

ФОТОГРАММЕТРІЯ ТА ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ, МОНІТОРИНГ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 528

О. Дорожинський

Національний університет "Львівська політехніка"

ЦИФРОВА ФОТОГРАММЕТРІЯ – СУЧАСНИЙ СТАН ТА ЧИННИКИ ЇЇ РОЗВИТКУ

© Дорожинський О., 2005

Рассматриваются основные факторы, влияющие на положительное развитие цифровой фотограмметрии.

The main factors influenced on positive development of digital photogrammetry are considered.

Ще у 1988 р. на XVI Конгресі Міжнародного товариства з фотограмметрії та дистанційного зондування (ISPRS) цим науковим дисциплінам дано таке визначення: це – область технічних наук, які займаються отриманням достовірної інформації про фізичні об'єкти та їх оточення шляхом реєстрації, вимірювання та інтерпретації образів або цифрових образів, отриманих за допомогою сенсорів, які не контактують безпосередньо з цими об'єктами. Можна, виходячи з позицій сьогодення, критикувати таке визначення, можна його сприймати повністю або ж частково, проте важливо осмислити, що воно було дане майже 20 років тому. Ясна річ, техніка і технології за цей час істотно розвинулись, і це вплинуло на фотограмметрію та дистанційне зондування (ДЗ).

У цій роботі подається узагальнений погляд на фотограмметрію, що є предметом багаторічного зацікавлення автора, і лишень 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.

На рис. 1 показані 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 отримується той чи інший продукт фотограмметричної діяльності. При цьому 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 на основі застосування конкретних технологій.

Така схема відтворює як попередній стан фотограмметрії, так і її сьогодення. При доскіпливому аналізі і науковому пошуку можна знайти безліч завдань, які впливатимуть на стан фотограмметрії в майбутньому.

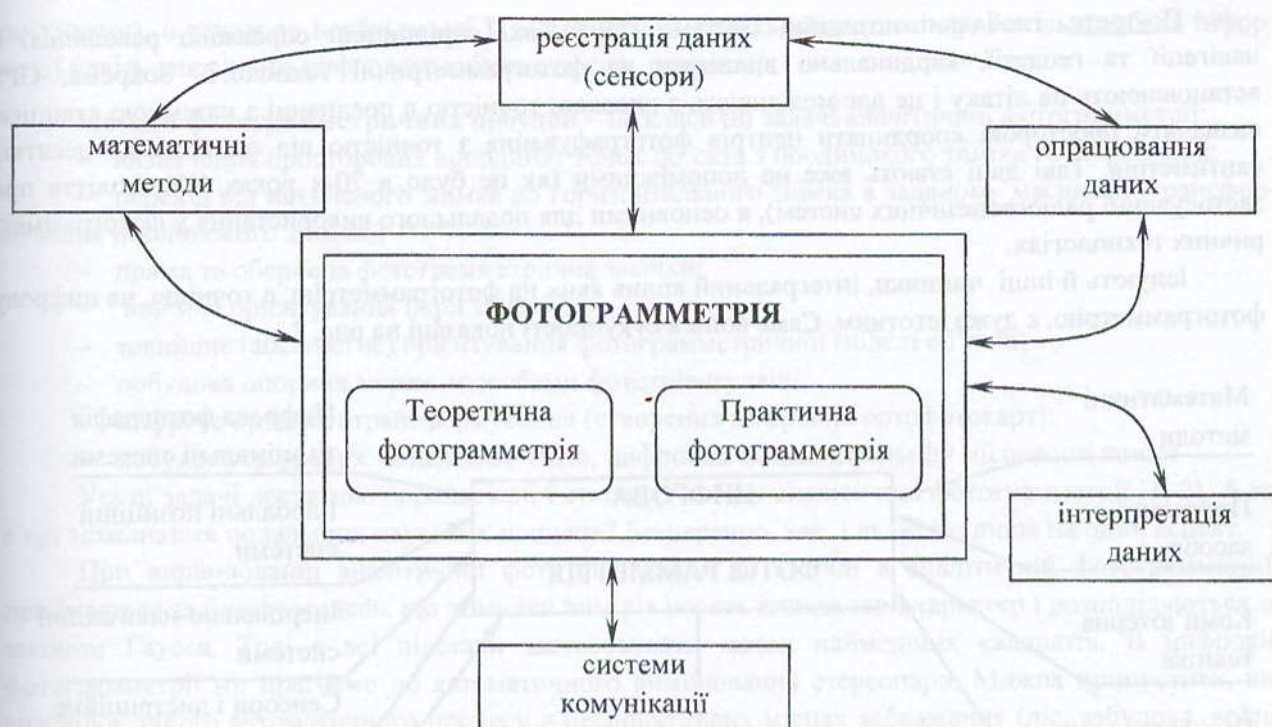


Рис. 1. Основні чинники, пов'язані з функціонуванням фотограмметрії як наукової дисципліни

Тепер зосередимо свою увагу на тих змінах, що відбулися у фотограмметрії кінця ХХ століття і які спричинили появу **цифрової фотограмметрії**. Вкажемо на кілька причин.

По-перше, – це величезний ріст можливостей комп'ютерної техніки. Якщо раніше, застосовуючи обчислювальну техніку, ми мали на увазі лише реалізацію чисельних методів, то тепер комп'ютер бере на себе все нові й нові функції. У фотограмметрії ці можливості реалізовано в кількох сферах.

Стало можливим завдяки великим обсягам зовнішньої та внутрішньої пам'яті та високій швидкодії опрацьовувати величезні масиви даних та проводити 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 собою дорогі аналогові чи аналітичні фотограмметричні прилади. На комп'ютері можна виконувати різноманітні графічні операції, і що принципово важливо, – постала 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'єкта, вже не є домінуючим інформаційним носієм. На зміну фотоемulsії прийшли нові засоби, серед яких найбільш цікавими 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 шлях вже потужно увійшов в аматорський світ і дещо повільніше у фотограмметричну практику (насамперед, через високу вартість аерознімальних цифрових систем). Натомість інший спосіб отримання цифрового фотограмметричного знімка – шляхом сканування фотознімка – досить поширений. Так чи інакше сьогодні фотограмметрія оперує з цифровим образом.

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

Існують й інші чинники, інтегральний вплив яких на фотограмметрію, а точніше, на цифрову фотограмметрію, є дуже істотним. Саме вони в сукупності показані на рис. 2.

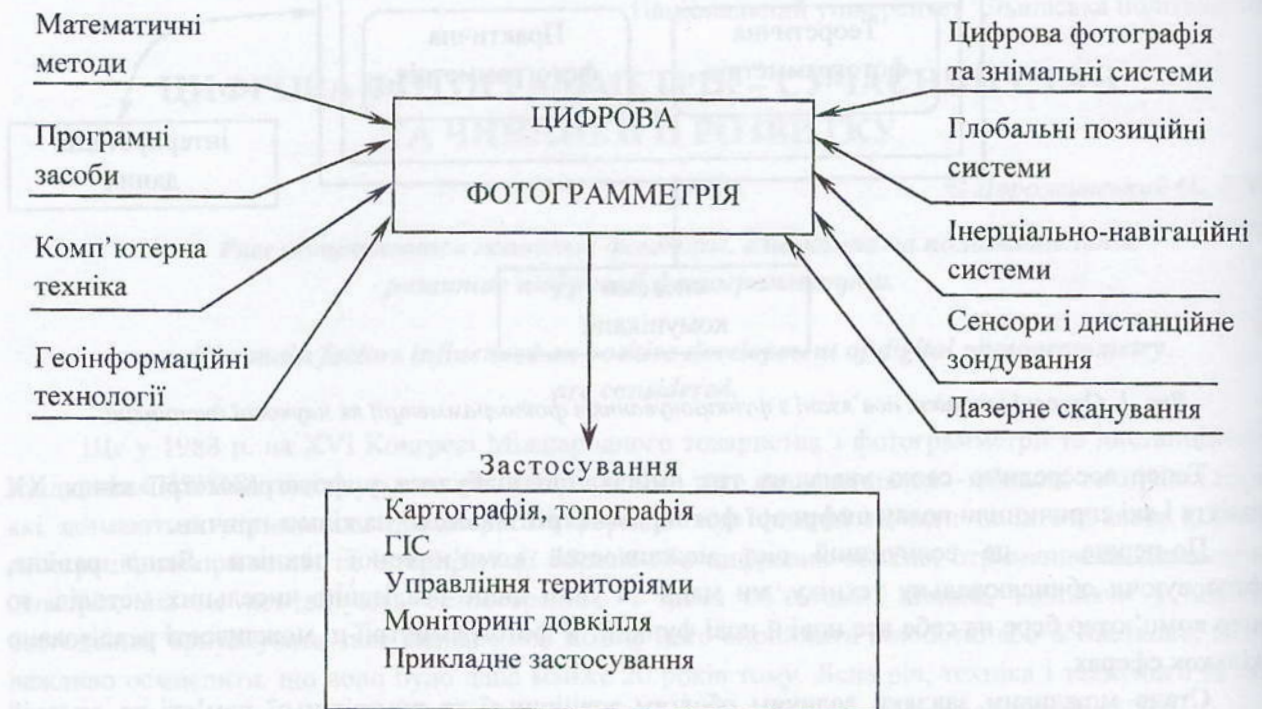


Рис. 2. Чинники, що впливають на розвиток і стан цифрової фотограмметрії та сфери застосування

Розглянемо коротко суть кожного з чинників, включених до рис. 2.

Математичні методи. Математичну суть фотограмметрії становить векторна алгебра та аналітична геометрія. Фундаментальними для аналітичної фотограмметрії (а вона є базою для цифрової фотограмметрії) є умова колінеарності та умова компланарності векторів [1].

Математичні методи, які застосовуються у фотограмметрії, традиційно можна поділити на два підрозділи:

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

Попередня обробка зображень має на меті усунення деформації образу, що спричинені дією зовнішніх або внутрішніх чинників (рефракція атмосфери, дисторсія оптичної системи, деформація фотографічного матеріалу, помилки при скануванні фотографічного зображення тощо). Саме тоді вимірний образ (знімок) буде представлений у вигляді сукупності плоских прямокутних координат (x, y) , які з найбільшою ймовірністю відповідали б їх істинним значенням (x^0, y^0) . Інша задача попередньої обробки зображень стосується покращання якості зображення (контраст, оптична щільність, кольорова гама тощо – все це в сукупності називають радіометричними характе-

ристиками), а також за необхідності їх компактного (ущільненого) запису, оскільки обсяг інформації навіть для одного цифрового знімка є досить великим.

Методи фотограмметричних побудов – це класичні задачі аналітичної фотограмметрії:

- визначення просторових координат точок об'єкта з поодинокого знімка та стереопари;
- перехід від нахиленого знімка до горизонтального знімка в заданому масштабі (трансформування поодинокого знімка);
- пряма та обернена фотограмметрична 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 тощо.

Усі ці задачі достатньо опрацьовані і становлять базу аналітичної фотограмметрії [1, 2]. А чи є тут можливість подальших наукових пошуків? Безперечно, так. І вкажемо лише на один аспект.

При вирівнюванні аналітичної фототріангуляції (а взагалі в аналітичній фотограмметрії) приймається за базову модель, що помилки вимірів носять випадковий характер і розподіляються за законом Гаусса. Тоді є всі підстави застосовувати метод найменших квадратів. В цифровій фотограмметрії ми прагнемо до автоматичного вимірювання стереопари. Можна припустити, що внаслідок такого автоматичного процесу в несприятливих місцях зображення (ліс, забудова, водна поверхня тощо), цей процес буде супроводжуватися грубими помилками. 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 [1]. Але це стосувалось фотозображень, а яка реальна картина при використанні автоматичних фотограмметричних вимірів, – це мають показати дослідження.

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

Програмні продукти, що використовуються в цифрових фотограмметричних станціях, є досить різноманітними, і їх наявність-відсутність залежить від фірми-виробника. Безперечно, що процес розширення програмних засобів є неперервним. Більшість фірм намагається зробити пакет універсальним, застосовуючи модульний принцип нарощування програм. В деяких випадках відчувається певна орієнтація на обробку зображень (знімків) конкретного типу (радіолокаційних, сканерних, кадрових, телевізійних тощо). До найпотужніших пакетів необхідно віднести розробки фірм LH-Systems (Швейцарія) та Intergraph (США).

Які головні завдання тут виникають? Це є нарощування програмних засобів, надання їм універсальності стосовно можливого опрацювання зображень, отриманих з різних сенсорів. Інше завдання – це опрацювання програмних засобів, що даватимуть змогу автоматично виконувати вимірювальні фотограмметричні операції (пошук стандартних зображень, пошук зв'язкових точок, пошук спільних точок в міжмаршрутному перекритті тощо). Особливою великою проблемою є автоматизація процесу інтерпретації зображень, що колись називалась як "автоматизація дешифру-

вання знімків". Ця проблема досі не вирішена, і можливо, з появою новітніх "систем штучного інтелекту" ми наблизились до її хоча б часткового вирішення.

Комп'ютерна техніка. Це є насамперед сам комп'ютер, що характеризується найбільш важливими параметрами: обсяги зовнішньої та внутрішньої пам'яті, швидкодія, розміри та площинність екрана, можливість працювати з графікою та периферійні пристрої (система стереоспостереження, друкарські пристрої, засоби створення мережевих систем, плоттери великих форматів тощо). Вимоги до технічних засобів, як і рекомендації до потрібних операційних систем, найчастіше подаються виробником цифрових фотограмметричних станцій.

Відомо, що кожних два-три роки потужність комп'ютерів істотно зростає. Як приклад, в 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 в цій сфері зумовлений розквітом як фундаментальних досліджень в області фізики, так і здобутками в сфері мікроелектроніки. На щастя, цей процес має позитивну тенденцію, а це означає неминучий розвиток цифрової фотограмметрії.

Цифрова фотографія та знімальні системи. Цифрова фотографія стрімко ввирвалася в нашу діяльність і її присутність на рівні аматорського, професійного та наукового застосування невинно зростає. У фотограмметрії це стало можливим завдяки появі на ринку лінійок та матриць ПЗЗ з високою роздільною здатністю.

Порівняно з аматорськими цифровими камерами фотограмметрія висуває значно вищі вимоги до цифрових аерознімальних систем. Вони зводяться ось до чого:

- оптика таких систем повинна бути дуже високої якості, практично "бездисторсійною";
- сенсори типу ПЗЗ повинні передавати (фіксувати) образ з високою роздільною здатністю і 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, обсяг 200-1000 гігабайт і більше;
- в таких системах повинні бути GPS-приймачі, що синхронно працюють зі знімальною камерою та дають можливість фіксувати просторові координати центрів проєкцій в момент знімання, а також інерціально-навігаційні системи (INS) для фіксації кутів нахилу камери в момент знімання.

На сьогодні лише кілька фірм (Швейцарія, Німеччина – США, Австрія, Україна) продукують такі знімальні системи. Найбільш відомими 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 fur Luft un Raumfahrt), а також DMC 2001 (Digital Modular Camera), виробництва фірми Z/I Imaging. В україномовній літературі дані про ці системи можна знайти в [3].

Принципова різниця між цими двома системами полягає в тому, що в ADS40 використовується ПЗЗ матриця (що дає змогу класифікувати отримане зображення як таке, що є аналогом аерофотознімка – центральна проєкція).

За високої якості отримання цифрового зображення системи такого класу поки що є досить дорогими. І це є стримуючим чинником для широкого впровадження їх в практику, оскільки не кожна фірма середнього достатку може придбати апаратуру за 1,5 млн. доларів.

Проте шлях широкого застосування систем такого типу є досить перспективним. Очевидно, буде тенденція до зниження вартості як за рахунок здешевлення базових компонентів (ПЗЗ – сенсор, програмні продукти, GPS, INS тощо), так і з появою конкурентоспроможних пропозицій від інших виробників.

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 це має місце в фотографії. Тоді і сенсори відповідно налаштовані на прийом певних сигналів.

Нижче подаємо характеристики діапазонів електромагнітного випромінювання та відповідних типів апаратури, що дає змогу реєструвати такі хвилі [4, 5]:

- 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, 0,1–30 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 при збільшенні довжини хвилі точність визначення місцезнаходження об'єкта знижується. Проте у фотограмметрії космічній це не є перешкодою, оскільки йдеться не про карти великих масштабів, а про інтерпретацію та прив'язку об'єктів та явищ з вимогами, співзвучними з точністю географічних карт.

Нові технологічні рішення завжди пов'язані з новою апаратурою. Саме до цього напрямку слід віднести радарну інтерферометрію. Радар, встановлений на супутнику, висилає 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 спеціальної комп'ютерної обробки дає видиме зображення. В 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.

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 зближуються 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 [6, 7].

На сьогоднішній день 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 різняться між собою геометричною схемою визначення віддалі. В першому – віддаль обчислюється по часу проходження сигналу до об'єкта і назад або ж фазовим методом, порівнянням фаз висланого та прийнятого сигналів.

В іншому – віддаль отримують з трикутника, утвореного точкою розташування відхиляючого дзеркала лазерного променя, точкою на поверхні об'єкта та оптичним центром приладу, що встановлений 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 100 000 Гц) та повна автоматизація отримання просторових координат точок об'єкта в часі 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. В таких умовах точність визначення координат є гіршою.

Лазерний пучок при проектуванні на об'єкт постає плямою, розмір якої залежить від віддалі "прилад-об'єкт". Чим віддаль більша, 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 с!), а 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 при опрацюванні останній відбитий сигнал, то отримаємо ЦМР поверхні Землі, якщо перший – то дістанемо висоти дерев, будинків тощо.

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

Зрозумілим є те, що при скануванні системою не отримуємо зображення об'єкта, а тільки ЦМР. Тому рекомендовано вживати дані Lidar для побудови ЦМР та цифрової моделі поверхні, для отримання цифрових моделей об'єктів, розташованих на землі (будинки, дерева), для просторової візуалізації об'єкта з різних точок бачення, побудови профілів по заданих напрямках тощо.

Геоінформаційні системи (ГІС) і технології 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 може досить ефективно поставляти фотограмметрія. І ясна річ, що оскільки головним інструментом для ГІС є комп'ютер, то мусимо мати цифрове зображення.

Збір та опрацювання даних в цифровій фотограмметрії тісно пов'язується та орієнтується на конкретного споживача. Тому те, що показано на рис. 2 під назвою "застосування", слід трактувати як "систему комунікації" між цифровою фотограмметрією та конкретними користувачами. Спектр такої комунікації дуже широкий.

У картографії (в тому числі і в цифровій картографії) використовується топографічна і спеціальна інформація в 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 їх 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 знаходяться тепер під постійним наглядом спеціалістів. А для них і карти, і видиме зображення, і просторові моделі є надзвичайно корисним матеріалом, причому не тільки для візуальної оцінки. В моніторингові задачі все потужніше проникають методи математичного опрацювання, а тут без дискретних просторових моделей не обійтися. Тому цифрова фотограмметрія є незамінним інструментом для отримання таких даних.

Прикладне застосування цифрової фотограмметрії ввібрало в себе усі попередні досягнення класичної фотограмметрії, з одного боку, а з іншого, – відкрило нові можливості як з технічної точки зору, так і з інформаційної.

Коли говоримо про прикладне застосування, то маємо на увазі багато різних галузей науки і народного господарства. Вкажемо тут лише на два приклади. Від 50-х років ХХ століття існує напрям, що має назву "архітектурна фотограмметрія". Засобами фотограмметричного опрацювання зображень розв'язуються 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 при

застосуванні комп'ютерного опрацювання 3D-моделей архітектори, будівельники, історики, археологи отримали можливість дуже ефективно розв'язувати свої задачі.

Інший приклад стосується нашого досвіду з використання цифрової фотограмметрії для дослідження процесу 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 в льодовій обстановці цієї суворої та притягуючої частини нашої Землі.

Висновки. Цифрова фотограмметрія вбирає в себе новітні досягнення комп'ютерних наук, геоінформатики, розбудови нових технічних засобів дистанційного зондування, що забезпечує їй подальший розквіт та широке практичне застосування.

1. Дорожжінський О.Л. Аналітична та цифрова фотограмметрія. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2002. – 163 с. 2. Лобанів А.Н. Аналітична фотограмметрія. – М.: Недра, 1972. – 224 с. 3. Дорожжінський О.Л. Основи фотограмметрії. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2003. – 212 с. 4. Sitek Z. Wprowadzenie do teledetekcji lotniczej I satelitarnej. – Krakow: Wyd. naukowo-dydaktyczne, 2000. – 354 s. 5. Ciolkosz A., Miszalski J., Oledzki J. Interpretacja zdjęć lotniczych. – Warszawa: Wydawnictwo naukowe PWN, 1999. – 459 s. 6. Tarek Zein, Rusiecki J. Skanowanie terenu laserem lotniczym. Magazyn informacyjny "Geodeta". – Grudzien 2002. – № 12(91). – S. 38–40. 7. 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.