2.7.2. Обернена фотограмметрична засічка для одного знімка

Нехай на місцевості задано опорні точки A, B, D з відомими координатами $(X, Y, Z)_{A,B,D}$ (рис. 2.26). Для знімка \bar{P} відомі елементи внутрішнього орієнтування f, x_0, y_0 ; для простоти приймаємо $x_0=y_0=0$. На знімку для зображень a, b, d виміряні плоскі прямокутні координати $(x, y)_{a,b,d}$.

Необхідно знайти елементи зовнішнього орієнтування знімка $X_S, Y_S, Z_S, \alpha, \omega, \kappa$.

Для розв'язання задачі використаємо рівняння колінеарності (2.25), оскільки геометрична суть задачі математично описується цими рівняннями.

Складність розв'язання полягає в тому, що невідомі величини $X_S, Y_S, Z_S, \alpha, \omega, \kappa$ пов'язані з величинами x, y нелінійними залежностями.

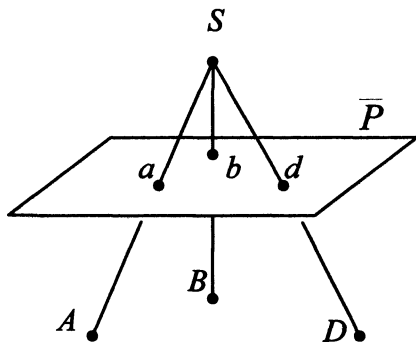


Рис. 2.26. Обернена фотограмметрична засічка

Класичним прийомом розв'язання задачі є приведення нелінійних залежностей до лінійного виду розкладанням у ряд Тейлора, обмежуючись частинними похідними першого порядку.

Перепишемо (2.25) у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} F_x = x &= -f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \\ F_y = y &= -f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \end{aligned} \right\}. \quad (2.48)$$

Розкладання в ряд Тейлора дає:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F_{0x} + \frac{\partial F_x}{\partial X_S} dX_S + \frac{\partial F_x}{\partial Y_S} dY_S + \frac{\partial F_x}{\partial Z_S} dZ_S + \frac{\partial F_x}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial F_x}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial F_x}{\partial \kappa} d\kappa \\ F_y &= F_{0y} + \frac{\partial F_y}{\partial X_S} dX_S + \frac{\partial F_y}{\partial Y_S} dY_S + \frac{\partial F_y}{\partial Z_S} dZ_S + \frac{\partial F_y}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial F_y}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial F_y}{\partial \kappa} d\kappa \end{aligned} \right\}. \quad (2.49)$$

Переходячи від нескінченно малих приростів $dX_S \dots \dots$ до кінцевих $\delta X_S \dots \dots$, позначаючи частинні похідні $\frac{\partial F_x}{\partial X_S} = a_x \dots \dots$, вільні члени $F_{0x} = l_x$, $F_{0y} = l_y$ та допускаючи, що виміряні величини x , y супроводжуються похибками, з рівнянь (2.49) отримаємо рівняння поправок:

$$\left. \begin{aligned} a_x \delta X_S + b_x \delta Y_S + c_x \delta Z_S + d_x \delta \alpha + e_x \delta \omega + f_x \delta \kappa + l_x &= v_x \\ a_y \delta X_S + b_y \delta Y_S + c_y \delta Z_S + d_y \delta \alpha + e_y \delta \omega + f_y \delta \kappa + l_y &= v_y \end{aligned} \right\}. \quad (2.50)$$

Тут
$$a_x = \frac{1}{R}(a_1 f + a_3 x), \quad a_y = \frac{1}{R}(a_2 f + a_3 y),$$

$$b_x = \frac{1}{R}(b_1 f + b_3 x), \quad b_y = \frac{1}{R}(b_2 f + b_3 y),$$

$$c_x = \frac{1}{R}(c_1 f + c_3 x), \quad c_y = \frac{1}{R}(c_2 f + c_3 y),$$

$$d_x = \frac{f}{R}[c_1(X - X_S) - a_1(Z - Z_S)] + \frac{x}{R}[c_3(X - X_S) - a_3(Z - Z_S)],$$

$$e_y = -f \sin \kappa + x \left(\operatorname{tg} \omega + \frac{Y - Y_S}{R \cos \omega} \right), \quad (2.51)$$

$$f_x = y, \quad f_y = -x,$$

$$d_y = \frac{f}{R} [c_2(X - X_S) - a_2(Z - Z_S)] + \frac{y}{R} [c_3(X - X_S) - a_3(Z - Z_S)],$$

$$e_y = -f \cos \kappa + y \left(\operatorname{tg} \omega + \frac{Y - Y_S}{R \cos \omega} \right),$$

$$l_x = F_{0x} - x, \quad l_y = F_{0y} - y,$$

$$R = a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S).$$

Як відомо з математики, застосування (2.49) дає змогу отримати остаточний розв'язок за допомогою послідовних наближень (ітерацій). Рівняння (2.50) записані для однієї точки; якщо ж таких точок декілька, то (2.50) запишеться у вигляді системи рівнянь поправок (у матричному представленні)

$$AX + L = V. \quad (2.52)$$

Тепер до системи (2.52) можна застосувати метод найменших квадратів (МНК).

У такому разі (застосування МНК) послідовність розв'язання задачі така.

1. Задаються наближеними значеннями елементів зовнішнього орієнтування:

$$X_S^0, Y_S^0, Z_S^0, \alpha^0, \omega^0, \kappa^0. \quad (2.53).$$

2. Для кожної опорної точки (їхня кількість дорівнює n) обчислюють коефіцієнти a_x, b_x, \dots та вільні члени l_x, l_y . У результаті цих дій формується матриця коефіцієнтів

$$A = \begin{matrix} & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{matrix} \begin{bmatrix} a_{x1} & b_{x1} & c_{x1} & d_{x1} & e_{x1} & f_{x1} \\ a_{y1} & b_{y1} & c_{y1} & d_{y1} & e_{y1} & f_{y1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{xn} & b_{xn} & c_{xn} & d_{xn} & e_{xn} & f_{xn} \\ a_{yn} & b_{yn} & c_{yn} & d_{yn} & e_{yn} & f_{yn} \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

та матриця вільних членів

$$L = [l_{x1} \quad l_{y1} \quad \dots \quad l_{xn} \quad l_{yn}]^T. \quad (2.55)$$

3. Складають систему нормальних рівнянь

$$A^T AX + A^T L = 0$$

та знаходять розв'язок

$$X = -(A^T A)^{-1} A^T L, \quad (2.56)$$

де

$$X = [\delta X_S \quad \delta Y_S \quad \delta Z_S \quad \delta \alpha \quad \delta \omega \quad \delta \kappa]^T. \quad (2.57)$$

4. Обчислюють уточнені значення шуканих невідомих

$$\left. \begin{aligned} X_S &= X_S^0 + \delta X_S^{(i)} + \dots \\ Y_S &= Y_S^0 + \delta Y_S^{(i)} + \dots \\ \dots &\dots \dots \dots \\ \kappa &= \kappa^0 + \delta \kappa^{(i)} + \dots \end{aligned} \right\}. \quad (2.58)$$

Тут індекс (i) означає номер наближення (ітерації).

5. Перевіряють ітераційний процес на збіжність:

$$\begin{aligned} \left| \delta X_S^{(i)} - \delta X_S^{(i+1)} \right| &\leq \varepsilon_{X_S}, \\ \left| \delta Y_S^{(i)} - \delta Y_S^{(i+1)} \right| &\leq \varepsilon_{Y_S}, \\ \left| \delta Z_S^{(i)} - \delta Z_S^{(i+1)} \right| &\leq \varepsilon_{Z_S}, \\ \left| \delta \alpha^{(i)} - \delta \alpha^{(i+1)} \right| &\leq \varepsilon_{\alpha}, \\ \left| \delta \omega^{(i)} - \delta \omega^{(i+1)} \right| &\leq \varepsilon_{\omega}, \\ \left| \delta \kappa^{(i)} - \delta \kappa^{(i+1)} \right| &\leq \varepsilon_{\kappa} \end{aligned} \quad (2.59)$$

де ε – задані допуски.

Якщо всі умови (2.59) задовольняються, то процес наближень вважається завершеним і за остаточне значення вектора невідомих приймають величини (2.58).

У протилежному випадку переходять до пункту 2.

6. Оцінюють точність отриманого розв'язку так. Обчислюють середню квадратичну похибку одиниці ваги:

$$\mu^2 = \left(\sum_1^n (v_x^2 + v_y^2) \right) / (2n - 6), \quad (2.60)$$

де v_x, v_y знаходять за (2.50), підставляючи в ці рівняння знайдені остаточні значення невідомих.

У пункті 3 з розв'язку системи нормальних рівнянь одержана обернена матриця

$$Q = (A^T A)^{-1}. \quad (2.61)$$

Діагональні коефіцієнти матриці Q дають змогу обчислити середні квадратичні похибки елементів зовнішнього орієнтування:

$$\begin{aligned} m_{X_s} &= \mu\sqrt{Q_{11}}, & m_{Y_s} &= \mu\sqrt{Q_{22}}, & m_{Z_s} &= \mu\sqrt{Q_{33}}, \\ m_{\alpha} &= \mu\sqrt{Q_{44}}, & m_{\omega} &= \mu\sqrt{Q_{55}}, & m_{\kappa} &= \mu\sqrt{Q_{66}}. \end{aligned} \quad (2.62)$$

Викладений метод придатний для знімків з довільними елементами орієнтування. Для отримання стійкого розв'язку необхідно виконати дві такі головні умови:

- опорних точок необхідно мати не менше від трьох і вони не повинні розташовуватись на одній прямій;
- наближені значення елементів зовнішнього орієнтування повинні бути відомі з певною точністю, інакше розв'язання буде тривати або дуже довго, або ітераційний процес взагалі стане неможливим; на практиці для лінійних елементів зовнішнього орієнтування X_s , Y_s наближені значення можна визначити за картою або сумістити з координатами однієї з опорних точок, а $Z_s = Z_i + f \cdot m$ (де Z_i – висота будь-якої опорної точки; m – знаменник масштабу знімка; f – фокусна віддаль знімка); якщо виконувалось планове аерофотознімання, то наближені значення кутів нахилу знімка приймають такими, що дорівнюють нулю.

2.7.3. Подвійна обернена фотограмметрична засічка

Ця задача відрізняється від попередньої тим, що тут беруть участь два знімки \bar{P}_1 і \bar{P}_2 (рис. 2.27).

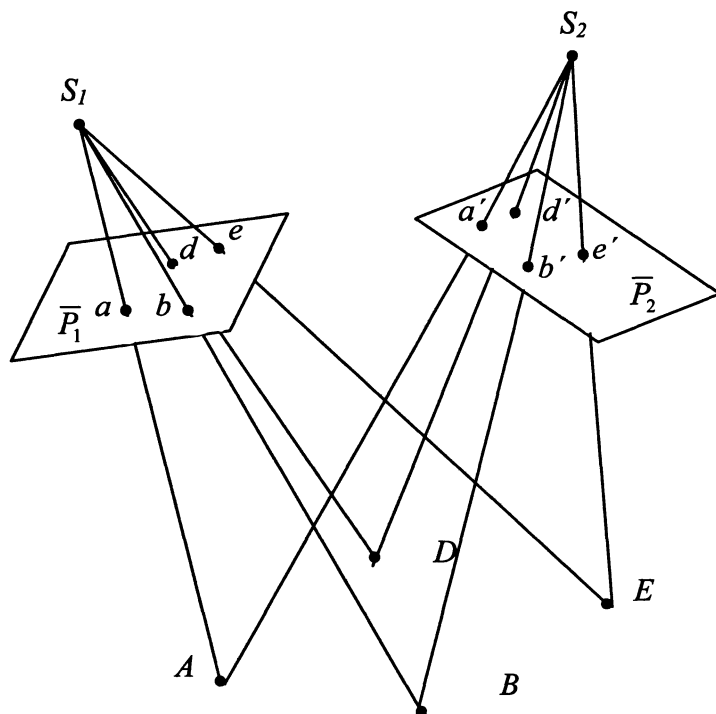
Нехай на місцевості задано опорні точки A, B, D, E з відомими координатами X, Y, Z . На знімках \bar{P}_1 і \bar{P}_2 ці точки зобразились в $a, a', b, b',$; для них виміряні координати x, y, x', y' . Теоретично допустимо, що деяка опорна точка зобразилась тільки на одному зі знімків.

Необхідно знайти елементи зовнішнього орієнтування для обох знімків та елементи внутрішнього орієнтування, тобто вектор невідомих такий:

$$X = \begin{bmatrix} X_{S_1} & Y_{S_1} & Z_{S_1} & \alpha_1 & \omega_1 & \kappa_1 & X_{S_2} & Y_{S_2} & Z_{S_2} & \alpha_2 & \omega_2 & \kappa_2 & x_0 & y_0 & f \end{bmatrix}^T. \quad (2.63)$$

Як бачимо, задача порівняно з п. 2.7.2 поширена на два знімки. Окрім цього, вектор (2.63) розширений на знаходження елементів внутрішнього орієнтування

(з допущенням, що для обох знімків ці величини однакові). Задачу зі знаходження фокусної віддалі та координат головної точки називають частковим калібруванням знімка.



2.27. Подвійна обернена фотограмметрична засічка

Вихідними рівняннями є рівняння колінеарності:

$$\begin{aligned} F_x = x - x_0 &= -f \frac{a_1(X - X_{S_1}) + b_1(Y - Y_{S_1}) + c_1(Z - Z_{S_1})}{a_3(X - X_{S_1}) + b_3(Y - Y_{S_1}) + c_3(Z - Z_{S_1})}, \\ F_y = y - y_0 &= -f \frac{a_2(X - X_{S_1}) + b_2(Y - Y_{S_1}) + c_2(Z - Z_{S_1})}{a_3(X - X_{S_1}) + b_3(Y - Y_{S_1}) + c_3(Z - Z_{S_1})}. \end{aligned} \quad (2.64)$$

$$\begin{aligned} F_x' = x' - x_0 &= -f \frac{a'_1(X - X_{S_2}) + b'_1(Y - Y_{S_2}) + c'_1(Z - Z_{S_2})}{a'_3(X - X_{S_2}) + b'_3(Y - Y_{S_2}) + c'_3(Z - Z_{S_2})}, \\ F_y' = y' - y_0 &= -f \frac{a'_2(X - X_{S_2}) + b'_2(Y - Y_{S_2}) + c'_2(Z - Z_{S_2})}{a'_3(X - X_{S_2}) + b'_3(Y - Y_{S_2}) + c'_3(Z - Z_{S_2})}. \end{aligned}$$

Рівняння поправок порівняно з (2.50) є розширеними:

$$\begin{aligned} a_x \delta X_{S_1} + b_x \delta Y_{S_1} + c_x \delta Z_{S_1} + d_x \delta \alpha_1 + e_x \delta \omega_1 + f_x \delta \kappa_1 + g_x \delta f + h_x \delta x_0 + s_x \delta y_0 + l_x &= v_x, \\ a_y \delta X_{S_1} + b_y \delta Y_{S_1} + c_y \delta Z_{S_1} + d_y \delta \alpha_1 + e_y \delta \omega_1 + f_y \delta \kappa_1 + g_y \delta f + h_y \delta x_0 + s_y \delta y_0 + l_y &= v_y, \end{aligned} \quad (2.65)$$

$$\begin{aligned} a'_x \delta X_{S_2} + b'_x \delta Y_{S_2} + c'_x \delta Z_{S_2} + d'_x \delta \alpha_2 + e'_x \delta \omega_2 + f'_x \delta \kappa_2 + g'_x \delta f + h'_x \delta x_0 + s'_x \delta y_0 + l'_x &= v'_x, \\ a'_y \delta X_{S_2} + b'_y \delta Y_{S_2} + c'_y \delta Z_{S_2} + d'_y \delta \alpha_2 + e'_y \delta \omega_2 + f'_y \delta \kappa_2 + g'_y \delta f + h'_y \delta x_0 + s'_y \delta y_0 + l'_y &= v'_y; \end{aligned}$$

тут всі вирази є такими самими, як і в (2.51), а для частинних похідних при δf , δx_0 , δy_0 маємо:

$$g_x = \frac{x - x_0}{f}, \quad h_x = h'_x = 1, \quad s_x = s'_x = 1, \quad (2.66)$$

$$g'_x = \frac{x' - x_0}{f}, \quad g_y = \frac{y - y_0}{f}, \quad h_y = h'_y = 1, \quad s_y = s'_y = 1.$$

Структура рівнянь графічно виглядає так:

	X_{S_1}	Y_{S_1}	Z_{S_1}	α_1	ω_1	κ_1	X_{S_2}	Y_{S_2}	Z_{S_2}	α_2	ω_2	κ_2	f	x_0	y_0	l_y	V_{xy}
Точка а																	
точка а'																	
точка б																	
точка б'																	

Подальше розв'язання принципово збігається з описаним в п. 2.7.2. Відмінність полягає лише в порядку системи нормальних рівнянь: якщо в попередній задачі кількість невідомих дорівнювала 6, то тут маємо 15 невідомих. Тому (2.59) розширюються до 15 перевірок. Для формул оцінки точності маємо замість (2.60) і (2.62) такі:

$$\mu^2 = \left(\sum_1^n (v_x^2 + v_y^2 + v_x'^2 + v_y'^2) \right) / (n - 15), \quad (2.67)$$

де n – загальна кількість рівнянь поправок (2.65);

$$\left. \begin{aligned} m_{x_{s_1}} &= \mu\sqrt{Q_{11}}, & m_{y_{s_1}} &= \mu\sqrt{Q_{22}}, & m_{z_{s_1}} &= \mu\sqrt{Q_{33}}, \\ m_{\alpha_1} &= \mu\sqrt{Q_{44}}, & m_{\omega_1} &= \mu\sqrt{Q_{55}}, & m_{\kappa_1} &= \mu\sqrt{Q_{66}}, \\ m_{x_{s_2}} &= \mu\sqrt{Q_{77}}, & m_{y_{s_2}} &= \mu\sqrt{Q_{88}}, & m_{z_{s_2}} &= \mu\sqrt{Q_{99}}, \\ m_{\alpha_2} &= \mu\sqrt{Q_{1010}}, & m_{\omega_2} &= \mu\sqrt{Q_{1111}}, & m_{\kappa_2} &= \mu\sqrt{Q_{1212}}, \\ m_f &= \mu\sqrt{Q_{1313}}, & m_{x_0} &= \mu\sqrt{Q_{1414}}, & m_{y_0} &= \mu\sqrt{Q_{1515}}, \end{aligned} \right\} \quad (2.68)$$

Формально мінімальна кількість опорних точок повинна становити чотири, і вони повинні зобразитись на двох знімках. Тоді кількість рівнянь $n=16$. Ці точки не повинні розміщатись на одній прямій.

Введення в задачу невідомих елементів внутрішнього орієнтування дещо впливає на стабільність розв'язку. Для усунення цього недоліку необхідно, щоб перепад висот між опорними точками був значним. У разі рівнинної місцевості система рівнянь є погано зумовленою, і, як наслідок, точність визначення елементів внутрішнього орієнтування є низькою.

2.7.4. Розв'язання задачі взаємного орієнтування

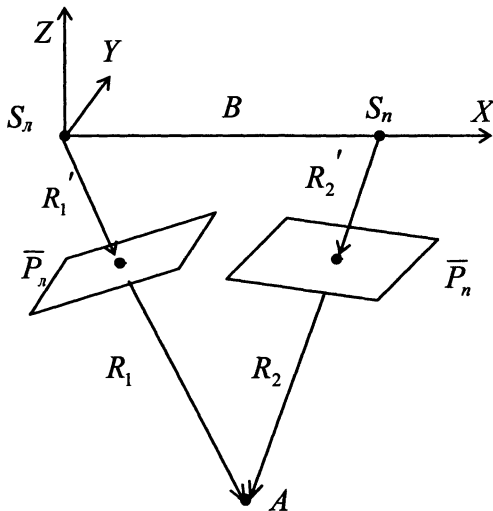


Рис. 2.28. Компланарність векторів для розв'язання задачі взаємного орієнтування

Нехай дана пара аерофотознімків, отримана з базису фотографування $S_p S_n$ (рис. 2.28). Необхідно знайти елементи взаємного орієнтування у базисній системі $\alpha_l, \alpha_n, \kappa_l, \kappa_n, \omega_n$. В основу розв'язання покладемо умову компланарності. На підставі рівняння скалярно-векторного добутку запишемо:

$$B \cdot (R_1' \times R_2') = 0. \quad (2.69)$$

Спроектувавши ці вектори на осі координат, рівняння (2.43) подамо у вигляді детермінанта (враховуючи, що $B_x = B, B_y = B_z = 0$):

$$\begin{vmatrix} B & 0 & 0 \\ X_1' & Y_1' & Z_1' \\ X_2' & Y_2' & Z_2' \end{vmatrix} = 0, \quad (2.70)$$

або після розкладання по першому рядку маємо:

$$B(Y_1' Z_2' - Y_2' Z_1') = 0$$

$$F = Y_1'Z_2' - Y_2'Z_1' = 0. \quad (2.71)$$

Компоненти векторів R_1' та R_2' є функціями координат точок a_n та a_n знімків та елементів взаємного орієнтування і описуються рівняннями (2.16). Використовуючи ці формули для лівого знімка, треба враховувати, що $\omega_n=0$.

Рівняння (2.71) є нелінійним стосовно величин α_n , κ_n , α_n , ω_n , κ_n . Використаємо прийом лінеаризації розкладанням (2.71) в ряд Тейлора:

$$F = F^0 + \frac{\partial F}{\partial \alpha_n} d\alpha_n + \frac{\partial F}{\partial \kappa_n} d\kappa_n + \frac{\partial F}{\partial \alpha_n} d\alpha_n + \frac{\partial F}{\partial \omega_n} d\omega_n + \frac{\partial F}{\partial \kappa_n} d\kappa_n. \quad (2.72)$$

З (2.72) одержимо рівняння поправок:

$$a d\alpha_n + b d\kappa_n + c d\alpha_n + d d\omega_n + e d\kappa_n + l = v, \quad (2.73)$$

$$\left. \begin{aligned} a &= -X_1'Y_2', & b &= Z_2' B - Y_2' C, & c &= Y_1'X_2', \\ d &= Y_1'E' - Z_1'F', & e &= Y_1'C' - Z_1'B' \\ E' &= Y_2' \cos \alpha_n', & C &= c_2 x_1 - c_1 y_1, & B &= b_2 x_1 - b_1 y_1, \\ & & C' &= c_2' x_2 - c_1' y_2, & B' &= b_2' x_2 - b_1' y_2, \\ F' &= x_2 b_3' \sin \kappa_n' - y_2 b_3' \cos \kappa_n' + f \cos \omega_n', \end{aligned} \right\} \quad (2.74)$$

$$l = Y_1'Z_2' - Z_1'Y_2'. \quad (2.75)$$

Якщо в рівнянні (2.75) зробити певні спрощення за умови, що елементи взаємного орієнтування – малі величини, то отримаємо:

$$l = q = y_1 - y_2, \quad (2.76)$$

де q – поперечний паралакс.

Нагадаємо про геометричний зміст задачі. Для визначення елементів взаємного орієнтування необхідно на стереопарі виміряти поперечні паралакси q не менше ніж в п'яти точках (парах точок), які розташовані у стандартних (або близьких до стандартних) зонах стереопари. Для підвищення точності розв'язання задачі вимірювання виконують при кількості точок більше ніж п'ять. Тому рівняння поправок (2.73) утворюють систему, аналогічну до (2.52).

У разі застосування МНК послідовність розв'язання задачі така.

1. Задаються наближеними значеннями елементів зовнішнього орієнтування

$$\alpha_n^0, \kappa_n^0, \alpha_n^0, \omega_n^0, \kappa_n^0.$$

2. Для кожної пари вимірюваних точок (їхня кількість дорівнює n) обчислюють коефіцієнти (2.74) та вільні члени (2.75). У результаті цих дій формується матриця коефіцієнтів

$$A_{n,5} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 & e_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 & e_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n & b_n & c_n & d_n & e_n \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

та матриця вільних членів

$$L_{n,1} = [l_1 \quad l_1 \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad l_n]^T. \quad (2.78)$$

3. Складають систему нормальних рівнянь

$$A^T A X + A^T L = 0$$

та знаходять розв'язок

$$X = [\delta\alpha_{\lambda} \quad \delta\kappa_{\lambda} \quad \delta\alpha_n \quad \delta\omega_n \quad \delta\kappa_n]^T. \quad (2.79)$$

4. Обчислюють уточнені значення шуканих невідомих

$$\begin{aligned} \alpha_{\lambda} &= \alpha_{\lambda}^0 + \delta\alpha_{\lambda}^{(i)}, & \alpha_n &= \alpha_n^0 + \delta\alpha_n^{(i)}, \\ \kappa_{\lambda} &= \kappa_{\lambda}^0 + \delta\kappa_{\lambda}^{(i)}, & \kappa_n &= \kappa_n^0 + \delta\kappa_n^{(i)}, \\ \omega_n &= \omega_n^0 + \delta\omega_n^{(i)}, \end{aligned} \quad (2.80)$$

i – номер ітерації.

5. Перевіряють ітераційний процес на збіжність:

$$\begin{aligned} |\delta\alpha_{\lambda}^{(i)} - \delta\alpha_{\lambda}^{(i+1)}| &\leq \varepsilon_{\alpha}, \\ |\delta\kappa_{\lambda}^{(i)} - \delta\kappa_{\lambda}^{(i+1)}| &\leq \varepsilon_{\kappa}, \\ |\delta\alpha_n^{(i)} - \delta\alpha_n^{(i+1)}| &\leq \varepsilon_{\alpha}, \\ |\delta\omega_n^{(i)} - \delta\omega_n^{(i+1)}| &\leq \varepsilon_{\omega}, \\ |\delta\kappa_n^{(i)} - \delta\kappa_n^{(i+1)}| &\leq \varepsilon_{\kappa}, \end{aligned} \quad (2.81)$$

де ε – задані допуски.

У разі виконання всіх умов (2.81) ітераційний процес завершено. Якщо хоча б одна з умов (2.81) не задовольняється, то переходять до пункту 2.

6. Після закінчення ітераційного процесу проводять оцінку точності. Середня квадратична похибка одиниці ваги дорівнює

$$\mu^2 = \left(\sum_1^n v^2 \right) / (n - 5), \quad (2.82)$$

а середні квадратичні похибки елементів взаємного орієнтування обчислюють за формулами аналогічними до (2.68).

У разі використання лінійно-кутової системи визначуваними елементами взаємного орієнтування є величини τ , ν , $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$, $\Delta\kappa$ (рис. 2.22). Відмінність від попередньо розглянутого полягає в тому, що замість рівняння поправок (2.73) та коефіцієнтів (2.74) маємо відповідно:

$$a \cdot \delta\tau + b \cdot \delta\nu + c \cdot \delta\Delta\alpha + d \cdot \delta\Delta\omega + e \cdot \delta\Delta\kappa + l = \nu, \quad (2.83)$$

$$a = -(x_1 Z'_2 + f X'_2) \sec^2 \tau - (x_1 Y'_2 - y_1 X'_2) \operatorname{tg} \nu \sin \tau / \cos^2 \tau,$$

$$b = (x_1 Y'_2 - y_1 X'_2) \sec^2 \nu / \cos \tau,$$

$$c = (y_1 - x_1 \operatorname{tg} \tau) X'_2 + (f \operatorname{tg} \tau + y_1 \operatorname{tg} \nu / \cos \tau) Z'_2,$$

$$\begin{aligned} d = & -(f \operatorname{tg} \tau + y_1 \operatorname{tg} \nu / \cos \tau) [a_3 (x_2 \sin \Delta\kappa + y_2 \cos \Delta\kappa) - f \sin \Delta\alpha \sin \Delta\omega] + \\ & + (f + x_1 \operatorname{tg} \nu / \cos \tau) [b_3 (x_2 \sin \Delta\kappa + y_2 \cos \Delta\kappa) + f \cos \Delta\omega] + \\ & + (y_1 - x_1 \operatorname{tg} \tau) [c_3 (x_2 \sin \Delta\kappa + y_2 \cos \Delta\kappa) + f \cos \Delta\alpha \sin \Delta\omega], \end{aligned} \quad (2.84)$$

$$\begin{aligned} e = & (f \operatorname{tg} \tau + y_1 \operatorname{tg} \nu / \cos \tau) (a_1 y_2 - a_2 x_2) - (f + x_1 \operatorname{tg} \nu / \cos \tau) (b_1 y_2 - b_2 x_2) - \\ & - (y_1 - x_1 \operatorname{tg} \tau) (c_1 y_2 - c_2 x_2). \end{aligned}$$

Послідовність розв'язання задачі така сама, як і для елементів взаємного орієнтування в базисній системі.

Аналіз розв'язання задачі показує, що точність взаємного орієнтування залежить прямо пропорційно від фокусної віддалі знімків – для короткофокусних аерофотокамер точність є кращою. Кути $\alpha_{л,н}$, ω_n визначаються точніше порівняно з кутами $\kappa_{л,н}$; для лінійно-кутової системи елементи ν , $\Delta\alpha$, $\Delta\omega$ визначаються краще ніж кути τ , $\Delta\kappa$.

Задача взаємного орієнтування розв'язується погано або зовсім не розв'язується, якщо сфотографована поверхня близька до поверхні циліндра, твірна якого паралельна до базису фотографування. Це так звана “умова невизначеності взаємного орієнтування”. Тоді детермінант матриці нормальних рівнянь є або нулем, або близький до нуля.

Професор І. Антіпов довів, що цього негативного явища можна позбутись, якщо до рівнянь взаємного орієнтування додається умова рівності координат зв'язкових точок.

2.7.5. Сумісне визначення елементів взаємного орієнтування та передавання масштабу для двох суміжних моделей

Нехай визначені елементи взаємного орієнтування j -ї моделі за формулою (2.83) та розв'язана пряма фотограмметрична засічка, тобто в j -й моделі визначено координати точки A (початок координат у точці S_2). Необхідно одночасно знайти елементи взаємного орієнтування $(j+1)$ -ї моделі та виконати приведення масштабу $(j+1)$ -ї моделі до масштабу попередньої j -ї моделі (рис. 2.29). Як відомо, визначення елементів взаємного орієнтування виконується на підставі виміряних поперечних паралаксів, а передавання масштабу виконується за зв'язковими точками.

Математичне формулювання задачі полягає у використанні рівняння (2.83) взаємного орієнтування та рівності векторів

$$S_2 A = S_2 A',$$

тобто

$$R_j = R_{j+1} = R'_{j+1} \cdot K = R'_{j+1} \frac{b' - \delta b}{b'} = R'_{j+1} - R'_{j+1} \frac{\delta b}{b'}. \quad (2.85)$$

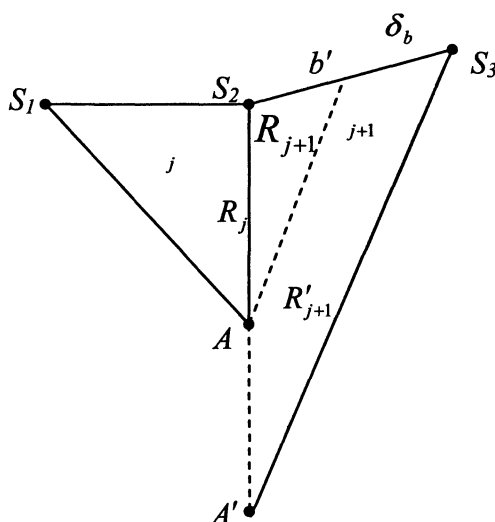


Рис. 2.29. З'єднання двох моделей за зв'язковими точками

Строго кажучи, рівняння (2.85) є нелінійним відносно шуканих елементів $\tau, \nu, \Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\kappa, \Delta b$ і тому треба було б застосувати описаний вище прийом лінеаризації (розклад функції у ряд Тейлора).

З практичного погляду, враховуючи, що $|R| \approx |Z|$ та те, що розв'язання задачі відбувається ітеративно, перепишемо (2.85) так:

$$\frac{Z}{b'} \delta b + Z_j - Z'_{j+1} = \nu_b, \quad (2.86)$$

$$\text{або } a_b \cdot \delta b + l_b = \nu_b'. \quad (2.87)$$

Отже, для всіх точок $(j+1)$ -ї стереопари складається система рівнянь (2.83), до неї долучаються рівняння (2.87), записані для зв'язкових точок, і одночасно розв'язується система нормальних рівнянь з 6 невідомими

$$X = [\delta\tau \quad \delta\nu \quad \delta\Delta\alpha \quad \delta\Delta\omega \quad \delta\Delta\kappa \quad \delta b]^T. \quad (2.88)$$

У разі застосування МНК послідовність розв'язання така:

1. Для кожної зв'язкової точки розв'язують пряму фотограмметричну засічку у j -й моделі.
2. Задаються наближеними значеннями елементів взаємного орієнтування та базису в $(j+1)$ -й моделі $\tau^0, \nu^0, \Delta\alpha^0, \Delta\omega^0, \Delta\kappa^0, b^0$.
3. Для кожної пари виміряних точок обчислюють коефіцієнти та вільні члени (2.74), (2.75).
4. Для кожної зв'язкової точки розв'язують пряму фотограмметричну засічку у $(j+1)$ -й моделі, використовуючи спочатку наближені (а потім уточнені) параметри (елементи взаємного орієнтування та базис).
5. Для кожної зв'язкової точки складають рівняння (2.87).
6. Складають нормальні рівняння, отримують розв'язок (2.88).
7. Обчислюють уточнені значення невідомих

$$\begin{aligned} \tau &= \tau^0 + (\delta\tau)^{(i)}, \quad \nu = \nu^0 + (\delta\nu)^{(i)}, \\ \Delta\alpha &= \Delta\alpha^0 + (\delta\Delta\alpha)^{(i)}, \quad \Delta\omega = \Delta\omega^0 + (\delta\Delta\omega)^{(i)}, \\ \Delta\kappa &= \Delta\kappa^0 + (\delta\Delta\kappa)^{(i)}, \quad b = b^0 + (\delta b)^{(i)}. \end{aligned} \quad (2.89)$$

8. Перевірка ітераційного процесу на збіжність аналогічна до (2.81), тільки додається перевірка

$$|\delta b^{(i)} - \delta b^{(i+1)}| \leq \varepsilon_b.$$

9. Оцінка точності розв'язання задачі аналогічна до (2.82), тільки в знаменнику стоятиме величина $(n-6)$.

Зазначимо, що геометричну сутність рівнянь (2.85) вперше використав проф. А. Скірідов, назвавши їх “умовою бокових сторін”. Він також запропонував використати цю умову для уточнення кутового орієнтування моделі на універсальних стереоприладах.

Як вже зазначалось, проф. І. Антіпов застосував цю саму умову у побудові мережі маршрутної фототріангуляції методом залежних моделей. Таке одночасне розв’язання задачі визначення елементів взаємного орієнтування та передавання масштабу принципово змінило проблему “невизначеності елементів взаємного орієнтування”. Оскільки детермінант сукупної системи нормальних рівнянь відрізняється від нуля, то розв’язок задачі є завжди стабільним.

2.7.6. Геодезичне орієнтування фотограмметричної моделі

У результаті розв’язання прямої фотограмметричної засічки, описаного в п. 2.7.1, отримують просторові координати точки A моделі об’єкта (рис. 2.25). Якщо система $SXYZ$ є абсолютною (геодезичною), і кути нахилу знімків та базису визначені в цій системі, то зрозуміло, що модель будується в абсолютній системі координат.

Проте найчастіше система $SXYZ$ є відносною, і тому треба знайти елементи геодезичного орієнтування моделі:

$$U = \begin{bmatrix} X_{0_\phi} & Y_{0_\phi} & Z_{0_\phi} & \alpha_0 & \omega_0 & \kappa_0 & t \end{bmatrix}^T. \quad (2.90)$$

З геометричного погляду ця задача складається з трьох дій (рис. 2.24):

- перенесення початку координат з центра O_ϕ у центр O ;
- “поворот простору”;
- зміна масштабу моделі, тобто приведення його до величини t .

Формули перетворення координат є такими:

$$\begin{bmatrix} X_\Gamma \\ Y_\Gamma \\ Z_\Gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{0_\phi} \\ Y_{0_\phi} \\ Z_{0_\phi} \end{bmatrix} + A_{\alpha_0, \omega_0, \kappa_0} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \cdot t. \quad (2.91)$$

Оскільки функції (2.91) є нелінійними відносно вектора (2.90), то приведемо їх до лінійного вигляду:

$$\begin{aligned} a_x \delta X_0 + b_x \delta Y_0 + c_x \delta Z_0 + d_x \delta \alpha_0 + e_x \delta \omega_0 + f_x \delta \kappa_0 + g_x \delta t + l_x &= v_x, \\ a_y \delta X_0 + b_y \delta Y_0 + c_y \delta Z_0 + d_y \delta \alpha_0 + e_y \delta \omega_0 + f_y \delta \kappa_0 + g_y \delta t + l_y &= v_y, \\ a_z \delta X_0 + b_z \delta Y_0 + c_z \delta Z_0 + d_z \delta \alpha_0 + e_z \delta \omega_0 + f_z \delta \kappa_0 + g_z \delta t + l_z &= v_z. \end{aligned} \quad (2.92)$$

Тут:

$$\begin{aligned} a_x &= 1, & b_x &= 0, & c_x &= 0, \\ a_y &= 0, & b_y &= 1, & c_y &= 0, \\ a_z &= 0, & b_z &= 0, & c_z &= 1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_x &= -\Delta Z, & e_x &= -\Delta Y \sin \alpha_0, & f_x &= (a_2 X - a_1 Y)t, & g_x &= \Delta X, \\ d_y &= 0, & e_y &= -\Delta Y t g \omega_0 - \frac{1}{\cos \omega_0} Z \cdot t, & f_y &= (b_2 X - b_1 Y)t, & g_y &= \Delta Y, \\ d_z &= \Delta X, & e_z &= \Delta Y \cos \alpha_0, & f_z &= (c_2 X - c_1 Y)t, & g_z &= \Delta Z, \\ \Delta X &= (a_1 X + a_2 Y + a_3 Z)t, & l_x &= X_0 + \Delta X - X_{\Gamma}, \\ \Delta Y &= (b_1 X + b_2 Y + b_3 Z)t, & l_y &= Y_0 + \Delta Y - Y_{\Gamma}, \\ \Delta Z &= (c_1 X + c_2 Y + c_3 Z)t, & l_z &= Z_0 + \Delta Z - Z_{\Gamma}. \end{aligned}$$

У рівняння (2.92) входять сім невідомих. Для однозначного розв'язання задачі треба мати дві планово-висотні опорні точки (вони дають шість рівнянь) та одну висотну (дає одне рівняння). Тоді задача розв'яжеться без контролю.

Найчастіше беруть чотири планово-висотні точки, розташовані по кутах стереопари, і розв'язують задачу, використовуючи МНК.

Знаходження вектора (2.90) є ітераційним і принципово не відрізняється від описаного у п. 2.7.2 чи 2.7.4.

Метод придатний до застосування за будь-яких значень елементів геодезичного (абсолютного) орієнтування моделі.

2.8. Геометричні перетворення, вживані у фотограмметрії

У фотограмметрії доводиться оперувати такою математичною категорією, як перетворення простору. Найуживанішим є проєктивне перетворення дво- або тривимірного простору. Подамо в стислій формі найпоширеніші у фотограмметрії типи перетворень.

1. Проєктивне; має вигляд:

$$y' = A^T y, \quad (2.93)$$

де A – матриця перетворень, ($\det A \neq 0$); y – вектор початковий; y' – вектор перетворений.

2. Афінне; має вигляд:

$$x' = Ax + b, \quad (2.94)$$

де A – матриця перетворення; x, x', b – вектори-стовпчики.

Властивості цього перетворення: площа, лінія і відрізок переходять відповідно у площину, лінію і відрізок; не порушується паралельність прямих і площин; зберігається метрика векторів; трикутник переходить в трикутник.

Особливий випадок цього типу перетворення:

$$x' = RAx + b, \quad (2.95)$$

за умови, що

$$A^{-1} = A^T,$$

тобто A – ортогональна матриця, а вектор R є діагональною матрицею, тобто

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & & & \\ & R_{22} & & \\ & & \ddots & \\ & & & R_{mm} \end{bmatrix}. \quad (2.96)$$

3. Афіне у разі збігу осей координат; має вигляд:

$$x' = Ax, \quad (2.97)$$

де $\det A \neq 0$.

4. Афіне зі збереженням подібності; має вигляд:

$$x' = kAx + b, \quad (2.98)$$

де $k > 0$, $A^{-1} = A^T$.

Властивості цього перетворення:

- кути зберігаються;
- зберігається подібність фігур;
- зберігається пропорційність відрізків;
- не порушується перпендикулярність векторів.

5. Афіне подібне середнє:

$$x' = kAx, \quad (2.99)$$

тобто отримане з (2.98) за умови $b=0$. У цьому разі зберігається початок системи координат.

6. Гомотетія:

$$x' = Ax, \quad (2.100)$$

тобто з (2.99) $k=1$.

7. Ізометрія:

$$x' = Ax + b. \quad (2.101)$$

Тут зберігаються довжини векторів.

8. Ізометрія середня:

$$x' = Ax. \quad (2.102)$$

Тут збігаються початки систем координат.

9. Поворот простору:

$$x' = Ax, \quad (2.103)$$

де $A^{-1} = A^T$, $\det A = 1$.

10. Перенесення:

$$x' = x + b, \quad (2.104)$$

$A = E$, $k = 1$.

Властивість: Змінюється початок системи координат.

11. Симетричне відображення:

$$x' = -x, \quad (2.105)$$

$A = E$, $k = 1$, впливає з (2.99).

Властивість: Змінюється орієнтування у просторі.

12. Ідентичне перетворення:

$$x' = x, \quad (2.106)$$

тут зберігаються всі елементи.

Звернемо тепер увагу на деякі аспекти геометричних перетворень. Спочатку розглянемо перетворення площини \bar{E} у площину \bar{P} (рис. 2.30).

Для визначення положення точки a на площині \bar{P} прийнята довільна (не прямокутна) система координат $O'x_1x_2$. Для так званих невластних точок (перетин двох паралельних прямих) ці координати не дають змогу визначити їхнє розміщення. Тому у проєктивній геометрії положення точки визначається його напрямком. Напрямок вектора визначається співвідношенням його складових $k:m$. Для будь-якої точки a (рис. 2.30) визначальним є відношення:

$$y_1 : y_2 : y_3 = x_1 : x_2 : 1. \quad (2.107)$$

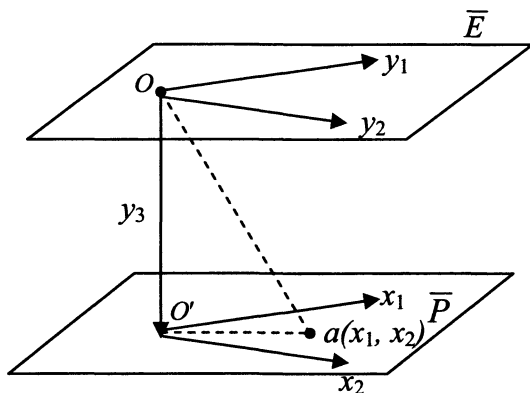


Рис. 2.30. Геометричне перетворення площини у площину

Координати y_1, y_2, y_3 називають однорідними координатами точки a у системі $O'x_1x_2$. Співвідношення (2.107) означає пропорційність складових k .

Для кожної точки площини можна записати

$$k_{y_1} : k_{y_2} : k_{y_3} = x_1 : x_2 : 1. \quad (2.108)$$

Звідси можна зробити висновок, що системі однорідних координат у $(n+1)$ -вимірному просторі може відповідати довільна система координат n -вимірного простору.

З (2.107) маємо:

$$x_1 = \frac{y_1}{y_3}, \quad x_2 = \frac{y_2}{y_3}. \quad (2.109)$$

Для тривимірного простору необхідно взяти чотири числа, тобто (2.107) запишеться так:

$$\begin{aligned} y_1 : y_2 : y_3 : y_4 &= x_1 : x_2 : x_3 : 1, \\ k_{y_1} : k_{y_2} : k_{y_3} : k_{y_4} &= x_1 : x_2 : x_3 : 1. \end{aligned} \quad (2.110)$$

Якщо врахувати (2.93) – лінійне перетворення, то для четвірки чисел запишемо:

$$\begin{aligned} k_{y_1} &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4, \\ k_{y_2} &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4, \\ k_{y_3} &= a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + a_{34}x_4, \\ k_{y_4} &= a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4. \end{aligned} \quad (2.111)$$

З (2.111) та (2.110) легко отримуємо формули для обчислення координат при геометричних проєктивних перетвореннях.

Для тривимірного простору:

$$\begin{aligned} \frac{k_{y_1}}{k_{y_4}} &= \frac{a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4}{a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4}, \\ \frac{k_{y_2}}{k_{y_4}} &= \frac{a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4}{a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4}, \\ \frac{k_{y_3}}{k_{y_4}} &= \frac{a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + a_{34}x_4}{a_{41}x_1 + a_{42}x_2 + a_{43}x_3 + a_{44}x_4}. \end{aligned} \quad (2.112)$$

Ставиться вимога, щоб для матриці перетворень $\det A \neq 0$.

Рівняння (2.112) можна спростити, розділивши чисельник і знаменник у (2.112) на $a_{44}x_4$.

Ввівши позначення для величин

$$\frac{a_{11}x_1}{a_{44}x_4} = \frac{a_{11}}{a_{44}} \cdot \frac{x_1}{x_4} = A_{11}x, \quad \frac{a_{12}x_2}{a_{44}x_4} = A_{12}y, \\ \frac{a_{13}x_3}{a_{44}x_4} = A_{13}z \quad \text{і т. д.}, \quad (2.113)$$

отримаємо:

$$y_1 = \frac{A_{11}x + A_{12}y + A_{13}z + A_{14}}{A_{41}x + A_{42}y + A_{43}z + 1}, \\ y_2 = \frac{A_{21}x + A_{22}y + A_{23}z + A_{24}}{A_{41}x + A_{42}y + A_{43}z + 1}, \quad (2.114) \\ y_3 = \frac{A_{31}x + A_{32}y + A_{33}z + A_{34}}{A_{41}x + A_{42}y + A_{43}z + 1}.$$

Для двовимірного простору (перетворення площини на площину) маємо $y_3 = 0, z = 0$ і відповідно

$$y_1 = \frac{A_{11}x + A_{12}y + A_{13}}{A_{41}x + A_{42}y + 1}, \\ y_2 = \frac{A_{21}x + A_{22}y + A_{23}}{A_{41}x + A_{42}y + 1}. \quad (2.115)$$

Для одновимірного простору (перетворення прямої на пряму) відповідно запишемо:

$$y_1 = \frac{A_{11}x + A_{12}}{A_{21}x + 1}. \quad (2.116)$$

Серед описаних вище перетворень назовемо декілька найвживаніших.

Перетворення тривимірного простору на тривимірний ($3D \rightarrow 3D$) у випадку евклідового простору (прямокутної системи координат). У цьому разі матриця A з (2.103) є ортогональною, а величини y_4 та x_4 з (2.112) відсутні. Тоді (2.103) запишеться так:

$$y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3, \\ y_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3, \quad (2.117) \\ y_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3.$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (2.118)$$

є матрицею напрямних косинусів і описує поворот однієї системи координат відносно іншої.

Про цю матрицю ми вже подали відомості у п. 2.3.2. За формулами (2.7) обчислюють компоненти матриці напрямних косинусів, а позначення літерами може бути таке, як в (2.8) або в (2.118).

Перетворення тривимірного простору на двовимірний (3D → 2D) (англ. Direct Linear Transformation – DLT).

Тоді y_3 з (2.114) відсутнє і маємо

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{A_{11}X + A_{12}Y + A_{13}Z + A_{14}}{A_{41}X + A_{42}Y + A_{43}Z + 1} \\ y_2 &= \frac{A_{21}X + A_{22}Y + A_{23}Z + A_{24}}{A_{41}X + A_{42}Y + A_{43}Z + 1}. \end{aligned} \quad (2.119)$$

Це перетворення з 11 невідомими параметрами.

Перетворення площини на площину (2D → 2D) як афінне перетворення зі збереженням подібності (2.98).

Тоді маємо, якщо $k=1$

$$\begin{aligned} y_1 &= a_{11}X + a_{12}Y + b_1 \\ y_2 &= a_{21}X + a_{22}Y + b_2. \end{aligned} \quad (2.120)$$

Оскільки $A^{-1} = A^T$, то матриця A є матрицею напрямних косинусів і є функцією тільки одного кута κ повороту системи координат. У такому разі $a_{11} = a_{22}$, $a_{21} = -a_{12}$ і бачимо, що це є перетворенням з чотирма невідомими параметрами.

Перетворення площини на площину (2D → 2D) з незбіжністю масштабів за осями координат. Це перетворення описується рівняннями (2.95) – (2.96). Тоді

$$\begin{aligned} y_1 &= R_1(a_{11}X + a_{12}Y) + b_1 \\ y_2 &= R_2(a_{21}X + a_{22}Y) + b_2 \end{aligned}$$

$$\text{або ж, якщо } R_1=R_2=1 \quad (2.121)$$

$$\begin{aligned} y_1 &= a_{11}X + a_{12}Y + b_1 \\ y_2 &= a_{21}X + a_{22}Y + b_2 \end{aligned}$$

і це є перетворення з шістьма параметрами.

Перетворення Гельмерта описується рівняннями

$$\begin{aligned}x &= a_0 + a_1 X + a_2 Y \\ y &= b_0 + a_2 X + a_1 Y\end{aligned}\tag{2.122}$$

і є чотирипараметричним двовимірним перетворенням, виконує зміну масштабу, “поворот простору (площини)” та паралельне перенесення.

Нелінійні перетворення у двовимірному просторі (зокрема такі, що використовуються у цифровій фотограмметрії при допасуванні оптичних щільностей для пікселів – див. т. зв. операція *Resampling*).

Одним з них є білінійне перетворення типу

$$\begin{aligned}x &= a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 XY, \\ y &= b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 XY.\end{aligned}\tag{2.123}$$

Це перетворення з 8 невідомими параметрами.

Інші типи нелінійних перетворень (кубична інтерполяція, поліном Лагранжа, сплайн-інтерполяція) подано у п. 4.6.

2.9. Математичні моделі похибок фотограмметричних вимірів. Вплив кривини Землі

2.9.1. Моделі похибок фотограмметричних вимірів

Фотограмметричні вимірювання супроводжуються значним впливом різних за своєю природою чинників, які викликають похибки у вимірах. У загальному вигляді виділимо такі основні групи чинників:

- 1) що спричиняють відхилення реальної моделі центральної проєкції від ідеальної;
- 2) що супроводжують вимірювання фотокоординат;
- 3) нестрогого математичного оброблення (використання нестрогих функціональних залежностей, апріорні допущення про ймовірну природу похибок).

Всі ці похибки доволі добре вписуються у гіпотезу адитивної структури похибок, запропоновану Ю.В. Кемніцом [8] (адитивна – дослівно “отримана підсумовуванням”):

$$\mathcal{E} = \Theta + \Delta,\tag{2.124}$$

де \mathcal{E} – повна, Θ – систематична, Δ – випадкова похибки.

Кожна з вищеназваних трьох груп наявна як у векторі похибок Θ , так і у векторі похибок Δ .

Проаналізуємо кожну з цих груп окремо.

2.9.2. Відхилення реальної центральної проекції від ідеальної

Розглянемо знімок як систему, в якій головними складовими частинами є формування зображення у площині прикладної рамки камери, фіксація зображення на відповідний носій (плівку, пластинку, ПЗЗ-сенсор тощо). До них зарахуємо вплив таких основних факторів:

- рефракція атмосфери;
- дисторсія оптичної системи;
- аберації оптичної системи;
- зміна розмірів камери через вплив зовнішніх факторів;
- вплив польоту літака на формування зображення (вібрація, змазане зображення);

– деформація фотографічного матеріалу у результаті фотолабораторних робіт.

Рефракція світлового променя під час проходження через неоднорідне оптичне середовище, яким є атмосфера Землі – це відхилення (викривлення) його від прямолінійної траєкторії. Геометричний смисл впливу цього явища на формування зображення пояснює рис. 2.31.

Існують близько десятка формул для визначення рефракції. Подамо формулу проф. І. Куштіна, за якою кут рефракції визначається за трьома аргументами:

$$\lambda'' = \frac{481'' \operatorname{tg} \alpha}{H_S - H_A} \left\{ 1 - 0,02257 H_A^{5,253} - \left[1 + \frac{34,14(H_S - H_A)}{288 - 6,5 H_A} \right] \times (1 - 0,02257 H_A)^{5,253} \right\}, \quad (2.125)$$

де H_A , H_S – абсолютні висоти над рівнем моря точок місцевості і центра фотографування.

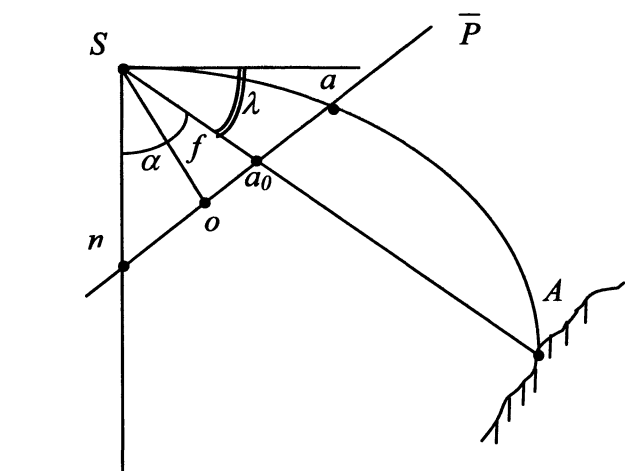


Рис. 2.31. Вплив рефракції на зміщення точки на знімку:
 S – центр проекції; A – точка місцевості; \bar{P} – знімок; a_0 – ідеальне зображення точки A ; a – реальне зображення точки A ; aa_0 – зміщення точки на знімку під впливом рефракції; α – зенітна віддаль;
 λ – кут рефракції

Як видно з рис. 2.31, зміщення точки під впливом рефракції проходить від центра знімка (точніше від точки надиру) вздовж радіус-вектора na .

Формула (2.125) отримана для так званої стандартної атмосфери, вважаючи, що для висоти 11 км вертикальний градієнт становить $6,5^\circ/\text{км}$. На висотах, більших за 11 км, атмосфера є ізотермічною з температурою 240°К .

Розрахунки показують, наприклад, що при висоті фотографування 3 км для точки, яка лежить на віддалі $oa \approx 100$ мм при $f=140$ мм, вплив рефракції такий: $aa_0 \approx 0,005$ мм.

Отже, при високоточних вимірах (точніше від 0,005 мм) вплив рефракції треба враховувати, виключаючи ці похибки перед фотограмметричними побудовами.

Зазначимо, що формули фотограмметричної рефракції мають дещо “ідеалізований” характер, оскільки стосуються стандартної атмосфери, яка насправді за своєю будовою, зміною температури, тиску є значно складнішою.

Дисторсія оптичної системи спричиняється похибками виготовлення оптичних компонентів та монтажем їх у цілісну систему. Геометрична інтерпретація цього явища показана на рис. 2.32: промінь, який входить в систему під кутом ω_1 , виходить з неї під іншим кутом ω_2 .

На рис. 2.32 відрізок aa_0 є дисторсійним зміщенням ідеально побудованої точки a_0 у положення a .

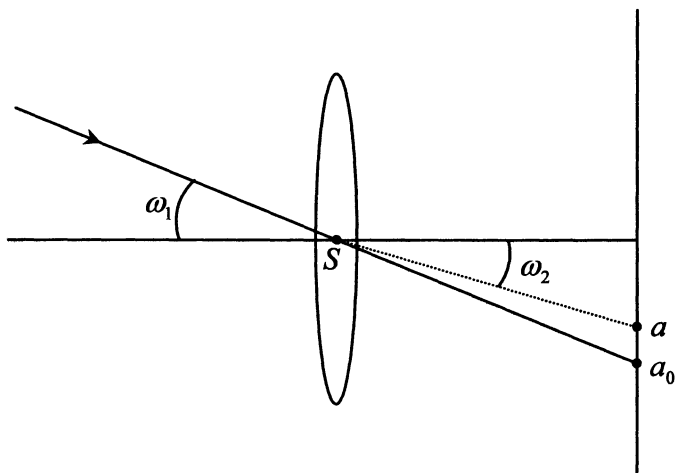


Рис. 2.32. Радіальна дисторсія оптичної системи

Окрім радіальної дисторсії існує тангенціальна дисторсія – зміщення точки зображення у напрямку, перпендикулярному до радіального зміщення. Тангенціальна дисторсія, як правило, на порядок менша від радіальної.

Існують два принципові підходи до боротьби з цим негативним явищем:

- визначення параметрів дисторсії для конкретної знімальної системи;
- конструювання та виготовлення так званих бездисторсійних систем, в яких дисторсія зведена до мінімуму.

Визначення параметрів дисторсії можна виконати декількома методами, які поділяють на дві групи: лабораторні методи (із застосуванням гоніометрів та калібраторів) та польові методи (з використанням спеціальних тестових полігонів). Ці методи вивчаються у курсах фотограмметрії та аерокосмічного знімання.

У зв'язку із загальним науково-технічним прогресом уможливилось створення метричних оптичних систем з дисторсією (на краю поля зображення) в 2–3 мкм при форматі знімка 230×230 мм. Це означає, що величина дисторсії співрозмірна з інструментальною точністю стереовимірювань; тому такі системи називають бездисторсійними (як приклад, аерофотокамера RC-30 фірми Leica, Швейцарія).

Аберації оптичної системи спричиняють погіршення якості зображення, яке своєю чергою, впливає на якість фотограмметричних вимірювань. До них зараховують сферичну та хроматичну аберації, кому, астигматизм. Методи боротьби з цими негативними явищами – проектування оптичних систем з мінімальними абераціями підбиранням оптичних компонентів, підвищенням якісних показників всіх технологічних операцій, пов'язаних із виготовленням оптичних систем.

Зміна геометричних розмірів фотокамери переважно стосується температурних впливів на оптику і металевий корпус камери. В результаті таких змін може змінюватися фокусна віддаль камери та віддалі між координатними позначками. Для боротьби з цим явищем застосовують сплави з малим коефіцієнтом температурного розширення.

Зміну фокусної віддалі фотокамери під впливом температури можна підрахувати за формулою:

$$\Delta f \approx f \cdot \tau(t_i - t_0), \quad (2.126)$$

де f – фокусна віддаль камери; τ – коефіцієнт лінійного розширення металу; t_0 – температура, за якої виконане калібрування камери; t_i – температура повітря під час фотографування. Розрахунки показують, що для сплаву силумін ($\tau = 2,3 \cdot 10^{-5}$) величина Δf коливається від сотих до десятих часток міліметра. Як приклад подамо відомості, що для фототеодолітів зміна температури на 5° викликає зміну Δf до 15 мкм, що встановлено дослідно. Отже, цей фактор необхідно враховувати, вносячи поправки як в елементи внутрішнього орієнтування, так і у виміряні координати точок знімка перед фотограмметричними побудовами.

Вібрація та змазане зображення негативно позначаються на якості зображення і знижують якість (а, отже, і точність) фотограмметричних вимірювань.

Методи боротьби – використання установок для гасіння вібрації, знімання на такій швидкості носія апаратури, за якої величина змазаного зображення не перевищує допустимої величини.

Деформація фотоматеріалу виникає з двох причин: через “старіння” матеріалу та всихання підкладки фотоемульсійного шару після фотохімічних робіт та висушування фотоматеріалу.

Деформацію поділяють на систематичну (рівномірну і нерівномірну) та випадкову. Систематична деформація описується афінним перетворенням; існують методики визначення параметрів цієї деформації та усунення її впливу перед фотограмметричними побудовами. Найвідоміші методи:

- поміщення у площині прикладної рамки фотокамери плоскопаралельної пластини із каліброваною сіткою хрестів;
- визначення параметрів деформації фотоматеріалу вдруковуванням тестової сітки у фотоматеріал з подальшим вимірюванням.

Деформація випадкова не підлягає точному визначенню. Її вплив можна зменшити, застосовуючи підкладку для фотоемульсійного шару з малим коефіцієнтом деформації, наприклад, лавсанову. Встановлено, що для кращих фотоплівок деформація лежить у межах 5–15 мкм (для знімка формату 18×18 см).

Дослідженням вищеназваних факторів займалися вчені з різних країн. Узагальнюючи отримані результати, можна зробити такі висновки:

1. Сукупний вплив різноманітних факторів спричиняє відхилення реальної фотосистеми від ідеальної. Характер результуючої похибки описується адитивною моделлю (2.124).
2. Випадкова складова результуючої, як правило, менша від систематичної похибки.
3. Як випадкова похибка, так і систематична не є постійними в часі і просторі. Їхній розмір коливається в діапазоні від кількох мікрометрів до десятих часток міліметра.
4. Значна частина систематичної постійної похибки повинна бути визначена спеціальними методиками і вилючена перед фотограмметричними побудовами.
5. Послаблення впливу змінної систематичної похибки та випадкової похибки можна досягти, застосовуючи вирівнювання за методом найменших квадратів, використанням методу самокалібрування та різноманітних геометричних умов для сукупності знімків, що перекриваються.

2.9.3. Похибки вимірювання фотокоординат

Вимірювання знімків на стереофотограмметричному приладі супроводжується такими похибками:

- інструментальні;
- візування на точки.

Інструментальні похибки поділяють на систематичні та випадкові. Систематичні похибки визначають під час дослідження приладу з використанням тест-сіток або макетних знімків-пластин. Їхній вплив можна виключити за допомогою юстування приладу або урахуванням перед фотограмметричним обробленням. Випадкові похибки залишаються; їх можна послабити під час фотограмметричного вирівнювання.

У разі візування на точки фотозображення переважають випадкові похибки. Оператор наводить вимірювальну марку на точку з певною точністю, яка залежить від контрасту та оптичної щільності зображення, роздільної здатності знімка, збільшення оптичної системи тощо. Серед систематичних похибок можна назвати особисту похибку оператора, яка є малодослідженою, і отже, про неї дуже мало відомо.

2.9.4. Фактори нестрогого математичного опрацювання

У початковому періоді розвитку аналітичної фотограмметрії через недосконалість обчислювальної техніки використовували наближені формули фотограмметричних зв'язків. Типовий приклад – це використання формул з урахуванням членів 1-го порядку малості під час розв'язання фотограмметричних задач. Сьогодні у зв'язку з використанням комп'ютерів обчислювальні проблеми значно спростилися. Тепер користуються строгими залежностями або застосовують ітераційний процес, як, наприклад, у разі лінеаризації рівнянь колінеарності чи компланарності.

Складнішою є проблема вирівнювання у фотограмметрії. Як відомо, у фотограмметрії і геодезії універсальною методикою є застосування методу найменших квадратів:

$$\sum PVV = \min \quad (2.127)$$

або у матричній формі запису

$$V^T P V = \min, \quad (2.128)$$

де V – вектор поправок до вимірів; P – вагова матриця.

Тут допускається, що похибки вимірів розподіляються за нормальним законом, і ця гіпотеза ґрунтується на величезному практичному досвіді. Хоча метод найменших квадратів найкраще розроблений і досліджений, але він не є універсальною математичною моделлю. У регресійному аналізі існують поняття функції втрат та функції регресії, які можна використати для вирівнювання у фотограмметрії чи геодезії. Їхнє використання потребує знання умовного закону розподілу випадкової величини, але не обмежується нормальним законом. Цю теорію ми подали в роботі [3].

Подальше спрощення полягає у застосуванні вагової матриці P . Якщо виміри незалежні і рівноточні, то $P=E$, тобто на діагоналі матриці P стоять ваги вимірів,

Нашими дослідженнями на макетних знімках [5] встановлено, що заміна $\Sigma=P=E$ призводить до появи систематичних помилок у мережах фототріангуляції та пониження точності побудов на 10–20 %.

Геометричний зміст зміщення δ_r точки на знімку зрозумілий з рис. 2.33. Точка A , що лежить на сфері з радіусом R , зображається в точці a ; її ортогональна проекція A_0 на знімку є в позиції a_0 . Зміщення $\delta_r = aa_0$, спричинене кривиною Землі, можна обчислити за формулою

$$\delta_r = Hr^3 / (2Rf^2), \quad (2.129)$$

де H – висота знімання; r – радіус-вектор точки a на знімку; R – радіус Землі ($R = 6370$ км); f – фокусна віддаль камери.

У разі невеликих висот знімання та недовгих маршрутів у координати кожної виміряної точки знімка необхідно ввести поправки перед фотограмметричними побудовами:

$$\Delta x = \delta_r \cdot \cos \chi, \quad (2.130)$$

$$\Delta y = \delta_r \cdot \sin \chi,$$

де r, χ – полярні координати точок на знімку.

Як видно з рис. 2.33, виміряні координати збільшуються на величину цих поправок (на рис. 2.33 показано збільшення радіуса-вектора).

Практичне значення має відповідь на запитання: якою є максимальна висота H , за якої можна нехтувати кривиною Землі. Задаючись допуском на зміщення $\delta_r = \Delta$, з (2.129) отримуємо

$$H \leq \frac{2 \cdot \Delta \cdot R \cdot f^2}{r^3}. \quad (2.131)$$

Для камери з $f = 150$ мм при $r = 150$ мм (край знімка) та при допуску $\Delta = 0.015$ мм (що відповідає розміру пікселя у разі сканування аерофотознімка в реальних умовах) отримаємо $H = 1300$ м.

Звідси можемо зробити важливий висновок: знімаючи камерою з $f = 150$ мм з висоти більше ніж 1300 м, необхідно врахувати вплив кривини Землі.

З'ясуємо тепер, як впливає неврахування кривини Землі на координати X, Z точки A' земної поверхні.

Геодезична висота цієї точки Z_z визначається відносно рівневої поверхні, так що $Z_z = A'A$. Фотограмметрична висота визначається у вибраній системі просторових координат так, що $Z_\phi = A'A''$. З основних математичних викладок можна отримати відповідну формулу:

$$Z_z = Z_\phi + \frac{X^2}{2R}. \quad (2.132)$$

Якщо $R = 6370$ км та виражаючи висоти у метрах, маємо

$$Z_z = Z_\phi + 0,0785 X^2. \quad (2.133)$$

Тут під величиною $X = NA''$ розуміють довжину знімального маршруту. Якщо $X = 10$ км і $Z = 0$, отримуємо похибку 7,8 м.

Для підрахунку планового спотворення маємо

$$\delta X = X_z - X_\phi = AN - A''N. \quad (2.134)$$

Існує вираз [10]:

$$\delta X = \frac{X^3}{3R^2} + Z \frac{X}{R}.$$

Якщо $X = 10$ км і $Z = 0$, маємо $\delta X = 8$ мм. Якщо віддаль становить 100 км, то похибка планової координати $\delta X = 8,3$ м.

Отже, кривина Землі дуже сильно спотворює висоту точки і доволі слабо впливає на її планове положення.

Користуючись цим викладом, можна отримати вирази, що описують вплив кривини Землі на розв'язання основних фотограмметричних задач.

Нарешті, ще раз вкажемо на універсальний підхід до урахування цього фактора: якщо відомо, що кривиною Землі не можна знехтувати, то алгоритм дій такий:

1. Від геодезичних координат B, L, H (див. п. 2.3) переходять до геоцентричних координат x, y, z .
2. Виконують розв'язання фотограмметричних задач (побудов) у геоцентричній системі координат.
3. Виконують перехід від геоцентричної до геодезичної системи координат.

3. КОМП'ЮТЕРНЕ ОПРАЦЮВАННЯ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

3.1. Основи перетворення образу у цифрову форму

3.1.1. Сприйняття зображень

Розглянемо спочатку, як око сприймає навколишній світ. Необхідною умовою бачення є наявність світла. Як відомо із фізики, світло – це форма енергії, яка являє собою електромагнітні коливання або хвилі. Ми бачимо предмети, якщо вони випромінюють або віддзеркалюють світлові хвилі від джерела світла.

Будова ока

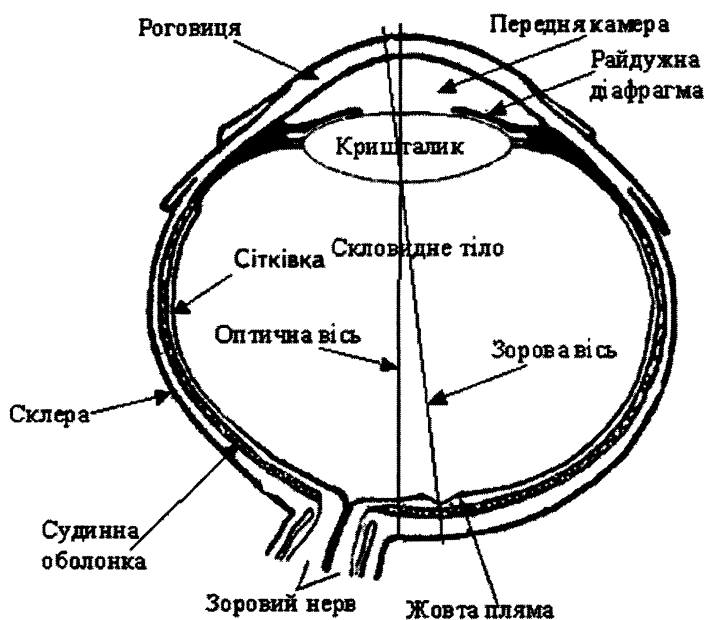


Рис. 3.1. Поперечний розріз ока

Системи відображення графічної інформації діють на зоровий апарат людини, тому повинні враховуватись як фізичні, так і психофізіологічні особливості зору. Функція ока людини – сприйняття світлових хвиль. Світло, що випромінює джерело, являє собою суміш світлових хвиль різної довжини. Довжина світлових хвиль визначається у нанометрах (нм), які являють собою мільярдні частки метра (10^{-9}). Наше око сприймає світлові хвилі з довжинами від 380 нм до 780 нм. У світлі міститься вся інформація про яскравість та колір. Яскравість відповідає загальній енергії усіх світлових хвиль, а кольоровість, навпаки, пов'язана з домінантними довжинами хвиль у суміші світлових хвиль.

Зоровий апарат людини

На рис. 3.1 показано поперечний розріз очного яблука людини. Око має майже сферичну форму з середнім діаметром близько 20 мм. Середину ока заповнює скловидне тіло, яке оточують три шари клітинок, рогівка, склера та сітківка. Прозора рогова оболонка покриває передню поверхню ока. Склера – це неперервне продовження рогівки. Судинна оболонка містить мережу кров'яних судин, через які надходить живлення до ока. Райдужна діафрагма змінює кількість світла, що проходить в око через зіницю. Діаметр зіниці ока змінюється від ~ 2 мм (за яскравого світла) до ~ 8 мм (у разі малої освітленості).

Прозорий кришталик складається з волокнистих комірок і підвішений до війового тіла. Він містить від 60 до 70 відсотків води, близько 6 відсотків жиру та протеїну. Кришталик поглинає до 8 відсотків світла видимого спектра з порівняно більшим поглинанням хвиль короткої довжини. Інфрачервоне та ультрафіолетове світло поглинаються протеїнами у структурі кришталика. Надмірна кількість такого світла може бути причиною ушкодження ока.

Світло потрапляє в око через рогівку і фокусується кришталиком на внутрішній шар, який називається сітківкою. Різниця між звичайною оптичною лінзою та кришталиком полягає в тому, що кришталик є гнучким і змінює свою форму. Як ілюструє рис. 3.1, радіус кривини зовнішньої поверхні більший від радіуса кривини внутрішньої поверхні. Форма кришталика керується натягненням у волокні війового тіла. Фокусування кришталика на ближні та віддалені об'єкти здійснюється мускулами, які змінюють товщину кришталика. Відстань між фокальним центром кришталика змінюється від 17 мм до 14 мм, коли сила заломлення зростає від мінімуму до максимуму. Коли око фокусується на об'єкті на віддалі більший від 3 метрів, кришталик отримує найменше заломлення. Зі зменшенням відстані від об'єкта до ока кришталик посилює своє заломлення.

У нервових волокнах сітківки світло перетворюється на імпульси. Сітківка складається з трьох шарів клітинок. Світлочутливі клітинки, т. зв. колбочки та палички, формують шар клітинок у задній частині сітківки. Тому світло має спочатку пройти два шари клітинок, а потім потрапляє на колбочки та палички. Причини для такої зворотної будови сітківки не повністю зрозумілі, однак одне з пояснень говорить про те, що розташування світлочутливих клітинок у задній

частині сітківки дає змогу будь-якому паразитному незахопленому світлу потрапити на клітини, що розміщені безпосередньо позаду сітківки, які містять чорний пігмент – меланін. Клітини, що містять меланін, допомагають хімічно відновлювати світлочутливий візуальний пігмент у колбочках та паличках після того, як вони були відбілені на світлі.

Отже, внутрішній шар сітківки ока містить два типи світлочутливих рецепторів, які займають область з кутом більш ніж 170° щодо осі зору:

$\cong 75 - 150$ млн. паличок (довгі та тонкі рецептори нічного зору);

$\cong 6.5$ млн. колбочок (короткі та грубі рецептори денного зору).

Інформація від рецепторів передається у мозок по зоровому нерву, який містить близько 800 тисяч волокон.

Палички придатні тільки для сприйняття інформації про яскравість світла. Завдяки їм забезпечується можливість розпізнавання предметів в умовах поганого освітлення – навіть сірих на сірому фоні.

Призначення колбочок – розпізнавання кольорів. Через те, що паличок значно більше ніж колбочок, вони передають значно більше інформації в мозок. Як наслідок, ми розпізнаємо на чорно-білих фотографіях практично всю необхідну інформацію про об'єкти знімання. Чорно-біле кіно та телебачення створене значно швидше, ніж кольорове. Кольори тільки уточнюють інформацію про зображення. Люди, які не сприймають кольори (дальтоніки), нормально орієнтуються в світі, і тільки іноді не можуть прийняти правильне рішення, наприклад, не сприймають колір світлофора.

Колбочки та палички містять зорові пігменти. Зорові пігменти дуже схожі на будь-які інші пігменти тим, що вони поглинають світло, а ступінь поглинання залежить від довжини хвилі світла. Важлива властивість зорових пігментів полягає в тому, що коли зоровий пігмент поглинає фотон світла, то змінюється форма молекули і водночас відбувається перевипромінювання світла. Пігмент змінюється, а змінена форма молекули вже не так добре поглинає світло, як часто кажуть, “відбілюється”. Зміна формули молекули та перевипромінювання енергії певним, не до кінця зрозумілим способом, ініціюють світлочутливу клітинку до видавання сигналу.

Інформація від світлочутливих рецепторів (колбочок та паличок) передається іншим типам клітинок, які з'єднані між собою. Спеціальні клітини передають інформацію у зоровий нерв. Отже, волокно зорового нерва обслуговує декілька світлочутливих рецепторів, тобто деяке попереднє опрацювання зображення відбувається безпосередньо в оці, яке, по суті, являє собою висунуту вперед частину мозку. Ділянка сітківки, в якій волокна зорового нерва збираються разом та виходять з ока, позбавлена світлочутливих елементів і називається сліпою плямою.

Збудження світлових рецепторів (паличок та колбочок), які перетворюють світлову енергію на електричні імпульси, передаються через зоровий нерв у мозок, де остаточно розшифровуються.

Чутливість ока

При яскравому світлі чутливість паличок мала, однак за низьких рівнів освітлення їхня чутливість зростає і забезпечує сприйняття предметів у разі темного освітлення. Палички містять пігмент з максимальною чутливістю на хвилі довжиною близько 510 нм (точкова лінія на рис. 3.2) у зеленій частині спектра. Пігмент паличок часто називають зоровим пурпуром через його колір. Максимальна щільність паличок припадає на область під кутом зору 20° щодо осі.

Існують три типи колбочок, які відрізняються світлочутливим пігментом. Колбочки звичайно називають “синіми”, “зеленими” та “червоними”. Вищезгадані три пігменти мають максимальне поглинання відповідно на хвилях 430, 530 та 560 нм. Цим довжинам хвиль відповідають не сині, зелені та червоні кольори, а фіолетовий, синьо-зелений і жовто-зелений. Логічніше було б застосувати назви “коротко”-, “середньо”- та “довгохвильові колбочки”.

Коли в око потрапляє світло, яке складається переважно із довгих хвиль, то відбувається збудження відповідних колбочок, і таке світло сприймається як червоне. Якщо світло містить довгі і середні хвилі, то на нього реагують два види колбочок, і воно сприймається як жовте, утворене із суміші червоного та зеленого. Якщо в світлі наявні хвилі всіх довжин, то одночасно збуджуються всі три види колбочок, і ми сприймаємо світло як біле.

Максимальна щільність колбочок досягається в області при куті зору близько $8^\circ \times 6^\circ$ щодо осі, яка проходить через жовту пляму. У центрі цієї області (в ямці) до кожної колбочки підходить окреме волокно зорового нерву. Це область максимальної гостроти зору.

І палички, і колбочки поглинають світлові хвилі, і обидва види клітинок реагують на інтенсивність світла, що падає. Основна відмінність полягає в тому, що палички поглинають світлові хвилі всього видимого спектра, тоді як колбочки ефективно розрізняють певні довжини хвиль.

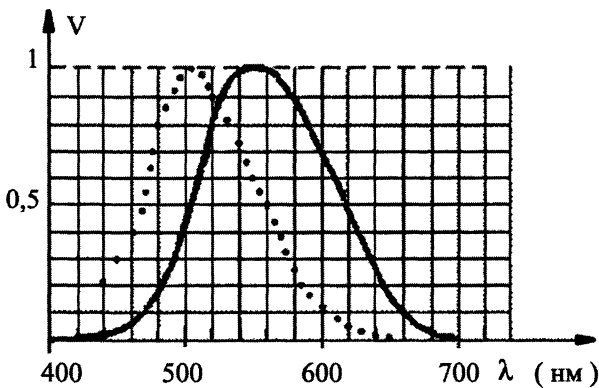


Рис. 3.2. Спектральна чутливість ока

Сумарна крива спектральної чутливості ока V при яскравому освітленні, тобто для кольорового зору показана на рис. 3.2 суцільною лінією.

З цих графіків стає зрозумілим, чому “вночі всі коти сірі”. Насправді, наприклад, реакція на червоний колір ($\lambda=700$ нм) за низьких рівнів освітлення (точкова крива на рис. 3.2) практично дорівнює нулю. Тому червоний колір вночі виглядає чорним.

Внаслідок того, що коефіцієнт заломлення в райдужці і кришталику зростає зі збільшенням частоти хвиль, око не позбавлене хроматичної аберації – коли зображення сфокусовано для однієї з частот, то на інших частотах зображення буде розфокусовано. Кришталік оптимально фокусує на сітківці світло з довжиною хвилі 560 нм. Оскільки піки чутливості середньо- та довгохвильових колбочок (530 і 560 нм відповідно) близькі один до одного, то зображення для цих колбочок можуть бути одночасно сфокусовані. Зображення для короткохвильових колбочок будуть розмиті. Оскільки ступінь фокусування є різним для різних типів колбочок, то немає потреби в однаковій роздільній здатності ока для різних типів колбочок. Око людини на одну короткохвильову колбочку містить 20 середньо- і 40 довгохвильових колбочок. Зважаючи на це, частота пропускання для “холодних” короткохвильових кольорів в телебаченні є істотно меншою, і не відзначається втрата якості відтвореного образу.

Всі пристрої, які виконують опрацювання кольорової інформації, ґрунтуються на виокремленому розпізнаванні різних кольорів, як правило, червоного, зеленого та синього. В основі адитивного кольорового синтезу лежать дві властивості світла: можливість розкласти на кольорові складові та можливість отримання багатьох кольорів змішуванням основних.

3.1.2 Кольорове охоплення та моделі кольору

Подання кольору в числовому вигляді належить до доволі складних задач, хоча поняття кольору видається нескладним. Колір – це об’єктивна та суб’єктивна характеристика об’єкта. Рису суб’єктивності кольору надає спостерігач. Реальне світло (наприклад, денне) є сумішшю різних світлових хвиль, отже, має різний спектр. Око людини сприймає світлові хвилі в певному інтервалі довжин та інтенсивностей (видимий інтервал випромінювання). Потім мозок людини опрацьовує сигнали, що надходять, сприймаючи предмети розфарбованими, залежно від суміші довжин хвиль та їхньої інтенсивності. Отже, реально колір пов’язаний не тільки з самим предметом, але й з особливостями фізіологічного сприйняття конкретним спостерігачем.

На сприйняття кольору впливають етнокультурні позиції суб’єкта. Так, народи Півночі колір, який ми сприймаємо, як білий, позначають різними словами. Давні греки синій та зелений кольори називали одним словом.

Умовно кольори можна поділити на випромінювальні та відбиті (які утворюються під час відбиття світла, що падає від об'єкта після часткового поглинання). Випромінювальні кольори – це кольори об'єктів, які світяться, такі, як сонце, вогонь, лампочки, зірки, екран телевізора. Для випромінювальних кольорів чорний колір – це відсутність будь-якого світла. Чим більші інтенсивність та спектр випромінювання, тим світло яскравіше. Максимально яскравий у випромінюванні колір – білий. Він містить в собі весь видимий спектр випромінювання. Відбиті кольори утворюються з білого доволі складно. Промінь повного спектра падає на предмети, які не світяться. Частина світла поглинається поверхнею предмета, а решта, яка залишилась, відбивається та сприймається оком. Якщо, наприклад, поглинаються всі довжини хвиль, крім червоних, предмет сприймається як червоний. Ці два типи кольорів відрізняються за властивостями. Кольори, які випромінюються, завжди яскравіші, ніж кольори, що віддзеркалюються, оскільки інтенсивність відбитого світла менша, ніж того, що падає.

Ще одна складність в описанні кольорів – це їхнє кількісне вираження. Око дуже чутливе до кольорів видимого спектра і легко розрізняє їх. Не існує пристроїв, які можуть відтворити весь діапазон видимих тонів, кольорів, відображених на екрані або на папері, і вони майже завжди відрізняються від оригінальних. Правильне передавання кольору на всіх етапах отримання зображення – дуже складна задача. Для коректного передавання всіх кольорів необхідно узгодити всі етапи підготовки зображення. Отже, математичне описання кольору важливе для практичної роботи.

Нижче розглянемо моделі, за якими описують кольори.

Для математичного описання кольору існує декілька кольорових моделей, але жодна з них не є універсальною (ідеальною). У кожній моделі прийнято декілька базових компонент і кожен базовий компонент робить свій внесок у створення конкретного кольору. Базові компоненти моделі називають каналами. Кольори, які можна описати, використовуючи цю модель, входять в її кольорове охоплення. Інакше кажучи, ці кольори утворюють кольоровий простір моделі. Всі моделі мають різне кольорове охоплення.

Розглянемо найвідоміші моделі кольорів.

Кольоровий графік МКО

Графік МКО (Міжнародна комісія з освітленості) або CIE (Commission International de l'Eclairage – the International Commission on Illumination) являє собою міжнародний стандарт для визначення кольору. МКО прийняла цей стандарт ще в 1931 р. З метою стандартизації комісія визначила такі довжини хвиль для трьох основних кольорів: синій = 435,8 нм, зелений = 546,1 нм і червоний = 700 нм. Графік МКО охоплює всі кольори, які здатне бачити око людини. Взагалі система МКО є розвитком моделі RGB на новій основі. У моделі RGB використовують три основні кольори, які випромінюють червоне, зелене та синє світло. Модель

RGB орієнтована на розв'язання практичних задач і тому використовує такі джерела основних кольорів, які можуть бути реалізовані.

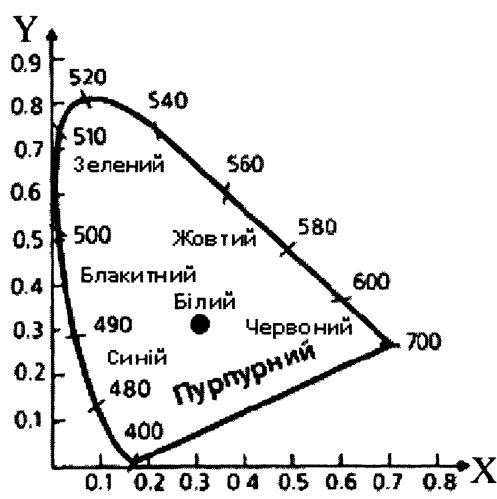


Рис. 3.3. Схематичне зображення графіка МКО

У системі МКО використовують джерела, які не існують в реальному світі. Ці абстрактні джерела дають змогу генерувати всі видимі кольори, використовуючи додатні значення червоного, зеленого і синього світла. Завдяки математичному нормуванню одне із трьох джерел світла може бути усунено, і для визначення будь-якого кольору достатньо мати тільки два джерела основних кольорів, які позначимо як x і y . Внутрішня частина графіка МКО вказує на кольори, які можуть бути сприйняті людським оком.

На лінії, що обмежує кольоровий простір МКО, розміщені всі чисті кольори. Їх можна отримати змішуванням джерел кольорів x і y . Наприклад, чистий червоний з довжиною хвилі 700 нм розуміють як результат змішування 70 % x та 25 % y . Кольори всередині контурної лінії можна отримати або змішуванням чистих кольорів, або змішуванням абстрактних основних кольорів x і y .

Всі кольори, які лежать всередині графіка МКО або на його межі, можна фізично реалізувати.

Тому їх можна застосовувати для отримання нових кольорів за допомогою адитивного змішування. Якщо відзначити три точки, що відповідають цим кольорам, і з'єднати прямими лініями, то автоматично отримаємо кольорове охоплення пристрою, в якому саме ці три кольори використовують як основні для адитивного кольорового синтезу.

У кольоровому охопленні є кольори, що входять в цей трикутник разом з граничними лініями. Адитивним синтезом неможливо отримати всі кольори, бо неможливо знайти три джерела, які фізично реалізуються і які б утворили трикутник, що охоплює всі видимі кольори.

Звичайно, не завжди використовують трикутник, його будують тільки для пристроїв, в яких кольори отримують адитивним змішуванням. Кольорове охоплення для друкованої продукції або для кольорової фотоплівки описується складнішими фігурами, оскільки кольори формуються з використанням інших принципів змішування. Типові приклади для діафільмів, монітора та офсетного друку наведено на рис. 3.4.

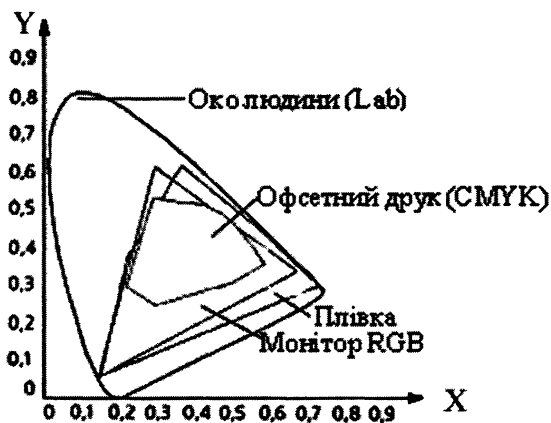


Рис. 3.4. Схема кольорового охоплення різних пристроїв

Як бачимо, фотоплівка дає змогу отримати більше кольорів, ніж відображається на моніторі.

Монітор, свою чергою, відображає більше кольорів, ніж може бути надруковано. Отже, система МКО є базою для визначення кольорового охоплення пристроїв.

Апаратно залежні кольорові моделі

- **Модель RGB** (RED – червоний, Green – зелений, Blue – синій) описує кольорове випромінювання. Базовими компонентами моделі є три кольори променів – червоний, зелений, синій. При сприйнятті кольору людиною власне вони безпосередньо сприймаються оком. Інші кольори являють собою суміш трьох базових кольорів у різних співвідношеннях. Кольори цього типу називають адитивними (Add – додавання). RGB – триканальна кольорова модель, використовується для кодування зображення у сканері, цифровому фотоапараті та при відображенні на екрані монітора.

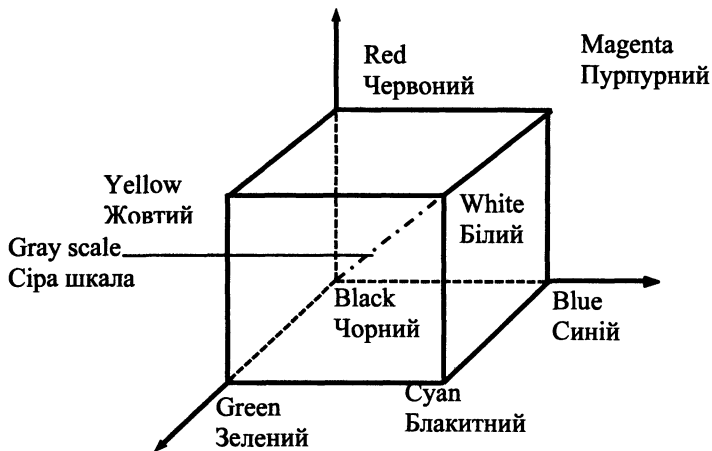


Рис. 3.5. Графічне подання моделі RGB

Зображення в моделі RGB. Кольоровий простір моделі зручно подати у вигляді кольорового куба (рис. 3.5). На осях координат відкладають значення кольорових каналів. Кожен з них може набувати значення від нуля (променів цього кольору немає) до максимального (найбільша яскравість світла). Внутрішня частина кубу містить усі кольори моделі. На початку координат значення кольорів каналів дорівнюють нулю (чорний колір). У протилежній точці, де всі канали досягають максимального значення, тобто всі кольори змішуються, утворюється білий колір. На відрізку, який з'єднує ці точки, розташовуються суміші рівних значень кольорів, які утворюють відтінки сірого (сіру шкалу) – від чорного до білого. Три вершини куба дають чисті вхідні кольори, інші три відображають подвійну суміш вхідних кольорів. У звичайному RGB зображенні кожен кольоровий канал і сіра шкала мають 256 градацій тонів.

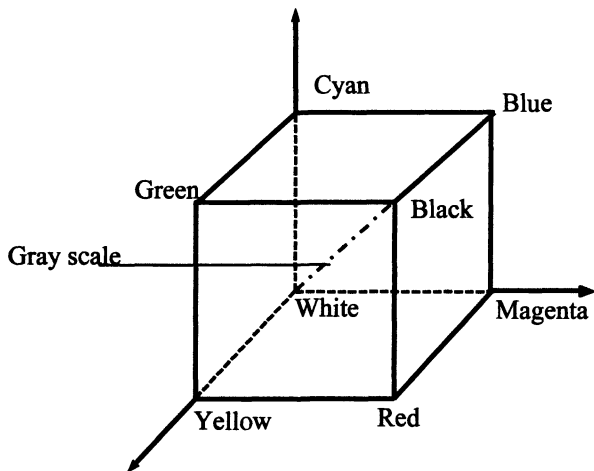


Рис. 3.6. Графічне подання моделі CMY

- Модель СМУ (Cyan – блакитний, Magenta – пурпурний, Yellow – жовтий).

Модель СМУ описує відображені кольори (фарби), які утворюються в результаті віднімання частини спектра світла, що падає, і називаються субтрактивними (Subtract – віднімання). При суміші кольорів результат темніший від вхідних, тому що кожний з кольорів поглинає частину спектра. Канали СМУ утворюються в результаті віднімання основних RGB-компонентів із білого світла. Це Cyan – блакитний (білий мінус червоний), Magenta – пурпурний (білий мінус зелений) і Yellow – жовтий (білий мінус синій).

Розвитком моделі СМУ є модель СМУК. Вона описує реальний кольоровий друк на офсетній машині чи кольоровому принтері. Пурпурна (фіолетова), блакитна і жовта фарби (поліграфічна тріада) послідовно наносяться на папір у різних пропорціях, і у такий спосіб відтворюється значна частина видимого спектра. У ділянках чорного і темних кольорів наноситься також чорна фарба. Це четвертий базовий колір, який вводиться в модель. Реальні фарби містять домішки і у суміші дають не чорний, а темно-коричневий колір.

СМУК можна розглядати як похідну моделі СМУ. Простір цієї моделі аналогічний до простору моделі RGB, в який перенесено початок координат (рис. 3.6). Суміш максимальних значень всіх трьох компонентів дає чорний колір. У разі повної відсутності фарби (нульове значення складових) отримуємо білий колір (білий папір). Суміш рівних значень трьох компонент дає тони сірого кольору.

Модель СМУК призначена спеціально для описання друкованих зображень, тому її кольорове охоплення значно вужче ніж RGB (це тому, що вона описує кольори, які відбиваються, інтенсивність яких завжди менша, ніж у кольорів, які випромінюються). При перетворенні у СМУК треба задати велику кількість технологічних характеристик – вибрати фарбу і колір, врахувати особливості технологічного обладнання тощо.

Додатковою особливістю моделі є введення чорного кольору, оскільки суміш СМУ-фарб не дає глибокого чорного кольору. У разі переведення у СМУК програма заміняє у темних областях тріадні фарби на чорний колір, чорний колір підкреслює контури зображених предметів, візуально підсилює різкість. Кольорова система СМУК є апаратно-залежною. Кольорове відчуття визначається до того ж навколишнім освітленням. Жодний об'єкт не може віддзеркалювати колір, який не випромінює джерело світла.

Описані кольорові моделі є апаратно залежними. Виводячи одне і те саме зображення на різних пристроях (наприклад, на різних моніторах) можна отримати різний результат. Отже, колір залежить як від базових складових, так і від параметрів пристроїв: якості і марки фарби для друку, властивостей паперу, властивості люмінофора та інших параметрів конкретного монітора, принтера або друкарського обладнання. Крім того, існування різних моделей для кольорів, які випромінюються та віддзеркалюються, незручне у разі комп'ютерного опрацювання кольорових зображень. У поліграфічний процес входять системи, які працюють як в моделі RGB (сканер, монітор), так і СМУК (фотонабір,

друкарська машина). У ході роботи необхідно перетворювати колір з однієї моделі в іншу. Оскільки ці моделі мають різне кольорове охоплення, перетворення супроводжується значними втратами тонів зображення.

Для правильного відображення кольору зручно визначити стандартну модель, до якої можна звести кольори на всіх етапах процесу.

Апаратно незалежні кольорові моделі



Рис. 3.7. Кольоровий круг

- Кольорова модель HSB (Hue, Saturation, Brightness) описує кольори за допомогою трьох незалежних характеристик – кольорового тону, насиченості та яскравості. До таких систем належать системи HSV, HSI, HLS.

Для визначення системи кольорів HSB використовують її подання у вигляді круга (рис. 3.7). На цьому крузі розташовані кольори видимого спектра, як цифри на годиннику. Їхнє розташування визначається кутом радіальної кольорової стрілки, який може набувати значення від 0° до 360° . Зазвичай для чисто червоного кольору беруть кут 0° , для чисто зеленого 120° і для чисто синього – 240° .

У кольоровому крузі насиченість кольору визначають як радіальні характеристики – насиченість зростає від центра круга до його границі. Отже, кут стрілки визначає кольоровий тон, а відстань від центра показує насиченість. Як правило, за радіус кольорового круга беруть одиницю, тоді насиченість кольору може набувати значення від нуля до одиниці, причому 0 відповідає білому кольору, а 1 – повністю насиченому чистому кольору. Часто значення насиченості визначають у відсотках між 0 % і 100 %.

Значення яскравості є незалежним і не прив'язане до кольорового круга. Воно змінюється також в межах від 0 до 1, або відповідно від 0 % до 100 %.

Зрозуміло, що кольоровий тон і насиченість кольору неможливо виміряти безпосередньо. Тому будь-яка форма введення кольорової інформації завжди починається з визначення червоної, зеленої та синьої складових у системі RGB. Потім значення HSB отримують за допомогою математичних розрахунків.

- **Модель Lab.** Успішною спробою створення апаратно незалежної моделі кольору, яка ґрунтується на сприйнятті кольору людиною, є модель Lab. Позначення L означає яскравість (Luminosity). Будь-який колір в Lab визначається яскравістю і двома хроматичними компонентами: параметром *a*, який змінюється в діапазоні від зеленого до червоного, і параметром *b*, який змінюється в діапазоні від синього до жовтого. Яскравість в моделі Lab повністю відокремлена від кольору. Це робить модель зручною для регулювання яскравості, контрастності, різкості та інших тонових характеристик зображення. Охоплення Lab включає охоплення всіх інших кольорових моделей, які використовують в поліграфічному процесі.

До подібних моделей кольору можна зарахувати системи YUV YCbCr. Позначення Y означає яскравість. Cb визначає колірність (Chrominance) для вхідного синього (blue); за допомогою Cr позначається колірність для вхідного червоного (red). Вхідний зелений отримується як комбінація цих трьох значень.

Основна перевага роботи в системах HSB, Lab та подібних – це їхня апаратна незалежність. Згідно з вищевказаним, якщо задавати значення RGB або CMYK, неможливо однозначно визначити колір без урахування характеристик пристроїв введення і виведення. Якщо скористатись системою типу HSB або Lab, то заданий кольоровий тон, насиченість та інтенсивність однозначно визначають колір. Відповідні апаратні пристрої або програмне забезпечення виконують перетворення цих даних у значення RGB або CMYK і забезпечують отримання правильного кольору.

Перетворення монохромних чорно-білих і напівтонових зображень у цифрову форму

Ми вже детально описали властивості світла і кольору. Далі розглянемо основу перетворення у цифрову форму зображення. Перетворення будь-якого аналогового сигналу (звуку, зображення) у цифрову форму називається *дискретизацією* і складається із двох основних операцій: *вибірки* та *квантування*. Вибірка стосується вибору на полі спостереження дискретної множини точок. Задача квантування полягає у призначенні яскравості із набору фіксованих величин – рівнів квантування кожній вибраній точці. Спочатку розглянемо проблему вимірювання яскравості.

Під час цифрового опрацювання розрізняють два види чорно-білих зображень: двоградаційні і напівтонові. Двоградаційне або бінарне зображення

складається тільки із чорних і білих елементів, а напівтонові зображення містять також відтінки сірого.

Першим кроком під час введення зображення є вимірювання розподілу яскравості в зображенні за допомогою світлочутливих сенсорів. Найважливішою деталлю сенсора є напівпровідниковий елемент, який змінює електричні властивості залежно від величини світла, що падає. Світлові хвилі викликають або зміну опору напівпровідникового елемента, або зміну рівня заряду мікроскопічних за розміром конденсаторів. У такий спосіб яскравість точки зображення може бути визначена напругою, яка вимірюється світлочутливим сенсором.

Залежність між яскравістю елемента зображення та напругою сенсора, як правило, нелінійна. Вищенаведена залежність може бути використана для автоматичного коригування зображень. Інші коригування, зокрема, пов'язані з відхиленнями в яскравостях у принтерах та моніторах, повинні виконуватись самим користувачем.

На другому етапі вимірювання аналогове значення, яке отримується для елементів сенсора, перетворюється на дискретне значення (таке, що можна виразити цілим числом). Необхідне перетворення виконується за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП), що схематично показаний на рис. 3.8. Перетворення неперервних аналогових даних, які переходять під час вимірювань у ступінчасті або “дискретні”, називають *квантуванням*. Інакше кажучи, квантування – це заокруглення величини відліку. Рівні квантування ділять весь діапазон зміни значень яскравості на скінченну кількість інтервалів.

Чим дрібніші сходинки, на які поділяється аналоговий сигнал, тим вища якість квантування.

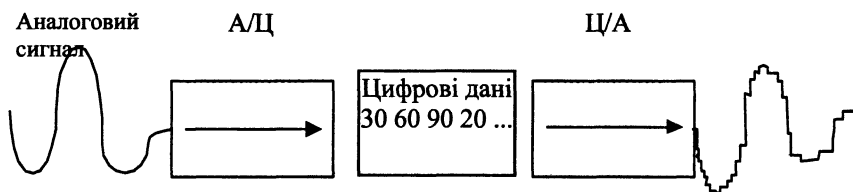


Рис. 3.8. Принцип аналого-цифрового та цифроаналогового перетворювача

Оскільки сканування здійснюється одночасно сенсором з багатьма елементами, зображення може бути розкладено на окремі точки і передано для подальшого опрацювання.

За цим принципом працюють всі апарати, які готують зображення для комп'ютера. Цей процес полягає в розкладанні зображення на точки, і його називають *вибіркою*. Інформація про яскравість кожної точки заноситься у комп'ютер.

У найпростішому випадку після оцифрування отримуємо двоградацийне бінарне зображення. Тоді оцифровувач працює з раніше встановленим порогом (деяке число). Нижче від цього порога точка сприймається як чорна (цифрове значення 0), а вище від порога – як біла (цифрове значення 1). Такий режим роботи використовується для цифрування креслень або сторінок тексту.

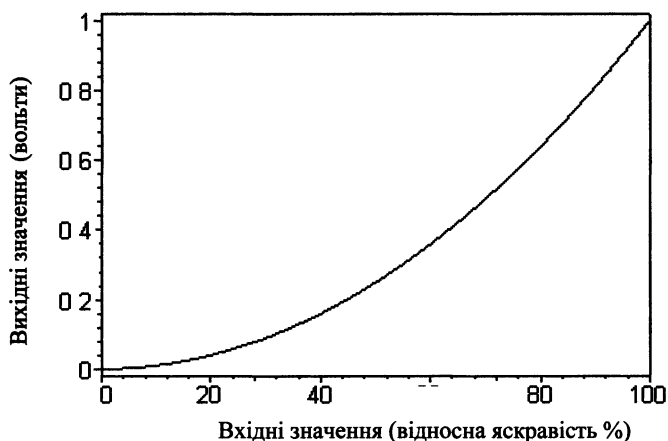


Рис. 3.9. Графік залежності яскравості та напруги на сенсорі

Для цифрування фотографій, які містять багато відтінків сірого, застосовують напівтоновий режим. Як результат для кожної точки зображення отримують цифрові значення, що відповідають яскравостям цих точок (рис. 3.9). У разі використання оцифровувача, який здатний розрізняти 256 рівнів сірого, на комп'ютер для чорних точок буде передаватись 0, для білих точок – значення 255. Значення для сірих точок будуть лежати між цими граничними значеннями. Вибір меж 0..255 зручний для запису яскравості кожної точки зображення в один байт. Отже, неперервне зображення наближається множиною точок, яка впорядковується у формі матриці, де кожний елемент масиву отримує дискретне значення. Цю матрицю називають *цифровим зображенням*. Кожний елемент матриці називають елементом зображення або пікселом (від англ. *picture element*).

Цифрування кольорових зображень

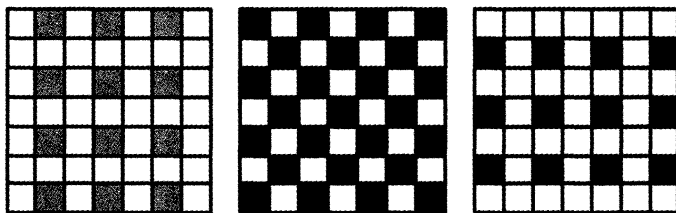
Розглянемо процеси, які виникають під час цифрування кольорових зображень. У кольоровому зображенні поряд з інформацією про яскравість міститься також інформація про кольори. Цифрування кольорових зображень принципово не відрізняється від цифрування чорно-білих зображень. Основна відмінність полягає в тому, що світло, яке віддзеркалюється від зображення, розкладається на зелену, синю та червону складові, кожна з яких потім цифрується

окремо. Колір кожної точки зображення після цифрування записується трьома числами – трійкою RGB, які відповідають інтенсивностям трьох кольорів.

Для цього в пристроях застосовують різні фільтри, які забезпечують подання на світлочутливі сенсори світла в певних діапазонах довжин хвиль, на які реагують ці сенсори. У сканерах і спрощених телевізійних камерах застосовують ПЗЗ-кристали, на які нанесені такі фільтри безпосередньо.

Перетворення у цифрову форму цифровою камерою

Перетворення зображення, створеного об'єктивом, у цифровий формат виконується поетапно. Спочатку у фоточутливій ПЗЗ-матриці відбувається накопичення заряду. Електронний затвор вмикає всі декілька мільйонів фотодіодів матриці на той час, який визначений витримкою. Заряд, який пройшов через фотодіоди, збирається у спеціальних “кишенях”, які розміщені у кременевій підкладці. Величина зібраного заряду під кожним пікселем пропорційна до локальної освітленості і часу експозиції. Зчитування інформації відбувається по рядках, кожний фотозаряд начебто зважується за допомогою цифроаналогового перетворювача та перетворюється у цифрове значення яскравості кожного пікселя. Далі мікропроцесор із сукупності цих чисел формує файл, який може бути або переданий напряму в комп'ютер через USB-порт, або записаний в карту пам'яті камери. Подивимось, як цифровий фотоапарат перетворює потік світла на файл зображення. Матриця, яка запам'ятовує зображення у цифровій камері, складається з масиву світлочутливих комірок, які відповідають пікселям зображення. Кожна комірка діє аналогічно до фотоекспонетра: вона виробляє електричний сигнал, пропорційний до інтенсивності світлового потоку, який потрапив у комірку. Отже, матриця сприймає зображення у сірому тоні, пікселі розрізняються між собою за яскравістю. Комірки матриці сприймають, як правило, глибину сірого тону в 12 бітів (у потужніших камерах 14 бітів), тобто 4096 (16384) градацій сірого кольору. Для отримання кольорового зображення у більшості сучасних камер встановлюється спеціальний фільтр, який покриває кожную комірку червоним, синім або зеленим фільтром – фільтр Байера, який встановлюється безпосередньо перед матрицею (рис. 3.10, 3.11). Кольорові фільтри збираються у групи по чотири, причому на два зелені припадає по одному червоному та одному синьому. Це зроблено тому, що людське око найчутливіше до зеленого кольору. Тепер кожна комірка містить інформацію про інтенсивність свого кольору. У результаті на матрицю надходить мозаїчна картинка в сірих тонах. Порівнявши отримане напівтонове зображення та схему розташування фільтрів Байера, одержимо псевдокольорове зображення. Іншими словами, це та сама картинка, де кожен піксел пофарбований відповідно до того, під яким фільтром він розміщений. Тепер, щоб отримати кольорове зображення, необхідно здійснити інтерполяцію за певним алгоритмом, який визначить колір кожного пікселя.



Червоний

Зелений

Синій

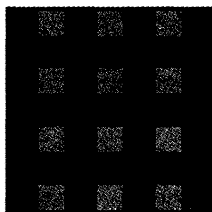
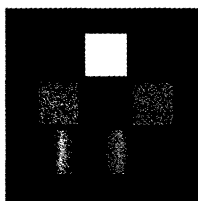


Рис. 3.10. Фільтр Байера



Зображення

RGB

зображення перетворюється на три такі:



R

G

B

Червоний

Зелений

Синій

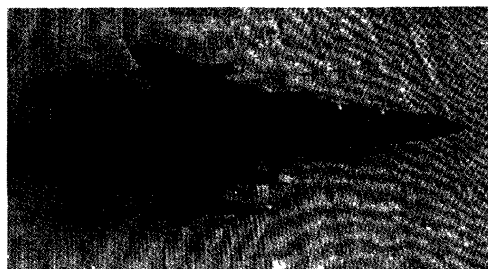
Рис. 3.11. Розклад зображення фільтром Байера на базові кольори

Роздільна здатність цифрування

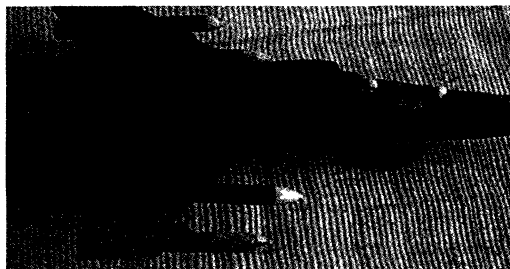
Точність цифрового подання кольорових і напівтонових зображень залежить від двох факторів, а саме від кількості вибірових точок, на які розкладається зображення, і від кількості рівнів квантування, за якою визначається яскравість, або

кількості кольорів у точках зображення. Далі ці два фактори будемо називати *просторовою роздільною здатністю* і *тоновою роздільною здатністю*.

Просторова роздільна здатність визначається розміром матриці цифрового зображення. Із збільшенням просторової роздільної здатності підвищується і якість оцифрованого зображення, але водночас зростає об'єм пам'яті, необхідний для збереження зображення. Якщо просторова роздільна здатність нижча від певного значення, то виникає так званий муар-ефект, який проявляється у вигляді хвилястих ліній, плям та нечітких контурів та у вигляді деяких інших спотворень (рис. 3.12, а). Щоб уникнути муар-ефекту, розмір елемента зображення не повинен перевищувати найтоншої деталі, що міститься у зображенні (рис. 3.12, b). Крім того, в результаті недостатньої вибірки стають помітними окремі пікселі та прямі, які не є горизонтальними або вертикальними і мають нерівні, східчасті краї (рис. 3.13).



а



б

Рис. 3.12. Муар-ефект

Тоновая роздільна здатність визначається кількістю рівнів квантування. Недостатня кількість рівнів квантування призводить до появи фальшивих контурів, які особливо помітні в областях однорідного тону (рис. 3.14).



256×256



128×128



64×64

Рис 3 13 Залежність між якістю зображення та щільністю вибірки



256

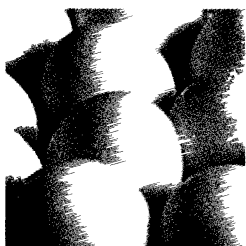


16

a



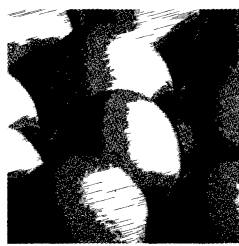
8



256



16



8



2

б

Рис 3 14 Залежність якості зображення від кількості рівнів квантування

Зображення у цифровому поданні дає змогу застосовувати достатньо ефективні алгоритми стиснення і записувати декілька сотень кадрів на одну карту пам'яті. Цифра прийшла недавно у фотоіндустрію, але темпи втілення цієї технології дуже високі, і сьогодні кількість цифрових камер перевершує кількість плівкових. До речі, фірма Kodak вже припинила продаж плівкових апаратів у розвинутих країнах.

3.2. Візуалізація цифрових образів на екрані комп'ютера

Під терміном “візуалізація” розуміють відображення інформації на екрані монітора. Графічне подання зображень здійснюється за допомогою спеціальної графічної плати (відеоадаптера). Монітор і відеоадаптер утворюють єдиний функціональний вузол і повинні бути узгоджені один з одним.

Спочатку розглянемо, як зображення відображається на екрані комп'ютерного монітора. Для цього нагадаємо процеси, які необхідні для цифрування та відтворення зображень.

Цифрування завжди починається з розкладу зображення на окремі елементи та вимірювання яскравості та колірності кожного з цих елементів. Отримані під час вимірювання інтенсивності (аналогове значення – напруга) перетворюються в аналого-цифровому перетворювачі на числові значення, які потім вводять у комп'ютер. Там вони зберігаються у вигляді матриці цифрових значень, яка звичайно називається “Bitmap” (бітова матриця). Тому оцифроване зображення називають також зображенням у форматі бітових матриць. Інша – поширеніша назва матричного зображення – растрове.

Бітові зображення принципово відрізняються від векторних зображень, в яких елементами є окремі графічні об'єкти (примітиви) – відрізки, кола, дуги, лінії, прямокутники або послідовності шрифтових знаків тощо. Введені примітиви мають математичне подання, і при їхньому відображенні на моніторі чи папері комп'ютер здійснює відповідні обчислення для точного відображення графічних об'єктів. Перевагою векторного зображення над бітовим є можливість його перетворення без втрати якості. Крім того, кожен елемент векторного зображення можна змінювати незалежно від інших. На рис. 3.15 проілюстрована різниця збільшення векторного (ліворуч) та растрового (праворуч) зображень.



Рис 3.15. Збільшення векторного (а) та растрового (б) зображень

Растрове зображення містить цифрову інформацію про колір кожної точки зображення – піксела. Піксел цифрового зображення – це лише дані про колір точки зображення, а сам піксел не має фізичних розмірів.

Зображення у цифровій формі зберігається в пам'яті комп'ютера. Щоб побачити зображення, необхідно скористатись будь-яким пристроєм виведення, наприклад, монітором або принтером. Ці пристрої самі по собі є растровими: на

екрані монітора і на відбитку принтера зображення також складається із кольорових точок. Елементи растрової сітки люмінофора, що формують зображення на моніторі, також називають пікселями. На паперовому відбитку растрову сітку формують плями фарби або тонера, які називають точками (а не пікселями).

Те саме стосується і пристроїв введення зображень, які використовують растрову технологію: сканерів та цифрових камер. Сканери вимірюють кольори паперового або прозорого оригінала в окремих точках. Виміри здійснюються по всій площі оригінала з однаковим кроком по горизонталі і вертикалі. Аналогічно формується цифрове зображення і в цифрових камерах. Відмінність тільки в тому, що в них фіксується світло, відбите від реальних об'єктів. Всі растрові пристрої введення використовують регулярну прямокутну растрову сітку, що простіше реалізується технічно і найзручніша для опрацювання. З цієї причини растрові зображення також мають прямокутну форму. Це дає можливість вимірювати розмір зображення за двома вимірами – висотою і шириною – у пікселях (наприклад, 640×480 або 1024×768).

Для пристроїв введення і виведення зображень точки і піксели вже не є абстрактними поняттями. Вони характеризуються строго визначеними розмірами, які залежать від можливостей або режимів роботи обладнання. Основною характеристикою растрових пристроїв є роздільна здатність. Це величина, що показує, скільки точок растрової сітки пристрою припадає на одиницю довжини (як правило, сантиметр або дюйм). Отже, роздільна здатність вимірюється в точках на дюйм (dpi) або в точках на сантиметр (dpc). Якщо, наприклад, у документації до принтера вказана максимальна роздільна здатність 600 dpi, то це означає, що він здатний розташувати на одному дюймі 600 плям тонера або фарби. Якщо ж роздільна здатність 600 dpi вказана для сканера, то цей сканер здатний виміряти колір зображення в 600 точках на одному дюймі оригінала, який скануємо. Чим вища роздільна здатність, тим дрібніші точки растра, і зрозуміло, що водночас зростає розмір зображення.

Як же дізнатись про розмір, який буде мати на пристрої виведення (принтері, моніторі) зображення, для якого відомий розмір у пікселях? Відповідь на це ніби просте запитання насправді проста тільки для монітора. Більшість офісних моніторів (і відеоадаптерів) можуть працювати з різними, але типовими розмірами растрової сітки екрана у пікселях: 640×480 , 800×600 , 1024×768 . Щоб обчислити розмір, який буде мати зображення на екрані, треба знати роздільну здатність монітора. Очевидно, що роздільна здатність монітора дорівнює кількості пікселів по горизонталі або вертикалі, поділений на відповідний розмір видимої ділянки екрана. Кількість пікселів залежить від встановленого режиму роботи монітора, а розмір видимої ділянки – від його діагоналі та настроювання. Звідси випливає, що важко знайти пару моніторів з абсолютно однаковою роздільною здатністю. З цієї причини зображення, що призначені для екранного перегляду, розраховуються на найтиповіші величини 72 і 96 dpi.

Щоб дізнатись про фізичний розмір зображення на моніторі, треба поділити розміри зображення на роздільну здатність монітора. Наприклад, на моніторі з роздільною здатністю 96 dpi зображення розміром 100х100 пікселів буде мати розміри (1,04х1,04) кв. дюймів або (2,65х2,65) см². При роздільній здатності 72 dpi те саме зображення матиме вже інший розмір – (1,39х1,39) кв. дюймів або (3,53х3,53) см².

Кожний раз виконувати подібні обчислення, коли треба оцінити розмір зображення на конкретному пристрої виведення, незручно. Тому розмір растрових зображень найчастіше характеризують так само, як і растрових пристроїв – роздільною здатністю. У такому разі замість розміру в пікселях при створенні або скануванні зображень вказують роздільну здатність та фізичний розмір у сантиметрах або дюймах. Цифрове зображення від цього не набуде фізичних розмірів. Такий спосіб рівнозначний припущенню: “якби зображення виводилось на пристрій із заданою роздільною здатністю, то воно б мало заданий розмір”.

У разі виведення зображення на інші пристрої (принтер, фотонабірний автомат тощо) доводиться враховувати їхню власну технологію створення растра (растеризації).

Типи зображень

Основними типами зображень у вигляді бітових матриць, які використовують для оброблення цифрових зображень, є *монохромні двоградаційні, палітрові, напівтонові та зображення у істинних кольорах*.

Монохромні двоградаційні зображення складаються тільки із чорних або білих пікселів. Для їх запам'ятовування на кожен елемент достатньо одного біта. Однак на програмному рівні дуже важко працювати з окремими бітами, тому такі зображення спочатку перетворюють у восьмибітовий монохромний формат, а потім опрацьовують за допомогою програм оброблення зображень. Після вказаного перетворення необхідна ємність пам'яті збільшується у вісім раз.

У *палітрових (або індексованих)* зображеннях числове значення не визначає прямо колір елемента зображення. До зображення додається кольорова палітра, яка складається із 16 або 256 RGB-трійок, за допомогою якого непрямо визначаються елементи зображень (рис. 3.16). На 16 або 256 кольорів необхідно відповідно 4 або 8 бітів на піксел зображення. Усіх можливих RGB-трійок є $2^{24} = 16\,777\,216$, що дає вибір 16 або 256 кольорів з 16 777 216 кольорів та тонів.

Індекс	R	G	B
0	12	123	45
1	17	24	33
2	210	0	0
...
255	12	76	125

Рис. 3.16. Приклад палітри кольорів

Можливості оброблення палітрових зображень у різних програмах відрізняються. Причиною цього є обмежена кількість кольорів, що містять палітрові зображення. У багатьох операціях оброблення зображень виникають кольори, яких не було у початковому зображенні. Їх необхідно узгоджувати з наявною кольоровою палітрою, що з одного боку вимагає великих витрат часу, а з іншого – не дає змоги застосовувати багато операцій оброблення зображень.

У *напівтонових зображеннях* один елемент зображення в запам'ятовувальному пристрої займає також 8 бітів, тобто може набувати значення від 0 до 255. Це числове значення у напівтонових зображеннях безпосередньо характеризує яскравість. Напівтонові зображення опрацьовують без подальших перетворень.

У *зображеннях в істинних кольорах* кожен елемент запам'ятовується у вигляді RGB-трійки. Оскільки червона, зелена і синя складові кольору елемента зображення задаються числом від 0 до 255, то для запам'ятовування кожного окремого елемента зображення необхідно 24 біти. Таким способом можна відобразити $2^{24} = 16\,777\,216$ різних кольорів. Зображення в істинних кольорах дає найбільші можливості для подальшого оброблення і художнього втілення.

Характеристики моніторів

На початку розвитку комп'ютерної техніки на екранах моніторів (дисплеїв) відображалась тільки алфавітно-цифрова інформація. Проте робота зі знімками потребувала відображення складніших графічних образів, і з часом якість моніторів постійно покращувалася, можливості зростали. Елемент зображення на моніторі, як згадано раніше, називається пікселом. Ключовими характеристиками монітора є: діагональ екрана, максимальна роздільна здатність, частота регенерації (оновлення) кадрів та глибина кольору.

Розмір діагоналі екрана у дюймах визначає його розмір. Сьогодні найпоширеніші монітори з діагоналлю 17 дюймів, однак ще залишилися старі монітори з меншою діагоналлю. Для графічних станцій діагональ досягає 25 дюймів.

Роздільна здатність монітора характеризується кількістю пікселів, що відображається на екрані. Найменша роздільна здатність сучасних моніторів 1024x768 пікселів. Фізична роздільна здатність залежить переважно від розміру екрана та діаметра точок (зерна) екрана, електронно-променевої трубки (для сучасних моніторів близько 0,25 мм). Відповідно, чим більший екран, тим менший діаметр зерна і тим вища роздільна здатність. Роздільну здатність монітора можна встановлювати у ході роботи з комп'ютером. Максимальна роздільна здатність звичайно є вищою від фізичної роздільної здатності електронно-променевої трубки монітора. Тому встановлювати на моніторі максимальну роздільну здатність постійно – тільки псувати зір. Якщо необхідна робоча роздільна здатність, з якою ви намагаєтесь працювати, є граничною для монітора, то необхідно використовувати монітор з більшою діагоналлю.

Дуже важливою характеристикою монітора є *частота оновлення кадру*. Чим частіше відбувається оновлення зображення на екрані, тим менш помітне його миготіння. Кількість кадрів, що формується за секунду, називається частотою оновлення (регенерації) або вертикальною частотою. З ергономічних причин використовують вертикальну частоту не нижче за 75 Гц, тобто 75 кадрів на секунду. Нижче від цього значення вже стає помітним миготіння. Тому частота оновлення кадрів при робочій роздільній здатності має бути 75 Гц та вище, інакше очі будуть втомлюватись.

У табл. 3.1 наведено типові характеристики моніторів, на які треба орієнтуватись.

Таблиця 3.1

Характеристики моніторів

Діагональ монітора	Роздільна здатність	Частота регенерації
14"	640×480	75–85 гц
14"	800×600	75–85 гц
14"	1024×768	60 гц
15"	640×480	75–100 гц
15"	800×600	75–100 гц
15"	1024×768	75 гц
15"	1280×1024	60 гц
17"	640×480	75–110 гц
17"	800×600	75–110 гц
17"	1024×768	75–85 гц
17"	1280×1024	60–75 гц

Чим більша роздільна здатність зображення і/або вертикальна частота, тим більше рядків необхідно накреслити на екрані за одиницю часу. Тому важливою характеристикою монітора є кількість рядків зображення, що формується за одиницю часу. Цей параметр називається горизонтальною частотою монітора. Зі

збільшенням роздільної здатності та частоти регенерації зростає горизонтальна частота, з якою повинен працювати монітор.

Чим вища частота регенерації зображення, тим менше навантаження на зір.

Кількість кольорових тонів, які можна відобразити на екрані, визначається об'ємом пам'яті, що відводиться під окремий піксел. В сучасних умовах на кожен піксел відводиться мінімум 3 байти (24 біти), що дає змогу відобразити $2^{24}=16\,777\,216$ тонів кольору (режим True Color).

Типи моніторів

Сьогодні існують два принципово різні типи моніторів – з електронно-променевою трубкою та плоскопанельні, в яких використовуються матриці на рідких кристалах, плазмові або світловипромінювальні пластики.

Електронно-променеві монітори працюють за тим самим принципом, що і телевізійний екран. Відомо, що зображення в таких моніторах створюється завдяки випромінюванню світла люмінофором, який міститься на внутрішній поверхні трубки. Люмінофор активізується в результаті його опромінювання зарядженими частинками, які випускає електронна гармата, розташована біля основи катодної трубки. Недоліком електронно-променевих моніторів є великі габарити та негативний вплив на зір користувача.

Альтернативою електронно-променевим моніторам є *екрани з матриць на рідких кристалах* (Liquid Crystal Display або LCD). Перші LCD-монітори були монохромними, як екрани для наручних годинників та калькуляторів. Потім з'явилися і кольорові екрани. В основі технологій, за якими створюються рідинно-кристалічні монітори, лежать фізико-хімічні властивості групи речовин, які називають рідкими кристалами. Власне кажучи, це особлива рідина, молекули якої взаємно орієнтовані. Якщо подавати напругу на полюсні контакти, які розташовані на краях матриці, що заповнена рідкими кристалами, молекули речовини змінюють свою просторову орієнтацію. Внаслідок цього змінюються оптичні властивості матриці, а саме змінюються ступінь її прозорості та характеристики світла, яке віддзеркалюється.

Принцип формування зображення LCD-монітора аналогічний до електронно-променевих моніторів, тобто дія відбувається попіксельно. Однак замість променя електронної гармати, спрямованого до люмінофорів, ми маємо справу з великою кількістю електродів, кожний з яких відповідає за одиничний піксел зображення. Забарвлення пікселя у певний колір може відбуватись двома способами. Перший спосіб полягає у розкладанні білого кольору на складові частини з використанням кольорових фільтрів. Недоліком цього простого та недорогого способу є доволі значні втрати сили світлового потоку під час проходження через систему фільтрів. Другий спосіб значно кращий, але відповідно дорожчий та реалізується складніше. У такому разі використовують динамічні зміни характеристики вектора поляризації

потокую за рахунок зміни напруги. Різні частини спектра реагують на такі зміни по-різному, тому “зайві” частини випромінювання можна відкидати.

Основними перевагами LCD-моніторів порівняно з електронно-променевими є їхній значно менший негативний вплив на зір людини. До переваг належать абсолютно плоский екран, який відтворює зображення без спотворень, компактність, зручність в експлуатації та ергономічність. До негативних рис можна зарахувати високу ціну.

Плазмові монітори. Прообразом для створення *плазмових матриць* (Plasma Display Panels) були звичайні лампи денного світла. Плазмові монітори складаються із порожньої скляної панелі, заповненої газом. На поверхні внутрішньої сторони стінок виведені мікроскопічні електроди, які утворюють дві симетричні матриці, а ззовні ця конструкція покрита шаром люмінофора. Коли на контакти подається струм, між ними виникає мікророзряд, що змушує світитись (в ультрафіолетовій частині спектра) розташовані поруч молекули газу. Внаслідок цього засвічується ділянка люмінофора, так само, як це відбувається в звичайних електронно-променевих моніторах. Основні переваги цієї технології – висока яскравість та контрастність зображення та незначна товщина пристрою. Основні недоліки, які не дають змоги використовувати цю технологію для виробництва моніторів – це низька роздільна здатність та дуже висока енергоємність.

Світловипромінювальні пластики. Інша альтернатива розвитку моніторів – виготовлення дисплеїв на основі світловипромінювальних пластиків (Light Emission Plastics або LEP), які являють собою складні полімери. LEP-дисплей являє собою нашарування тонких полімерних плівок. Навіть порівняно з екранами на рідких кристалах пластикові монітори здаються зовсім тонкими – навіть декількох міліметрів достатньо для відтворення на них якісного зображення. За багатьма параметрами світловипромінювальні пластики мають переваги над всіма своїми конкурентами. На них не впливають інверсійні ефекти, що дає змогу змінювати картинку на такому дисплеї з дуже високою частотою. Для роботи LEP використовується струм низької напруги, і вони характеризуються низькою енергоємністю. Зокрема, пластик сам випромінює, а не використовує відбитий або прямий потік світла від іншого джерела. Недоліком цієї технології є обмежений термін експлуатації LEP-матриць та неякісне відтворення світловипромінювальним пластиком кольорового зображення.

Відеоадаптер. Сучасний відеоадаптер (відеокарта) – це другий окремий комп'ютер всередині персонального комп'ютера. У технічних характеристиках відеоадаптера вказують вимоги, які ставляться до монітора. При реалізації тривимірної графіки основну роботу виконує процесор відеокарти, а не центральний процесор. Якщо працювати тільки з офісними пакетами програм, то різниця у швидкості між сучасними та старими відеокартами непомітна. Тільки під час роботи з програмами графічного моделювання помітна не тільки вища

швидкодія роботи, але можна побачити, що сучасний відеоадаптер створює на екрані монітора реалістичне зображення.

Режими роботи відеокарти. Основний режим роботи відеокарти – це текстовий режим. У цьому режимі графічні елементи – лінії і прямокутники створюються з використанням псевдографічних символів. І тільки за командами операційної системи відеокарта перемикається в графічний режим. Розробники комп'ютерного обладнання вводять все нові та нові стандарти побудови зображення. З часом після чорно-білого монітора з'явились кольорові монітори. Далі послідовно збільшувались кількість точок і кількість кольорів, що виводились на екран. Відповідно кожен стандарт характеризується роздільною здатністю, глибиною кольору, а також способом синхронізації зображення.

Скажемо дещо про умовні позначення режимів (хоча більшість з них уже відійшли в минуле).

MDA (Monochrome Display Adapter – монохромний адаптер дисплею) – найпростіший відеоадаптер, який працював у текстовому режимі.

HGC (Hercules Graphics Card – графічна карта Hercules) – розширення MDA з графічним режимом 720×348, розроблене фірмою Hercules.

CGA (Color Graphics Adapter – кольоровий графічний адаптер) – перший адаптер з графічними можливостями.

EGA (Enhanced Graphics Adapter – поліпшений графічний адаптер) – подальший розвиток CGA.

VGA (Video Graphics Array – масив візуальної графіки) – XX ст.

SVGA (Super VGA – супер-VGA) – розширення VGA з вищими роздільними здатностями. Відеорежими додано із ряду 800×600, 1024×768, 1152×864, 1280×1024.

XGA (eXtended Graphics Array – розширений масив графіки).

Після режиму VGA йде режим SVGA, точніше, роздільну здатність вище за 640×480 та 16 кольорів зараховують до SVGA (Super VGA). Найпоширеніша така класифікація:

- VGA – 640×480;
- SVGA – 800×600;
- XGA – 1024×768;
- SXGA – 1280×1024.

Глибина кольору та роздільна здатність. Сьогодні найпоширеніші режими – це SVGA з роздільною здатністю 800×600 для 14- та 15-дюймових моніторів і 1024×768 для 17-дюймових. Отже, для роздільної здатності 800×600 зображення на екрані монітора складається із 480000 точок, для 1024×768 – із 786432.

Для кожної точки зображення вказується певний колір, який отримується за правилами RGB-моделі. Загальна кількість тонів може досягати мільйонів кольорів; для простих режимів використовують 16 або 256 кольорів. Об'єм необхідної відеопам'яті визначається залежно від роздільної здатності (кількість рядків

помножена на кількість точок у рядку) і глибини кольору (необхідної кількості бітів для зберігання інформації про окрему точку). Співвідношення між глибиною кольору та кількістю бітів на один піксел визначається за формулою

$$G=2^m,$$

де G – кількість кольорів (глибина кольору), а m – кількість бітів, що припадає на один піксел.

Таблиця 3.2.

Роздільна здатність та мінімальний об’єм відеопам’яті

Роздільна здатність	Кількість бітів на один піксел	Кількість кольорів	Об’єм відеопам’яті
640×480	8	256	512 Кбайт
800×600	8	256	1 Мбайт
800×600	16	65 536	1 Мбайт
800×600	24	16 777 216	2 Мбайт
1024×768	8	256	1 Мбайт
1024×768	16	65 536	2 Мбайт
1024×768	24	16 777 216	4 Мбайт
1280×1024	8	256	2 Мбайт
1280×1024	16	65 536	4 Мбайт
1280×1024	24	16 777 216	8 Мбайт

Отже, необхідний об’єм відеопам’яті b у бітах дорівнює

$$b = N \cdot M \cdot m,$$

де N – кількість пікселів у рядку; M – кількість рядків; m – кількість бітів на один піксел. Значення N і M визначаються вибраним режимом, а кількість кольорів залежить від кількості бітів, відведених на один піксел. У табл. 3.2 наведено тільки ті режими, які дає змогу використовувати сучасне програмне забезпечення.

Відеопам’ять виділяється блоками по 512 Кбайт, 1 Мбайт, 2 Мбайт, 4 Мбайт та 8 Мбайт. Для роботи сучасних офісних застосувань та перегляду відеофільмів достатньо 8 Мбайт відеопам’яті для роздільної здатності 800х600 або 16 Мбайт для

роздільної здатності 1024×768. Основна причина зусиль, спрямованих на збільшення пам'яті відеоадаптера, полягає в тому, що на платі адаптера розміщений графічний процесор, який може самостійно, за управляючими командами центрального процесора будувати об'ємні зображення. Це потребує надзвичайно великого ресурсу для зберігання проміжних результатів обчислень та зразків текстур для створення реалістичних зображень.

Апаратне пришвидшення графічних функцій. Для того щоб звільнити центральний процесор від зайвої роботи з відображення графічних примітивів, конструктори використали апаратні прискорювачі або акселератори. Спочатку використовувались акселератори на окремій платі. З розвитком напівпровідникової технології вдалося розташувати всі елементи апаратних прискорювачів на самій платі відеокарти. Нині чіп відеокарти самостійно обчислює нові параметри точок на екрані за командами центрального процесора.

Побудова тривимірних зображень потребує складних математичних розрахунків з плаваючою комою, тому найдосконаліші відеопроецесори мають математичний копроцесор. Отже, на сучасній відеокарті встановлено процесор, який мало відрізняється за продуктивністю від сучасного Pentium'а. Зазначимо, що сучасний відеопроецесор вміє моделювати не тільки дво- і тривимірні зображення, але і виконувати декомпресію стиснених відеоданих під час відтворення відеофільмів.

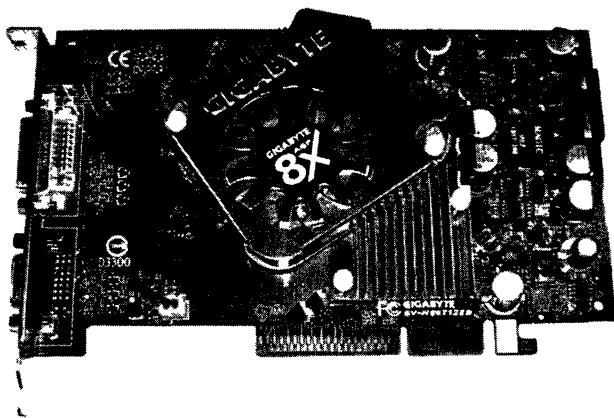


Рис. 3.17. Відеокарта NVidia GeForce 6600/6200 Series

Для прикладу можна скористатись з рекламного опису відеокарти (рис. 3.17), розміщеного в Інтернеті <http://itc.ua/article.phtml?ID=19590>. Результати, продемонстровані моделями цієї серії, стали справжньою несподіванкою для більшості спеціалістів. Справді, у середньому ціновому діапазоні продукти 6600/6600GT не мають рівних. А якщо додати до переваг відеокарти 6600 ще і підтримку останніх 3D технологій та невисокий рівень нагрівання, отримаємо найкращу серію ігрових прискорювачів середнього класу. Модель GeForce 6200 продемонструвала просто аномальну швидкодію.

3.3. Збереження цифрових зображень

Під час збереження зображень створюються графічні файли, які розміщуються на різноманітних дисках та інших носіях інформації. Графічні файли використовуються для збереження зображень для їхнього подальшого оброблення та перенесення даних між комп'ютерами. В оперативній пам'яті комп'ютера графічна інформація кодується у вигляді деякого масиву, в якому розміщені байти, які відповідають пікселям зображення і, у разі необхідності, ще деякі характеристики.

У файлах графічна інформація кодується інакше, ніж в пам'яті комп'ютера. Способи кодування називають форматами графічних файлів. Існує велика кількість форматів графічних файлів, що зумовлено різноманітністю сфер їхнього застосування. Графічний формат, як правило, можна розпізнати за розширенням імені файла. Ось далеко не повний список форматів: BMP, CUR, DCX, DIB, EMF, FAX, G3F, G3N, GIF, ICB, ICO, J2C, J2K, JP2, JPC, JPE, JPEG, JPG, PBM, PCX, PGM, PIX, PNG, PPM, PXM, RLE, TARGA, TGA, TIF, TIFF, VDA, VST, WBMP, WMF.

Вибір формату для збереження та оброблення графічних файлів залежить від сфери їхнього застосування. У разі помилкового вибору формату зображення може стати непридатним для використання.

Для зменшення розмірів графічних файлів використовують формати, що допускають стиснення, тобто зменшення кількості байтів для збереження файла. Для підтримки стиснення використовуються різноманітні алгоритми, які дають змогу зберігати графічні файли без втрат інформації або з втратою неістотної для зору інформації. Існуючі алгоритми уможливають значне стиснення, однак часто це призводить до погіршення якості зображення.

Якщо зображення планується використовувати тільки для екранного перегляду, то можна знизити якість зображення. Використання зображення для фотограмметричного оброблення не допускає зниження якості.

Для друку зображень великих розмірів також недоцільно стискати об'єм графічного файла, але для друку невеликих зображень, наприклад, фотографій розміром 9х13, зображення можна стискати.

Для передавання зображень через Інтернет рекомендується стискати графічні файли, особливо при передаванні зображень по телефонних лініях.

Сучасний цифровий фотоапарат середнього класу має матрицю елементів розміру 2272×1704 пікселів. Якщо передбачається тільки переглядати фотографії на екрані монітора, то зменшення роздільної здатності до роздільної здатності екрана 1024×768 зменшує об'єм файла в 5 разів. Якщо ж передбачається оброблення файла зображення для покращання естетичних якостей, то знімок доцільно зберігати у повному форматі, щоб мати можливість використати всю необхідну інформацію.

Кожний графічний файл складається з двох частин, заголовка і даних (рис. 3.18).

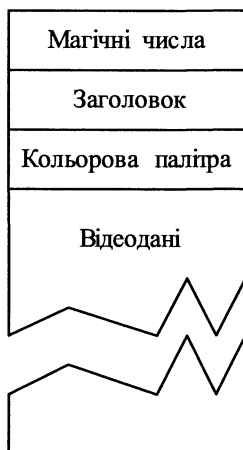


Рис. 3.18. Структура графічного файла

На початку заголовка розташовано декілька числових значень, які означають специфікацію файла (BMP, GIF, JPEG та інші). Всі програми оброблення зображень розрізняють формати файлів не за розширеннями, а за “магічними числами” (так їх називають у англомовній літературі). За ними слідує заголовок файла. Він містить загальні відомості про файл – ширину та висоту зображення, кольорове чи монохромне зображення, з якого місця починаються відеодані, чи використовується стиснення. Послідовність і спосіб запису цієї інформації в заголовку для кожного формату даних різні.

Індексовані зображення додатково містять палітру кольорів, відповідно до якої елементам зображення присвоюються значення RGB-трійок. Якщо файл містить палітру зображення, то після заголовка здебільшого міститься таблиця кольорів. Однак це стосується не всіх графічних файлів. Для зображень у натуральних кольорах (1 піксел займає 3 байти) та напівтонових зображень палітра для конкретних форматів може бути відсутня.

За заголовком і палітрою йдуть відеодані. Спосіб їхнього збереження залежить від типу зображення – монохромне бінарне, напівтонове або зображення у істинних кольорах, формат файла тощо.

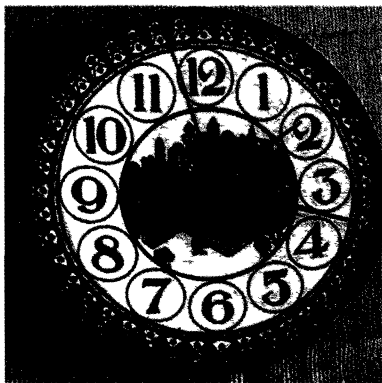
Формат BMP

Растровий формат BMP (BitMap), створений в корпорації Microsoft, орієнтований на застосування в операційній системі Windows. Підтримує тільки зображення в моделі RGB з глибиною кольору від 2 до 32 бітів. На рис. 3.19 наведено монохромне бінарне зображення та його BitMap-подання. Режим 32 бітів подібний до 24-бітового, але в ньому є додатковий байт – четвертий канал (альфа-канал), який містить додаткову інформацію про прозорість. У цьому форматі передбачається використання найпростішого алгоритму стиснення – кодування довжин серій (RUN Lenth Encoding – RLE) без втрат інформації, але цей варіант використовується рідко через проблеми сумісності.

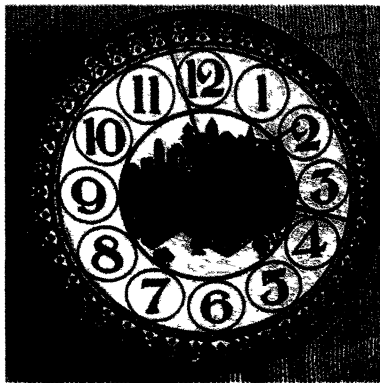
Як вже відзначалось (п. 3.1), людське око дуже чутливе до яскравості і на порядок гірше сприймає кольори. Крім того, чутливість людського ока до різних частот світлового спектра є різною. Око чутливіше до нижньої частини спектра, ніж до верхньої. Формат JPEG якраз враховує цю властивість.

На підставі аналізу частотної складової, вже під час квантування вдається позбутись високих частот. Кольори у верхній частині спектра відкидаються, що не впливає на сприйняття зображення. Також відкидається частина інформації про яскравість. Простіше кажучи, JPEG просто відкидає половину інформації про яскравість і 3/4 про кольори. Це приблизний підрахунок, оскільки застосовуються також складніші схеми стиснення.

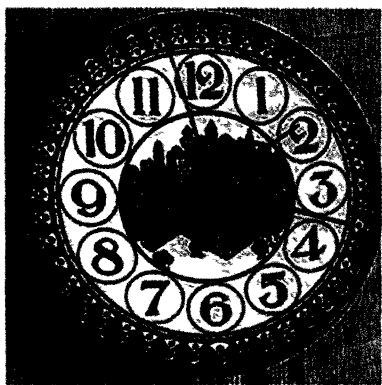
Інформація про яскравість і колір потім кодується так, що зберігається тільки різниця між сусідніми блоками. У результаті перетворень блоки містять багато нулів, а на останній стадії здійснюється оброблення за алгоритмом Хаффмана, що дає доволі добрі результати.



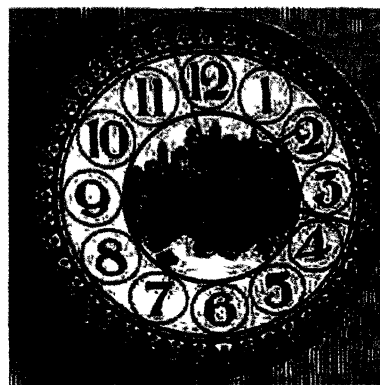
BMP (192 Кб)



JPEG – висока якість (75,9 Кб)

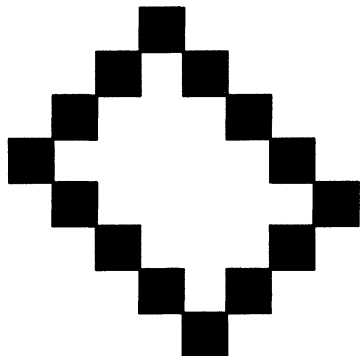


JPEG – середня якість (17,4 Кб)



JPEG – низька якість (2,8 Кб)

Рис 3 20. Порівняння формату BMP та JPEG за різної якості
(об'єм вказано для кольорових фотографій)



0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	0	0	1	0
1	0	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	0	0	1	0
0	0	1	0	0	1	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0

Рис 3.19. Монохромне бінарне зображення та його BitMap-подання

Формат PCX

Формат PCX (PC eXchange) – один із перших растрових форматів, створений фірмою Zsoft для програми PC Paintbrush. Підтримує монохромні, індексовані і RGB-зображення. Формат припускає алгоритм стиснення RLE без втрат інформації.

Формат GIF

Формат GIF (Graphics Interchange Format) створений мережевою службою CompuServe (нині підрозділ AOL, America Online) спеціально для передавання растрових зображень в Інтернеті. Використовує алгоритм стиснення LZW (Lempel – Zif – Welch), який не призводить до втрат якості. Підтримує тільки індексовані зображення.

Формат JPEG

У форматі JPEG (Joint Photographers Experts Group) вперше реалізовано принцип стиснення зображення з втратою якості. Він ґрунтується на усуненні із зображення тієї частини інформації, яка слабо сприймається оком людини. Найширше цей формат використовується в електронній пошті. Під час збереження зображення у форматі JPEG можна вказати необхідний ступінь стиснення, відповідно і якість зображення.

Стиснення за схемою JPEG складається з декількох кроків. На першому кроці зображення перетворюється з моделі RGB на модель YUV (Lab), яка побудована з використанням характеристик яскравості та кольоровості. Вся подальша робота ведеться в цій системі кольорів, бо вона найближча до сприйняття зображення оком. Позначення Y – це тільки чорно-біле зображення. Компоненти UV містять інформацію про колір, що дає можливість пофарбувати зображення.

На наступному кроці зображення розділяється на квадратні ділянки розміром 8x8 пікселів. Далі з кожною ділянкою здійснюється дискретне косинус-перетворення. Водночас виконується аналіз кожного блока, розклад його на складові кольори і підрахунок частоти кожного кольору.

На відміну від форматів, що зберігають всю інформацію про зображення, JPEG зберігає інформацію інакше. Кількість інформації, яка залишається після стиснення, залежить від заданої якості зображення (рис 3.20). Звідси випливає дуже важливе зауваження: якщо ви зберігаєте зображення у форматі JPEG, то відновити його до останнього пікселя неможливо! Тому цей формат називають “форматом з втратами”. Не рекомендується багато раз перестискувати JPEG-зображення, оскільки після того воно стане значно гіршим.

Отже, ділянка зображення 8x8, яка початково містила по 24 біти на елемент, тобто 1536 бітів, перетворюється буквально на пригоршню бітів, яка описує характеристики всієї ділянки.

Формат PNG

Формат PNG (Portable Network Graphics – компактна мережева графіка) розроблений останнім часом і призначений для передавання зображення по мережі. Цей формат подібний до GIF. Підтримує напівтонові і RGB-зображення з одним альфа-каналом, а також індексовані і монохромні зображення. Альфа-канал слугує маскою прозорості. Отже, формат PNG – єдиний із поширених в Інтернеті форматів, який дає змогу отримувати кольорові зображення з прозорим фоном. У цьому форматі використовується стиснення без втрат інформації, що ґрунтується на LZW-стисненні.

Формат TIFF

Формат TIFF (Tagget Image File Format – теговий файл зображення) створений фірмою Aldus спеціально для збереження сканованих зображень. Англійське слово “tag” (тег) означає “бірка”, “ярлик”. Незважаючи на те, що від моменту створення формату TIFF пройшло багато часу, дотепер він є основним форматом, який використовується для зберігання сканованих зображень. Кожна програма оброблення зображень може зчитувати і записувати TIFF-файли. Версії формату існують на всіх комп’ютерних платформах, що робить його зручним для перенесення растрових зображень між ними. TIFF підтримує практично всі типи зображень: напівтонові, індексовані та кольорові зображення у моделях RGB і CMYK.

У форматі підтримується будь-який алгоритм стиснення. Найпоширенішим є стиснення без втрат інформації за алгоритмом LZW, що забезпечує доволі високий ступінь стиснення. Рідше використовують стиснення JPEG, але програм, здатних прочитати такі файли, поки що дуже мало.

Формат WMF (Windows Meta File)

У форматі WMF зберігаються команди, що створюють такі графічні примітиви, як відрізки, еліпси, точки тощо. Для певного типу зображень це дає змогу, по-перше, значно скоротити об’єм збереженої інформації, а по-друге –

збільшувати розмір зображень без втрати гладкості (рис. 3.15). Широко використовується формат WMF у відомому пакеті Microsoft Office. Цей формат зручно використовувати для побудови топографічних карт.

Формат RAW

Файли формату RAW (*raw* у перекладі з англійської “сирий”) інколи називають “цифровим негативом” через великі можливості оброблення при використанні цього формату. Фактично RAW – бітове відбиття з матриці цифрового фотоапарата без будь-якого оброблення.

У разі використання форматів TIFF або JPEG інтерполяція здійснюється процесором камери.

У разі використання формату RAW оброблення файла зображення здійснюється спеціальними програмами-конверторами для універсального комп'ютера, який звичайно значно потужніший від спеціалізованого комп'ютера камери. Перевага RAW у використанні всієї корисної інформації, отриманої з матриці камери. Автоматична інтерполяція, яку здійснює камера у деяких випадках (наприклад, помилкової експозиції), може спрацювати некоректно і частина інформації може бути безповоротно загублена. У разі використання RAW такі похибки можна виправити під час остаточного оброблення знімка. Певним недоліком RAW-формату є його нерегламентованість і відмінність у різних виробників цифрових камер, однак це може бути також перевагою цього формату.

Періодично з'являються повідомлення про створення нових форматів графічних файлів, які, за словами фірм-розробників, мають чудові властивості і ці формати запатентовані. Фірма очікує масового використання нового формату і отримання величезних прибутків. Однак ніхто не хоче платити за новий формат, який приблизно на 5–10 % кращий від попередників. Тоді фірма починає безкоштовно поширювати модулі для оброблення свого формату, сподіваючись з часом на поширення формату і отримання очікуваних прибутків. Однак у останні роки такі надії на виправдовуються. Так, JPEG2000, хоча значно кращий за JPEG, не зумів замінити останнього. Як приклад наведемо опис формату DNG.

Формат DNG (Digital Negative Specification)

Нещодавно компанія Adobe Systems опублікувала специфікацію нового графічного формату DNG. Вважають, що DNG у перспективі дасть можливість стандартизувати RAW-зображення різних виробників. Більше того, компанія випустила спеціалізовану утиліту, за допомогою якої можна конвертувати в DNG-формат RAW-файли з більш ніж 65 цифрових камер. Запропонована утиліта вже існує в різних операційних системах, і її можна завантажити безкоштовно. Тепер виробники зможуть використовувати єдиний формат DNG. “Цей формат буде прийнятий багатьма, хоча, може бути, і не в цьому році, а протягом

найближчих п'яти років, але він дає перевагу всім”, – говорить Пол Уорthingтон (Paul Worthington), аналітик дослідницької компанії Future Image. За його словами, з часом все більше цифрових камер будуть використовувати формат DNG, даючи змогу отримати якісніші знімки.

Мабуть, треба ставитись обережно до запевнень компанії Adobe Systems про переваги формату DNG. Переваги формату RAW в його орієнтованості на обладнання, відокремленні знімання та фіксації знімка від його оброблення. Кожен виробник може розробляти свої типи матриць, фільтрів для того, щоб користувач міг отримувати найкращі результати. А способи оброблення файлів у RAW-форматі найкраще може забезпечити сама фірма-виробник камер, особливо якщо вона вважатиме за доцільне опублікувати свою специфікацію. Для фотограмметричних цілей найпридатніший формат RAW, особливо за наявності можливостей покращувати оброблення зображень у цьому форматі.

Формат RAW розрахований на тих користувачів, які бажають отримати максимум інформації про зображення. Користувачам, яким потрібна добра якість зображення, можна рекомендувати формат TIFF. Обидва ці формати потребують значних ресурсів флеш-пам'яті, і вони встановлені на камерах дещо вищого від середнього цінового діапазону. Формат JPEG економно використовує пам'ять та встановлюється на дешевших камерах і орієнтований, як правило, на відбитки розміром не більше ніж 10×15 см.

Поряд з наведеними і поширеними форматами використовують також особливі формати, розроблені для певних і спеціалізованих програм оброблення зображень.

3.4. Компресія цифрових образів

Компресія або стиснення – це подання інформації ефективніше; іншими словами, “витиснення повітря з даних”. Наявність необов'язкових даних забезпечує можливість використання схем кодування зі стисненням. Про стиснення даних жартівливо кажуть “Зморщений слон у консервній банці”.

Для стиснення зображень у вигляді бітових матриць застосовують два різні методи – *стиснення без втрат* і *стиснення з втратами*. Методи, що допускають втрату відеоінформації, виявляються значно ефективнішими. Для стиснення рухомих зображень застосовують тільки такі методи, а досягнення великого стиснення зумовлено двома явищами.

По-перше, зір людини істотно нечутливіший до оцінки рухомого образу. Тому зображення, призначені для відеоанімації, допускають значно більше стиснення, ніж окремі нерухомі зображення.

По-друге, існує можливість кодувати послідовні кадри не по одному, а як міжкадрові різниці. При цьому передається тільки та інформація, що відрізняє певний кадр від попереднього. Такі методи використовують при стисненні за стандартом MPEG. Оскільки у послідовності кадрів, які швидко змінюються, багато

частин зображення залишаються незмінними, то з'являється можливість досягти значної економії ємності пам'яті, а ступінь стиснення становитиме 100 і більше разів. Під час стиснення окремих кадрів діють й інші вимоги.

Як правило, зображення призначене для друку або для перегляду на високоякісних моніторах, після стиснення не повинно помітно втратити якість.

Ефективніший алгоритм стиснення є складнішим і тому вимагає потужнішого процесора і більше часу, необхідного для кодування-декодування зображень. Якщо час декодування не має такого великого значення для статичних зображень, то для відео- або анімації це величина критична. Частота кадрів, роздільна здатність, глибина кольору і розмір кадрів – все це часто мінімізується, щоб запустити відео. Нині стиснення використовується для збереження великих об'ємів відеоданих і для окремих зображень. Не дивно, що апаратні засоби і програмне забезпечення, призначене для компресії, все частіше стають частиною комп'ютерної системи. Певні схеми стиснення належать до сім'ї алгоритмів, кожен з яких можна реалізувати декількома способами. В результаті отримуються зовсім різні формати файлів.

Деякі алгоритми захищені авторськими правами. Щодо інших, доволі поширених алгоритмів стиснення, довгий час тягнуться юридичні баталії.

3.4.1. Кодування без втрат

Вкажемо на фактори, що впливають на вибір схеми стиснення без втрат.

1. *Ефективність стиснення.* В загальному випадку подається у формі відношення компресії c_k :

$$c_k = \frac{\text{загальний розмір у бітах початкового вхідного зображення}}{\text{загальний розмір у бітах стисненого потоку бітів}},$$

яке порівнює розмір даних початкового вхідного зображення з розміром згенерованого стиснутого потоку в бітах.

Ефективність компресії також часто виражають як середній коефіцієнт бітів B у бітах на піксел або bpp (*bit per pixel*):

$$B = \frac{\text{Загальний розмір стисненого бітового потоку в бітах}}{\text{Загальна кількість пікселів у початковому вхідному зображенні}}.$$

2. *Затримка кодування.* Затримка кодування може бути визначена як мінімальний час, необхідний для кодування і декодування разом із взірцем вхідних даних. Затримка кодування зростає із загальною кількістю необхідних арифметичних операцій. Також затримка зростає із підвищенням вимог до пам'яті, що призводить до затримки обміну (*communication*). Мінімізація затримки кодування особливо важлива для роботи в реальному режимі часу.

3. *Складність реалізації.* Вимірюється у термінах загальної кількості необхідних арифметичних операцій і в термінах вимог до пам'яті. На практиці бажано оптимізувати ефективність компресії зі збереженням вимог до простоти наскільки можливо. Для деяких застосувань, таких, як редагування бази даних і оновлення, необхідна тільки мала складність декодування, тому що декодування виконується частіше ніж кодування.

Групове стиснення

Один із найпростіших способів стиснення файлів – групове кодування. Відповідно до цієї схеми серії величин, які повторюються (наприклад, значення пікселя) замінюються кількістю повторень та заданням величини.

Наприклад, при позначенні значення пікселя буквами серія пікселів

abbbbbbbccddddeéddd

буде замінена на *1a7b2c4d2e3d*. Цей підхід просто реалізується і добре працює з довгими серіями, в яких є багато повторень. Зображення з великими ділянками постійних тонів добре стискаються алгоритмами такого типу.

Групове кодування використовують у багатьох форматах bitmap файлів, таких, як TIFF, PCX та інших.

Кодування методом Хаффмана

Кодування методом Хаффмана (Huffman, 1952) полягає у заміні даних ефективнішими кодами. Цей метод розроблено у 1952 р. для текстових файлів, і пізніше він викликав появу багатьох варіантів. Основна схема – присвоєння кожній величині двійкового коду різної довжини. Коротші коди використовують для величин, які з'являються частіше. Відповідність між старими та новими кодами зберігається у таблиці перекодування, яка завантажується у програму декодування перед самими кодами.

Наприклад, у послідовності

abbbcccddeeeeeeef

є шість різних величин, які позначені різними буквами. Частоти, з якими вони з'являються, дорівнюють:

a:1 b:3 c:3 d:2 e:6 f:1

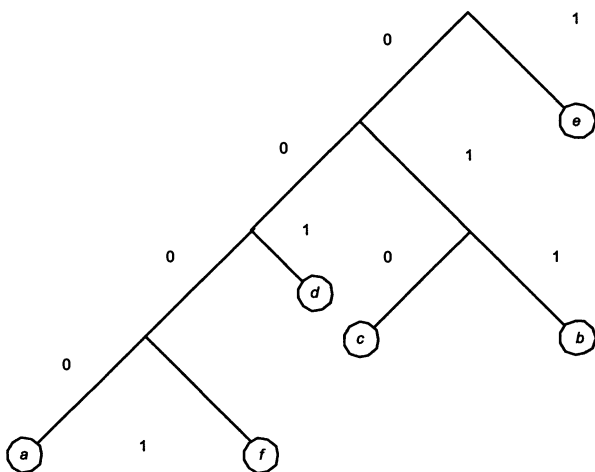


Рис. 3.21. Впорядкування кодів за Хаффманом (приклад)

Спочатку всі частоти впорядковують за спаданням їхніх значень. Основний алгоритм об'єднує разом елементи, які мають найменші частоти, потім пара розглядається як один елемент і їхні частоти об'єднуються. Це повторюється, поки всі елементи не об'єднуються в пари. В цьому прикладі найменшу частоту мають елементи a та f – вони стають першою парою; елементу a присвоюється нульова гілка, а f – перша. Це означає, що 0 і 1 будуть молодшими бітами кодів a і f відповідно. Наступні старші біти будуть отримані у міру побудови дерева.

Далі частоти a і f додаються, що дає в сумі 2. Оскільки тепер найнижча частота 2, то ця пара об'єднується з d (яке також має частоту 2). Початковій парі присвоюється нульова гілка цього дерева, а d присвоюється гілка 1. Отже, код для a закінчується на 00, для f – на 01; а d – закінчується на 1 і буде на один біт коротшим порівняно з кодами для a і f . Дерево продовжують будувати подібно, так що елементи, що зустрічаються рідше, описуються довгими кодами, а найпоширеніші – коротшими.

Ефективність стиснення за схемою Хаффмана залежить від статистичних характеристик кодованого матеріалу.

Схема кодування LZW

LZW – сучасніший алгоритм стиснення, розроблений дослідником Террі Велчем (1984) на основі праць Якоба Зіва і Абрахама Лемпеля.

На відміну від схеми Хаффмана і арифметичного стиснення, схема LZW не потребує апіорних знань про початкову ймовірність елементів або точної апіорної статистичної моделі даних. Починаючи з простої таблиці кодів, алгоритм формує ефективнішу таблицю у міру свого просування. Такий алгоритм називається адаптивним. На відміну від схеми Хаффмана, реалізація LZW, як правило, не використовує коротших кодів для елементів, що трапляються частіше.

LZW починає з таблиці, що містить адреси для кожного символу вхідного алфавіту. Наприклад, для 8-бітових даних алфавіт містить 256 символів. Потім алгоритм додає в таблицю дані для кожного унікального сполучення символів, яке знаходить в заданій послідовності величин.

Нехай заданий вхідний алфавіт $S = \{a, b, c, d\}$. Тоді початкова кодова

таблиця буде виглядати так:

Номер	Вхідні символи
1	<i>a</i>
2	<i>b</i>
3	<i>c</i>
4	<i>d</i>

Розглянемо процедуру кодування для послідовності символів: *ababcbab*.

LZW-алгоритм шукає найдовшу послідовність символів, яку він може розпізнати, і додає їх у початкову таблицю. Наприклад, він знаходить першу величину *a* і розпізнає її, потім перевіряє сполучення *ab* і не знаходить його. Тоді він сполучення *ab* поміщає в таблицю під номером 5 (див. табл. 3.3). Далі шифратор бере останню величину *b* і утворює сполучення з наступною величиною – *ba*, яке не розпізнається, тому знову додається в таблицю під номером 6. Далі настає етап розпізнавання. Наступне сполучення *ab* існує в таблиці, тому на наступному етапі вже до *ab* додається новий символ *c* і шукається сполучення *abc* серед попередніх рядків. Оскільки такого сполучення немає, то алгоритм заносить його в таблицю під номером 7 і так далі. Результат побудови кодової таблиці наведений у табл. 3.3.

Таблиця 3.3.

Кодова таблиця, побудована для послідовності *ababcbab*

Номер	Вхідні символи	Номер	Вхідні символи	Номер	Вхідні символи
1	<i>a</i>	4	<i>d</i>	7	<i>abc</i>
2	<i>b</i>	5	<i>ab</i>	8	<i>cb</i>
3	<i>c</i>	6	<i>ba</i>	9	<i>bab</i>

Для наведеної вхідної послідовності отримана така послідовність кодів номерів із табл. 3.3:

1 2 5 3 6 2.

Остаточні коди отримуються бінарним поданням фіксованої довжини номерів із таблиці. Довжина генерованих бінарних кодів залежить від максимально дозвільної довжини таблиці. Якщо максимальний розмір таблиці M рядків, то довжина кодових слів буде $\log_2(M)$, заокруглена до найближчого найменшого цілого.

Шифратор і дешифратор LZW починають з однієї і тієї самої таблиці, і вони відстежують ситуації, коли таблиця розширюється.

Типові коефіцієнти стиснення, які забезпечуються при кодуванні LZW, містяться між 1:1 та 1:3. Зображення в істинних кольорах, які характеризуються різноманітністю кольорів, важко стискати за схемою LZW. У зображеннях, де кількість кольорів обмежена, є велика ймовірність існування ділянок з однаковими кольорами. Тому ступінь стиснення такого зображення може сягати близько 50 %. LZW використовується у форматах GIF і TIFF, описаних у п. 3.3.

Арифметичне стиснення

Арифметичне стиснення, подібно до кодування за алгоритмом Хаффмана, використовує коротші коди для ділянок, які повторюються і довші коди для тих ділянок, які трапляються рідко. Це ефективніша схема, хоча вона подібно до LZW стискає послідовності величин, а не самі величини. Теорію арифметичного стиснення розробили Abrahamson (1989), Langdon (1984), Rissanen (1979) та Witten (1987).

Для арифметичного стиснення існують різні варіанти, деякі з них патентовані. Основна ідея методу полягає у відображенні кожної відмінної послідовності величин пікселів у діапазон чисел між 0 та 1 та їхньому поданні десятковим дробом. Потім отриманий ряд чисел подається як двійковий дріб змінної довжини.

Нехай задано вхідний алфавіт із чотирьох символів $\{a, b, c, d\}$, де кожний символ передає значення пікселя. Припустимо, що кожний піксел з'являється в зображенні з такими ймовірностями:

$$P(a) = 0,1 \quad P(b) = 0,3 \quad P(c) = 0,4 \quad P(d) = 0,2.$$

Арифметичне кодування для заданого алфавіту починається з розділення інтервалу $[0;1)$ на чотири кодові підінтервали, що не перетинаються. Кожному підінтервалу призначається символ алфавіту, довжина підінтервалу дорівнює ймовірності символів (див. табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Приклад призначення інтервалів у арифметичному кодуванні		
Вхідний алфавіт	Ймовірність символу	Підінтервали
<i>a</i>	0,1	$[0; 0,1)$
<i>b</i>	0,3	$[0,1; 0,4)$
<i>c</i>	0,4	$[0,4; 0,8)$
<i>d</i>	0,2	$[0,8; 1)$

Отже, ми можемо однозначно подати будь-яку величину пікселя числом з його кодового інтервалу. Наприклад, для величини *c* можна взяти код 0,5, оскільки це число лежить в межах відповідного кодового підінтервалу $[0,4; 0,8)$.

Для подання послідовності із двох символів поділимо кожний кодовий інтервал першого рівня на кодові інтервали другого рівня. Довжина кодового

інтервалу другого рівня дорівнює добутку ймовірностей окремих символів першого рівня. Наприклад, довжини підінтервалів для b $[0,1; 0,4)$ дорівнюють:

$$P(b) \cdot P(a) = 0,03; P(b) \cdot P(b) = 0,09; P(b) \cdot P(c) = 0,12; P(b) \cdot P(d) = 0,06.$$

Тоді кодовий підінтервал $[0,1; 0,4)$ для b розділиться на підінтервали другого рівня, подані у табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Приклад підінтервалів другого рівня для послідовностей із двох символів

Послідовність із двох символів	Ймовірність послідовності із двох символів	Підінтервали другого рівня	Варіанти кодів	Двійковий код
ba	0,03	$[0,1; 0,13)$	$1/8=0,125$.001
bb	0,09	$[0,13; 0,22)$	$3/16=0,1875$.0011
bc	0,12	$[0,22; 0,34)$	$1/4=0,25$.01
bd	0,06	$[0,34; 0,4)$	$3/8=0,375$.011

Для кодування послідовності з двох символів із префіксом b у кожному з підінтервалів вибрано варіанти кодів з найменшою довжиною в двійковому поданні. Як бачимо з табл. 3.5, більшим ймовірностям відповідають довші інтервали. Очевидно, чим довший інтервал, тим більше можливостей для знаходження найкоротшого коду.

Довжина кодового інтервалу монотонно спадає для кожного наступного рівня. У результаті кодовий інтервал стискається для кожного наступного рівня.

У табл. 3.6 подано приклад конструювання кодових підінтервалів для вхідної послідовності $bacdd$.

Таблиця 3.6

Приклад конструювання кодових підінтервалів для арифметичного кодування

№ рівня	Символи вхідної послідовності	Кодовий підінтервал
1	b	$[0,1; 0,4)$
2	a	$[0,1; 0,13)$
3	c	$[0,112; 0,124)$
4	d	$[0,1216; 0,124)$
5	d	$[0,12352; 0,124)$

Інше подання кодування для цього прикладу ілюструє рис. 3.22. Кожне дійсне число, що належить останньому кодовому підінтервалу, може бути використано як унікальний код (у двійковому поданні) для заданої послідовності (наприклад, число $0,1236332724_{10} = 0,00011111101_2$).

Зрозуміло, коли послідовність стане довшою, необхідно більше цифр (і відповідно більше бітів), тобто більшу точність. Без сумніву, у такому разі треба позначити кінець послідовності спеціальним символом і почати нову, якщо досягнута точність програмного забезпечення.

Зауважимо, що потрібна більша точність (більше бітів) для послідовностей, які використовують малоймовірні величини. І навпаки, необхідно в середньому менше бітів для послідовностей, які містять ймовірніші величини. Чим більший кодовий інтервал, тим більша ймовірність знайти дріб малої кількості двійкових розрядів.

Подібно до коду Хаффмана, арифметичне кодування є ефективним для зображень, в яких часто трапляються однакові послідовності пікселів.

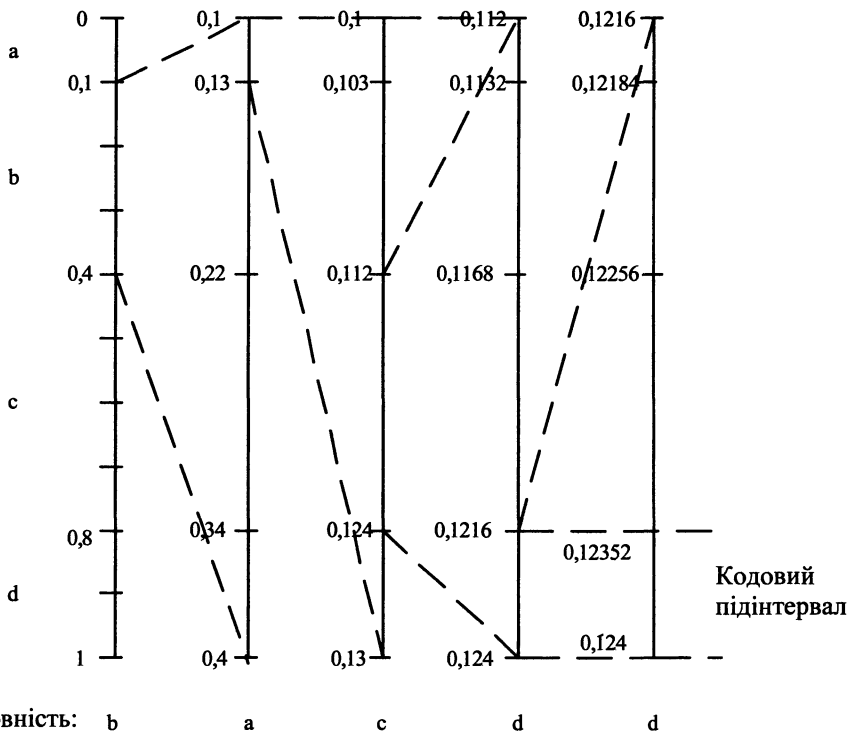


Рис. 3.22. Кодування при арифметичному стисненні

Зауважимо, що наведений тут приклад побудовано за припущенням незалежності появи символів алфавіту. У реальності ймовірності послідовностей символів замінюють відносними частотами їхньої появи.

Ми розглядали чотири типи зображень: чорно-білі, напівтонові, палітрові і істинно кольорові. Чорно-білі зображення можна ефективно стискати за допомогою методу Хаффмана.

Напівтонові та істинно кольорові зображення погано стискаються алгоритмами стиснення без втрат. Правильно освітлені напівтонові зображення містять практично всі числові значення між 0 та 255, і багато з них трапляються з близькими частотами. Тому кодування за Хаффманом неефективне.

У палітрових зображеннях з невеликою кількістю кольорів частота повторень кольору буде великою, тому стиснення без втрат може дати ефективний результат. Якщо ж кількість палітрових кольорів велика або однокольорові піксели розташовані далеко один від одного, то ефективність стиснення без втрат буде низькою.

3.5. Оптимізація яскравості та контрасту

Щоб забезпечити високу якість зображення, йому треба надати адекватну яскравість та достатній контраст. Контраст відіграє особливо важливу роль, оскільки слабкоконтрастні зображення здаються невиразними і недостатньо детальними. Крім того, у кольорових зображеннях не повинні переважати кольорові тони. Якщо такий дефект виявлено, то спеціальне цифрове оброблення дає змогу істотно поліпшити зовнішній вигляд зображення.

Кольорові та монохромні зображення здебільшого обробляються однаково. Кольорові зображення складаються із трьох монохромних напівтонових зображень, що містять інтенсивності червоної, зеленої та синьої складових. Наприклад, для зміни яскравості значення інтенсивності трьох складових збільшують або зменшують лінійно або експоненціально – залежно від використаної функції. Досягається такий самий ефект, як для монохромного зображення: воно стає світлішим або темнішим. Відмінність полягає тільки в тому, що завдяки збільшенню і відповідно зменшенню значень RGB змінюється не тільки яскравість зображення. Наприклад, збільшення інтенсивностей еквівалентне додаванню білого. Завдяки цьому зображення стає не тільки світлішим, але одночасно і менш насиченим.

Отже, треба пам'ятати, що зміна значень RGB може впливати не тільки на кожну із трьох характеристик кольору – яскравість, насиченість та кольоровий тон. Тому для забезпечення можливості вибіркової зміни характеристик професійні програми оброблення зображень передбачають перетворення зображення із RGB в HSV або іншу кольорову систему, яка забезпечує розділення інформації про яскравість та колір. Після здійснення перетворення треба виконати обернене перетворення у систему RGB.

Під час оптимізації яскравості та контрасту відбувається втрата частини відеоінформації. У цифрових зображеннях яскравість елемента або окремої кольорової складової задається числовим значенням від 0 до 255. Якщо внаслідок операції оброблення зображень виникають числові значення, більші від 255 або менші від 0, то їм присвоюють граничні значення 255 або 0. Отже, при будь-якій зміні яскравості або контрасту або стискається діапазон яскравостей (тобто елементи, які до цього мали різні яскравості, набувають однакові значення), або значення яскравості досягають граничних величин. Обидві дії призводять до втрати відеоінформації. Тому кожна програма оброблення зображень дає змогу спочатку виконати випробування змін яскравості та контрасту. Для цього в пам'яті комп'ютера щоразу утворюється запасна копія початкового зображення. Тільки після того, як вдасться отримати бажаний ефект, можна виконати перевірену операцію з початковим зображенням.

Для зміни яскравості зображення в принципі існують дві функції, а саме лінійне та логарифмічне перетворення. У разі лінійного перетворення яскравість кожного елемента збільшується (зменшується) на фіксовану величину. Програма повинна стежити за тим, щоб яскравість не виходила за межі від 0 до 255.

При експоненціальному перетворенні нові значення яскравості обчислюються за формулою:

$$G_{рез} = \left(G / G_{макс} \right)^{1/\gamma} \times G_{макс},$$

$G_{рез}$ – обчислене (результуюче) значення яскравості;

G – значення яскравості в точці зображення;

$G_{макс}$ – максимальне значення яскравості по всьому зображенню, звичайно 255.

Як бачимо, це степенева функція, з аргументом, що дорівнює $1/\gamma$.

При показниковому перетворенні яскравості встановлюється певне значення показника γ (гамма). Якщо $\gamma < 1$, зображення стає темнішим, а при значенні $\gamma > 1$ світлішим.

Лінійне освітлення не враховує фізіології зору. Людина сприймає яскравості майже логарифмічно, і тому для досягнення рівномірного освітлення, яке враховує фізіологію зору, треба діяти відповідно до експоненціальної або показникової функції.

При лінійному освітленні до всіх значень яскравості додається фіксована величина незалежно від того, якою була початкова яскравість елемента зображення. Натомість у разі використання гамма-перетворення ступінь освітлення залежить від початкового значення яскравості.

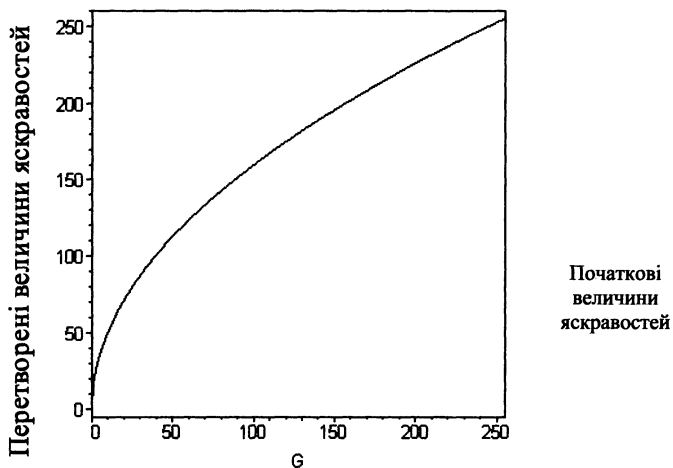


Рис. 3.23. Градаційна крива при освітленні для значення $\gamma=2$

За допомогою гамма-перетворення можна не тільки забезпечити рівномірне освітлення, але і зменшити втрати відеоінформації. Аналіз вищенаведеної формули показує, що незалежно від вибраного значення показника γ яскравість зображення не виходить за межі від 0 до 255. Отже, при освітленні за допомогою гамма-перетворення здійснюється стиснення діапазону яскравостей, але яскравість не досягає граничних значень. Це особливо важливо для збереження якості зображення; зауважимо, що чорні елементи з яскравістю 0 залишаються такими самими і після освітлення. Чисто чорний колір надзвичайно важливий для збереження контрасту зображення і тому при освітленні повинен зберігатись. При лінійному освітленні чисто чорний колір губиться. На рис. 3.23 подана градаційна крива, яка отримана для значення $\gamma=2$.

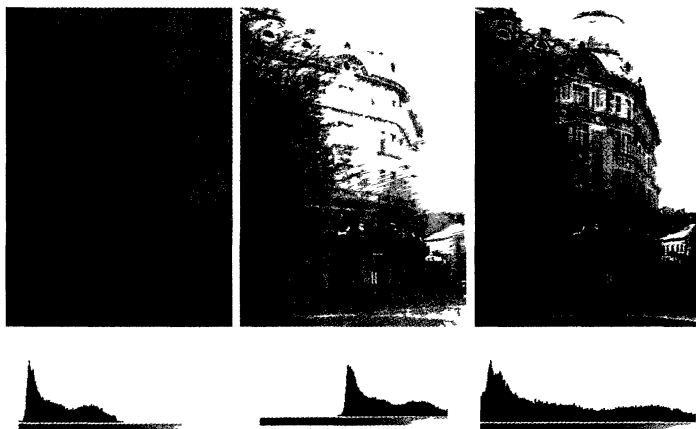
Після застосування гамма-корекції мінімальні різниці яскравостей для нижніх градацій стають більшими, аніж для верхніх градацій. Це еквівалентно підвищенню контрасту в місцях зображення з меншою яскравістю, що сприяє покращанню сприйняття зображення, отриманого в результаті перетворення.

Як правило, видається корисним оптимізувати яскравість та контрастність одночасно. З цієї причини у більшості програм оброблення зображень відповідні функції об'єднані в одному діалозі.

Об'єктивно оцінити розподіл яскравостей у зображенні можна за допомогою *гістограм*. Гістограма являє собою графік, у якому на осі абсцис відкладається значення яскравостей, а на осі ординат – кількість елементів зображення, які мають відповідні значення яскравостей (рис. 3.24).



Приклад гістограми. Лінійка знизу змінного тону показує яскравість точки, величина вертикального відрізка над точкою вказує кількість пікселів цієї яскравості



Темне зображення та його гістограма. Права частина гістограми показує, що світлих точок немає

Світле зображення та його гістограма. Ліва частина гістограми показує, що темних точок немає

Збалансоване за тоном зображення та його гістограма

Рис. 3.24. Зображення різних за тоном типів та їхні гістограми

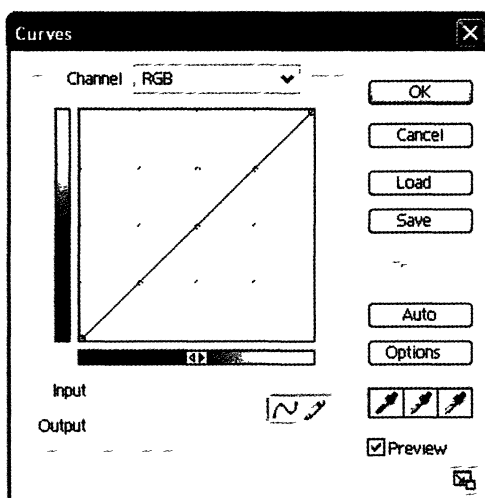


Рис. 3.25. Діалогове вікно редагування тонової кривої у пакеті Photoshop

Будь-яку тонову корекцію можна виконати за допомогою тонових кривих. Оригінали зображень можуть мати різноманітні недоліки. При зніманні на яскравому світлі зникає контраст у тінях. Фотографії, зроблені зі спалахом або проти сонця, мають сильну нерівномірність освітлення. Тонові криві дають можливість виправити навіть дуже складні дефекти оригінала. Зсув кривої змінює яскравість, нахил – корегує контраст (рис. 3.25).

За тоновим діапазоном зображення поділяють на світлі, збалансовані і темні (рис. 3.24). У темному зображенні більшість пікселів зосереджена в зоні тіней. Таке зображення виграє, якщо його тони стануть світлішими і контрастнішими. До другого типу належать світлі зображення. Вони містять основну частину деталей у світлих тонах і вимагають затемнення. До третього типу належать збалансовані зображення. Вони мають опуклу гістограму з перебільшенням тонів середньої яскравості і не потребують ні затемнення, ні освітлення.

3.6. Методи кольорової компресії

Оптимізація зображень передбачає скорочення розміру файлів зображення. З цією метою використовують: *стиснення відеоданих у межах спеціальних форматів файлів (JPEG, GIF, PNG), скорочення кількості кольорів зображень, попереднє оброблення, яке підвищує ефективність стиснення (згладжування).*

З цією метою в деяких форматах для зменшення кількості кольорів зображення в істинних кольорах перетворюють на індексовані зображення. Палітра індексованого зображення може мати не тільки 256 кольорів, але і меншу кількість. Скорочення палітри дає можливість скоротити і розмір файла. Наприклад, якщо палітра буде складатись не із 256, а із 64 кольорів, то для кодування одного пікселя необхідно 6 бітів, а не 8. У результаті розмір зображення зменшиться в чотири рази. Отже, глибина кольору індексованих зображень може набувати цілі значення в діапазоні від 1 до 8. Компактність подання кольорів у індексованих зображеннях зумовлює їхню сферу застосування WEB-дизайні.

Індексовані зображення отримують із істинно кольорових скороченням кількості використаних кольорів. Які кольори опиняться в палітрі, – визначається спеціальними алгоритмами або вказується безпосередньо. Перший спосіб використовують, коли необхідно досягти найкращого наближення до кольорів оригіналу. До другого звертаються, якщо треба досягти однакового відтворення кольорів у різних програмах або на різних комп'ютерах.

Наприклад, у програмі Photoshop один із варіантів палітри Adaptive (адаптивна) розташовує в індексовану палітру кольори, які переважають у істинно кольоровому зображенні. Якщо палітра формується для зображення з лісовим пейзажем, то вона буде переважно містити відтінки зеленого. Палітра морського пейзажу матиме переважно відтінки синього. Палітра Perceptual (перцепційна) створюється з тих кольорів, до яких найчутливіше око людини.

Яким способом передаються під час індексування ті кольори оригіналу, які відсутні у палітрі? Для цього використовується не один, а декілька сусідніх пікселів зображення.

Відсутній у палітрі відтінок передається поєднанням декількох сусідніх пікселів, наприклад, темнішого і світлішого відтінків. Часто такі “синтезовані” кольори називають гібридними, а імітацію відповідних кольорів – згладжуванням (алгоритм Pattern (Мозаїка)). Відсутні тони замінюють мозаїкою із пікселів, які наявні в палітрі індексованого зображення. Цей спосіб не завжди дає задовільний результат, тому що стає помітною регулярна мозаїчна структура. Кращий результат дає алгоритм згладжування, реалізований у Photoshop під назвою Diffusion (Дифузія). Спрощено його можна описати так. Згладжування починається з першого лівого верхнього пікселя зображення і продовжується по рядках до останнього правого нижнього. Колір першого пікселя замінюється на найближчий із обмеженої палітри, колір другого пікселя вибирають так, щоб вони разом з першим давали колір, найближчий до кольору другого пікселя оригіналу. Такий алгоритм дає змогу розподілити помилку у виборі кольору по всьому зображенню без появи непотрібних візерунків.

Зображення можуть містити не тільки кольорові, але і додаткові канали – альфа-канали. У них, як правило, зберігають маски – це виділені області зображення, які зберігаються для повторного використання. Альфа-канали також є напівтоновими, їх додають до пам’яті, що займає зображення, і це займає ще 8 бітів на один піксел. Багатоканальний тип зображення дає змогу використовувати в них скільки завгодно кольорових каналів. Канали багатоспектрального зображення також є напівтоновими і вимагають ще по 8 бітів на кожний піксел зображення.

Отже, оптимізація зображень нерозривно пов’язана з форматом файлів, в яких їх передбачається зберігати. Для забезпечення максимальної щільності стиснення для кожного алгоритму мають перевагу зображення, опрацьовані в спеціальний спосіб. Так, наприклад, скорочення кількості кольорів зображення не дає помітного виграшу у розмірі JPEG-файла, а згладження лише погіршить результат для алгоритму GIF. Починаючи оптимізацію, завжди необхідно керуватись досвідом у використанні того чи іншого формату графічних файлів.

Зауважимо, що оптимізація, безперечно, погіршує якість зображення. Високий ступінь стиснення JPEG-компресії викликає появу артефактів і спотворень у передаванні кольорів.

Отже, оптимізація зводиться до досягнення компромісу між компактністю файла і допустимою якістю. Якість зображення в кожному окремому випадку доводиться контролювати візуально.

3.7. Прилади із зарядовим зв'язком – основні відомості

Прилади із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) належать до твердотілих напівпровідникових приймачів та являють собою складну радіоелектронну мікросхему, на поверхні якої розміщена двовимірна матриця з мікроприймачем світла – пікселем. Під дією світла (фотонів) у пікселях з'являються електрони, і кожний піксел працює як накопичувач електронів, кількість яких пропорційна до кількості світла, що падає. Після експозиції накопичені електронні заряди вимірюються та запам'ятовуються.

З багатьох інтерпретацій цього складного явища заслуговує на увагу метод аналогії Дж. Крістіана з Вашингтона (США) (рис. 3.26).

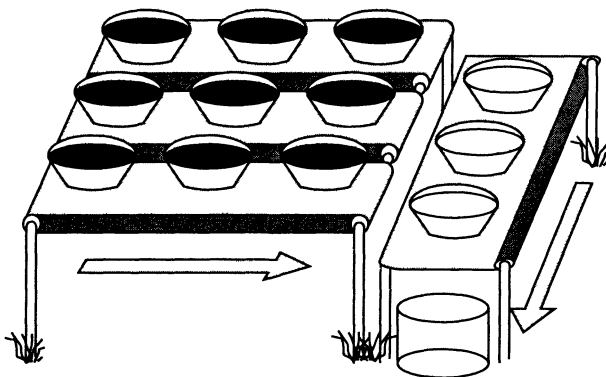


Рис. 3.26. Пояснення до принципу дії приладу із зарядовим зв'язком

Нехай завданням є визначення однорідності та кількості опадів від дощу на якійсь ділянці. Поставивши ємкості для збирання води, після закінчення дощу можна розпочати вимірювання. Після того, як ми увімкнемо шланги, вода з верхніх ємкостей перетече в середні збірники, а далі в нижню посудину.

Вимірюючи щоразу кількість додатково зливої води, можна чітко визначити розподіл опадів на досліджуваній ділянці. Так само працює ПЗЗ, але у такому разі дощовими краплями є фотони.

Принцип роботи ПЗЗ-елемента показано на рис. 3.27. На кремнійову підкладку *p*-типу наносять канали з напівпровідника *n*-типу. Над каналами створюються електроди з полікристалічного кремнію з ізолювальною прокладкою з оксиду кремнію SiO_2 . Після подання на цей електрод електричного потенціалу у збідненій зоні під каналом *n*-типу створюється потенціальна яма, призначена для зберігання електронів. Фотон, що досяг кремнію, генерує електрон, а останній “падає” в потенціальну яму. Чим яскравіше світло, тим більше електронів накопичується в ямі, тим більше значення заряду, тобто фотоструму.

Заряд, накопичений під одним електродом, у будь-який момент може бути перенесений під сусідній електрод, якщо його потенціал буде збільшено. Одночасно потенціал першого електрода буде зменшено (рис. 3.28). Таке перенесення здійснюється т. зв. послідовними регістрами зсуву, які перетворюють рядок зарядів на вході на серію

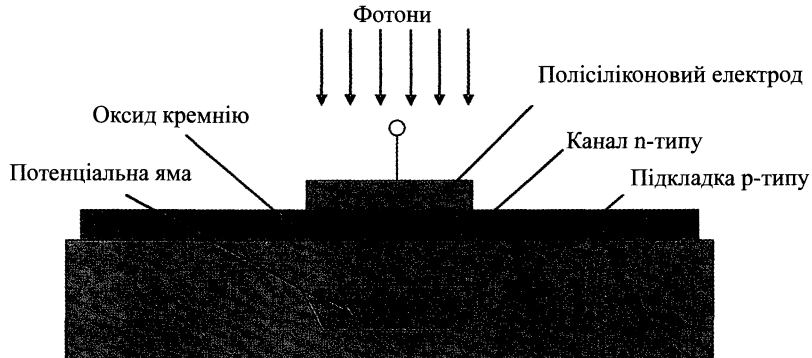


Рис. 3.27. Подання ПЗЗ-елементу

імпульсів на виході. Між ПЗЗ-елементами можна розміщувати від двох до чотирьох електродів перенесення, і від їхньої кількості залежить "фазовість" реєстру зсуву, який може бути дво-, три- або чотирифазним.

Перенесення заряду можна виконувати зліва направо або навпаки. Важливо, що таке перенесення відбувається для всіх зарядів одночасно. Двовимірний масив пікселів, тобто матрицю, отримують за допомогою стоп-каналів, що розділяють електродну структуру ПЗЗ на стовпчики. Стоп-канали формуються у приповерхневій зоні спеціальними технологічними операціями, і ці канали не дають зарядові переходити у сусідні стовпчики. Як бачимо, двовимірний потік фотострумів формує конструкцію, яку називають ПЗЗ-матрицею.

Існують кілька типів таких матриць:

повнокадрова;

матриця з буферизацією кадру;

матриця з буферизацією стовпчиків.

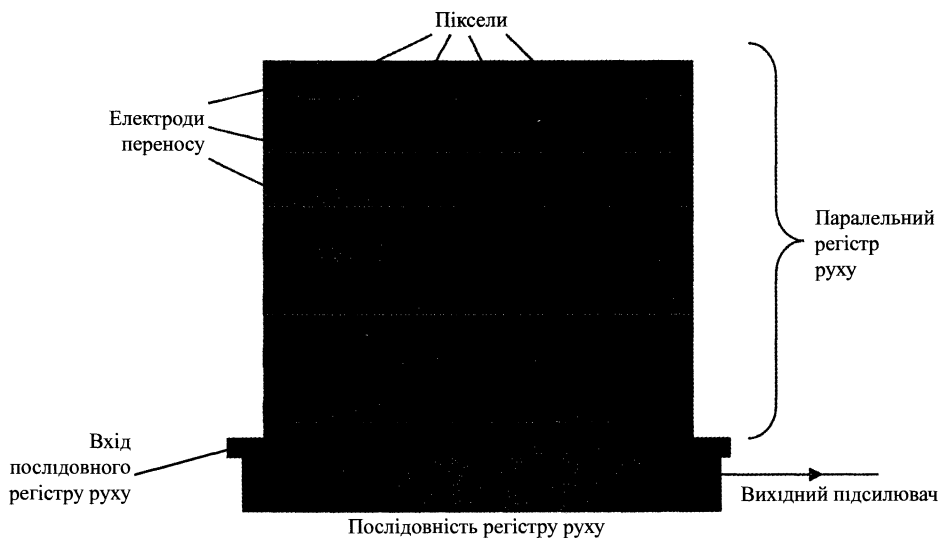


Рис. 3.28. Повнокадрова ПЗЗ-матриця

Повнокадрова ПЗЗ-матриця (рис. 3.28) є найпростішою конструкцією. Швидкість зчитування кадру обмежена швидкістю роботи як паралельного, так і послідовного регістрів зсуву. Інтервал між експонуванням залежить від швидкості зчитування кадру.

Матриця з буферизацією кадру – це досконаліша конструкція (рис. 3.29). Тут потенціальні ями основного паралельного регістру зсуву звільняються швидше, бо немає необхідності для кожного рядка очікувати на повний цикл послідовного регістру. Тому інтервал між експонуванням скорочується, але водночас знижується швидкість зчитування за рахунок того, що кожен рядок проходить вдвічі більшу віддадь.

У матриці з буферизацією стовпчиків (рис. 3.30) мінімізовано інтервал між експонуванням не для пари кадрів, а для неперервного потоку. Заряди, що потрапили в буферний регістр, зчитуються через послідовний регістр зсуву, зверху вниз. Скидання фотострумів у буферний регістр проходить лише за один цикл. Час на експонування для кожного кадру відповідає інтервалу, що витрачається на повне зчитування паралельного регістру. Тому можна створити відеосигнал з високою частотою кадрів, не менше ніж 30 кадрів на секунду.

ПЗЗ-матриця схематично показана на рис. 3.31. Вона складається з мікролінз, фільтра кольору та фотодіода.

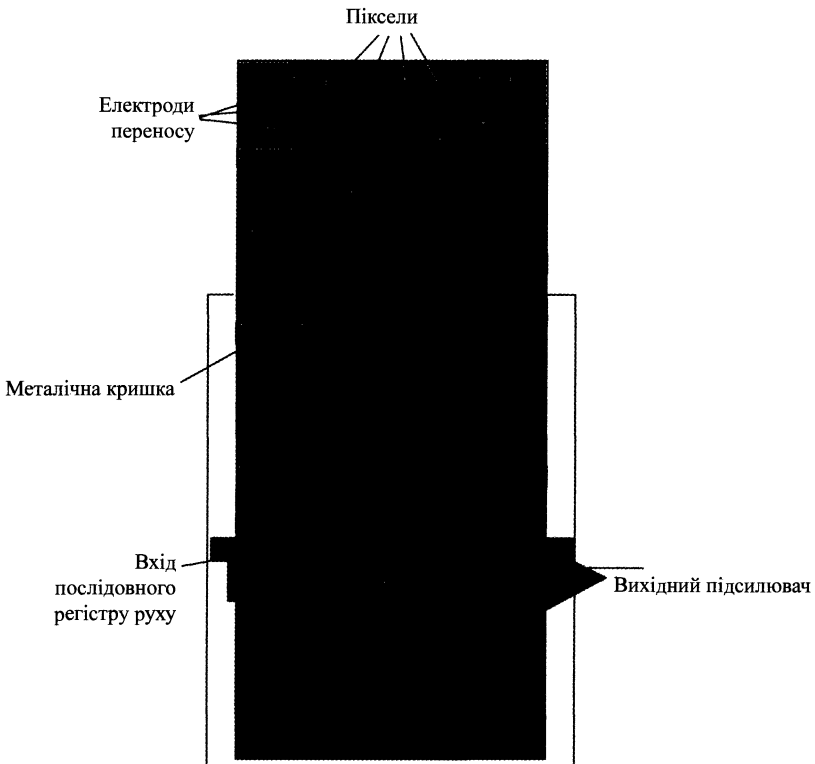


Рис. 3.29. Матриця з буферизацією кадру



Рис. 3.30. Матриця з буферизацією стовпчиків

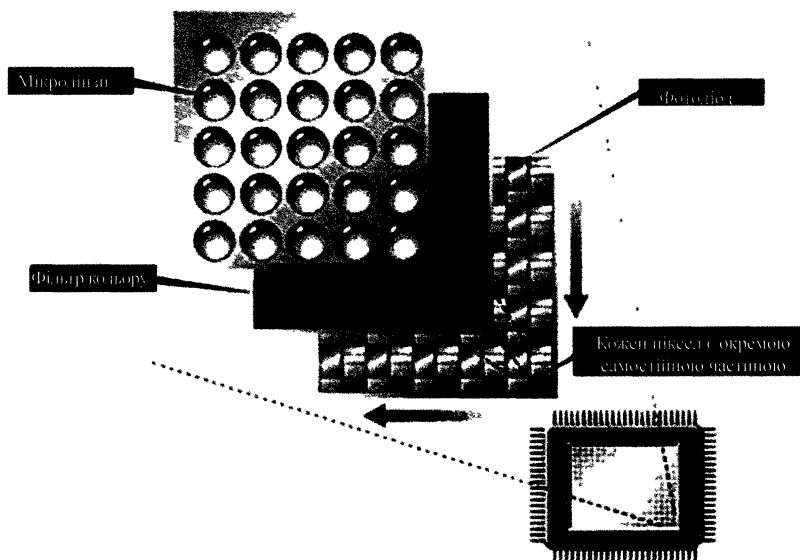


Рис. 3.31. Схема ПЗЗ-матриці

Мікролінза збирає всю частину фотонів, що падають, у концентрований світловий потік, який скеровується на компактну світлочутливу область піксела. У такий спосіб збільшується ефективність дії ПЗЗ- матриці, бо її поверхню до 70 % покривають буферні реєстри зсуву.

Фільтр кольору має на меті дістати з ПЗЗ-матриці інформацію про колір, що є важливим для кольорової фотографії. Використовують два типи фільтрів: основних кольорів (RGB) та додаткових кольорів (CMYG). Фільтр RGB передає яскраві кольори, фільтр CMYG (голубий, бузковий, зелений і жовтий) переважає основний фільтр за різкістю та чутливістю зображення.

Фотодіод слугує для переведення світлової енергії в електричні заряди (електрони). Потім вони розсилаються у вертикальному та горизонтальному напрямках, а кількість електронів пропорційна до інтенсивності світла, отриманого пікселем.

Для ПЗЗ-матриць основними характеристиками є:

чутливість, зокрема:

монохроматична як відношення фотоструму до світлової енергії випромінювання;

спектральна як залежність чутливості від довжини хвилі світла;

інтегральна як відношення фотоструму (в міліамперах) до світлового потоку (у люменах), який іде від джерела світла, ототожненого з вольфрамовою лампою розжарювання;

поріг чутливості як параметр пристрою, що реєструє світло і характеризує мінімальну величину світлового сигналу, що можна зареєструвати. Поріг чутливості обмежується т. зв. темновим струмом – наслідком термоелектронної емісії, що виникає при подаванні потенціалу на електрод, під яким формується потенціальна яма;

динамічний діапазон: здатність матриці розрізняти в зображенні і дуже темні, і дуже світлі тони; здатність реєструвати світло як при яскравому освітленні, так і при дуже слабкому;

блумінг (від англ. Bloming – розмивання): якщо внутрішній фотоефект спричиняє появу такої кількості надлишкової кількості електронів, яка перевищує глибину потенціальної ями, то створений заряд почне переходити в сусідні пікселі. На знімках це проявляється як плями білого кольору і правильної форми, розмір яких залежить від кількості надлишкових електронів. Відведення їх з потенціальної ями – задача т. зв. системи електронного дренажу (overflow drain), і це зумовлює покращання дії ПЗЗ.

На завершення цієї описової частини вкажемо, що завдяки застосуванню сучасних досягнень мікроелектроніки ПЗЗ як приймачі випромінювання отримали широке застосування і мають величезне майбутнє, зокрема для розвитку цифрового знімання у дистанційному зондуванні, топографічній та космічній фотограмметрії.

4. ЦИФРОВИЙ ФОТОГРАММЕТРИЧНИЙ ЗНІМОК

4.1. Вступ

Технології аналогової та аналігичної фотограмметрії скеровані на опрацювання фотограмметричного зображення, яке з математичного погляду запису образу є неперервною $f(x, y)$ функцією, де x, y – плоскі прямокутні координати точки у площині знімка, а значення функції у цій точці є величиною яскравості (іноді кажемо про оптичну щільність).

Цифрова фотограмметрія оперує з іншим типом зображення – цифровим знімком. Цифровий фотограмметричний знімок – це сукупність елементів (пікселів), що утворюють матрицю зображення (растр) розміром $m \times n$ елементів; для кожного елемента відоме дискретне значення яскравості (оптичної щільності або кольору). Таке зображення має високі геометричні та радіометричні характеристики, придатне для вимірювання та інтерпретації образу, тобто для фотограмметричного опрацювання.

З математичного погляду запис цифрового знімка (образу) є функцією дискретною $f_{\alpha}(x, y)$, де x, y визначають положення пікселя у матриці зображення. Фактично положення елемента у матриці задається номером рядка i та номером стовпчика j . Величина яскравості для напівтонового зображення записується в шкалі 0,...,255, що зручно для запису яскравості в пікселі одним байтом.

Існують два способи отримання цифрового фотограмметричного знімка:

- скануванням фотознімка, тобто перетворенням аналогового фотознімка в цифрове зображення за допомогою фотограмметричного сканера;
- отриманням цифрового зображення безпосередньо під час знімання об'єкта з використанням цифрової знімальної камери (системи).

Подано основні відомості про обидва способи.

4.2. Сканування фотографічних зображень. Фотограмметричні сканери

У розділі 3 вказано, що перетворення будь-якого аналогового сигналу в цифрову форму називають дискретизацією, і тут маємо справу з двома основними операціями: вибіркою та квантуванням. Схематично фотограмметричний сканер показано на рис. 4.1.

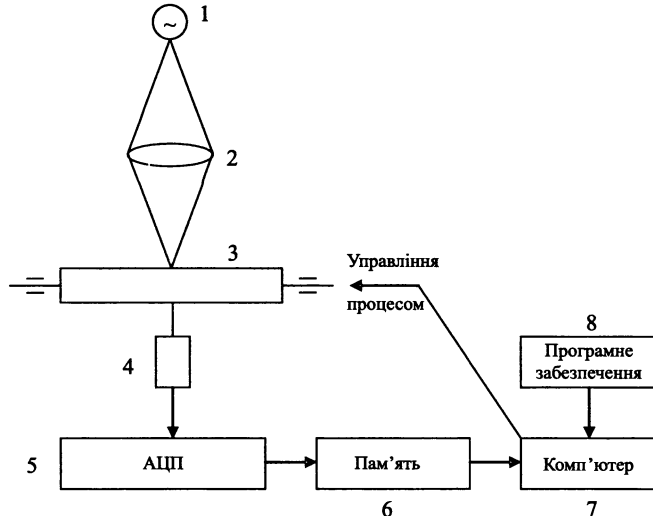


Рис. 4.1. Схема фотограмметричного сканера:
 1 – джерело світла; 2 – оптична система; 3 – прецизійний монокомпаратор;
 4 – ПЗЗ (елемент, лінійка або матриця – переважно лінійка);
 5 – аналого-цифровий перетворювач; 6 – збереження цифрових значень яскравостей попіксельно; 7 – комп'ютер; 8 – програмне забезпечення.

Якщо сенсор має багато елементів, а найчастіше це ПЗЗ-лінійка, то зображення одночасно розкладається на багато пікселів; саме цей процес називають вибіркою.

Дискретизація (або як прийнято в фотограмметрії говорити – сканування) має дуже серйозне теоретичне обґрунтування. Про один із цих аспектів уже згадано в п. 4.1.

Функція аналогового сигналу $f(x, y)$ має бути замінена дискретною функцією $\alpha(x, y)$. Дискретне значення яскравості отримують, впливаючи пікселем з розмірами $\Delta x, \Delta y$ і визначаючи яскравості у заданих позиціях знімка у межах 8-бітової шкали на піксел – це квантування (зводиться до заокруглення величини відліку яскравості в межах діапазону зміни яскравості та поділу його на скінченну кількість інтервалів).

Часто під час такого обчислення використовують таблицю з назвою LUT, яка генерується під час сканування. Отриманий сигнал (яскравість) переводиться з використанням LUT у дискретне значення яскравості.

Важливим є питання визначення розміра пікселя. Щоб відтворити неперервну функцію сигналу (яскравості) з використанням дискретних значень, розмір пікселя не повинен бути більшим від обчисленого з виразу:

$$\Delta x = \Delta y \leq \frac{0.7}{R} \text{ (мкм)}, \quad (4.1)$$

де R роздільна здатність у кількості ліній/мм (не кількість пар ліній чорна – біла, а саме сумарна кількість ліній).

Як приклад, для високоякісного зображення при $R = 100$ л/мм отримаємо $\Delta x = \Delta y = 7$ мкм.

Зауважимо, що інтервал сканування такий самий, як і розмір пікселя. Якщо крок сканування є неузгодженим з роздільною здатністю знімка, то можуть виникнути спотворення у цифровому зображенні у вигляді зубчиків або сходинок.

Цілком зрозумілою є вимога до якості сканування – цей процес має бути таким, аби не втратити інформативності зображення – оригіналу та передати її новому продукту – цифровому знімку.

З теорії інформації відомо, що при невизначеності входів та виходів чи невизначеності повідомлень введена міра невизначеності – ентропія. Математично вона описується так: для деякої сукупності випадкових величин x_1, x_2, \dots, x_n з ймовірностями $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_n)$ з усіх повідомлень одержимо ентропію як усереднене значення ймовірностей:

$$H(X) = - \sum_{j=1}^n P(x_j) \lg_2 P(x_j). \quad (4.2)$$

Визначена у такий спосіб ентропія, яка відповідає заданому закону розподілу дискретної величини, залежить тільки від величин ймовірностей і зовсім не залежить від числових значень повідомлень (тут яскравостей).

Для бінарного образу, який має тільки два значення яскравості (біле або чорне зображення – наприклад, поліграфічний текст) ймовірність появи кожного з них однакова: $P(x_1) = P(x_2) = 0.5$.

Для такої ситуації ентропія $H(X) = 1$, і висновок є таким: під час сканування достатньо запис сигналу ввести в 1 біт для пікселя.

Якщо ж відбувається реєстрація напівтонового образу зі шкалою 8 бітів, то ймовірність появи повідомлення в діапазоні 0 – 255 (256 позицій) становить $P(x_j) = 1/256$. Ентропія на підставі (4.2) є

$$H(X) = - \sum_{j=0}^{255} 1/256 \cdot \lg_2 1/256 = 8. \quad (4.3)$$

Звідси випливає, що для запису інформації на кожен піксел треба 8 бітів.

Для відсканованого зображення важливими та об'єктивними оцінками є такі, що визначають геометричну точність цифрового знімка та якість самого зображення. Першу групу об'єднують т. зв. геометричні параметри, а другу утворюють радіометричні показники.

До геометричних параметрів належать:

- роздільна здатність сканера, що визначається кількістю пікселів на 1 дюйм або мінімальним розміром пікселя у мкм;
- середня квадратична похибка сканування як сумарна інструментальна похибка компаратора, визначається у мкм; ця похибка пов'язана з розмірами фотознімка–оригіналу (чим більший розмір фотознімка, тим важче забезпечити цей параметр).

До радіометричних параметрів належать:

- можливість сканувати чорно-білі або кольорові фотоматеріали, або ж і перші, і другі;
- характеристики ПЗЗ-приймача та внутрішня його розрядність (кількість бітів на кожний канал);
- можливість табличного перетворення сигналу у вихідний з розміром 8 бітів;
- спосіб збереження кольорового зображення (наприклад, у форматі True Color, 24 біти) або чорно-білого (наприклад, з 256 позиціями сірого, 8 бітів);
- визначення в автоматичному режимі найкращих значень експозиції, контрасту та кольору (у кожному з каналів RGB), коригування якості зображення з використанням програмного забезпечення.

Основним показником сканера є його роздільна здатність, яка визначається у кількості пікселів на 1 дюйм та позначається *DPI* (англ. Dot Per Inch). Іноді роздільна здатність виражається в мікрометрах – розмір пікселя як квадратної фігури (наприклад, 15 мкм означає розмір пікселя 15х15 мкм).

Здатність сканера відтворювати яскравість (оптичну щільність) оригіналу і є радіометричною характеристикою сканера. Як вже зазначалось, кількість рівнів яскравості може бути різною, але найчастіше становить 8–12 бітів; в літературі цю кількість позначають *DN* (англ. Digital Numbers).

З будови сканера стає зрозумілим, що розмір пікселя залежить від:

- розміру чутливого елемента ПЗЗ, що зумовлено конструктивними особливостями приладу, а точніше, яку ПЗЗ ми використовуємо;
- розміру спроектованого пікселя на площину знімка; на цей розмір може вплинути збільшення (зменшення) оптичної системи.

Результуючий розмір пікселя або є сталим (наприклад, німецький сканер PS-1), або ж може бути змінним і набувати розмірів 15; 22,5; 30 мкм.

Важливим показником є швидкість сканування. Вона залежить від розміру пікселя та швидкості передавання даних, що вимірюється в мегабайтах за 1 с. Досвід показує, що швидкості сканування зображення становить 10–20 мм/с для чорно-білих знімків.

Як приклад подамо технічні показники фотограмметричного сканера “Дельтаскан” Науково-виробничого підприємства “Теосистема” (Україна):

- | | |
|-----------------------------------|----------------------|
| – мінімальний розмір пікселя | 8 мкм, |
| – геометрична роздільна здатність | 1 мкм, |
| – ср. кв. похибка сканування | 3 мкм, |
| – максимальна оптична щільність | 3.4 D, |
| – діапазон оптичних щільностей | 2.7D, |
| – розрядність | 12/8 бітів на канал, |

- максимальний розмір фотознімка 320х320 мм або 320х450 мм,
- сканування рулонних фільмів шириною 250 мм до 300 мм,
- використана ПЗЗ – лінійка кольорова SONY 3х5300х8,
- вихідні формати Tiled TIFF, Tiled TIFF (JPEG), BMP, колір 24 біти, чорно-білі 8 бітів
- швидкість сканування:

чорно-білого знімка форматом 230х230 мм, при пікселі 8 мкм	12 хв,
кольорового знімка з тими самими параметрами	30 хв,
- програмне забезпечення з такими функціями:
 - автоматичного підбору параметрів сканування;
 - можливості ручного вибору параметрів сканування і таблиць по кожному каналу;
- зміни розміру пікселя, мкм:

8, 16, 32, 64,.....
12, 24, 36, 48,.....
16, 32, 48,.....
24, 48,.....

використання режиму лінійності за щільністю, що дає змогу “витягти” максимум деталей та отримати рівномірний розподіл яскравості по всьому зображенню;

- сканування позитивів і негативів у прямому і дзеркальному відображеннях;
- використання цифрових фільтрів для покращання якості зображення;
- геометричне калібрування сканера по контрольній сітці;
- радіометричне калібрування сканера і усунення нерівномірного відтворення яскравості;
- можливість автоматичного створення “піраміди” зображень з різних масштабів;
- аналіз зображення і побудова гістограми;
- злиття або розділення кольорових каналів;
- виділення або об’єднання фрагментів зображень.

Вимірювальна система сканера повинна бути високопрецизійною та мати інструментальну похибку у межах 1–3 мкм. За аналогією зі стерекомпараторами для досягнення такої точності здійснюють тестування з використанням контрольних сіток. Їх сканують, а потім, порівнюючи отримані та істинні координати перехресть сітки визначають інструментальну точність сканера (передусім неперпендикулярність напрямних сканера x - x та y - y , різномасштабність шкал x та y). За необхідності здійснюють виправлення вимірювальної системи.

Серед фотограмметричних сканерів найвідомішими є прилад DSW100 фірми Leica-Geosystems (Швейцарія), сканер PS-2001 (Z/I) (Німеччина–США), Дельтаскан (Україна).

Технічні параметри та можливості цих приладів є переважно подібними до наведених вище.

На рис 4 2 подано загальний вигляд сканера PS-2001, а на рис 4 3–4 6, 4 8 – корекцію зображення з порушенням контрастом (PS-2001)

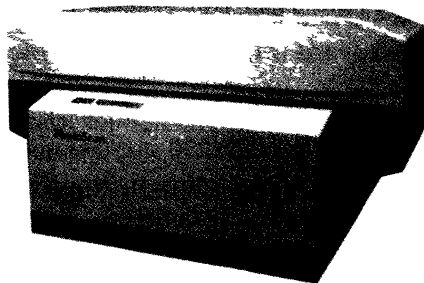


Рис 4 2 Загальний вигляд сканера PS-2001 фірми Z/I Imagings

Сканування кольорових діапозитивів – аерознімків виконують за 4 кроки

Крок 1 – це сканування за початкових параметрів, так підібраних, щоб отримати максимальну якість (рис 4 3) Гістограми, побудовані для першого сканування, повинні бути вузькими за формою У поданому прикладі вибрано такі параметри

Output Data Proportional to Density

Крок 2 – це покращання контрасту з використанням опції Fit (рис 4 4) Оскільки початковий образ є малоконтрастним і видається через це розмитим, то використання згаданої опції змінює параметри T_{min} і T_{max} Натиснувши на позначку Apply to Setup, зберігаємо поліпшений образ Параметри сканування є такими



Рис 4 3 Перший крок сканування – за початкових параметрів

Output Data Proporcional to Density

Tmin 0 0146

Tmax 0 6457



Рис 4 4 Крок 2 – покращання контрасту за опцією Fit

Крок 3 – це корекція гістограми з використанням параметрів Tmin і Tmax (рис 4 5) Якщо гістограма з попередніх дій не задовольняє нас, то треба виконати зміну Tmax і Tmin

В описаному випадку маємо

Output Data Propotional to Density

Tmin 0 0135

Tmax 0 6550



Рис 4 5 Корекція гістограми за параметрами Tmin і Tmax

Крок 4 – це корекція параметра для окремих каналів (рис. 4.6).

Якщо попередня корекція є вдалою, то можна виконати Gamma-корекцію для кожного RGB-каналу окремо. Для цього з меню вибираємо позицію Gamma Correction і пересуваючи вказівники, що належать відповідним каналам R,G,B, можна спостерігати зміни образу та гістограми цих окремих каналів. Остаточні вибрані параметри закріплюємо, вибравши Apply to Setup. У нашому прикладі зменшено величини для голубого та червоного каналів.

Остаточні параметри є такими:

Ouput Data Proportional to: Scan Gamma Correction

Tmin: 0.0135

Tmax: 0.6550

Gamma R: 40.74

GammaG: 100.00

Gamma B: 8.13

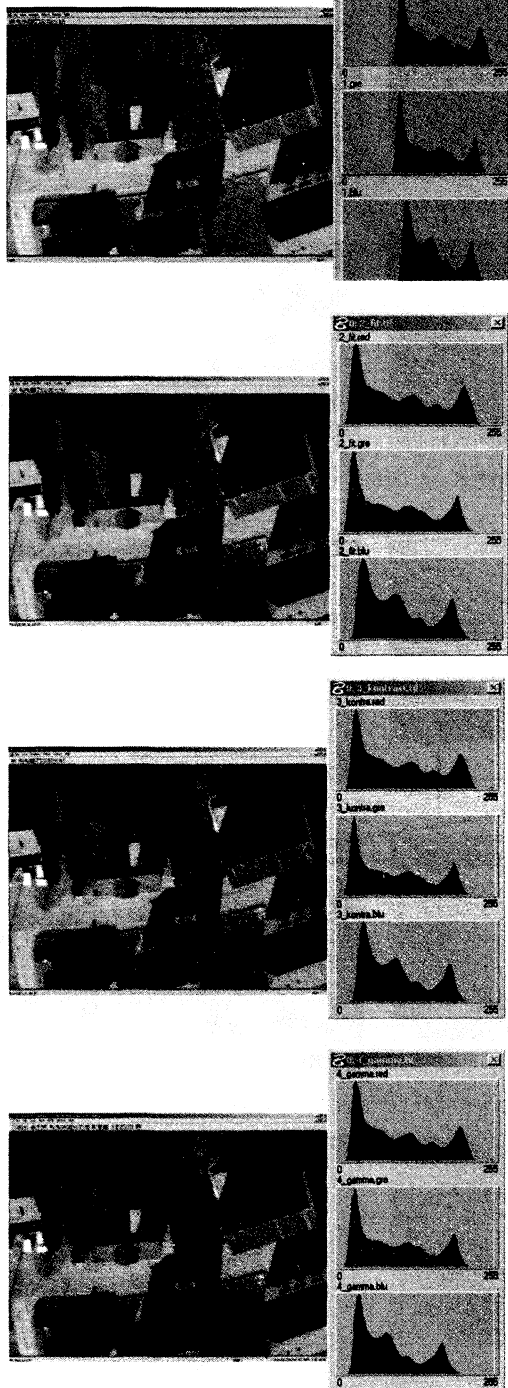


Рис. 4.6. Корекція параметра для окремих каналів

Результатом чи ефектом опрацювання є порівняння двох зображень та їхніх гістограм з відповідними параметрами, показаними на рис. 4.7 (а, б).



а



6

Рис. 4.7. Порівняння двох образів та їхніх гістограм

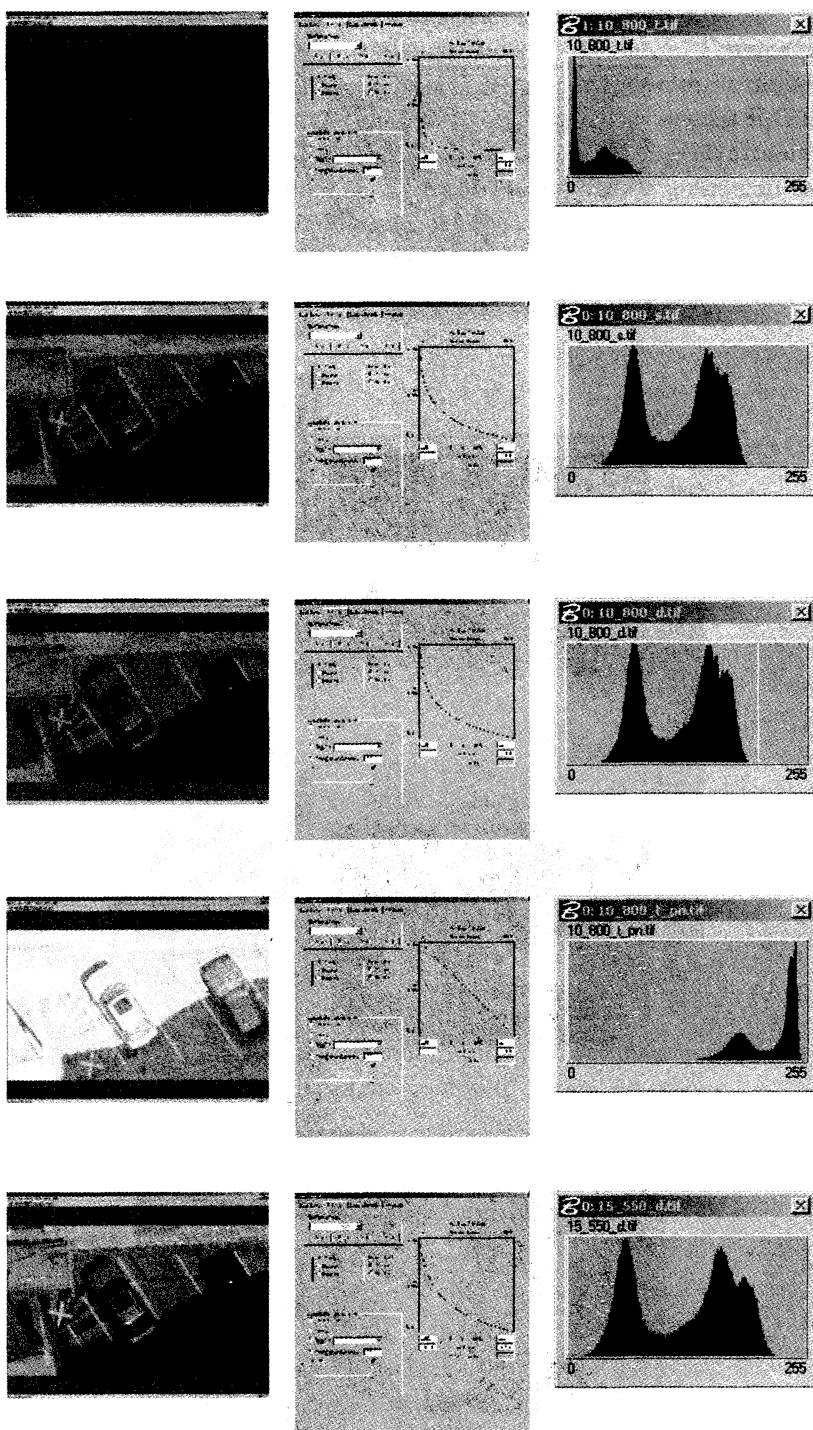


Рис. 4.8. Корекція зображення після сканування на PS/2001

4.3. Визначення плоских прямокутних координат точок цифрового зображення

Візьмемо екранну плоску прямокутну систему координат з початком у центрі лівого верхнього (початкового пікселя) $P_0 (i = 0, j = 0)$ та з осями координат $x_e y_e$.

Система координат фотознімка фіксується координатними позначками 1–2–3–4, і для кожної з них відомі координати у системі $o_0 x y$: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4)$. Як відомо, в загальному випадку прямі 1–3 та 2–4 не є взаємно перпендикулярними, що показано на рис. 4.9, але це не впливає на подальші міркування.

Завдання полягає у переході від системи $x_e y_e$ до системи $x y$ для будь-якої точки растрового зображення.

З позиції перетворення простору – це:

- перенесення початку координат з центра пікселя P_0 в точку O_0 ;
- поворот системи $x_e y_e$ на кут κ до збігу з системою $x y$.

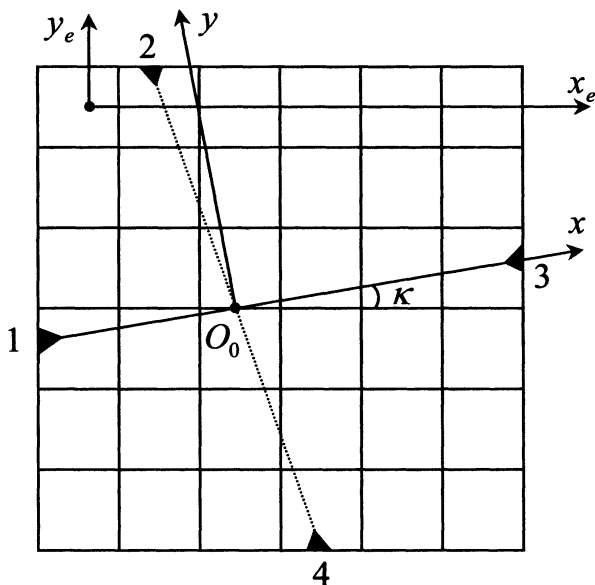


Рис. 4.9. Координатні системи фотознімка та растрового зображення

Тут можливі кілька варіантів розв'язання; найтиповішими є такі.

Варіант 1. Незбіг координат x та x_e, y та y_e подамо як поліноміальну функцію

$$\begin{aligned}x &= a_0 + a_1 x_e + a_2 y_e + a_3 x_e y_e + \dots, \\y &= b_0 + b_1 x_e + b_2 y_e + b_3 x_e y_e + \dots,\end{aligned}\tag{4.4}$$

де невідомими є коефіцієнти a_i, b_i .

Це просте перетворення є доволі універсальним, бо не накладає обмежень на кількість координатних позначок. Їх може бути 4, 8, 16. У разі використання сітки хрестів у площині прикладної рамки аерофотокамери їх може бути кілька десятків. Вибір “довжини” полінома (кількості коефіцієнтів) залежить від доцільності врахування спотворення растрового зображення та кількості координатних позначок.

Для чотирьох координатних позначок можна використати поліноми

$$\begin{aligned}x &= a_0 + a_1 x_e + a_2 y_e + a_3 x_e y_e, \\y &= b_0 + b_1 x_e + b_2 y_e + b_3 x_e y_e.\end{aligned}\tag{4.5}$$

Тоді окремо для абсцис та окремо для ординат складемо системи лінійних рівнянь, із розв’язання яких отримуємо коефіцієнти $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$.

Очевидно, що за позицією пікселя у растрі (i – номер рядка, j – номер стовпця) обчислюють координати

$$x_e = \Delta_x \cdot j, \quad y_e = \Delta_y \cdot i,\tag{4.6}$$

де Δ_x, Δ_y – кроки сканування по рядку та між рядками (як правило, $\Delta_x = \Delta_y$).

Варіант 2. У разі чотирьох координатних позначок за умови, що прямі 1–3 та 2–4 є взаємно перпендикулярними. Тоді перетворення простору опишеться рівняннями

$$\begin{aligned}x &= x_0 + x_e \cos \kappa + y_e \sin \kappa, \\y &= y_0 + y_e \cos \kappa - x_e \sin \kappa.\end{aligned}\tag{4.7}$$

Тут маємо три невідомі (x_0, y_0, κ) при восьми рівняннях для чотирьох позначок. Введемо невідомі $u = \cos \kappa$ та $z = \sin \kappa$ і перепишемо (4.7) у вигляді рівнянь поправок:

$$\begin{aligned}1 \cdot x_0 + 0 \cdot y_0 + y_e \cdot z + x_e \cdot u + l_x &= V_x, \\0 \cdot x_0 + 1 \cdot y_0 + (-x_e) \cdot z + y_e \cdot u + l_y &= V_y.\end{aligned}\tag{4.8}$$

Розв’язання рівнянь (4.8) за методом найменших квадратів дасть шукані параметри перетворення, а пряме використання рівнянь (4.6) та (4.7) переводить будь-який піксел у систему координат знімка.

В обох варіантах ми не торкалися питання, як відбувається спостереження координатних позначок на екрані. Очевидно, що найпростішим є “ручне” наведення, яке здійснює оператор. На початку розвитку цифрової фотограмметрії застосовували саме таку технологію.

Сучасні цифрові фотограмметричні станції дають змогу реалізувати це завдання в автоматичному режимі. Для цього створюють певні передумови:

- сканування фотознімків відбувається так, що поворот знімка (кут κ на рис. 4.4) є незначним, тобто (x_e, y_e) та (x, y) є майже паралельними системами координат;

- для використовуваного типу координатної позначки в комп’ютер вводиться її еталонний образ у цифровій формі;

- місцезоташування координатної позначки на растровому зображенні наближено задається, щоб уникнути необхідності пошуку позначок по всьому растровому зображенні.

На наступному етапі працюють алгоритми автоматичного пошуку, теоретичні основи яких розглянемо нижче.

4.4. Цифрові фотограмметричні знімальні системи

Значний прогрес у галузі сенсорної техніки, передусім створення приладу із зарядовим зв’язком (ПЗЗ) з високою роздільною здатністю, став основою для створення знімальних камер аеро- та космічного базування.

Оскільки продукування ПЗЗ-лінійок високої якості було освоєно ще в 80-ті роки минулого століття, то це одразу ж було використано в космічній техніці. Були створені знімальні камери сканерного типу, що давало змогу отримати високоякісні зображення Землі. Пізніше, уже на зламі двох століть, почалось виробництво високоякісних ПЗЗ-матриць, що стало поштовхом до створення цифрових аерознімальних систем. Отже, сьогодні існують два типи знімальних систем: перший – сканерного типу з ПЗЗ-лінійками, другий – аналог аерофотокамери, що працює на принципі центральної проекції, з ПЗЗ-матрицею.

У системах сканерного типу використовують 2, 3 або більше ПЗЗ-лінійок, розташованих у фокальній площині об’єктива. Схема такої знімальної системи з двома лінійками показана на рис. 4.10.

У першому випадку оптична система відхиляє промені так, що вони формують смугу пікселів, яка перпендикулярна до напрямку польоту. Наступну смугу отримують за рахунок польоту, переміщення носія (літака, супутника) в нову позицію. У такий спосіб формується неперервне зображення поверхні, яке записується у пам’яті бортового комп’ютера. Щоб отримати з однієї позиції S стереозображення, використовують дві (або більше) ПЗЗ-лінійки, одна з яких формує надирний образ (ПЗЗ-1), а друга – зображення назад або вперед (ПЗЗ-2 на рис. 4.10 дає зображення вперед). Така схема знімання рівносильна зніманню з базису фотографування.

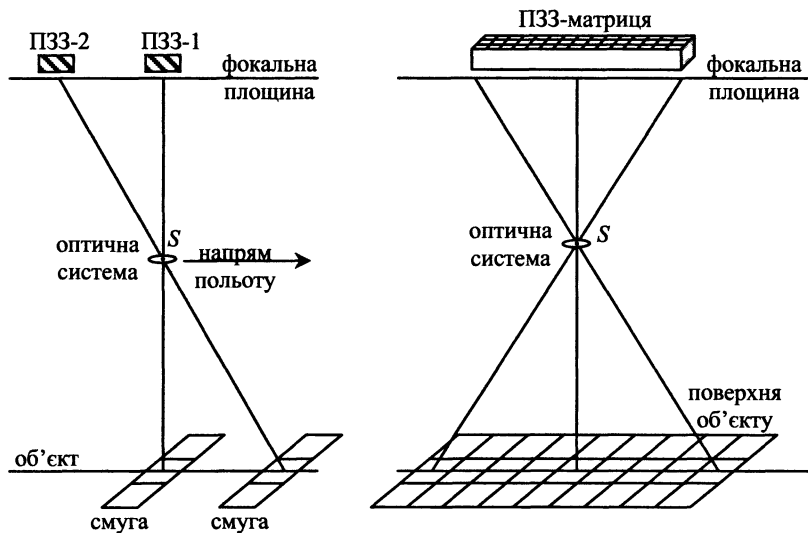


Рис. 4.10. Принципові схеми формування зображення в цифрових знімальних системах: сканер з двома ПЗЗ-лінійками, система з ПЗЗ-матрицею

У другій схемі зображення формується об'єктивом за законами центральної проєкції. Це справді повний аналог аерофотокамери. Проте промисловість поки що не виготовляє ПЗЗ-матриці великих розмірів, такі, як 180х180 мм, 230х230 мм, 300х300 мм (розмір кадру фотознімка в аерофотокамерах). Тому замість однієї ПЗЗ-матриці застосовують 3 або більше малих матриць, кожна з яких має певну оптичну систему. Сумарний образ P формується з образів P_1, P_2, P_3, P_4 з деяким перекриттям (рис. 4.11).

Кожна із систем має певні переваги та недоліки. Коротко перерахуємо їх.

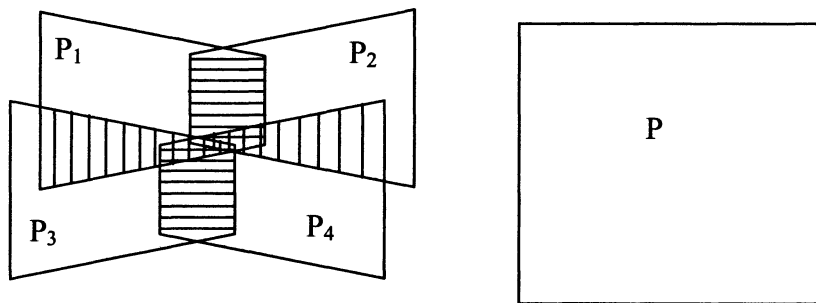


Рис. 4.11. Сумарний образ, сформований знімальною системою з чотирма ПЗЗ-матрицями із зонами перекриття

Системи з ПЗЗ-лініями

Переваги:

1. Оскільки виготовлення ПЗЗ-лінійок високої якості добре освоєне, то створення систем є простішим.
2. Можна використовувати декілька ПЗЗ-лінійок, причому здійснювати багатоспектральне знімання, а не тільки чорно-біле. Отримані зображення містять величезний обсяг інформації, що дає змогу проектувати такі системи як для картографічних задач, так і для дистанційного зондування досліджуваної території.
3. Під час картографування у великих масштабах з використанням аерофотознімків дахи будівель закривають фундаменти (це об'єктивна закономірність бокових променів центральної проекції). Тут можна використати надирне зображення, яке проектує дах на фундамент, а це полегшує створення ортофотокарти.
4. Комбінування різних смуг зображень дає змогу мати два або й більше зображень однієї і тієї самої точки на поверхні об'єкта. А це дає надлишкову інформацію для автоматичного пошуку ідентичних точок при фототріангуляції та при побудові ЦМР.

Недоліки:

1. Кожний образ, створений ПЗЗ-лінійкою, має певні лінійні та кутові елементи зовнішнього орієнтування. Тому сумарний образ, зібраний з таких смуг, буде zdeформованим геометричними створеннями, і потрібно перед розв'язанням основних фотограмметричних задач здійснити його корекцію. Рис. 4.12 демонструє це явище.
2. Для усунення цього явища необхідно застосовувати інерціальну навігаційну систему (INS), що фіксує три ейлерові кути орієнтації платформи та GPS- систему для фіксації лінійних елементів зовнішнього орієнтування. В результаті знімальна система стає дорожчою.
3. Для опрацювання сканерних зображень непридатне програмне забезпечення, створене на засадах та алгоритмах центральної проекції. Тому багаторічні напрацювання у галузі аналітичної та прикладної фотограмметрії (у сенсі комплексів програм) не можна використати безпосередньо. А створення нових програмних продуктів – це додаткові витрати, і не малі.

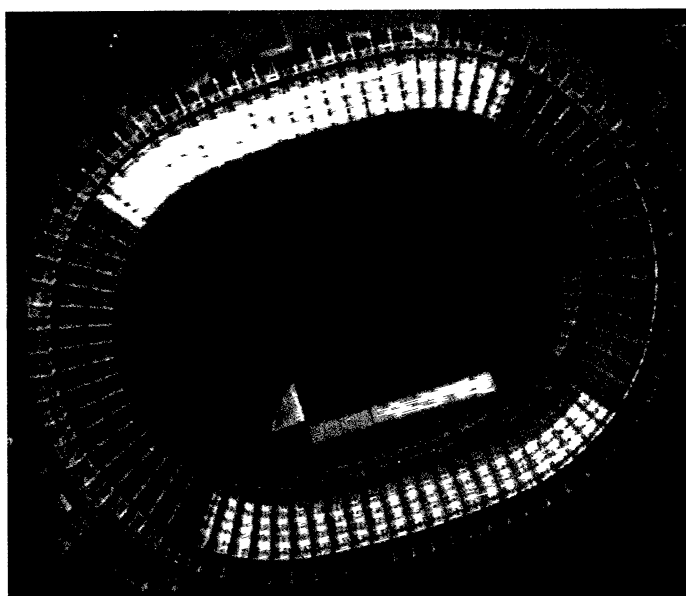
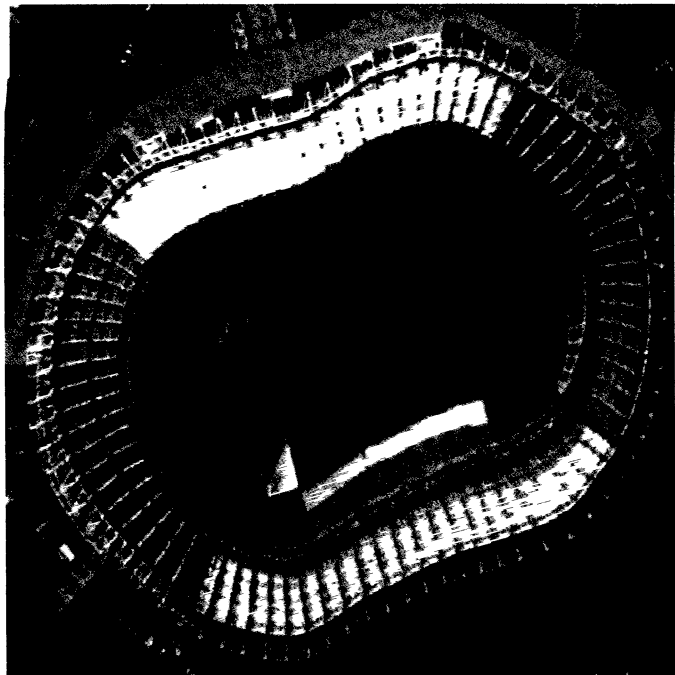


Рис 4 12 Зображення із смуг знімання до виправлення за кути нахилу носія апаратури та після корекції

Система з ПЗЗ-матрицями

Недоліки:

1. Відсутність ПЗЗ-матриць, що за розмірами є рівні з кадром аерофотокамери.
2. Формування сумарного зображення з чотирьох менших зображень (рис. 4.11) вимагає створення чотирьох оптичних систем, причому треба досягти їхньої повної ідентичності та високопрецизійної взаємної орієнтації.
3. Система має певні обмеження стосовно багатоспектральності, і за цим показником програє порівняно з камерами на ПЗЗ-лінійках.
4. Система повинна мати пристрій для компенсації зсуву зображення (за аналогією з аерофотокамерами), що є важливим для великомасштабного знімання. А кожне додаткове конструкторське рішення призводить до подорожчання системи.

Переваги:

1. Теоретично система може обійтись без INS та GPS, що здешевлює її (на практиці система оснащується цими пристроями, бо це скорочує обсяги польових робіт з прив'язки зображень).
2. До створення системи під конкретне завдання можна застосовувати модульний принцип, а це позитивно впливає на технологічний процес виготовлення системи. Можна створити ряд окремих підсистем (наприклад, що працюють в інфрачервоному, RGB-діапазонах чи чорно-білому), а потім комбінувати ці модулі під конкретне замовлення.
3. Для оброблення таких зображень можна використати створене раніше програмне забезпечення, де реалізовані принципи центральної проєкції.

Наведемо тепер основні характеристики цифрових знімальних систем.

Цифрова аерокамера ADS40 (Airborne Digital Sensor)

Це продукт співпраці швейцарської фірми LH – Systems (Leica) та Німецького центру космічних досліджень DLR (Deutsches Zentrum für Luft – und Raumfahrt). Цей Центр розробив свого часу концепцію електрооптичного сканера з трьома ПЗЗ-лінійками та мав досвід з камерами WAOSS для дослідження Марса.

Компонентами системи є: головний сенсор – камера SH40 (з оптико-електронним блоком DO64, інерціальною вимірювальною системою IMU), обчислювально-управляючий блок CU40, блок зовнішньої пам'яті для запису зображення MM40, інтерфейс оператора OI40, пульт індикації та управління польотом GI40, гіростабілізувальна платформа PAV30.

Камера має три панхроматичні лінійки, які скеровані у напрямках “вперед” (28° від надиру), “назад” (42° від надиру) та “у надир”. Кожна лінійка має довжину 78 мм та налічує 12 000 пікселів. Щоб збільшити роздільну здатність, у системі розміщено одну біля одної дві лінійки, зміщені на півпікселя. Тому така об'єднана лінійка налічує 24 000

пікселів, що відповідає роздільній здатності аерофотокамери і досягає 150 л/мм. Фокусна віддаль об'єктива становить 62.5 мм, відносний отвір 1:4.

У надирному напрямку “працюють” ще чотири лінійки в спектральних діапазонах: червоний, зелений, голубий та інфрачервоний. Цікавою є конструкція т. зв. телецентричного об'єктива, який формує зображення для цих чотирьох лінійок, а за допомогою дихроїчних дзеркал розщеплює світловий промінь на складові у чотирьох різних спектральних діапазонах.

У комплекс входить GPS та INS (від фірми Applanix); частота вимірювання елементів орієнтування камери становить 200 Гц.

Швидкість сканування у межах однієї смуги становить 200÷800 Гц. Від цього параметра, висоти польоту та швидкості зчитування даних у зовнішню пам'ять залежить розмір пікселя на місцевості.

Зовнішня пам'ять має об'єм 540 GB, чого вистачає на 4 години польоту. Є блок компресії даних з коефіцієнтом від 2 до 20; передавання даних з камери до комп'ютера виконується через світловоди з швидкістю 40 Мегабіт/с.

Зразки цифрових зображень подаються на Web-сторінках фірми.

Цифрова аерокамера DMC 2001 (Digital Modular Camera)

Створена фірмою Z/I Imaging; принципово відрізняється від попередньої тим, що в ній використовується ПЗЗ-матриця. Тут використано принцип багатооб'єктивної знімальної камери. Суть полягає в тому, що в корпус камери вмонтовано декілька об'єктивів, а положення їхніх головних оптичних осей визначено. Кожен об'єктив проектує зображення на свою ПЗЗ-матрицю; об'єктиви виставлені так, що між зображеннями існуватиме мінімальне взаємне перекриття.

У камері застосовано модульний підхід до формування зображення: залежно від вимог користувача можна змінювати їхню кількість та спектральний діапазон. Конструктивно розрізняють модуль панхроматичний та модуль багато-спектральний.

Панхроматичний модуль характеризується такими параметрами. Об'єктив має фокусну віддаль $f=120$ мм, відносний отвір 1:4. Розмір пікселя становить 6×6 мкм, радіометрична роздільна здатність 12 бітів. Швидкість знімання становить 1 знімок за 2 с. Можна використовувати: модуль 1 (один об'єктив, матриця 7000×4000 пікселів, кут поля зору $39^\circ \times 22^\circ$); модуль 2 (два об'єктиви, матриця 7000×7500 пікселів, кут поля зору $39^\circ \times 42^\circ$); модуль 3 (чотири об'єктиви, матриця $13\,500 \times 8000$ пікселів, кут поля зору $74^\circ \times 44^\circ$).

Багатоспектральний модуль має об'єктив з $f=25$ мм, відносний отвір 1:4. Розмір пікселя 12×12 мкм, радіометрія така сама, як і для попереднього модуля – 12 бітів. Можна використовувати: модуль 4 (три об'єктиви, спектральний діапазон RGB, матриця 3000×2000 пікселів, кут поля зору $72^\circ \times 50^\circ$); модуль 5 (чотири об'єктиви, спектральний діапазон RGB + інфрачервоний, матриця 3000×2000 пікселів, кут поля зору $72^\circ \times 50^\circ$).

У камері є електронна система для компенсації змазування зображення, а також системи для реєстрації даних від GPS та INS. Останні можна використовувати як для подальшого фотограмметричного опрацювання (фототріангуляція за відомих елементів зовнішнього орієнтування знімків), так і для визначення швидкості літака під час польоту. Як зазначалося, з чотирьох знімків у результаті попереднього оброблення формується один цифровий знімок, який є теоретично центральною проекцією. Тому надалі до такого образу можна застосовувати класичні рішення аналітичної фотограмметрії.

Обмеженням для камер такого типу (поки що) є швидкість зчитування та запису сигналів з ПЗЗ.

Цифрова аерокамера UltraCam – D

Це продукція австрійської фірми Vexcel Imaging GmbH. У камері використано прямокутну матрицю сенсорів ПЗЗ. Це багатооб'єктивна камера, що побудована на модульному принципі і має чотири панхроматичні модулі та чотири багатоспектральні.

Для панхроматичного модуля (складається з дев'яти матриць ПЗЗ) технічними даними є: об'єktiv з $f = 100 \text{ мм}$, відносний отвір $1:5,6$; кут поля зору $55^{\circ} \times 37^{\circ}$, формати знімка $103,5 \times 67,5 \text{ мм}$, розмір знімка 11500×7500 пікселів, розмір пікселя $9 \times 9 \text{ мкм}$. Радіометрична роздільна здатність 12 бітів.

Для багатоспектрального модуля: об'єktiv з $f = 28 \text{ мм}$, відносний отвір $1:4$, кут поля зору $65^{\circ} \times 46^{\circ}$, розмір знімка 4008×2672 пікселів, розмір пікселя $9 \times 9 \text{ мкм}$, спектральні канали RGB + інфрачервоний.

Обидва модулі використовують систему компенсації змазування образу, мають блок пам'яті на 1 терабайт (більше ніж 1850 знімків). Цикл знімання: за 1 с 1,3 знімка.

Результуючий знімок у панхроматичному діапазоні складається з дев'яти первинних образів, які мають незначне перекриття. Цей знімальний ефект досягається тим, що в площині прикладної рамки ПЗЗ-матриці розташовані так:

- модуль 1: 4 матриці, розміщені у кутах прикладної рамки;
- модуль 2: 2 матриці, розміщені усередині довших боків прикладної рамки;
- модуль 3: 2 матриці, розміщені усередині коротких боків прикладної рамки;
- модуль 4: 1 матриця, покриває центральну частину прикладної рамки.

Сумарний знімок має розмір 11500×7500 пікселів. Модулі розташовані в один ряд, скерований у напрямку польоту. Закривачі відкриваються майже одночасно, але з різницею в кілька мілісекунд. Саме цей ефект дає змогу формувати образ відповідно на ПЗЗ-носії, що належить до кожного з чотирьох модулів.

Модулі багатоспектрального знімання мають в кожному з чотирьох одну ПЗЗ-матрицю, меншого розміру порівняно з панхроматичним зніманням, але з більшим кутом поля зору.

Цифрові камери сканерного типу HRSC

У Німецькому центрі космічних досліджень DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) була створена камера HRSC – А для марсіанських досліджень (1997 р.). Дещо пізніше були створені досконаліші системи:

- нормальнокутна камера HRSC – AX150 (з 2001 р.);
- ширококутна камера HRSC – AX047 (з 2000 р.).

Камера працює на принципі сканера з кількома ПЗЗ-лініями. У нормальнокутній камері розміщено 9 лінійок, з них 5 для панхроматичного режиму, 4 для RGB та інфрачервоного. У ширококутній камері є 5 лінійок, з них 3 для панхроматичного режиму, 2 для зеленого і червоного діапазонів спектра.

Технічні параметри камери типу HRSC – AX150 такі. Об'єктив має фокусну віддаль $f = 150 \text{ мм}$, поле зору $20,5 \times 29,1$ кількість ПЗЗ-лінійок – 9, кількість пікселів у лінійці 12 000, розмір пікселя 6,5 мкм, радіометричну роздільну здатність 12 бітів, просторову роздільну здатність при висоті польоту 3000 м впоперек польоту 13 см, у напрямку польоту близько 6 см. Швидкість передавання даних від 32 до 80 Мегабіт/с.

Камера HRSC – AX 047 характеризується так: об'єктив з $f = 47 \text{ мм}$, кут поля зору $14,4^0 \times 79,4^0$; кількість ПЗЗ-лінійок – 5, кількість пікселів у лінійці 12 000, розмір пікселя 6,5 мкм, радіометрична роздільна здатність 12 бітів, просторова роздільна здатність при висоті польоту 3000 м становить впоперек польоту 41,5 см, у напрямку польоту близько 6 см. Швидкість передавання даних від 20 до 80 мб/с.

Обидві камери не є продуктами комерційними (у сенсі тиражування екземплярів), але використовувались для фотограмметричного знімання спільно з французькою фірмою ISTAR та голландською фірмою Geodan Geodetic.

Це стосувалось створення ортофотокарти та 3D-моделей міст. Камера AX150 показала точність 25 см для просторових моделей, а камера ширококутна – 50 – 80 см.

Доречно нагадати, що ідеологія камер HRSC була використана під час створення камери ADS40, що, по суті, є результатом плідної співпраці двох потужних фірм – швейцарської Leica GeoSystems та німецького центру DLR.

Цифрова аерокамера 3-DAS-1

Науково-виробниче підприємство “Геосистема” (Україна) у 2006 р. продемонструвало триоб'єктивну цифрову аерокамеру, що має три ПЗЗ-лінійки. Одна лінійка скерована в надир, друга та третя з кутами конвергенції 16^0 , 26^0 або 42^0 , які можна змінювати. У результаті отримується потрібне стереоскопічне покриття території, що знімається.

Технічні параметри камери такі: об'єктив з $f = 110 \text{ мм}$, кут поля зору впоперек польоту 36^0 , кількість ПЗЗ-лінійок – 3, кількість пікселів 8000 у режимі RGB (тому отримують кольорові зображення), розмір пікселя 9 мкм, радіометрична роздільна здатність 42 біти, висота польоту від 550 до 4400 м, ширина смуги захоплення від 360 до 2880 м, просторова роздільна здатність від 4,5 см до 36 см.

Програмне забезпечення дає змогу планувати польоти, контролювати навігацію і траєкторію польоту, проглядати отримане в польоті зображення. Створює і опрацьовує оригінальні та стиснуті 16- або 8-бітні зображення необмеженого розміру. Виконує калібрування камери та післязнімальне опрацювання з виправлення зображення за даними GPS та INS (камера дає зображення зі спотвореннями за кути нахилу, що є неминучим для систем сканерного типу, рис. 4.12).

4.5. Методи покращання характеристик цифрових знімків

Головна мета методів покращання зображень полягає у такому обробленні зображення, щоб результат був зручнішим для спеціальних застосувань, аніж вихідне зображення. Термін “спеціальні застосування” дуже важливий, тому що викладені методи є проблемно орієнтованими. Наприклад, метод, який покращує рентгенівський знімок, може не давати покращання зображень планети Марс.

Розглянуті методи можна поділити на два типи:

- такі, що застосовуються у просторовій області;
- такі, що використовуються у частотній області.

Просторові методи стосуються самої площини зображення і ґрунтуються на безпосередній маніпуляції з пікселями зображення. Методи другого типу побудовані на модифікації зображення за допомогою перетворення Фур’є.

4.5.1. Методи просторової області

Термін “просторова область” стосується сукупності пікселів, які створюють зображення, та тих методів, які безпосередньо оперують з цими пікселями.

Тут розглядаються тільки монохромні зображення, оскільки такі самі операції можна застосувати до кольорових зображень, до кожного окремого каналу (тобто R,G,B).

Припустимо, що яскравість зображення задана неперервною функцією $f(x, y)$, в деякому прямокутнику. Здійснимо дискретизацію функції f . Розділимо сторони прямокутника відповідно на N та M частин та введемо дискретну систему координат $[0, N-1] \times [0, M-1]$. Будемо розглядати функцію f у точках з цілочисловими координатами (x, y) . Квантуємо значення f у тих точках, вибираючи всі її цілочислові значення $\{0, 1, 2, L-1\}$. Називатимемо ці значення рівнями сірого тону. Ми отримали функцію $f(x, y)$, яка є цілочисловою як за значеннями, так і за аргументами.

Функція оброблення зображення у методах просторової області може бути записана як

$$g(x, y) = T[f(x, y)], \quad (4.9)$$

де $f(x,y)$ – вхідне зображення, $g(x,y)$ оброблене зображення і T – оператор над f , визначений у деякому околі точки (x,y) .

Під околom точки (x,y) розуміємо квадратну або прямокутну підобласть зображення з центром у точці (x,y) . Центр підобласті пересуваємо від пікселя до пікселя, починаючи з вершини лівого верхнього кута і застосовуємо операцію до кожної точки (x,y) ; отримуємо значення g в цій точці. Околи можуть бути іншої форми, наприклад, круги, але квадратні околи легше застосовувати. Найпростіша форма T буде для околу 1×1 .

Якщо g залежить тільки від значення f в точці (x,y) , то T стає перетворенням сірої шкали; тоді функцію відображення запишемо у формі

$$s = T(r), \quad (4.10)$$

де r і s визначають рівні сірого $f(x,y)$ і $g(x,y)$ у точці (x,y) .

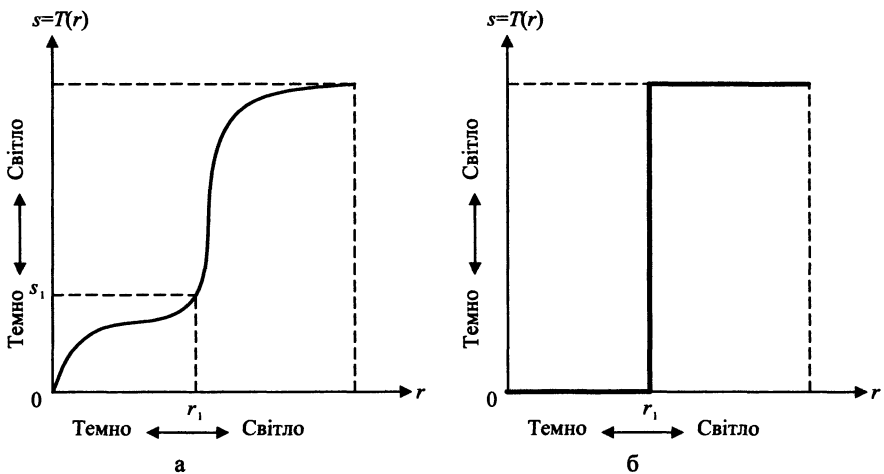


Рис. 4.13. Функція перетворення рівнів сірого для поліпшення контрастності

Ілюстрацією до цього перетворення може бути утворення зображення вищої контрастності від початкового. Якщо $T(r)$ має форму, показану на рис. 4.13, а, то результатом цього перетворення є утворення зображення вищої контрастності від початкового, завдяки затемненню рівнів, нижчих від значень r_1 , і підсвітлювання рівнів, вищих за r_1 у початковому зображенні. Рівні сірого, нижчі за r_1 , стискаються функцією перетворення до вузької області s_1 темного кінця спектра; протилежний ефект спостерігається для значень r , вищих за r_1 . Граничний

випадок показано на рис. 4.13, б, у результаті перетворення отримаємо дворівневе зображення. Отже, як показано далі, деякі прості, але достатньо потужні методи оброблення можуть бути реалізовані за допомогою перетворення сірої шкали.

Використання більших околів дають змогу реалізувати низку різноманітних функцій перетворення для покращання зображень. У такому разі результат перетворення залежить не тільки від рівня сірого у точці (x, y) , але і від рівнів сірого її сусідів. Один із основних методів цього напрямку ґрунтується на використанні так званих *масок*. Для позначення масок також використовують терміни: шаблон, вікно або фільтр. Маска є малий, наприклад, 3×3 двовимірний масив, показаний на рис. 4.16, б. Коефіцієнти маски вибирають для визначення деяких властивостей зображення. Ідея операції з маскою полягає в тому, що пікселу призначається значення функції від маски і його сусідів. Якщо w_i , $i=1,2,...,9$ є коефіцієнтами маски, а $r_i = f(x_i, y_i)$, $(i=1,2,...,9)$ – рівні сірого для центрального піксела (x_5, y_5) та його 8 сусідів (рис. 4.14), то перетворення зображення є такою операцією

$$T[f(x, y)] = \sum_{i=1}^9 w_i r_i . \quad (4.11)$$

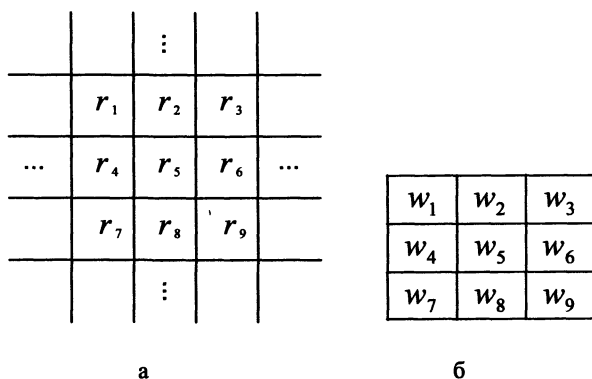


Рис. 4.14. а – ділянка зображення із значеннями пікселів від r_1 до r_9 ;

б – маска 3×3 з коефіцієнтами w_i , $i=1,2,...,9$

Далі центр маски пересувається від піксела до піксела вздовж зображення. При кожній локалізації маски ми обчислюємо суму добутків за (4.11).

Коефіцієнти маски і відповідні рівні сірого тону можна виразити як вектор-стовпчики:

$$\vec{W} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_9 \end{bmatrix}, \quad \vec{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_9 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Тоді праву частину рівняння (4.11) можна подати скалярним добутком:

$$\vec{W}^T \cdot \vec{r} = \sum_{i=1}^9 w_i \cdot r_i, \quad (4.13)$$

де T означає векторне транспонування.

Якщо припустити $w_i = \frac{1}{9}$, $i = 1, 2, \dots, 9$, то ця операція дає середнє значення пікселів в області 3×3 з центром у r_5 . Належно підбираючи коефіцієнти і застосовуючи маску до кожної позиції піксела у зображенні, можна виконати різноманітні корисні операції над зображенням, такі, як зменшення шуму, визначення ізольованих точок, тонких ліній тощо.

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

Рис. 4.15. Маска для виявлення ізольованих точок

Задача виявлення і потім сегментації ізольованих точок застосовується для усунення шуму і дослідження частинок. Основна маска для виявлення ізольованих точок показана на рис. 4.15. Ізольована точка знайдена, якщо

$$|\vec{W}^T \vec{x}| > T, \quad (4.14)$$

де T – невід’ємний поріг. Значення T встановлює відносний рівень сірого тону, з якого ми вважаємо точку частинкою у зображенні.

Наступний рівень складності – це виявлення ліній у зображенні. Розглянемо маски на рис. 4.16, а–г. Якщо перша маска рухається вздовж зображення, то це відповідає лініям, орієнтованим горизонтально з товщиною в один піксел. За умови постійного фону максимальне значення отримується, коли лінія проходить через середній рядок маски.

-1	-1	-1
2	2	2
-1	-1	-1

а

-1	-1	2
-1	2	-1
2	-1	-1

б

-1	2	-1
-1	2	-1
-1	2	-1

в

2	-1	-1
-1	2	-1
-1	-1	2

г

Рис. 4.16. Маски для виявлення ліній :

а – горизонтальних; б – під (+45°);

в – вертикальних; г – під (-45°)

Якщо w_1, w_2, w_3, w_4 – вектори, сформовані з чотирьох масок на рис. 4.16, то обчислимо значення $\tilde{w}_i^T \cdot \vec{x}$ для $i=1, 2, 3, 4$. Тоді вектор \vec{x} є наближенням до маски, якщо $\tilde{w}_i^T \cdot \vec{x} > \tilde{w}_j^T \cdot \vec{x}$ для всіх значень j , окрім $j=i$.

4.5.2. Методи частотної області

Дискретне перетворення Фур'є

Методи частотної області ґрунтуються на дискретному перетворенні Фур'є. У разі двох змінних пара дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) задається виразами:

а) пряме перетворення Фур'є

$$F(u, v) = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cdot \exp[-i2\pi(ux/M + vy/N)] \quad (4.15)$$

для $u=0, 1, 2, \dots, M-1$, $v=0, 1, 2, \dots, N-1$;

б) обернене перетворення Фур'є

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \cdot \exp[i2\pi(ux/M + vy/N)] \quad (4.16)$$

для $x=0, 1, 2, \dots, M-1$, $y=0, 1, 2, \dots, N-1$.

Рівності (4.15) та (4.16) називають дискретною парою перетворення Фур'є. Перетворення Фур'є дійсної функції є комплексною функцією, тобто

$$F(u, v) = R(u, v) + i \cdot I(u, v), \quad (4.17)$$

де $R(u, v)$ і $I(u, v)$ дійсна і уявна частини $F(u, v)$. Часто задають рівність (4.15) у експоненціальній формі:

$$F(u, v) = |F(u, v)| \cdot e^{i\varphi(u, v)}, \quad (4.18)$$

$$|F(u, v)| = [R^2(u, v) + I^2(u, v)]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.19)$$

$$\varphi(u, v) = \arctg \left[\frac{I(u, v)}{R(u, v)} \right]. \quad (4.20)$$

Модуль функції $|F(u, v)|$ називають *спектром Фур'є* $f(x, y)$, а $\varphi(u, v)$ – *фазовим кутом*. Квадрат спектра

$$P(u, v) = |F(u, v)|^2 = R^2(u, v) + I^2(u, v) \quad (4.21)$$

має назву *спектр потужності* або *спектральна щільність*. Змінні u, v у перетворенні Фур'є називають *частотами*.

Вибірка неперервної функції у разі двох змінних – це двовимірна сітка з кроками Δx та Δy вздовж осей x і y відповідно. Дискретна функція $f(x, y)$ подає значення функції $f(x, y) = f(x_0 + x \cdot \Delta x, y_0 + y \cdot \Delta y)$ для $x = 0, 1, 2, \dots, M-1$, $y = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

Якщо на зображенні створена квадратна сітка, то $M=N$ і пара ДПФ запишеться у вигляді:

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cdot \exp[-i2\pi(ux + vy)/N] \quad (4.22)$$

для $u, v = 0, 1, 2, \dots, N-1$ та

$$f(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \cdot \exp[i2\pi(ux + vy)/N] \quad (4.23)$$

для $x, y = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

Зазначимо, що у такому разі множник $\frac{1}{N}$ входить в обидва вирази. Оскільки $F(u, v)$ і $f(x, y)$ – це пара перетворень Фур'є, то метод групування сталих множників може бути довільним.

Основи частотної фільтрації зображення

Основою методів частотної області є теорема згортки, із якої маємо таке співвідношення у частотній області:

$$G(u, v) = H(u, v) \cdot F(u, v), \quad (4.24)$$

де G і F – перетворення Фур'є функцій g, f відповідно, $H(u, v)$ називають *передавальною* функцією.

Числові задачі поліпшення зображень можуть бути виражені у формі рівності (4.24). Типова задача поліпшення зображення полягає в тому, щоб для заданої функції $f(x, y)$ після обчислення $F(u, v)$ вибрати передавальну функцію $H(u, v)$ так, щоб отримане зображення

$$g(x, y) = \mathfrak{F}^{-1} [H(u, v) \cdot f(u, v)] \quad (4.25)$$

виявляло певні характеристики яскравості $f(x, y)$. (Де $\mathfrak{F}^{-1}[\dots]$ означає обернене перетворення Фур'є виразу у квадратних дужках). Наприклад, застосовуючи функцію $H(u, v)$, можна підкреслити краї у $f(x, y)$, тобто підсилити високочастотні компоненти $F(u, v)$.

4.5.3. Поліпшення зображення модифікацією гістограми

Гістограма зображення

(Деякі відомості про метод гістограми подано у п. 3.5)

Гістограма рівнів сірого забезпечує глобальний опис зовнішнього вигляду зображення. Гістограма H_f цифрового зображення f – це графік залежності частоти появи кожного рівня сірого тону f . Отже, H_f є одновимірною функцією, визначеною в області $\{0, 1, 2, L-1\}$, з областю значень від нуля до максимальної кількості пікселів, що відповідають рівням сірого тону f .

Якщо f містить точно J_k значень появи рівня k сірого тону для кожного $k=0, \dots, L-1$, то

$$H_f(k) = J_k. \quad (4.26)$$

Алгоритм побудови гістограми зображення полягає в простому підрахунку кількості пікселів, що відповідають кожному рівню сірого тону.

0	0	7	7	7	2	2	4	4	4
0	0	7	7	7	2	2	4	4	4
7	7	7	7	7	2	2	4	4	4
5	5	5	5	1	7	7	6	6	6
5	5	5	5	1	1	7	6	6	6
6	6	5	5	1	1	6	6	4	2
3	3	5	5	1	1	7	6	4	2
3	3	5	5	5	6	6	6	7	2
3	3	3	5	5	4	6	6	7	7
3	3	3	3	4	4	6	6	7	7

Рис. 4.17. Фрагмент 8-рівневого зображення 10×10 пікселів

Приклад. Нехай рівні сірого тону фрагмента 8-рівневого зображення подано матрицею (рис. 4.17).

Підраховуємо кількість нулів у матриці. Їх 3, аналогічно одиниць є 4, і так далі. Заповнюємо таблицю 4.1.

Таблиця 4.1

Підрахування частот (для прикладу)

Рівень сірого тону	0	1	2	3	4	5	6	7
Частоти сірого тону	4	7	9	11	14	17	18	20

Будуємо гістограму (рис. 4.18)

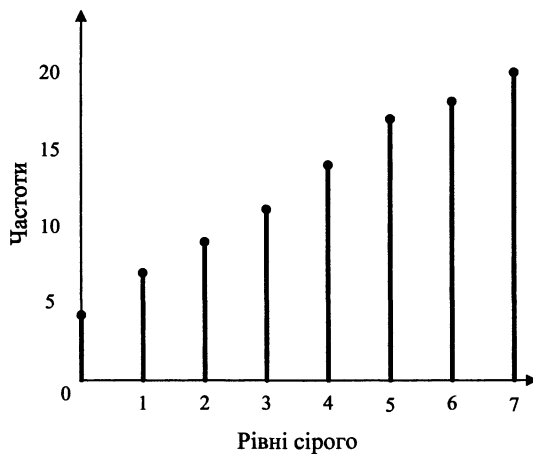


Рис. 4.18. Гістограма фрагмента, показаного на рис. 4.17.

Гістограма достовірно характеризує розподіл рівнів сірого тону у зображенні.

Насправді середня оптична щільність – це основна міра середньої яскравості або середнього рівня сірого кольору. Вона може бути обчислена безпосередньо за зображенням:

$$\bar{f} = \frac{1}{NM} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} f(x, y). \quad (4.27)$$

Визначена із гістограми величина \bar{f} для зображення дає

$$\bar{f} = \frac{1}{NM} \sum_{i=0}^{L-1} iH_f(i). \quad (4.28)$$

Вирівнювання гістограми

Одним із ефективних методів поліпшення зображення є метод вирівнювання або лінеаризація гістограми. Ідея полягає в тому, щоб рівні сірого тону зображення не тільки заповнювали діапазон шкали сірого тону, але і їхнє розподілення має бути однорідним по всьому діапазону. Отже, в ідеальному випадку бажано отримати сталу гістограму. У сенсі максимуму ентропії (про ентропію згадано в розділі 3) зображення з повністю сталою гістограмою містить найбільшу кількість інформації.

Для того, щоб пояснити вирівнювання гістограми, необхідно зробити деяке уточнення цього поняття для зображень. Для зображення, що містить $M \times N$ пікселів, нормалізована гістограма задається як

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{M \cdot N}, \quad 0 \leq r_k \leq 1 \quad (4.29)$$

для $k = 0, 1, \dots, L-1$, де L – кількість рівнів сірого; $p_r(r_k)$ – відносна частота появи k -го рівня сірого тону; n_k – кількість пікселів k -го тону у зображенні. Змінна r_k передає нормалізований рівень сірого тону у початковому зображенні, причому $r_0 = 0$ відповідає чорному тону, а $r_{L-1} = 1$ – білому.

Для $p_r(r_k)$ виконується:

$$\sum_{k=0}^{L-1} p_r(r_k) = 1. \quad (4.30)$$

Нормалізована гістограма має очевидну інтерпретацію – це емпірична щільність ймовірностей значень рівнів сірого тону зображення f . Іншими словами, якщо піксел з координатами (x, y) розглядається як випадковий, то $p_r(r_k)$ – це ймовірність того, що $f(x, y) = k$ і дорівнює

$$p_r(r_k) = P_r \{ f(x, y) = k \}.$$

Визначимо кумулятивну функцію перетворення як

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{N \cdot M} = \sum_{j=0}^k p_r(r_j), \quad (4.31)$$

$$0 \leq r_k \leq 1, \quad 0 \leq s_k \leq 1,$$

$$k = 0, 1, \dots, L-1.$$

Функція $T(r_k)$ є емпіричною функцією розподілу ймовірностей, отже, це неспадна функція.

Застосування (4.31) пояснимо на прикладі фрагмента 8-рівневого зображення з розподілом сірого тону, як показано у табл. 4.2.

Розподіл рівнів сірого нормалізованої та вирівняної гістограм

k_r	n_{rk}	$p_r(r_k)$	$T(r_k)$	$s_k * (L-1)$	$k_s =$ $INT[s_k$ $*(L-1)]$	n_{sk}	$p_s(s_k)$
0	4	0,04	0,04	0,28	0	11	0,11
1	7	0,07	0,11	0,77	0	0	0
2	9	0,09	0,20	1,40	1	9	0,09
3	11	0,11	0,31	2,17	2	11	0,11
4	14	0,14	0,45	3,15	3	14	0,14
5	17	0,17	0,62	4,34	4	17	0,17
6	18	0,18	0,80	5,60	5	18	0,18
7	20	0,20	1,00	7,00	7	20	0,20

Гістограма розподілу відповідних рівнів сірого тону подана на рис. 4.19. Функція перетворення (4.31) обчислюється у такій послідовності:

$$s_0 = T(r_0) = \sum_{j=0}^0 p_r(r_j) = p_r(r_0) = 0,04 ;$$

$$s_1 = T(r_1) = \sum_{j=0}^1 p_r(r_j) = p_r(r_0) + p_r(r_1) = 0,11 ;$$

$$s_2 = 0,20 , \quad s_5 = 0,62 ,$$

$$s_3 = 0,31 , \quad s_6 = 0,80 ,$$

$$s_4 = 0,45 , \quad s_7 = 1,00 .$$

Оскільки у цьому прикладі є тільки 8 дозволених рівнів, то кожному з перетворених значень можна призначити найближче значення рівня, наприклад,

$INT[s_0 \cdot 7] = INT[0,28] = 0$, де INT – означає операцію заокруглення до цілого значення.

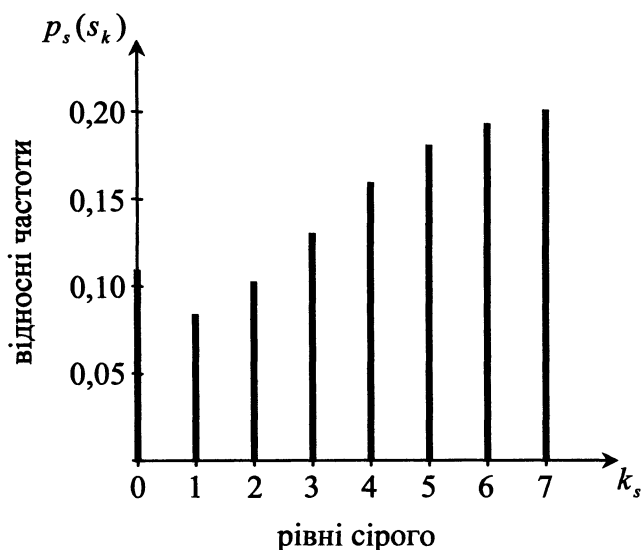


Рис. 4.19. Вирівняна гістограма для фрагмента зображення порівняно з рис. 4.18

Відзначимо, що у результаті ми отримали тільки 7 різних рівнів сірого тону. Отже, $k_r=1$ відображається до $k_s=0$ і у перетвореному зображенні з'являється $n_{s0} = 4 + 7 = 11$ пікселів із значенням $k_s = 0$. Також 9 пікселів набувають значення $k_s = 1$ і 11 пікселів – $k_s = 2$. Аналогічно стає 14 пікселів із значенням $k_s = 3$; 17 пікселів з $k_s = 4$; 18 пікселів з $k_s = 5$ і 20 пікселів з $k_s = 7$. Ділення цих чисел на $N \cdot M = 100$ дає змогу знайти значення $p_s(s_k)$ і побудувати вирівняну гістограму зображення (рис. 4.19). Як бачимо, вирівняна гістограма містить тільки 7 рівнів сірого замість 8 рівнів (рис. 4.18). Оскільки різниця яскравостей у зображенні стає різкішою, то контрастність зображення значно збільшується. Оскільки гістограма – це наближення до функції щільності розподілу ймовірності, то ідеально вирівняної гістограми ми не отримаємо.

Гістограма є найважливішим аналітичним інструментом, за допомогою якого можна отримати об'єктивну інформацію про розподіл яскравостей у зображенні.

4.5.4. Згладжування зображень

Операції згладжування використовують переважно для зменшення шуму або ефекту муару, який виникає у цифровому зображенні у результаті недостатньої вибірки або квантування.

Осереднення околу

Осереднення околу належить до методу просторової області для згладжування зображення. Для заданого $N \times N$ зображення $f(x, y)$ операція побудови згладженого зображення $g(x, y)$ полягає у визначенні середнього значення пікселів в околі кожної точки (x, y) . Згладжене зображення отримують за співвідношенням

$$g(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{(n, m) \in S} f(n, m) \quad (4.32)$$

Для $x, y = 0, 1, \dots, N-1$ S – множина координат точок в околі точки (x, y) , включаючи її саму. M – загальна кількість точок в околі.

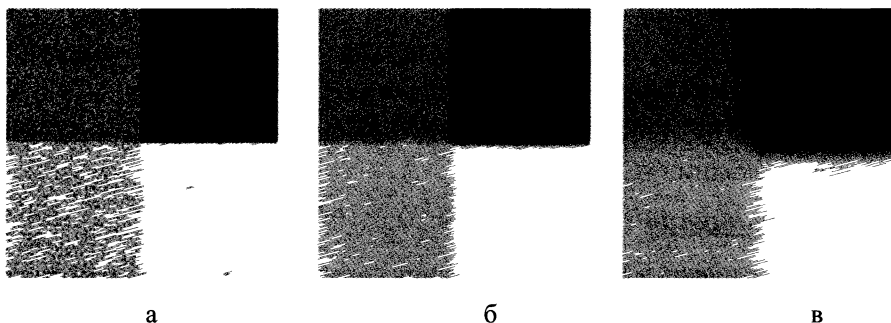


Рис. 4.20. Згладжування зображення методом осереднення околу: а – початкове зашумлене зображення; б, в – результат оброблення за формулою (4.26) з околами розмірів 9×9 та 31×31

На рис. 4.20 показано ефект згладжування з використанням методу осереднення околу. На рис. 4.20, а бачимо чотирирівневе зображення, пошкоджене шумом. Рис. 4.20, б, в є результатом згладжування зашумленого зображення з околами $n = 9, 31$ відповідно. Як бачимо, ступінь згладжування пропорційний до розміру вибраного околу.

Ефект згладжування може бути зменшений використанням порогового критерію. Замість використання (4.32) утворюємо $g(x, y)$ за таким правилом:

$$g(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{M} \sum_{(n,m) \in S} f(n, m), & \text{якщо } \left| f(x, y) - \frac{1}{M} \sum_{(n,m) \in S} f(n, m) \right| < T, \\ f(x, y) & \text{у протилежному випадку} \end{cases} \quad (4.33)$$

де T – порогове значення. Такий підхід залишає без зміни області зображення з великим, порівняно з T , відхиленням рівнів сірого тону. Можна очікувати, що більші відхилення відповідають контурам, тому використання умови (4.33) приведе до зменшення нечіткості контурів.

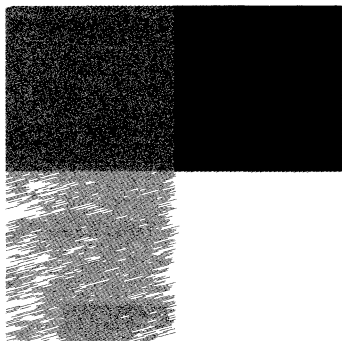


Рис. 4.21. Зображення рис. 4.20, згладжене за (4.33) з використанням околу 9×9 та $T=10$

Порівняння цього результату з рис. 4.20 показує, що межі між чотирма квадратами є різкішими на рис. 4.21.

Медіанна фільтрація

Основні недоліки методу згладжування полягають у тому, що розпливаються контури та інші чіткі деталі. Хоча цю проблему можна обійти використанням порогу, але вибір порогового значення пов'язаний зі значними випробуваннями. Альтернативний підхід полягає у застосуванні медіанного фільтра, за якого середнє значення сірого тону кожного пікселя замінюється медіанним значенням із рівнів сірого в околі кожного пікселя. Цей метод особливо ефективний, якщо характер шуму зумовлюють окремі яскраві (темні) точки і якщо треба зберегти чіткі контури.

Нагадаємо, що *медіаною* m множини значень є таке значення, що половина значень множини менша, ніж m , а половина більша, ніж m . Для виконання медіанної фільтрації в околі пікселя спочатку впорядковують за зростанням значення сірого тону в цьому пікселі та його сусідах, далі визначають медіану і призначають це значення пікселю. Припустимо, що окіл 3×3 складається із значень (10, 25, 25, 19, 150, 19, 19, 25, 25). Впорядковуємо ці значення як (10, 19, 19, 19, 25, 25, 25, 25, 150) і визначаємо медіану – 25.

Як бачимо, механізм медіанної фільтрації полягає в тому, що точки з екстремальними значеннями яскравості після сортування стають крайніми у

послідовності, медіана має значення, подібне до сусідніх пікселів. У такий спосіб усуваються яскраві (темні) ізольовані піксели в околі. Перевага методу медіанної фільтрації порівняно з методом осереднення околу полягає у можливості виконувати два або більше проходів для усунення точкового шуму.

4.5.5. Підкреслення країв у зображенні

Визначення країв між областями

Для визначення країв між областями на зображенні найпоширенішим є градієнтний метод. Край – це границя між двома областями з порівняно різними властивостями сірого тону. Для заданої функції $f(x,y)$ градієнт f від координат (x,y) визначається як вектор

$$\overline{G}[f(x,y)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix}. \quad (4.34)$$

З векторного аналізу відомо, що вектор вказує у напрямку максимальної швидкості зміни f у точці (x,y) . Для визначення країв між областями на зображенні нас цікавить модуль вектора, який позначається $G[f(x,y)]$, причому

$$G[f(x,y)] = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2}. \quad (4.35)$$

Ця величина дорівнює максимальній швидкості зростання $f(x,y)$ у напрямку G .

На практиці градієнт наближають сумою абсолютних значень похідних:

$$G[f(x,y)] = |G_x| + |G_y|. \quad (4.36)$$

Таке наближення значно легше реалізувати.

Маски обчислюють за формулами

$$G_x = \overrightarrow{w_1}^T \cdot \vec{r}, \quad G_y = \overrightarrow{w_2}^T \cdot \vec{r}, \quad (4.37)$$

де \vec{r} має зміст, який пояснено у (4.12).

Ці дві маски називають *операторами Собеля* (рис. 4.22).

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

а

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

б

Рис. 4.22. Оператори Собеля; а – для обчислення G_x ; б – для обчислення G_y

Щоб отримати градієнт, використовують комбінацію (4.35) або (4.36). Згортання цих масок із зображенням $f(x,y)$ дає градієнт в усіх точках зображення і його називають *градієнтним зображенням*. Існують багато способів побудови градієнтного зображення з використанням порогових значень. Нижче наведено можливі варіанти побудови градієнтних зображень:

а) підсилення важливих країв із збереженням особливостей гладкого фону:

$$g(x,y) = \begin{cases} G[f(x,y)], & \text{якщо } G[f(x,y)] \geq T, \\ f(x,y), & \text{у протилежному випадку;} \end{cases} \quad (4.38)$$

б) задавання країв певним рівнем сірого кольору, а фон залишається без зміни:

$$g(x,y) = \begin{cases} L_G, & \text{якщо } G[f(x,y)] \geq T, \\ f(x,y), & \text{у протилежному випадку,} \end{cases} \quad (4.39)$$

де L_G – рівень сірого тону для країв;

в) вивчення зміни сірого тону країв без впливу фону:

$$g(x,y) = \begin{cases} G[f(x,y)], & \text{якщо } G[f(x,y)] \geq T, \\ L_B, & \text{у протилежному випадку,} \end{cases} \quad (4.40)$$

L_B – рівень сірого тону для фону;

г) побудова бінарного градієнтного зображення, де краї і фон зображені двома різними сірими тонами:

$$g(x,y) = \begin{cases} L_G, & \text{якщо } G[f(x,y)] \geq T, \\ L_B, & \text{у протилежному випадку,} \end{cases} \quad (4.41)$$

де L_G – рівень сірого тону для країв, а L_B – рівень сірого тону для фону, T – порогове значення, яке підбирають експериментально.

Визначення належності пікселя темній чи світлій стороні краю

Для цього використовують оператор Лапласа:

$$L[f(x,y)] = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}, \quad (4.42)$$

який наближено можна обчислити згортанням маски (рис. 4.23) із зображенням $f(x,y)$. Якщо вектор сформований із коефіцієнтів цієї маски, ми можемо виразити оператор Лапласа (лапласіан) у формі:

$$L[f(x,y)] = \vec{w}^T \cdot \vec{r}, \quad (4.43)$$

де \vec{r} має зміст, який пояснено у (4.12).

0	1	0
-1	-4	1
0	1	0

Рис. 4.23. Маска
для обчислення
оператора Лапласа

Зауважимо, що лапласіан дорівнює нулю на постійних областях сірого тону і на похилих частинах країв, як і очікується від похідної другого порядку. Він реагує на зміну інтенсивності сірого тону, але рідко використовується для самого виявлення країв. Причина в тому, що оператор другої похідної є занадто чутливим до шуму. Тому цей оператор відіграє другорядну роль детектора для встановлення належності цього пікселя темній або світлій стороні краю.

4.5.6. Поліпшення зображень за допомогою частотних фільтрів

Завдання поліпшення зображення полягає у виборі передавальної функції $H(u,v)$

$$g(x,y) = \mathfrak{F}^{-1}[H(u,v) \cdot f(u,v)] \quad (4.44)$$

у такий спосіб, щоб отримане зображення мало певні характеристики (де $\mathfrak{F}^{-1}[\dots]$ означає обернене перетворення Фур'є (ОПФ) виразу у квадратних дужках).

Як відомо, край між областями однорідного сірого тону та інші різкі перепади яскравостей (такі, як шум) становлять значну частину високочастотних компонент перетворення Фур'є (ПФ). Звідси випливає, що розпливчастість прямо залежить від високочастотних компонент у прямому перетворенні цього зображення, тоді

обернене перетворення дає згладжене зображення. Навпаки, якщо послабити низькочастотну компоненту перетворення Фур'є, не зачіпаючи високочастотну, то можна підсилити різкість зображення.

Наведемо приклади передавальних функцій радіально-симетричних фільтрів низьких та високих частот. Нагадаємо, що назва фільтра збігається з назвою тих частот, які він пропускає. Передавальні функції, які ми розглянемо, мають однакові дійсні та уявні частини та нульовий фазовий зсув.

Для згладжування зображень використовують такі фільтри.

Ідеальний фільтр низьких частот

Двовимірний радіально-симетричний ідеальний низькочастотний фільтр задається передавальною функцією:

$$H(u, v) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } D(u, v) \leq D_0 \\ 0, & \text{якщо } D(u, v) > D_0 \end{cases}, \quad (4.45)$$

де $D_0 > 0$ – константа, а саме радіус кола перемикання частот, а $D(u, v)$ – відстань від центра частотної області до точки з координатами (u, v) :

$$D(u, v) = \left[u^2 + v^2 \right]^{1/2}. \quad (4.46)$$

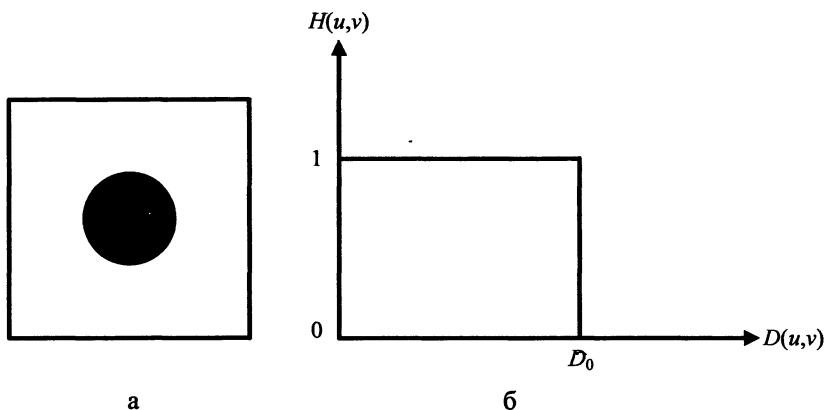


Рис. 4.24. Вигляд ідеального радіально-симетричного низькочастотного фільтра:
а – зображення маски фільтра: чорні піксели набувають значення 1, а білі – 0;
б – поперечний переріз передавальної функції фільтра

Як впливає із теореми зсуву, для того щоб початок дискретного перетворення Фур'є функції $f(x, y)$ перенести у центр $N \times N$ частотного квадрата,

необхідно перетворення Фур'є застосувати до добутку $f(x,y)$ на $(-1)^{x+y}$ (У разі одновимірної функції $f(x)$ множимо на $(-1)^x$).

Назва “ідеальний фільтр” виникає з умови, що всі частоти всередині кола радіуса D_0 проходять без змін, а всі частоти ззовні цього кола повністю знищуються. Наведені тут фільтри є радіальносиметричними відносно початку координат. Зазначимо, що для радіальносиметричного фільтра з центром у частотному $N \times N$ квадраті прийнято, що початок перетворення Фур'є розташований у центрі квадрата.

Для фільтрів подібного типу достатньо задати поперечний розріз, який поширюється як функція відстані від початку координат вздовж радіальної прямої. Точку переходу між значеннями $H(u,v)=1$ і $H(u,v)=0$ часто називають точкою перемикання частоти (тут D_0). Коли поперечний розріз обертається навколо початку, точка D_0 описує коло і ми отримуємо геометричне місце точок перемикання частот на відстані D_0 від початку. Величина D_0 є важливою характеристикою фільтрів і слугує для порівняння поведінки фільтрів різних типів. Якщо радіус фільтра D_0 збільшується, ступінь розпливчастості зменшується і навпаки.

Різке перемикання частот ідеального фільтра не може бути реалізоване за допомогою апаратних засобів, але може бути змодельоване на комп'ютері.

Фільтр Баттерворта низьких частот

Передавальна функція радіально-симетричного фільтра низьких частот n -го порядку визначається співвідношенням:

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + \left[D(u,v) / D_0 \right]^{2n}}, \quad (4.47)$$

де D_0 , $D(u,v)$ має такий самий зміст, як у (4.45)

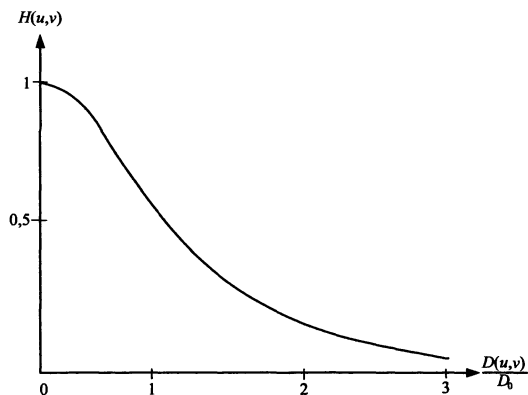


Рис. 4.25. Поперечний переріз передавальної функції низькочастотного фільтра Баттерворта

Низькочастотний фільтр Баттерворта (рис. 4.25), на відміну від аналогічного ідеального фільтра, пропускає частину високих частот ззовні кола перемикання частот і завдяки цьому чіткі контури на зображенні менше розмиваються. Тому такі фільтри належать до фільтрів з гладким переходом між низькими та високими частотами.

Для підсилення різкості зображень задають аналогічні фільтри високих частот.

Ідеальний фільтр високих частот

Двовимірний ідеальний радіально-симетричний високочастотний фільтр (рис. 4.26) задається передавальною функцією:

$$H(u, v) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } D(u, v) \leq D_0 \\ 1, & \text{якщо } D(u, v) > D_0 \end{cases}, \quad (4.48)$$

де D_0 , $D(u, v)$ має такий самий зміст, як у (4.45).

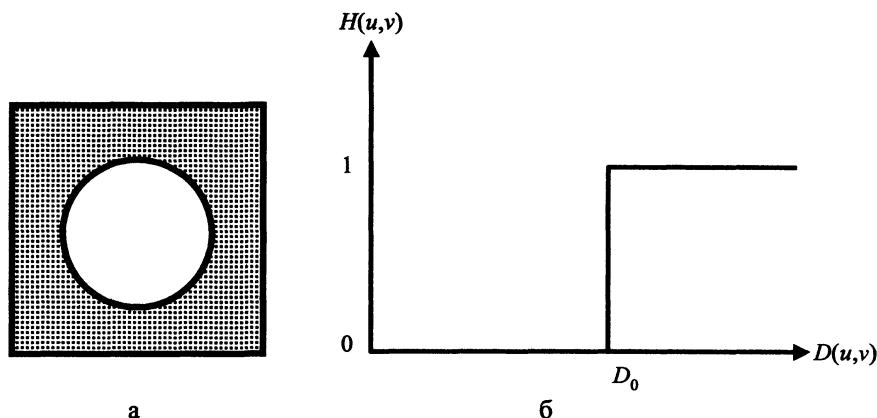


Рис. 4.26. Вигляд ідеального радіально-симетричного високочастотного фільтра:

а – зображення маски фільтра: чорні піксели набувають значення 1, а білі – 0;

б – поперечний переріз передавальної функції фільтра

Фільтр Баттерворта високих частот

Передавальна функція радіально-симетричного фільтра високих частот (рис. 4.27) n -го порядку визначається співвідношенням:

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + \left[\frac{D_0}{D(u, v)} \right]^{2n}}, \quad (4.49)$$

де D_0 , $D(u, v)$ має такий самий зміст, як у (4.45).

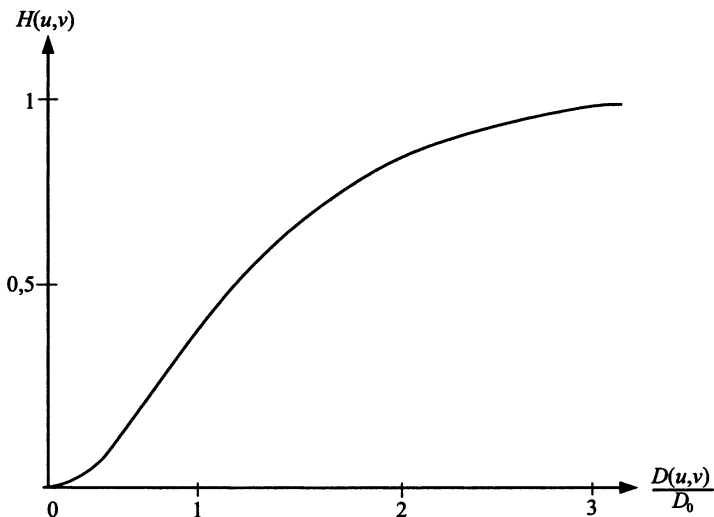


Рис. 4.27. Поперечний переріз передавальної функції
високочастотного фільтра Баттерворта

Незважаючи на те, що цей фільтр зберігає частину низькочастотних компонент, області однорідного сірого тону стають затемненими. Прийом, який часто використовують для пом'якшення тональності, полягає у додаванні константи до передавальної функції фільтра високих частот. Такий спосіб називають *високочастотним підсиленням*. Для подальшого поліпшення зображення рекомендують після високочастотного підсилення застосовувати *вирівнювання гістограм*.

З обчислювального погляду застосування частотних фільтрів включає такі процеси:

1. Введення зображення $f(x, y)$ та значення D_0 .
2. Виведення початкового зображення на екран.
3. Перенесення початку координат у центр частотного квадрата множенням $f(x, y)$ на $(-1)^{x+y}$.
4. Застосування прямого перетворення Фур'є до результату, отриманого в попередньому пункті, тобто визначення $F(u - N/2, v - n/2)$.
5. Формування матриць для задання дійсної та уявної частин передавальної функції фільтра $H(u, v)$.
6. Обчислення матриці $G(u, v)$ множенням елементів матриці $F(u - N/2, v - N/2)$ на відповідні елементи матриці $H(u, v)$. (Виконувати як множення комплексних чисел!).

7. Обчислення матриці $g(x, y)$ застосуванням оберненого перетворення Фур'є до матриці $G(u, v)$.
8. Перенесення початку координат у лівий верхній кут множенням $g(x, y)$ на $(-1)^{x+y}$.
9. Візуалізація отриманого зображення.

4.6. Специфічні операції опрацювання цифрових знімків

У різних технологічних процесах фотограмметричного опрацювання цифрових знімків часто постають спільні за змістом завдання. До них належать нижчеперераховані, подамо опис їхньої суті і змісту.

Побудова пірамідальних образів

При автоматичному пошуку ідентичних контурів (точок) на різних знімках, при генеруванні ЦМР та при створенні ортофотокарт необхідно отримати із зображення-оригіналу похідні образи, переважно зменшені. За ідеєю це нагадує картографічну генералізацію, коли від певної кількості карт великого масштабу поступово, крок за кроком, переходимо до карти дрібного масштабу. Схематично створення пірамідального образу показано на рис. 4.28.

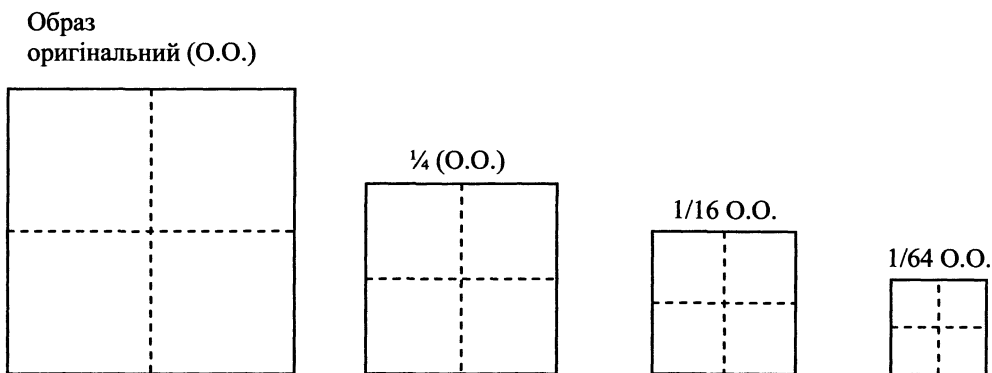


Рис. 4.28. Зменшення оригіналу знімка, крок за кроком, до 1/64 і далі

Опрацьовано кілька способів побудови нового образу:

- генерування через n -пікселів, без зміни оптичної щільності;
- генерування з усередненням оптичної щільності;
- генерування з усередненням та згладжуванням методом Гаусса.

У першому способі (в англomовній літературі *subsampling*) зменшення оригіналу йде що другий рядок та що другий піксел. Наступний образ зменшується так, що займає $\frac{1}{4}$ обсягу пам'яті попереднього.

У способі з усередненням оптичної щільності (англ. *Averaging*) з чотирьох пікселів генерується новий з оптичною щільністю, визначеною як середнє з чотирьох базових пікселів.

У способі Гаусса (англ. *Gaussian sampling*) перед генеруванням нового образу здійснюється згладжування оригіналу фільтром Гаусса. Це дає змогу уникнути деформації важливих елементів на базовому зображенні або ж запобігти їхньому зникненню під час генерування нового образу (особливо це стосується лінійних об'єктів). Фільтрація Гаусса виконується сплайн-вікном 5×5 пікселів зі значеннями коефіцієнтів, наведених на рис. 4.29.

1	4	6	4	1
4	16	24	16	4
6	24	36	24	6
4	16	24	16	4
1	4	6	4	1

Рис. 4.29. Коефіцієнти для сплайн-згладжування фільтром Гаусса

Допасування оптичних щільностей (resampling)

Задача зводиться до генерування оптичної щільності нового піксела, утвореного з певної сукупності пікселів базового зображення. Як бачимо, це перегукується із формуванням пірамідальних образів, але ця процедура є особливо важливою під час створення ортофотокарт.

Пояснимо це на простому прикладі.

Нехай об'єкт формується у вигляді сукупності (матриці) пікселів (рис. 4.30). Матриця пікселів, що формує знімок, є дещо іншою. Центри пікселів з головного образу переносяться у зовсім інше місце.

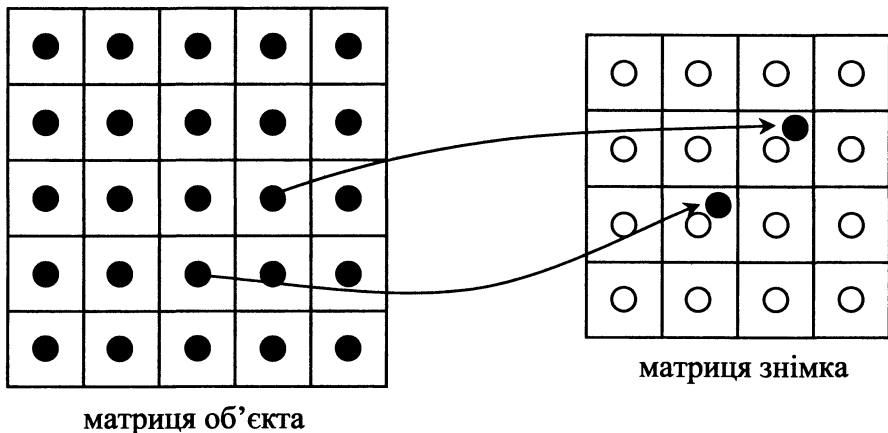


Рис. 4.30. Попіксельне перенесення оптичних щільностей з основного зображення (об'єкта) на сформований образ

Необхідно кожному з пікселів матриці знімка надати значення оптичної щільності. Це можна реалізувати такими способами:

- *найближчого "сусіда"*; новоутвореному пікселу приписується оптична щільність пікселя з оригіналу, центр якого лежить найближче до центра пікселя образу. Спосіб найпростіший, але втрачається якість передавання зображення – для плоских територій до 20 %, для горбистих – вдвічі;
- *білінійного перетворення*; беруть чотири сусідні піксели, записується система рівнянь з чотирма параметрами, які можна визначити. Недолік – оптична щільність пікселя є штучною і не відповідає реальності;
- *кубічної інтерполяції*; беруть 16 найближчих пікселів, складають відповідні рівняння з вагами. Вага є величиною обернено пропорційною до віддалі між визначуваним та поточним пікселями;
- *з використанням полінома Лагранжа*; так само беруть 16 пікселів, але математичною моделлю є поліном Лагранжа;
- *сплайн-інтерполяцією*; визначаються параметри переходу з використанням 16 пікселів та сплайн-функції. Цей вид інтерполяції характеризується плавною зміною оптичної щільності.

Пояснимо цю процедуру на прикладі використання білінійного перетворення:

$$\rho = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy. \quad (4.50)$$

Візьмемо центри чотирьох пікселів 1, 2, 3, 4, для яких відомі оптичні щільності $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$.

Виберемо деяку систему координат з початком у центрі першого пікселя 1 (рис. 4.31).

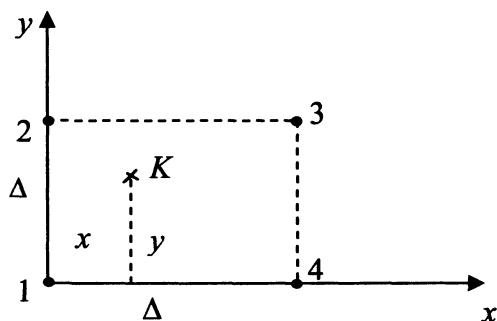


Рис. 4.31. Положення центрів чотирьох пікселів 1, 2, 3, 4 базового зображення та K – визначуваного образу

Для цих чотирьох центрів маємо такі координати:

$$\begin{aligned}x_1 &= 0, & y_1 &= 0, \\x_2 &= 0, & y_2 &= \Delta, \\x_3 &= \Delta, & y_3 &= \Delta, \\x_4 &= \Delta, & y_4 &= 0.\end{aligned}$$

де Δ – відома величина, може бути крок сканування.

Підставляючи ці значення координат у (4.50), отримаємо систему лінійних рівнянь з чотирма невідомими a_0, a_1, a_2, a_3 :

$$\begin{aligned}a_0 + a_1 \cdot 0 + a_2 \cdot 0 + a_3 \cdot 0 \cdot 0 &= \rho_1, \\a_0 + a_1 \cdot 0 + a_2 \cdot \Delta + a_3 \cdot 0 \cdot \Delta &= \rho_2, \\a_0 + a_1 \cdot \Delta + a_2 \cdot \Delta + a_3 \cdot \Delta \cdot \Delta &= \rho_3, \\a_0 + a_1 \cdot \Delta + a_2 \cdot 0 + a_3 \cdot 0 \cdot \Delta &= \rho_4,\end{aligned}$$

з якої маємо такі значення невідомих:

$$\begin{aligned}a_0 &= \rho_1, & a_1 &= \rho_4 / \Delta, & a_2 &= \rho_2 / \Delta, \\a_3 &= \frac{1}{\Delta^2} (\rho_3 - \rho_1 - \rho_2 - \rho_4).\end{aligned}\tag{4.51}$$

Якщо визначуваний піксел з центром у точці K має координати x, y , то його оптична щільність обчислюється так:

$$\rho = \rho_1 + x \cdot \frac{\rho_4}{\Delta} + y \cdot \frac{\rho_2}{\Delta} + x \cdot y \cdot \frac{1}{\Delta^2} (\rho_3 - \rho_1 - \rho_2 - \rho_4).\tag{4.52}$$

Подібний хід обчислень і для інших типів інтерполяції, лише замість рівнянь типу (4.50) беруть інші відомі в математиці формули: кубічний поліном, поліном Лагранжа або сплайн-функцію. Наприклад, поліном Лагранжа має вигляд:

$$\rho_n(x) = \sum_{i=1}^n f(x_i) \prod_{j \neq i} \frac{x - x_j}{x_i - x_j}, \quad (4.53)$$

де x – вузол інтерполяції;

$f(x_i)$ – оптична щільність в i -му вузлі;

\prod – символ коефіцієнта;

ρ_n – шукана оптична щільність у вузлі інтерполяції.

4.7. Методи автоматичної ідентифікації образів у цифровій фотограмметрії

Повна автоматизація фотограмметричного опрацювання знімків (без участі людини) як наукова проблема була сформована доволі чітко у 50-ті роки XX ст., хоча відомі праці проф. А. Скірідова, опубліковані в 30-ті роки XX ст., в яких ставилася проблема автоматизації стереовимірювань через використання фотострумів.

Практична реалізація цієї проблеми фактично була здійснена в 90-х роках XX ст. і тісно пов'язана з впровадженням у життя швидкодійних комп'ютерів з величезним об'ємом пам'яті.

Задачу автоматичної ідентифікації образів можна розділити на такі складові частини:

- автоматичний пошук на знімках образів, для яких наперед відоме їхнє стандартне подання: координатні позначки, замарковані штучним або натуральним способом точки знімків або місцевості (опорні точки) тощо;
- автоматичний пошук чітких контурних точок на сусідніх знімках (стереопари або маршрутів);
- автоматичний пошук ідентичних точок на лівому та правому знімках стереопари.

Розглянемо деякі підходи до реалізації поставлених задач. Кореляційні методи, що застосовуються у фотограмметрії, належать до таких основних груп:

- кореляційний аналіз оптичних щільностей (англ. *Area Based Matching* – *ABM*);
- кореляційний аналіз примітивів (англ. *Feature Based Matching* – *FBM*);
- кореляційний аналіз топологічних властивостей (англ. *Relation Matching* – *RM*).

Передусім нагадаємо, що коефіцієнт кореляції обчислюється з виразу:

$$r = \frac{\delta_{12}}{\delta_1 \cdot \delta_2} = \frac{\sum(\rho_1 - \rho_{s1})(\rho_2 - \rho_{s2})}{\sqrt{\sum(\rho_1 - \rho_{s1})^2 \cdot \sum(\rho_2 - \rho_{s2})^2}}, \quad (4.54)$$

де δ_{12} – коваріація, δ_1, δ_2 – стандартні відхилення;

ρ_1, ρ_2 – значення сигналів (оптичних щільностей) в обох зображеннях (наприклад, лівого і правого знімків стереопари);

ρ_{s1}, ρ_{s2} – середні арифметичні значення сигналів для досліджуваних образів.

Відомо, що $-1 \leq r \leq 1$. Два сигнали вважаються ідентичними, для яких коефіцієнт кореляції є максимальним.

Метод *ABM* полягає у дослідженні двох вікон розміром $M \times N$ пікселів, що належать до двох образів (наприклад, лівий та правий знімки стереопари). У т. зв. методі *Cross Correlation* (CC) мірою подібності (ідентичності) двох зображень є максимальний коефіцієнт кореляції (метод кореляційний). У методі найменших квадратів (англ. *Least Squares Matching* – метод опрацював Forsther) обчислюють $\sum VV = \min$, де

$$V_{ij} = \rho_i - \rho_j. \quad (4.55)$$

Це означає, що сума квадратів різниць оптичних щільностей у пікселях на первинному та досліджуваному образах повинна бути мінімальною.

Метод *ABM* придатний для дослідження зображень з доброю текстурою.

Метод *FBM* полягає у виділенні незалежно на кожному образі груп пікселів, що творять лінії або точки (т. зв. примітиви). Далі виконується кореляційний аналіз цих груп (примітивів), якими можуть бути точки, елементи границь, малі замкнуті області, полігони, складені структури.

Кожний елемент має атрибутивні дані, такі, як координати на зображенні, середня оптична щільність образу. Для ліній – це орієнтація, градієнт, довжина і кривина, для полігону – це площа, середня оптична щільність. Такі списки на наступному етапі піддаються аналізу. Часто мірою подібності є метод найменших квадратів: сума квадратів розбіжностей між характеристиками повинна бути мінімальною.

Для зображень з нечіткою текстурою метод не є надійним, проте позитивом є його незалежність від геометрії зображень та різниць оптичних щільностей.

Метод *RM* полягає у порівнянні топологічних властивостей і залежностей.

З математичної позиції простір поділяють на дві категорії – метричний і топологічний. І перший, і другий визначаються як пари (M, A) , де M – множина об'єктів, A – деяке відношення на цій множині.

У метричному просторі це пара (M, ρ) , де ρ – відношення, назване метрикою, і воно визначає віддаль $\rho(x, y)$ з певними умовами.

Топологічний простір – це пара (M, ν) , де ν – система підмножин множини

M , яка містить в собі:

- саму множину M і порожню множину \emptyset ;
- перетин будь-якої пари своїх підмножин;
- об'єднання будь-якої множини зі своїми підмножинами, а також перетин множини з підмножинами.

Топологічний підхід тісно переплітається з теорією графів. Зокрема, можна згадати, що під час вивчення структурних властивостей графів використовують їхні матричні подання. У найпростішому, наприклад, поданні дорожню мережу можна зобразити у вигляді графа, створити матриці перерізів і контурів (типові процедури в теорії графів) та побудувати топологічні матриці. Аналіз топологічних матриць з двох образів дає можливість відшукати ідентичні елементи.

Загалом можливості топологічного підходу ще далеко не вичерпані і потребують подальших досліджень.

Кореляція для стандартних образів

Нехай координатна позначка знімка має стандартний вигляд, який поданий матрицею оптичних щільностей 5×5 (рис. 4.32). Необхідно відшукати цей образ у матриці знімка, в області пікселів 12×12 . Візуально людині дуже легко віднайти цей пошуковий образ, який показано пунктирною лінією на рисунку.

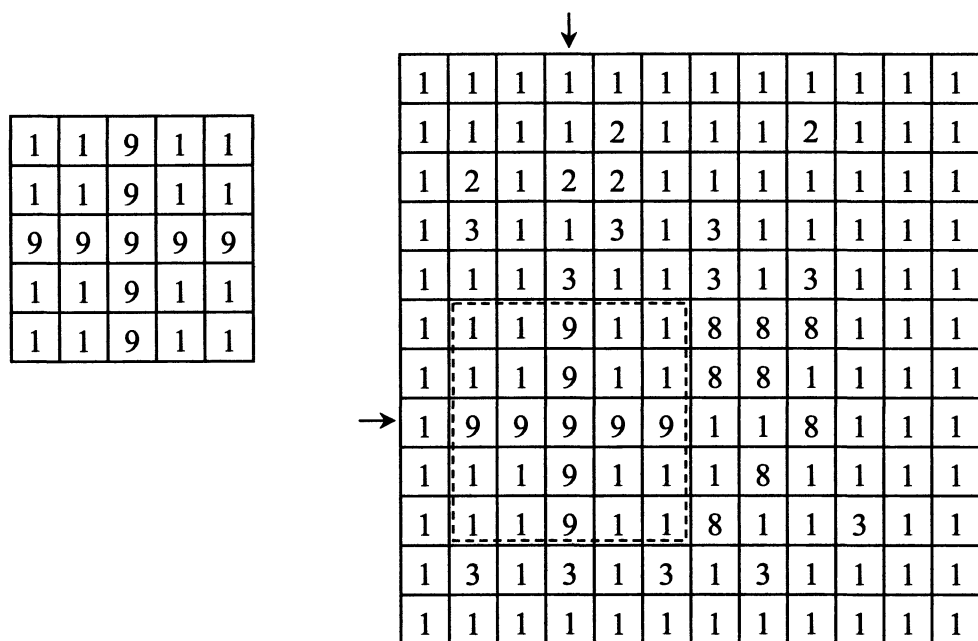


Рис. 4.32. Цифрове подання координатної позначки як еталону – ліворуч та матриці зображення (знімка) – праворуч

Автоматичне знаходження полягає в обчисленні сукупності коефіцієнтів кореляції для різних позицій стандарту стосовно досліджуваного образу (4.54). Зі знайдених коефіцієнтів вибирають той, що має максимальне значення.

На якість пошуку зазвичай впливають два чинники:

- шуми (випадкові помилки), які змінюють оптичні щільності (або їх ще називають радіометричними характеристиками);
- “розмиття країв” образів через недостатню чутливість сенсорів.

Для підвищення якості кореляції відеосигналів використовують так звану “підгонку” стандартного образу до пошукового на рівні субпіксельної області. Це означає, що піксел ділиться на кілька субпікселів, а далі оптичні щільності подають як суми постійної та випадкової складової. До такої моделі можна застосувати метод найменших квадратів для мінімізації випадкових помилок. Як правило, “підгонка” полягає в знаходженні трьох невідомих, які точніше наближають шуканий образ до стандартного.

Розглянутий варіант обчислення сукупності коефіцієнтів кореляції з рівняння (4.54) є найпростішим, бо є класичною задачею одновимірної кореляції.

Автоматичний пошук чітких контурів на сусідніх знімках.

Переважно використовують на підставі ієрархічної багаторівневої кореляції лівого та правого знімків, що формують стереопару (або зображень з двох сусідніх маршрутів). Для базових (початкових) зображень виконують вирівнювання фототону з використанням фільтра Гаусса.

Далі застосовують пірамідальну побудову зображень на 1, 2, 3 та ін. рівнях. У такий спосіб виконується локалізація елементів зображень, тобто істотно зменшується пошукова зона ідентичних контурів. Застосувавши кореляційні обчислення, знаходять ідентичні чіткі контури на обох знімках.

Автоматичний пошук ідентичних точок для фототріангуляції та ЦМР

Під час побудови та спостереження стереомоделі на стереофотограмметричних приладах оператор, маючи певні професійні навички, легко знаходить ідентичні точки на лівому та правому знімках, використовуючи явище штучного стереоефекту. Чим більше поле зору приладу, тим легше спостерігати стереоефект та міряти модель. Тут, очевидно, задіяні фізіологічні властивості стереозору, досвід та навички оператора.

У цифровій фотограмметрії пошук ідентичних зображень, як згадано вище, ґрунтується на аналізі оптичних щільностей, і це можна реалізувати кількома способами.

Спосіб одновимірної кореляції застосовується у разі опрацювання трансформованих зображень (знімків), тобто коли і лівий, і правий знімки є горизонтальними і, як наслідок, відсутній поперечний паралакс. Тоді зображення лівого знімка приймають за вихідне ідентично, як для стандартних образів.

Спосіб попереднього знаходження областей, де розміщені ідентичні точки, можна реалізувати в діалоговому або автоматизованому режимі. Очевидно, що тоді немає необхідності шукати ідентичні точки по всій стереопарі, а можна обмежитись

пошуком їх у певних зонах. Для автоматичного вибору таких зон використовують т. зв. *інтерест-оператори*.

Оптичні щільності всього знімка творять т. зв. текстуру знімка, а перші або ж і другі різниці дають розмір текстури. Порівнюючи цей розмір з наперед заданим пороговим значенням, можна віднайти ідентичні ділянки двох знімків. У межах цих ділянок пошук ідентичних точок відбувається на підставі одновимірної кореляції для орієнтованих (трансформованих) знімків або ж двовимірної кореляції для неорієнтованих знімків.

Інтерест-оператор використовують також для пошуку пікселя або групи пікселів, які сильно відрізняються оптичною щільністю від сусідніх пікселів (груп).

Відомі два опрацювання. Перше належить Moravec (1981 р.) і зводиться до розрахунку суми квадратів різниць щільностей пікселів в трьох напрямках (по осі x , по осі y та по діагоналі). Результатом для досліджуваного вікна (розміром 4×4 або 8×8 пікселів) була мінімальна різниця за напрямками. Вікно, для якого результат не перевищував певного допуску, давало шукану ідентичну точку чи область.

Друге опрацювання належить Forstner (1987 р.) і зводиться до обчислення суми квадратів різниць (себто градієнтів) у кожному вікні та використанні варіантів для двох вікон. Цей підхід використовується для автоматичного знаходження зв'язкових точок у цифровій фототріангуляції.

Третій спосіб полягає у побудові оператора або матриці складчастості. Суть методу полягає в обчисленні вторинних різниць оптичних щільностей:

$$a''_{i,j} = a_{i+1,j} + a_{i-1,j} + a_{i,j+1} + a_{i,j-1} - 4a_{i,j},$$

де i, j – номери пікселів.

На утвореному в такий спосіб новому зображенні дуже чітко виділяються лінії (дороги, контури будівель тощо) і зникають напівтони. Тому таке зображення є легшим для корелювання ідентичних точок. Застосування оператора L_0G (Лапласа–Гаусса) дає змогу фільтрувати шуми (випадкові помилки) в оптичних щільностях та підвищувати якість корелювання образів.

Четвертий спосіб полягає в побудові піраміди зображень, він розглядався вище.

Наступний спосіб полягає в тому, що об'єкт апроксимують (розкладають) сукупністю взаємно прилеглих граней. Коефіцієнт кореляції та геометричне положення грані визначають одночасно; підставою для знаходження ідентичних ділянок є те, що оптичні щільності зображень на лівому і правому знімках є максимально близькими.

5. ПОБУДОВА ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ ОБ'ЄКТІВ

5.1. Поняття про цифрові моделі об'єкта (ЦМО, ЦММ, ЦМР)

Головним джерелом даних про земну поверхню і надалі залишаються карти, але в останні десять років інтенсивно впроваджуються методи, пов'язані з цифровим поданням земної поверхні та динаміки її змін.

Кінець ХХ століття з його величезним за розмахом розвитком інформаційних технологій характеризується кардинальними змінами в інженерній науці та практиці. Тому закономірно, що сучасні методи комп'ютерного опрацювання інформації ґрунтуються на створенні цифрових моделей об'єкта (ЦМО), цифрових моделей місцевості (ЦММ) та цифрових моделей рельєфу (ЦМР), які широко використовують у ГІС і які є пріоритетними для розв'язання цілої низки наукових та народно-господарських завдань. Наприклад, інтерактивні методи проектування інженерних споруд, аналіз просторових даних, управління територіями вимагають подання інформації про місцевість у цифровій формі. У більшості задач власне ЦММ є незамінною формою подання інформації про Землю або її частини від глобального до субрегіонального рівнів.

Модель – це об'єкт будь-якої природи, здатний замінити за певних умов інший об'єкт. Під *моделюванням* розуміють побудову моделі і дослідження відповідності моделі вихідному об'єкту для отримання про нього нової інформації.

Природне середовище є одночасно протяжне і дискретне (дискретні просторові елементи у певних межах). Ця властивість має значення для моделювання середовища в геоінформаційних системах, які забезпечують інтеграцію різних типів даних, поданих у цифровій формі. Моделі поверхні Землі зручно класифікувати як цифрові моделі об'єктів (ЦМО), цифрові моделі місцевості (ЦММ) та цифрові моделі рельєфу (ЦМР).

Об'єкт є елементом, виокремленим із загальної системи даних. *Цифрова модель об'єкта* подає інформацію про об'єкт, а також правила оперування з цією інформацією. Об'єкти земної поверхні визначаються геометричними даними, зв'язками, типом, атрибутами, часовими змінними. Геометричним поданням об'єкта є точка, лінія і поверхня. Цифрові моделі об'єктів залежно від задачі дослідження можуть мати самостійний характер (гідрографія, дорожня мережа) або ставати елементами цифрової моделі місцевості.

Під *цифровою моделлю місцевості* розуміють впорядковану множину точок з інформацією про місцевість у цифровій формі, визначену математичними залежностями, за якими однозначно з потрібною точністю можна отримати необхідні характеристики місцевості.

Кожен умовний знак є моделлю певного об'єкта місцевості.

Цифрова модель рельєфу визначена як цифрове і математичне подання рельєфу місцевості на основі дискретної сукупності вихідних точок, які дають змогу із заданою точністю відтворити реальну поверхню та її структуру. Основні сфери застосування цифрових моделей пов'язані з визначенням та побудовою ізоліній (у топографії – горизонталей), побудовою профілів, визначенням вододілів та ліній стоку, вибором оптимальних трас доріг, каналів, меліоративних мереж, інших лінійних об'єктів, виділенням басейнів водозборів, визначенням обсягів земляних робіт, об'ємів винятих порід. Зростає кількість робіт, кінцевою метою яких стає отримання даних про зсувні, ерозійні та деформаційні процеси. До окремої групи робіт, пов'язаних з рельєфом, належить визначення площ затоплених та підтоплюваних земель, що є сферою гідрологічних досліджень.

За розташуванням вихідних точок і порядком формування цифрові моделі рельєфу можна класифікувати за трьома типами: ті, які не враховують структуру рельєфу, ті, які частково враховують структуру рельєфу і ті, які враховують структурну будову рельєфу.

До моделей, які не враховують структуру рельєфу, можна зарахувати:

- 1) регулярні моделі;
- 2) моделі, задані точками з довільним розташуванням.

До моделей, які частково враховують структуру рельєфу, належать:

- 1) регулярні моделі, доповнені точками, розташованими на структурних лініях, і характерними точками;
- 2) моделі, в яких точки розміщені через однаковий інтервал;
- 3) моделі, в яких вихідні точки розташовані за профілями.

Моделі, які враховують структуру рельєфу, поділяють на:

- 1) структурні, в яких вихідні точки моделюють структуру рельєфу;
- 2) моделі, в яких вихідні точки розташовані на ізолініях залежно від їхньої кривини.

Дані для створення ЦМР отримують з фотограмметричних вимірювань, з наземного (геодезичного) знімання, скануванням горизонталей на картах з фіксацією результатів у цифровій формі, за матеріалами дистанційного зондування або з використанням лазерних та інших систем, які дають просторові координати точок місцевості.

5.2. Методи збирання даних для побудови моделі об'єкта

5.2.1. Загальні відомості

Сучасні геодезичні, картографічні, фотограмметричні та дистанційні технології збирання інформації про об'єкти дають змогу швидко та з бажаною точністю отримати дискретні дані про поверхню досліджуваного предмета.

Такі методи і підходи постійно вдосконалюються, і це стосується їхньої швидкодії, оперативності, ефективності, інформаційності та точності.

Доволі часто в літературі, особливо в зарубіжній, задачу цифрового моделювання поділяють на дві складові:

- отримання цифрової моделі покриття місцевості;
- побудова цифрової моделі місцевості (найчастіше мають на увазі рельєф земної поверхні).

Під першим напрямком розуміють способи отримання даних про земну поверхню та об'єктів на ній (в англ. транскрипції DSM – Digital Surface Model). Зустрічається термін-аналог “Цифрова модель ландшафту” (Digital Landscape Model – DLM). У результаті опрацювання сукупності даних про рельєф отримують кінцевий продукт – ЦМР.

Сьогодні існують такі методи збирання даних:

- геодезичний (польовий), в сучасних умовах ґрунтується на використанні електронних тахеометрів;
- картометричний, використовують картографічні матеріали (карти, плани), з яких методом цифрування (вручну, напівавтоматично або в автоматичному режимі) отримують дискретні дані про об'єкт. Наприклад, цифрують горизонталі, відображені графічно на карті;
- фотограмметричний, ґрунтується на стереовимірюваннях просторової моделі об'єкта, побудованої зі стереопари зображень. Вимірювання може бути ручним, напівавтоматичним або ж автоматичним. Детальніше воно буде висвітлено в розділі 7;
- наземне лазерне сканування, ґрунтується на використанні спеціального приладу – лазерного наземного сканера. Відомості про цей сучасний ефективний спосіб подано у п. 5.2.2;
- лазерне сканування з повітряного носія. Використовується лазерний сканер, встановлений на літаку чи гелікоптері. Відомості про цей підхід подаємо в п. 5.2.3;
- інтерферометрія зображень, отриманих за допомогою радара, встановленого на літаку чи супутнику. Короткі відомості про цей спосіб викладено в п. 5.2.4.

Як вже згадувалось, точки виміряної поверхні можуть створювати регулярну або нерегулярну сітку. У регулярній сітці точки утворюють квадрати або прямокутники, називають цю сітку GRID. Натомість нерегулярна сітка постає у вигляді сукупності трикутників, і називають її TIN (від англ. Triangular Irregular Network). Це т. зв. “первинна сітка”, а від неї треба перейти до “вторинної” сітки, яка переважно є регулярною сіткою GRID.

GRID переважно будують на сітці географічній або сітці кілометровій, причому густина сітки залежить від подальшого її призначення та від складності рельєфу.

Наприклад, при використанні аерофотознімків точки вибирають з кроком 1 мм. При масштабі знімання 1:20 000 це дає сітку 20×20 м в натурі. Для спокійного рельєфу цього достатньо, але для складної за формами місцевості таку сітку треба згустити в 2–3 рази. Тому існують різні підходи: одні з них ґрунтуються на досвіді (емпіричні), інші – на попередніх розрахунках очікуваної точності (прогностичні).

Деякі відомості про точність побудови ЦМР подано в наступних розділах.

5.2.2. Наземне лазерне сканування

Лазерне сканування – це метод створення за допомогою лазера (скануванням) цифрової моделі об'єкта у вигляді густої мережі точок з визначеними просторовими координатами. Наземний лазерний сканер (рис. 5.1) – це прилад, що вимірює віддаль до точки об'єкта та два кути: горизонтальний і вертикальний. Отримані в такий спосіб ці три величини дають змогу обчислити просторові координати точки, від якої відбився лазерний промінь.

Лазерний сканер справив величезний вплив на геодезичні знімальні роботи: у лічені хвилини можна отримати таку величезну кількість скоординованих точок об'єкта, якої ручним способом досягти неможливо.

Схематично сканер складається з кількох блоків:

- вимірювальна головка (лазерний випромінювач + приймач);
- призма, що обертається та змінює положення променя у вертикальній площині;

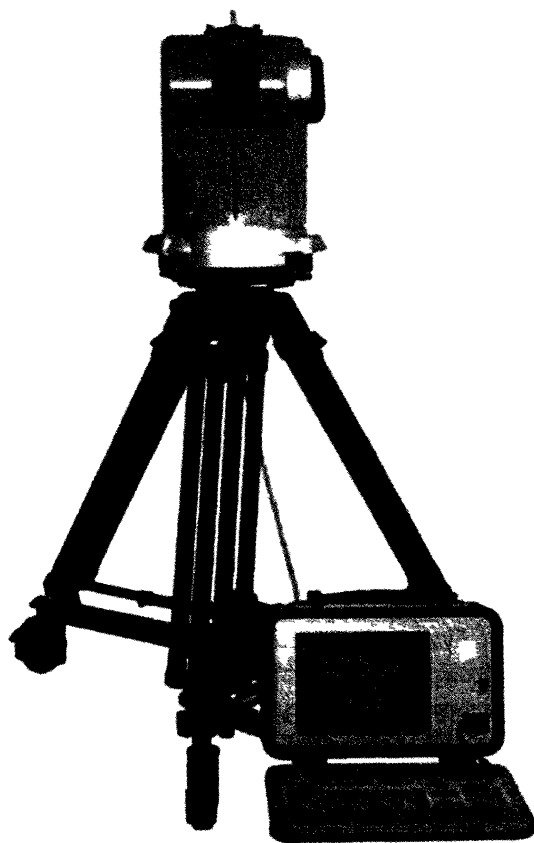


Рис. 5.1. Загальний вигляд лазерного сканера
Callidus 3D
(фірма Dr. Niebuhr GmbH, Німеччина)

- сервопривід, що обертає вимірювальну головку у горизонтальній площині;
 - комп'ютер для керування зніманням та реєстрації даних.
- У лазерних сканерах реалізовані різні принципи вимірювання віддалі:
- за часом проходження сигналу від приладу до точки об'єкта;
 - порівнянням фаз випромінюваного та відбитого сигналів.

У першому (імпульсному) способі віддаль отримують так:

$$S = (v \cdot t) / 2. \quad (5.1)$$

У другому (фазовому) способі віддаль обчислюють так:

$$S = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{v}{2f}, \quad (5.2)$$

де

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi_1, \quad (5.3)$$

де φ_0 – фаза прямих коливань;

φ_1 – фаза відбитих коливань;

v – швидкість поширення електромагнітних коливань в атмосфері;

f – частота коливань;

t – час проходження сигналу “туди–назад”.

Окрім систем, в яких реалізовано ці способи, існують т. зв. триангуляційні системи, в яких віддаль визначається з трикутника, утвореного точкою випускання (і відхилення) лазерного променя, точкою відбиття (на об'єкті) та оптичним центром камери, що визначає напрям відбитого сигналу.

Безперечні позитивні риси сканера :

- не потрібна відбивна призма чи дзеркало на поверхні об'єкта, як в електронних тахеометрах;
- висока швидкість сканування поверхні, що лежить в діапазоні від 5000 до 100000 вимірів на секунду;
- високий ступінь автоматизації польових робіт, практично за мінімальної участі оператора;
- безконтактність з об'єктом досліджень, який може бути важкодоступним для людини (встановлення відбивної призми, рейки – як у разі тахеометричного знімання), висока щільність точок на поверхні об'єкта (це тисячі або ж сотні тисяч точок).

Станом на 2003 рік існувало близько 10 компаній, які виготовляли лазерні сканери геодезичного призначення, лідерами серед них є Riegl (Австрія), Callidus (Німеччина–США), Суґах (США–Швейцарія), ILRIS (Німеччина), MENSİ (Франція).

Надалі продукція фірм розширювалася та модифікувалася з тих міркувань, що кожний із типів сканерів був зорієнтований на вузьку спеціалізацію, для знімання об'єктів певного класу.

Наприклад, серед родини RIEGL LMS з'явилися LMS-2210, LMS-Z360, LPM-25HA.

Прототип Cyraх 2500 (Leica, Швейцарія) розрісся до сім'ї HDS 4500, HDS 3000, HDS 2500, HDS 6000 (HDS – це абревіатура від англ. High Definition Surveying), ScanStation 2.

Важливою складовою лазерної системи є програмне забезпечення. Воно виконує функції контролю польових робіт, керування приладом, оптимізації об'єму інформації для збереження, а також виконує візуалізацію “образів”, побудову 3D-моделей, аналізу даних та подання результатів опрацювання у стандартних форматах, доступних для інших систем.

Деякі системи, наприклад, HDS 3000 (Leica, Швейцарія), мають цифрову камеру, яка розташована на одній оптичній осі з віссю лазера. У такий спосіб можна отримати реальний колір точки в системі кольорів червоний–зелений–голубий (RGB). Якщо ж такої фіксації немає, то кожна точка отримує псевдоколір залежно від інтенсивності відбитого сигналу.

Деякі технічні параметри сканувальних систем подано в табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Технічні параметри деяких лазерних систем

Назва системи	Діапазон віддалі, м	Точність мм/при віддалі, м	Кут сканув.: гориз., верт.	Час скан., хв	Роб. темпер., °C
Callidus	0,15-150	5/ 32	360×180	4-9	0-+40
Cyrax2500	1,5-100	4/50	40×40	10	0-+40
ILRYS -3D	2-800	10/100	40×40	8	-20-+50
SOISIC (MENSI)	0,8-40	0,5/5	46×320	15	+5-+40
LMS-Z210 RIEGL	2-350	25/200	330×80	0,5	0-+40
LMS-Z360 RIEGL	2-200	6/20	360×90	0,5	0-+40
LMS-Z420 RIEGL	2-1000	20/1000	360×80	2	-20-+50
LPM-25HA RIEGL	1-40	8/20	180×150	2	+5-+40

Доречно зауважити, що фазові сканери випромінюють лазерну пляму безперервно, що є перевагою порівняно з імпульсними системами. Тому швидкість перших є значно вищою і може становити 100 000 точок за 1 с і більше.

Набір відсканованих точок залежить від кроку сканування у вертикальній площині, кроку повороту сервопривода в горизонтальній площині та кутів поля зору сканера. Якщо кути “поля зору” є $360^{\circ} \times 180^{\circ}$, кроки сканування у горизонтальній та вертикальній площинах становлять $0,1^{\circ}$, то маємо:

- кількість точок у вертикальній площині $180:0,1 = 1800$ точок;
- кількість смуг (у горизонтальній площині) $360:0,1 = 3600$ смуг;
- загальна кількість точок $1800 \times 3600 = 6\,480\,000$ точок.

За невисокої швидкості сканування 5000 точок за 1с загальний час становитиме 21 хв. За високої швидкості 100 000 точок за 1 с затрачений час становить всього 1 хвилину.

Після польових робіт настає камеральне опрацювання отриманих даних. Опрацювання залежить від того результату, який хочемо мати: або просторові координати всіх вимірних точок (існує такий термін, як “хмара” точок, або TIN-модель, або набір перетинів поверхні, або складну просторову модель або набір геометричних параметрів – периметри, діаметри, площі, об’єми тощо.

Технологія камерального оброблення “хмари” точок складається з кількох основних етапів, які логічно впливають з геометрії формування лазерного набору точок.

Об’єднання (зшивання) окремих сканів

Зняти повністю об’єкт з однієї станції практично неможливо. Наприклад, будинок знімають з трьох–чотирьох позицій так, щоб охопити його повністю. Іноді спостерігається розмитість деяких деталей об’єкта – його кутів, країв, граней. Лазерний промінь падає на об’єкт не у вигляді точки, а у вигляді плями невеликих розмірів. Наприклад, лазер системи HDS 2500 (Leica) на віддалі 50 м дає пляму діаметром 6 мм. Саме це спотворює відбитий сигнал, який реєструється приймачем як два або й більше сигналів. Тому такі точки не реєструються безпосередньо, а моделюються з “хмари” точок. З цих причин виникає потреба об’єднання окремих сканів з тим, щоб отримати єдиний образ об’єкта. Об’єднання сканів здійснюють різноманітними прийомами, але майже завжди використовують такі точки окремих сканів, які розпізнаються (ототожнюються) безпомилково на сусідніх сканах.

Трансформування координат

Увесь набір точок повинен бути зафіксований в єдиній просторовій системі координат. Оскільки центр сканування для кожного скана розміщений у центрі вимірювальної головки сканера, а вона змінює своє розташування у просторі, то необхідно виконати перерахунок координат. Ця задача з погляду аналітичної геометрії збігається із задачею “поворот простору”. Тут теж існує кілька варіантів: можна об’єднувати сусідні скани за опорними точками, а можна об’єднувати за відомими лінійними та кутовими елементами орієнтування сканера.

Створення поверхонь

Весь масив (“хмара”) точок повинен бути поданий поверхнями, що математично описуються. Це потрібно для того, щоб можна було надалі використовувати дані в CAD-системах або ж при 3D-моделюванні. Тому в програмний комплекс входить великий набір прикладних програм, який дає змогу створювати прості математичні поверхні (сфера, циліндр, конус, площина тощо) або використовувати апарат апроксимації поверхонь (наприклад, TIN-поверхня). Отримані результати подають у стандартних форматах, які дають змогу їх експортувати в системи автоматичного проектування та в різноманітні системи прийняття інженерних чи неінженерних рішень.

Для користувачів лазерних сканувальних систем дуже важливим є питання точності отримання просторових координат. У роботі [29], яку ми вважаємо однією з кращих у дослідженні точності сканувальних лазерних систем, зазначається, що задекларована фірмами-виробниками точність часто не збігається з реальними характеристиками. Тому кожна система повинна бути досліджена на точність, і тут є повна аналогія з підходами, що віддавна існують у фотограмметрії (калібрування знімальних систем та калібрування вимірювальних приладів).

На точність отримання координат сканерними системами впливають:

- точність кутового позиціонування (у вертикальній та горизонтальній площинах);
- точність визначення віддалі;
- характеристика роздільної здатності;
- граничні ефекти (розмитість сигналів);
- відбивна здатність поверхонь;
- фізичний стан середовища, в якому поширюється лазерний промінь.

Дослідники розробили спеціальні тест-об'єкти, які дають змогу виявити інтегральну точність кожної з досліджуваних систем. Наприклад, у роботі [29] було досліджено 7 типів систем. Основні експертні висновки, як приклад, наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Переваги і недоліки деяких лазерних систем

Марка системи	Переваги	Недоліки
Callidus	Велике поле зору	Недост. розд. здатність по вертикалі (0,25 град)
Сyrax 2500	Висока точність	Мале вікно сканування (40x40 град)
S25	Висока точність при малих віддальах	Не працює при сонячному світлі і на великі віддалі
GS 100	Велике поле зору	Великі шуми
Riegl Z210	Велике поле зору. Сканування при великих віддальах	Низька точність
Riegl Z420i	Те саме	Великі шуми
Zopller+Frohlich (Imager 500)	Велике поле зору	Низька якість реєстрації країв. Обмежена кутова розд. здатність (0,018 град)

Сфера застосування лазерних систем доволі широка:

- тривимірне топографічне знімання місцевості;
- гірнича справа (знімання кар'єрів, відкритих гірничих копалень, шахт, тунелів тощо);

- геологічне знімання;
- промисловість (побудова просторових моделей складних промислових установок, комунікацій, резервуарів, складних технологічних виробництв і багато інших застосувань);
- будівництво (промислове і цивільне будівництво, автомобільні дороги, мости, аеродроми тощо);
- архітектура (фасади будівель, розміри будівель, фронтальні плани, перерізи, архівація окремих архітектурних фрагментів);
- енергетика, археологія, моделювання скульптур тощо.

Під час вибору лазерної системи користувач (замовник) повинен орієнтуватись і на точність роботи системи, і на інші чинники. Зокрема, на вартість системи, умови і частоту необхідного калібрування системи, сервісне обслуговування, гарантійні умови і терміни, кадрову підготовку, передусім освоєння програмного супроводження системи.

Загальний висновок є таким: лазерні сканувальні системи є потужним технічним засобом для розв'язання широкого класу задач, пов'язаних з просторовим моделюванням об'єктів.

5.2.3. Лазерні сканувальні системи повітряного базування

Стрімкий розвиток лазерної техніки та комп'ютерних технологій стимулював розроблення та використання нових технологій отримання геопросторових даних. До них належить і метод лазерного сканування поверхні Землі з літака чи гелікоптера. Тепер лазерне сканування є предметом посиленої уваги як науковців, так і практиків через нові широкі можливості цього методу для виконання важливих господарських завдань.

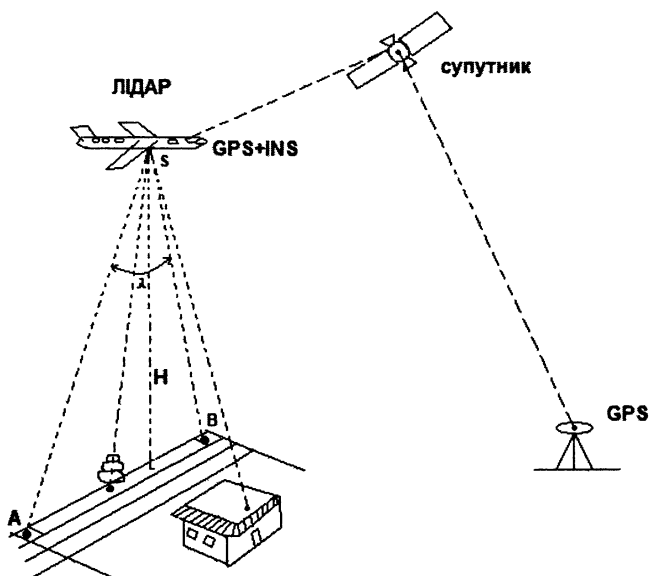


Рис. 5.2. Схема лазерного сканування з літака

Питання теорії і практики лазерного сканування з літальних апаратів опубліковані переважно в закордонній науковій літературі, до якої, на превеликий жаль, український читач має обмежений доступ. Це саме стосується і міжнародних конференцій, на яких жваво обговорюються актуальні проблеми цього методу та відбувається обмін набутим досвідом. Нижче подаємо інформацію, яка ознайомить читача із засадами та проблемами лазерного сканування з повітряного носія, а також з деякими прикладами опрацювання даних лазерного сканування.

Лазерне сканування ґрунтується на тій самій ідеї, що й лазерне вимірювання відстаней: надісланий лазером сигнал відбивається від об'єкта і повертається до приймача. За часом проходження оптичного сигналу обчислюється відстань від лазера до об'єкта. Сьогодні маємо близько двох десятків лазерних сканувальних систем як наземного, так і повітряного базування.

Системи повітряного базування ЛІДАР (від англ. LIDAR – Light Detection and Ranging) працюють за принципом безперервного отримання смуг сканування. Лазерний промінь у межах однієї смуги відхиляється дзеркалом чи призмою (в оптичних сканерах), а набір смуг отримується внаслідок руху носія (рис. 5.2).

Окрім лазера, який надсилає імпульс з оптичного центра, на носії встановлено GPS-приймач для фіксації просторових координат точки S та інерційно-навігаційну систему (INS), що фіксує нахил платформи з лазером, тобто три кути Ейлера.

Фіксація цих даних (GPS+INS) дає можливість визначити просторове положення оптичного центра – точки S у момент надсилання світлового імпульсу, а також положення вектора, наприклад, SA , у тій просторовій системі координат, в якій працює позиційна система GPS. Кінцевим результатом лазерного сканування є визначені просторові координати точки земної поверхні.

Сукупність точок відбиття лазерних променів утворює нерегулярну сітку з величезною кількістю таких точок. За цими даними математичним способом можна після камерального доопрацювання отримати цифрову модель рельєфу (ЦМР) поверхні у вигляді регулярної сітки.

Густота точок відбиття залежить від частоти генерування імпульсів – у деяких системах це 100 кГц, тобто за одну секунду фіксується 100 000 точок відбиття.

Окрім згаданої вище апаратури, деякі системи оснащені й допоміжною апаратурою – однією або двома відеокамерами. Перша камера орієнтована в надирному напрямку до землі, а друга – під кутом 45 градусів до надиру й скерована вперед. Отримані зображення можна використати як доповнення до побудованої сканером ЦМР. Деякі найновіші системи оснащені цифровими аерознімальними камерами, що в сукупності утворює потужний багатоцільовий знімальний комплекс.

Сучасні системи ЛІДАР дають змогу фіксувати кілька відбиттів променя від об'єкта. Наприклад, якщо лазерний промінь падає на крону дерева, то перше відбиття буде від крони, а наступне від поверхні Землі, оскільки лазерний промінь проникає крізь крону (довжина хвилі становить близько 1,06 мкм). Цю властивість широко використовують на практиці, оскільки можна побудувати, наприклад, цифрову модель

лісового покриття за кронами дерев, цифрову модель дахів будинків для забудованих теренів, цифрову модель дротів для високовольтних ліній електропередач.

Серед фірм, що займаються виробництвом ЛІДАРів, найвідомішою є канадська компанія “Ortech Incorporated”, яка створила сканерну систему ALTM 30/70, а пізніше (2004 р.) – систему ALTM 3100 із частотою генерування імпульсів 100 кГц. Це дуже високий показник. Широко представлена на ринку продукція швейцарської фірми “Leica Geosystems”, зокрема система ЛІДАР ALS50.

Основні технічні параметри лазерних систем подано у табл. 5.3.

Коли йдеться про картографування території, то з технологічного погляду побудова ЦМР системами ЛІДАР вимагає так званого “чищення”, тобто усуваються імпульси, що не пов’язані з поверхнею Землі. Частково це робиться апаратно-програмно, проте повністю цей процес автоматизувати не вдається й тому потрібне втручання оператора-фотограмметриста.

Таблиця 5.3

Основні технічні параметри ЛІДАРІВ

Параметри	ALTM30/70	ALTM3100	ALS50
Частота генерування імпульсів, кГц	33, 50, 70	33, 50, 70, 100	83
Висота польоту, Н(м)	200-300	80-3500	до 4000
Ширина смуги захоплення	від 0 до 0,93 Н	від 0 до 0,93 Н	від 0 до 0,93 Н
Кут сканування, градуси	0-25	0-25	до 75
Кількість реєстрованих відбиттів	4	4	3-4
Частота сканування, кГц	0-70	0-70	-
Тривалість імпульсу, нс	10	10	10
Частота реєстрації GPS, Гц	1-2	1-2	1-2
Частота реєстрації INS, Гц	50-200	50-200	50-200
Розходження лазерного променя, мрад	0,2-0,7	0,3 або 0,8	-
Точність визначення віддалі, см	1	1	1
Точність визначення висоти, см	15-35	15-35	-
Точність визначення планового положення, см	1/2000 Н	1/2000 Н	-

У світовій практиці сьогодні накопичено доволі значний досвід лазерного сканування місцевості та побудови ЦМР. Це, по суті, перший етап використання ЛІДАРів.

Сучасні лазерні системи дають змогу в ході сканування реєструвати кількість відбитої енергії, так звану “intensity returns”. Наприклад, система ALTM3100 реєструє за одне вимірювання 12 бітів інформації. Це означає, що відбита енергія є інформацією для створення образу того пікселя, від якого відбився промінь. Зареєстрований образ називають “intensity images”. Ступінь відбиття оптичного сигналу, що надсилається в

ближньому інфрачервоному діапазоні (а саме в цьому діапазоні працює лазер), доволі різний: для металевих дахів – до 90 %, для снігу та льоду – 50...80 %, для рослинного покриву – 50 %, для піску – 15 %, а для водної поверхні – майже нуль.

Донедавна такі образи не використовувались, і головна причина цього - довжина хвилі, яка не давала змоги отримати образ з високою роздільною здатністю. Проте останнім часом вдалося істотно покращити якість зображення, і тому спостерігається інтенсивне вивчення можливостей і практичного використання intensity images, навіть з'явився термін "лідарграмметрія".

Порівняно з аерофотозніманням лазерне сканування має низку переваг. Оскільки така система є активною з позицій випромінювання, то отриманий образ не залежить від натурального освітлення території. Тому можна виконувати знімання з малих висот з-під хмар, здійснювати знімання вночі, а в цей період доби Земля закрита хмарами значно менше. На таких зображеннях немає тіней, а для всієї території отримуємо фактично одну стереомодель.

Така у загальних рисах картина використання лазерного сканування з повітряних носіїв.

Технологія опрацювання ЛІДАР-даних істотно відрізняється від фотограмметричного оброблення цифрових знімків. Найнаочніше це видно із створення ортофотокарти, що геометрично відображено на рис. 5.3.

У фотограмметричній технології, як відомо, є процеси, яких не оминати: скажімо, потрібно виконати польову розріджену прив'язку знімків, здійснити камеральне згущення геодезичної мережі (аерофототріангуляцію), побудувати ЦМР стереофотограмметричним способом, а далі створити ортофотокарту на цифровій фотограмметричній станції. На цьому, останньому, етапі формується аналітичний знімок, переноситься оптична щільність з реального образу на цифровий знімок або ж

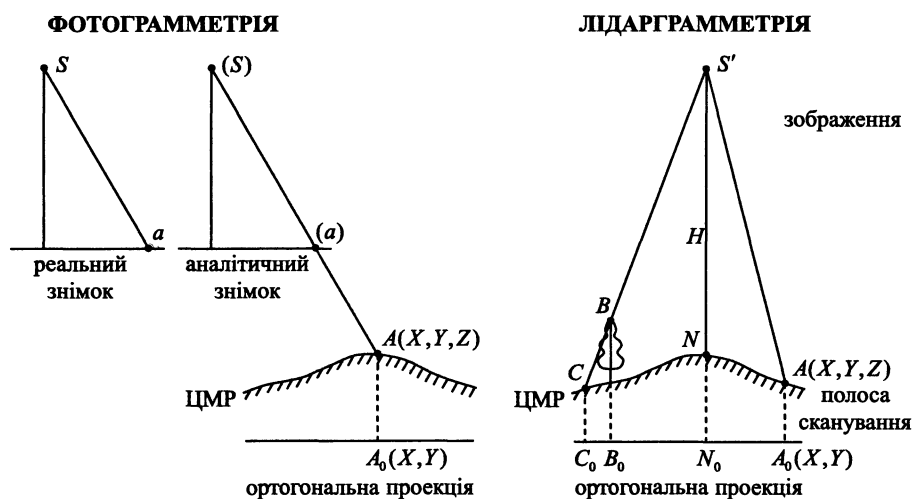


Рис. 5.3. Геометричні схеми формування ортофотокарти засобами фотограмметрії і лідарграмметрії

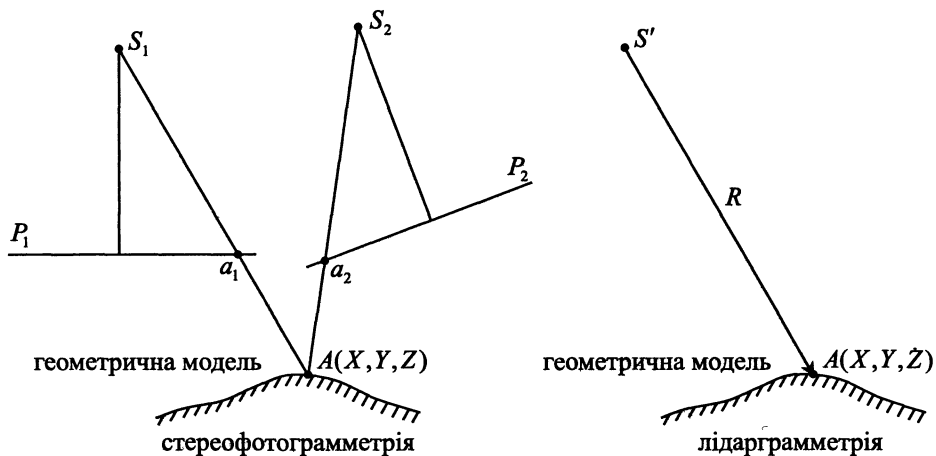


Рис. 5.4. Геометрія побудови просторової моделі території з фотограмметричної засічки та з лазерного сканування

безпосередньо попиксельно на карту. Результатом є ортофотокарта, де фототон відповідає реальним кольорам у натурі.

У ЛІДАР-технології польові геодезичні роботи не потрібні, бо немає необхідності виконувати прив'язку знімків. Немає потреби і в згущенні мережі, тобто аерофототріангуляція стає зайвою. ЦМР будується за даними лазерного сканування так, як уже згадувалося і тому не потрібний трудомісткий камеральний процес створення цифрової моделі рельєфу, стереофотограмметричним способом.

На рис. 5.3 відображено смугу як результат сканування місцевості, яка дає образ з різними за інтенсивністю пікселами. До кожного піксела необхідно застосувати математичне оброблення, щоб обчислити просторові координати точки відбиття імпульсу. Окрім цього, саме зображення (на рис. 5.3 праворуч вгорі) поєднує кілька відбиттів. Тому потрібне програмне опрацювання образу, в результаті якого отримуємо ортофотокарту в псевдокольорах.

Лідарграмметрія має ще одну істотну відмінність від фотограмметрії. В останній просторова модель будується на підставі прямої фотограмметричної засічки з двох сусідніх знімків (рис. 5.4), а при лазерному скануванні просторова модель будується з однієї точки (в межах смуги сканування) вектором R (так, ніби вона виконана з миттєвого центру знімання). Вся сукупність отриманих векторів утворює просторову модель території, яка є неперервною для всієї траєкторії польоту носія.

На особливу увагу заслуговує питання геометричної та радіометричної якості лазерного сканування. Тут важливими факторами є розбіжність (розходження) лазерного променя та вплив атмосфери.

Розбіжність лазерного променя (див. табл. 5.3) становить від 0,2 до 0,7 мрад. Ця розбіжність дає пляму на сканованій поверхні розміром $H/5000$ або $H/1300$ (де H – висота фотографування в метрах). При висоті польоту 1000 м отримаємо відповідно 0,2 м або 0,7 м. Це фактично і буде розмір піксела на поверхні Землі, і він визначає певною мірою



Рис. 5.5. Образ з першого відбиття лазерного променя



Рис. 5.6. Образ з останнього відбиття лазерного променя

роздільну здатність образу. Звичайно, на роздільну здатність впливає фізичний стан атмосфери (механічні домішки, задимленість), а на геометрію проходження променя – рефракція лазерного променя. Вважаємо, що комплексне вивчення цих факторів ще далеко не закінчене, більше того, воно перебуває у початковій фазі. Наприклад, наші розрахунки для стандартної атмосфери показали, що при висоті знімання 3000 м зміщення пікселя під впливом рефракції становить 0,1 м. А це вже величина, співрозмірна з точністю методу, бо, як показують літературні джерела, при середніх висотах польоту інтегральна оцінка точності побудови ЦМР становить 0,15 м.



Рис. 5.7. Образ водної поверхні

Стосовно густоти точок ЦМР, то й тут є певні обмеження. Теоретичною межею в імпульсному методі (а тільки він використовується у системах повітряного базування) є частота чергування імпульсів: $C_{\text{макс}} = Шв. \text{ світла} / 2H$. При висоті польоту $H = 1500$ м отримаємо 100 кГц, а при $H = 3000$ м – це лише 50 кГц. Зняти таке обмеження може фазовий метод, проте він вимагає неперервного випромінювання, і це в системах повітряного базування реалізувати поки що непросто. А в системах наземного базування, як уже зазначалося у п. 5.2.2, фазовий метод використовується доволі широко.

Як у сучасному цифровому аерозніманні, так і під час лазерного сканування повітряного базування стримуючим чинником є доволі висока вартість комплексу. Тому вкладені кошти можуть швидко окупитися тільки для великих за обсягом робіт топографічного або інженерного призначення.

Нижче подаємо три приклади – образи з лазерного сканування, які частково ілюструють можливості лазерного сканування (взяті з практичних робіт, виконаних авторами у 2005–2006 роки):

- рис. 5.5 – образ, отриманий з першого відбиття лазерних променів;
- рис. 5.6 – образ, отриманий з останнього відбиття лазерних променів;
- рис. 5.7 – образ, накладений на ортофотокарту, проілюстровано зменшення оптичної щільності для точок водної поверхні.

Отже, можна зробити загальний висновок, що системи лазерного сканування повітряного базування є потужним засобом картографування територій і вони все ширше застосовуються у різних сферах. Практики сприймають метод як завершену технологічну лінію з функціональними компонентами – знімальна та бортова апаратура, комп'ютери та високопродуктивне програмне забезпечення. Окремі аспекти удосконалення методу загалом та його складових, без сумніву, будуть досліджуватися і розвиватися.

5.2.4. Радарні методи

Радарні методи (від англ. Radio Detection And Ranging – RADAR) ґрунтуються на використанні відбитих від земних об'єктів хвиль у мікрохвильовому діапазоні (від 1 мм до 1 м) і належать до активних методів формування образу. Антена радару висилає електромагнітний імпульс, який приймається тією самою або іншою антеною, що залежить від фізичних принципів, закладених у конструкцію приладу.

Для формування образу земної поверхні використовують радари бокового огляду, які поділяють на дві групи:

- радар бокового огляду з реальною антеною (RAR – від англ. Real Aperture Radar);
- радар бокового огляду з синтезованою антеною (SAR – від англ. Synthetic Aperture Radar).

Радар типу RAR складається з передавача, приймача, передавально-приймальної антени, перетворювача та реєстратора. Передавач випромінює вбік короткий потужний радіоімпульс у межах плоскої смуги, яка має широке охоплення в напрямку, перпендикулярному до польоту, та мале охоплення в напрямку польоту.

Скерований до земної поверхні імпульс падає на порівняно вузьку смугу; спочатку відбивається та його частина, яка є ближчою до радару, і пізніше – та, що розташована далі. Відбита частина імпульсу реєструється приймачем. Оскільки імпульси висилаються без перерви, то результатом дії радару є неперервна смуга – образ місцевості.

Оптична щільність такого зображення залежить від інтенсивності відбитого сигналу, яка, своєю чергою, залежить від кількох факторів: довжини хвилі, відбивної здатності об'єкта, можливості проникати через рослинність тощо.

Додатковим фактором є поляризація висланого сигналу. Він може бути поляризованим у горизонтальній площині (H) або у вертикальній (V). Це також стосується відбитого сигналу. Тому зондування поверхні може відбуватись в чотирьох комбінаціях: HH , VV , HV , VH .

Тут перша літера означає поляризацію висланого сигналу, друга – прийнятого.

Важливим показником радару є його роздільна здатність у вигляді розміру елемента у нахиленій площині (висланого імпульсу) R_H та у проекції горизонтальній R_r :

$$R_H = \frac{ct}{2}, \quad (5.4)$$

$$R_r = \frac{ct}{2 \cos \theta}, \quad (5.5)$$

де c – швидкість поширення електромагнітних хвиль;

t – час висилання імпульсу;

θ – кут від горизонтальної прямої до напрямку висланого імпульсу.

Простий аналіз рівняння (5.4) показує, що чим більша віддаль від радара до об'єкта, тим більшим буде елемент R_H . З виразу (5.5) бачимо, що при $\theta = 90^\circ$ (це надирний напрямок) елемент R_r буде нескінченно великим. З огляду на це і виконується висилання імпульсу не “під літак”, а вбік від надиру.

У напрямку, перпендикулярному до польоту носія апаратури (азимутальний напрямок), розмір елемента визначається так:

$$R_a = D \cdot \frac{\lambda}{d}, \quad (5.6)$$

де D – нахилена віддаль до об'єкта;

λ – довжина хвилі;

d – довжина (розмір) антени.

З виразу (5.6) бачимо, що розмір елемента R_a залежить прямо пропорційно від віддалі до об'єкта та довжини хвилі і є обернено пропорційним до розміру антени. Цей останній фактор є дуже важливим, і його успішно використано в SAR. SAR має доволі коротку антену, з якої через певний короткий часовий інтервал висилається імпульс. Розгортка антенного випромінювання в азимутальному напрямку є значною, а імпульси настільки частими, що кожний елемент місцевості опромінюється багаторазово. Ці відбиті сигнали опрацьовуються на підставі ефекту Доплера і ніби підсумовуються з багатьох положень антени. Тому така уявна (підсумована) антена ніби має довжину в сотні метрів (для літака) або кілька кілометрів (для космічних носіїв). А (5.6) відразу вказує на значне зменшення розміру елемента R_a , тобто на істотні збільшення роздільної здатності радара.

Перші застосування радарів стосувались військової сфери – польотів літаків – і стосуються 40-х років XX століття.

Для картографування та дистанційного зондування радари почали використовувати з 80-х років, і першими були доволі вдалі космічні експерименти. Оскільки формування зображення є з фізичного погляду іншим, ніж у фотозніманні, то і опрацювання таких образів істотно відрізняється від фотограмметричних методів. Тому й виник та розвивається окремий напрямок, який окреслено терміном “радарграмметрія”. Сьогодні сформувались два напрямки використання радарних зображень:

- створення цифрових моделей рельєфу (ЦМР);

- дешифрування радіолокаційних образів (для виявлення якісних характеристик об'єктів).

Для створення ЦМР можна застосовувати стереометричний, інтерферометричний, клинометричний або полярометричний методи. Два останні не знайшли практичного застосування і тому ми їх не розглядаємо.

Стереометод ґрунтується на стереоскопічному радіолокаційному зніманні та вимагає наявності стереопари на цю територію. Таку стереопару можна отримати при зніманні в один бік (рис. 5.8, а) або в протилежні боки (рис. 5.8, б).

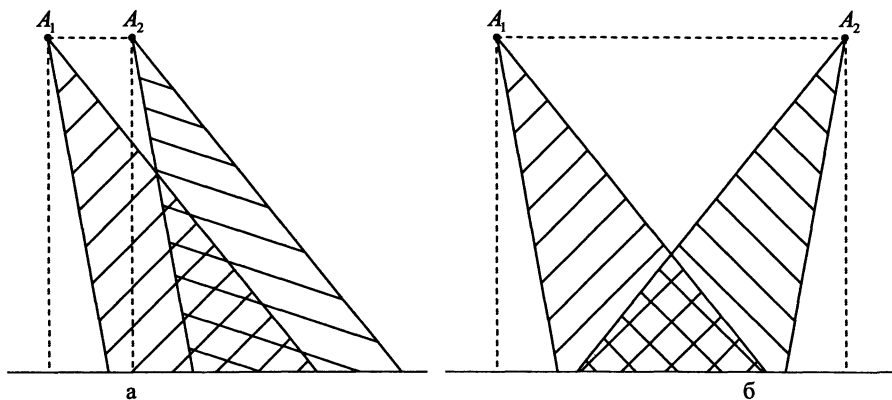


Рис. 5.8. Стереознімання в один бік (а) або в різні боки (б)

Хоча геометрична схема побудови радіолокаційних зображень є дещо іншою, ніж при стереофотограмметричному зніманні, проте тут простежується певна подібність: для ідентичних точок радіолокаційної стереопари матимемо поздовжній паралакс, а, вимірявши його, можна обчислити перевищення між точками земної поверхні, і, як наслідок, побудувати ЦМР.

Інтерферометричний метод ґрунтується на виділенні фазової інформації з радіосигналу та сумісного опрацювання фазових полів, зареєстрованих при зніманні з двох різних позицій (з двох витків, наприклад, при супутниковому зніманні чи двома антенами при зніманні з літака).

Фізичною основою формування образу є явища дифракції та інтерференції електромагнітних хвиль, а відтворення об'єкта відбувається на підставі голографічного ефекту.

Нагадаємо коротку суть цих явищ. Якщо на вузьку щілину скерувати плоску хвилю випромінювання, то на екрані за щілиною через інтерференцію отримаємо запис у вигляді чередування світлих і темних смуг різної інтенсивності (картина Френеля). Якщо ж пересувати щілину перед екраном та висилати промінь через певний інтервал, то отримаємо запис образу, т. зв. голограму. Якщо її опромінити таким самим когерентним випромінюванням, то будуть відновлені фази хвиль і постане образ експонованої щілини.

Така схема описується в різних підручниках, пов'язаних з лазерною технікою та формуванням голограми. Ця сама засада стосується і радара, в якому відбиті сигнали інтерферують з висланим (базовим) сигналом і утворюють інтерференційний образ із реєстрацією фаз і амплітуд сигналів.

Геометричне трактування радарної інтерферометрії подає рис. 5.9.

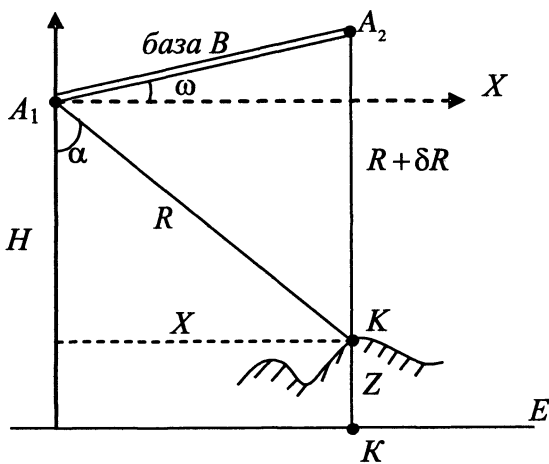


Рис. 5.9. Геометрія радарного знімання

На рис. 5.9 A_1 – антена передавально-приймальна;
 A_2 – інша антена (приймальна);
 E – відлікова поверхня;
 H – висота антени A_1 над поверхнею E ;
 X – система координат (вісь Y перпендикулярна до площини рисунка);
 $R, R + \delta R$ – віддаль від антен до точки K земної поверхні;
 B – база інтерферометрії (знімання);
 α – кут відхилення променя R ;
 ω – нахил бази.

Для визначення висоти Z над поверхнею відліку з рис. 5.9 маємо:

$$Z = H - R \cos \alpha. \quad (5.7)$$

З теореми косинусів для трикутника $A_1 A_2 K$ маємо:

$$(R + \delta R)^2 = R^2 + B^2 - 2R \cdot B \cdot \cos(90^\circ - \alpha + \omega). \quad (5.8)$$

Розкриваючи (5.8) та підставляючи в (5.7), отримаємо:

$$Z = H - \frac{(\delta R)^2 - B^2}{2B \sin(\omega - \alpha) - 2(\delta R)} \cos \alpha. \quad (5.9)$$

Величина δR визначається так:

$$\delta R = \frac{\lambda \cdot \Phi}{2\pi}, \quad (5.10)$$

де λ – довжина хвилі; Φ – абсолютна різниця фаз висланого і прийнятого сигналів.

Для повного розв'язання задачі з визначення Z (а це і є суть побудови ЦМР) необхідно знати довжину бази B та її орієнтацію у вибраній просторовій системі. Ця задача в літаковому варіанті розв'язується за допомогою GPS та INS, а в космічному варіанті можна використати параметри орбіти.

Визначення Φ пов'язане з певними проблемами, бо можна виміряти тільки кінцеву різницю фаз $\Delta\Phi$, а кількість повних циклів відбиттів залежить від довжини хвилі. Внаслідок цієї та інших причин опрацювання радарної інтерферограми є складним обчислювальним процесом.

Окрім описаного методу радарної інтерферометрії, опрацьовано т. зв. метод диференціальної радарної інтерферометрії. Той самий об'єкт знімають у два різні часові моменти, а порівняння інтерферограм дає змогу визначити зміну положення об'єкта в просторі, наприклад, зсуви, рухи, пов'язані з сейсмічною активністю, геодинамічні зміни через гірничі роботи тощо. Точність визначення змін по висоті може становити кілька міліметрів.

Практична реалізація космічних програм радарного знімання почалась із запуску апаратів у СРСР Космос-1870 та Алмаз-1 (1991 р.). Пізніше запуснені ERS-1 (Європейська космічна агенція ESA, 1991 р.), JERS-1 (Японія, 1992), ERS-2 (ESA, 1995), RadarSat-1 (Канада, 1995), Envisat (ESA, 2002 р.). Роздільна здатність цих систем становить від 10 до 150 м. Що стосується точності побудови ЦМР, то за даними американських дослідників інтерферентна аеросистема дала точність 1 м для горбистої місцевості та 3 м для гірської.

Для космічного знімання станом до 2007 р. найкращі результати отримані з радара RADARSat-1 – до 8 м.

Як зазначають відомі спеціалісти в цій сфері, теоретична точність радіолокаційного знімання може становити сантиметри і навіть міліметри і залежить від довжини хвилі посланого сигналу. Поки що практично такого результату ще ніхто не отримав, бо на саме знімання накладаються інші фактори з негативним впливом. Передусім, необхідно точно фіксувати розташування антен у просторі, а сучасні GPS та INS не можуть забезпечити такої надвисокої точності. Іншим стримуючим фактором є рівень фазового шуму сигналів та їхньої часової декореляції при різночасовому зніманні.

Незважаючи на певні труднощі, цей метод має велику перспективу. Тому розробляються нові потужніші системи, серед них SAR-X Cosmo-SiyMed (Італія), Radarsat-2 (Канада) та TerraSAR-X (Німеччина).

Здекларований запуск Radarsat-2 на кінець 2006 р. був відкладений на 2007 рік, і ще не реалізований. Причини, звичайно, не повідомляються.

Натомість 2007 р. став успішним для TerraSAR-X: 15 червня 2007 р. німецький радарний супутник надвисокої роздільної здатності успішно виведено на орбіту, і він почав передавати космічні зображення, прийняті в німецькому аерокосмічному дослідницькому Центрі DLR.

Попередні дослідження показали, що просторова роздільна здатність становить 3 м (режим StripMap) і до 1 м в режимі опрацювання SpotLight.

У кінці липня 2007 р. виконано термінове знімання стихійного лиха – затоплення в центральних районах Великобританії. Знімки з роздільною здатністю 3 м використано для швидкої та ефективної оцінки масштабів затоплення на величезній території.

Оброблення радіолокаційних зображень виконується з використанням спеціального програмного забезпечення. Як приклад, подано короткі відомості про деякі розробки.

До складу системи Erdas Imagine 8.7 входить пакет Radar Mapping Suite, опрацьований фірмами Leica Geosystems and Mapping (Швейцарія), Vexcel Corporation (Австрія) та НПО “Машиностроение” (Росія). До складу пакета входять чотири модулі:

- модуль IMAGINE Radar Interpreter слугує для попереднього оброблення зображень та покращання їхньої якості (базовими функціями є усунення спекл-шумів, радіометрична і геометрична корекція, текстурний аналіз, міжсенсорне злиття зображень);

- модуль IMAGINE OrthoRadar слугує для геометричної корекції зображень та ортотрансформування. Перша частина вирішується з використанням моделі радару, даних орбіти і параметрів формування зображення. Друга частина використовує дані про опорні точки та ЦМР;

- модуль IMAGINE StereoSAR DEM слугує для створення ЦМР за використанням стереопар на основі просторової кореляції з обчисленням паралаксів;

- модуль IMAGINE IFSAR DEM слугує для створення ЦМР на базі радарної інтерферометрії. Модуль рекомендується для моніторингу деформації споруд, осідання земної поверхні, фіксації геодинамічних змін у сейсмоактивних районах.

Два останні модулі можуть працювати в автоматичному режимі або ж за участю оператора.

У розробку від фірми РАКУРС (Росія) входить система для оброблення радіолокаційних зображень, а запропоновані технологічні схеми названо процесорами:

- геопроцесор призначений для геометричної корекції зображення, прив’язки його до місцевості;

- інтерферометричний процесор призначений для побудови ЦМР з пари інтерферометричних космічних зображень;

- стереопроцесор призначений для створення ЦМР зі стереопари зображень, отриманих космічними радаром із синтезованою антеною.

Треба зауважити, що згадані програмні комплекси є доволі складним інструментом з погляду розробки, але максимально наближені до споживача і розраховані як на фахівця, так і на початківця.

Детальніші відомості про методи і технології опрацювання радарних зображень можна відшукати на сайтах згаданих фірм.

Нижче подана серія зображень, наведених на сайті російської фірми РАКУРС, які демонструють крок за кроком одну з розроблених ними технологічних ліній опрацювання радарних зображень, отриманих зі станцій ERS-2 та ERS-1 (подано мовою оригіналу).

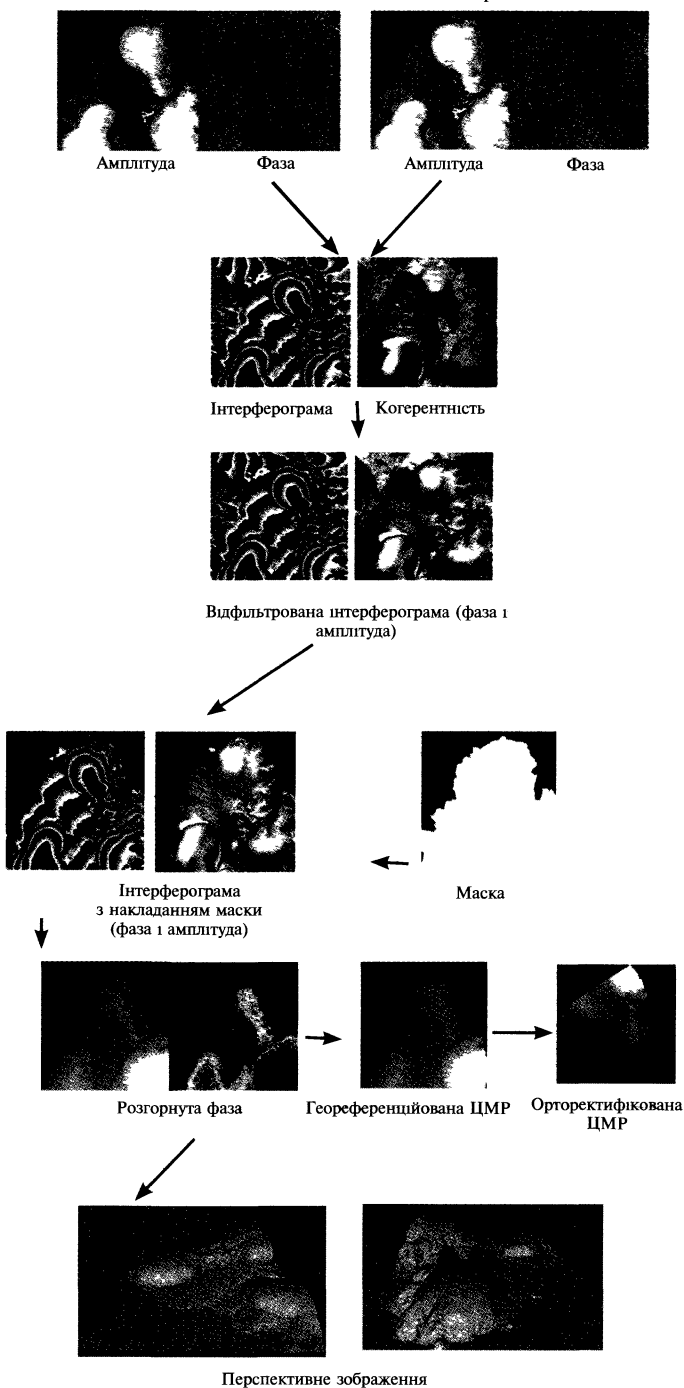


Рис. 5.10. Опрацювання радарних образів за допомогою програмного комплексу РАКУРС РАДАР

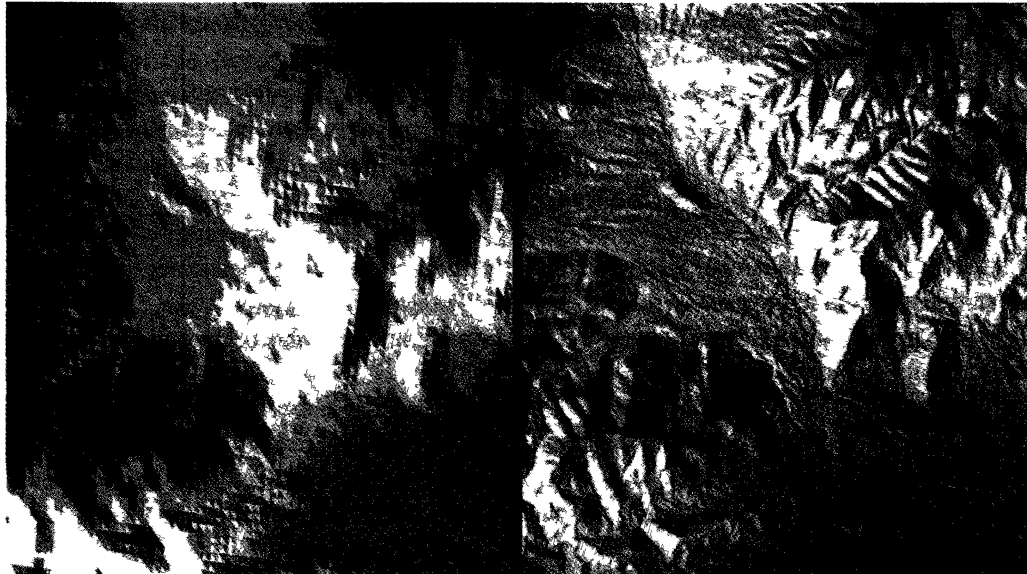


Рис 5 11 Порівняння двох радарних знімків з різною роздільною здатністю

На рис 5 11 праворуч показана модель рельєфу Лас-Вегаса як перше зображення, отримане системою TerraSAR-X з роздільною здатністю 1 м (з повідомлення розробників), хоча на самому рисунку воно подається з т зв огрубленням до 5 метрів

На рис 5 11 ліворуч для порівняння автори наводять зображення, отримане системою SRTM у 2000 році

Дослідження реальної точності TerraSAR-X, очевидно, розгортатимуться найближчим часом, тим більше, що доступ до цих зображень відкритий через Інтернет

5.3. Математичні моделі відтворення та інтерполяції ЦМР

Основні методи моделювання є різними за математичним змістом і утворюють дві групи: перша передбачає для моделювання рельєфу використовувати аналітичні функції, друга ґрунтується на застосуванні таких функцій, що враховують статистичні характеристики рельєфу.

До першої групи належать методи, побудовані на застосуванні: степеневих поліномів; ортогональних поліномів; сплайнів; радіальних базисних функцій; триангуляції; скінченних елементів; R-функцій; рядів Фур'є.

До статистичних зараховують методи: середнього вагового; вагових функцій; випадкових функцій; колокації; Крайгінга.

Такий підхід до розв'язання питань моделювання рельєфу є дещо спрощеним, бо найкращі результати моделювання отримують на основі комбінування двох підходів: вилучають систематичну складову за допомогою аналітичних функцій, а додаткові поправки у висоти точок визначають на підставі статистичного аналізу поля.

Водночас глибший аналіз спеціальної літератури, що стосується методів інтерполяції та апроксимації функцій, що широко використовуються в інших галузях науки і техніки (фільтр Колмогорова–Віннера, метод колокації, метод Крайгінга та деякі інші), приводить до висновку, що всі вони мають спільну математичну основу. Їхню спільність визначає критерій мінімізації середньоквадратичних помилок відновлення функцій $\varepsilon^2 = E |f(x) - \hat{f}(x)|^2 = \min$,

де $f(x)$ – реалізація функцій; $\hat{f}(x)$ – оцінка функції після перетворення. Однак між ними існують і відмінності, які стосуються переважно практичної реалізації, зокрема знаходження функцій, які характеризують статистичні особливості поля.

Однак, враховуючи тенденції підбору математичних функцій для моделювання рельєфу, варто зауважити, що деякі із аналітичних функцій, зокрема радіальні базисні функції, використовуються для зміни коваріаційної функції у статистичних методах, тобто поділ на дві групи математичних методів для побудови ЦМР є умовним.

Розглянемо колокацію як математичну модель для побудови ЦМР.

Стосовно визначення ЦМР основне рівняння колокації запишеться:

$$Z = Ax + \delta Z + \Delta Z, \quad (5.11)$$

де Ax визначає регуляризовану змінну частину або тренд, δZ – сигнал, змінну складову, яка нерегулярно осцилює навколо Ax і ΔZ – випадкову складову або шум.

У моделі колокації для отримання незміщених оцінок з мінімальною дисперсією математичне сподівання повинно дорівнювати: $E(\delta Z) = 0, E(\Delta Z) = 0$.

На відміну від вживаних для апроксимації рельєфу функцій, які моделюють тренд або тренд і сигнал разом, за методом колокації сигнал визначається як окрема

величина і у точках опори, і у прогнозованих інтерполяційних точках. Тобто колокація передбачає визначення оцінок параметрів, величин сигналів у точках спостереження і в точках визначення або прогнозу. Для отримання розв'язку з мінімальними дисперсіями похибок повинні бути задані коваріаційні матриці вимірюного вектора C_{ZZ} , сигналу $C_{\delta Z \delta Z}$ і взаємна коваріаційна матриця сигналів вимірювання δZ і прогнозу $\delta Z_p - C_{\delta Z \delta Z_p}$, а також коваріаційна матриця шуму $C_{\Delta Z \Delta Z}$.

Розв'язання рівняння (5.4) за принципом

$$\delta Z^T C_{\delta Z \delta Z}^{-1} \delta Z + \Delta Z^T C_{\Delta Z \Delta Z}^{-1} \Delta Z = \min \quad (5.12)$$

дає оцінки для x і δZ .

$$\hat{x} = (A^T C^{-1} A)^{-1} A^T C^{-1} Z. \quad (5.13)$$

$$\hat{\delta Z} = C_{\delta Z \delta Z} C^{-1} (Z - A \hat{x}), \quad (5.14)$$

$$\hat{\delta Z}_p = C_{\delta Z \delta Z_p} C^{-1} (Z - A \hat{x}), \quad (5.15)$$

де $C = C_{ZZ} = C_{\delta Z \delta Z} + C_{\Delta Z \Delta Z}$.

Практичне використання залежностей (5.13)–(5.15) полягає в тому, що часто не вдається отримати окремо матриці “сигналу” і “шуму”, тобто вважають, що $C_{\Delta Z \Delta Z} = 0$, хоча фактично коваріаційна матриця $C_{\delta Z \delta Z}$ буде містити матрицю $C_{\Delta Z \Delta Z}$.

На основі теоретичного опрацювання підходів до цифрового моделювання рельєфу розглянемо такі різновиди колокаційної моделі:

- 1) колокацію за умов, що ваги, з якими висоти вихідних точок входять у рівняння прогнозу, визначаються за коваріаційною функцією під певними умовами (*перша модель*);
- 2) аналітичну колокацію, якщо коваріаційну функцію заміняють радіальними базисними функціями (*друга модель*);
- 3) висоту точки прогнозу отримують на основі сумісного визначення коефіцієнтів рівнянь, які апроксимують систематичну складову та коефіцієнтів, залежних від коваріаційної функції (*третья модель*).

Перша модель. Коваріаційну функцію, яка є структурною характеристикою колокації, можна отримати із теорії стаціонарних випадкових функцій. Якщо задатися значеннями просторової змінної Z у точках поля з координатами x і $x + h$, де h – змінний інтервал, то

$$C(h) = E\{[Z(x) - E_Z][Z(x + h) - E_Z]\}, \quad (5.16)$$

де $Z(x)$, $Z(x+h)$ – значення просторової змінної Z у точках поля з координатами $Z(x)$, і $Z(x+h)$; $E_Z = E\{Z(x)\}$ – середнє значення змінної Z у межах поля.

Задачу прогнозу у заданій точці $Z(x_k)$ за вимірними значеннями $Z(x_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$ невідомої випадкової функції формують як лінійний функціонал

$$L_Z = \sum_{i=1}^n W_i Z(x_i) - Z(x_k), \quad (5.17)$$

параметри якого характеризують усереднене значення коефіцієнта W_i для i -го перетину поля і визначаються за методом найменших квадратів (м. н. к.). Основним критерієм ефективності оцінки $Z(x_k)$ є її дисперсія

$$\sigma_{Z_k}^2 = E \left\{ \sum_{i=1}^n W_i Z(x_i) - Z(x_k) \right\}^2, \quad (5.18)$$

яка за фіксованого значення координат може змінюватись через зміну коефіцієнтів W_i . Коефіцієнти W_i виконують роль усереднених вагових коефіцієнтів. Якщо виразити дисперсію через коваріаційну функцію, то за правилами оперування з коваріаційними функціями вираз (5.18) запишемо так:

$$\sigma_{Z_k}^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_i W_j C(h_{ij}) - 2 \sum_{i=1}^n W_i C(h_{ik}) + C_k, \quad (5.19)$$

де $C(h_{ij})$ – коваріація між парами точок i -го і j -го перетинів поля, розташованих на відстані $h_{ij} = |x_i - x_j|$; $C(h_{ik})$ – коваріація між i -ми і k -ми парами точок; C_k – дисперсія поля для точок з координатами x_k .

Якщо задати умову незміщеності оцінки $Z(x_k)$ стосовно вихідних даних, то

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1. \quad (5.20)$$

У такому разі невідомі вагові коефіцієнти знаходять, розв'язавши системи рівнянь вимірів, зв'язаних умовами. З урахуванням (5.20) функція Лагранжа запишеться:

$$F = \sigma_{Z_k}^2 + 2\lambda \left(\sum_{i=1}^n W_i - 1 \right) \min, \quad (5.21)$$

де λ – множник Лагранжа.

Диференціюючи функцію Лагранжа за невідомими – коефіцієнтом W_i і множителем λ , отримуємо $n+1$ рівнянь:

$$\sum_{j=1}^n W_j C(h_{ij}) + \lambda = C(h_{ij}), \sum_{i=1}^n W_i = 1. \quad (5.22)$$

З використанням множника Лагранжа дисперсію прогнозованої величини одержимо з виразу:

$$\sigma_{Z_k}^2 = \text{var}[Z_k - \hat{Z}_k] = C_k - \sum_{j=1}^n W_j C(h_{jk}) - \lambda. \quad (5.23)$$

З урахуванням математичного сподівання вираз (5.18) запишемо:

$$\sigma_{Z_k}^2 = E \left\{ \sum_{i=1}^n W_i \left[Z(x_i) + m_{x_i} \right] - \left[Z(x_k) + m_{x_k} \right] \right\}^2. \quad (5.24)$$

Якщо m_x виразити за допомогою полінома

$$m_x = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 y^2 + a_5 xy, \quad (5.25)$$

то аналогічно з (5.22) отримуємо $n+m+1$ рівнянь колокаційної моделі з урахуванням тренду:

$$\sum_{j=1}^n W_j C(h_{ij}) + \lambda_1 + \lambda_2 x_i + \lambda_3 y_i + \lambda_4 x_i^2 + \lambda_5 y_i^2 + \lambda_6 x_i y_i = C(h_{ik})$$

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1$$

$$\sum_{i=1}^n W_i x_i^2 = x_k^2;$$

$$\sum_{i=1}^n W_i x_i = x_k;$$

$$\sum_{i=1}^n W_i y_i^2 = y_k^2; \quad (5.26)$$

$$\sum_{i=1}^n W_i y_i = y_k;$$

$$\sum_{i=1}^n W_i x_i y_i = x_k y_k.$$

Розв'язання рівнянь (5.26) полягає у знаходженні вагових коефіцієнтів та коефіцієнтів, які визначають систематичну складову. Оцінку точності Z_k аналогічно до (5.25) запишемо:

$$\sigma_{Z_k}^2 = C_k - \sum_{i=1}^n a_1 f^1(x_k, y_k) - \sum_{j=1}^n W_j C(h_{jk}), \quad (5.27)$$

де $\sum_{i=1}^n a_1 f^1(x_k, y_k)$ – функція, яка характеризує тренд для k -ї точки.

Друга модель. Колокацію за м. н. к. можна застосувати для моделювання рельєфу на регулярній ЦМР, якщо вихідні точки розподілені нерівномірно. Найбільшою проблемою колокації є отримання коваріаційної функції. Відомо, що колокація можлива тоді, коли структури скалярного поля малі стосовно розмірів ділянки, за якою визначали коваріаційну функцію. Якщо це положення порушено, то необхідно перейти до колокації з відтворювальними ядрами.

Формули колокації з відтворювальним базисом мають ту саму структуру – коваріаційну функцію заміняють відтворювальним базисом. Як відтворювальні базиси використовують аналітичні функції: диференціальні сплайни, мультиквадрики, інші радіальні функції.

Якщо Z_p – вектор визначуваних позначок моделювання, а вектор виміряних значень дорівнює Z , то отримаємо:

$$Z_p = Q_p Q^{-1} Z, \quad (5.28)$$

де Z – вектор значень, виміряних у n -вихідних точках; Q_p – матриця розміру $m \times n$; m – кількість визначуваних точок; n – кількість заданих точок; Q – матриця розміру $m \times n$.

Елементами матриць Q є значення радіальних базисних функцій.

У мультиквадриковому методі моделювання елементи матриць визначаються із співвідношень:

$$Q_{ij} = \sqrt{S_{ij} + B} \text{ або } Q_{ij} = S_{ij} + B, \quad (5.29)$$

де S_{ij} – відстань між точками i та j ; B – параметри згладжування.

У логарифмічному мультиквадрику квадрика запишеться:

$$Q_{ij} = \ln(S_{ij} + B). \quad (5.30)$$

Якщо коваріаційну функцію заміняють диференційним сплайном, то елементи коваріаційної матриці визначають із співвідношення

$$Q_{ij} = S_{ij}^2 \ln S_{ij}^2. \quad (5.31)$$

Після вилучення із вектора Z систематичної частини Ax вираз (5.28) запишемо:

$$\Delta Z_p = Q_p Q^{-1} (Z - Ax). \quad (5.32)$$

Вектор

$$Z_p = A_p \hat{x} + Q_p Q^{-1} (Z - Ax). \quad (5.33)$$

Коваріаційну матрицю вектора точок прогнозу запишемо:

$$C_{Z_p Z_p} = A_p N^{-1} A_p^T + Q_p Q^{-1} (C_{ZZ} - A N^{-1} A^T) Q^{-1} Q_p^T, \quad (5.34)$$

де $N = A^T C_{ZZ}^{-1} A$; C_{ZZ} – коваріаційна матриця вектора Z .

Третя модель. Визначення значення висоти Z_k можна отримати по-іншому.

Використовуючи рівняння для визначення висоти вихідної точки Z_i , запишемо:

$$Z_i = (a_0 + a_1 x_1 + a_2 y_1)^s + \delta Z_i,$$

де s – степінь полінома, за допомогою якого апроксимуємо систематичну складову; δZ_i – корельована випадкова величина.

Для знаходження невідомих коефіцієнтів під умовою мінімуму суми квадратів корельованих величин і збігу функції моделювання в точках опори запишемо функцію Лагранжа:

$$F = \delta Z^T C_{\delta Z \delta Z}^{-1} \delta Z - 2\lambda \left[(a_0 + a_1 x + a_2 y)^s \delta Z - Z \right]. \quad (5.35)$$

Використаємо для апроксимації тренду поліном другого степеня і візьмемо часткові похідні функції F за невідомими a_0, a_1, \dots, a_5 і по δZ . Прирівнявши їх до 0, отримаємо систему рівнянь:

$$\sum_{i,j=1}^n b_i C(h_{ij}) + a_0 + a_1 x_1 + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 y_i^2 + a_5 x_i y_i = Z_i$$

$$\sum_{i=1}^n b_i = 0,$$

$$\sum_{i=1}^n b_i x_i^2 = 0,$$

$$\sum_{i=1}^n b_i x_i = 0,$$

$$\sum_{i=1}^n b_i y_i^2 = 0, \quad (5.36)$$

$$\sum_{i=1}^n b_i y_i = 0,$$

$$\sum_{i=1}^n b_i x_i y_i = 0.$$

Коефіцієнти $b_i (i = 1, 2, \dots, n)$ відповідають множникам Лагранжа, $C(h_{ij}) = C_{\Delta Z \Delta Z}$.

Система (5.36) містить також $n + m + 1$ рівнянь з $n + m + 1$ невідомими. Елементи матриці $C(h_{ij})$ можна виразити через коваріації точок поля або через базисні радіальні функції.

Оцінку \hat{Z}_k запишемо:

$$\hat{Z}_k = \sum_{i=1}^n b_i C(h_{ik}) + a_0 + a_1 x_k + a_2 y_k + a_3 x_k^2 + a_4 y_k^2 + a_5 x_k y_k. \quad (5.37)$$

Дисперсію точок прогнозу у такому разі визначаємо із залежності:

$$\sigma_{Z_k}^2 = C_k - \sum_{i=1}^n a_i f^1(x_k, y_k) - \sum_{i=1}^n b_i C(h_{ik}), \quad (5.38)$$

де $\sum_{i=1}^n a_i f^1(x, y)$ – функція, яка характеризує тренд; C_k – дисперсія поля.

Метод Крайгінга. Широковживаний для розв'язання геостатистичних задач метод Крайгінга є видозміненою колокаційною моделлю з умовами.

Алгоритм методу Крайгінга складається з двох етапів: на підставі просторової структури даних отримують варіограму, а за коваріаційними залежностями між позначками точок визначають висоти точок.

У Крайгінгу, запропонованому Д. Кріге для оцінювання запасів золотоносних жил в африканських золоторудних покладах, узагальненою функцією, яка виражає синтезовані властивості поля, є функція розсіювання або варіограма, яку визначають через значення просторової зміни:

$$\gamma(h) = 0,5E \cdot \left\{ [Z(x+h) - Z(x)]^2 \right\} \quad (5.39)$$

або

$$\gamma(h) = C(0) - C(h).$$

Оскільки для побудови варіограми використовують статистики, отримані за обмеженою кількістю даних, і враховуючи те, що навіть після вилучення тренду залишкові відхилення висоти вихідних точок не відповідають умовам стаціонарності, реальні варіаційні криві не збігаються з їхнім ідеальним поданням.

Для моделювання варіограм, вигляд яких залежить від типу рельєфу, підбирають різні математичні функції. Через статистичний характер залежності між позначками точок не знайдено загальної моделі варіограм.

Враховуючи (5.22), запишемо рівняння Крайгінга у загальному вигляді, замінивши значення коваріаційної функції n значеннями варіограми:

$$\sum_{j=1}^n \gamma_{ij} W_j + \lambda = \gamma_{ki}, \quad \sum_{i=1}^n W_i = 1. \quad (5.40)$$

З використанням множника Лагранжа дисперсія оцінки прогнозованої величини запишеться:

$$\sigma_{Z_k}^2 = C_k - \sum_{j=1}^n W_j \gamma_{kj} - \gamma. \quad (5.41)$$

Якщо модельована поверхня містить систематичну компоненту (тренд), то подана вище модель, внаслідок невиконання вихідної умови стаціонарності, буде наближеною. Для точнішого моделювання поверхні з використанням методу Крайгінга необхідно знати функцію апроксимування тренду і узагальнену коваріаційну функцію $C(h)$, яка характеризує автокореляцію даних за відсутності тренду.

У Крайгінгу за наявності тренду, який названо універсальним Крайгінгом, вагові коефіцієнти W_i аналогічно до (5.26) знаходять, розв'язавши систему, яка містить $n + m + 1$ рівнянь:

$$\sum_{j=1}^n W_j \gamma_{ij} + \sum_{i=0}^n a_l f^l(x_i) = \gamma_{kj},$$

$$\sum_{i=1}^n W_i f^l(x_i) = f^l(x_k), \quad l = 0, 1, \dots, m, \quad (5.42)$$

де a_l – невідомі значення коефіцієнтів полінома.

Оцінка точності аналогічна до (5.27).

Аналіз колокаційної моделі вказує, що підвищення точності моделювання пов'язане:

- 1) з вибором розмірів локальних ділянок або радіуса пошуку, в межах якого буде здійснюватися моделювання, а також з вибором кількості та розташування вихідних точок;
- 2) з вибором функції, якою апроксимують систематичну складову;
- 3) зі знаходженням коваріаційної функції в колокаційній моделі або варіограми в Крайгінгу, за якими визначають корельовану зміну;
- 4) з підбором аналітичної функції, яка відповідає властивостям коваріаційної функції.

Метод середнього вагового. Невідоме значення висоти в точці інтерполяції повинно бути подібним або додатно корельованим з її сусідніми вихідними точками. Однією із умов для максимізації подібності є умова:

$$\min \sum_{i=1}^n W_{ik} (Z_i - Z_k)^2, \quad (5.43)$$

де n – кількість точок, відомих в околі точки з висотою Z_i ;

Z_i – значення висоти i -ї відомої точки;

Z_k – значення висоти, яке визначається для k -ї невідомої точки;

W_{ik} – взаємовідношення зв'язності або вага між i -ю і k -ю точками.

Нормальне рівняння для (5.43) запишемо:

$$\sum_{i=1}^n W_{ik} (Z_i - Z_k) = 0, \quad (5.44)$$

звідки

$$Z_k = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ik} Z_i}{\sum_{i=1}^n W_{ik}}. \quad (5.45)$$

Рівняння (5.45) відоме як метод середнього вагового або ковзного середнього, оскільки відомі значення висот є зваженими за деяким відношенням зв'язності, і це відношення оновлюється кожний раз, якщо оцінка стосується нової визначуваної точки. Природа зв'язності між відомими і невідомими точками може набирати різні форми і залежності.

Найпоширенішим у практиці є визначення ваги як величини, оберненої до відстані між відомою та визначуваною точками.

За цим методом висоту k -ї точки поверхні, на якій задані n вихідних точок з відповідними позначками $Z_i, i = 1, 2, \dots, n$, знаходять із залежності:

$$Z_k = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_i}{S_{ik}} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{S_{ik}} \right)}, \quad (5.46)$$

де S_{ik} – відстань між визначуваною та вихідними точками.

Із літератури відомо, що цей метод використовують як найпростіший, він не потребує значних обчислювальних зусиль.

Shepard здійснив модифікацію методу середнього вагового, яка полягає у тому, що під час обчислення ваг враховують кути, побудовані з визначуваної на вихідні точки. У методі Shepard'а ваги визначають за формулою:

$$W_{ik} = S_{ik}^{-2} [T_k / (\sum_{i=1}^n S_{ij}^{-1})], \quad (5.47)$$

$$\text{де } T_k = \sum_{i=1}^n S_{ij}^{-1} (1 - \cos \theta_{ij}).$$

Метод середнього вагового не позбавлений недоліків:

- він може призводити до двозначних розв'язків, якщо невідомі топографічні характеристики поверхні;
- на результати істотно впливає нерівномірний розподіл вихідних даних.

Тріангуляція. Метод побудови ЦМР на основі тріангуляції споріднений з геодезичними методами подання рельєфу. Він полягає у з'єднанні точок вимірювання так, щоб вони утворювали мережу трикутників. Позначку (висоту) точки, яка потрапляє всередину трикутника, найчастіше визначають за формулою:

$$Z(x_k, \gamma_k) = \sum_{i=1}^n W_i Z(x_i, \gamma_i), \quad (5.48)$$

де W_i – вага;

$Z(x_i, \gamma_i)$ – позначки вихідних точок;

$Z(x_k, \gamma_k)$ – позначка визначуваної точки.

Ваги знаходять на основі процентної залежності між утвореними площами поверхонь трикутників S_i (рис. 5.12) і всією площею S .

$$W_i = \frac{S_i}{S}. \quad (5.49)$$

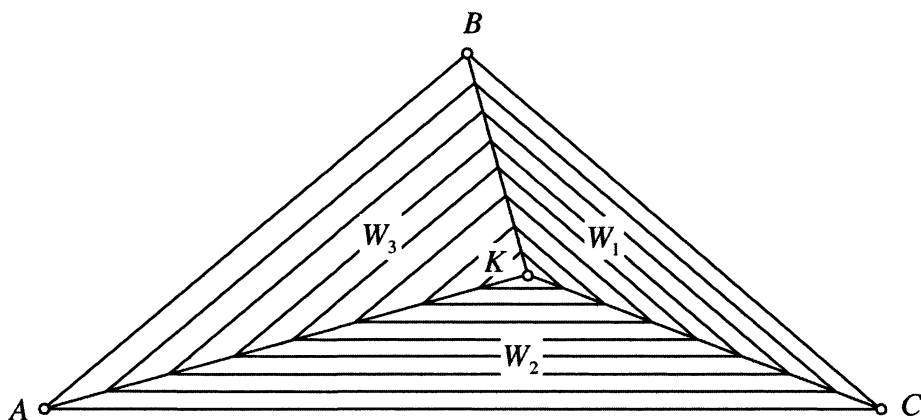


Рис. 5.12. Визначення ваг у методі тріангуляції

Вагова величина, з якою точка входить у рівняння (5.48), розміщена навпроти вершин трикутника:

$$Z_k = Z_A W_1 + Z_B W_2 + Z_C W_3. \quad (5.50)$$

Тріангуляція як інтерполяційний метод особливо придатна в гірських районах з різко вираженою структурою рельєфу, а для моделювання розривних процесів (яри, котловани, обриви) є просто незамінною.

6. АНАЛІТИЧНА ФОТОТРИАНГУЛЯЦІЯ

6.1. Класифікація способів аналітичної фототриангуляції

Фототриангуляція – це метод згущення опорної мережі з використанням фотознімків об'єкта, який необхідно вивчити в кількісному та якісному аспектах.

В основу класифікації способів фототриангуляції можна покласти доволі різноманітні ознаки. Нижче подамо основні види фототриангуляції: спочатку подається класифікаційна ознака, потім основний елемент цієї ознаки і, нарешті, тип фототриангуляції (табл. 6.1).

Таблиця 6.1

Класифікація способів фототриангуляції

№ з/п	Класифікаційна ознака	Елемент ознаки	Типи фототриангуляції (Ф.)
1	2	3	4
1	Призначення	Топографія Інженерна справа	Топографічна Ф. Нетопографічна Ф.
2	Вид знімання	Космічний знімок Аерофотознімок Фототеодолітний знімок	Космічна Ф. Аерофототриангуляція Наземна Ф.
3	Визначувані координати об'єкта	Просторові координати X, Y, Z Планові координати X, Y Висота Z	Просторова Ф. Планова Ф. Висотна Ф.
4	Кількість маршрутів фотознімання об'єкта	Один Більше ніж один	Маршрутна Ф. Багатомаршрутна (блочна) Ф.
5	Відтворення моделей об'єкта (геометрична суть)	В'язка Модель	Ф. за методом в'язок Ф. за методом моделей
6	Використання опорних (додаткових) даних	Статоскоп Радіовисотомір GPS	Ф. з використанням показів статоскопа Ф. з використанням показів радіовисотоміра Ф. з використанням даних GPS
7	Визначення параметрів калібрування знімків	Параметри калібрування	Ф. із самокалібруванням Ф. без самокалібрування

1	2	3	4
8	Застосування вимірювальних засобів	Стереоскопатор Стекометр Стереоскоп Цифрова фотограмметрична станція	Аналітична Ф. Цифрова Ф.

6.2. Фототріангуляція методом в'язок

Нехай ділянка місцевості покрита кількома аерофотознімальними маршрутами, причому поздовжнє перекриття знімків становить 60 %, а поперечне не менше ніж 20 %. На ділянці виконана планово-висотна прив'язка, а кількість опорних точок – не менша від трьох; опорні точки, як правило, розташовуються по периметру ділянки. Сукупність знімків утворює блок, у межах якого необхідно здійснити згущення опорної мережі, тобто визначити просторові координати X , Y , Z деякої кількості точок.

Для кожної точки об'єкта, що зобразилась на знімку, можна записати рівняння колінеарності (2.48). Вважаючи, що елементи внутрішнього орієнтування відомі, а невідомими є елементи зовнішнього орієнтування та координати точок мережі, виконаємо лінеаризацію (2.48).

Отримаємо рівняння поправок:

$$\begin{aligned} a_x \delta X_s + b_x \delta Y_s + c_x \delta Z_s + d_x \delta \alpha + e_x \delta \omega + f_x \delta \kappa + g_x \delta X + h_x \delta Y + k_x \delta Z + l_x &= v_x, \\ a_y \delta X_s + b_y \delta Y_s + c_y \delta Z_s + d_y \delta \alpha + e_y \delta \omega + f_y \delta \kappa + g_y \delta X + h_y \delta Y + k_y \delta Z + l_y &= v_y; \end{aligned} \quad (6.1)$$

де коефіцієнти a_x, b_x, \dots, f_y обчислюють за (2.51), а

$$\begin{aligned} g_x &= -a_x, & h_x &= -b_x, & k_x &= -c_x, \\ g_y &= -a_y, & h_y &= -b_y, & k_y &= -c_y. \end{aligned} \quad (6.2)$$

Вільні члени

$$l_x = \bar{x} - x, \quad l_y = \bar{y} - y, \quad (6.3)$$

де x, y – виміряні координати точки, що зобразилась на знімку;
 \bar{x}, \bar{y} – координати цієї самої точки, обчислені за (2.48).

Розв'язують задачу методом послідовних наближень; ітераційний процес вважається закінченим у разі виконання умов, аналогічних до (2.59), але розширених на всі визначувані невідомі.

Для всієї сукупності виміряних точок та всіх знімків розмір системи нормальних рівнянь типу (2.56) дорівнює:

$$N = 6n + 3k, \quad (6.4)$$

де n – кількість знімків, що входять в блок; k – кількість точок об'єкта, координати яких визначають.

Якщо $n=100$, $k=1000$, то $N=3600$, то розмір матриці нормальних рівнянь становить $3600 \times 3600 = 12960000$ чисел, або $\approx 13 \cdot 10^6$. Для розв'язання задачі необхідно, щоб кожне число подавалось 32 бітами. Це означає, що загальний об'єм пам'яті становить $32 \cdot 13 \cdot 10^6$ бітів $= 4 \cdot 10^8$ бітів, тобто близько 1 гігабайту. Для сучасних ПЕОМ це не становить великої проблеми, тоді як ще 10 років тому пряме розв'язання задачі було доволі складним. Для ефективного розв'язання задачі розроблено способи, які істотно спрощують цю проблему. Деякі з них розглянемо нижче.

1. Спосіб еквівалентних перетворень. Вихідна система рівнянь поправок

$$AX + L = V \quad (6.5)$$

записується у вигляді блочної матриці

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + l_1 &= V_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + l_2 &= V_2. \end{aligned} \quad (6.6)$$

Рівнянням (6.5) відповідають нормальні рівняння

$$A^T AX + A^T L = 0. \quad (6.7)$$

Вводячи в (6.7) підблоки блочних матриць A , X , L , отримаємо

$$\begin{bmatrix} a_{11}^T & a_{21}^T \\ a_{12}^T & a_{22}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11}^T & a_{21}^T \\ a_{12}^T & a_{22}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} = 0. \quad (6.8)$$

Перемноження дає

$$\begin{aligned} b_{11}x_1 + b_{12}x_2 + l'_1 &= 0, \\ b_{21}x_1 + b_{22}x_2 + l'_2 &= 0. \end{aligned} \quad (6.9)$$

Вилучимо групу невідомих x_1 . Для цього перше рівняння домножимо ліворуч на величину $b_{21}b_{11}^{-1}$ та віднімо від першого рівняння друге:

$$\begin{aligned} b_{21}b_{11}^{-1}b_{11}x_1 + b_{21}b_{11}^{-1}b_{12}x_2 + b_{21}b_{11}^{-1}b_{11}l'_1 &= 0, \\ b_{21}x_1 + b_{22}x_2 + l'_2 &= 0. \end{aligned} \quad (6.10)$$

Отримаємо рівняння з вектором x_2 :

$$(b_{21}b_{11}^{-1}b_{12} - b_{22})x_2 + (b_{21}b_{11}^{-1}l'_1 - l'_2) = 0. \quad (6.11)$$

Звідси знаходимо вектор x_2 , а підставивши його значення в (6.10), знайдемо вектор x_1 .

Отже, система рівнянь (6.7) замінюється системою (6.11), а порядок її визначається розмірностями векторів x_1 та x_2 . Поділ блочної матриці на підблоки є

довільним, тому в принципі можна систему з N невідомими розділити на дві підсистеми з $(N/2)$ невідомими.

2. Спосіб квазізнімків (пропозиція проф. А.Н. Лобанова).

Зі знімків спочатку будують невеликі мережі (підблоки), які між собою мають значне перекриття. З кожного підблока методом оберненої фотограмметричної засічки будують квазізнімок з довільними елементами орієнтування. Оскільки підблоки мають значне перекриття, то і квазізнімки теж мають перекриття. З декількох квазізнімків будують нові підблоки, а з них нові квазізнімки. Так роблять доти, доки кількість невідомих (розмір вектора невідомих X) не досягне потрібної розмірності.

3. Спосіб компактного запису матриці нормальних рівнянь.

Оскільки матриця нормальних рівнянь має близькодіагональну структуру, то формується логічна бітова матриця-аналог, де одиницею позначається ненульовий елемент, а нулем – нульовий елемент. Далі матрицю нормальних рівнянь записують в ущільненому вигляді, а всі операції здійснюють, керуючись інформацією 0,1 (своєрідним кодом), тільки для ненульових елементів. Детальні дослідження цього методу виконано в кандидатській дисертації О. Тумської (Львівська політехніка).

6.3 .Фототріангуляція методом моделей

За цим методом спочатку за результатами вимірювань пари знімків будують окремі моделі для частини об'єкта у незалежних просторових фотограмметричних системах координат $S_1X_1Y_1Z_1, S_2X_2Y_2Z_2, \dots$ (рис. 6.1).

Звичайно початок системи координат переносять у лівий центр фотографування, а вісь X спрямовують вздовж базису проектування. Найпоширенішим способом побудови моделі є обчислення елементів взаємного орієнтування для кожної пари знімків та подальше розв'язання прямої фотограмметричної засічки.

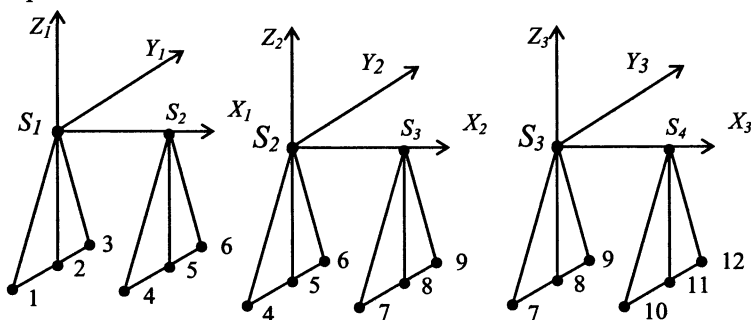


Рис. 6.1. Окремі фотограмметричні моделі зі спільними зв'язковими точками

Наступним кроком є з'єднання моделей в єдину систему координат та в єдиному масштабі. Очевидним є те, що координати точок $S_2, 4, 5, 6$ в моделях 1, 2

повинні збігатися. Такий самий зв'язок між моделями 2, 3 і т. д. Отже, вихідними є умови

$$\begin{aligned} X_j - X_{j+1} &= 0, \\ Y_j - Y_{j+1} &= 0, \\ Z_j - Z_{j+1} &= 0. \end{aligned} \quad (6.12)$$

З математичного погляду цей процес є “геодезичним” орієнтуванням системи $(j+1)$ -ї моделі відносно системи координат j -ї моделі, що описується у п. 2.7.6.

Відмінність полягає в тому, що перенесення початку системи координат $(j+1)$ -ї моделі відбувається фіксовано. Наприклад, для 2-ї моделі маємо:

$$X_0 = X_{S_2}, \quad Y_0 = Y_{S_2}, \quad Z_0 = Z_{S_2}, \quad (6.13)$$

де $X_{S_2}, Y_{S_2}, Z_{S_2}$ – координати центра S_2 в першій моделі.

Тому рівняння (2.93) містить чотири невідомі:

$$\begin{aligned} d_x \delta\alpha + e_x \delta\omega + f_x \delta\kappa + g_x \delta t + l_x &= v_x, \\ d_y \delta\alpha + e_y \delta\omega + f_y \delta\kappa + g_y \delta t + l_y &= v_y, \\ d_z \delta\alpha + e_z \delta\omega + f_z \delta\kappa + g_z \delta t + l_z &= v_z. \end{aligned} \quad (6.14)$$

Одна зв'язкова точка дає три рівняння. Якщо кількість рівнянь (6.14) перевищує кількість невідомих, то застосовують МНК.

Цей підхід має певний недолік: якщо точки 4, 5, 6 розташовані на одній прямій, то елемент $\delta\alpha$ визначається погано (нестійко). Тому запропоновані дещо інші алгоритми, наприклад, трикутник S_2A_6 з моделі 1 повинен збігатися з аналогічним трикутником з моделі 2. Жорсткість такого сполучення дещо краща.

Об'єднані між собою моделі утворюють загальну маршрутну або блочну модель.

6.4. Фототріангуляція за відомих координат центрів проєкцій

У практиці фототріангуляційних робіт є два випадки, коли координати центрів проєкцій відомі.

Перший з них стосується фототеодолітного знімання, в якому центри фотографування відомі з геодезичних робіт. Здебільшого відомі координати фотостанції, а координати центра проєкції можуть бути визначені, якщо відомі кутові елементи зовнішнього орієнтування та висота інструмента (рис. 6.2). Тут:

Q_0 – центр фото станції; C – центр обертання фототеодоліта; Q – перетин осі Z з головною оптичною віссю фотокамери, якщо $\omega=0$;

ω – кут нахилу фотокамери,

r – стала фотокамера.

Якщо елементи зовнішнього орієнтування (кутові і лінійні) точно відомі, то геодезичні координати точки об'єкта обчислюють за формулами прямої фотограмметричної засічки:

$$\begin{bmatrix} X_{\Gamma} \\ Y_{\Gamma} \\ Z_{\Gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\Gamma} \\ Y_{\Gamma} \\ Z_{\Gamma} \end{bmatrix}_{Q_l} + r \cdot \begin{bmatrix} b_2 \\ a_2 \\ c_2 \end{bmatrix}_l + \frac{B_t}{p_t} \begin{bmatrix} f \\ x_{t_l} \\ z_{t_l} \end{bmatrix}, \quad (6.15)$$

де Q_l – ліва фото станція; l – індекс, що означає лівий знімок, a_2, b_2, c_2 – напрямні косинуси; B_t – базис фотографування, приведений до горизонтального положення, x_{t_l}, y_{t_l}, p_t – трансформовані координати і повздовжній паралакс вимірної точки.

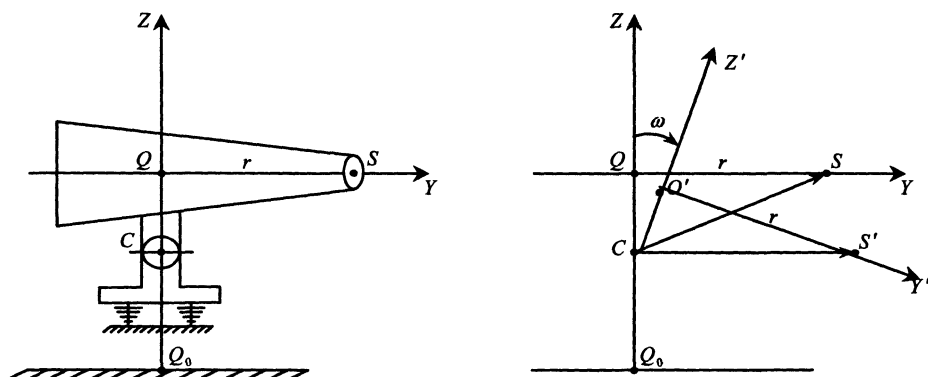


Рис. 6.2. Зміна координат центра проєкції при нахилі фототеодоліта

Тут α – кут, утворений віссю X_{Γ} і проєкцією головної оптичної осі фотокамери на горизонтальну площину:

$$\alpha = A + \varphi - 90^\circ, \quad (6.16)$$

A – дирекційний кут базису фотографування;

φ – кут скосу;

ω – кут нахилу фотокамери, κ – розворот знімка в своїй площині.

Під час побудови фототріангуляційної мережі способом в'язок для кожної вимірної точки складають два рівняння поправок:

$$\begin{aligned} a_x \delta X_Q + b_x \delta Y_Q + c_x \delta Z_Q + d_x \delta \alpha + e_x \delta \omega + f_x \delta \kappa - a_x \delta X - b_x \delta Y - c_x \delta Z + l_x &= v_x, \\ a_z \delta X_Q + b_z \delta Y_Q + c_z \delta Z_Q + d_z \delta \alpha + e_z \delta \omega + f_z \delta \kappa - a_z \delta X - b_z \delta Y - c_z \delta Z + l_z &= v_z, \end{aligned} \quad (6.17)$$

де a_x, \dots, f_z – частинні похідні, отримані з диференціювання видозмінених рівнянь колінеарності.

Подальше застосування МНК та організація ітераційного процесу є аналогічними до способу в'язок для аерофотознімків.

Другий випадок стосується аерофототріангуляції з використанням даних глобальних позиційних систем (GPS).

Сучасні GPS дають змогу фіксувати місцезнаходження літака, морського судна, автомобіля з дуже високою точністю – від кількох сантиметрів до десятка сантиметрів.

Опускаючи деякі деталі, формалізуємо задачу так:

для кожного центра фотографування лінійні елементи зовнішнього орієнтування X_S , Y_S , Z_S відомі. Необхідно побудувати мережу блочної фототріангуляції.

У такому разі рівняння поправок (2.48) набирають вигляду:

$$\begin{aligned} d_x \delta \alpha + e_x \delta \omega + f_x \delta \kappa + g_x \delta X + h_x \delta Y + k_x \delta Z + l_x &= v_x, \\ d_y \delta \alpha + e_y \delta \omega + f_y \delta \kappa + g_y \delta X + h_y \delta Y + k_y \delta Z + l_y &= v_y. \end{aligned} \quad (6.18)$$

Як відомо, для побудови фототріангуляції способом в'язок необхідно мати опорні точки, розташовані по периметру блока. Тоді для опорних точок у рівняннях (6.1) $\delta X = \delta Y = \delta Z = 0$, тобто поправки для них не визначаються, а у разі застосування МНК задача з побудови мережі має розв'язок.

Якщо відомі лінійні елементи зовнішнього орієнтування всіх знімків, опорних точок взагалі не потрібно. Цей, на перший погляд парадоксальний, висновок отримав теоретичне та експериментальне підтвердження [5].

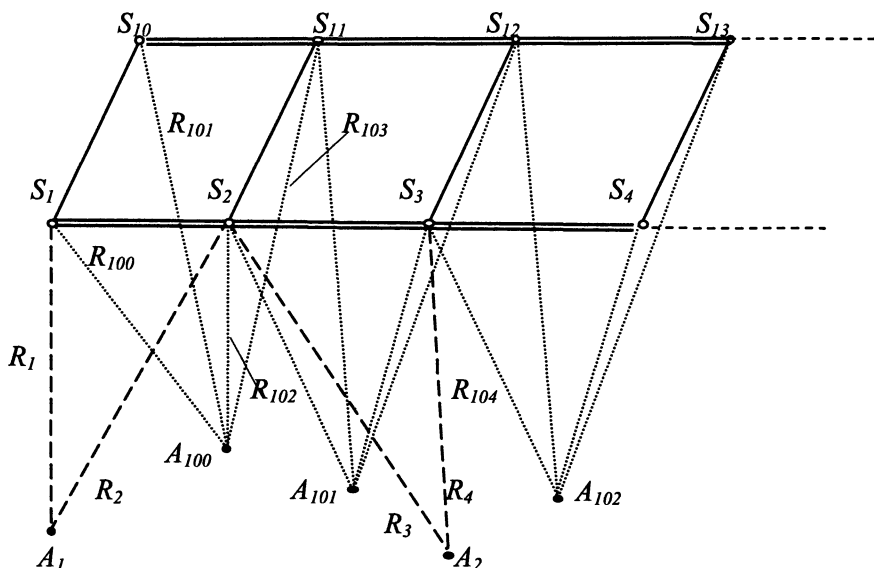


Рис. 6.3. Блокова мережа з двох аерофотознімальних маршрутів зі зв'язковими точками для стереопар та маршрутів

Для повного розв'язання цієї задачі використовуються фотограмметричні зв'язки між знімками, що належать одному маршруту (передовсім зв'язкові точки) та між знімками сусідніх маршрутів (для точок, що лежать у міжмаршрутному перекритті). Геометрична суть задачі впливає з рис. 6.3.

На рис. 6.3: S_1, S_2, S_3, \dots – центри фотографування i -го маршруту;

$S_{10}, S_{11}, S_{12}, \dots$ – центри фотографування $i+1$ -го маршруту;

A_1, A_2, \dots – точки, що зобразились на i -му маршруті;

A_{100}, A_{101}, \dots – точки, спільні для i та $i+1$ -го маршруту.

Нахили знімків приводять до зміни векторів R_1 та R_2 , R_{100} та R_{101} . Це нагадує гойдалку: знімки з центрами S_1 та S_{10} нахилиються доти, доки вектори R_1 та R_2 не перетнуться в точці A_1 ; одночасно знімки з центрами S_1 та S_{10} нахилиються доти, доки вектори R_{100} та R_{101} не перетнуться в точці A_{100} . Вищеописаний спосіб, що ґрунтується на рівняннях (6.18), апробований на макетних знімках (дослідження виконав І. Колб, Львівська політехніка). Доведена правильність ідеї та досліджена точність способу при різноманітних параметрах змодельованого аерофотознімання.

Запропонований спосіб дає змогу зробити такі істотні висновки, які раніше в літературі не зустрічались.

1. Оскільки цей спосіб реалізується в аналітичній фотограмметрії виключно за строгими формулами, які не накладають жодних обмежень на кути нахилу знімків, то немає потреби в гіростабілізувальних установках. Це здешевить аерофотоапаратуру.

2. Блочна мережа будується без жодної опорної точки. Це стає особливо цінним при фотографуванні недоступних територій, на яких неможливо виконувати геодезичні роботи та визначити опорні точки.

Для високоточного фіксування координат центрів проекції доцільно використати диференційний режим роботи GPS, коли на літаку функціонує приймальна GPS-станція, а на місцевості в районі аерознімальних робіт встановлена базова GPS-станція. Така схема допомагає уникнути невизначеності GPS-визначень та підвищити точність фіксації просторових координат центрів проекцій, якщо віддаль від літака до базової станції не перевищує 50 км.

6.5. Маршрутна фототріангуляція

Для побудови фототріангуляційної мережі зі знімків одного маршруту розроблено три способи: частково залежних моделей, повністю залежних моделей, незалежних моделей. У першому способі кожна наступна модель, побудована з пари знімків, що перекриваються, має незалежний масштаб, але спільну кутову орієнтацію з попередньою моделлю. У способі повністю залежних моделей масштаб та кутова орієнтація залежать від попередньої моделі. У способі незалежних моделей кожна модель будується в своїй системі координат та у незалежному масштабі. З теоретичних позицій всі три способи є рівнозначними; різниця полягає лише в математичному описі задачі. Розглянемо коротко кожний спосіб.

6.5.1. Спосіб частково залежних моделей

За вимірними координатами і паралаксами точок знімків спочатку обчислюють елементи взаємного орієнтування кожної стереопари. Для першого знімка в маршруті задаються довільною системою координат та довільними елементами зовнішнього орієнтування. Як правило, $X_{S_1} = Y_{S_1} = Z_{S_1} = \alpha_1 = \omega_1 = \kappa_1 = 0$. Кутові елементи орієнтування для наступного знімка розраховують за строгими формулами

$$A_n = A_l \cdot A_{(\Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\kappa)_{i-i+1}}, \quad (6.19)$$

де A_n - матриця напрямних косинусів для правого (наступного) знімка стереопари; A_l - матриця напрямних косинусів для лівого (попереднього) знімка стереопари;

$A_{(\Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\kappa)_{i-i+1}}$ - матриця напрямних косинусів, обчислена за елементами взаємного орієнтування $\Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\kappa$.

Тут $\tau, \nu, \Delta\alpha, \Delta\omega, \Delta\kappa$ - елементи взаємного орієнтування в лінійно-кутовій системі.

Базисні компоненти розраховують так:

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = T_3^T A_n(\tau, \nu, o)_{i-i+1} \cdot T_3 \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6.20)$$

де B - базис у першій стереопарі (довільна величина).

$$T_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6.21)$$

Матриця T_3 здійснює перехід від фотограмметричної до базисної системи координат (рис. 6.4).



Рис. 6.4. Базисна та фотограмметрична системи координат

У результаті таких дій кожна модель матиме спільну орієнтацію з першою моделлю, але довільний масштаб.

Передавання масштабу виконують за зв'язковими точками.

Масштабний коефіцієнт

$$K_{j+1} = K_j \frac{\Delta Z_j - B_{Zj}}{\Delta Z_{j+1}}, \quad (6.22)$$

де j – номер моделі; ΔZ – апліката зв'язкової точки; B_z – базисний компонент (перевищення правого центра проекції над лівим).

Отримані дані дають змогу побудувати вільну маршрутну модель

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_\Phi = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{S_{lj}} + K_j \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_j, \quad (6.23)$$

де

$$\Delta X = Nx_{t_l}, \quad \Delta Y = Ny_{t_l}, \quad \Delta Z = -Nf \quad (6.24)$$

формули прямої фотограмметричної засічки.

Геодезичне орієнтування маршрутної моделі виконується так, як описано в п. 2.7.6.

Завершальним етапом є виключення деформації фототріангуляційної мережі, найчастіше з використанням степеневих поліномів.

6.5.2. Спосіб повністю залежних моделей

Лівий знімок кожної стереопари спочатку трансформують за відомими кутовими елементами цього знімка. Для першої пари приймають $\alpha_l = \omega_l = \kappa_l = 0$. На наступному етапі розв'язують задачу взаємного орієнтування в лінійно-кутовій системі та визначають поправки до базису так, як описано в п. 2.7.4. В результаті цієї операції правий знімок та базис проектування отримують кутову орієнтацію попередньої стереопари. Одночасно масштаб наступної моделі приведений до масштабу попередньої.

Обчислення просторових координат точки моделі виконують за формулами (6.23), але приймаючи $K_j=1$ для всіх моделей.

Геодезичне орієнтування маршрутної моделі та виключення деформації маршрутної мережі здійснюється так само, як і в попередньому способі.

6.5.3. Спосіб незалежних моделей

Для кожної стереопари розв'язують задачу взаємного орієнтування в базисній або лінійно-кутовій системі. Приймаючи базис проектування довільним, знаходять просторові координати точки моделі, розв'язуючи пряму

фотограмметричну засічку. Отже, кожна модель побудована у своїй системі координат та у своєму, довільному, масштабі.

Приєднання $(j+1)$ -ї моделі до j -ї виконується за методикою, описаною в п. 6.3. Геодезичне орієнтування та усунення деформації маршрутної мережі виконується так само, як і в попередніх способах.

Способи маршрутної фототріангуляції набули широкого поширення в 60–80-ті роки XX ст., коли обчислювальні машини мали обмежені можливості. Нині при потужних ПЕОМ вони витіснені програмами блочної фототріангуляції, і маршрутна мережа розглядається як окремий випадок блочної мережі.

6.6. Фототріангуляція із самокалібруванням

Під терміном “самокалібрування” (або “автокалібрування”) розуміють визначення елементів внутрішнього орієнтування знімка та параметрів деформації фотозображення, зумовленої різними чинниками (наприклад, симетрична та асиметрична дисторсія об’єктива, афінна деформація зображення).

Метод самокалібрування вимагає, щоб об’єкт зобразився не менше ніж на трьох знімках. Цей метод вперше запропонував D.C. Brown (США), і він був використаний для фотограмметричного опрацювання знімків Місяця в умовах повної відсутності опорних точок на об’єкті. Були використані дані про орбіту, елементи внутрішнього орієнтування та кути нахилу камери.

Існують кілька способів фототріангуляції із самокалібруванням; відмінність їх полягає у прийнятій апріорі математичній моделі. Назвемо їх:

- використання умов колінеарності для всіх точок фототріангуляції;
- використання (сумісне) умов колінеарності і компланарності для всіх точок фототріангуляції;
- апріорі прийняте положення, що елементи внутрішнього орієнтування (ЕВО) відомі;
- апріорі прийняте положення, що ЕВО невідомі;
- апріорі прийняте положення про тип функції, яка описує параметри деформації зображення.

Запишемо рівняння (2.48) так:

$$\begin{aligned}x &= x_0 - f \frac{r_x}{r_z}, \\ y &= y_0 - f \frac{r_y}{r_z},\end{aligned}\tag{6.25}$$

а рівняння компланарності як

$$y_{t_n} - y_{t_n} = 0,\tag{6.26}$$

де y_{t_n} – трансформована ордината точки лівого знімка (2.41) за кутами нахилу лівого знімка стереопари; y_{t_n} – трансформована ордината точки правого знімка (2.41) за кутами нахилу правого знімка стереопари.

Доповнимо рівняння (6.25), (6.26) функціями параметрів деформації зображення ψ_x та ψ_y . Тоді

$$\begin{aligned}x - x_0 + f \frac{r_x}{r_z} + \psi_x &= 0, \\y - y_0 + f \frac{r_y}{r_z} + \psi_{y_l} &= 0, \\y_{t_l} - y_{t_n} + \psi_{y_l} - \psi_{y_n} &= 0.\end{aligned}\tag{6.27}$$

Лінеаризація перших двох рівнянь з (6.27) приводить до рівнянь поправок, аналогічних до (2.50), а останнього з (6.27) – до рівняння типу (2.72). В узагальненому матричному вигляді будемо мати:

$$\begin{aligned}A_x \delta S + B_x \cdot \delta \Gamma + D_x \delta E + L_x &= V_x, \\A_y \delta S + B_y \cdot \delta \Gamma + D_y \delta E + L_y &= V_y, \\A_q \delta S + B_q \cdot \delta \Gamma + D_q \delta E + L_q &= V_q,\end{aligned}\tag{6.28}$$

де δS – вектор поправок до елементів зовнішнього орієнтування знімків;

$\delta \Gamma$ – вектор поправок до геодезичних (просторових) координат точок об'єкта;

δE – вектор невідомих параметрів калібрування зображення;

L_x, L_y, L_q – вільні члени, обчислені з (6.27);

V_x, V_y, V_q – поправки до вимірних величин (координат і поперечного паралаксу);

A_x, A_y – матриці коефіцієнтів (2.51);

B_x, B_y – матриці коефіцієнтів (6.2);

A_q, B_q – матриці коефіцієнтів (2.74) чи (2.84).

Якщо прийнято, що елементи внутрішнього орієнтування треба уточнити, то частинні похідні, що є складовими матриць D_x, D_y, D_q , описуються рівняннями (2.66).

Тепер звернемось до функцій ψ_x, ψ_y , коефіцієнти яких теж входять в матриці D_x, D_y, D_q .

Однією з пропозицій (G. Schut, США) є застосування таких поліномів:

$$\begin{aligned}\psi_x &= a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 x^2 y + a_6 xy^2 + a_7 xy^3, \\ \psi_y &= a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 x^2 y + a_6 xy^2 + a_7 xy^3.\end{aligned}\tag{6.29}$$

A. Grün (Німеччина) пропонує поліноми такого типу:

$$\begin{aligned}\psi_x &= a_1 x + a_2 y + a_7 x^2 y + a_8 xy^2, \\ \psi_y &= a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 x^2 y + a_6 xy^2.\end{aligned}\tag{6.30}$$

Обидва типи поліномів (6.29) та (6.30) використовують у разі поперечного перекриття між маршрутами 20–30 %.

В. Дубиновський (Росія) пропонує такі поліноми:

$$\begin{aligned}\psi_x &= c_0 + c_1x + c_2y + c_3x^2 + c_4xy + c_5y^2 + c_6x^3 + c_7x^2y + c_8xy^2 + c_9x^4, \\ \psi_y &= c'_0 + c'_1x + c'_2y + c'_3x^2 + c'_4xy + c'_5y^2 + c'_6x^3 + c'_7x^2y + c'_8xy^2 + c'_9x^4.\end{aligned}\quad (6.31)$$

І. Антіпов (Росія) запропонував вибирати кількість членів поліномів з (6.31) на підставі аналізу точності калібрування. Пояснимо ідею такого підходу. Спочатку візьмемо повністю поліном (6.31) і розв'яжемо систему лінійних рівнянь n -го порядку за МНК. Отримана обернена матриця дає змогу виконати оцінку точності за аналогією з (2.67)–(2.68). На наступному кроці один елемент, наприклад, c_0 , виключається і розв'язок отримується для системи порядку $(n-1)$. Почергово вилучають з розв'язку інші елементи, а отриманим вважається розв'язок, в якому оцінка точності є найкращою.

Зовсім інший підхід запропонував В. Дубиновський (Росія), який назвав свій спосіб принципом зон.

Фотознімок ділиться на зони (рис.6.5).

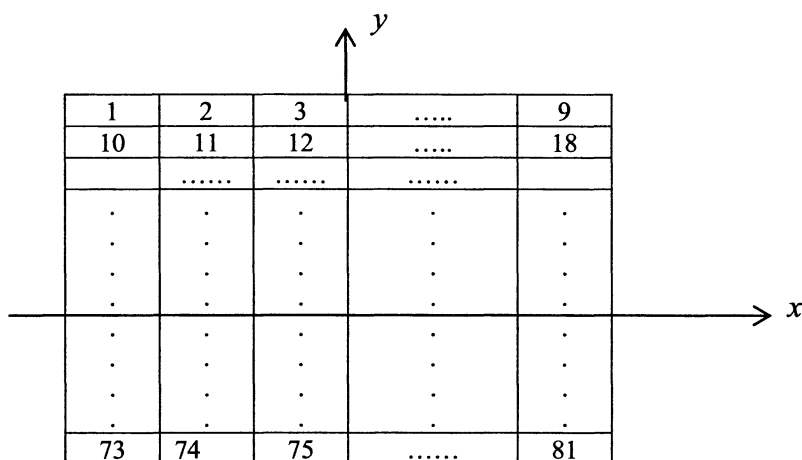


Рис. 6.5. Поділ знімка на зони для знаходження параметрів калібрування

Розмір зони для знімка 180×180 мм та їхню кількість подано в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Кількість зон на знімку при калібруванні

Параметр	Точність вимірювань, мм		
	0,005	0,010	0,05
Сторона квадрата (зони), мм	4,2	8,5	42,5
Кількість зон на знімку	1600	400	16

Аналіз показав, що для фототріангуляції достатньо знімок ділити на 9 зон. Для кожної зони визначають поправки Δx і Δy , вважаючи, що вони в межах однієї зони є незмінними величинами. Тоді функції ψ_x, ψ_y мають вигляд:

$$\psi_{x_i} = \Delta x_i, \quad \psi_{y_i} = \Delta y_i, \quad (6.32)$$

де i – номер зони.

Точка вважається належною до i -зони, якщо

$$x - x_i \leq \varepsilon_x, \quad y - y_i \leq \varepsilon_y, \quad (6.33)$$

де x_i, y_i – координати центра i -ї зони; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – допуск на відхилення, який дорівнює половині розміру зони.

Ефективність фототріангуляції з самокалібруванням перевіряли у різних експериментальних умовах. За даними В. Дубиновського, побудова фототріангуляції з самокалібруванням є в 1,3–3,1 раза точнішою від фототріангуляції без самокалібрування. Точність побудови не залежить від кількості опорних точок у блоці фототріангуляції, а їхня кількість може бути мінімальною (для розв'язання задачі геодезичного орієнтування блочної моделі та усунення залишкової деформації мережі).

6.7. Деформація фототріангуляційної мережі.

Точність фототріангуляції

Точність побудови мережі фототріангуляції залежить від багатьох чинників, серед яких головними є геометрична та фотографічна якість фотозображення, параметри аерофотознімання, точність вимірювання знімків, кількість та розташування опорних точок, математична модель фототріангуляції тощо.

Основні похибки фотокоординат спричиняють дисторсія об'єктива, деформація фотоматеріалу, невіривнювання фотоемульсійного шару у площину, рефракція атмосфери, клиновидність світлофільтра, похибки ототожнення та розпізнавання точок на знімках. Всі ці фактори можна поділити на систематичні та випадкові; вони добре описуються адитивною моделлю (див. п. 2.9.1).

Сумарний вплив похибок під час фототріангуляційних побудов є доволі складним. Найлегше він простежується на побудові висотної фототріангуляційної мережі способом моделей. Якщо кожна наступна ланка під'єднується до попередньої, побудованої з окремої стереопари, то елементарні похибки кожної моделі $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ нагромаджуються за законом подвійного підсумовування:

$$\sum = n\varepsilon_1 + (n-1)\varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n. \quad (6.34)$$

Графічно це подається ламаною, подібною до параболи (рис. 6.6).

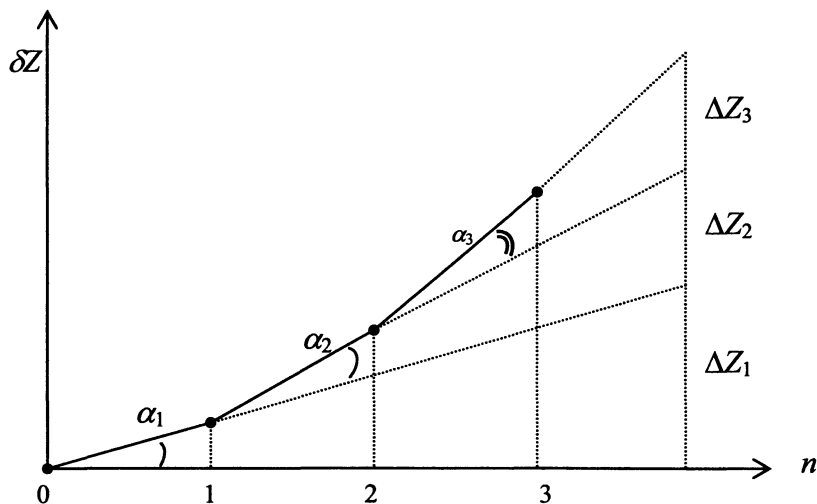
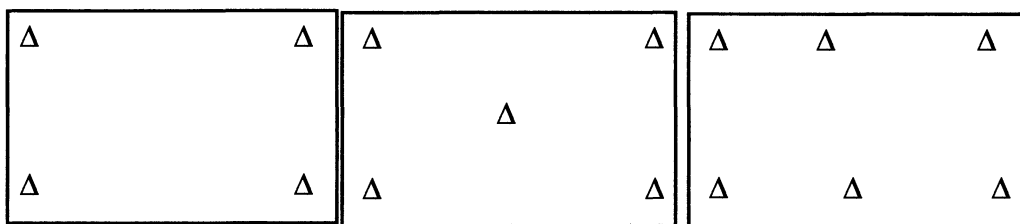


Рис. 6.6. Деформація висот у фототріангуляційній мережі під впливом похибок поздовжнього кута нахилу моделей

Похибки в азимутальному напрямку (кут κ) спричиняють аналогічну до рис. 6.6 деформацію мережі у плановому положенні. Нагромадження похибок в кутах ω_i спричиняють деформацію мережі у вигляді кручення.

Усунення деформації просторової мережі виконується, як правило, із використанням опорних точок, розміщених за певною схемою, та відповідних апроксимувальних функцій.

Для маршрутної фототріангуляції найпоширенішими є схеми, подані на рис. 6.7.



Δ – опорна точка.

Рис. 6.7. Схеми розміщення опорних точок у маршруті фототріангуляції

Для блочної фототріангуляції опорні точки розташовують по периметру блока (рис. 6.8).

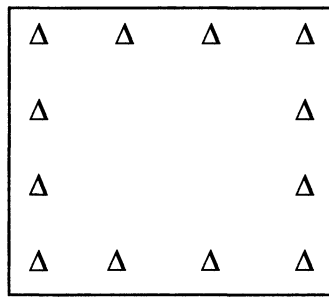


Рис. 6.8. Схема розміщення опорних точок для фототріангуляційного блока

Апроксимувальними функціями найчастіше є степеневі поліноми, в яких кількість членів залежить від n -кількості опорних точок, наприклад:

$$\begin{aligned}\psi_x &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5x^3 + a_6y^2, \\ \psi_y &= b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5x^3 + b_6y^2, \\ \psi_z &= c_0 + c_1x + c_2y + c_3xy + c_4x^2 + c_5x^3 + c_6y^2;\end{aligned}\quad (6.35)$$

якщо $n \geq 7$, то зберігаються всі члени в (6.35);

якщо $7 > n \geq 5$, то зберігають a_0, \dots, a_4 ; b_0, \dots, b_4 ; c_0, \dots, c_4 ;

якщо $5 > n \geq 4$, то зберігають a_0, \dots, a_3 ; b_0, \dots, b_3 ; c_0, \dots, c_3 .

Очікувану точність фототріангуляції можна заздалегідь підрахувати, використовуючи відповідні формули (їхнє виведення подано в курсі фотограмметрії).

Для вільної маршрутною мережі середні квадратичні похибки координат точки, що розміщена у кінці маршруту, будуть такими:

$$m_{x_n} = 1,2 \cdot m \cdot m_q \sqrt{n^3}, \quad m_{y_n} = 0,6 \cdot m \cdot m_q \sqrt{n^3}, \quad m_{z_n} = 0,9 \frac{f}{b} \cdot m \cdot m_q \sqrt{n^3}. \quad (6.36)$$

Для схеми прив'язки маршруту з чотирьох точок (рис. 6.7) найбільша похибка виникає всередині маршруту, а середні квадратичні похибки обчислюють так:

$$\begin{aligned}m_{x_{n/2}} &= 0,3 \cdot m \cdot m_q \sqrt{n^3}, \quad m_{y_{n/2}} = 0,15 \cdot m \cdot m_q \sqrt{n^3}, \\ m_{z_{n/2}} &= 0,2 \frac{f}{b} \cdot m \cdot m_q \sqrt{n^3},\end{aligned}\quad (6.37)$$

де n – кількість знімків; f – фокусна віддаль, b – базис в масштабі знімка; m_q – середня квадратична похибка вимірювання паралакса, m – знаменник масштабу знімка.

Для блочної фототріангуляції можна скористатись формулами Ф. Лисенка:

$$\begin{aligned}m_{x,y} &= 0,75m\sqrt{3(2ns + kn - rs)/(2kns)}, \\m_z &= (0,25H / p)\sqrt{3(2ns + kn - rs)/(2kns)},\end{aligned}\tag{6.38}$$

де n – кількість знімків у блоці; s – кількість знімків, на яких зобразилась точка (залежить від поздовжнього та поперечного перекриття); k – кількість точок мережі на кожному знімку, r – кількість опорних точок у блоці; H – висота фотографування, p – середнє значення поздовжнього паралакса.

Аналіз формули (6.38) приводить до таких висновків.

Збільшення кількості знімків у блоці від 10 до 100 знижує точність побудови тільки на 6–7 %. Якщо кількість точок на знімку збільшити з 5 до 12, то точність підвищиться в 1,5 рази. Збільшення поперечного перекриття з 20 % до 60 % підвищує точність побудов у 1,8 рази.

Детальні дослідження реальної точності фототріангуляції були доволі масштабними в 1975–1985 рр. і опубліковані в матеріалах конгресів та конференцій Міжнародного фотограмметричного товариства.

7. ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОЇ ФОТОГРАММЕТРІЇ

7.1. Цифрові фотограмметричні станції та основні види продукції

Цифрова фотограмметрична станція (ЦФС) – це система технічних і програмних засобів для опрацювання фотографічних і нефотографічних зображень, яка дає змогу отримувати кінцеву продукцію у цифровому, графічному або візуальному поданні (карти, плани, просторові моделі об'єктів, ЦМР, каталоги координат тощо).

Базовим технічним засобом є потужний персональний комп'ютер (іноді два), на якому здійснюють вимірювальні та обчислювальні операції. До комп'ютера висуваються високі вимоги стосовно оперативної та зовнішньої пам'яті, швидкодії, розміру екрана, частоти виведення зображення на екран.

Програмне забезпечення є серцевиною технологій цифрової фотограмметрії. Чим розгалуженішим і потужнішим воно є, тим більші технологічні можливості має ЦФС. Вважається, що типова ЦФС дає змогу реалізувати такі процеси:

- створення топографічних карт і планів;
- побудова мереж фототріангуляції;
- побудова цифрових моделей об'єктів, зокрема рельєфу;
- створення цифрових ортофотопланів та карт.

7.1.1. Системи стереоспостереження у ЦФС

Як згадувалось раніше, основою стереоспостереження двох образів (знімків) є умова, щоб ліве око бачило лівий знімок, а праве – правий знімок. У ЦФС таке розділення досягається кількома способами.

Перший спосіб ґрунтується на використанні звичайного лінзово-дзеркального стереоскопа. На екран монітора одночасно виводяться два зображення (лівий і правий знімки), і це дає змогу оператору через стереоскоп спостерігати стереопару, бачити об'ємну модель та здійснювати необхідні операції (зокрема вимірювальні). Перевагою цього способу є те, що не вимагається високої частоти виведення на екран зображень, і достатньо для цього 60 Гц.

Другий спосіб передбачає використання поляризаційних окулярів та поляризаційного екрана, який розміщують перед монітором. Спосіб поляризації полягає в тому, що зображення від лівого знімка поляризується в горизонтальній

площині, а кристали лівого фільтра окулярів так само зорієнтовані. Відповідно праве зображення поляризується у вертикальній площині, а правий фільтр окулярів має ту саму орієнтацію. Частота подавання зображень на екран (почергово лівий і правий знімки) повинна бути високою і становити 120 Гц. Синхронізація подавання образів з поляризаційним екраном створює можливість стереоспостереження. Недоліком способу є втрата яскравості зображення, яка становить близько 25 %.

Третій спосіб ґрунтується на використанні активних окулярів на рідких кристалах. На екран почергово виводиться то лівий, то правий знімок; частота виведення становить 120 Гц. З цим процесом синхронізована робота давача інфрачервоного сигналу та сенсора, що “відкриває” лівий або правий фільтр окулярів. У певний момент часу на екран подається ліве зображення, висилається сигнал до окулярів на лівий фільтр; правий в цей момент не пропускає світла. Оператор бачить лівий знімок. У наступний момент (все-таки частота 120 Гц) те саме повторяється для правого зображення. Через інерційність людського зору обидва зображення зливаються в одну об’ємну стереоскопічну модель.

При стереоспостереженнях використовують кольорові екрани великих розмірів (19 або 21 дюйм) з роздільною здатністю близько 1280×1024 пікселів. Під час спостережень можна змінювати масштаб зображення, переміщати його по екрану.

Для вимірювальних операцій (в режимі 2D або 3D) використовується багатофункціональна “мишка”, конструкція якої в кожній станції є оригінальною.

7.1.2. Характеристики деяких ЦФС

Цифрова фотограмметрична станція “Дельта”

Створена в Науково-виробничому підприємстві “Геосистема” (Україна). Ґрунтується на стандартному Intel-сумісному комп’ютері з системою Windows 97/2000/XP. Використовує відеорежими кольорових моніторів з роздільною здатністю від 1024×768 до 1600×1200 пікселів та вище. Для стереоспостережень використовується або стереоскоп, або Open GL сумісні закриваючі окуляри. Програмне забезпечення реалізує основні способи і задачі аналітичної фотограмметрії та операції з опрацювання зображень.

Програма орієнтування забезпечує створення каталогів опорних точок, напівавтоматичне орієнтування стереопари і поодинокого знімка, контроль якості та можливість виправлення кожного процесу орієнтування, опрацювання аеро- та космічних знімків високої роздільної здатності.

Програма стереозбирання і створення електронних карт працює як у стереорежимі, так із поодинокими знімками, для яких попередньо створена ЦМР. Виконується векторизація ортофотопланів або відсканованих карт, накладання векторної інформації на растрову у режимі 3D, використовуються шаблони типових об’єктів, автоматичне створення і замикання полігонів. Відновлюється рельєф в автоматичному та напівавтоматичному режимах, побудова та інтерполяція горизонталей.

Система дає змогу створювати ортомозаїки з необмеженої кількості знімків та полігонів з вирівнюванням тональності і корекцією кольорів.

Закладено та реалізовано такі функції опрацювання рельєфу: побудова регулярної сітки (GRID) або нерегулярної (TIN) з пікетів чи горизонталей, генерування горизонталей з ЦМР або TIN, інтерполяція горизонталей, побудова перерізів, підрахунок об'ємів.

Реалізована автоматична блочна тріангуляція з вирівнюванням блока, спосіб швидкої кореляції для автоматичного ототожнення точок і передавання їх на сусідні знімки. Відбувається електронне маркування точок і генерування абрисів. Після вирівнювання блока видається каталог координат точок мережі.

Використовуються внутрішні формати графічних даних DMF, TIFF, внутрішній формат бази даних DMF, експорт та імпорт графічних даних у форматах DXF, MID/MIF, SHP, DGN, TXF, ASCII, TIFF, BMP, JPG.

Реалізовано обмін даними з програмами AutoCAD, MapInfo, ArcView, MicroStation, ГІС "Карта 2000".

Програмний комплекс "Photomod"

Програмний комплекс створено в ФКЦ "Земля" (Росія). Основними галузями застосування є:

- геодезія і картографія;
- кадастри різного призначення;
- маркшейдерія;
- інженерні вишукування і проектування;
- геологія;
- архітектура.

Система ґрунтується на комп'ютері типу Pentium з оперативною пам'яттю не менше ніж 64 MB, операційною системою Windows 98 і вище, графічною картою True Color 8 MB до True Color 32 MB, апаратною підтримкою Open GL. З додаткового обладнання потрібні рідкокристалічні або анагліфічні окуляри, спеціалізована десятикнопкова мишка.

Основні функції системи такі:

- оброблення знімків – центральної проєкції або сканерних зображень;
- блочна фототріангуляція;
- побудова ЦМР;
- створення ортофотопланів;
- векторизація у стереорежимі та за ортофотопланом;
- створення і друк електронних карт;
- калібрування планшетних поліграфічних сканерів.

Система має такі робочі модулі:

- Photomod Project Manager – створення і керування проектами;
- Photomod AD – збирання даних і вимірювання при обробленні блока зображень;
- Photomod Solver – вирівнювання мережі фототріангуляції;
- Photomod Montage Desktop – візуалізація вирівнювання блока зображень,

запуск модулів StereoDraw, DTM, FastOrtho, Mosaic; зшивання моделей і горизонталей, побудованих за різними стереопарами;

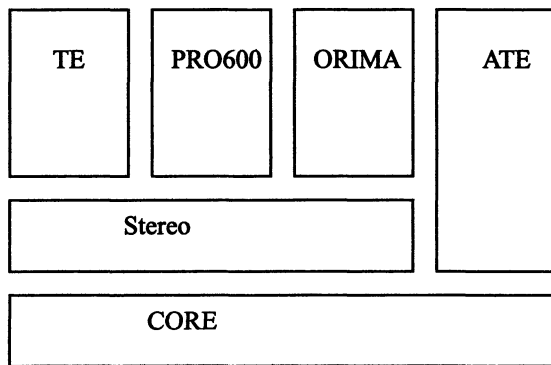


Рис. 7.1. Архітектура програмного комплексу LPS

- Photomod StereoDraw – 3D-векторизація у стереорежимі за стереопарою;
- Photomod DTM – побудова моделей рельєфу та горизонталей зі стереопари;
- Photomod FastOrtho – ортотрансформування поодинокого знімка;
- Photomod Mosaic – побудова ортофотопланів;
- Photomod VectOr – створення і виведення на друк цифрових карт;
- Photomod ScanCorrect – виправлення спотворень відсканованих зображень, які виникають у разі використання планшетних сканерів.

Програмний комплекс від Leica Geosystems (Швейцарія)

Програмний комплекс під назвою LPS (Leica Photogrammetry Suite) призначений для фотограмметричного опрацювання різноманітних зображень, отриманих за допомогою: аерофотокамер, 35-мм фотокамер, цифрових камер, цифрової аерокамери ADS40, сенсорів космічного базування, зокрема SPOT, IRS-1C, MODIS, QuickBird, ASTER, EROS A1, IKONOS, Generic Pushbroom.

Програмний комплекс побудовано за модульно-ієрархічним принципом (рис. 7.1).

CORE (Ядро) – це фундамент для роботи та об’єднання всіх модулів, призначене для управління фотограмметричним проектом та розв’язання різноманітних фотограмметричних задач. Управління проектом реалізується через панель інструментів проекту – або покроковим вирішенням, або в режимі пакетного опрацювання.

Реалізовано автоматичне управління даними, включаючи знімки, файли ЦМР, дані з дешифрування. Серед даних можуть бути параметри камери, зокрема калібрування, коефіцієнти раціональних поліномів, координати опорних точок, дані GPS, векторні дані, растри зображень, сканованих карт тощо.

LPS Core дає змогу вимірювати опорні, контрольні та зв’язкові точки вручну. Реалізовано автоматичний пошук точок у зонах перекриття знімків; проте їх можна вручну коректувати або усувати. Зони розміщення таких точок задає оператор. Автоматичне перенесення точок на суміжні знімки виконується з урахуванням характеру місцевості, тіней та інших факторів-перешкод. Ядро забезпечує реалізацію функції “тріангуляція”, куди входить опрацювання GPS для визначення положення камери в момент знімання, побудову псевдовільних мереж фототріангуляції при

відомих елементах “геодезичного” орієнтування блока або за наявності опорних точок та інші допоміжні операції.

У функцію “Ортотрансформування” входить виправлення масштабних спотворень через нахил знімка, рельєф місцевості та систематичні похибки зображення. Використовуються результати фототріангуляційних побудов. Ортозображення отримуються при одночасному опрацюванні одного або багатьох знімків, при використанні різних типів ЦМР (растр, 3D-шейп-файли, текстові файли, моделі поверхонь).

Функція “Монтаж ортозображень” реалізує в автоматичному режимі з’єднання всіх ортозображень в єдиний блок з вирівнюванням яскравості і фототону всіх частин.

Функція “Створення фотопланів і їх друк” реалізує з’єднання нетрансформованих знімків в єдину мозаїку (фотосхему) або ж ортозображень в єдиний мозаїчний фотоплан з друкуванням цих матеріалів.

Ще одна функція “IMAGINE Advantage” перейшла з пакета ERDAS IMAGINE та реалізує фільтрацію зображень, покращання образів тощо.

Модуль АТЕ (Automatic Terrain Extraction) призначений для автоматичної побудови ЦМР у межах стереопари або блока знімків. Результатом є окремі файли на стереопару або зістикована загальна блочна модель. Тут реалізовано готові кореляційні рішення з урахуванням різного характеру місцевості. Для підвищення точності побудови ЦМР передбачено урахування відомих висот опорних і зв’язкових точок, наявних даних ЦМР. Побудовані пакетом просторові моделі поверхонь узгоджуються з даними по рельєфу – файлами MicroStationDGN та структурними лініями.

Модуль TE (Terrain Editor) призначений для інтерактивного редагування або ручного створення ЦМР. При редагуванні рельєфу як підкладка використовується стереозображення, що дає змогу краще оцінити точки ЦМР. Режими візуалізації такі: зображення фіксоване – рухається курсор; фіксований курсор – рухається зображення, автоматичне створення панорами. Саме стереоспостереження можна здійснювати або за допомогою активного екрана, або активних окулярів, або в анагліфічному режимі. Редагування ЦМР передбачає згладжування, проріджування, вертикальне переміщення, натягування на поверхню, інтерполяцію, відміну та повторення операцій.

Модуль PRO600 призначений для дешифрування зображень у стереорежимі та зв’язку LPS з MicroStation. Уможливорює тривимірну векторизацію у середовищі MicroStation GeoGraphics з використанням потужних інструментальних засобів, призначений для великих картографічних проєктів. Він об’єднує:

- створення картографічного образу за допомогою ліній, штрихування полігонів, умовних знаків, підписів до горизонталей, штрихування ухилів та підписів до сітки;
- кодування об’єктів;
- відображення графіки у MicroStation та у стереовікні LPS;
- введення просторових координат у MicroStation в реальному часі;
- автоматичне узгодження кольорів з роздільною здатністю MicroStation;
- набір символів, ліній, дуг, полігонів тощо;
- налаштування функцій кнопок дигіталізації (близько 100 функцій);
- інші.

Модуль ORIMA DP (Digital Photogrammetry) призначений для побудови фототріангуляційних мереж у блоках складної конфігурації та з необмеженою кількістю знімків. Реалізовано в трьох версіях: DP-TB, DP-TE/GPS, DP-M. Версія ORIMA-TB призначена для фототріангуляції великих блоків. Інструменти графічного аналізу похибок полегшують аналіз та уникнення грубих похибок. Передбачено вирівнювання з самокалібруванням, автоматичний пошук грубих похибок, статистична оцінка якості вимірних величин.

Пакет підтримує тільки кадрові зображення, без використання даних GPS.

Версія ORIMA-DP-TE/GPS дає змогу використовувати дані GPS, що приводить до скорочення кількості опорних точок. Передбачено різне перетворення геодезичних координат, імпорт та редагування даних GPS та INS.

Версія ORIMA DP-M доповнює дві попередні тим, що зорієнтована на фототріангуляцію за знімками ADS40.

Цифрова фотограмметрична станція ImageStation INTERGRAPH

Комплекс створено відомою американською фірмою INTERGRAPH, яка кілька років тому об'єднала свої творчі зусилля з німецькою фірмою ZEISS.

Інсталяція відбувається на PC -комп'ютері з використанням операційної системи Windows XP разом з програмним комплексом Bentley MicroStation. Рекомендовані такі технічні параметри: процесор Dual Inter Xeon 3,6 GHz, оперативна пам'ять 2GB, диск SAS, монітор з мінімальним розміром 21 дюйм з частотою зміни зображення 120 Гц та роздільною здатністю 1280×1024. До технічних засобів, окрім комп'ютера, належать: високопродуктивна графічна карта 3DLabs Realizm 800 PCIe, інфрачервоний давач, стереоокуляри на рідких кристалах 3D Crystal Eyes, мишки (маніпулятор) Z/1 Mouse USB.

Програмне забезпечення має низку модулів:

модулі управління:

*ISPM (Image Station Photogrammetric Meneger);

– модуль орієнтування і тріангуляції, зокрема:

* ISMS (ImageStation Model Setup);

* ISDMS (ImageStation Digital Mensuration);

* ISAT (ImageStation Automatis Triangulation);

– модулі пошуку даних, зокрема:

* ISSD (ImageStation Stereo Display);

* ISFC (ImageStation Feature Collection);

* ISDC (ImageStation DTM Collection);

* ISAE (ImageStation Automatic Elevation).

Розглянемо коротко кожний з модулів. Деякі з вікон модулів подано на рис. 7.2–7.19.

Управління даними (ISPM) – це модуль, що визначає перелік необхідних даних, введення їх, усунення та аналіз. Модуль дає змогу створювати звіти та порівняння. Модуль забезпечує роботу інших програмних продуктів.

Основні риси:

– автоматизація підбирання знімків;

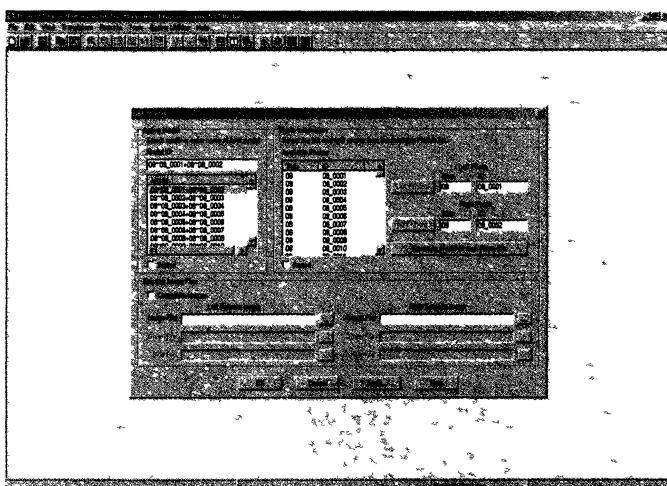


Рис. 7.2. Вікно модуля ISPM

- можливість епіпольярного допасування;
- стеження за виконанням проекту і оцінка стану виконання (Footprint Viewer);
- інструмент для “швидкого” відтворення оригіналів знімків (RasView).

Модуль ISMS – це засіб фотограмметричних вимірювальних операцій, вимагає дій модуля ISPM.

Основні риси:

- відтворення стереопари з одночасним поданням у таблиці результатів вимірів;
- можливість вимірювань у режимі моно- або стереоспостережень;
- ручне орієнтування (внутрішнє, взаємне, геодезичне, пряма фотограмметрична засічка);
- плавне переміщення зображення;
- інтерактивна або автоматична корекція радіометричних характеристик образу;
- можливість виконання вимірювань для аеротріангуляції.

Модуль ISDM – це потужний фотограмметричний інструмент, який уможливорює вимірювання на багатьох знімках одночасно. Ці дані передаються до аеротріангуляційних побудов або ж експортуються в потрібних форматах до інших завдань і споживачів. Дас змогу спостерігати ті самі точки на багатьох знімках у блоці. Виконує автоматичну кореляцію з одночасним обчисленням контрольних показників, що підвищує точність і швидкість вимірів. Реалізує автоматичну корекцію радіометричних показників, що істотно допомагає оператору у вимірювальних операціях.

Основні риси:

- відтворення одночасно багатьох знімків з виданням таблиці результатів;
- ручне або автоматичне взаємне орієнтування (методи з автокореляцією та LSM – Least Squares Matching);

- ручне геодезичне орієнтування і пряма фотограмметрична засічка;
- інтегрований модуль вимірювання фототріангуляції в реальному режимі часу (Photo – T);

- багатий набір способів статистичного аналізу;
- графічне подання опорних точок та відносних похибок;
- реалізація методу самокалібрування за математичною моделлю Ebner;
- можливість використання GPS/INS.

Модуль ISAT є пакетом для виконання автоматичної тріангуляції, починаючи від внутрішнього орієнтування до вимірювання зв'язкових точок та вирівнювання блока зі статистичним аналізом результатів.

Практично всі операції виконуються автоматично. Винятком є ручне спостереження та виміри невеликої кількості опорних точок.

Основні риси:

- автоматичний контроль даних на кожному етапі;
- графічний вибір знімків, що формують блок тріангуляції;
- поділ блока на підблоки, що практично не обмежує розміри тріангуляційних побудов;
- винятково швидкий і точний спосіб вимірювання зв'язкових точок;
- вирівнювання блока методом в'язок з виявленням грубих похибок, використанням даних GPS/INS, даних калібрування камери, методу самокалібрування, аналізу похибок на підставі коваріаційної матриці;
- графічна презентація відносних похибок;
- об'єднання підблоків з відповідним аналізом.

Модуль ISSD візуалізує стереомодель одночасно з вимірювальною позначкою. Використання графічного середовища MicroStation дає змогу виконувати операції з векторними даними і не потребує побудови геометричної (просторової) моделі, оскільки остання створюється миттєво, “на льоту”.

Основні риси:

- плавне зміщення образу, спостереження одночасно багатьох зображень;
- відображення на екрані нерухомого образу або нерухомої вимірювальної позначки;
- декомпресія (ущільнення) з формату JPEG у реальному часі;
- використання методу пірамід і “плиткової” структури для швидкої візуалізації знімка, необмежені зміни масштабу у методі пірамід;
- автоматичний баланс контрасту та яскравості фрагмента образу;
- можливість визначення і корекція систематичної похибки оператора;
- можливість використання чорно-білих зображень з глибиною сірого
- 16–24 бітів для кольорових образів.

Модуль вимагає наявності ISPM та MicroStation J.

Модуль ISFC містить інструментарій для цифрування об'єктів з чорно-білих образів і стереозображень, які далі можуть використовуватись у системах GIS або CAM. Використання таблиці об'єктів дає змогу окреслити такі риси, як геометричний тип, спосіб цифрування, символіка, набір атрибутивних даних. Вибір об'єкта автоматично

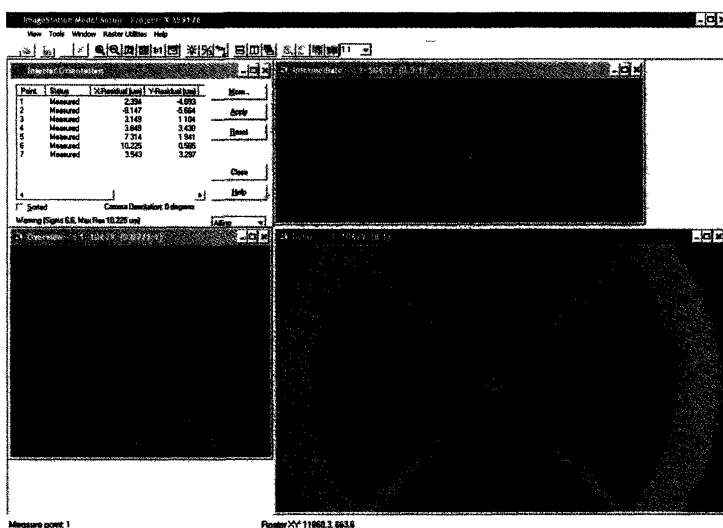


Рис. 7.3 Вікно модуля ISMS

настроює MicroStation відповідно до його положення в таблиці об'єктів. Графіка об'єкта записується до графічного файла MicroStation, атрибути – до даних MSAccess. Завдяки цьому дані можна використати в інших системах.

Для функціонування необхідні: ISPM, ISSD, MicroStation J.

Модуль ISDC дає змогу вимірювати пікети і точки скелетних ліній рельєфу за стереомоделлю. Окрім цього, можливий аналіз та виправлення наявної моделі. У динамічному режимі на екрані відтворюються горизонталі, що дає змогу виправлення виконувати швидко і продуктивно.

Основні риси:

- можливість вивчення довільної кількості зібраних даних;
- можливість пошуку елементів скелетних ліній (хребти, стоки, насипи, виїмки, характерні точки поверхні тощо);
- можливість використання плоских елементів до визначення елементів скелетних ліній рельєфу;
- допускається використання різних геометричних елементів (прямі, дуги, хорди тощо);
- збирання інформації із супутникових зображень;
- вивчення окремих елементів та цілих підобластей;
- вивчення виключених областей;
- динамічна візуалізація горизонталей і трикутників;
- інтерактивний контроль та вивчення “підозрілих” точок з використанням ImageStation Automatic Elevation;
- імпорт/експорт різних форматів.

Модуль ISAE слугує для автоматичного вимірювання точок ЦМР на цифрових стереопарах (аеро- або космічних). Модуль працює разом з ISDC, тому можна цифрувати виключені області і структурні елементи ЦМР, що уможливило швидке обчислення ISAE, а також реалізується вивчення та аналіз результатів вимірювань.

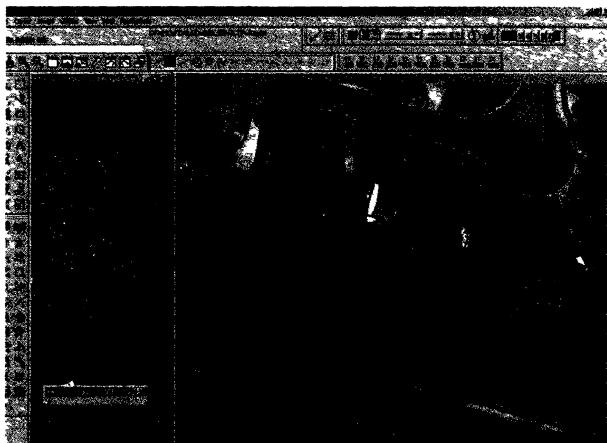


Рис. 7.4. Вікно модуля ISSD

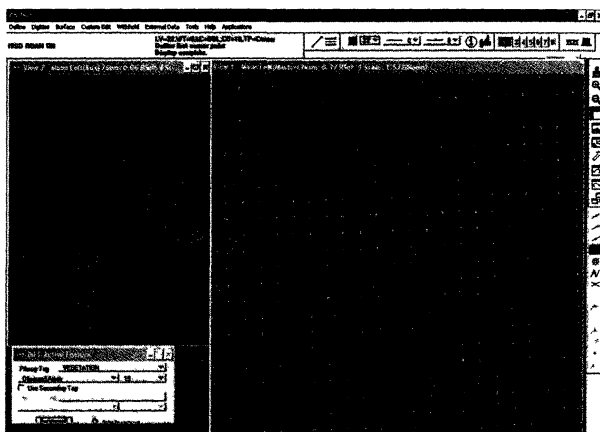


Рис. 7.5. Вікно модуля ISAE

Характерні риси:

- генерування точок у прийнятій системі координат для моделі;
- опрацювання зображень чорно-білих, кольорових, аеро- та космічних;
- додатковий інтерфейс до зручного виконання процесів включення і перетворення даних;
- зручні алгоритми вимірювання;
- використання існуючих елементів ЦМР для підвищення ефективності програмного модуля;
- використання технології Symmetric Multiprocessing для максимального використання апаратних засобів;
- епіпольярне перетворення “на ходу”;
- наявність механізмів протидії “пороговому” ефекту.

7.2. Технологія побудови мереж аеротріангуляції з цифрових знімків

У кінці XX століття аналітичну аерофототріангуляцію майже повністю замінено іншим підходом, який в літературі часто називають цифровою аеротріангуляцією. На це вплинули такі істотні зміни: по-перше, заміна вимірювального засобу – замість стереокомпаратора використовується комп'ютер; по-друге, вихідним матеріалом замість фотознімка є цифровий знімок.

Це спричинило кардинальні зміни в технологічних процесах, оскільки стало можливим виконувати вимірювальні операції в автоматичному режимі. Проте алгоритми фототріангуляційних побудов (метод в'язок, метод моделей тощо) залишались такими самими, як при аналогічній фототріангуляції.

Аеротріангуляція цифрова (АТЦ) об'єднує такі процеси:

1. Складання проекту мережі АТЦ.
2. Підготовчі роботи.
3. Вимірювальні роботи.
4. Обчислення (побудова) мережі АТЦ.
5. Аналіз отриманих результатів.

Відзначимо кілька особливих рис, які істотно впливають на побудову АТЦ. Передусім це використання зафіксованих у польоті лінійних (за допомогою GPS) та кутових (з використанням INS) елементів зовнішнього орієнтування знімків. За їхньої наявності істотно скорочується необхідна і достатня кількість опорних точок, тобто зменшуються обсяги польових робіт.

Інший фактор стосується режиму стереоспостереження: він може бути ручним, напівавтоматичним або ж автоматичним. Вибір методики залежить від якості та фактури цифрових знімків, наявності потрібного програмного забезпечення. За автоматичного режиму оператор звільняється від копіткої камеральної роботи, а саме вимірювання стає швидшим і дешевшим.

Проект АТЦ складають на комп'ютері, і, по суті, це схема (рис. 7.6) з розміщенням у стандартних зонах таких точок:

- опорних точок (планово-висотних або висотних);
- контрольних точок (теж планово-висотних або висотних);
- центрів знімків з підписаними їхніми номерами;
- зв'язкових точок (у зонах потрібного перекриття);
- точок у міжмаршрутних перекриттях;
- характерних точок рельєфу або місцевості (як правило, їх вибирають в ручному режимі).

Підготовчі роботи передбачають:

- введення загальних для всього маршруту (блока) спільних даних (елементи внутрішнього орієнтування, дані калібрування камери, елементи зовнішнього орієнтування);
- введення цифрових зображень у необхідному форматі, який сприймається програмним забезпеченням;

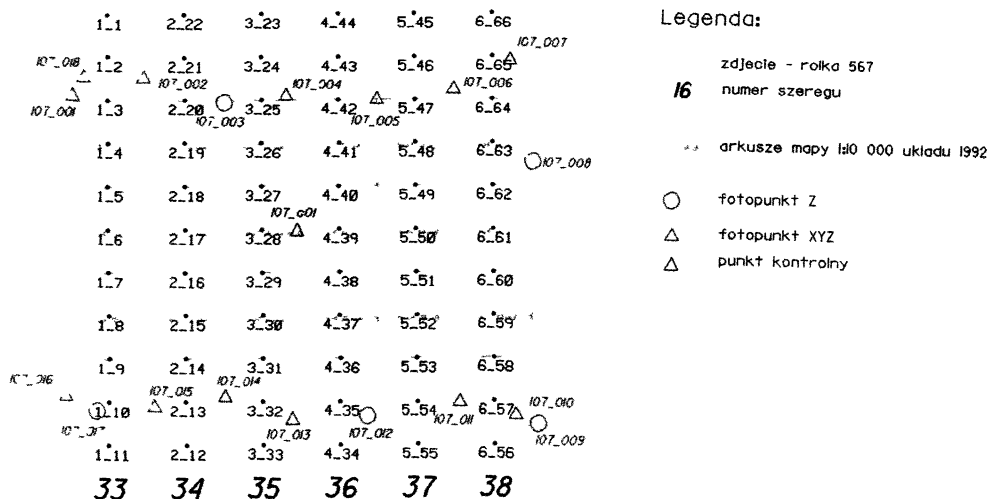


Рис 7.6. Схема блока цифрової аеротриангуляції


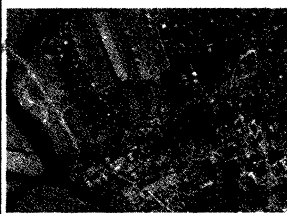
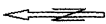
- введення каталогу координат опорних і контрольних точок;
- введення (у разі необхідності) допусків як параметрів оцінки якості побудови АТЦ;
- вибір ручного або автоматичного режиму для вимірювальних операцій.

Вимірювальні роботи:

- виконання внутрішнього орієнтування для кожного знімка у ручному, напівавтоматичному або автоматичному режимах;
- вимірювання зв'язкових точок в одному з вищезазначених режимів;
- вимірювання опорних (рис. 7.7) і контрольних точок (переважно у ручному режимі);
- вимірювання (за необхідності) характерних та особливих точок рельєфу та місцевості.

Обчислювальні роботи ведуться в автоматичному режимі з виданням інформації про відбраковані точки на кожному з етапів фотограмметричних побудов, про оцінку точності (середньої квадратичної похибки одиниці ваги, ср. кв. похибок визначених елементів зовнішнього орієнтування тощо). У разі наявності контрольних точок здійснюється обчислення ср. кв. похибок за координатами цих точок, що є об'єктивною оцінкою якості фотограмметричних побудов.

Аналіз отриманих результатів виконується фотограмметристом на підставі отриманих ср. кв. похибок, векторної діаграми похибок на контрольних точках, уточнених елементів зовнішнього орієнтування (за даними з GPS та INS). У разі необхідності вводяться необхідні корективи, і побудова АТЦ повторюється. У разі якісного виконання видрукований та збережений каталог координат точок мережі та

PROJEKTOWANA LOKALIZACJA PUNKTU OSNOWY FOTOGRAMETRYCZNEJ									
Lokalizacja: Wępowództwo: maczewska Powiat: Wągrow Gmina: Budyšin Miejscowość: Kąkolów Ul. nr domu: ul. Kłosa	Opis położenia punktu: Na stoku wznoszącego się	Uwagi:	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: right;">Nr arkusza</td><td style="text-align: left;">N-34-127</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">Nr lokalizacji</td><td style="text-align: left;">107_013</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">Rok pomiaru</td><td style="text-align: left;">2004</td></tr> </table>	Nr arkusza	N-34-127	Nr lokalizacji	107_013	Rok pomiaru	2004
Nr arkusza	N-34-127								
Nr lokalizacji	107_013								
Rok pomiaru	2004								
		<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); font-size: small; margin-right: 5px;">Zaplecze pomiaru nr 107_013</div>  </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  </div>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center; font-size: small;">Projektowana ogólna lokalizacja położenia punktu</th> </tr> <tr> <td style="width: 50%; font-size: x-small;">Wymiary:</td> <td style="width: 50%; font-size: x-small;">Prosta</td> </tr> <tr> <td style="font-size: x-small;">Specyfikacja:</td> <td style="font-size: x-small;">12-20-1000</td> </tr> </table>	Projektowana ogólna lokalizacja położenia punktu		Wymiary:	Prosta	Specyfikacja:	12-20-1000
Projektowana ogólna lokalizacja położenia punktu									
Wymiary:	Prosta								
Specyfikacja:	12-20-1000								
Projektowana szczegółowa lokalizacja położenia punktu									

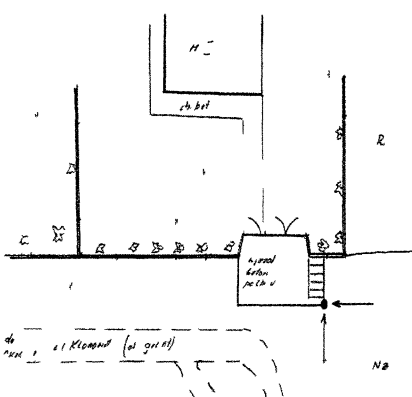

OPIS TOPOGRAFICZNY PUNKTU OSNOWY FOTOGRAMETRYCZNEJ																						
<div style="text-align: center; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">PPG</div> <div style="font-size: x-small; text-align: center;">PRZEDSIĘWZIENIOWO POMIAROWO GEODEZYJNYCH SPÓŁKA z o.o. WARSZAWA</div>	Lokalizacja: Wępowództwo: maczewska Powiat: Wągrow Gmina: Budyšin Miejscowość: Kąkolów Ul. nr domu: ul. Kłosa	Opis położenia punktu: Na stoku wznoszącego się	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: right;">Nr arkusza</td><td style="text-align: left;">N-34-127</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">Nr lokalizacji</td><td style="text-align: left;">107_013</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">Rok pomiaru</td><td style="text-align: left;">2004</td></tr> </table>	Nr arkusza	N-34-127	Nr lokalizacji	107_013	Rok pomiaru	2004													
Nr arkusza	N-34-127																					
Nr lokalizacji	107_013																					
Rok pomiaru	2004																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="3" style="font-size: x-small;">PUNKT 1002</th> <th colspan="3" style="font-size: x-small;">PUNKT 1003</th> </tr> <tr> <td style="width: 33%; text-align: center;">X</td> <td style="width: 33%; text-align: center;">Y</td> <td style="width: 33%; text-align: center;">Z</td> <td style="width: 33%; text-align: center;">X</td> <td style="width: 33%; text-align: center;">Y</td> <td style="width: 33%; text-align: center;">Z</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6 5074.48</td> <td style="text-align: center;">648 48.34</td> <td style="text-align: center;">81.02</td> <td style="text-align: center;">68 0078.77</td> <td style="text-align: center;">7510477.82</td> <td style="text-align: center;">81.02</td> </tr> </table>		PUNKT 1002			PUNKT 1003			X	Y	Z	X	Y	Z	6 5074.48	648 48.34	81.02	68 0078.77	7510477.82	81.02			
PUNKT 1002			PUNKT 1003																			
X	Y	Z	X	Y	Z																	
6 5074.48	648 48.34	81.02	68 0078.77	7510477.82	81.02																	
Szczegółowa lokalizacja położenia punktu		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center; font-size: x-small;">Wydawca: PPG Sp. z o.o. Warszawa</th> </tr> <tr> <td style="width: 50%; font-size: x-small;">Specyfikacja:</td> <td style="width: 50%; font-size: x-small;">Roman Kowalski</td> </tr> <tr> <td style="font-size: x-small;">6-16-2004</td> <td style="font-size: x-small;">107_013</td> </tr> </table>		Wydawca: PPG Sp. z o.o. Warszawa		Specyfikacja:	Roman Kowalski	6-16-2004	107_013													
Wydawca: PPG Sp. z o.o. Warszawa																						
Specyfikacja:	Roman Kowalski																					
6-16-2004	107_013																					

Рис 7.7 Розміщення опорної точки (плановане) та зарис вибраної опорної точки

елементів зовнішнього орієнтування для кожного знімка приймається для подальшого використання

Нижче подається (як приклад) виконання АТЦ фірмою ТМСЕ (Краків) на цифровій станції від INTERGRAPH

1 Проект блочної АТЦ

При виконанні АТЦ з елементами зовнішнього орієнтування, зареєстрованими в польоті, кількість опорних точок є меншою порівняно з класичною фототріангуляцією. Розміщення опорних точок приймається таким

– у кутах блока розміщуються по дві опорні точки (не по одній, як рекомендовано класичною схемою), що є дуже важливим для точності і надійності побудови мереж,

- на кінцях маршрутів теж розміщують точки, це показано на рис 7 6,
- контрольні опорні точки розташовують всередині блока

На рис 7 6 подано блок з 66 знімків. У мережі використано опорні точки, не замарковані перед польотом, а натуральні контурні точки. Частину опорних точок, які важко було розпізнати на місцевості, використано як висотні опорні точки (а не планово-висотні). На кожну опорну точку виготовлено зарис. Приклад такого зарису показано на рис 7 7

2 Внутрішнє орієнтування

У комп'ютер імпортуються такі дані

- фокусна віддаль аерокамери,
- координати головної точки,
- параметри калібрування камери, передусім ті, які моделюють дисторсію,
- координати координатних позначок

На рис 7 8 подано вікно з даними про камеру. Дисторсія подана як середнє значення в інтервальному діапазоні від точки автоколімації (калібрування камери

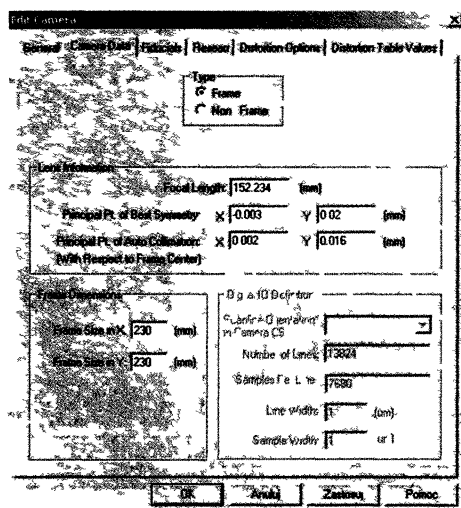


Рис 7 8 Вікно з даними про знімальну камеру

виконувалось на автоколіматорі. (Цей спосіб вивчається в курсі “Аерокосмічні знімальні системи”). Камера має вісім координатних позначок (рис. 7.9).

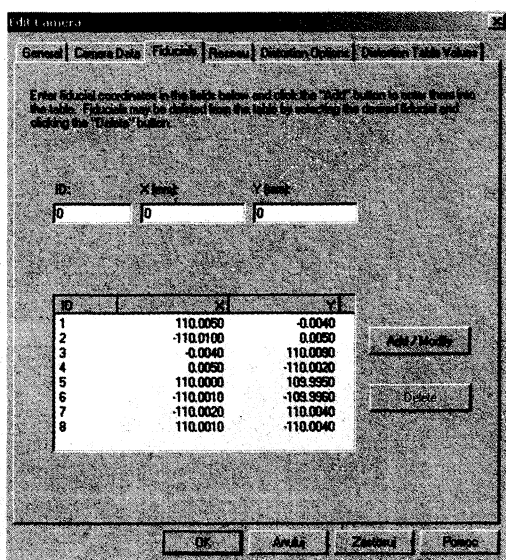


Рис. 7.9. Координати 8-координатних позначок на знімку

У вікні рис. 7.10 показано дані про радіальну дисторсію.

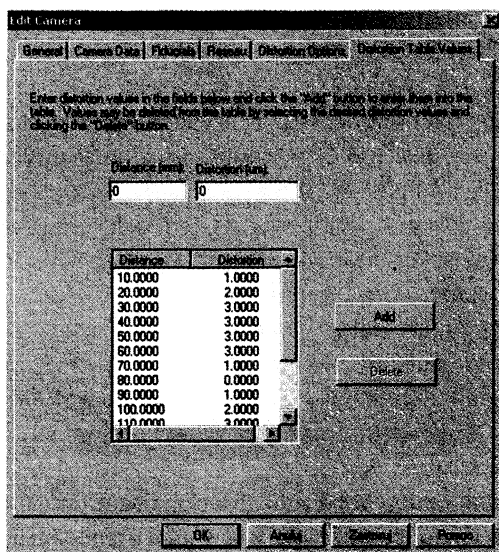


Рис. 7.10. Дані про дисторсію камери

Вимірювання координатних позначок (рис. 7.11), як правило, ведеться автоматично. Проте оператор повинен вручну виконати наведення хоча би на одну позначку, а інші відшуковуються та вимірюються в автоматичному режимі.

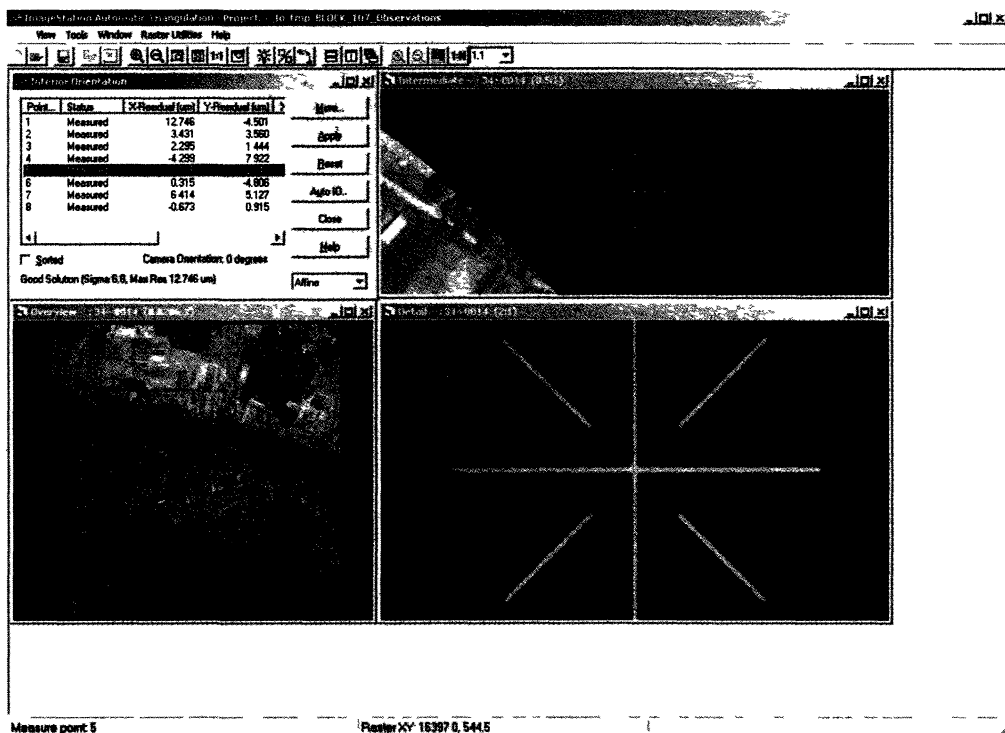


Рис. 7.11. Вимірювання координатної позначки

Для восьми позначок використовується афінне перетворення для виконання внутрішнього орієнтування. При скануванні знімків з пікселем 16 мкм точність орієнтування становить близько 10 мкм. При більших значеннях необхідно повторити сканування або повторно виконати калібрування камери.

3. Вимірювальний процес в аеротріангуляції автоматичний.

Використання кореляції ідентичних точок на кількох знімках істотно пришвидшує вимірювальний процес в автоматичному режимі, а програма дає змогу шукати такі точки на 6 або більше знімках. Знайдені ідентичні точки перевіряються на точність: обчислюють похибки на підставі різниць плоских прямокутних координат із суміжних знімків, а виправлення виконують на підставі вимірювань, які здійснює оператор у ручному режимі.

У разі застосування методу кореляції до вимірювань опорних точок отримують, як показав досвід, значно кращі результати, ніж у разі стереовимірювань оператором.

На рис. 7.12 подано приклад вимірювання контрольної опорної точки, яка зображена на чотирьох знімках.

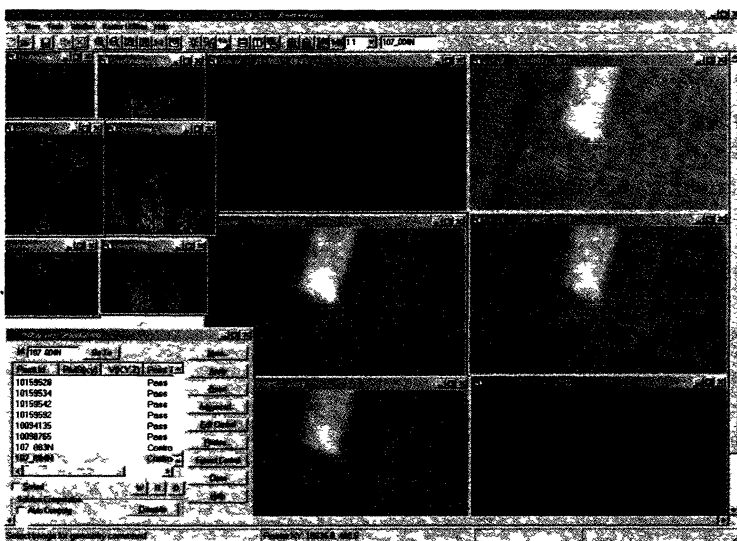


Рис 7 12 Вимірювання контрольної точки, що зобразилась на чотирьох знімках

На рис 7 13 показано схему (вікно) розміщення зв'язкових точок у блоці знімків. Червоним кольором показано точки, що належать одному маршруту, а синім – ті, що розташовані у зонах поперечного перекриття.

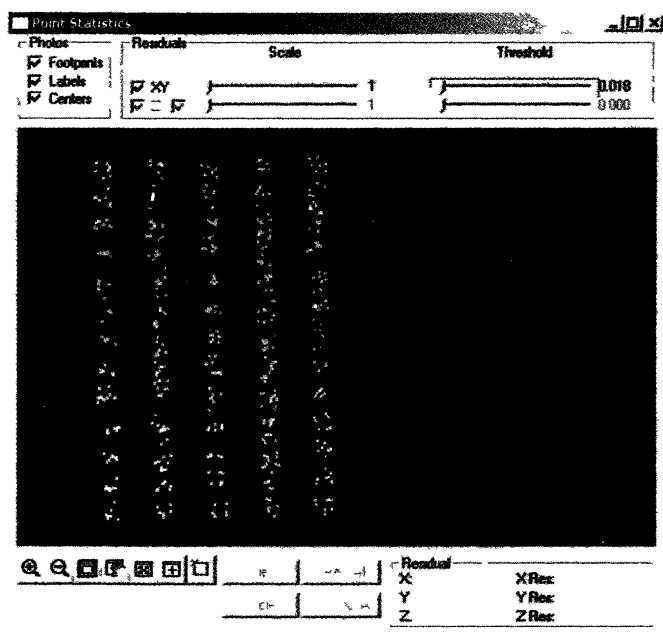


Рис 7 13 Вікно з розміщенням зв'язкових точок у блочній мережі

4. Вирівнювання АТЦ.

В основу блочної АТЦ покладено метод в'язок з використанням даних GPS.

Вихідними даними для цього процесу є: фотограмметричні вимірювання для зв'язкових точок та точок міжмаршрутних перекриттів, просторові координати опорних точок та їхні плоскі прямокутні координати на знімках, параметри аерокамери, просторові координати центрів проекцій.

На рис. 7.14 наведено вікно, в якому показано:

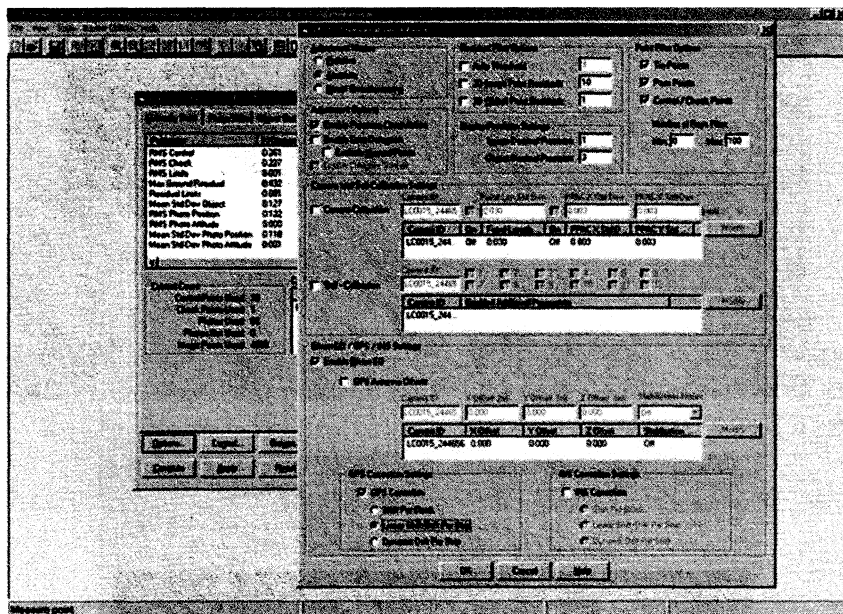


Рис. 7.14. Вікно з даними для вирівнювання цифрової аеротріангуляції

- визначені елементи зовнішнього орієнтування для кожного знімка;
- просторові координати кожної зв'язкової точки та точність їхнього отримання;
- використані виміряні в польоті за допомогою GPS;
- для кожного маршруту визначено дрейф і штифт GPS-вимірів.

5. Аналіз результатів.

Аналіз здійснюється на підставі:

- порівняння очікуваних похибок вимірювань з їхніми середніми значеннями, отриманими після вирівнювання;
- відхилень фотограмметричних і геодезичних координат на опорних точках;
- відхилень у координатах на контрольних точках (які не брали участі у вирівнюванні).

Контроль виконується як на підставі цифрових даних (рис. 7.15), так і з аналізу еліпсів похибок, показаних у вікні (рис. 7.16).

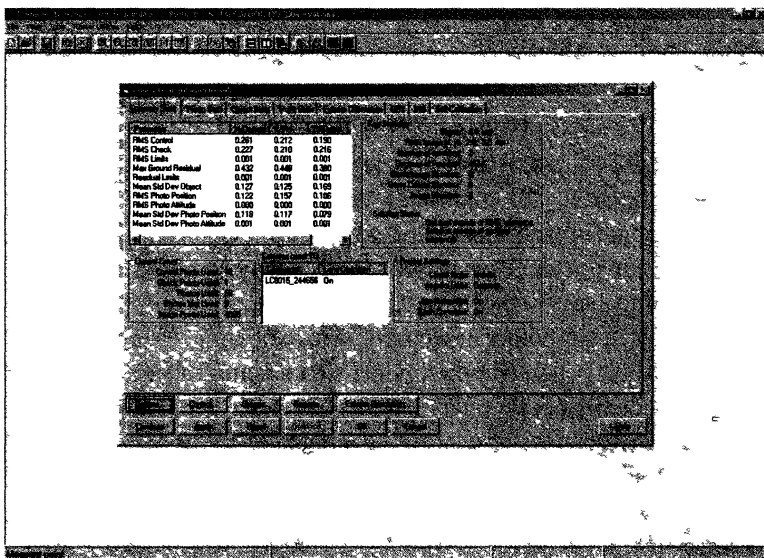


Рис 7 15 Цифрові дані для аналізу, точності побудови АТЦ

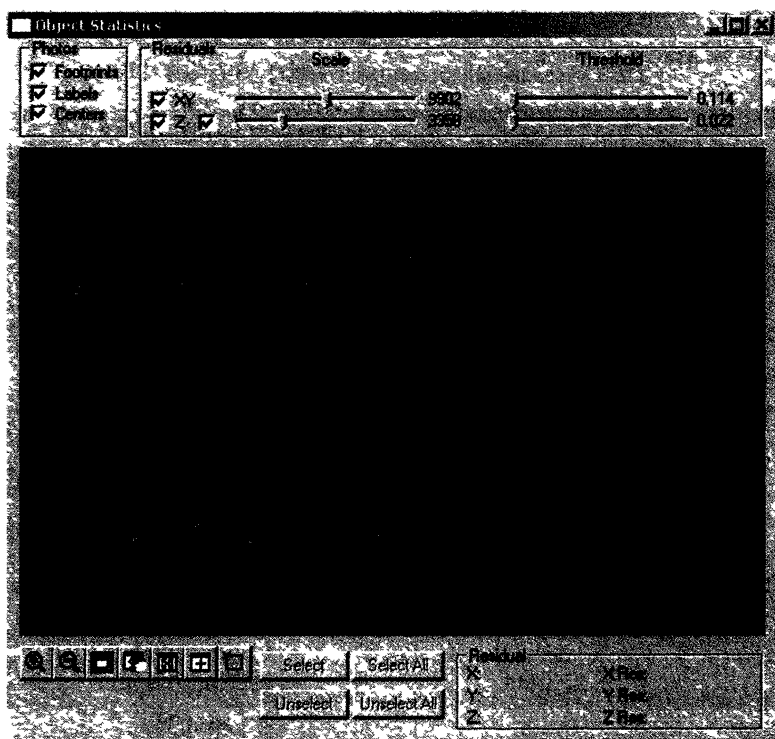


Рис 7 16 Вектори похибок на опорних точках

Тут вектори відхилень у координатах показано стрілками (напрям і довжина), а відхилення зображено колами.

7.3. Технології взаємного та абсолютного орієнтування моделі

У сучасних технологічних лініях опрацювання цифрових знімків (стереопар) ці задачі як окремі незалежні операції втратили ту домінуючу позицію, яку вони займали в технологіях аналогової та аналітичної фотограмметрії. Проте в програмних комплексах для ЦФС практично кожен виробник не може обійтися без них. Це пов'язано передусім з тим, що в практиці фотограмметричних робіт може виникнути потреба побудувати модель об'єкта у межах однієї стереопари. Тоді логічним є шлях виконання взаємного орієнтування, абсолютного орієнтування та визначення просторових координат точок з прямої фотограмметричної засічки (проте студенти повинні пам'ятати, що альтернативою цьому є використання умови колінеарності).

Задача взаємного орієнтування була доволі важливою ланкою у фототріангуляції методом моделей (див. п. 6.3). Ще одне її практичне застосування – у цифровій фотограмметрії, коли перед розв'язанням задачі пошуку ідентичних точок (на підставі аналізу кореляції оптичних щільностей) здійснюється взаємне орієнтування, тобто визначається, чи усувається поперечний паралакс, і в такий спосіб задача двовимірної кореляції зводиться до одновимірної кореляції. А це спрощує і пришвидшує пошук ідентичних чи зв'язкових точок.

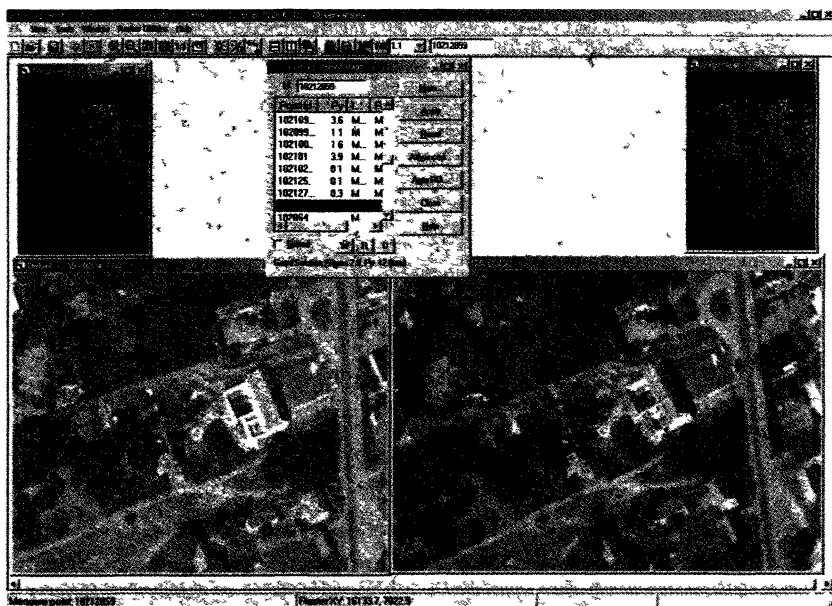


Рис 7 17 Вікно у програмі Intergraph для взаємного орієнтування без використання стереоефекту

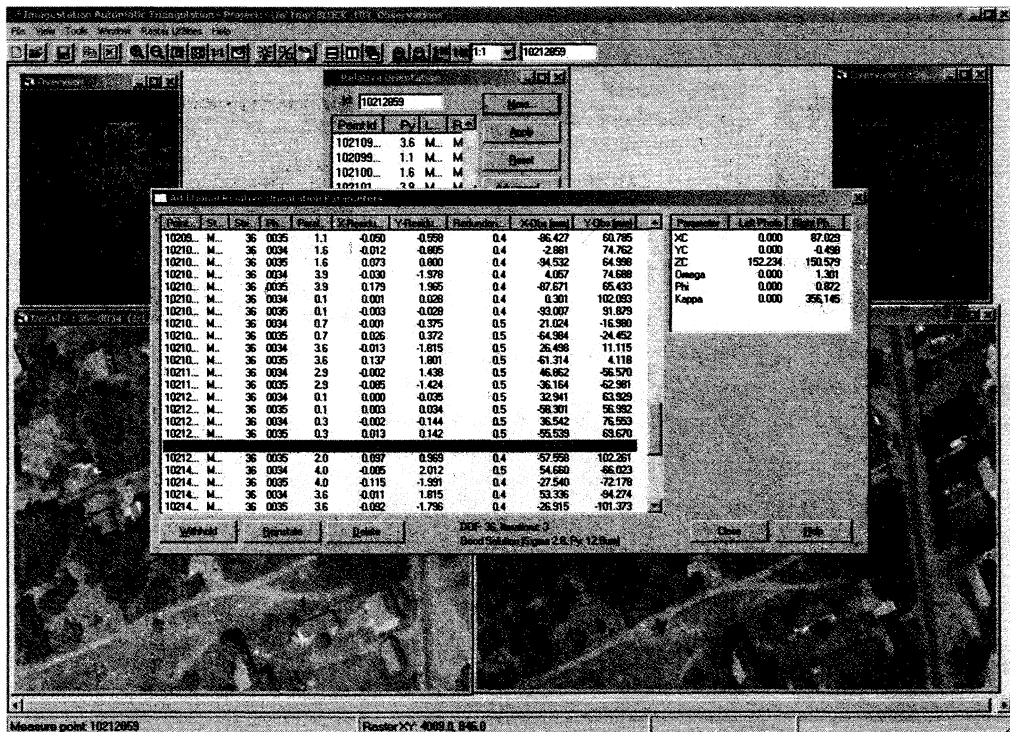


Рис. 7.18. Вікно з даними про визначення ЕВО

Як відомо, для визначення елементів взаємного орієнтування (ЕВО) необхідно виміряти координати і паралакси б і більше точок стереопари. Якщо в аналітичному та аналоговому способах вимірювання виконували тільки стереоскопічно, то на ЦФС це можна виконувати і стерео-, і монокулярно.

На рис. 7.17 показано вимірювання без використання стереоефекту.

Після вимірювання певної кількості точок вмикається обчислювальна програма і отримують елементи взаємного орієнтування у базисній або лінійно-кутовій системах (див. п. 2.6.2).

Програма кожного разу видає інформацію про залишкові поперечні паралакси, про точність розв'язання задачі, порівнює їх з допусками і видає або зберігає обчислені елементи орієнтування (рис. 7.18).

Для розв'язання задачі абсолютного орієнтування моделі використовують підходи, описані в п. 2.7.6. На стереопарі треба мати 3–4 опорні точки, і для них виконують стереовимірювання. З каталогу координат вибирають абсолютні (геодезичні) координати цих точок.

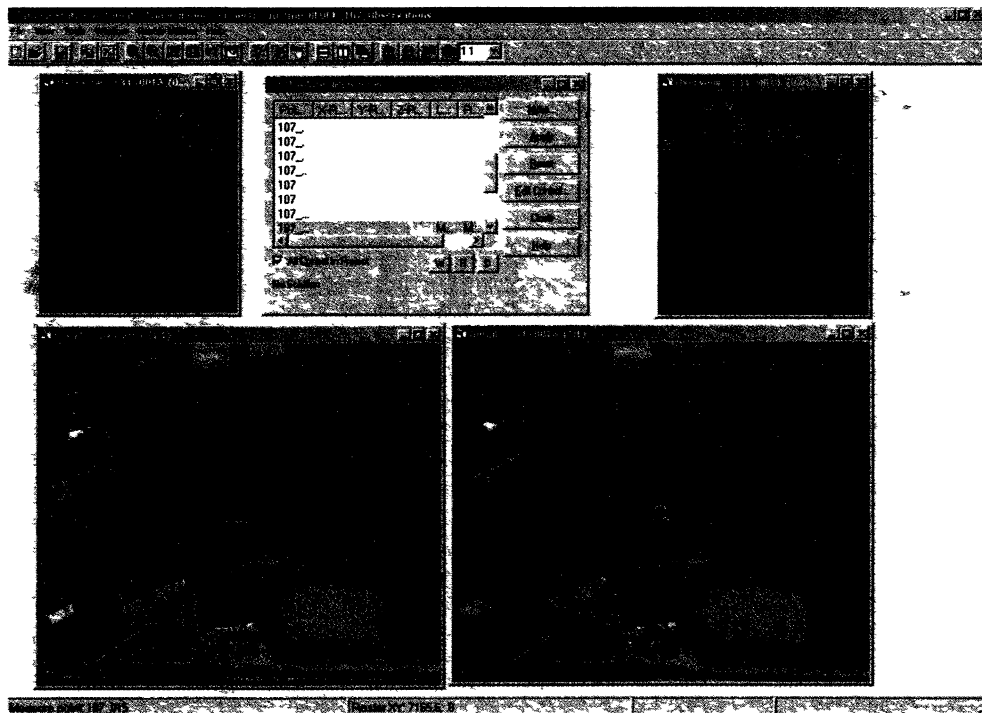


Рис 7 19 Вікно, де вказана опорна точка
для виконання абсолютного орієнтування моделі

На рис 7 19 показано стереопару і одну з таких опорних точок. Після завершення вимірювального процесу обчислюють 7 елементів абсолютного орієнтування (в деяких випадках кінцевим результатом є 12 елементів зовнішнього орієнтування обох знімків, що творять стереопару (див п 2 6)

Після виконання абсолютного (зовнішнього) орієнтування моделі можна розпочинати збирання елементів ситуації чи рельєфу (векторизації моделі)

7.4. Технології побудови цифрової моделі рельєфу (ЦМР) з цифрових аерознімків

Технологічною схемою побудови ЦМР передбачено виконання таких етапів:

- підготовчі роботи і контроль вихідних даних;
- збирання даних;
- контроль якості;
- візуалізація.

Нижче подано, як приклад, виконання побудови ЦМР на цифровій станції від INTERGRAPH.

Підготовчі роботи включають приготування знімків та стереопар, відбір необхідних даних з аеротріангуляції. На цьому самому етапі виконується контроль всіх вихідних даних.

Елементами контролю є:

- виміри контрольних точок на всіх стереопарах;
- контроль правильного стикування сусідніх стереопар;
- контроль якості зображень (наявність хмар, дефектів тощо);
- контроль покриття всієї території стереопарами.

Результатом контрольних дій є рапорт до осіб, що приготували аерознімки та побудували мережу аеротріангуляції, а також допуск до виконання вимірювальних робіт з побудови ЦМР.

Збирання даних виконується на ЦФС і полягає в отриманні:

- сітки точок, розміщених регулярно, GRID (доволі часто до такої сітки додаються точки з нерегулярним розміщенням, для підвищення точності ЦМР);
- скелетних ліній та інших ліній, що визначають особливості рельєфу поверхні (обриви, насипи, канали, рови тощо);
- висотних точок (пікетів), що відображають характерні місця поверхні (вершини, сідловини, западини тощо);
- елементів гідрології – водостоки, ріки (що відрисовуються двома береговими лініями), водойми (зокрема озера, ставки);
- елементів інфраструктури (мости, віадуки, труби для перепускання води тощо);
- границь тих частин поверхні, для яких не можна отримати потрібну точність побудови ЦМР з об'єктивних причин (наприклад, територія покрита високою рослинністю).

Збирання даних може здійснюватись у режимі автоматичному, напіваавтоматичному або ручному. Вибір методу залежить від кількох факторів, серед яких домінують необхідна точність побудови ЦМР, тип території, ступінь забудови та покриття рослинами чи деревами. Великий вплив мають фактори часу та коштів. Відомо, що ручний збір є істотно дорожчим від автоматичного отримання даних, але в першому випадку точність є вищою.

У *методиці автоматичного збирання даних* використовується спеціальна програма (наприклад, ImageStation Automatic Elevation в комплексі від INTERGRAPH).

Побудована ЦМР візуалізується на екрані у вигляді регулярної сітки з певним кроком, із вказанням висот пікетних точок. Цей процес є керованим і “наглядовим”. Ключове значення тут має підбір параметрів побудови ЦМР, які залежать від типу місцевості та масштабу картографування. Кожного разу необхідне тестування заданих параметрів, щоб досягти оптимальних результатів.

Нижче подано рисунки, які ілюструють цей процес (рис. 7.20–7.28).

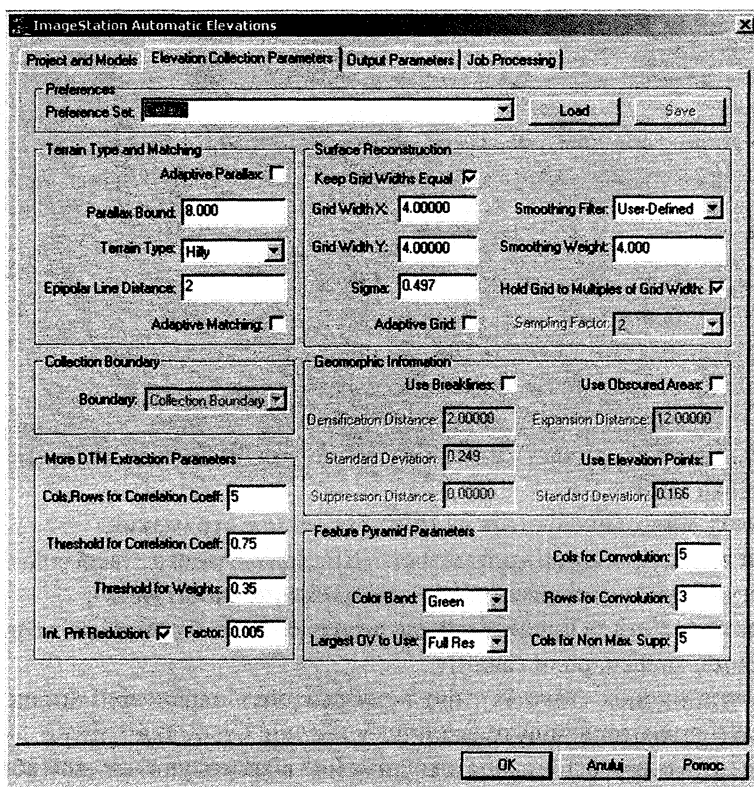


Рис. 7.20. Вікно програми Intergraph ImageStation Automatic Elevation – встановлення параметрів будови ЦМР

За напівавтоматичною методикою збирання даних використовують побудовану автоматично ЦМР з подальшою корекцією отриманих даних, і цей процес виконує оператор на ЦФС. Під час такого опрацювання помилкові пікети усуваються або ж їхні висоти виправляються з тим, щоб вони відповідали заданій точності. Додатково оператор відрисовує елементи гідрології та структурні лінії рельєфу.

Ручне збирання даних виконує оператор на ЦФС. Здійснюється вимірювання всіх елементів ЦМР у такій послідовності: елементи гідрології, елементи інфраструктури, структурні лінії, пікети у вигляді регулярної сітки, пікети у характерних місцях рельєфу, границі (обриси) учасників з пониженою точністю вимірювань.

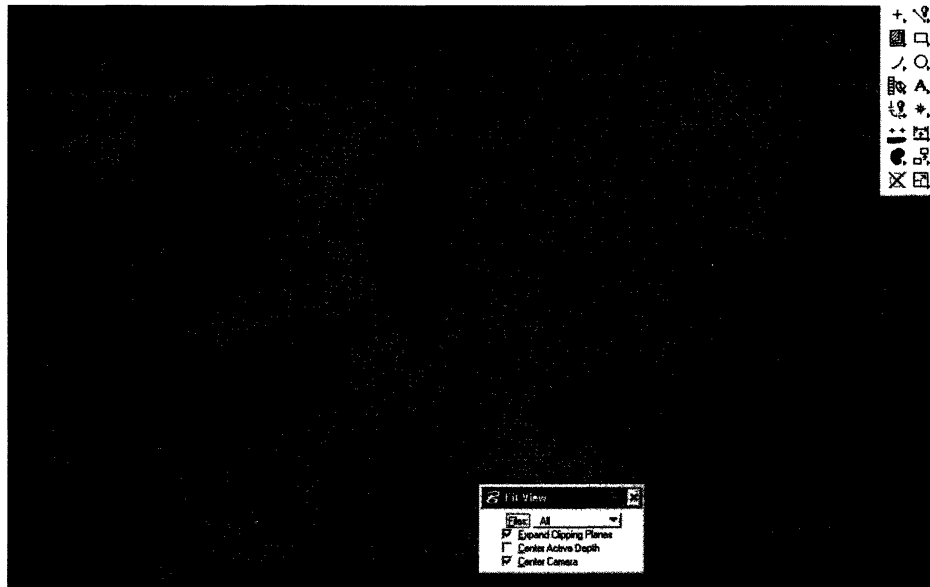


Рис. 7.21. Результат автоматичної побудови ЦМР – сітка точок з регулярним розташуванням. Рожевим кольором позначені пікети з високою ймовірністю недопустимих похибок



Рис. 7.22. Регулярна сітка, отримана автоматично, візуалізована на стереомоделі

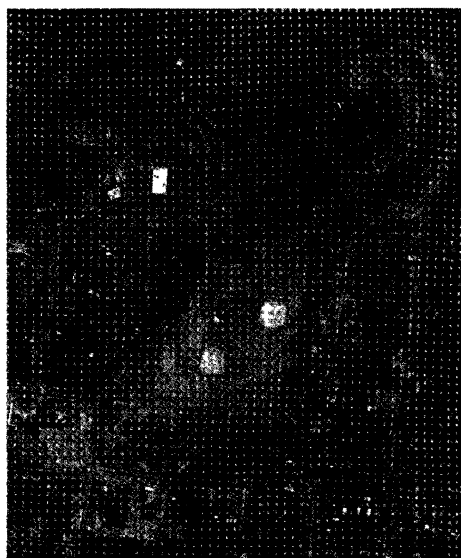


Рис. 7.23. Сітка точок, побудована автоматично, візуалізована на моделі та доповнена такими потрібними елементами, як дороги і гідрологія

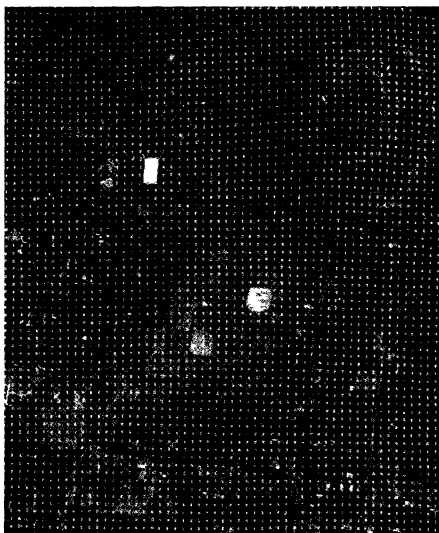


Рис. 7.24. Сітка точок, побудована автоматично, візуалізована на стереомоделі, доповнена дорогами та гідрологією, а також скелетними лініями (тобто всіма елементами, що вимагається для ЦМР)

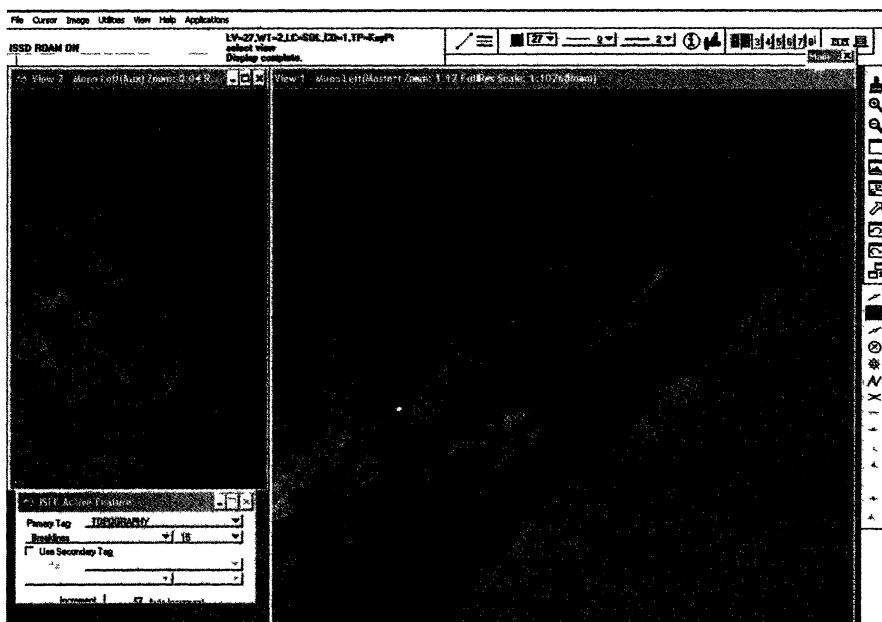


Рис.7.25. Ручне вимірювання ЦМР – гідрологія (вікно на ЦФС)

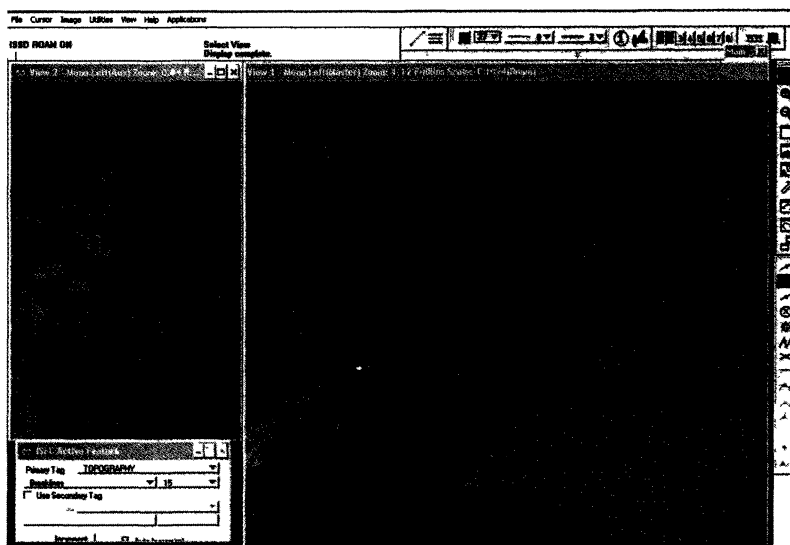


Рис 7 26 Ручне вимірювання ЦМР – гідрологія та скелетні лінії (вікно на ЦФС)

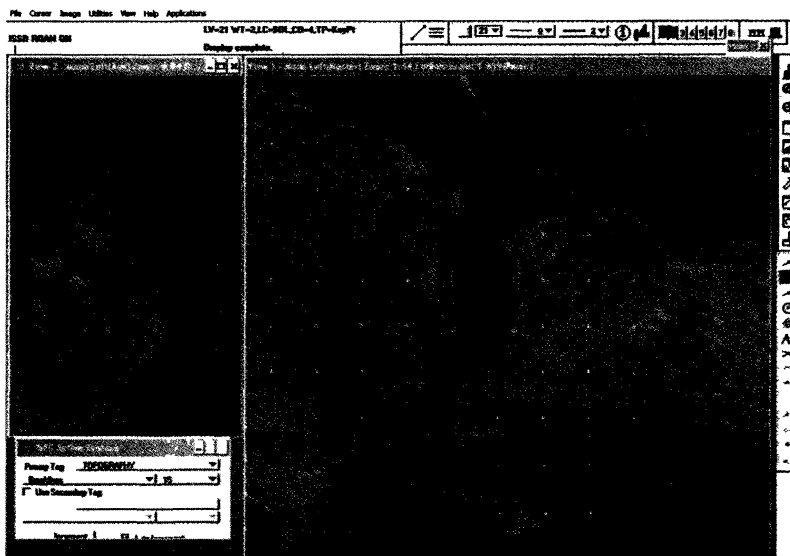


Рис 7 27 Ручне вимірювання ЦМР – гідрологія, скелетні лінії, регулярна сітка пикетних точок, точки на лініях та об'єктах гідрології опущені
Це вигляд вікна на ЦФС



Після закінчення збирання даних здійснюється контроль якості за такими елементами:

- контроль топологічний; контролюється правильність атрибутивної частини всіх елементів, перетинів, з'єднань, понижень;

- візуальний контроль даних на стереомоделі: ЦМР, візуалізована у вигляді горизонталей, спостерігається стереоскопічно – горизонталі повинні лежати на поверхні моделі;

- контроль на підставі контрольних опорних точок, висоти яких визначені незалежно (польові роботи, аеротріангуляція, окремі вимірювання).

Як приклад, у табл. 7.1 подано результати оцінки побудови ЦМР з використанням контрольних точок.

Рис. 7.28. Візуалізація ЦМР у вигляді горизонталей

Таблиця 7.1

Статистичні дані з оцінки ЦМР за контрольними точками

Етап	Номенклатура карт 1:100 000	Кількість точок ЦМР	Похибка мін., м	Похибка макс., м	Похибка середня, м
Етап II	N-34-----	845	0,00	0,98	0,23
	N-34	784	0,00	1,28	0,30
Етап III	N-34	3342	0,00	1,45	0,35
	N-34	3041	0,00	1,48	0,39
	N-34	2897	0,00	1,32	0,27
	N-34	3008	0,00	1,46	0,40

На підставі об'єктивної оцінки точності робиться висновок про придатність побудованої ЦМР для подальшого використання або ж про необхідність повторних вимірювань.

Візуалізація може здійснюватись у вигляді:

- горизонталей, які генеруються при заданій висоті перетину рельєфу, відповідно згладжені та доопрацьовані (додані атрибути, берг-штрихи тощо);
- регулярної сітки GRID;
- нерегулярної сітки TIN.

На рис. 7.28 подано приклад візуалізації ЦМР.

7.5.1. Визначення і теоретичні основи

Цифрова ортофотокарта – це растрове зображення, побудоване за вимогами топографічної карти точно визначеного масштабу, часто доповнене умовними знаками та зображенням рельєфу у вигляді горизонталей.

Основною геометричною задачею під час створення ортофотокарти є перетворення знімка (найчастіше центральної проєкції) в ортогональну проєкцію – це зображення у заданому масштабі, вільне від спотворень за кути нахилу знімка та з мінімальними (допустимими) спотвореннями за рельєф місцевості. Цей процес у вітчизняній літературі називають ортотрансформуванням, а в західній – орторектифікацією. Якщо йдеться про виправлення цифрового зображення, то його називають цифровим ортотрансформуванням.

Окрім геометричної задачі, в орторектифікації існує і радіометричне завдання – створеному під час геометричного виправлення новому пікселу необхідно надати оптичну щільність (колір) у такий спосіб, щоб оригінал-знімок та створене ортозображення були максимально ідентичними.

Геометрична інтерпретація побудови ортозображення показана на рис. 7.29.

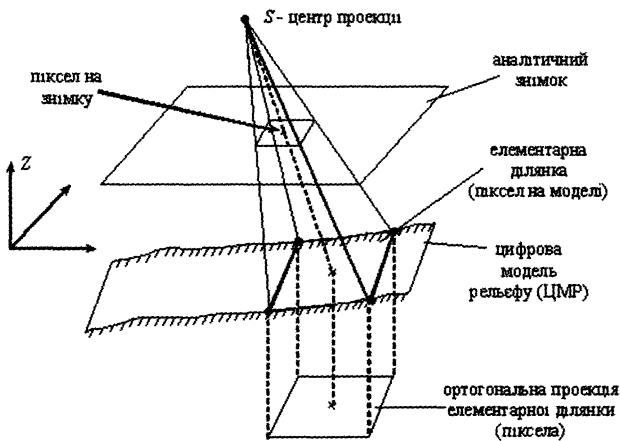


Рис. 7.29. Геометричне пояснення ідеї цифрового ортотрансформування

Вихідними даними для цього процесу є:

- оригінал зображення (знімка) в цифровому вигляді;
- елементи внутрішнього орієнтування знімка;
- елементи зовнішнього орієнтування знімка;
- цифрова модель рельєфу.

На першому етапі будується аналітичний знімок за заданих елементів внутрішнього та зовнішнього орієнтування та просторових координат точок місцевості, взятих з ЦМР. Математичною основою слугує раніше наведене рівняння колінеарності, яке для наочності подано ще раз:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}, \\ y - y_0 &= -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}. \end{aligned} \quad (7.1)$$

де X, Y, Z – координати центра пікселя на ЦМР у вибраній просторовій системі координат;

x_0, y_0, f – елементи внутрішнього орієнтування;

X_s, Y_s, Z_s – лінійні елементи зовнішнього орієнтування;

a_i, b_i, c_i – напрямні косинуси, обчислені за кутовими елементами зовнішнього орієнтування α, ω, χ .

Зазначимо, що вихідним є цифровий знімок, де кожний піксел має координати x_e, y_e ; а у рівняннях (7.1) фігурують плоскі прямокутні координати точки x, y . Їхній взаємозв'язок подано у п. 4.3. Параметри такого переходу є найчастіше коефіцієнтами поліноміальних функцій і є величинами відомими. Саме їх використовують для зворотного переходу (етап другий) від аналітичного знімка (x, y) до цифрового зображення (x_e, y_e) . У літературі рекомендується залежно від типу цифрового знімка використовувати:

- для метричних знімків афінне, білінійне або проєктивне перетворення;
- для неметричних знімків подібне перетворення.

На третьому етапі згенерованому пікселу аналітичного знімка необхідно передати відповідну щільність (колір) від оригінального зображення. Про цю операцію ми згадували у п. 4.6. (англ. “*resampling*”) та вказали на кілька інтерполяційних прийомів визначення оптичної щільності.

На четвертому етапі необхідно виконати “зшивання” окремих ортозображень в єдину картину, яку часто називають мозаїкою. Розбіжності оптичних щільностей на стиках кількох образів усуваються переважно в автоматичному режимі, іноді з втручанням оператора. Визначається лінія, по якій повинні стикуватись сусідні образи та визначається смуга (по ширині), з якої беруться оптичні щільності для опрацювання. Найчастіше за остаточне значення приймається середнє арифметичне із 100 – 200 пікселів, що потрапили в зону опрацювання. Складніші алгоритми дають змогу плавно змінювати оптичну щільність, але їхнє застосування потребує більших затрат машинного часу. Наведений загальний підхід у різних програмах має конкретну реалізацію і не обов'язково повинен повторювати описану вище схему.

Нижче подаємо короткий опис створення цифрової ортофотокарти на ЦФС фірми “Intergraph”.

Вихідні дані беруть з даних проекту (рис 7 30)

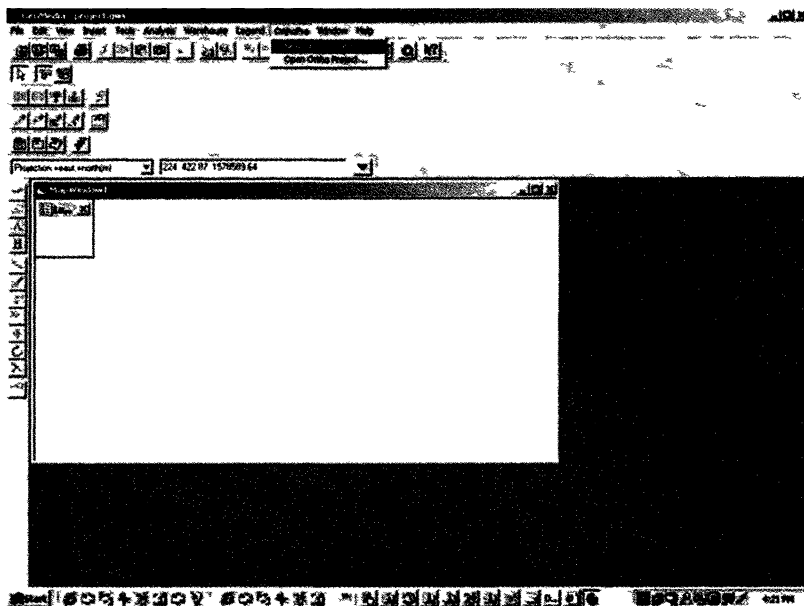


Рис 7 30 Вікно з даними для цілого проекту

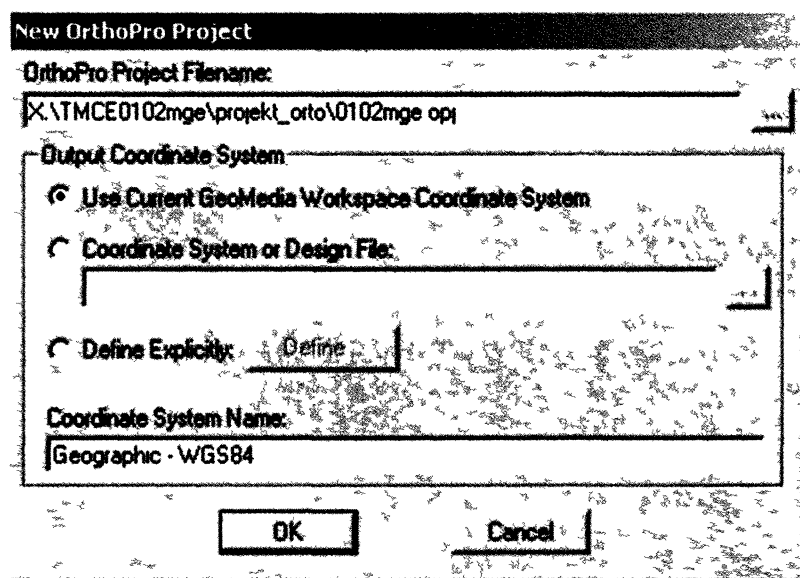


Рис 7 31 Вікно з базовими даними

Далі з вікна, в якому є ярлик OrthoPro Project Filename, вибирають файл, який надалі буде базовим (рис. 7.31).

Окрім назви файла, необхідно вибрати систему для проекту загалом. Є три варіанти:

- Use Current Geomedia Workspace Coordinate System, із вибором системи координат з поточного проекту Geomedia;
- Coordinate System or Design File через вибір файла, з якого ці дані можна отримати;
- Define Explicitly, тобто вручну.

Далі визначаємо:

- рисунок з границями проекту (рис. 7.32);
- розмір пікселя (рис. 7.33);
- розміщення фотограмметричного проекту;
- розташування ЦМР (рис. 7.34);
- формат вихідних файлів: тип компресії, розмір файла (рис. 7.35).

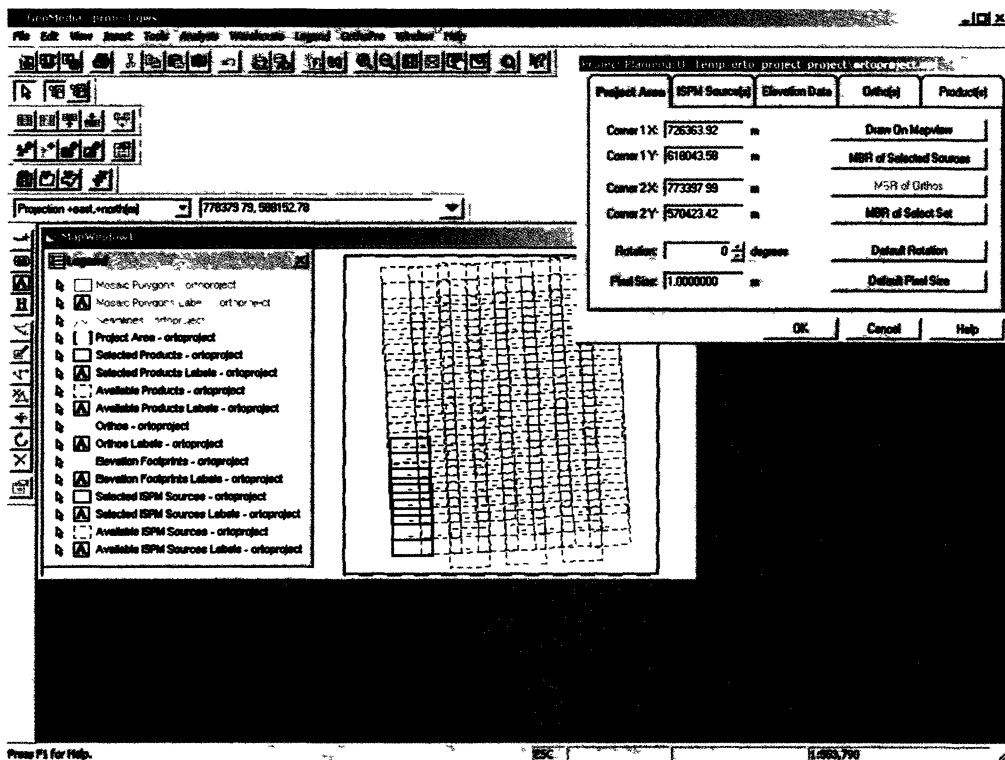


Рис. 7.32. Вихідні дані для ортоперетворень: границі проекту

Project Planning: U:\Temp\orto_project\project\ortoproject.opj

Project Area	ISPM Source(s)	Elevation Data	Ortho(s)	Product(s)
Corner 1 X: 0 m			Draw On Mapview	
Corner 1 Y: 1000.00 m			MBR of Selected Sources	
Corner 2 X: 1000.00 m			MBR of Orthos	
Corner 2 Y: 0 m			MBR of Select Set	
Rotation: 0 degrees			Default Rotation	
Pixel Size: 1.0000000 m			Default Pixel Size	

OK Cancel Help

Рис. 7.33. Вихідні дані для ортоперетворень: розмір пікселя

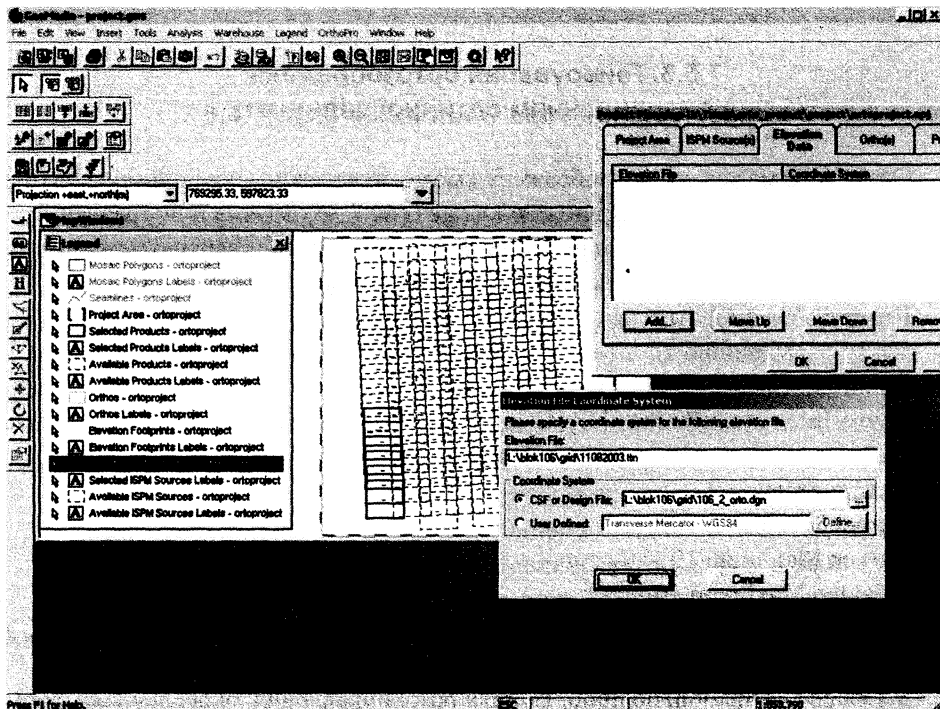


Рис. 7.34. Вихідні дані для ортоперетворень: рисунок розміщення ЦМР

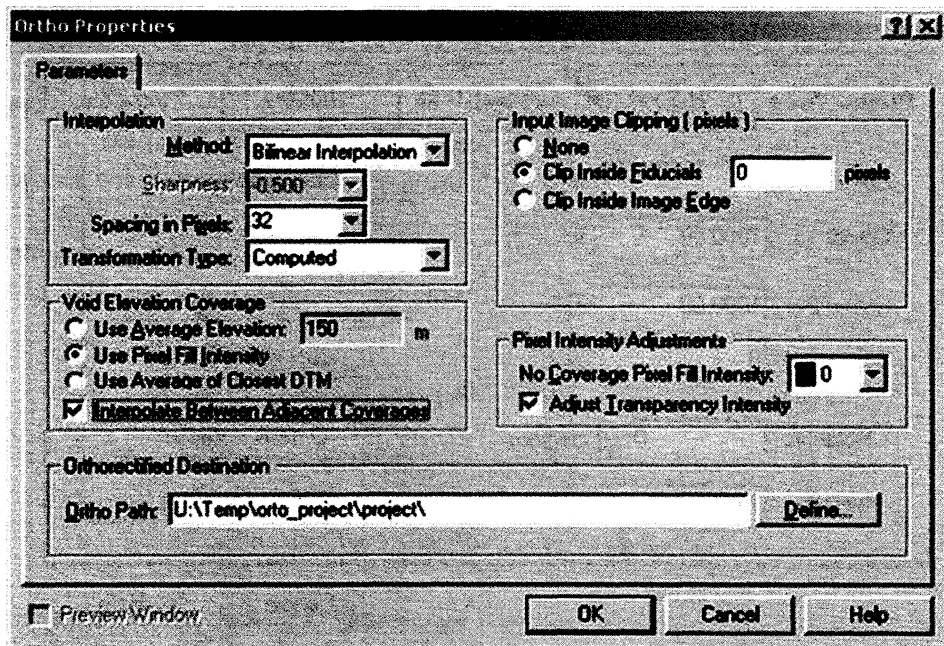


Рис. 7.35. Вихідні дані для ортоперетворень: відомості про вихідні файли

7.5.3. Генерування ортозображень з виправленням оптичної щільності

Оскільки в межах одного зображення може проявлятися нерівномірна оптична щільність, то, використовуючи функцію Dodge (рис.7.36), можна її поправити.

У групі Use Intensities in Range можна встановити нижню і верхню межі оптичної щільності пікселів (відсікання гістограми).

Використовуємо:

1.1.1. Minimum 15

Minimum 240

Група Intensity Influence Limits дає змогу видозмінити темні та світлі області з одночасним зазначенням розміру області, в межах якої виконана ця дія.

Використовуємо:

Kernel Size 33

Darken Maximum 10

Brighten Maximum 10

У групі Pixel Intensity Adjustments можна встановити значення пікселів, які будуть прозорими.

У Dodge Destination, подібно, як і для ортовиправлення, окреслюється формат і місце, де будуть записані результуючі файли.

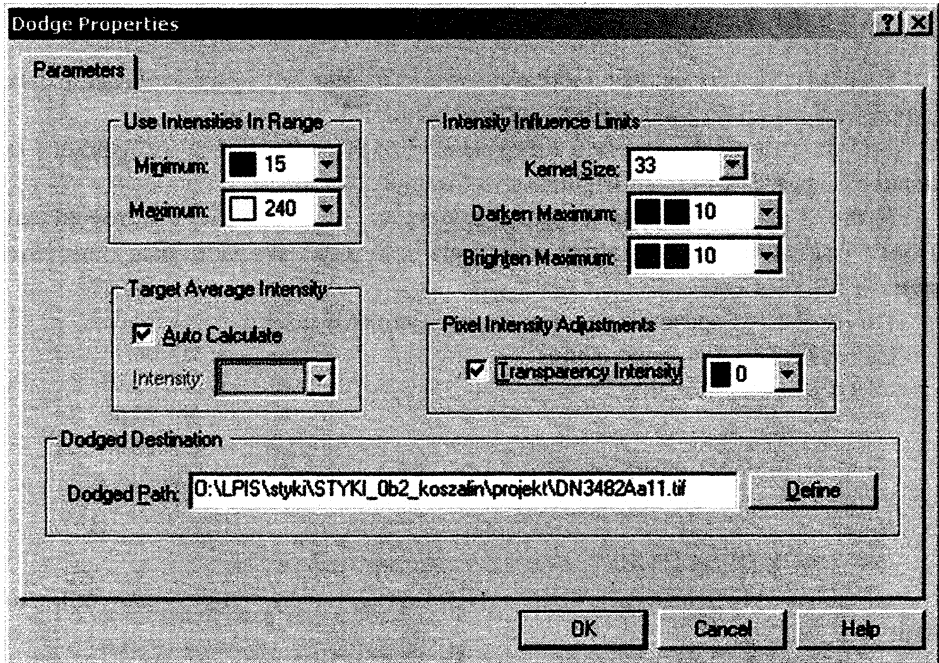


Рис. 7.36. Вікно для корекції оптичної щільності одного знімка

7.5.4. Визначення лінії “склеювання” мозаїки

Найкраще проводити цю лінію так:

а) лінію проводимо в смузі перекриття знімків як у маршруті, так і між маршрутами;

б) для плоскої місцевості бажано, щоб лінія була ототожнена на сусідніх знімках і проходила по узбіччю доріг, по стежках, посередині смуги зелені на автострадах чи інших двосмугових дорогах, на забудованих територіях вздовж вулиць (обходячи автомобілі);

в) якщо рисуємо лінію через велике поле, то лінія повинна бути зигзагоподібною і оминати елементи озеленення, дерева тощо;

г) у лісових масивах чи плантаціях проводимо цю лінію посередині просік;

д) при переході через водні об’єкти лінію необхідно проводити у найвужчому місці, а там, де є куці, лінію проводять перпендикулярно до русла ріки.

Після виконання цієї дії необхідно впевнитись, що всі зображення будуть використані при “склеюванні”.

Також необхідно перевірити, чи полігони, утворені цими лініями, повністю покриваються масивом знімків.

7.5.5. Вирівнювання кольорів для створених ортофотокарт

У межах усього масиву зображень радіометрію ортозображень виправляють так, щоб не було істотних відхилень за тональністю і кольором.

Для цього використовують інструмент IRASC, вибираючи з головного меню аплікацію Contrast Contrast|Brightness та Contrast Gamma.

Якщо ті самі звернення (contrast, brightness, gamma) можна застосовувати до більшості файлів, то доцільно використовувати аплікацію, яка дасть змогу автоматично вирівняти тональність.

Готують файл-зразок із розширенням (наприклад, rec);

CONVERT.REC – назва файла

IRASC OPEN

.....

.....

.....

Де:

SOURCE DIRECTORY – каталог з вихідними файлами;

DESTINATION DIRECTORY – каталог, в якому будуть записані змінні файли;

CONTRAST BRIGHTNESS – c15–12 – це відповідно контраст і яскравість;

IRASC GAMMA – r – c 0.83 – червоний;

IRASC GAMMA – g – c 0.72 – зелений;

IRASC GAMMA – b – c 0.83 – голубий.

Якщо файл-зразок підготовано, то з рівня Microstation задіємо аплікацію mgs. та, вказуємо файл-зразок (рис. 7.37) та вибираємо файли, для яких хочемо виконати радіометричну корекцію (рис. 7.38).

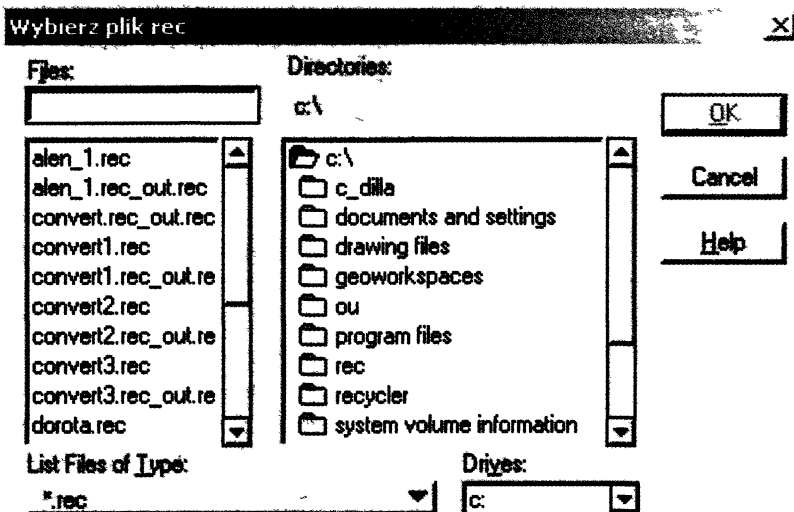


Рис. 7.37. Вікно, де вказуємо файл-зразок

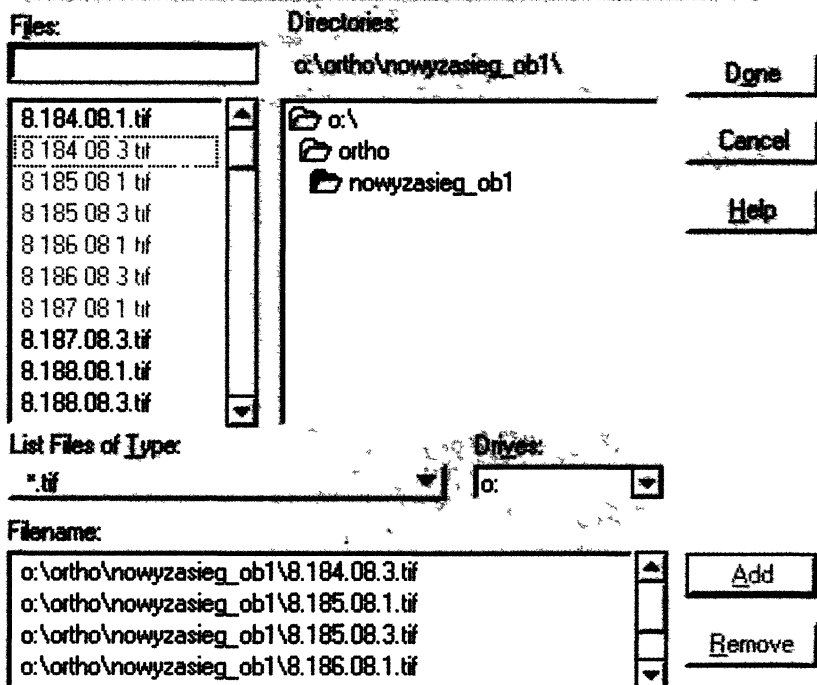


Рис 7.38 Вікно з переліком файлів для радіометричної корекції

7.5.6. Створення ортофотокарт з обрізанням по рамках секцій з одночасним тональним вирівнюванням

Під час “склеювання” отримаємо поліпшений тонально масив, який покриває всю область проекту. Тепер ортофотокарти будуть “нарізані” на аркуші (по трапеціях).

Оскільки метою є отримання ортофотокарти високої якості, то на кожному етапі здійснюється контроль проміжних та кінцевих продуктів. Остаточню ортофотокарта має однакову тональність (рис. 7.39).

“Склеювання” можна розпочати після підготовки окремих ортозображень та ліній склеювання.

До них входить база з рамками аркушів. Тоді з головного меню OrthoPro переходимо до Project Planning та закладку Product(s) (рис. 7.40).

Щоб ввести лінію “склеювання” до бази проекту, необхідно у головному вікні Geomedia з головного меню Tool Display Design Files (рис. 7.41) вибрати положення файла, систему координат та шар, на якому розміщена лінія склеювання. Далі імпортуємо цю лінію і автоматично через Assign Mosaic Polygons прив’язуємо ортообраз до визначеного полігону з використанням лінії склеювання (рис. 7.42).

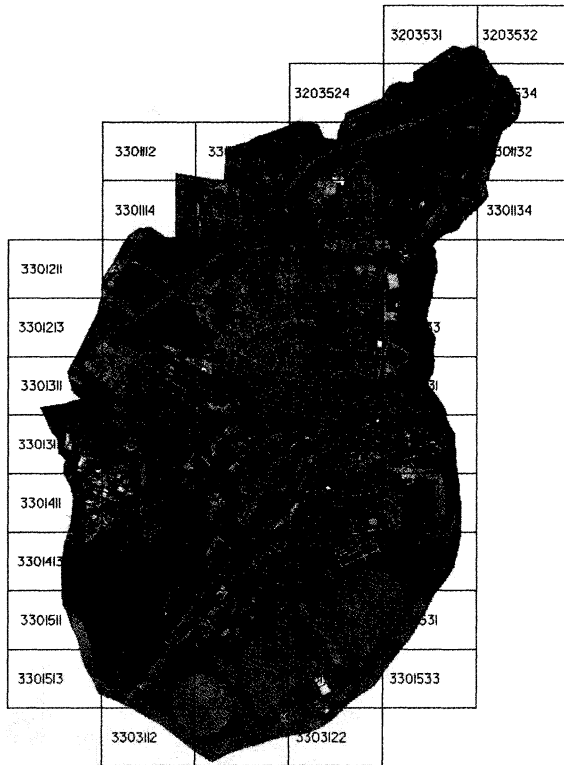


Рис. 7.39. Загальний вигляд ортофотокарти з покриттям аркушів карти

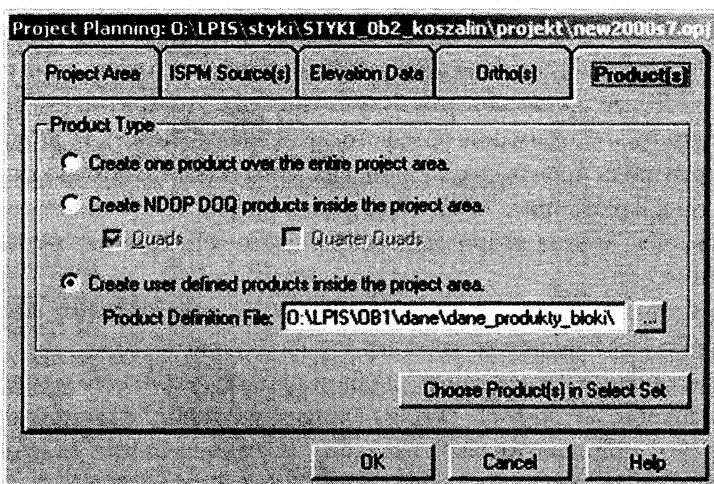


Рис. 7.40. Вибір бази з рамками продуктів

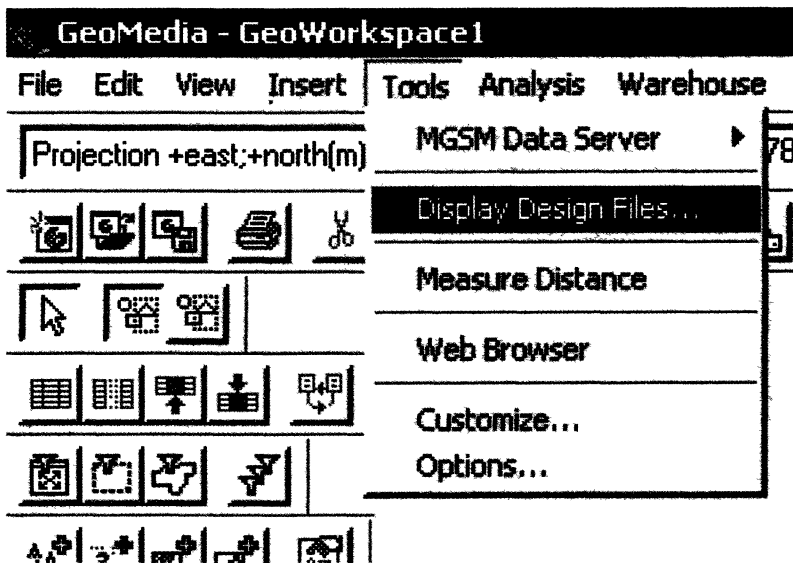


Рис 7 41 Вибір файла, системи координат, шару з лінією “склеювання”

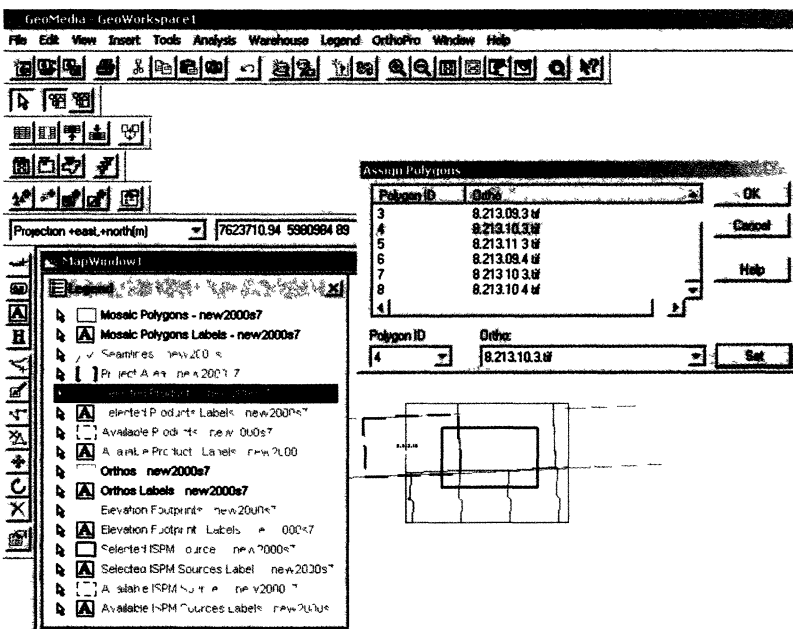


Рис 7 42 Визначення місцезнаходження ортозображення у полігоні

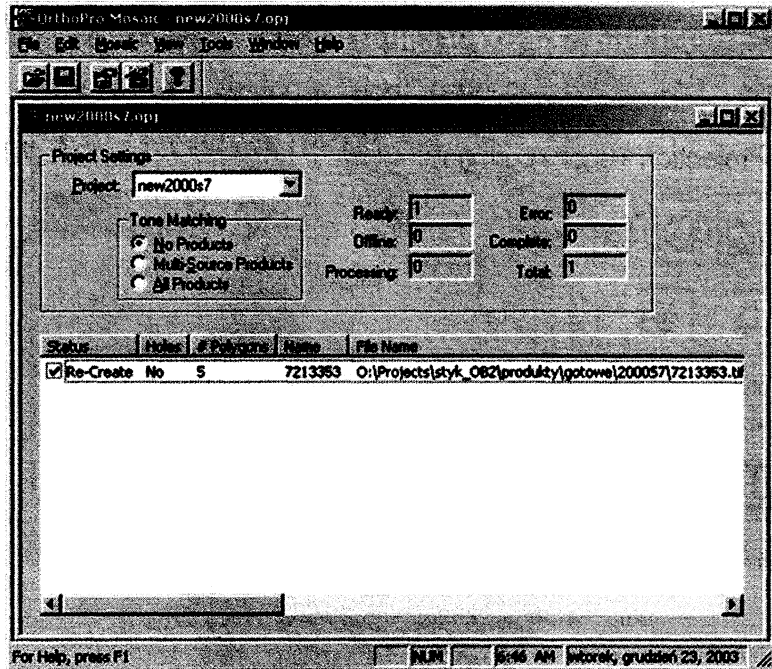


Рис. 7.43. Вікно для вибору шляху вирівнювання за тональністю

Вирівнювання за тональністю подано вікном (рис. 7.43).

Аплікація OrthoProMosaic дає змогу вибрати одну з трьох опцій функціональної групи Tone Matching, яка буде підставою для вирівнювання тональності під час склеювання.

No Products – склеювання без вирівнювання тональності.

Multi – Source Products – вирівнювання тональності у межах кожного з продуктів з метою згладжування різниць по лінії склеювання.

All Products – вирівнювання тональності у межах усього проекту та усунення тональних різниць на границях продуктів (зображень).

7.5.7. Виправлення похибок ЦМР та похибок знімків на створених ортофотокартах

Підлягають контролю та виправленню такі елементи.

Елементи ЦМР

а) контроль будинків, їхня ортогональність, прямолінійність ліній дахів, фундаментів, частин будівель пов'язаних з головним об'єктом: рампи, тераси, помости. Всі відхилення позначаються;

б) контроль витягнутих лінійних об'єктів (наприклад, залізничні колії, шосе, дороги на насипах). Похибка проявляється як викривлення такої лінії;

в) контроль мостів, віадуків, містків для пішоходів. Деякі з цих об'єктів можуть в натурі бути дугами, тому до виправлення таких об'єктів треба підходити обережно;

г) контроль відкритих територій: на незабудованих теренах може виявитись частина якоїсь ділянки (рілля, неорні землі), яка розміщена в натурі на такому самому рівні, що і увесь масив, а на зображенні матиме розмитості країв, хвилястість ліній (замість дуги чи прямої);

д) контроль границі об'єкта в тих місцях, де закінчується ЦМР; виступи над берегом моря, океану.

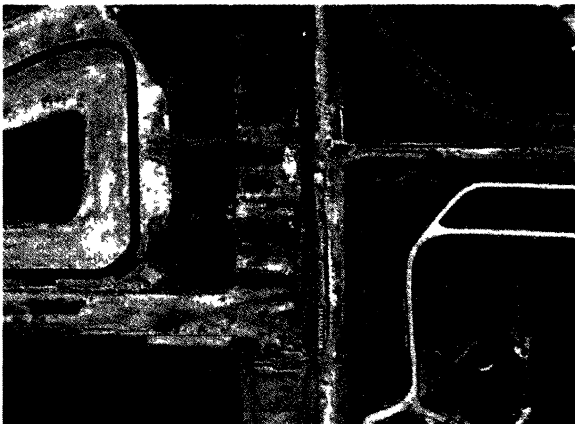


Рис. 7.44. Фрагмент ортофотокарти

Елементи знімка

а) перегляд прямокутних, багатограних деталей, що закривають інші деталі об'єкта. Тому такий об'єкт погано проглядається або спостерігається ефект фальшивого його зміщення;

б) забруднення знімка – ефект пилу або інших механічних домішок, що осіли на знімку у вигляді кривих, спіралей, коротких прямих ліній. На великих відкритих теренах часто хибний ефект забруднень дають великі камені. Тому треба впевнитись, чи це натуральний об'єкт, чи пил;

в) порисовування – часто на листах відзначаються довгі риси (кілька сот метрів);

г) на ділянках великих розмірів, однорідних за кольором чи тональністю, з'являються регулярні квадрати.

Похибки ліній “склеювання”

а) на забудованих територіях, на дорогах, вулицях можна побачити розмиті обриси автомобілів. Це причина руху об'єкта, а не похибки опрацювання.

Чорні поверхні невеликих розмірів часто мають розмиті контури або ж такі, що врізаються в поверхню;

б) ефект накладання боковин високих будинків у містах – там виступають розмиті обриси;

в) тональна різниця між окремими ортозображеннями. У такому разі ситуацію можна виправити вручну;

г) перетин будинку лінією склеювання, теж виправляється вручну;

д) розмита рослинність;

е) ефект “роздвоєння” стовпів, викликаний тим, що лінія склеювання надто близько підходить до такого об'єкта.

Фрагмент ортофотокарти показано на рис. 7.44.

7.6. Сумісне опрацювання даних лазерного сканування з літака та цифрових знімків

Лазерне сканування, зорієнтоване на розв'язання топографічних задач, практично використовується для побудови ЦМР або ж для генерування растрових зображень і створення з них просторових моделей, придатних для стереоспостережень на ЦФС.

Попри величезні переваги перед аерофотозніманням, лазерне сканування має певні недоліки, яких поки що неможливо уникнути. Тому до ЦМР треба у незалежний спосіб (переважно це фотограмметричний підхід) додати дані про:

- контури озер, ставків, водойм;
- ріки, канали, канави;
- виїмки, насипи;
- скелетні лінії рельєфу, урвища та інші форми рельєфу, що переривають плавний перебіг горизонталей.

Перші два типи топографічних об'єктів дають погане відбиття лазерного променя, тому повинні бути виправлені з інших джерел інформації. Що стосується вказаних вище форм рельєфу, то їхнє відображення з лазерного відбиття не завжди є повноцінним і вимагає, як правило, ручного доопрацювання на ЦФС.

Побудова ЦМР з лазерних даних має такі етапи:

- фільтрація даних;
- вилучення даних (точок), що не дають додаткової інформації;
- “згладжування” даних;
- вимірювання ліній переривання плавного перебігу рельєфу та скелетних ліній.

Опишемо коротко ці процеси.

Фільтрація даних

Метою цієї дії є вилучення з величезної кількості точок тих пунктів, які не дають необхідної інформації про рельєф. Фільтрацію виконують у два етапи; на першому це автоматична фільтрація, а на другому – ручна.

На першому етапі використовуються спеціалізовані програми, а на другому залучаються для ручного опрацювання доступні топографічні матеріали: ортофотокarti, ортофотознімки, топографічні карти.

Залежно від рівня фільтрації даних розрізняють у виробничій практиці рівні якості даних, подані в табл. 7.2.

Вилучення і згладжування

Сучасні LIDAR у стані реєструвати величезну кількість точок, навіть 100 тис. на секунду. Такий об'єм даних, з одного боку є корисним, бо дуже детально відображає рельєф, але, з іншого боку містить дані, які повторяються, не вносять додаткової інформації та ускладнюють опрацювання величезних масивів даних. З цієї причини створені відповідні алгоритми, які дають змогу без втрати інформації про рельєф усувати непотрібні точки.

Рівні оцінки якості фільтрації лазерних даних

Рівень	Назва	Опис даних
1	Початковий, або “всі точки”	Вся сукупність даних у відповідній системі координат, нефільтрована. Найдешевший та найшвидший за доступом продукт.
2	Низький рівень довіри або “попередня обробка”	Дані підлягають попередньому обробленню. Точки місцевості відділяються від інших даних, але не ведеться поділ на групи об’єктів (будинки, ліси, дороги тощо). Відібрані дані можуть містити помилкові точки, тому і виникає рівень неповної довіри. Затрати коштів і часу незначні.
3	Високий рівень довіри, або “просіяні” дані	Виконується автоматична і ручна фільтрація. Дані на 90 % правильно відображають місцевість. Затрати часу значні.
4	Класи об’єктів	Дані з рівня 3 опрацювують, поділяючи їх на класи: будинки, електролінії тощо.

Згладжування полягає у зміні висот деяких пунктів з метою побудови ЦМР заданої точності, без надмірної деталізації форм рельєфу.

Згладжування треба виконувати доволі обережно, погодивши з вимогами замовника. У практиці доволі часто цей процес не здійснюють.

Вимірювання ліній переривання головного перебігу рельєфу і скелетних ліній

Хоча лазерне сканування дає величезну кількість точок земної поверхні, створена ЦМР повинна бути доповнена лініями, які показують обриви, насипи, виїмки та інші, що характеризують порушення плавного перебігу рельєфу, але які об’єктивно існують в природі.

Для виконання процесу використовують:

- дані з моделі TIN, згенерованої з лазерного сканування;
- дані з фотограмметричних опрацювань на ЦФС;
- дані з опрацювання лазерних “образів” у растровому вигляді і згенерованої просторової моделі на ЦФС;
- суміщення наявних ортофотокарт з моделлю TIN (з лазерного сканування) і подальше опрацювання на ЦФС.

У разі генерування з ЦМР горизонталей, що є дуже **важливим** завданням під час картографування, теж необхідно доповнювати ЦМР **специфічними** лініями рельєфу.

Як відомо, при використанні ЦМР здійснюється **інтерполяція** висот точок, а уже після цього генеруються горизонталі. Сучасні програмні **засоби** уможливають певні маніпуляції з ЦМР, і при цьому створюються **проміжні продукти**, такі, як профілі, перспективні зображення, перерізи тощо.

На нижчеподаних рисунках наведено такі зразки опрацювань: на рис. 7.45 показано згенеровані горизонталі з ЦМР. На рис. 7.46 показано згенеровані горизонталі з нанесенням на ортозображення. На рис. 7.47 подано рельєф у вигляді “тіньової” картини, т. зв. бінарний образ. На рис. 7.48 показано горизонталі у перспективному сприйнятті.



Рис. 7.45. Горизонталі, згенеровані з ЦМР



Рис. 7.47. ЦМР у вигляді бінарного образу



Рис. 7.46. Горизонталі, згенеровані з ЦМР і перенесені на ортозображення



Рис. 7.48. Подання рельєфу горизонталіями у перспективному відображенні

7.7. Сучасні технології у картографуванні території (на прикладі Швейцарії)

Швейцарські урядові структури – Федеральне топографічне бюро та Федеральне аграрне бюро – в 1999 році прийняли проект, метою якого була актуалізація даних для кадастру. Проект був розрахований на 1999–2006 роки. Проект мав велике соціальне та фінансове значення, оскільки уряд Швейцарії здійснює доплату аграріям залежно від площі угідь. Тому головним завданням проекту було точне визначення границь і площ угідь, задіяних у сільськогосподарській діяльності (рис. 7. 49). Фактично завдання зводилось до створення цифрової моделі місцевості та цифрової моделі покриття поверхні (ці терміни пояснені в попередніх розділах). Загальна площа території становила 31000 кв.км, причому проектом не передбачалось виконання робіт на висоті більше ніж 2100 м над рівнем моря (Альпи), де вже не проростає ліс. Територія була поділена на п'ять частин.

З огляду на потрібну точність та оперативність фірма Swissphoto (головний виконавець проекту) використала технології лазерного сканування з літака та засоби цифрової фотограмметрії.

Основними рисами виконання робіт були такі:

- на рівнинних районах точність координування точок є найважливішим фактором для водного господарства та моделювання загрози повеней; включення скелетних ліній рельєфу є корисним і бажаним;

- автоматична фільтрація “хмари” точок лазерного сканування на теренах зі складною топографією не завжди дає добрі результати; тому треба орієнтуватись на ручне доопрацювання;

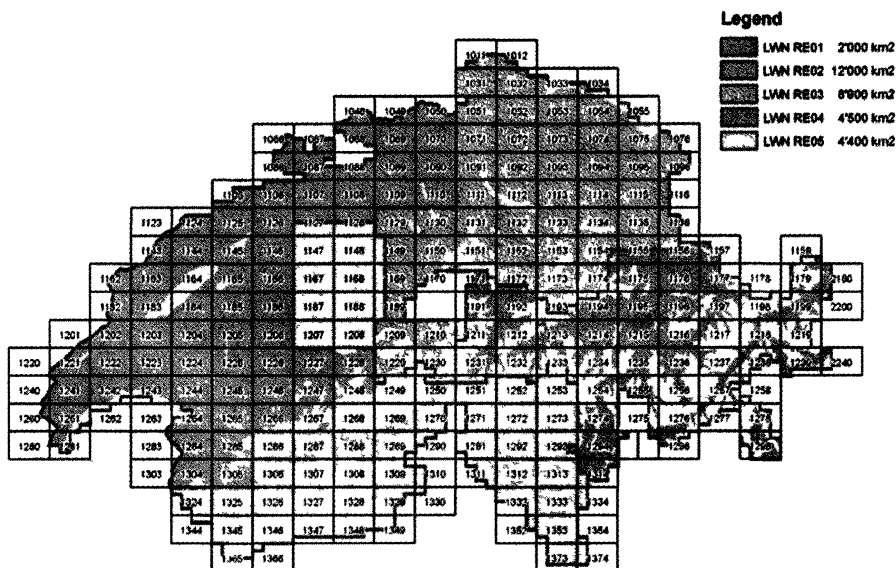


Рис 7.49 Розграфка на трапеції і план польовтів

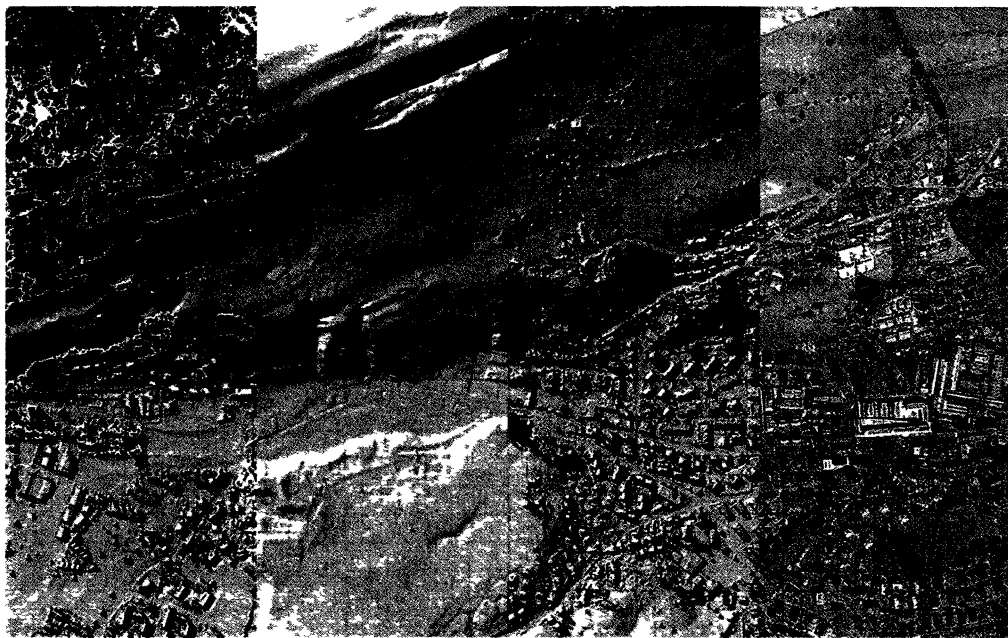
– для кращого відтворення рельєфу у гірських теренах густота висотних точок повинна бути доволі значною.

Вимоги до результатів проекту були такі:

Збирання даних. Знімання території необхідно виконати до початку вегетації рослин (дерева ще без листя), а сніговий покрив не повинен перевищувати 10 см. З огляду на це термін знімання припадав на грудень–червень залежно від географічного розміщення регіону.

Цифрова модель місцевості (ЦММ). Головним елементом є поодинокі точки на поверхні місцевості. Рослинність і елементи вертикальних конструкцій необхідно відокремити від оригінальної “хмари” точок лазерного сканування. Ср. кв. похибка визначення висоти точки не повинна перевищувати 50 см. Густота точок не менша від 0,44 точки на 1 кв. м для відкритої території та 0,14 для лісів. На відкритій території віддаль між точками не повинна перевищувати 2 м.

Цифрова модель покриття території (ЦМП) (рис. 7.50). Складається зі сталої (видимої) поверхні, вертикальних конструкцій та багаторічної рослинності. Змінна рослинність (щороку) не є елементом ЦМП (наприклад, кукурудза). Частина об’єктів, що потрапили в дані сканування, усуваються з опрацювання. До них належать автомобілі, човни, поїзди, низькі вуличні ліхтарі, вежі, стовпи тощо. Точки, що tworять ЦМП, групуються у такі три категорії: точки поверхні місцевості, точки рослинності, точки конструкцій. Ср. кв. похибка визначення висоти в будь-якому місці території не повинна перевищувати 50 см.



Границя лісів

Цифрова модель
місцевості

Цифрова модель
покриття території

Цифрова
ортофотокарта

Рис 7.50. Види зображень, отримані з використанням ЛІДАРа

Таблиця 7.3

Характеристика топографії окремих частин території

Параметри	Об'єкт				
	$L1$	$L2$	$L3$	$L4$	$L5$
Середня висота, м	850	892	885	1720	1483
Середній ухил, град.	13	13	14	25	27
Перепад висот, м	474	509	562	714	876
Максимальний ухил, град.	32	38	45	47	41
Середній перепад висоти, м	1467	1686	1688	1858	1813

Для виконання лазерного знімання (а це тривало 5 років) використано два різні сенсори. Сканер ALTM 2536 (сканер 1) застосовано для знімання об'єктів 2, 3, 4, а сканер ALTM 3100 (рис. 7.51) (сканер 2) після закінчення робіт на об'єкті 5. Під час виконання проекту технологія самого знімання та опрацювання даних розвивалась і вдосконалювалась, що впливало на якість, оперативність та швидкість виконання робіт.

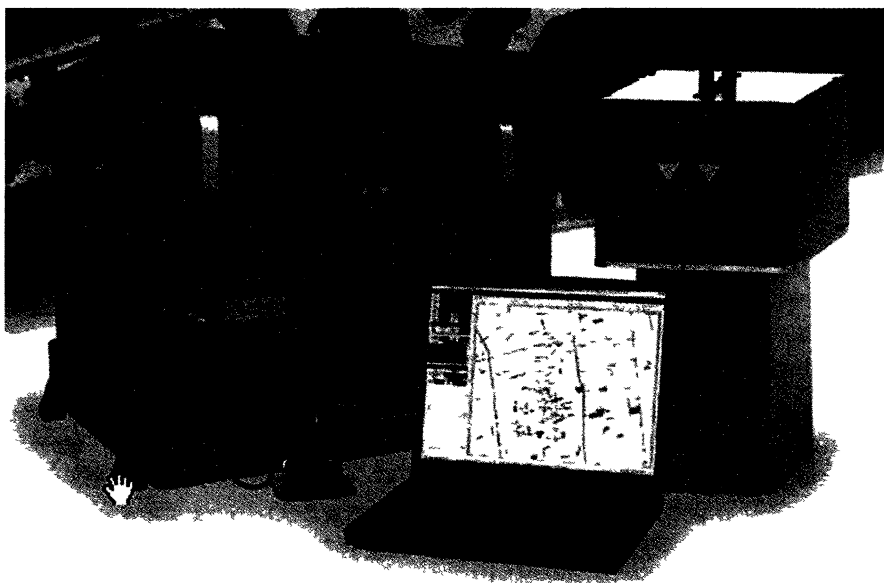


Рис 7 51 Лазерний сканер ALTM 3100



Рис. 7.52. Основні напрямки польотів
(у кантоні Уті)



Рис. 7.53. Профілі польотів, застосовані
до рельєфу місцевості

До найцікавіших параметрів сканерів зарахуємо:

- висоту польота: сканер 1 – 3000 м, сканер 2 – 4900 м;
- віддаль між точками відповідно 1,31 м і 1,28 м;
- максимальну кількість відбиттів відповідно 4 і 3 плюс останнє.

На проектування знімальних робіт (сканування з літака) мали вплив технічні параметри сканерів, вимоги до точності, можливості літака і передусім тип місцевості (рис. 7.52). Щоб уникнути великої кількості коротких знімальних маршрутів, було прийнято рішення виконувати політ не на сталій висоті, а відповідно до профілю рельєфу (рис. 7.53). Основний напрям польоту визначали головні долини і головні гірські хребти. Для долин середніх розмірів були заплановані окремі лінії польоту. Поперечні лінії польотів доповнювали основні траєкторії там, де цього вимагала топографія (рельєф) місцевості. Переважно це стосувалось тих місць, де віддаль *місцевість – літак* у долинах була більшою від максимально допустимої для сканера віддалі висилання імпульсу.

Розрахунки показали ефективність такого гнучкого підходу

порівняно зі зніманням зі сталої висоти польоту.

Під час виконання польотів у кожному конкретному випадку на місцевості встановлювалась одна GPS-станція, бо цього вимагає, як відомо, диференційний режим фіксації місцезнаходження літака (сканера). Для безпомилкового виконання робіт враховувалась віддаль *станція – об'єкт знімання*, доступність супутників та їхня видимість.

Статистичні дані знімальних робіт

Об'єкт	Кількість польотів	Кількість маршрутів знімання	Сумарна довжина польотів, км	Середня довжина лінії польоту, км	Сканер
L2	211	2988	59139	19,8	ALTM 2356
L3	185	2035	34061	16,7	ALTM 2356
L4	165	2720	29540	10,8	ALTM 2356
L5	75	1000	18000	17	ALTM 3100

Великий ухил місцевості (див. табл. 7.3) істотно ускладнював знімання, а це потребувало калібрування сканера, передусім для виявлення поправок до кутів нахилу та навігаційних параметрів. Тому було прийнято рішення виконувати калібрування системи на підставі знімання тестової ділянки, і це робили двічі: перед початком знімання об'єкта та після таких робіт. У ході знімальних робіт постійно виникали різниці між сусідніми смугами знімання при використанні системи ALTM 2356, тому фірма-виробник сканера змушена була переглянути технічні рішення, вдосконалити оптику та удосконалити алгоритм урахування дрейфу літака. Все це сприяло покращанню роботи системи.

Апаратура від фірми Optech (сканер ALTM 3100) не мала таких недоліків. Очевидно, це пов'язано з вищою частотою роботи INS, GPS та компенсацією впливу поперечного кута нахилу лазера, аж до $\pm 7^\circ$.

Опрацювання даних лазерного сканування складалось із кількох ключових етапів.

Після калібрування системи за даними знімання тестового об'єкта виміряні лазером віддалі редукувались до еліпсоїдальної системи координат. Потім координати точок було переведено до швейцарської системи координат з прийнятою моделлю геоїда. Незважаючи на те, що такі дані доступні для комерційних структур, надалі всі обчислення велись у власній системі координат.

Найзначущішими процесами була фільтрація і класифікація “хмар” точок на гірських теренах. Власне рис. 7.54 демонструє поступові кроки в опрацюванні даних. Неузгодженості результатів виявлялись та усувались на останньому етапі – це кінцевий контроль якості. Іноді необхідно було повторити кілька разів опрацювання даних і вдатися до ручного виправлення (втручання оператора).

Автоматична класифікація – фільтрація точок місцевості.

Для фільтрації точок місцевості використано програмне забезпечення фінської фірми TerraSolid (2004 р.). У ньому реалізовано різні алгоритми фільтрації даних та різні інструменти для контролю та виправлення даних у ручному режимі.

Фільтрація ґрунтується на алгоритмі адаптивної тріангуляції, розробленому Axelsson (1999). Позитивною рисою методу є те, що можна добирати алгоритм фільтрації залежно від характеристик топографії конкретного регіону. На пізнішому етапі були опрацьовані власні інструменти фільтрації – класифікації, які враховували

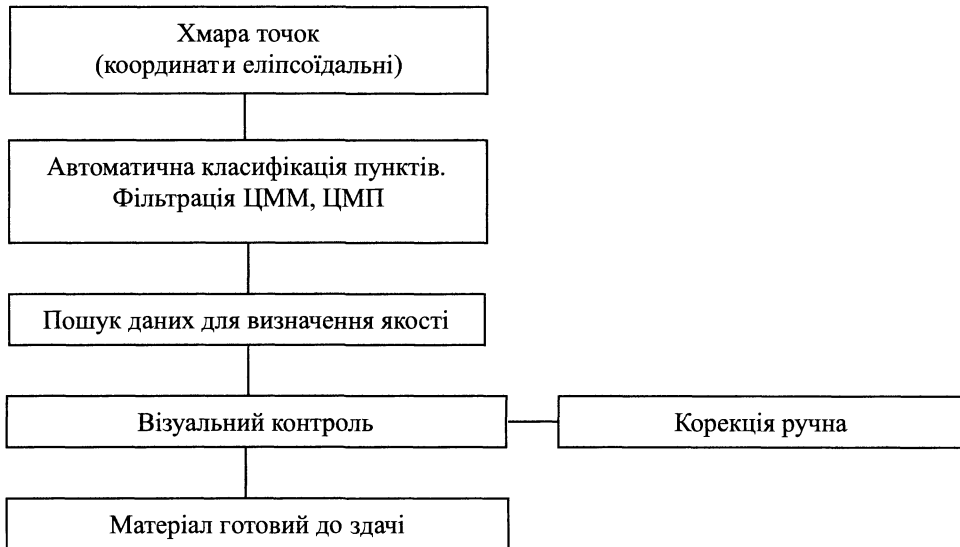


Рис. 7.54. Етапи опрацювання даних лазерного сканування

топографічні характеристики та тип сканера. Кількість помилок не перевищувала 10 % від загальної кількості точок, найменша кількість припадала на райони рівнинні або злегка горбисті.

Класифікація точок ЦМП. Відповідно до вимог у ЦМП повинні входити тільки точки з першого лазерного відбиття, які належать до точок поверхні землі, рослинності та елементів конструкцій. Для підвищення ефективності опрацювання виконували з метою одночасної побудови ЦММ і ЦМП. Ступінь ручного втручання був значно меншим. Це впливає з факту, що тільки постійні об'єкти могли бути залишені в файлі даних, натомість всі інші об'єкти (про них вже згадано вище) усувались. До точок, що залишились, застосовано автоматичну класифікацію – фільтрацію.

Для будинків додатково використано їхні контури, отримані з геодезичного кадастру. Проблематичним було визначення в багатьох випадках, від якого об'єкта відбився імпульс лазера. Встановлено, що тільки суто прагматичний підхід, досвід і логіка давали вичерпну відповідь у кожному конкретному випадку.

Перевірка якості. Встановлення якості відіграло важливу роль у цьому проекті. Перед виконанням першої частини проекту необхідно було передбачити (спланувати) перевірку якості на всіх етапах опрацювання даних, особливо якості даних, що утворюють ЦММ та ЦМП.

Для базового контролю якості “хмара” точок була автоматично перекваліфікована відповідно до описаної вище процедури. Метою такого контролю було виявлення відсутності даних між смугами сканування, і в такий спосіб можна було перевірити загальну точність даних та якість вирівнювання смуг та маршрутів. Комплектність даних перевіряв оператор з використанням сіток різної густоти, яку він міг легко

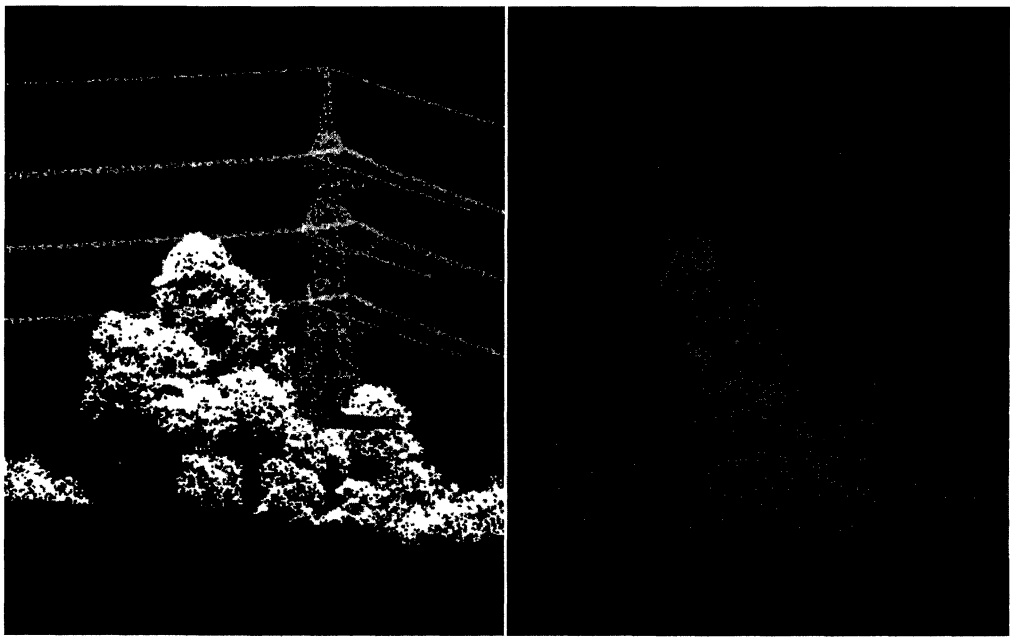


Рис. 7.55. Зображення до і після опрацювання

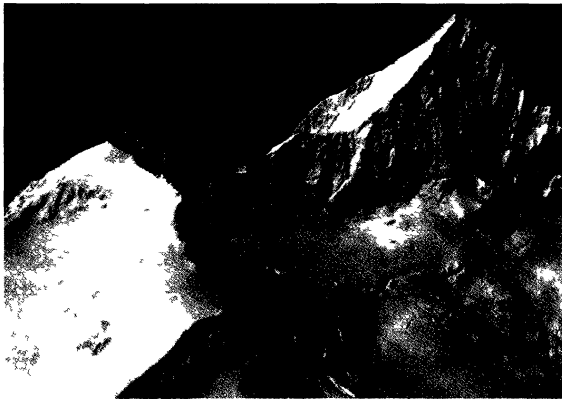


Рис. 7.56. Зображення, згенероване з лазерних даних
(Швейцарські Альпи)

змінювати. Практично кожний випадок неповних даних легко виявлявся та усувався. Загальна точність даних встановлювалась з використанням точок з відомими висотами та контрольних точок. Важче було виявити незбіг смуг великої протяжності. І тут використано різниці між ЦММ і ЦМП. Беручи до уваги те, що алгоритми класифікують нижчу поверхню як місцевість, а вищу як ЦМП, різниці становлять елементи, які не є елементами топографії місцевості. Якщо базовий контроль якості виявив помилки, то необхідно було виконати певний аналіз та корекцію.

Для візуального контролю в класах об'єктів різні типи даних було отримано з “хмари” точок. Додаткові дані, такі, як карта пікселів (зображення) та ортофотокарта використовувались як допоміжний матеріал. Для перевірки ЦММ застосовано: регулярні сітки (з кроком 2 м, 10 м і 100 м) точок ЦММ з набором кольорів, сітки ухилів, горизонталі (з перетином 2 м, 5 м, 10 м залежно від характеру), різниці висот між відомими точками з ЦММ і ЦМП, зокрема для контрольних точок.

Для ЦМП використано такі самі підходи, а також сітку рослинності (сітку, утворену тільки з рослинності), сітку будинків з набором кольорів, сітку з різниці ЦММ–ЦМП. Безперечно, таке збирання даних – це тільки один аспект детальної перевірки. Через обмежену кількість статистичних тестів широко використано досвід та знання операторів та контролерів. Зображення до і після опрацювання подано на рис. 7.55.

Згенерований образ з лазерних даних показано на рис. 7.56.

Навчання. З огляду на те, що перевірка і контроль у ручному режимі значною мірою залежать від кваліфікації оператора, то навчання і підготовка кадрів стають центральними у виробничій діяльності. У нашому проекті операторам були доступні всі технологічні відомості та документація через систему Intranet.

Оскільки у ході виконання робіт технологічні аспекти постійно оновлювались та вдосконалювались, то ті, хто навчався чи працював, мали можливість опановувати нововведення. Окрім того, що існували загальні підходи до вживаних технологій, і цьому навчались всі виконавці, кожен міг мати і мав індивідуальні інструментальні засоби, якими найчастіше користувався.

Висновки. Завдяки реалізації цього проекту фірма Swissphoto довела, що лазерне сканування з літака є завершеною технологією, що забезпечує побудову ЦММ та ЦМП високої точності та якості навіть для важкодоступних гірських районів. Саме ця технологія дала змогу зібрати необхідні дані в стислі терміни та зекономити кошти. Густота закоординованих точок перевищила сформульовані вимоги, за винятком декількох невеликих територій. Точність визначення висот точок, визначена за контрольними пунктами, становила 25–35 см. Найбільші різниці у висотах отримано для штучних споруд (дороги, мости, будівлі), а також для лісів. В обох випадках візуальний контроль підтвердив, що похибка була результатом інтерполяційних способів, а не похибок фільтрації чи похибок у координатах.

З огляду на великий обсяг виконаної роботи основні висновки можна вважати достатньо аргументованими. На підставі набутого досвіду встановлено, що управління подібним проектом повинно доповнюватись діями, що дають змогу вести пошук нових підходів і планувати використання модернізованих чи оновлених технічних та програмних засобів. Необхідно використовувати інструментарій, що допомагає максимально автоматизувати окремі процеси, проте не виключається ручне доопрацювання, перевірка та контроль побудованих моделей оператором. Постійне підвищення кваліфікації персоналу є абсолютно потрібним, і тільки воно може забезпечити технологічний прогрес.

У перспективі метод лазерного сканування буде ефективнішим і точнішим як завдяки вдосконаленню лазерних сканерів, так і завдяки розширенню потенційних можливостей програмного забезпечення.

8. КОСМІЧНА ФОТОГРАММЕТРІЯ

8.1. Предмет космічної фотограмметрії. Об'єкти досліджень

З часу запуску першого штучного супутника Землі (СРСР, 1957 рік) минуло півстоліття. Космонавтика за цей короткий час досягла таких вершин, які на початку космічної ери здавались фантастикою.

Розвиток методів та засобів космічних досліджень визначив формування нового напрямку в фотограмметрії, який тепер ми називаємо *космічна фотограмметрія*. Це розділ фотограмметрії, який займається теорією, технологією і практичною реалізацією у сфері отримання та опрацювання космічних знімків (образів) з метою виявлення кількісних та якісних характеристик Землі, Місяця, планет Сонячної системи та інших космічних об'єктів.

Вивчення Землі з космосу ведеться на підставі знімання (космічних знімків), здійсненого зі штучних супутників Землі (ШСЗ). Найактуальнішим завданням є отримання картографічних матеріалів у різних масштабах – від дрібних до великих, що у перспективі повинно замінити методи аерофотограмметрії. Іншим важливим напрямком є дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), в якому картографічна компонента є лише однією із великої кількості складових (геологія, геофізика, метеорологія, екологія, гідрологія, океанографія, рослинний світ тощо). Кожний із напрямків ДЗЗ є вузькопрофесійною сферою; тому це є предметом вивчення та розвитку кожної конкретної галузі знань.

Серед задач ДЗЗ виокремлюється дуже важливий напрямок, пов'язаний із моніторингом різних небезпечних явищ та процесів (повені, пожежі, руйнування берегової лінії, льодовикові процеси та багато інших).

Для вивчення планет та інших небесних тіл Сонячної системи використовують автоматичні міжпланетні станції (АМС). Космічні зображення, отримані з цих апаратів, допомагають розв'язувати астрометричні, картографічні, планетологічні та прикладні задачі. Як зазначають дослідники, в космічній фотограмметрії в оригінальний спосіб поєднались астрометрія, небесна механіка та аналітична фотограмметрія.

На особливу увагу в космічній фотограмметрії заслуговує побудова глобальних опорних мереж на планетах та великих супутниках Юпітера, Сатурна тощо. Такі мережі є основою для подальшого картографування цих небесних тіл. Доволі часто космічна фотограмметрія (а саме це її задача) є єдиним методом побудови таких опорних мереж, оскільки наземні спостереження або неможливі, або ж не дають такої точності, яку забезпечує космічна фотограмметрія.

Оскільки умови космічного знімання істотно відрізняються від аерознімання, то і теоретичні, і технологічні розв'язання доволі часто істотно різняться від опрацювання аерофотознімків. Ці відмінності полягають у такому:

- висоти знімання у десятки – сотні разів перевищують висоти фотографування з літака;

- рух ШСЗ та АМС відбувається по орбітах відповідно до законів небесної механіки; це дає змогу визначати координати центрів знімання з інтегрування диференційних рівнянь руху ШСЗ чи АМС;

- орієнтування топографічних знімків в інерційному просторі виконується автономно, з використанням додаткових технічних засобів (астродавачів, синхронного фотографування зоряного неба додатковою камерою, лазерних або радіовіддалемірів тощо).

Об'єкти, що досліджують засобами космічної фотограмметрії, дуже різні. Це і планета як космічне тіло, і поверхня планети, і окремі її фрагменти як з макропогляду, так і з дуже малої відстані (наприклад, зі спущених на поверхню самохідних апаратів, як це було для Місяця – “Луноход”).

Апаратура для отримання зображень та методи опрацювання образів взаємопов'язані, а їхнє розмаїття значно більше, ніж в аеро- чи наземній фотограмметрії. Про це йтиметься далі.

8.2 Картографічні супутникові системи високої точності та роздільної здатності

8.2.1. Супутникові системи світу

Супутникові системи – це сукупність супутників багатопільового призначення. Залежно від виду, призначення і типу використання інформації супутники поділяються на:

1. Науково-спостережні: призначені для вивчення Космосу, Всесвіту і довкілля. Вони часто використовуються для картографування і допомагають у дослідженні і моніторингу Землі у різних її частинах за допомогою фотографування чи сканування земної поверхні. Перший такий супутник був запущений СРСР у 1957 р.

2. Військово-стратегічного призначення: використовуються для відстеження бойових зон, для спостереження за запусками ракет, за ядерними випробовуваннями, зброєю, шпигуванням, перехопленням повідомлень, спостереження за появою невідомих об'єктів, курсу судна, відстеження руху військової техніки. Перший “шпигунський” супутник Discoverer I був запущений у США 28 лютого 1959 р. як частина секретної програми Corona.

3. Навігаційні (GPS): подібні до попередніх, але використовуються для того, щоб визначити місцезнаходження і позицію, передусім в авіаційній і морській навігації. Такі системи існують від 1978 р. і дотепер є широкоживаними для військових, промислових, комерційних та наукових потреб.

4. Метеорологічні: використовуються для збирання даних, необхідних для прогнозування погоди, для вимірювань із Космосу параметрів таких явищ, як хмарність, вітер, температура атмосфери. Їх також використовують для виявлення і вивчення кліматичних змін і глобального потепління. Перший метеорологічний супутник – Explorer 7, запущений 13 жовтня 1959 р.

5. Телекомунікаційні: слугують для мобільного зв'язку, міжміських і міжнародних з'єднань, телепередач через супутникові системи, комп'ютерного зв'язку, для звукових сигналізаторів. Перший геостационарний орбітальний супутник зв'язку – це SYNCOM3, запущений 19 серпня 1964 р.

Кожен із супутників виводиться на певну орбіту. Розрізняють кілька типів орбіт, які зображено на рис. 8.1.

Геостационарна орбіта (GEO), відома ще як геосинхронна навколосезна орбіта) – орбіта заввишки близько 35 900 км. над поверхнею Землі над екватором, на якій супутник здійснює один оберт за 24 години, зберігаючи фіксовану позицію над Землею. При такій високій орбіті сигнали супутників можуть охоплювати більшу частину планети, окрім точок Північного і Південного полюса, і є найпридатнішими для комунікаційних зв'язків і спостережень.

Геосинхронна перехідна орбіта (MEO) відома ще як середня або овальна – це орбіта заввишки близько 20 000 км над поверхнею Землі. Супутники, розміщені на цій орбіті замість кругових обертів навколо Землі, рисують овал, покриваючи Північний і Південний полюси.

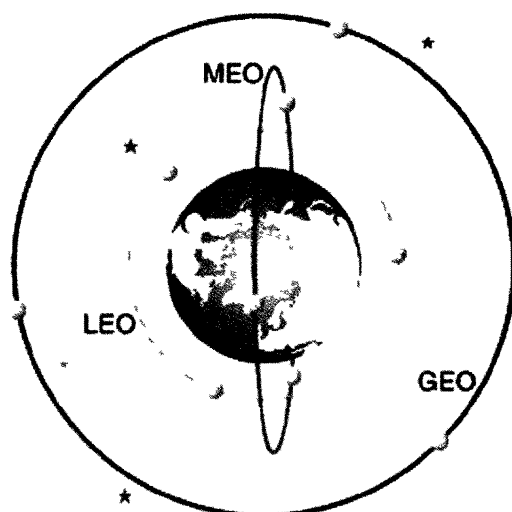


Рис. 8.1. Типи орбіт

Низька навколоземна орбіта (LEO) – орбіта, розташована найнижче з усіх до Землі. Швидкість супутників, розміщених на цій орбіті, має бути доволі високою, щоб уникнути виведення їх з орбіти чи зіткнення з Землею. Ця орбіта є найпридатнішою для використання інформації для моніторингових, метеорологічних і наукових цілей.

Перелік деяких супутників Землі подано у табл. 8.1, а заплановані запуски на найближчі роки зібрано у табл. 8.2.

Таблиця 8.1

Перелік деяких супутників Землі*

Назва	Тип орбіти	Ви- сота орбіти, км	Запущений у	Вийшов з обслуго- вування	Орга- нізація
1	2	3	4	5	6
ADEOS	Сонячно- синхронна	797	1996	1997	NASDA
Aqua	Сонячно- синхронна	705	2002		NASA
BILSAT	Сонячно- синхронна	686	2003		TUBITAK- BILTEN
CBERS	Сонячно- синхронна	778	1999		INPE
KOСMOC	Сонячно- синхронна		1987		Російське космічне агентство
DMSP-16	Близько- полярна сонячно- синхронна	830	2003		Департамент оборони США
ENVISAT	Сонячно- синхронна	800	2002		ESA
EROS A	Сонячно- синхронна	480	2000		ImageSat Inter- national
GEOS-10	Гео- стаціонарна		1997		NOAA
INSAT-2B	Гео- стаціонарна		1993		ISRO
IRS-1C	Сонячно- синхронна	817	1995		ISRO

1	2	3	4	5	6
LANDSAT 1	Сонячно-синхронна	907	1972	1978	NASA
LANDSAT 7	Сонячно-синхронна	705	1999		NASA
Meteosat 7	Гео-стаціонарна		1997		EUMETSAT
NOAA-17	Близько-полярна сонячно-синхронна	833	2002		NOAA
Quickbird	Сонячно-синхронна	450	2001		DigitalGlobe
QuikSCAT	Сонячно-синхронна	803	1999		NASA
RadarSat-1	Сонячно-синхронна	798	1995		RadarSat International
Seasat	Сонячно-синхронна	800	1978	1978	NASA
SPOT 1	Сонячно-синхронна	832	1986	2002	CNES
UK-DMC	Сонячно-синхронна		2003		Британський національний космічний центр

* За даними бібліотеки Міжнародного інституту геоінформаційних наук і обсерваторії Землі (Нідерланди).

Прогнозовані та заплановані запуски нових супутників від 2005 р.*

Назва	Інформаційне джерело	Запланована дата запуску
	2007	
ADM-Aeolus	ESA ADM Aeolus	Жовтень
MSG-4	EUMETSAT	2007
COSMO-SkyMed 3	Agenzia Spaziale Italiana Galileo Avionica	2007
RapidEye	RapidEye AG	2007
GOES-0	GOES at Boeing	Квітень
CASSIOPE	Канадське космічне агентство	2007
NOAA-N'	POES launch table	Грудень
	2008	
GOES-P	GOES at Boeing	Жовтень
OCO	Orbiting Carbon Observatory	2008
OSTM (Jason-2)	Ocean Surface Topography Mission	2008
EROS C	ImageSat International	2008
CBERS 3	OBT-CBERS	2008
World View II	Digital Globe	2008
	2009	
MSG-3	EUMETSAT	2009
EROS C	ImageSat International	2009
Pleiades-2	CNES	2009
	2010	
METOP-2	POES launch table	Червень
	2011	
CBERS 4	OBT-CBERS	2011
	2012	
GOES-P	NOAA	2012
NPOESS-C1	NPOESS	2012

* Інформація зібрана за даними офіційних і неофіційних джерел Міжнародного інституту геоінформаційних наук і обсерваторії Землі (Нідерланди) і може змінюватися.

Супутники є державною або приватною власністю, тобто належать компаніям чи країнам, і іноді їх можна орендувати. Продукція, а це інформація і зображення, допомагають покращати комунікаційну мережу як всередині окремої країни, так і в усьому світі. До речі, за потенціалом доходів ринок космічного зв'язку перевищує ринок послуг із виведення космічних апаратів на орбіти.

Стосовно супутникових систем навігаційного призначення, то необхідно особливо відзначити їх революційний вплив на геодезію, картографію, фотограмметрію, про що вже неодноразово згадувалось.

У світі сьогодні існують такі незалежні супутникові системи:

1) NAVSTAR – Global Position System, створена США; сузір'я складалося з 24 супутників;

2) ГЛОНАСС – Глобальна навігаційна супутникова система, створена у СРСР, нині належить Росії; сузір'я складалося із 24 супутників.

3) Galileo – Європейська система глобального позиціонування, створюється країнами-учасниками Євросоюзу; сузір'я складатиметься з 30 супутників.

На відміну від двох перших систем, що були першочергово призначені для військових потреб, система Galileo призначена переважно для використання у цивільних і комерційних цілях, а реалізація проекту розпочата в 2007 році.

8.2.2. Значення роздільної здатності

Перспективним напрямком комерціалізації космосу є ринок дистанційного зондування землі (ДДЗ). Залежно від можливостей апаратури ДЗЗ та від технічних параметрів, особливо таких, як висока точність і роздільна здатність, виникає розподіл за ознакою функціонального використання інформації, що надходить з космічних апаратів.

Роздільна здатність – величина, що визначає вибір масштабу знімання за заданого показника детальності знімків. За детальністю знімки поділяються на:

1. Знімки низької роздільної здатності (кілометри).
2. Знімки середньої роздільної здатності (сотні метрів).
3. Знімки високої роздільної здатності, які, своєю чергою, поділяються на:
 - знімки дуже високої роздільної здатності (10–20 метрів);
 - знімки надвисокої роздільної здатності (1 метр і менше).

Наприклад, знімки низької роздільної здатності є корисними у використанні для великих територій, а також для таких потреб, як контроль температури морської поверхні, вивчення стану рослинності, для аналізу стихійних лих. Знімки високої роздільної здатності від 10 до 30 м придатні для використання в картографії, моніторингу, для картографування у масштабах 1: 50 000 та 1: 25 000. Кожна роздільна здатність має найкраще застосування для різних типів призначень (аплікацій). Наприклад, найвищі вимоги до точності і детальності збирання даних та картографування серед кадастрів має містобудівний кадастр. Для його ведення з використанням ДДЗ необхідні цифрові дані про рельєф земної поверхні і, на відміну від земельного кадастру, ще й дані про висоту будівель, споруд і промислових об'єктів. Космічні знімки високої роздільної

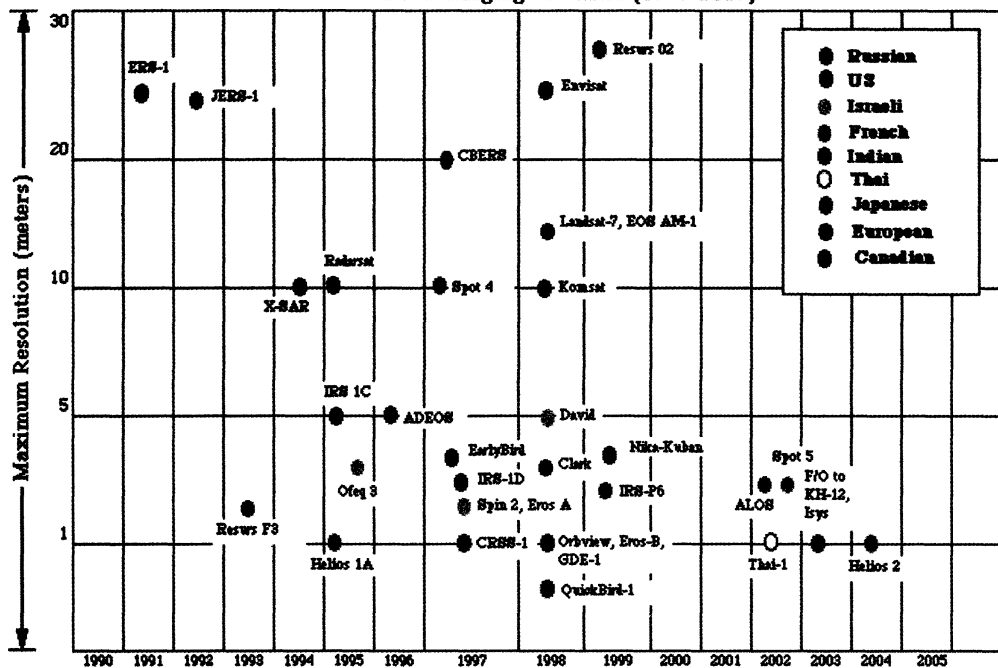


Рис. 8.2. Деякі супутники Землі у хронології із вказанням їхньої роздільної здатності

здатності є найкращими для аналізу міської забудови, інженерних вишукувань, для уточнення деталей на поверхні землі.

Іноді знімки високої роздільної здатності, наприклад, отримані з космічних систем типу SPOT 5 (сенсор PAN, роздільна здатність 5 м), IRS (сенсор PAN-5, 6 м) інтегрують з даними нижчої роздільної здатності, що дає змогу виявити додаткові відомості про досліджувані об'єкти та явища, особливо на спектрональних і синтезованих знімках. Крім того, на спектрональних фотознімках легко дешифрують лісові масиви та інші рослинні компоненти, що важливо для вивчення трав'янистих фітоценозів, міських агломерацій, дачної забудови, порушень різного походження. На таких зображеннях погано виділяються зони забруднення за прямими ознаками. Змістовна деталізація цього рівня (1–10 м) відповідає масштабам карт 1: 10 000–1: 50 000. За даними космічного знімання з роздільною здатністю 1–10 м будуються цифрові моделі рельєфу і створюються тематичні і топографічні карти, наприклад, карти зонування для точнішого урахування особливостей місцевості, ландшафтних закономірностей та інше. Таку детальну інформацію отримують з супутникових систем QuickBird, Ikonos з роздільною здатністю 0,6–1 м.

На рис. 8.2 зображено в хронологічній послідовності появу супутників, що забезпечують роздільну здатність до 30 м.

Основні характеристики космічних систем високої роздільної здатності

Система (Компанія)	IKONOS-2 Space Imaging	Quick Bird 2 Digital Globe	Orb View 3 ORBIMAGE	EROS B Image Sat Int	Ресурс-ДК Роскосмос	SPOT 5 SPOT IM- AGE	Geo Eye 1 Geo Eey	Word View 2 Digital Globe
Дата запуску	24.09.1999	18.10.2001	26.06.2003	25.04.2006	15.06.2006	3.05.2002	2007	2008
Висота орбіти	682 км	450 км	460 км	600 км	350-607 км	822 км	684 км	770 км
Ширина смуги знімання	11 км	16, 5 км	8 км	7 км	28,3 км	60 км	15,2 км	16,4 км
Спектральні шари, нм	Панхром (PAN) 0,45-0,90 Колір (MS) 0,45-0,52 (B) 0,52-0,62 (G) 0,64-0,69 (R) 0,76-0,90 (IR)	PAN: 0,45-0,90 MS: 0,45-0,52 (B) 0,52-0,60 (G) 0,63-0,69 (R) 0,76-0,90 (IR)	PAN: 0,50-0,90 MS: 0,45-0,52 (B) 0,52-0,60 (G) 0,63-0,69 (R) 0,76-0,90 (IR)	PAN: 0,50-0,90	PAN: 0,58-0,80 MS: 0,50-0,80 (B) 0,60-0,70 (G) 0,70-0,80 (R)	PAN: 0,48-0,71 MS: 0,50-0,59 (B) 0,61-0,68 (G) 0,78-0,89 (R) 1,58-1,75 (IR)	PAN: 0,45-0,90 MS: 0,45-0,52 (B) 0,52-0,60 (G) 0,625-0,695 (R) 0,76-0,90 (IR)	PAN: 0,50-0,90 MS: 0,423-0,453 (B) 0,5-0,64 (G) 0,7-0,73 (R) 0,9-1,05 (IR)
Кількість пікселів у лінії	13826 (PAN) 3,28 (MS)	27632 (PAN) 6856 (MS)	8000 (PAN)	20000 (PAN)				
Розмір піксела, м	0,82 (PAN) 3,28 (MS)	0,61 (PAN) 2,44 (MS)	1,0 (PAN) 4,0 (MS)	0,8 (PAN)	1 м (PAN) 2-3 м (MS)	5,0 м (PAN) 10 м (MS)	0,41 (PAN) 1,65 (MS)	0,46 (PAN) 1,8 (MS)
Радіометрична розд. здатність	11 бітів	11 бітів	11 бітів	11 бітів	11 бітів	11 бітів	11 бітів	11 бітів
Максимальне відхилення від надиру оптичної системи вздовж і впоперек польоту, градуси	±45	±30	±45	±45	±30	±	±60	±40

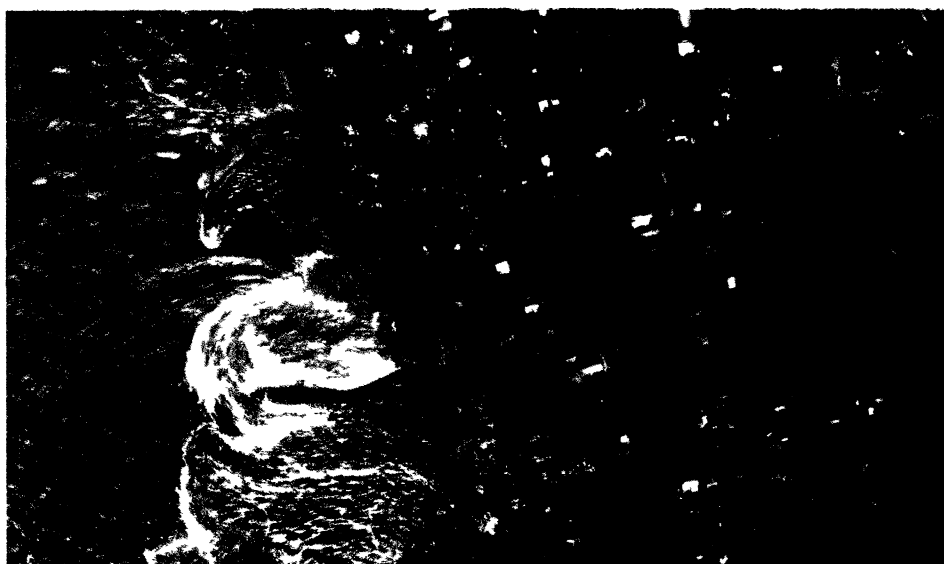


Рис. 8.3. Зображення цунамі: пляж Калутара, Шрі Ланка, 26 грудня 2004 р. Виконано QuickBird, DigitalGlobe, США



Рис. 8.4. Зображення повітряного шоу: Париж, 13 червня 2005 р. Виконано SPOT 5, Spot Image, Франція



Рис. 8.5. Покриття частин світу з супутників IRS-серії (джерело: www.eurimage.com)

8.2.3. Космічні системи високої роздільної здатності

Знімки високої та надвисокої роздільної здатності все більше проникають на ринок інформаційного забезпечення. До них можна зарахувати SPOT, QuickBird, Ikonos, Landsat, EROS, Ресурс-ДК та деякі інші.

Основні відомості про системи подано в табл. 8.3. Для таких систем є ціла низка спільних рис, які виникають як з оптимальних орбітальних параметрів, так і з фізичної природи формування зображень. Деякі такі риси подано в роботі [32].

Орбіти таких апаратів нахилені до екватора під кутом 98° . Це означає, що супутник проходить над цією територією в один і той самий місцевий час, що дає змогу використати ефект тієї самої освітленості цієї області.

Під час польоту супутника відбувається реєстрація його положення на орбіті дуже часто і з високою точністю. Це означає, що фотограмметричне опрацювання зображень можна виконувати без опорних точок.

Роздільна здатність системи залежить від висоти орбіти, фокусної віддалі оптичної системи та розмірів комірок ПЗЗ. Сумарний вплив цих параметрів найкраще оцінюється розміром пікселя на земній поверхні. Як бачимо з табл. 8.3, сьогодні цей розмір становить 0,5–4 м для найкращих систем.

У переважній більшості сучасних знімальних систем використано принцип дії електрооптичного сканера. При цьому задіяно кілька ПЗЗ-лінійок, що реєструють зображення в діапазонах панхроматичному та багатоспектральному, включаючи інфрачервоний діапазон променів. Роздільна здатність панхроматичних зображень, як правило, в 3–4 рази вища від багатоспектральних образів.

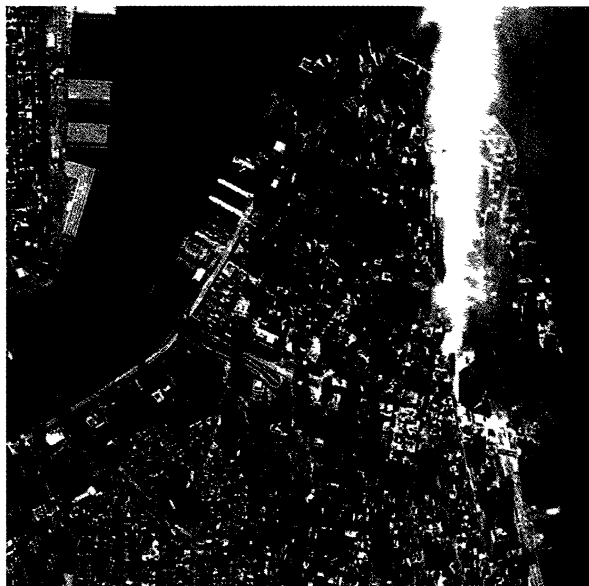


Рис. 8.6. Зображення World Trade Center у Манхеттені, Нью-Йорк, 11:43 EDT 12 вересня 2001 року.
Супутник Ikonos, компанія Space Imaging

Радіометрія зображень є доволі високою і становить переважно 11 бітів, що означає для панхроматичного образу можливість розрізняти 2048 рівнів сірого.

Відхилення від надиру оптичної системи (у різних знімальних системах від 30° до 60°) істотно розширяє можливість знімання тієї чи іншої області з цього орбітального витка знімання. Таке рішення позитивно впливає на реалізацію тієї самої території “вперед” або “назад” і утворення стереопари.

Як зазначають дослідники, “стереоскопія з однієї орбіти” має великі переваги перед “стереоскопією з сусідніх орбіт”.

Отже, космічні системи високої роздільної здатності

довели свою дієздатність, і очікується, що впродовж найближчих років їхня кількість збільшиться як за рахунок компаній “зі стажем”, так і завдяки появі нових. Активну космічну діяльність вже розпочали Китай, Японія, Бразилія, від яких можна очікувати цікавих і привабливих наукових і комерційних проектів.

На рис. 8.3, 8.4, 8.5 та 8.6 як приклади показано зображення, отримані різними знімальними космічними системами.

8.2.4. Ціна картографічних супутникових зображень

Ціна супутникового знімка залежить від просторової роздільної здатності на місцевості, яку він забезпечує: що дрібніші деталі супутник “бачить”, то дорожчим буде знімок. Отож, якщо один знімок місцевості, отриманий з Landsat-7 (розміром 183×172 км), коштує близько 600 доларів, то одна повна сцена місцевості, отримана з супутника QuickBird ($16,5 \times 16,5$ км), коштує вже понад 9000 доларів. Можна купувати окремий фрагмент (але не менш як 60 км^2) такої сцени, який обійдеться покупцю в 2080 доларів, що також недешево. За даними Державного науково-виробничого центру аерокосмічної інформації “Природа” для більшості офіційних компаній-представників супутникових систем цінові характеристики станом на 2005 р. є такими, як показано у табл. 8.4.

Цінова інформаційна таблиця станом на 2005 р.

№ з/п	Супутник	Характеристика зображення	Роздільна здатність	Ціна за 1 кадр без ПДВ (розмір кадра)
1	Landsat-4,5 (TM) Landsat 7 (ETM+)	Панхром Один з 7 кан.	30 м 15 м 30 м	50\$ (185×185 км) 150\$ (185×185 км)* 50\$ (185×185 км)* 425\$ – нове замовлення 250\$ – міжнародний архів
2	SPOT (HRV)	Кольорові панхром, кольорові панхром, кольорові панхром, кольорові	2,5 м 2,5 м, 5 м 5м, 10 м 10 м, 20 м	8100 євро (60×60 км) 5400 євро (60×60 км) 2700 євро (60×60 км) 1900 євро (60×60 км)
3	IRS	PAN LISS-3	5.8 м. 23,5 м	1470 \$ (70×70 км) * 400 \$ (142×142 км)*
4	IKONOS	Панхром пан +мультисп.	1 м 4 м	235 грн./км ² 269 грн./км ²
5	QuickBird	пан +мультисп.	0,6 м	\$16 / км ² – міжнародний архів \$21 / км ² – нове замовлення
6	ERS (ERS SAR, Envisat ASAR)	радіолокаційні	25 м 150 м	400 євро (56-100×100 км) 100 євро (56-100×100 км)

* Ціни продавця

Як ми бачимо з табл. 8.4, ціна прямо пропорційна до якості зображення.

8.2.5. Картографічні супутникові системи та Україна

Українська наземна космічна інфраструктура дає змогу забезпечувати управління та приймати інформацію від супутників вітчизняного та закордонного виробництва. За роки незалежності в Україні здійснено 85 запусків ракет-носіїв українського виробництва, за допомогою яких запущено 184 супутники різноманітного призначення. Україна бере активну участь у розробленні програми наукових досліджень на Міжнародній космічній станції, у програмі створення Європейської навігаційної системи “Галілео” (2005 р.), у глобальній системі спостереження Землі GEOSS та багатьох інших. Інформація дистанційного зондування користується широким попитом для різних потреб і в Україні. Завдяки допомозі уряду США до Українського центру менеджменту землі та ресурсів (УЦМЗР) було передано архів знімків Landsat 4 за 1988 р. на всю територію України. Наступні нові такі знімки з Landsat 7 були придбані УЦМЗР за 1999–2000 рр. Використання як архівних, так і нових знімків дає змогу легко оцінити зміни у конкретному регіоні. Такі знімки були використані для оновлення топографічної основи гірських територій Закарпаття і Криму, для Чорнобильської зони відчуження і Азово-Чорноморського регіону, оцінки землекористування навколо окремих об’єктів та територій природно-заповідного фонду, і навіть для виявлення слідів на знімках від пожеж чи сінокосіння віком 4 і більше років (заповідник Асканія-Нова). Повніша та детальніша інформація про участь України в космічних програмах та в міжнародній співпраці подається регулярно на офіційному сайті Національної космічної агенції України (НКАУ).

8.3. Теоретичні основи космічної фотограмметрії

8.3.1. Завдання космічної фотограмметрії

Серед багатьох наукових і прикладних завдань космічної фотограмметрії домінують такі:

- побудова глобальних високоточних опорних мереж на планетах і супутниках;
- картографування небесних тіл, зокрема земної поверхні.

Без розв'язання першої задачі неможливе картографування планет, бо опорна мережа є основою для створення карт у різноманітних картографічних проекціях. Якщо для Землі опорні мережі можна створити геодезичними методами (триангуляція, трилатерація тощо), то для інших планет Сонячної системи ці методи неприйнятні – туди людина поки що не долетіла. Тому метод аналітичної космічної фототриангуляції є незамінним.

Створення карт для планет та їхніх супутників – величезне за науковою вагою завдання. Саме карти як “образ простору та інформація” дають людству можливості ближче пізнати світ, заглянути в такі віддалені куточки простору, до яких навіть потужні помічники астрономів – телескопи – не могли дістатися. Основним джерелом даних під час картографування небесних тіл є космічні знімки, отримані з АМС або штучних супутників (для Землі). Для розв'язання обох задач використовуються інші додаткові дані в різних комбінаціях: орбітальні параметри польоту АМС або супутника, знімки зоряного неба, лазерні віддалеміри, встановлені на борту АМС або супутника, наземні траєкторні вимірювання (лазерні, радіотехнічні тощо).

Для задач космічної фотограмметрії сформульовано певні математичні моделі, – або простіші, або складні. Ці моделі увібрали в себе відомості з небесної механіки, астрометрії, вищої геодезії, астрономії та суміжних наукових дисциплін. Нижче подамо в стислій формі основні потрібні нам відомості, без яких подальше сприйняття матеріалу ускладнене.

8.3.2. Відомості про орбітальний рух

АМС або ШСЗ здійснює політ у просторі по кеплерівській еліптичній орбіті, в одному з фокусів якої розташований центр планети (рис. 8.7). У теорії незбуреного руху приймається, що супутник (АМС) обертається навколо сферичної поверхні планети, для якої маса та сила ваги абсолютною рівномірно розподілені. У цьому ідеальному випадку всю масу планети можна подати як зосереджену в одній точці і розглядати рух супутника у гравітаційному полі, створеному центром мас планети.

У реальності рух супутника є збуреним, і це спричиняється неоднорідністю гравітаційного поля планети, опором атмосфери, притяганням Сонця та інших небесних тіл, тиском сонячного випромінювання. Вплив цих чинників можна

описати і врахувати. Це дає змогу обчислити на будь-який момент часу положення супутника на орбіті та складові швидкості його переміщення з інтегрування диференційних рівнянь руху. Для цього треба знати шість параметрів – початкові умови руху та деякі характеристики планети.

Визначення початкових умов руху – початкових координат станції x_0, y_0, z_0 та складових швидкості переміщення станції V_x, V_y, V_z для деякої початкової епохи t_0 з даних орбітальних спостережень, виконаних за період $t - t_0$, називають визначенням орбіти.

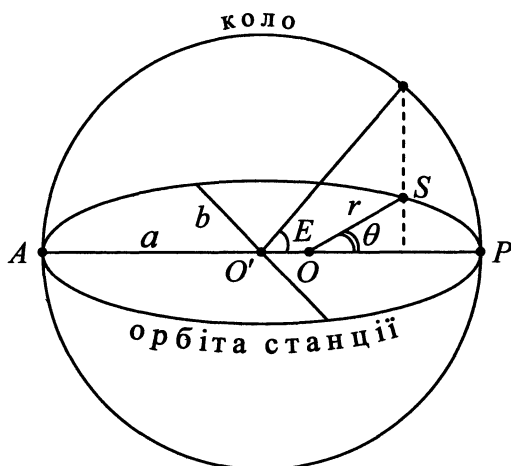


Рис. 8.7. Еліптична орбіта (за Кеплером) та її основні елементи

На рис. 8.7 показано основні елементи орбіти АМС (або супутника). Тут:

O' – центр еліптичної орбіти;

O – центр планети, розташованої в одному з фокусів еліпса;

S – положення супутника на орбіті;

A – апоцентр (найдалша точка орбіти від центру планети).

P – перицентр (найближча точка орбіти до центра планети);

a, b – велика та мала півосі еліпса;

r, θ – полярні координати супутника (довжина планетоцентричного вектора та істинна аномалія супутника);

E – ексцентрична аномалія супутника.

Подано основні формули для обчислень параметрів орбіти. Ексцентриситет орбіти:

$$e = \frac{AO - OP}{2a}. \quad (8.1)$$

Планетоцентрична віддаль r :

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta}. \quad (8.2)$$

Істинна аномалія θ на момент часу t :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\sqrt{1 + e^2}}{\cos E - e} \sin E, \quad (8.3)$$

причому ексцентричну аномалію E отримують з виразу:

$$E - E \sin E = \frac{\sqrt{\mu}}{a^{3/2}} (t - \tau), \quad (8.4)$$

де μ – гравітаційна стала планети, геофізична константа;

τ – час проходження станції через перицентр орбіти P .

Рух супутника по орбіті описується трьома законами Кеплера.

Перший закон Кеплера: супутник рухається по еліпсу, в одному з фокусів якого – центр мас планети.

Другий закон Кеплера: рух супутника по орбіті (еліпсу) відбувається так, що радіус-вектор описує рівні площі за рівні часові інтервали.

Третій закон Кеплера: квадрати періодів обертання двох будь-яких супутників відносяться як куби великих півосей їхніх орбіт:

$$\left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2 = \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^3. \quad (8.5)$$

Наслідком цього закону є формула для обчислення періоду обертання супутника навколо планети

$$T = 2\pi \frac{a^{3/2}}{\sqrt{\mu}}. \quad (8.6)$$

Модель кеплерівського руху є першим наближенням. Реальний рух є значно складнішим, тому говорять про збурений рух супутника, а основними збурювальними факторами є:

- відхилення реального гравітаційного поля планети від ідеального;
- збурювальний вплив Сонця та планет;
- атмосферне гальмування у верхніх шарах атмосфери;
- вплив магнітного і теплового полів планети;

- сонячне випромінювання;
- дія заряджених і нейтральних частинок.

Як збурений, так і незбурений рух супутника описується системою диференціальних рівнянь, а розв'язок їх подається у вигляді шести інтегралів. Математичні вирази для таких рівнянь наводяться в літературі, а збиранням та опрацюванням даних про рух супутників займаються спеціалізовані центри. Результати інтегрування найчастіше подаються для конкретних супутників через рівні часові інтервали. Користувачеві-фотограмметристу залишається отримати такі дані та здійснити інтерполювання положення та швидкості супутника на конкретні часові моменти знімання.

8.3.3. Системи координат, вживані у космічній фотограмметрії

Космічний апарат (КА) обертається навколо планети під дією гравітаційних та інших сил. Тому необхідно використати такі системи координат, які адекватно фіксують такий орбітальний рух. Основною вимогою до такої системи є інерційність. Будь-яка система відліку, в якій вільна матеріальна точка рухається рівномірно та прямолінійно, називається інерційною. Для супутників використовують екваторіальну геоцентричну систему координат (рис. 8.8). Для Землі як планети початок знаходиться в центрі мас Землі, вісь ox скерована в точку весняного рівнодення γ , вісь oz співпадає з віссю обертання Землі, а вісь oy скерована перпендикулярно до площини xoz вправо.

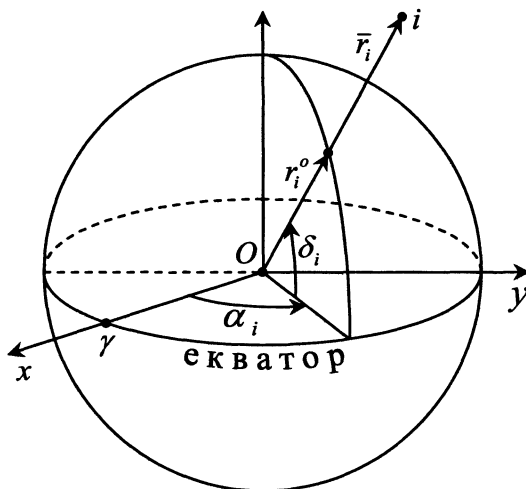


Рис. 8.8. Інерційна (екваторіальна) система координат

Розміщення матеріальної точки i визначається вектором \vec{r}_i , фіксується такими величинами: r_i – геоцентричним радіусом, α_i – прямим сходженням, δ_i – схиленням. Якщо ж хочемо зафіксувати її прямокутні координати у системі $oxyz$, то маємо:

$$\begin{aligned}x &= r \cos \alpha \cos \delta \\y &= r \sin \alpha \cos \delta \\z &= r \sin \delta.\end{aligned}\tag{8.7}$$

Зворотне перетворення дає:

$$\begin{aligned}\alpha &= \arctg y / x \quad (0 \leq \alpha \leq 24^4) \\ \delta &= \arctg \left(z / \sqrt{x^2 + y^2} \right) \quad (-90^0 \leq \delta \leq 90^0) \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}.\end{aligned}\tag{8.8}$$

Екваторіальна система координат безперервно змінює своє розміщення через вплив прецесії (рух осі власного обертання по коловій конічній поверхні; тоді точка весняного рівнодення зміщується; загальна річна прецесія для Землі становить 50,3") та нутації (коливання земної осі чи осі Світу, зумовлені збуренням Сонця і Місяця). Для того, щоб така система стала інерційною, її необхідно зафіксувати на певну епоху T_0 , якою прийнята епоха $T_0 = 2000,0$. Інерційна система координат встановлюється каталогами координат зірок. У космічній фотограмметрії використовують каталог Смітсоніанської астрофізичної обсерваторії (SAOC), створений на підставі спостережень більше ніж 250 тис. зірок.

Для фіксації положення точок земної поверхні інерційна система незручна, бо треба вказати ще й час, якого стосуються ці координати. Адже через вплив гравітаційних сил полюси Землі змінюють своє положення на поверхні планети. Тому для Землі прийнята Грінвіцька геоцентрична система координат (рис. 8.9). Тут початок O збігається з центром мас Землі, вісь oz скерована в середній Північний полюс Землі, вісь ox лежить у площині геоцентричного Грінвіцького меридіана та площині екватора. Вісь oy доповнює цю систему до просторової прямокутної, як показано на рис. 8.9.

У літературі наводяться формули, за якими можна від істинних інерційних координат α, δ зафіксованих на епоху t , перейти до грінвіцьких координат.

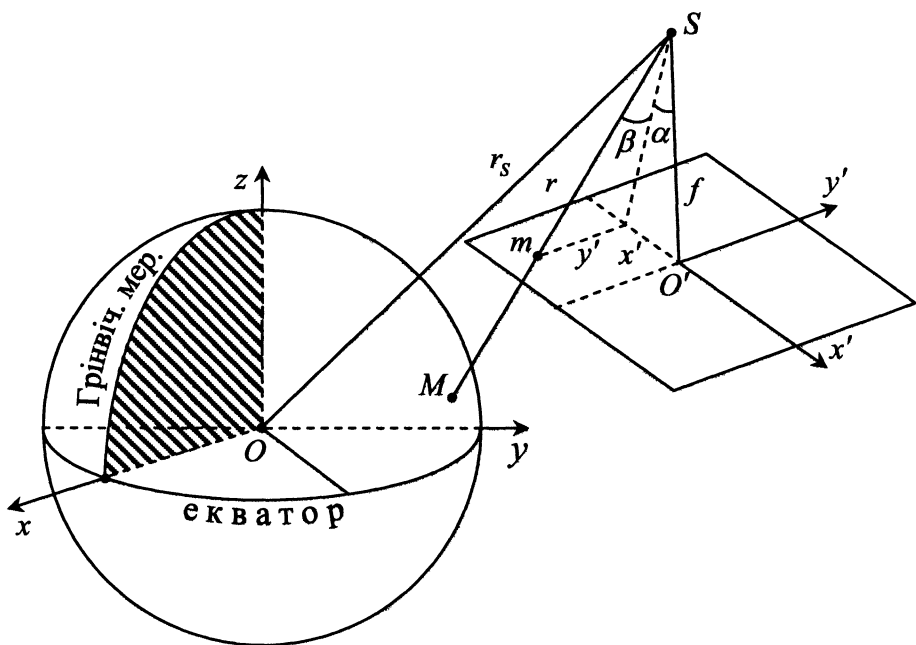


Рис. 8.9. Грінвіцька система координат
(Північний полюс – середнє значення у 1900–1905 рр.,
площина екватора – середнє положення у 1900–1905 рр.)

У фотограмметрії (як і в геодезії) широко використовуються геодезичні системи координат. Початок геодезичної системи, як правило, не збігається з центром мас Землі, проте осі координат майже паралельні до осей грінвіцької системи. Розбіжність становить 1-2" і встановлюється на підставі високоточних астрономічних спостережень. Для конкретної математичної моделі еліпсоїда для Землі – т. зв. референц-еліпсоїда – геодезичні координати точки задаються широтою B , довготою L та висотою H (див. п. 2.3).

Для вивчення планет (побудова опорних мереж та картографування) використовують планетоцентричні та планетографічні системи координат. Вони зв'язані з прийнятою для планети референц-поверхнею.

У планетоцентричній системі початок розміщений у центрі мас планети, вісь z збігається з положенням середньої осі обертання планети, площина xy збігається з площиною середнього екватора. Тут бачимо повну аналогію з рис. 8.9, проте замість Грінвіцького меридіана треба взяти щось своє. Таким нульовим меридіаном є меридіан, що проходить через наперед вибрану точку планети. Наприклад, для Меркурія це кратер Хун Кал; для Марса – це кратер – Ері-О; для Юпітера та Сатурна нульові меридіани виводять з вимірів магнітних полів.

Планетоцентричні широти φ і довготи λ як сферичні координати зв'язані з просторовими прямокутними координатами рівняннями, аналогічними до (8.7).

$$\begin{aligned}x &= r \cos \alpha \cos \lambda \\y &= r \cos \varphi \sin \lambda \\z &= r \sin \varphi.\end{aligned}\tag{8.9}$$

У літературі подаються формули для переходу від прямокутних координат для стандартної епохи до прямокутних координат в описаній планетоцентричній системі. Для цього використовують дані МАС (Міжнародного астрономічного союзу) для кожної планети: координати північного полюсу обертання та напрямку нульового меридіана (на епоху В 1950 або на епоху 2000).

Для картографування поверхні планет використовують планетографічну систему. В ній положення точки задається широтою φ' , довготою λ' та висотою H .

Планетографічна широта φ' – кут між нормаллю до референц-поверхні та площиною екватора планети.

Планетографічна довгота λ' – кут, вимірюваний по екватору від нульового меридіана до меридіана точки.

Планетографічна висота H – віддаль по нормалі від точки до поверхні референц-еліпсоїда.

Планетоцентричні та планетографічні координати обчислюють так:

$$\operatorname{tg} \varphi = \left(\frac{c}{a} \right)^2 \operatorname{tg} \varphi' = (1 - e)^2 \operatorname{tg} \varphi',\tag{8.10}$$

$\lambda = 360^\circ - \lambda'$ (для планет з прямим обертанням);

$\lambda = \lambda'$ (для планет з оберненим обертанням);

$e = \frac{a - c}{a}$ – полярне стиснення;

a – екваторіальний радіус;

c – полярний радіус.

Згідно з рекомендаціями МАС для планет із прямим обертанням довготи ростуть від 0° до 360° від нульового меридіана праворуч, а для зворотного обертання – ліворуч.

8.3.4. Визначення планетоцентричних координат точок планети із застосуванням кадрових систем

Кадрова знімальна система дає змогу отримати знімок (образ) як центральну проекцію, в якій точка зображення визначається або прямокутними координатами $(x, y - f)$, або сферичними координатами (α, β, r) (рис. 8.9).

Отримуючи формули, що зв'язують точку m знімка з точкою M поверхні планети, виходять з наявності вихідних даних, які можуть бути у різних комбінаціях. Наприклад, можуть бути відомі кутові елементи орієнтації знімальної камери в системі космічного апарата, або ж кутове орієнтування камери та елементи орбіти в планетоцентричній системі координат на конкретну епоху t , прецесійні елементи як відхилення епохи t від стандартної епохи 2000, чим визначається положення нульового меридіану та Північного полюса планети.

Як видно з рис. 8.9, для точок S , m , M справедлива умова колінеарності; тому за повною аналогією з аерозніманням запишемо класичні рівняння:

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{(X - X_S)a_1 + (Y - Y_S)b_1 + (Z - Z_S)c_1}{(X - X_S)a_3 + (Y - Y_S)b_3 + (Z - Z_S)c_3}, \\ y &= -f \frac{(X - X_S)a_2 + (Y - Y_S)b_2 + (Z - Z_S)c_2}{(X - X_S)a_3 + (Y - Y_S)b_3 + (Z - Z_S)c_3}, \end{aligned} \quad (8.11)$$

де X_S, Y_S, Z_S – координати центра проекції у планетоцентричній системі;
 X_1, Y_1, Z – координати точки M на поверхні планети у цій самій системі;
 a_i, b_i, c_i – компоненти матриці A (8.12), що описує поступовий перехід від системи координат камери до планетоцентричної системи:

$$A = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_7 A_8 A_9 A_{10} A_{11} A_{12} A_{13} A_{14} A_{15}, \quad (8.12)$$

$$A' = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_7 A_8 A_9. \quad (8.13)$$

Проміжна матриця A' (8.13) теж необхідна для обчислень. Тут кожна з матриць A виконує певну зміну кутової орієнтації, а саме:

A_1, A_2, A_3 – матриці, що визначають положення нульового меридіана та північного полюса обертання планети у поточний момент часу t ; обчислюють за рекомендованими даними МАС, що уже відзначалося раніше;

A_4, A_5, A_6 – матриці, що обчислюють за прецесійними елементами як відхилення епохи на момент знімання від стандартної епохи;

A_7, A_8, A_9 – матриці, що обчислюють за елементами оскулювальної орбіти космічного апарата на момент знімання; ці елементи визначають з формул руху небесних тіл, вони виникають під впливом реального гравітаційного поля, впливу

Сонця та планет атмосферного гальмування, магнітного та теплового полів, сонячної радіації;

A_{10}, A_{11}, A_{12} – матриці, обчислені за кутовими елементами орієнтування координатної системи космічного апарату у геоекваторіальній системі на момент знімання;

A_{13}, A_{14}, A_{15} – матриці, обчислені за кутовими елементами орієнтування камери у координатній системі космічного апарату;

A_{16} – матриця, що описує кутовий перехід θ від планетоцентричної орбітальної системи до планетоцентричної екваторіальної системи (формула (8.3), θ – істинна аномалія орбіти).

Якщо хочемо обчислити координати X, Y, Z для точки M – поверхні планет, то маємо такий вираз:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = A' \cdot A_{16} \begin{bmatrix} r_s \cos \theta \\ r_s \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} + A \begin{bmatrix} r \sin \alpha \cos \beta \\ r \sin \beta \\ -r \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}, \quad (8.14)$$

де r_s – віддаль від центра планети до космічного апарату (КА) (рис. 8.9); визначається за параметрами орбіти на момент знімання.

Віддаль r як віддаль від космічного апарату до точки на поверхні планети обчислюється, якщо відомі дані про рельєф планети. Якщо ж таких даних немає, то беруть віддаль від КА до точки на референц-поверхні. У деяких випадках на КА може працювати лазерний віддалемір, що безпосередньо вимірює таку віддаль.

Використання рівнянь колінеарності (8.8) у космічній фотограмметрії таке саме, як і в аерофотограмметрії: вони становлять базу для космічної фотогріангуляції (див. п. 8.4).

8.3.5. Визначення планетоцентричних координат точок планет із використанням сканерних систем

Для отримання математичних залежностей необхідно брати до уваги геометрію формування зображення. На рис. 8.10 маємо:

S – центр сканувального дзеркала, P – площа зображення; Od – об'єктив; N – піксел у надирі; A – боковий піксел у точці поверхні планети; β – кут сканування; r – віддаль від сканера до точки планети.

Координати точки визначаються згідно з рис. 8.10 так:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ r \sin \beta \\ -r \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (8.15)$$

Тому для загального випадку знімання сканерною системою з лінійною розгорткою з (8.14) маємо:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = A' \cdot A_{16} \begin{bmatrix} r_S \cos \theta \\ r_S \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} + A \begin{bmatrix} 0 \\ r \sin \beta \\ -r \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (8.16)$$

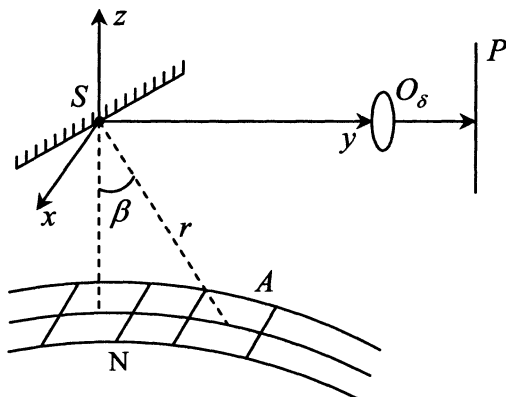


Рис. 8.10. Дія сканера з лінійною розгорткою

Віддаль r_s до планети визначається так само, як і для рівнянь (8.14).

Сучасні сканерні знімальні системи по-різному орієнтовані під час знімання. Найпоширенішими є два способи, які, до речі, дають змогу отримати стереопари:

- системи з постійною орієнтацією центрального променя на центр мас планети;
- системи з постійним кутовим положенням сканера у просторі.

У першому випадку головний промінь сканера розміщений у площині орбіти КА і скерований на центр мас планет, а площина сканування перпендикулярна до площини орбіти КА.

Координати точки планети обчислюють так:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = A' \begin{bmatrix} (r_S - r \cos \beta) \cos \theta \\ (r_S - r \cos \beta) \sin \theta \\ r_S \sin \beta \end{bmatrix}. \quad (8.17)$$

(Нагадаємо, що θ – кут, названий аномалією орбіти; це один із параметрів, що характеризує орбіту КА; r_s – довжина планетоцентричного радіус-вектора КА).

У другому випадку кутове орієнтування сканера (α – поздовжній, ω – поперечний кути та χ – кут розвороту) залишаються постійними.

Координати точки поверхні планет обчислюють так:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = A' \cdot A_{16} \left(\begin{bmatrix} r_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + A_{16}^T \cdot A_\alpha \cdot A_\omega \cdot A_\chi \cdot A_E \cdot A_\beta \cdot \begin{bmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right), \quad (8.18)$$

де

$A_\alpha, A_\omega, A_\chi$ – матриці напрямних косинусів

$$A_\alpha = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A_\omega = \begin{bmatrix} \cos \omega & 0 & \sin \omega \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \omega & 0 & \cos \omega \end{bmatrix}, A_\chi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \chi & -\sin \chi \\ 0 & \sin \chi & \cos \chi \end{bmatrix}, \quad (8.19)$$

$$A_E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, A_\beta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}.$$

8.3.6. Визначення планетоцентричних координат точок планети з даних радіолокаційного знімання

В останні роки набуло широкого поширення радіолокаційне знімання поверхні планети, зокрема Землі. При такому виді знімання є беззаперечні переваги, головна з яких – це незалежність від атмосферного стану (задимленість, хмарність). Радіопромені вільно проникають через атмосферу, а відбитий сигнал від поверхні дає інформацію про радіояскравість елементарної поверхні. Положення точки земної поверхні у просторі визначається віддаллю від радіолокатора до планети, складовою швидкості та елементами осколуювальної орбіти на момент знімання.

При зніманні планети в такому випадку вісь z_p скерована в центр мас планети, а антена радіолокатора відхилена від площини орбіти КА на заданий кут ліворуч або праворуч.

З певних геометричних міркувань (рис. 8.11) та (8.14) можна отримати формули для обчислення просторових координат точки поверхні планети:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = A' \cdot A_{16} \begin{bmatrix} r_s - r \cos \beta_p \\ -r \sin \alpha_p \sin \beta_p \\ r \cos \alpha_p \sin \beta_p \end{bmatrix}, \quad (8.20)$$

де кути α_p, β_p показано на рис. 8.11.

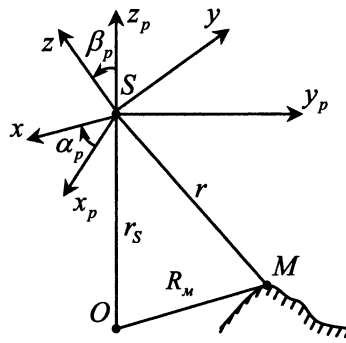


Рис. 8.11. Сферичні координати (орієнтація координатної системи) при радіолокаційному зніманні

Тут: O – центр мас планет; M – точка поверхні планети; S – центр знімання на момент знімання (час t); Sx_p, y_p, z_p – планетоцентрична орбітальна система, α_p, β_p – сферичні координати точки M ; r – довжина радіуса-вектора точки M .

У (8.20) матриця A' обчислюється з виразу (8.19), матриця A_{16} (як і раніше) є такою:

$$A_{16} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8.21)$$

Взагалі кажучи, для створення коректної математичної моделі опрацювання радіолокаційних зображень необхідно знати геометричні засади формування цих образів. Наприклад, у фундаментальній монографії проф. Ю. Тюфліна [19] згадується, що під час радіолокального знімання поверхні Венери були задіяні два різні способи.

Перший, названий “смуговим зніманням”, ґрунтувався на тому, що відбиті від поверхні планет сигнали у межах вузької поверхневої смуги створювали один рядок панорамного образу. Для кожного пікселя смуги були відомі віддаль r , кут β_p та момент часу знімання t . За цими даними можна обчислити координати точки планети в планетоцентричній орбітальній системі.

У другому способі для кожного елемента поверхні планет фіксується час запізнення імпульсу τ (проходження радіоімпульсу до об’єкта і назад) та доплерівське зміщення частоти ν , які зв’язані з віддаллю r та величиною складової швидкості V_r по напрямку на точку поверхні:

$$r = \frac{2r}{c}, \quad v = \frac{2V_r}{\lambda}, \quad (8.22)$$

де c – швидкість світла; λ – довжина хвилі.

Ці дані дають змогу визначити координати точки планети у планетоцентричній орбітальній системі координат.

Подамо приклад–схему знімання з використанням радару бокового бачення із синтезованою апертурою SAR (англ. Synthetic Aperture Radar) на рис. 8.12 а, б.

На рис. 8.12, а показана геометрична схема отримання зображення із супутника. Антена радару має розміри 10м x 1м, довгою стороною зорієнтована в напрямку польоту. Висилає вузькоспрямований пучок радіохвиль під кутом 23° . Роздільна здатність на Землі становить 30х30 м. Віддаль між витками (в проекції на поверхню Землі) становить 300 км, а ширина смуги становить 100 км. Це система безперервної дії.

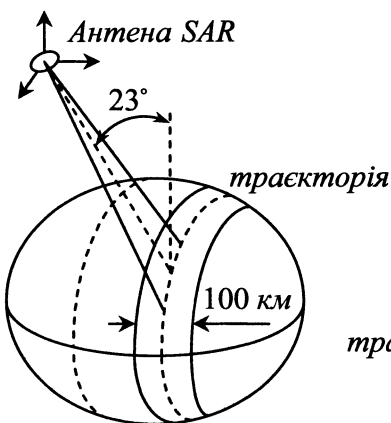


Рис. 8.12, а. Дія SAR у режимі формування зображення

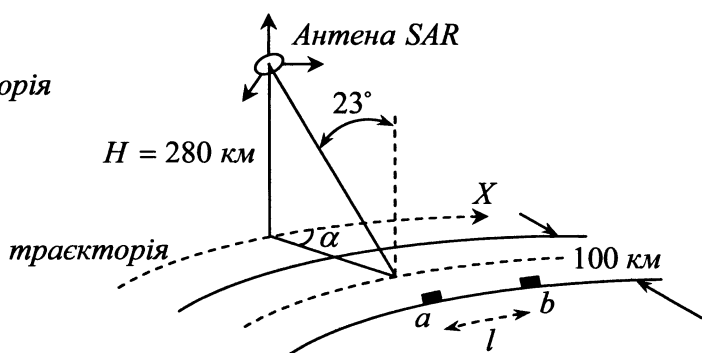


Рис. 8.12, б. Дія SAR у хвильовому режимі

На рис. 8.12, б показана схема т. зв. хвильового способу (SAR WM – від англ. SAR Wave Mode), який використовується для реєстрації невеликих територій a, b, \dots (переважно 5 км x 5 км) на віддалі l (200–300 км). Переважно слугує для оцінки океанічних хвиль за допомогою вимірювання напрямку поширення та їхньої довжини.

8.4.1. Математичні моделі космічної фототріангуляції

Основним завданням космічної фототріангуляції є створення мережі опорних точок планети, а в низці випадків уточнення орбітальних та навігаційних параметрів руху космічного апарату.

Для побудови мереж найбільш придатні кадрові знімки. Проте це не виключає застосування сканерних та радіолокаційних знімальних систем.

Залежно від типу знімальної системи вхідними фотограмметричними величинами є координати точки на знімку та елементи внутрішнього орієнтування (для кадрових систем), координати точок на панорамному зображенні та масштабні коефіцієнти (для сканерних систем), орієнтація радіолокаційного вектора – променя – кути відхилення променя від планетоцентричного радіуса – вектора та віддаль до точки планети (для радіолокаційних систем).

Види опорних даних у космічній фототріангуляції доволі різноманітні. Частково про це згадувалось раніше, а зараз ще раз виокремимо найважливіші:

- координати центрів проекцій знімальної системи на момент знімання, визначені в планетоцентричній геоекваторіальній системі певної епохи, отримані з диференціальних рівнянь руху космічного апарата;
- кутові елементи зовнішнього орієнтування зображень, визначені за допомогою знімків зоряного неба та при відомих параметрах взаємного розташування на космічному апараті знімальної системи та зоряної камери (що фотографує зоряне небо);
- дані радіопрофілювання поверхні планети з космічного апарату;
- дані віддалемірних вимірювань від КА до поверхні планети (лазерні або радіовіддалеміри);
- координати точок поверхні планети в планетоцентричній системі координат, зафіксованої відносно тіла планети.

Можливі різні комбінації з цих опорних даних, і все залежить від конкретної ситуації: від постановки задачі, мети, якої треба досягти, наявного апаратного комплексу тощо.

Загальна математична модель достатньо добре описується рівняннями, поданими в розділі 2, проте в кожній конкретній ситуації є свої особливості. Покажемо це на прикладі фототріангуляції з одночасним визначенням початкових умов руху супутника.

В основу фототріангуляції покладено умову колінеарності для точки поверхні планети M , точки зображення m та центру знімання S (рис. 8.9). Ця умова описується рівняннями (8.11). Якщо задача сформульована так, як вказано вище, то невідомими параметрами є:

- кутові елементи орієнтування знімка (α, ω, χ) , приведені на певний момент знімання t ;
- координати центру проекції X_0, Y_0, Z_0 та складові швидкості руху супутника V_x, V_y, V_z ;
- координати X, Y, Z точки M на поверхні планети.

Оскільки рівняння (8.11) є нелінійними, то необхідно за аналогією до аерофототріангуляції виконати лінеаризацію за всіма шуканими невідомими. Якщо в аерофототріангуляції цих невідомих було 9 (6 елементів зовнішнього орієнтування знімка та 3 – координати точки поверхні), то тут таких невідомих є 13; тому лінеаризовані рівняння (8.11) матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial x}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial x}{\partial \chi} d\chi + \frac{\partial x}{\partial t} dt + \frac{\partial x}{\partial X_0} dX_0 + \frac{\partial x}{\partial Y_0} dY_0 + \frac{\partial x}{\partial Z_0} dZ_0 + \frac{\partial x}{\partial V_x} dV_x + \\ + \frac{\partial x}{\partial V_y} dV_y + \frac{\partial x}{\partial V_z} dV_z + \frac{\partial x}{\partial X} dX + \frac{\partial x}{\partial Y} dY + \frac{\partial x}{\partial Z} dZ + l_x = V_x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial \alpha} d\alpha + \frac{\partial y}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial y}{\partial \chi} d\chi + \frac{\partial y}{\partial t} dt + \frac{\partial y}{\partial X_0} dX_0 + \frac{\partial y}{\partial Y_0} dY_0 + \frac{\partial y}{\partial Z_0} dZ_0 + \frac{\partial y}{\partial V_x} dV_x + \\ + \frac{\partial y}{\partial V_y} dV_y + \frac{\partial y}{\partial V_z} dV_z + \frac{\partial y}{\partial X} dX + \frac{\partial y}{\partial Y} dY + \frac{\partial y}{\partial Z} dZ + l_y = V_y. \end{aligned} \quad (8.23)$$

Позначаючи частинні похідні через $a_x, b_x, \dots, a_y, b_y, \dots$, запишемо (8.23) як класичні рівняння поправок:

$$\begin{aligned} a_x \delta \alpha + b_x \delta \omega + c_x \delta \chi + d_x \delta t + e_x \delta X_0 + f_x \delta Y_0 + g_x \delta Z_0 + \\ + h_x \delta V_x + i_x \delta V_y + j_x \delta V_z + k_x \delta X + m_x \delta Y + n_x \delta Z + l_x = V_x, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_y \delta \alpha + b_y \delta \omega + c_y \delta \chi + d_y \delta t + e_y \delta X_0 + f_y \delta Y_0 + g_y \delta Z_0 + \\ + h_y \delta V_x + i_y \delta V_y + j_y \delta V_z + k_y \delta X + m_y \delta Y + n_y \delta Z + l_y = V_y. \end{aligned} \quad (8.24)$$

Якщо виміри на знімках були некорельовані та рівноточні, то вагова матриця $P_1 = E$, тобто буде одиничною.

Переходячи до матричного запису, з (8.24) отримаємо рівняння поправок:

$$B_1 \cdot \delta_1 + B_2 \cdot \delta_2 + B_3 \cdot \delta_3 + L_F = V_F, \quad (8.25)$$

$$\begin{aligned}
\delta_1 &= (\delta\alpha \quad \delta\omega \quad \delta x \quad \delta t)^T, \\
\delta_2 &= (\delta X_0 \quad \delta Y_0 \quad \delta Z_0 \quad \delta V_x \quad \delta V_y \quad \delta V_z)^T, \\
\delta_3 &= (\delta X \quad \delta Y \quad \delta Z)^T.
\end{aligned} \tag{8.26}$$

Якщо політ супроводжувався фіксацією кутів нахилу знімка, були відомі початкові умови руху супутника та координати точки на поверхні планети, то всі величини виступають як опорні дані, що підлягають уточненню. Тому до рівнянь (8.25) додаються:

$$\begin{aligned}
\delta\alpha + (\alpha - \alpha_0) &= V_\alpha \\
\delta\omega + (\omega - \omega_0) &= V_\omega \\
\delta\chi + (\chi - \chi_0) &= V_\chi \\
\delta t + (t - t_0) &= V_t
\end{aligned} \tag{8.27}$$

$$\begin{aligned}
\delta X_0 + (X_0 - X'_0) &= V_{X0} \\
\delta Y_0 + (Y_0 - Y'_0) &= V_{Y0} \\
\delta Z_0 + (Z_0 - Z'_0) &= V_{Z0} \\
\delta V_x + (V_x - V_{ox}) &= V_X \\
\delta V_y + (V_y - V_{oy}) &= V_Y \\
\delta V_z + (V_z - V_{oz}) &= V_Z
\end{aligned} \tag{8.28}$$

$$\begin{aligned}
\delta X + (X - X') &= V_X \\
\delta Y + (Y - Y') &= V_Y \\
\delta Z + (Z - Z') &= V_Z,
\end{aligned} \tag{8.29}$$

тут $\alpha_0, \omega_0, \chi_0, t_0, \dots$ – початкові значення невідомих.

Для параметрів, що входять в рівняння (8.27), (8.28), (8.29) відомі коваріаційні матриці K_2, K_3, K_4 і відповідно вагові матриці:

$$P_2 = K_2^{-1}, \quad P_3 = K_3^{-1}, \quad P_4 = K_4^{-1}. \tag{8.30}$$

Переписавши (8.27) – (8.29) у вигляд матриць, долучивши їх до (8.25), отримаємо систему рівнянь поправок:

$$B_1 \cdot \delta_1 + B_2 \cdot \delta_2 + B_3 \cdot \delta_3 + L_F = V_F, \quad \text{вагова матриця } P_F$$

$$\delta_1 + L_1 = V_1, \quad \text{вагова матриця } P_1 \quad (8.31)$$

$$\delta_1 + L_1 = V_2, \quad \text{вагова матриця } P_2$$

$$\delta_1 + L_1 = V_3, \quad \text{вагова матриця } P_3.$$

Застосовуючи умову мінімізації суми квадратів поправок, переходять до нормальних рівнянь та отримують розв'язок з оцінкою точності; це класичний прийом методу найменших квадратів, який застосований та описаний у розділі 2.

Якщо записати сукупність (8.31) у вигляді

$$A \cdot X + L = V, \quad \text{вагова матриця } P, \quad (8.32)$$

то розв'язок з оцінкою точності матиме вигляд

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L, \quad (8.33)$$

$$\mu^2 = (V^T P V) / (n - k), \quad (8.34)$$

де μ – ср. кв.похибка одиниці ваги; отримана коваріаційна матриця вирівняних величин дає змогу оцінити точність кожного визначуваного параметру (за аналогією з фототріангуляцією).

Структура нормальних рівнянь, з яких отримуємо розв'язок (8.33), доволі складна як для космічної фототріангуляції одного витка (маршруту), так і для блока космічних знімків.

У зв'язку з тим, що в останнє десятиліття значно виросли можливості комп'ютерної техніки, то став можливим прямий розв'язок системи нормальних рівнянь, не вдаючись до тих комбінацій, які раніше застосовували, щоб ефективно використати об'єм оперативної пам'яті комп'ютера і зменшити витрати часу на обчислювальні процедури.

На відміну від аерофототріангуляції, тут виникає проблема обчислення матриць часткових похідних, які прийнято називати ізохронними похідними. Складність полягає в тому, що рух ШСЗ є нерівномірним і здійснюється під впливом різних сил. Модель руху описується трьома диференціальними рівняннями другого порядку, куди входять похідні від гравітаційного поля Землі, прискорення спричинені опором атмосфери та кутова швидкість обертання Землі. Якщо супутник має високу орбіту, то впливом атмосфери для обчислень матриці B_2 можна знехтувати. Натомість для низьких орбіт цей вплив треба враховувати. Проте ця проблема не є нерозв'язною, і розроблено аналітичні та обчислювальні способи отримання матриці B_2 .

8.4.2. Відомості про створені опорні мережі на об'єктах Сонячної системи

Дослідження Місяця

Початок у створенні опорної мережі Місяця датовано 1965 роком, коли отримані космічні знімки з автоматичної станції “Зонд-3” (СРСР). Опрацьовані зображення методом оберненої фотограмметричної засічки з використанням 38 опорних точок Збірного каталогу Головної астрономічної обсерваторії Академії наук України дали змогу створити мережу з 59 пунктів, зокрема на поверхню зворотного боку Місяця. Подальше опрацювання дало змогу створити каталог координат, що містив більше ніж 3000 точок місячної поверхні, а відтак це було підставою для отримання повної карти Місяця у масштабі 1:5 000 000.

У наступні роки використано знімки, отримані зі станцій “Зонд-6” та “Зонд-8”. Побудована опорна мережа із 300 пунктів поширилась на зворотний бік Місяця та лібраційну зону.

Зображення, отримані з автоматичних станцій Appollo-15, Appollo-16 та Appollo-17 (1971–1972 рр.), дали змогу побудувати опорну мережу з 5000 точок, причому мережа покрила близько 20 % поверхні Місяця. Як вихідну інформацію використано параметри орбіти, дані лазерного висотоміра та знімки зоряного неба (додаткова камера). Сумісне опрацювання цих даних з фотограмметричними вимірами та вирівнювання блочної фототріангуляції показали, що просторові координати точок мережі отримано з точністю близько 30 м.

За матеріалами телевізійного знімання та радіопрофілювання, отриманими зі станції “Луна-22” (СРСР, 1974 р.), створено каталог селеноцентричних координат точок в екваторіальній частині Місяця.

Дослідження Марса

На всю територію планети побудована опорна мережа із зображень, отриманих станцією “Марінер-9” (США, 1971 р.). Ця мережа налічує 3000 пунктів. Вихідні зображення отримані телекамерою з фокусною віддаллю 52 мм, роздільна здатність приймача становила 700x832 елементи. Точність отриманих координат у планетоцентричній системі оцінено величиною 5 км.

Телевізійні зображення, отримані зі станцій “Вікінг-1” та “Вікінг-2” (США, 1982 р.), були підставою для повторного вирівнювання опорної мережі та координування нових пунктів. Всього їх було близько 7000.

Фототелевізійне знімання зі станцій “Марс-4” і “Марс-5” (СРСР, 1974 р.) дало мережу з 184 точок марсіанської поверхні. Частково використані координати опорних точок, отримані з американських опрацювань.

Дослідження Венери

Як відомо, поверхня Венери закрита товстим шаром атмосфери, що унеможливорює спостереження у видимому діапазоні світла. Тому оснований метод радіолокаційного знімання та радіопрофілювання. Основна інформація – це радіолокаційні панорами, віддалі до точок поверхні планет та орбітальні параметри. Як визначувані точки вибирали чітко розпізнані контури на панорамних зображеннях,

Комп'ютерна модель рельєфу Венери
побудована за даними АМС "Магеллан".

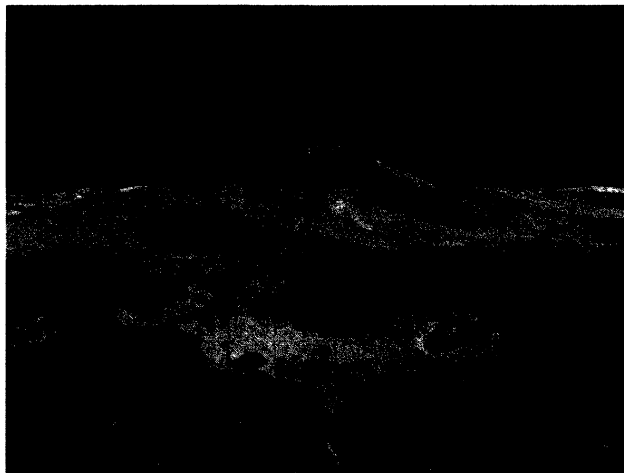


Рис. 8.13. Просторовий образ поверхні Венери,
отриманий з КА "MAGELLAN"

і почала передавати радіолокаційні знімки поверхні. Одним із результатів картографування була гравіметрична карта, що покрила 95 % поверхні планети. За даними знімання були побудовані перспективні образи, один з яких показаний на рис. 8.13.

Дослідження інших планет та супутників

За даними телевізійного знімання зі станції "Марінер-10" (1974, 1975 рр.) побудована опорна мережа для Меркурія, у яку входить 2400 точок. Точність координування оцінюється в 10 км для південних полярних районів і 25 км – для північних. Покриття поверхні планети становить близько 45 %.

Отримані зображення зі станції "Вояджер-1" і "Вояджер-2" (США, 1979, 1979, 1981, 1984 рр.) були підставою для досліджень поверхонь супутників Юпітера (Іо, Європа, Ганімед, Калісто).

Опорні мережі побудовано також для супутників Сатурна (Мінас, Енцелад, Тефій, Діон, Рей, Япет). За даними "Марінер-9" опрацьовано зображення поверхні Фобоса – супутника Марса, та отримано координати 260 точок.

що перекриваються. Перші радіолокаційні знімки Венери отримані зі станції "Піонер-Венера" (США, 1978 р.), які дали змогу отримати карту поверхні планети у масштабі 1:50 000 000 з точністю у плані 30 км, по висоті 700 м.

Значним досягненням було картографування планети з використанням радіолокаційних панорам, отриманих зі станцій "Венера-15" та "Венера-16" (СРСР, 1983 р.). Побудовано карту в масштабі 1:5 000 000, яка покривала $\frac{1}{4}$ поверхні планети з точністю в плані 0,9 – 2,5 км, по висоті 30 м. У картографуванні планети особливу роль відіграв колектив московських фотограмметристів на чолі з професором Ю. Тюфліним.

У 1989 році NASA запустило станцію "Магеллан", яка вийшла на орбіту у серпні 1990 р.

8.5. Космічна фотограмметрія для картографування території

Ще в недалекому минулому основним продуктом картографічних робіт (а фотограмметричні методи і технології тут домінували) вважалась карта, точніше топографічна карта. Сьогодні через кардинальні зміни в техніці і технологіях можемо говорити уже про розширений перелік картографічних продуктів. До них належать:

- топографічна карта з графічним відображенням ситуації та рельєфу;
- цифрова карта з ситуаційним та рельєфним змістом;
- цифрова ортофотокарта з фотографічним зображенням ситуації та графічним відображенням рельєфу;
- цифрова модель рельєфу.

До кожного з видів цих продуктів ставляться певні технічні вимоги.

Традиційна топографічна карта будується в заданому масштабі, і ставиться вимога до точності відображення контурів (0,2 – 0,3 мм у масштабі карти) та до точності відображення рельєфу ($\frac{1}{2}$ – $\frac{1}{4}$ перетину рельєфу залежно від типу рельєфу). Важливою є вимога до картографічного змісту карти, його наповнення – які об'єкти повинні бути відображені, а які на карті не показують.

Для цифрової карти масштаб карти в безпосередньому вираженні не має сенсу, бо всі елементи ситуації подаються в натуральному вираженні, у прийнятій абсолютній системі координат. Проте необхідно знати точність отримання ситуації та рельєфу, що так чи інакше опосередковано впливає з масштабу карти.

Цифрова ортофотокарта теж не має масштабу, оскільки зберігається в пам'яті комп'ютера піксельно. Для неї важливим показником є розмір пікселя на землі та похибка визначення елемента ситуації в натурі. Звичайно, така ортофотокарта може бути надрукована. І ось тоді можна говорити про масштаб ортофотокарти.

Про цифрову модель рельєфу (ЦМР) детальні відомості подано в розділі 5. Тут зауважимо, що основними характеристиками ЦМР є структура даних: сітка (GRID) або мережа пунктів (TIN), точність визначення висоти будь-якої точки ЦМР, розмір комірки на землі (для GRID) або середня віддаль між точками (для TIN).

Зважаючи на те, який картографічний продукт хочемо отримати та спираючись на наявний досвід, можна спроектувати використання даних космічного знімання для практичного використання. Звичайно, для цього треба вивчити реальні можливості тих чи інших космічних знімальних систем, і дуже часто не покладатись на інформацію від фірми-виробника, оскільки такі дані можуть мати рекламний характер.

Теоретичним базисом для оцінки придатності зображень для картографування є роздільна здатність (часто вживають термін “просторова роздільна здатність”) та радіометрична характеристика (амплітудна роздільна здатність – здатність передавання ступенів сірого або кольорів).

З геометричним показником точності космічних систем ситуація доволі оптимістична. Враховуючи, що графічна точність карти становить $p = 0,2$ м (у масштабі карти), отримаємо такі вимоги до точності відображення контурів (масштаб – точність): 1:10 000 – 2 м; 1:25 000 – 5 м; 1:50 000 – 10 м; 1:100 000 – 20 м; 1:200 000 – 40 м.

Розмір пікселя P на землі, що дає та чи інша знімальна система, залежить від якості самої системи та висоти польоту космічного апарата. Такі дані наводяться у

різних літературних джерелах; нами вони подані у табл. 8.5. Враховуючи точність відображення контуру, отримаємо максимальне значення знаменника масштабу карти:

$$\frac{1}{M} = p / P.$$

Таблиця 8.5

Космічний апарат			Масштаб карти
	Канали, м	Роздільна здатність P , м	
Landsat 7	багатоспектр.	30	1:150 000
IRS – 1C	багатоспектр.	23,5	1:117 000
SPOT 1-4	багатоспектр.	20	1:100 000
SPOT 4	панхром	10	1:50 000
IRS – 1C	панхром	5,8	1:29 000
SPOT 5	панхром	5	1:25 000
IKONOS	багатоспектр.	4	1:20 000
EROS A	панхром	2,4	1:12 000
IKONOS	панхром	1	1:5 000
EROS B	панхром	0,7	1:3 500
Quick Bird	панхром	0,6	1:3 000

Як бачимо, за геометричними показниками деякі космічні системи придатні навіть для великомасштабного топографічного картографування. Значно гірша картина з можливостями дешифрування зображень. З експериментальних досліджень встановлено, що для створення карти у масштабі 1:10 000 піксел на землі не повинен перевищувати 0,65 м; відповідно для карти у масштабі 1:25 000 до 1 м, для карти 1:50 000 до 1,75 м. Це означає, що сучасні знімальні системи навіть з найкращими показниками призначені для створення карт у масштабі 1:25 000 і не більше.

Тепер розглянемо коротко основні технологічні особливості космічної фотограмметрії для картографування територій.

Формування стереопар

Для створення топографічної карти чи ЦМР потрібна стереомодель поверхні. Космічне стереознімання має певні особливості порівняно з аерозніманням. Відомі три способи такого знімання.

Перший спосіб (рис. 8.14) аналогічний до аерознімання: з одного витка знімають поверхню на дві лінійки сенсорів, одна з яких фіксує надирне зображення, а друга – з відхиленням вперед. Такі два образи утворюють стереопару.

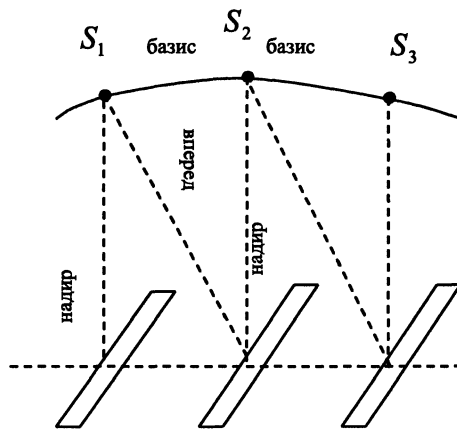


Рис. 8.14. Геометрія стереознімання з одного витка на дві лінійки сенсорів

Другий спосіб (рис. 8.15) полягає у зніманні тієї самої поверхні, але зі зміною кутової орієнтації сенсора. Послідовне переміщення носія з позиції 1 до 2 дає зображення поверхні без зміни орієнтації системи.

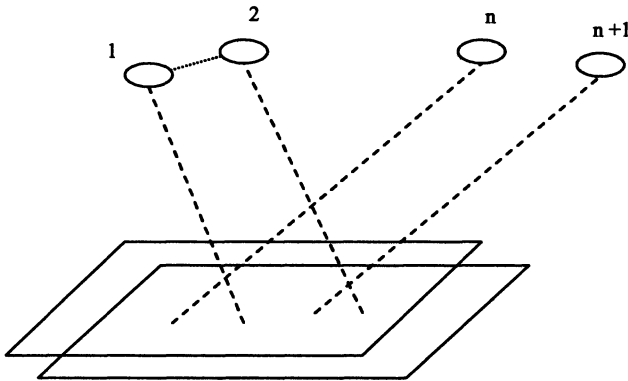


Рис. 8.15. Геометрія стереознімання зі зміною орієнтації системи

Коли ж носій у позиції $n, n+1$ то змінюється спрямування сенсора на ділянку знімання, і з таких двох різно зорієнтованих зображень отримують стереопару.

Третій спосіб (рис. 8.16) стосується знімання з двох різних витків або з двох різних супутників.

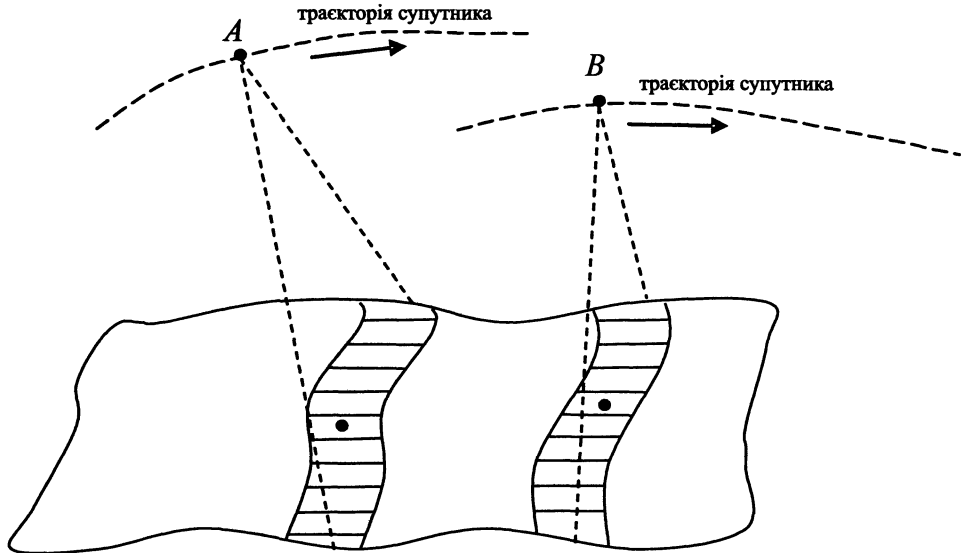


Рис. 8.16. Знімання території з двох різних супутників

Тут показано смугу знімання для супутника A та смугу для супутника B на один і той самий момент часу. Очевидно, при неперервному зніманні можна сформулювати стереомодель поверхні.

Отже, до фотограмметричного опрацювання надходять стереозображення, які дають змогу отримати просторову модель поверхні. Проте досягнення потрібної геометричної якості кінцевого продукту передбачає спеціальне фотограмметричне опрацювання.

Доволі часто цей підхід називають геометричною корекцією космічних зображень. Отже, задача полягає у знаходженні взаємозв'язку між точками на зображенні та точками відзнятої поверхні об'єкта за невідомих елементів внутрішнього та зовнішнього орієнтування.

Поліноміальні моделі типу 2D мають вигляд:

$$\begin{aligned} x &= a_0 + a_1X + a_2Y + a_3X^2 + a_4XY + a_5X^2 + \\ y &= b_0 + b_1X + b_2Y + b_3X^2 + b_4XY + b_5X^2 + \end{aligned} \quad (8.35)$$

Поліноміальні моделі типу 3D є такими:

$$\begin{aligned} x &= a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4X^2 + a_5XY + a_6XZ + \\ y &= b_0 + b_1X + b_2Y + b_3Z + b_4X^2 + b_5XY + b_6XZ + \end{aligned} \quad (8.36)$$

В обох моделях невідомими є коефіцієнти a_0, \dots, b_6, \dots . Їхня кількість залежить від наперед вибраного полінома. Для знаходження невідомих треба мати певну кількість опорних точок (нагадуємо, що це точки поверхні об'єкта з відомими просторовими координатами X, Y, Z , розпізані на зображенні; для них виміряні плоскі прямокутні координати x, y).

Застосування поліноміальних моделей доволі обмежене, бо вимагає значної кількості опорних точок, є чутливим до їхнього розташування на зображенні, до помилок розпізнавання та відбракування неякісних даних.

Модель проективного перетворення має вигляд:

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4 X^2 + a_5 XY + a_6 XZ + \dots}{1 + b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + b_4 X^2 + b_5 XY + b_6 XZ + \dots}, \\ y &= \frac{c_0 + c_1 X + c_2 Y + c_3 Z + c_4 X^2 + c_5 XY + c_6 XZ + \dots}{1 + d_1 X + d_2 Y + d_3 Z + d_4 X^2 + d_5 XY + d_6 XZ + \dots}, \end{aligned} \quad (8.37)$$

містить поліноміальні коефіцієнти $a_0, a_1, \dots, d_6, \dots$ які треба віднайти. Ця просторова модель має назву RFP (від англ. Rational Function Polynomial) або частіше RPC (від англ. Rational Polynomial Coefficients). Знаходження невідомих з цієї моделі вимагає знання певної кількості опорних точок; їхній вибір часто є обмеженим, а це спричиняє і обмеження щодо кількості невідомих (бо одна опорна дає два рівняння).

Проективне перетворення простору на площину подано нами у вигляді (2.119). Ця модель в літературі подається як DLT (від англ. Direct Linear Transformation). Тут є 11 коефіцієнтів, які треба визначити за наявності опорних точок. Подамо ще раз ці рівняння:

$$\begin{aligned} x &= \frac{A_{11}X + A_{12}Y + A_{13}Z + A_{14}}{A_{41}X + A_{42}Y + A_{43}Z + 1}, \\ y &= \frac{A_{21}X + A_{22}Y + A_{23}Z + A_{24}}{A_{41}X + A_{42}Y + A_{43}Z + 1}. \end{aligned} \quad (8.38)$$

Шість опорних точок дають 12 рівнянь, і цього достатньо для розв'язання задачі. Проте мінімальний контроль (одне надлишкове рівняння) не гарантує доброго, якісного розв'язання. Тому на практиці беруть більшу кількість опорних точок, що уможливує вирівнювання методом найменших квадратів, відбраковування помилкових опорних точок та оцінку точності знайдених параметрів.

Звернемо увагу на важливий аспект подальшого опрацювання космічного зображення. Відомо, що за одним зображенням можна отримати координати X, Y точки об'єкта і висота Z цієї точки повина бути відома (переважно із заздалегідь побудованої ЦМР). Тоді після простих перетворень маємо:

$$\begin{aligned} \kappa_1 X + \kappa_2 Y + L_1 &= 0, \\ \kappa_3 X + \kappa_4 Y + L_2 &= 0. \end{aligned} \quad (8.39)$$

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= A_{41} \cdot x - A_{11}, & \kappa_2 &= A_{42} \cdot x - A_{12}, & L_1 &= A_{43} \cdot x \cdot Z - A_{13}Z - A_{14}, \\ \kappa_3 &= A_{41} \cdot x - A_{21}, & \kappa_4 &= A_{42} \cdot y - A_{22}, & L_2 &= A_{43} \cdot y \cdot Z - A_{23}Z - A_{24}. \end{aligned} \quad (8.40)$$

Кожне з рівнянь (8.39) містить дві невідомі величини, і їх легко знайти з розв'язання рівнянь та отримати координати X, Y точки поверхні планети.

Коефіцієнти RPC входять в поставку від IKONOS, QuickBird, OrbView3. Методом DLT треба скористатись для оброблення зображень від IRS 1C/1D та деяких інших.

Покращання розпізнавальних можливостей космічного зображення часто називають радіометричною корекцією. Попередню радіометричну корекцію здійснює власник зображення; якщо знімальна система працювала у панхроматичному та багатоспектральному діапазонах, то можна отримати високоякісне синтезоване кольорове зображення. Це стосується того випадку, коли панхроматичне зображення за якістю в 3–4 рази краще від багатозонального.

Дуже важливим технологічним аспектом картографування територій є вибір програмного забезпечення. Річ у тім, що дані космічного знімання передаються (продаються) у різноманітних форматах, у різних комбінаціях та з різними характеристиками. Користувач (покупець) повинен наперед знати, що він буде з цими матеріалами робити та як він буде їх опрацьовувати.

На ринку інформаційних послуг та дистанційного зондування нині є доволі великий спектр програмного забезпечення. Серед них найвідоміші ERDAS (у складі Leica, Швейцарія), Z/I Imaging (у складі Intergraph Corp., США), PCI Geomatics (США), BAE Systems (США), Photomod (фірма Ракурс, Росія) та інші.

Сучасні програмні комплекси зорієнтовані на розв'язання широкого класу задач, опрацювання різноманітних картографічних матеріалів та космічних зображень.

Як приклад наведемо деякі відомості про ERDAS IMAGINE.

Візуалізація та імпорт даних

Комплекс може читати і записувати інформацію без конвертації у 50 форматах файлів (GeoTIFF (.tif), JPEG 2000, PCI (.pix), TIFF (.tif), Surfer тощо). Близько 100 форматів доступні через імпорт – експорт або конвертацію у формати прямого доступу. Тому растрові зображення доступні до використання практично від усіх супутників.

Візуалізація реалізується за допомогою IMAGINE Geospatial Light Table. Функціями цього пакета є відображення, комбінування, географічна прив'язка, аналіз і подання даних, причому в єдиному вікні. Існує можливість одночасного подання різнотипних зображень, регулювання яскравості, контрасту, зміна масштабу та поворот зображення, кольоровий синтез, вимірювання площ та віддалей.

Геометрична корекція

Реалізована прив'язка зображень на основі параметрів орбіти або ж за опорними точками. Для різних сенсорів застосовані різні математичні моделі:

Модель раціональних поліномів: DPPDB, IKONOS NITF, IKONOS RPC, QuickBird RPC.

Поліноміальна модель: IRS1C/1D, Landsat MSS, Landsat TM, Landsat 7ETM+, RADARSAT, SPOT-4, ASTER.

Орбітальна модель: ASTER, EROS A1, MODIS, QuickBird, Spot 5.

Програма підтримує 55 проєкцій, 45 еліпсоїдів та 200 геодезичних систем координат. Є можливість користувачеві додавати свої еліпсоїди та системи координат.

Відтрансформовані зображення можна об'єднати ("зшити") в єдине безшовне зображення з вирівнюванням кольору, контрасту та яскравості. Можна з головного зображення формувати листи карт у розграфці будь-якого масштабу.

Покращання зображення та ГІС-аналіз

Можна виконати покращання просторової роздільної здатності кількома фільтраційними методами (фільтр зі згортанням, фокальна тематична фільтрація, адаптивні фільтри Уоллеса) та методами об'єднання панхроматичних та багатозональних зображень.

Радіометричні перетворення зводяться до вирівнювання і суміщення гістограм яскравості, усунення шумів тощо. Спектральні перетворення виконуються методом головних компонентів, Tasseled cap тощо. Задіяні такі функції, як нормалізація спектра, обчислення та нормалізація яскравостей. До аналізу радіометричних показників застосовується пряме та обернене перетворення Фур'є.

ГІС-аналіз реалізується у вигляді аналізу по границях, опрацювання тематичних растрів, побудови буферних зон, картографічного накладання шарів, просторової статистики, перекодування. До цього додається топографічний аналіз ЦМР: побудова зон видимості, карт ухилів та експозицій схилів, відмивання рельєфу, інтерполяція поверхонь тощо.

Дешифрування зображень

Комплекс дає змогу реалізувати дешифрування на різних рівнях: від простого ручного до побудови складної багатопараметричної експертної системи класифікації даних. Реалізовано кілька алгоритмів:

- алгоритм ISODATA, здійснюється класифікація і задається певна кількість класів;
- класифікація з навчанням; тут користувач може керувати класифікацією на різних етапах: вибір, оцінка і редагування еталонів; перевірка придатності дешифрувальних еталонів для класифікації; швидке перекодування з показом неоднозначних областей; побудова спектральних графіків та гістограм еталонів; посткласифікаційне редагування та оцінка точності класифікації;
- експертна класифікація.

Моделювання

Реалізовано опрацювання зображень та побудова алгоритмів просторових обчислень. Використовується "Мова просторового моделювання" (SML), яка дає змогу записувати та реалізувати моделі алгоритмів аналізу образів та просторового аналізу.

Окрім цього, алгоритми опрацювання можна будувати за допомогою графічного редактора блок-схем, який перетворює їх на програми мовою SML.

Створення карт

Модуль дає змогу будувати карти як в електронному, так і в паперовому вигляді. Можна створювати і редагувати карти і фотокарти, додавати різну кількість картографічних елементів і зображень, творити координатні сітки, рамки, зарамкове оформлення, легенди карт тощо. Карти можна друкувати у різних масштабах та у довільній розграфці.

Програмний комплекс побудовано за модульним принципом. Кожний модуль має певне призначення та широкі функціональні можливості. Наприклад, фотограмметричний пакет Leica Photogrammetry Suite (LPS) має чотири основні модулі (побудова і редагування ЦМР, стереодешифрування і стереозбирання, фототріангуляція, автоматична побудова ЦМР). Детальний опис кожного модуля подано в матеріалах фірми. І це стосується не тільки Leica, а й інших розробників програмних продуктів.

На закінчення цього розділу наведемо головні результати незалежних досліджень на придатність космічних знімків для картографування територій. У Польщі на трьох об'єктах різної території (густозаселена, промислова та густозаселена, рівнинна з переважно сільським господарством) виконано картографування з використанням космічних зображень від EROS, IKONOS та QuickBird. Зроблено висновки, що розпізнавання об'єктів залежить від сумарної роздільної здатності системи. Розпізнавання будинків (порівняно з аерофотозніманням у масштабі 1:26 000) дало такі результати: EROS – 25–30 %, IKONOS – 80 %, QuickBird – 95 %. Для двох останніх систем отримано непогані результати з розпізнавання лінійних об'єктів: автомобільні дороги, залізниці, водотоки. Майже не розпізнаються огорожі, дамби, пам'ятники, фонтани та подібні точкові об'єкти. Стосовно геометричної точності, то зображення від IKONOS і QuickBird забезпечують точність координування 1 м, що є еквівалентом аерофотознімання у масштабі 1:25000 – 1:40000. Зображення від EROS дають значно гірші результати.

Короткий висновок

На закінчення цього розділу можна стверджувати, що космічне картографування безперечно, буде нарощувати можливості і потенціал. Серйозні військові розробки поступово входять у сферу діяльності комерційних структур. У публікаціях згадується про супутник військової розвідки KH-11M, роздільна здатність якого на місцевості становить 15 см і менше (залежно від атмосферних умов). Це у 6–7 разів краще від IKONOS, і саме така об'єктивна реальність дає підстави оптимістично розглядати космічну фотограмметрію як перспективний метод топографічного картографування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Основна

1. *Антипов И.Т.* Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции. – М., 2005.
2. *Бобир Н.Я., Лобанов А.Н., Федорук Г.Д.* Фотограмметрия. – М.: Недра, 1974. – 471 с.
3. *Дорожинський О.Л.* Аналітична та цифрова фотограмметрія. – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2002. – 163 с.
4. *Дорожинський О.Л.* Основи фотограмметрії. – Львів. Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2003. – 212 с.
5. *Дорожинський А.Л.* Теория и технология методов аналитической фотограмметрии в автоматизированных геологических комплексах и системах. Дис. д-ра техн.наук. – Львов, 1988. – 288 с. Машинопись.
6. *Дорожинський О., Почкін С.* Критерії оцінки аерокосмічних зображень для кадастрових робіт // Укр. міжвідомчий н.-т. збірник // Геодезія, картографія і аерофотознімання". – Львів, вип. 68, 2007. – С. 172–177.
7. *Дорожинський О.* Цифрова фотограмметрія – сучасний стан та чинники її розвитку // Укр. міжвідомчий н.-т. збірник "Геодезія, картографія і аерофотознімання". – Львів, вип.66, 2005. – С.136–143.
8. *Кемниц Ю.В.* Математическая обработка зависимых результатов измерений. – М.: Недра, 1970. – 189 с.
9. *Климов А.С.* Форматы графических файлов. – К.: НИПФ "ДиаСофт Лтд.", 1995. – 480 с.
10. *Куштин И.Ф., Лысков Г.А.* Фотограмметрия снимка и стереоскопических моделей. – М.: Недра, 1984. – 167с. М., Картгеоцентр-Геодезиздат, 2003. – 295 с.
11. *Лобанов А.Н.* Аналитическая фотограмметрия. – М.: Недра, 1972. – 224 с.
12. *Лобанов А.Н., Журкин И.Г.* Автоматизация фотограмметрических процессов. – М.: Недра, 1980. – 240 с.
13. *Милчев М.Н.* Цифровые фотоаппараты. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2004. – 250 с.
14. *Могильный С.Г. Беликов И.Л.* Фотограмметрия. – Киев-Донецк: Вища школа, 1985. – 278 с.
15. *Мориц Г.* Современная физическая геодезия / Пер. с англ.. – Недра, 1983. – 392 с.
16. *Неизвестный С., Никулин О.* Приборы с зарядовой связью. Устройство и принцип работы // Специальная техника №4. – М: 1999.
17. *Соломенчук В.Г., Соломенчук П.В.* "Железо" ПК 2004. – СПб.: БХВ- Петербург, 2004. – 368 с.
18. *Сердюков В.М.* Фотограмметрия. – М.: Высшая школа, 1983. – 351 с.
- ✓ 19. *Тюфлин Ю.С.* Космическая фотограмметрия при изучении планет и спутни-ков. ✓
– М.: Недра, 1986. – 247с.
20. *Тайц А.А., Тайц А.М., Петров М.Н.* Эффективная работа: Photoshop 7. – СПб.: Питер, 2004. – 765 с.

21. Тукай Р. Використання даних лазерного сканування місцевості з літака для побудови цифрової моделі забудованої території // Збірник праць Західного геодезичного т-ва "Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва". – Львів, 2005.– С. 268–271.
- ✓ 22. Урмаев М.С. Космическая фотограмметрия. – М.: Недра, 1989. – 279 с.
23. Урмаев Н.А. Элементы фотограмметрии. – М.: 1941. – 121 с.
24. Шлихт Г.Ю. Цифровая обработка цветных изображений. – М.: ЭКОММ, 1997. – 336 с.
25. Щеглов В. Практические методы Крайгинга. – М., 1989. – 51 с.
26. Butowtt J., Kaczynski R. Fotogrametria. – Warszawa. Wojskowa Akademia Techniczna, 2003. – 375 s.
27. Bovik Al. Handbook of Image and Video Processing. – Academic Press., A Harcourt Science and Technology Company, 2000. – 891 p.
28. Brook M., Herman B. Lidar stereo Image Creation and Exploration.
www.geolidar.ru/catalog/geocasmos
www.gi.leica-geosystems.com/LGIS u b14340. aspx
29. Boekler W., Heinz G., Marbs A., Siebold M. 3D scanning software: an introduction. Proc. Of the CIPA WGG int. Workshop on scanning for cultural heritage recording. – 2002.
30. XX ISPRS Congress, 12-23 July 2004, Istanbul, Commission I–VI.
31. XIX ISPRS Congress, July, 2000, Amsterdam, Commission I–VI.
32. Kurczynsky Zd. Lotnicze i satelitarne obrazowanie Ziemi.cz.1 i cz.2. – Warszawa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006. – 582 c.
33. Kraus K. Photogrammetrie. – Vienna, 1994.
34. Sitek Z. Wprowadzenie do teledetekcji lotniczej i satelitarnej. Krakow. Wydawnictwa AGH, 2000. – 354 s.
35. Gromley R.G. Digital cartography.-Prentice Hall, Englewood Cliff. New Jersey, 1992. – 317 p.
36. Gonzalez R.C., Wintz P. Digital Image Processing. – Second Edition. – Addison-Wesley Publishing Company, 1987. – 503 p.

Web – сторінки:

38. Aplanix: www.aplanix. Com
39. DigitalGlobe: www.digitalglobe. com
40. DLR – www.dlr. de
41. Eurimage: www.eurimage. com
42. Geolidar: www.geolidar. ru
43. Geosystem: www.vingeo. com
44. Jena – Optronik: www.jena-optronic.de
45. ISPRS: www.csprs. org
46. Leica: www.leica-geosystems. com
47. Optech: www.optech. on. ca
48. Orbimage: www.orbimage. com
49. RadarSAT: www.rsi. ca
50. SPOT Image: www.spotimage. com
51. Vexcel: www.vexcel. com
52. TerraScan: www.terrasoild. fi
53. МГУ им. Ломоносова: Satelliteimage for education. htm
54. Swiss: www.swisstopo. ch/de/geo/agnes. htm

55. *Березин Н.П., Кононов В.И.* Разрешающая способность: история, состояние и развитие // ОМП, 1991, № 11.
56. *Богомолов А.Ф., Тюфлин Ю.С.* Радиолокационное картографирование Венеры с АМС “Венера – 15,16” // Геодезия и картография, 1984, № 8. – С.11–17.
57. *Буритинська Х.* Аерофотографія. – Львівське астрономо–геодезичне товариство. Львів–1999. – 340 с.
58. *Бусыгин Б.С., Гаркуша И.Н., Серединин Е.С., Гаевенко А.Ю.* Инструментарий геоинформационных систем. – Киев, 2000. – 172 с.
59. *ДеМерс Ма. Н.* Географические информационные системы. Основы.: Пер. с англ.. – М.: Дата+. – 1999, 490 с.
60. Исследование области гор Максвелла планеты Венера космическими аппаратами “Венера–15” и “Венера–16” // В.А. Котельников, Э.Л. Аким, Ю.Н. Александров и др.– Письма в астрономический журнал, 1984, т.10, №12. – С. 883–889.
- ✓ 61. *Лаврова Н.П.* Космическая фотосъемка. – М.: Недра, 1983.
- ✓ 62. Многозональные аэрокосмические съемки Земли. Под ред.Р.З.Сагдеева. – М.: Наука, 1981.
63. *Савиных В.П., Кучко А.С., Стеценко А.Ф.* Аэрокосмическая фотосъемка. М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 1997.
- ✓ 64. *Урмаев М.С.* Орбитальные методы космической геодезии. – М.: Недра, 1978.
65. Картографирование Луны и Марса. – М.: Недра, 1978.
66. *Ackermann F.* Survey flight navigation and exterior camera orientation by GPS and other sensor. Aerial Surveying Today and Tomorrow. Expert’s Seminar, Berlin, 14–15 May 1996.
67. *Baltsavias E.P.* Future of Photogrammetric Scanners and Film Scanning, GIM International, March 2000.
68. *Dowman I.* Integration of LIDAR and IFSAR for Mapping. XXth ISPRS Congress, 12–23 July 2004, Istanbul, Commission II.
69. *Graham R., Koh A.* Digital Aerial Survey: Theory and Practice. Whittles Publishing. Scotland, UK, 2002.
70. *Kraus K.* Photogrammetry. Vol.2, Verlag, – Bonn, 1997.
71. *Kraus K., Rieger W.* Prossesing of laser scanning data for wooded areas. Photogrammetric Weec’99, Heidelberg, Wichmann, 1999.
72. *Leberl F.,* The UltraCam Large Format Aerial digital Camerea System. Proceedings of ASPRS, Anchorage, Alaska, 5–7 May 2003.
73. LHSystems ADS40 Airborne Digital Sensor, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol.XXXIII, part B1, Amsterdam, 2004.
74. *Madanil M., Dorstel C., Heipke C., Jacobsen K.* DMC Practical Experience and Accuracy Assessment. XXth ISPRS Congress, 12–23 July 2004 Istanbul, Commission II, 2004.
75. *Roth R.* Trends in Sensor and Data Fusion. Photogrammetric Weec’05, Heidelberg, Wichmann, 2005.
76. *Sitek Z.* Fotogrametria ogolna i inzynieryjna. PPWK, Warszawa, 1991.
77. *Wolniewicz W.* Geometrical Capacity of the VHRS Images Collected with Significant off–nadir Angle. ISPRS Hannover Workshop 2005: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information. Hannover, Germany, 17–20 May, 2005.

- Аберації оптичної системи 72
- Абсолютна система координат 33
- Абсолютне орієнтування на ЦФС 251
- Автоматична міжпланетна станція (АМС) 283
- Автоматична триангуляція 241, 246
- Адитивна структура похибок 69
- Аеротриангуляція цифрова 241
- Аерофотограмметрія 20
- АМС “Вояжер” 314
- АМС “Магеллан” 314
- АМС “Марінер-10” 314
- Аналітичний знімок 259
- Аналого-цифрове перетворення 90
- Архитектурна фотограмметрія 18
- Афінне перетворення 63, 64
- Білінійне перетворення 174
- Бінарне зображення 89
- Вагова матриця 74
- Візуалізація зображення 95
- Взаємне орієнтування на ЦФС 250, 251
- Взаємне орієнтування пари знімків 56-60
- Виникнення фотографії 19
- Висотна опорна точка 241
- Відеоадаптер 95, 102
- Відеокарта 102, 103, 105
- Вісь перспективи 28
- Внутрішнє орієнтування на ЦФС 244
- В’язка променів 27, 28
- Гамма-корекція 121, 122
- Генерування горизонталей 274
- Геодезичне орієнтування фотограмметричної моделі 62
- Геодезичний метод збору даних для ЦММ 183
- Геоінформаційна система (ГІС) 17
- Геоінформаційні технології 17
- Геометричне перетворення площини в площину 65, 68
- Геометричне перетворення тривимірного простору в тривимірний 66, 67
- Геосинхронна перехідна орбіта 285
- Геостаціонарна орбіта 285
- Геоцентрична система координат 33
- ГІС 11
- Гістограма 122, 157
- Головна вертикаль знімка 28
- Головна точка сходу 28
- Голограма 198
- Гомотетія 64
- Графік МКО для кольорів 83
- Гринвіцька система координат 300, 301
- Деформація фотоматеріалу 73
- Дискретизація 89
- Дискретне перетворення Фур’є 155
- Дистанційне зондування (ДЗ) 9, 15
- Дисторсія радіальна 71, 244
- Дисторсія тангенціальна 71
- Диференційні рівняння руху ШСЗ 284, 297
- Діапазони електромагнітного випромінювання 15
- Екваторіальна система координат 299
- Елементи взаємного орієнтування в базисній системі 46
- Елементи взаємного орієнтування в лінійно-кутовій системі 45
- Елементи внутрішнього орієнтування знімка 34
- Елементи еліптичної орбіти 297
- Елементи зовнішнього орієнтування знімка 35
- Елементи зовнішнього орієнтування моделі об’єкта 46, 47
- Елементи зовнішнього орієнтування пари знімків 44
- Ентропія 133

- Завдання космічної фотограмметрії 296
- Задача “Поворот простору” 31
- Закон подвійного підсумовування 227
- Закони Кеплера 298
- Зарис опорної точки 243
- Збурений рух супутника 298
- Зв’язкова точка 60
- Змазання зображення 72, 73
- Зміна розмірів фотокамери 72
- Знімальна система 25, 26, 143
- Знімок горизонтальний 40
- Знімок нахилений 40
- Ізометрія 64
- Ізометрія середня 65
- Імпульсний спосіб визначення віддалі 185
- Інваріанти перспективи 29
- Інерційна система координат 299
- Інерційно-навігаційна система (INS) 14
- Інтерест-оператор 180
- Інтерферометрія зображень 198, 202
- Ітераційний процес 52, 58, 61
- Картометричний метод збору даних для ЦММ 183
- Коваріаційна матриця 75, 205
- Коваріаційна функція 205
- Кодування без втрат 113
- Коефіцієнт кореляції 176, 177
- Колінеарність векторів 37, 48
- Кольорова гама 83, 84
- Компланарність векторів 56
- Компресія цифрових образів 112
- Контраст 13, 120, 122
- Координатна система растрового зображення 141
- Координатні позначки 141, 246
- Корекція геометрична 320, 321
- Корекція радіометрична 264, 266
- Кореляційний аналіз оптичних щільностей (ABM) 176
- Кореляційний аналіз примітивів (FBM) 176
- Кореляційний аналіз топології (RM) 176
- Космічна фотограмметрія 22, 296
- Космічна фототріангуляція 309
- Космічне знімання 293, 296, 314
- Кривина Землі 75, 76
- Кубічна інтерполяція 174
- Кут напрямку знімання 35, 36
- Кут нахилу знімка 28
- Кут рефракції 70
- Кут розвороту знімка 35
- Кути Ейлера 31
- Лазерна пляма 17, 191
- Лазерне сканування з літака 183, 189
- Лідарграмметрія 192, 193, 275
- Лінеаризація нелінійних рівнянь 50, 310
- Лінії переривання плавного перебігу рельєфу 273
- Лінія істинного горизонту 28
- Лінія напрямку знімання (ЛНЗ) 28
- Масштаб знімка 27
- Матриця напрямних косинусів 32
- Матриця одинична 40
- Медіанна фільтрація 164
- Метод Shepard 212
- Метод колокації 204, 205
- Метод Крайгінга 204, 210
- Метод масок 153, 154
- Метод середнього вагового 204, 211
- Метод Хаффмана 114
- Методи надання оптичної щільності:
 - найближчого сусіда 174
 - білінійного перетворення 174
 - кубічної інтерполяції 174
 - за поліномом Лагранжа 174
 - сплайн-інтерполяції 174
- “Склеювання” мозаїки 265
- “Хмара” точок при лазерному скануванні поверхні 187, 280
- Методи фотограмметричних побудов 12
- Мікрохвильовий радіометр 15
- Моделі кольору 82
- Модель кольору CMY 87
- Модель кольору CMYK 87
- Модель кольору HSB 88
- Модель кольору Lab 89
- Модель кольору RGB 85, 86
- Модель проєктивного перетворення DLT 319
- Модель проєктивного перетворення RPC 319

- Монітор електронно-променевий 101
- Монітор плазмовий 102
- Муар-ефект 94
- Наземна фотограмметрія 19, 30
- Наземне лазерне сканування 183, 184
- Напрямні косинуси 31, 32
- Незбурений рух супутника 298
- Неквадратична функція втрат 13
- Низька навколоземна орбіта 286
- Нутація 300
- Обернена матриця з нормальних рівнянь 53
- Обернена фотограмметрична засічка для поодинокого знімка 49
- Око людське 78
- Окуляри на рідких кристалах 232
- Окуляри поляризаційні 231, 232
- Оператор Лапласа 167
- Оператор Собеля 166
- Опорна мережа на Марсі 313
- Опорна мережа на Місяці 313
- Опорна точка 228, 243
- Оптична щільність 13
- Орбіта еліптична 297
- Ортогональна проекція 27, 259
- Ортогонально-центральна проекція 25
- Ортофотокарта цифрова 259
- Ортофототрансформування цифрове 259
- Передавальна функція 157
- ПЗЗ-лінійка 132
- ПЗЗ-матриця з буферизацією кадра 128
- ПЗЗ-матриця з буферизацією стовчиків 128, 129
- Піксел 91, 96, 172, 174, 177
- Планетографічна система координат 301, 302
- Планетодіцентрична система координат 301, 302
- Планово-висотна опорна точка 241
- Повний кут зору сканера 26
- Повнокадрова ПЗЗ-матриця 127
- Подвійна обернена фотограмметрична засічка 53
- Поздовжній кут нахилу знімка 35
- Покращання характеристик цифрових знімків 151
- Поліноміальна модель 2D 318
- Поліноміальна модель 3D 318
- Попереднє опрацювання зображень 12
- Поперечний кут нахилу знімка 35
- Поперечний паралакс 57
- Похибки вимірювань фотокоординат 73, 74
- Прецесія 300
- Прилад із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) 10, 14, 126
- Програмний комплекс РАКУРС 201
- Проективне перетворення 63, 68
- Проекція Гаусса–Крюгера 33
- Просторова область 151
- Просторова роздільна здатність 94, 294
- Просторова фотограмметрична система координат 31
- Пряма фотограмметрична засічка 47
- Радар 16, 196–203
- Радар бокового огляду 15, 196
- Радарна диференціальна інтерферометрія 198
- Радіолокаційне знімання Венери 22, 313, 314
- Радіолокаційне знімання планети 306
- Радіолокаційне стереоскопічне знімання 198
- Радіопрофілювання поверхні планети 308
- Растрове зображення 96
- Растровий формат BMP 107
- Растровий формат GIF 108
- Рефракція світлового променя 70
- Рівні квантування зображення 94
- Рівняння колінеарності 39
- Рівняння компланарності 56
- Робастний спосіб 13
- Роздільна здатність 93, 97, 289
- Роздільна здатність фотограмметричного сканера 134
- Розмір піксела при скануванні 132
- Ручне вимірювання ЦМР 254
- Ряд Тейлора 50, 57

- CAD-** програми 13
 Середні квадратичні похибки елементів зовнішнього орієнтування 53, 56
 Середня квадратична похибка одиниці ваги 52, 55, 59
 Система координат аерознімка 29, 30
 Система координат наземного знімка 30
 Сканер “Дельтаскан” 134
 Сканер PS-2001 136
 Сканер фотограмметричний 23, 132-136
 Сканувальна система 26
 Скелетна лінія рельєфу 253
 Сплайн-інтерполяція 174
 Спосіб незалежних моделей 223
 Спосіб повністю залежних моделей 223
 Спосіб частково залежних моделей 222
 Стереоефект 231
 Стереознімання з космічних апаратів 316, 317
 Стереомат 22
 Стереоскоп дзеркальний 231
 Супутникові системи 284–287
 Сферичні координати при радіолокаційному зніманні 307
 Тепловізор 15
 Тоновая крива 124
 Тоновая роздільна здатність 94
 Топологічний простір 178
 Точка надиру 28
 Точка нульових спотворень 28, 43
 Точність фототріангуляції 229, 230
 Умова невизначеності взаємного орієнтування 59
 Фазовий спосіб визначення віддалі 185
 Фільтр Байєра 92, 93
 Фільтр Баттерворта 169
 Фільтр високих частот 170
 Фільтр низьких частот 168
 Фокусна віддаль знімка 34
 Формати графічних файлів 106
 Фотограмметричний метод збору даних для ЦММ 183
 Фотознімок 26
 Фототріангуляція аналітична 12, 214
 Фототріангуляція блочна 214, 220
 Фототріангуляція із самокалібруванням 224
 Фототріангуляція маршрутна 221
 Фототріангуляція методом в'язок 23, 215
 Фототріангуляція методом моделей 217
 Характеристики моніторів 97, 98, 99
 Центр проекції 26, 27
 Центральна проекція 25
 Цифрова аерокамера 24, 148-150
 Цифрова модель місцевості (ЦММ) 181
 Цифрова модель об'єкта (ЦМО) 181
 Цифрова модель покриття території (ЦМП) 276
 Цифрова модель рельєфу (ЦМР) 181, 182
 Цифрова фотограмметрична станція (ЦФС) 23, 231–240
 Цифрова фотограмметрія 11, 23, 231
 Цифрова фотографія 14
 Цифрова фотокамера 92
 Цифрові аерокамери 143-150
 ЦФС “Дельта” 232
 ЦФС Leica 234
 ЦФС “Intergraph” 236
 ЦФС “Photomod” 233
 Цифрово-аналогове перетворення 90
 Частотна фільтрація зображень 157
 Чутливість ока 79, 80, 81
 Ширина смуги сканування 26
 Штучний супутник Землі (ШСЗ) 283
 Якість зображення 13, 106, 109, 123
 3-DAS-1 150
 ADS40 15, 147
 Averaging 173
 CYRAX 2500 186
 DMC 2001 15, 148
 Endeavour 16

Erdas Imagine 201
EROS 288, 291
ERS -1, ERS – 2 201

Gaussian sampling 173
GPS 11, 14, 220, 285
GPS GALILEO 289
GPS NAVSTAR 289
GPS ГЛОНАСС 289
GRID 253

HDS 3000 186
HRSC 150

IKONOS 291, 295
IRS 286, 291, 295
ISPRS 9, 24, 230

JPEG-формат 108, 109

Landsat 287, 295
LCD-монітор 101
LEP-монітор 102
LIDAR 16, 189-194
LUT – таблиця 132
LZW-кодування 115
PNG – формат 110

QuickBird 291, 292, 295

RADARSAT–1 200, 287
RAR 196
Resampling 173, 260

SAR 196
SPOT 287, 291, 295
Subsampling 173

TERRASAR – X 200, 203
TIFF-формат 110
TIN 187
UltraCam – D 149

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

ДОРОЖИНСЬКИЙ Олександр Людомирович
ТУКАЙ Ришард

ФОТОГРАММЕТРІЯ

Редактор Оксана Чернигевич
Коректор Наталія Колтун
Технічний редактор Лілія Саламін
Комп'ютерне верстання Любові Семенович
Комп'ютерне опрацювання ілюстрацій Зоряни Рисін
Художник-дизайнер Уляна Келеман

Здано на складання 18.10.07. Підписано до друку 15.06.08.
Формат 70×100 $\frac{1}{16}$. Друк офс. Папір офс.
Умовн. друк. арк. 26,8. Обл.-вид. арк. 21,8.
Тираж 1000 прим. Зам. 71033

Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”
Реєстраційне свідоцтво серії ДК № 751 від 27.12.2001 р.

Поліграфічний центр
Видавництва Національного університету “Львівська політехніка”
вул. Колесси, 2, Львів, 79000