

Національний університет “Львівська політехніка”

БАБУШКА АНДРІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 528.85

**ОЦІНКА ІНФОРМАТИВНОСТІ АВІАЦІЙНОГО ЛАЗЕРНОГО
СКАНУВАННЯ ДЛЯ РОЗВ’ЯЗАННЯ ГІДРОГРАФІЧНИХ ЗАДАЧ**

05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Львів – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті “Львівська політехніка”
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Бурштинська Христина Василівна,
професор кафедри фотограмметрії та геоінформатики
Національного університету “Львівська політехніка”

Офіційні опоненти:

- д.т.н., доцент **Шульц** Роман Володимирович, професор кафедри геоінформатики і фотограмметрії Київського національного університету будівництва і архітектури, м. Київ;
- к.т.н. **Москаленко** Антоніна Анатоліївна, доцент кафедри геоінформаційних систем і технологій Національного університету біоресурсів і природокористування України, м. Київ.

Захист відбудеться «28» грудня 2015 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.12 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, Львів-13, вул. Карпінського, 6, ауд.502 II-го навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «27» листопада 2015 р.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради, к.т.н., доц.

Б.Б.Паляниця

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Кінець XX – початок XXI століть для геодезичної науки та виробництва визначається постійно зростаючою потребою отримання та використання геопросторових даних. Крім існуючих методик, з'являються ефективніші, в яких використовують принципово нові підходи отримання зображень та точкових даних, зокрема авіаційне лазерне сканування (АЛС).

Перші лазерні системи використовували для коридорного знімання суто з топографічною метою, сьогодні лазерні сканери застосовують в практиці моніторингу земної поверхні, просторового моделювання територій, інвентаризації доріг, ліній електропередач, лісових масивів, створення кадастрових планів різного призначення. Окремо розвивається напрям дослідження рельєфу дна, морської рослинності та інших підводних об'єктів – батиметричне знімання.

Використання лазерного сканування пов'язане з оцінкою техногенного впливу та виявленням наслідків стихійних лих (землетрусів, ураганів, повеней та ін.). Технологію лазерного сканування місцевості з авіаційного носія щораз ширше використовують в геодезії, топографії та картографії, а також для розв'язання різних тематичних завдань. Повітряні лазерні сканери є ефективними у дослідженнях, пов'язаних з вивченням об'єктів, процесів та явищ, які базуються на використанні цифрових моделей рельєфу (ЦМР) та місцевості (ЦММ). Дані лазерного сканування застосовують для створення ортофотозображень та мозаїк (за створеною ЦМР), картографування територій, для проектування інфраструктури.

Завдяки постійному вдосконаленню технології, а також комбінації лазерного сканера з іншою знімальною апаратурою (наприклад, багатоспектральною оптико-електронною камерою), інформативність таких даних тільки підвищується, а перелік завдань, які можна розв'язати, постійно збільшується. Разом з апаратною частиною вдосконалюються також методи обробки даних лазерного сканування, що розширює їхні інтерпретаційні можливості та скорочує час на опрацювання. Не менш важливим є також питання автоматизації процесів обробки для зменшення ролі оператора та скорочення часу між виконанням знімання та отриманням готової продукції.

Питання використання даних лазерного сканування для дослідження гідрографічних об'єктів пов'язане в першу чергу з необхідністю якісного моделювання рельєфу земної поверхні. Такі об'єкти мають суттєвий вплив на побудову ЦМР – без коректного відображення структурних ліній гідрографічних об'єктів неможливо правильно змоделювати земну поверхню.

Моделювання гідрографічних об'єктів необхідне для розв'язання екологічних та гідрологічних задач, зокрема для виявлення потенційно небезпечних ділянок затоплення та підтоплення під час стихійних лих. Використання лазерних сканерів в останньому випадку дає можливість досить швидко і точно оцінити масштаби затоплення. Явні переваги лазерне сканування має у дослідженні морського шельфу, узбережжя морів і океанів, а також припливів і відпливів.

У передових країнах, де розвинутий ринок землі, використання лазерного сканування є буденним явищем. Основними перевагами застосування методу лазерного сканування місцевості є швидкість отримання кінцевого продукту, висока детальність та точність отриманих даних. Фактично головним обмеженням

застосування повітряних лазерних сканерів є їхня висока вартість, а, відповідно, і висока вартість готової продукції.

Якщо з початку виготовлення першої серійної лазерної сканувальної системи (1993р.) до початку 2000-х рр. у світі налічувалось близько 90 таких сканерів, то на даний час тільки одна канадська компанія Optech International Inc. в рік виготовляє їх більше 100. Асортимент лазерних сканерів в кожній компанії є досить широким – для певного типу завдань пропонують окрему систему із конкретними характеристиками.

Слід зазначити, що крім хмари точок, за якою будують ЦМР та ЦММ, отримують також додаткову інформацію (тематичні зображення), яка дозволяє розв'язувати спеціальні задачі.

Завдяки постійному розширенню сфер застосування лазерного сканування ця технологія є однією з головних у практиці дистанційного зондування, і в найближчі роки альтернативних методик для отримання ЦММ та ЦМР високої детальності у світі немає.

Роботи щодо застосування даних лазерного сканування для дослідження гідрографічних об'єктів проводились переважно за кордоном. Найдетальніше цією тематикою займаються науковці в Німеччині (Brzank, Heipke, Höfle, Schmidt), Канаді (Hopkinson), Росії (Данилин І.М., Медведєв Е.М., Ризаєв І.Г.), Україні (Шульц Р.В.), США та Китаї (Lin), є поодинокі дослідження в інших країнах.

Зважаючи на світову тенденцію, а також те, що новітні технології в Україні з'являються з деяким запізненням, можна передбачити, що використання даних лазерного сканування в нашій країні буде тільки зростати, а з відкриттям ринку землі збільшиться потреба у швидкому отриманні точних картографічних даних.

Зв'язок з важливими науковими та практичними програмами, планами, темами. Тема дисертації пов'язана з виконанням досліджень кафедри фотограмметрії та геоінформатики Національного університету "Львівська політехніка" за темою "Розробка та дослідження методів фотограмметрії, дистанційного зондування та геоінформаційних технологій для кількісної та якісної оцінки об'єктів, явищ і процесів".

Теоретичні та експериментальні результати досліджень лягли в основу лабораторних робіт та розрахунково-графічної роботи з навчальної дисципліни «Технології лазерного сканування».

Мета і завдання дослідження. Основною метою досліджень є оцінка інформативності авіаційного лазерного сканування для розв'язання гідрографічних задач, визначення впливу основних чинників на поширення лазерного сигналу, на точність та інформативність отримуваних даних, розробка методики опрацювання даних лазерного сканування з метою відображення берегових ліній гідрографічних об'єктів, розробка методу ефективною оптимізації входної поверхні для коректної побудови ЦМР з наявними гідрографічними об'єктами. За інформативність приймають співвідношення сигнал/шум лазерної знімальної системи. Ця величина дозволяє визначати фіксований сигнал точки відбиття. Для практичної реалізації досліджень використано дані авіаційного лазерного сканування, отримані знімальною системою Optech ALTM 3100EA.

Основними завданнями дисертаційної роботи є:

- розглянути фізичні основи лазерного сканування гідрографічних об'єктів та проаналізувати чинники, які впливають на послаблення лазерного сигналу, зокрема дослідити вплив атмосфери на інформативність лазерного сканування та методика її врахування під час обробки даних, визначити ступінь послаблення лазерного імпульсу за відбивання від водної поверхні та його вплив на планування маршрутів знімання;
- визначити можливості знімальної апаратури для фіксації лазерного імпульсу та його вплив на точність визначення координат точок місцевості;
- опрацювати класифікацію гідрографічних об'єктів, від якої залежить подальше опрацювання даних лазерного сканування;
- запропонувати методику визначення берегової лінії різнотипних гідрографічних об'єктів;
- запропонувати метод побудови оптимізованих цифрових моделей рельєфу, які містять гідрографічні об'єкти, та дослідити його ефективність.

Об'єктом дослідження є авіаційне лазерне сканування гідрографічних об'єктів.

Предмет дослідження – методи опрацювання даних лазерного сканування гідрографічних об'єктів.

Методи дослідження. В роботі використано новий підхід до аналізу впливу основних чинників на інформативність лазерного сканування, який базується на методах фізичного та математичного моделювання.

Запропонований метод оптимізації вхідної поверхні базується на методах математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів. Запропоновано методику врахування впливу основних чинників на інформативність даних лазерного сканування, здійснено її реалізацію та проаналізовано ефективність.

На підставі обчислення рівня повернутого сигналу від об'єктів з дифузним відбиттям запропоновано формулу для об'єктів з дзеркальним типом відбиття.

В роботі на підставі даних авіаційного лазерного сканування розглянуто та запропоновано методику побудови ЦМР з різнотипними гідрографічними об'єктами та визначення їх берегових ліній.

Вперше опрацьовано та реалізовано метод побудови оптимізованих цифрових моделей рельєфу, які містять гідрографічні об'єкти.

Практичне значення одержаних результатів. Методику та результати досліджень можна використати в державних та приватних проектно-вишукувальних установах, підприємствах та організаціях, які займаються дослідженням гідрографічних об'єктів. Результати роботи впроваджено в навчальний процес за спеціальностями «Фотограмметрія та дистанційне зондування» та «Геоінформаційні системи і технології» у Національному університеті «Львівська політехніка».

Особистий внесок здобувача. Досліджено вплив різних чинників на інформативність лазерного сканування гідрографічних об'єктів. Запропоновано формулу для обчислення рівня повернутого сигналу для об'єктів з дзеркальним типом відбиття. Виконано класифікацію гідрографічних об'єктів та запропоновано метод обробки даних лазерного сканування при дослідженні гідрографічних об'єктів. Опрацьовано та запропоновано новий метод оптимізації точок лазерного сканування для створення ЦМР з наявними гідрографічними об'єктами.

Апробація результатів роботи. Основні теоретичні та експериментальні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на:

1. I-й Всеукраїнській конференції “Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку і безпеки”, 3-5 червня 2008 р., м. Київ, Україна;
2. XVI-й Міжнародній науково-технічній конференції "ГЕОФОРУМ-2011", 27-29 квітня 2011 р., м. Львів-Яворів, Україна;
3. XVII-й Міжнародній науково-технічній конференції "ГЕОФОРУМ-2012", 25–27 квітня 2012 р., м. Львів-Яворів, Україна;
4. VII-й Міжнародній науково-технічній конференції «Кадастр, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку», 13-15 червня 2013 р., м. Львів, Україна;
5. XIX-й Міжнародній науково-технічній конференції "ГЕОФОРУМ-2014", 23-25 квітня 2014 р., м. Львів-Яворів, Україна.
6. Наукових семінарах кафедри фотограмметрії та геоінформатики (2010-2015рр.).

Публікації. Результати досліджень за темою дисертації опубліковано в сімох публікаціях, які наведені у списку використаних джерел, в тому числі шість у збірниках наукових праць – фахових виданнях України та одна – в іноземному періодичному виданні.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 133 сторінки, у тому числі 121 сторінка основного тексту, ілюстрації складають 68 рисунків та 15 таблиць. Бібліографія включає 110 найменувань і викладена на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У Вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, вказано наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, сформульовано основні положення, що виносяться на захист, викладено відомості про апробацію роботи, повноту публікацій та їх впровадження.

У першому розділі “Засади авіаційного лазерного сканування та задачі дисертаційної роботи” подано основні принципи лазерного сканування, сферу його застосування, а також можливість використання методики лазерного сканування для дослідження гідрографічних об’єктів. Подано короткий опис технології батиметричного знімання для дослідження рельєфу дна водойм. Проаналізовано публікації науковців, які проводили дослідження з використання даних лазерного сканування для розв’язання гідрографічних задач.

Питання інформативності лазерного сканування пов’язане з інтенсивністю відбитого від об’єкту сигналу, так як тільки достатній рівень сигналу дасть можливість зафіксувати його приймальною апаратурою. Тому огляд літератури проведено за трьома основними напрямками:

- вплив різноманітних чинників на зменшення інформативності даних лазерного сканування (фізичні основи лазерного сканування);
- дослідження, пов’язані з можливістю розрізнення водних об’єктів і суші за даними лазерного сканування;

- аналіз функціональних можливостей програмних пакетів для виконання прорідження точок лазерного сканування для коректного відображення горизонталей.

Встановлено, що основними чинниками впливу на зменшення рівня лазерного сигналу є параметри атмосфери, оптичні характеристики об'єкту локації (оптичні параметри) та апаратура лазерного сканера. Досліджень із впливу атмосфери на послаблення лазерного променя проведено недостатньо, тому і надалі питання залишається відкритим. Основні відомості про поглинання і розсіювання лазерного променя атмосферою взяті з практики дистанційного зондування, де розглядається сонячне випромінювання, як джерело світла. Враховуючи, що лазерні промені є когерентними і вузько спрямованими, здатними поширюватися на великі відстані, параметри впливу атмосфери на них відрізнятимуться від тих, які діють для сонячного світла. Тобто, за сприятливих погодних умов атмосфера може мати менший вплив, а за несприятливих – значно більший, ніж для сонячного світла.

Питання впливу атмосфери та підстильної поверхні на рівень зафіксованого відбитого сигналу за лазерного сканування взагалі вивчено недостатньо. Деякі дослідження проводились для передавання горизонтального лазерного сигналу між двома точками, а також для лазерних радарів, що не відповідає умовам авіаційного лазерного сканування. В публікаціях немає комплексного підходу до визначення всіх чинників, які впливають на рівень отриманого сигналу за певних умов сканування. Існуючі емпіричні формули в процесі нових досліджень уточнюються різними авторами, що призводить до появи певної неоднозначності у визначенні невідомих параметрів.

Методи, які використовують для ідентифікації та моделювання гідрографічних об'єктів, можна розділити на декілька груп:

- методи, за якими проводять автоматичну класифікацію точок лазерного сканування на “вода/земля” для подальшого моделювання гідрографічних об'єктів;
- методи, в яких використовують додаткові дані для ідентифікації гідрографічних об'єктів (наземні методи, батиметричне знімання, додаткові картматеріали та ін.);
- методи, в яких використовують всі наявні матеріали лазерного сканування для моделювання гідрографічних об'єктів.

Існуючі алгоритми хоча й дають прийнятний за точністю результат на одних ділянках, абсолютно не спрацьовують на інших. У багатьох випадках виділити суто гідрографічні об'єкти неможливо, тому що подібні класифікаційні характеристики мають також інші об'єкти. Крім того, запропоновані алгоритми дієво можуть працювати тільки у випадку виділення великих гідрографічних об'єктів, де параметри інтенсивності, щільності та висоти точок сканування не змінюються на заданій території. Автоматично означити у такому випадку, наприклад, вузький струмок неможливо. А якщо такий об'єкт буде знаходитись під кронами дерев, то тут виникають складнощі навіть у ручному інтерпретуванні. Тому питання розв'язання завдання класифікації точок водних об'єктів та суші є відкритим. Методи, які ґрунтуються на класифікації точок не є автоматизованими, тому що вони не вирішують питання векторизації гідрографічних об'єктів, а є тільки допоміжним етапом, який в певних випадках дозволяє точніше нанести межі водних об'єктів.

Надзвичайно велика щільність виміряних точок безперечно дає великі переваги АЛС над іншими методами знімання, а також дозволяє отримати дуже детальну цифрову модель місцевості, що є необхідним для розв'язання багатьох задач (в тому числі і гідрографічних). Тим не менше, якщо основною метою проведення лазерного знімання є створення топографічного плану території з точним відображенням об'єктів гідрографії та рельєфу місцевості у вигляді горизонталей, надмірна концентрація точок призводить до ускладнення процесу обробки даних. Тому, якщо раніше стояла задача з мінімального набору даних отримати максимально точну і детальну цифрову модель рельєфу, то з появою великих наборів даних (хмар точок) лазерного сканування виникла необхідність ефективного прорідження точок без суттєвої втрати точності і інформативності. В літературі описано складні математичні методи, але далеко не всі вони призначені для виконання задачі побудови оптимізованої моделі рельєфу земної поверхні. Тому в сучасних програмних комплексах використовують спрощені методи оптимізації точок, які не завжди дають бажаний результат, що підтверджується на практиці.

Для створення цифрових моделей місцевості важливе значення має точне відображення елементів гідрографії. Зокрема важливою є інформація про їхнє просторове положення, форму, а також просторове узгодження берегових ліній з рельєфом місцевості. Для такого узгодження і детальної ідентифікації використовують додаткову інформацію у вигляді растрових карт і векторних шарів.

У другому розділі **“Фізичні основи лазерного сканування”** розглянуто чинники, які впливають на точність лазерного сканування. Окремо виділено групу чинників, які впливають на зменшення рівня лазерного сигналу, а відповідно і на точність вимірювання відстані.

Основні групи чинників, які впливають на точність лазерного сканування. Точність лазерного сканування залежить від багатьох чинників і їх параметрів. Розрізняють дві групи чинників:

- геометричні, пов'язані безпосередньо з точністю визначення координат точок;
- фізичні, які впливають на послаблення лазерного сигналу і тим самим на точність визначення координат.

Висота польоту є головним параметром лазерного сканування, від неї залежать як геометричні, так і фізичні чинники.

До геометричних чинників належать:

- розходження променя лазера;
- кут сканування лазерного сканера;
- геометрія розташування супутників GPS;
- відстань до наземної базової станції GPS;
- параметри інерційної навігаційної системи.

Фізичні чинники, які впливають на послаблення лазерного сигналу. На послаблення інтенсивності лазерного сигналу, який фіксується приймальною апаратурою під час лазерної локації, впливають такі фізичні чинники:

- втрати сигналу, спричинені проходженням лазерного імпульсу через товщу атмосфери, зокрема селективне поглинання газовими компонентами, аерозольне поглинання і розсіювання, молекулярне розсіювання, турбулентність;

- оптичні властивості поверхні об'єкта локації (відбивна здатність, напрям відбиття, площа поверхні об'єкта локації);
- внутрішній і зовнішній шуми (шуми приймача і підсилювального приладу, шуми, обумовлені зворотнім розсіюванням лазерного променя та сонячного світла в атмосфері та інші).

Точність визначення координат точок ЦМР залежно від геометричної структури лазерного сканування достатньо вивчено і розглянуто в багатьох монографіях і наукових статтях. В той же час у розгляді фізичних чинників процесу через складність досліджень спостерігаємо суттєві прогалини. Тому, увагу зосереджено власне на розгляді впливу фізичних чинників на якість лазерного сканування. Ця група чинників є особливо важливою, так як визначає здатність системи фіксувати отриманий сигнал з необхідною точністю або не фіксувати його взагалі, тобто визначає також інформативність лазерного сканування. Виробниками точність визначення координат подається для конкретних умов (з високими параметрами видимості і відбивної здатності). Як буде змінюватись точність і інформативність лазерного сканування за умов наближених до реальних, не вказуються.

Вплив атмосфери на послаблення лазерного імпульсу. Основний вплив на поширення лазерного випромінювання в атмосфері належить аерозолям. Концентрація аерозолів різко зменшується із збільшенням висоти а основна їх концентрація знаходиться до 1км (типова висота знімання лазерним сканером). Тому необхідно враховувати можливі втрати енергії при зніманні, особливо це стосується сканування у промислових районах.

Основними оптичними параметрами, які визначають процес перенесення випромінювання в аерозольній атмосфері, є показники розсіювання σ і поглинання κ . Послаблення ε визначається за формулою:

$$\varepsilon = \sigma + \kappa. \quad (1)$$

В задачі лазерної локації для розрахунку показників послаблення, розсіювання і поглинання в різних метеорологічних умовах зазвичай використовують емпіричні співвідношення, отримані з експериментальних досліджень. Всі вони використовують як базовий параметр метеорологічну дальність видимості S_M .

В дисертаційній роботі розраховано показники аерозольного послаблення атмосфери для літнього, весняно-осіннього та зимового періодів. Відомо, що загалом атмосфера зимового періоду є чистішою, ніж в інші періоди. Проте, результати проведених розрахунків показують, що за наявності серпанку менших втрат енергії лазерного сигналу слід очікувати саме за сканування поверхні в літній період. Однак, для вибору часу лазерного знімання в різні сезонні періоди слід зважати на наявність в атмосфері аерозолів та кількість днів з високою видимістю.

Для практичного застосування використано наближену, але зручну для розрахунку коефіцієнта аерозольного послаблення формулою:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{3,91}{S_M} \left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^{0,585\sqrt{S_M}}, \quad (2)$$

де λ – довжина хвилі випромінювання;

В таблиці 1 подано розраховані значення ε для типових довжин хвиль λ лазерних сканерів та $S_M=1,2,3,4,5,6$ км.

Таблиця 1

Розраховані значення $\varepsilon(\lambda)$ для типових довжин хвиль λ лазерних сканерів

λ , нм	$\varepsilon(\lambda)$, км ⁻¹					
	$S_M = 1$ км	$S_M = 2$ км	$S_M = 3$ км	$S_M = 4$ км	$S_M = 5$ км	$S_M = 6$ км
1064	2,66	1,20	0,75	0,53	0,40	0,32
1560	2,13	0,91	0,54	0,37	0,28	0,22

Для розрахунку втрат енергії лазерного імпульсу під час проходження його крізь атмосферну товщу використовують коефіцієнт пропускання атмосфери T , який є експоненційною функцією коефіцієнта аерозольного послаблення $\varepsilon(\lambda)$ та відстані R , має межі від 0 до 1 і обчислюється за формулою:

$$T = \exp(-\varepsilon(\lambda) \cdot R). \quad (3)$$

В таблиці 2 подано розраховані значення коефіцієнта пропускання атмосфери T . Значення коефіцієнта аерозольного послаблення $\varepsilon(\lambda)$ взято з таблиці 1, а значення R прийнято рівним 1км.

Таблиця 2

Розраховані значення T для типових довжин хвиль λ лазерних сканерів

λ , нм	T					
	$S_M = 1$ км	$S_M = 2$ км	$S_M = 3$ км	$S_M = 4$ км	$S_M = 5$ км	$S_M = 6$ км
1064	0,07	0,30	0,47	0,59	0,67	0,73
1560	0,40	0,58	0,69	0,76	0,80	0,80

Графіки залежності коефіцієнта пропускання атмосфери T від метеорологічної дальності видимості для довжин хвиль 1064 і 1560нм подано на рис.1.

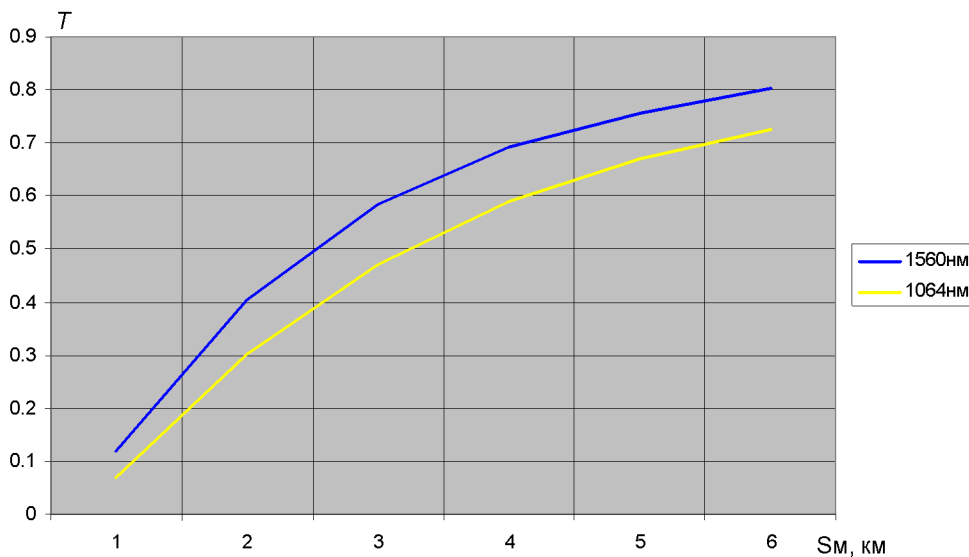


Рис.1. Графіки залежності коефіцієнта пропускання атмосфери T від метеорологічної дальності видимості для довжин хвиль 1064 і 1560нм

В дисертаційній роботі також розраховано значення показників молекулярного розсіювання, яке може мати вплив за умов великої прозорості атмосфери та слабкої турбулентності. Результати розрахунків подано в таблиці 3. Також оцінено можливі зміни потужності лазерного сигналу за рахунок турбулентності атмосфери, які залежать від структурної характеристики показника заломлення C_n^2 .

Розраховані значення об'ємного коефіцієнту молекулярного розсіювання $K_S(\lambda, z)$

λ , нм	$K_S(\lambda, z)$, км ⁻¹				
	$z=0$ км	$z=1$ км	$z=2$ км	$z=3$ км	$z=4$ км
1064	$7,177 \cdot 10^{-4}$	$6,501 \cdot 10^{-4}$	$5,911 \cdot 10^{-4}$	$5,319 \cdot 10^{-4}$	$4,785 \cdot 10^{-4}$
1560	$1,553 \cdot 10^{-4}$	$1,407 \cdot 10^{-4}$	$1,279 \cdot 10^{-4}$	$1,151 \cdot 10^{-4}$	$1,035 \cdot 10^{-4}$

Значення, розраховані для типових довжин хвиль лазерних сканерів і висот знімання вказують на те, що коефіцієнт молекулярного розсіювання та структурна характеристика показника заломлення C_n^2 є настільки малими, що ним можна нехтувати. Домінантний вплив на послаблення лазерного променя в атмосфері належить аерозолям, вплив яких може бути суттєвим за несприятливих метеорологічних умов. Зменшення потужності лазерного променя, а відповідно і точності визначення відстані, може сягати 5-7 разів.

Послаблення лазерного імпульсу при відбиванні від водної поверхні. Відкриті водойми відбивають лазерний промінь дзеркально. Тому відбивні властивості води визначаються кутом падіння променя. За незбуреної водної поверхні лазерний імпульс повертається до сенсора, якщо кут його падіння буде близьким до 0°. Із збільшенням кута падіння внаслідок дзеркального відбиття сигнал практично повністю втрачається. У випадку бурхливої водної поверхні, промені надирного напрямку повертаються з високою інтенсивністю, а промені, що відбилися від країв смуги сканування, мають слабкий сигнал або повністю втрачаються. Відбивні характеристики межі середовищ “повітря-вода” задаються коефіцієнтами відбиття Френеля, які для незбуреної водної поверхні визначаються такими формулами:

$$V_{\parallel}^2 = \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{n \cos \alpha - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}}}{n \cos \alpha + \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}}} \right)^2 \\ \left(\frac{\cos \alpha - \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{\cos \alpha + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right)^2 \end{array} \right\}; \quad (4)$$

де V_{\parallel}, V_{\perp} – френелівські амплітудні коефіцієнти відбиття для компоненти електричного вектора відповідно в площині падіння і в перпендикулярній до площини падіння; α – кут падіння; $n = n_2/n_1$ (n_1, n_2 – коефіцієнти заломлення повітря і води).

Якщо в падаючому випромінюванні немає переважаючого напрямку коливань електричного вектора, то коефіцієнт відбиття V^2 визначається з виразу:

$$V^2 = 0,5(V_{\parallel}^2 + V_{\perp}^2). \quad (6)$$

Величина n для межі розподілу “повітря-вода” на довжині хвилі 1км становить 1,33. Обчислимо коефіцієнт Френеля для різних кутів падіння лазерного променя (таблиця 4).

Коефіцієнти Френеля для різних величин кутів падіння променя

Кут падіння, α°	Коефіцієнт Френеля, V^2
0 - 20	0,020
25	0,021
30	0,021
45	0,028
60	0,059
75	0,211
90	0,999

Результати розрахунків показують, що коефіцієнти Френеля є малими за кутів падіння променя до 30° . Із збільшенням кута падіння до 90° коефіцієнт наближається до 1. Але за великих кутів сигнал повністю втрачається внаслідок дзеркального відбиття, а малий коефіцієнт відбиття не завжди дає можливість зафіксувати повернутий сигнал.

Дзеркальний характер відбиття лазерного променя необхідно враховувати під час проектування маршрутів. Вісь маршруту при лазерному скануванні повинна пролягати вздовж гідрографічних об'єктів за їх наявності. Це збільшить кількість зареєстрованих від поверхні водойм сигналів, що необхідно для коректної побудови ЦМР.

Розрахунок енергії повернутого лазерного імпульсу. За дзеркального характеру відбиття тільки промені, які були випромінені в напрямку, близькому до надирного, повернуться назад до приймача, у цьому разі приймальна апаратура зможе їх зафіксувати. Для кутів відмінних від 0° сигнал буде практично повністю втрачатись внаслідок дзеркального відбиття. В реальних умовах будь-яка водна поверхня майже завжди є збуреною, тому відбиття отримують також за більших кутів падіння променя. Це відбувається внаслідок того, що із загальної площі поверхні, на яку падає лазерний промінь, якась невелика її частина в момент падіння може знаходитись перпендикулярно до променя (рис.2). Із збільшенням кута падіння ймовірність такого взаємного розташування падає, тому на краях смуги сканування зазвичай дуже мало зафіксованих відбиттів, а ті, які зафіксовані, мають дуже малу інтенсивність.

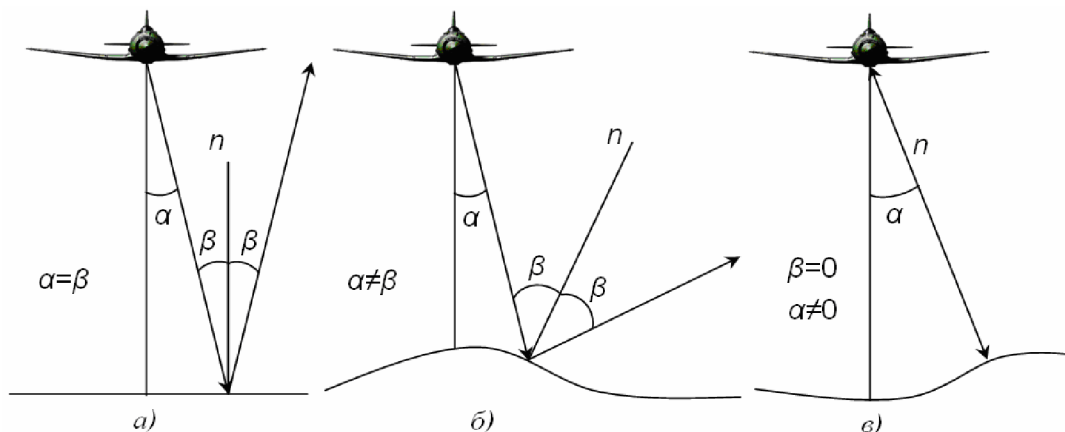


Рис.2. Відбиття лазерного променя від води у випадку: а) горизонтальної поверхні; б) збуреної поверхні за $\alpha \neq \beta$, в) збуреної поверхні за $\beta = 0$

Розрахунок відбитої енергії. Для отримання математичного виразу відбитої оптичної енергії P_R від поверхні води скористаємось рівнянням для дифузно відбивної поверхні. З урахуванням втрат в приймальній оптиці рівень повернутого сигналу буде зменшений, тому потрібно враховувати коефіцієнт пропускання оптичної системи η . Тоді рівняння запишемо у вигляді:

$$P_R = \rho \cdot \frac{A_r \cdot P_T \cdot T^2}{2\pi R^2} \cdot \eta, \quad (7)$$

де P_T – випромінена лазером оптична енергія; ρ – коефіцієнт відбиття поверхні; A_r – площа апертури приймального пристрою; R – відстань від сенсора до об'єкта локації; T – коефіцієнт пропускання атмосфери; η – коефіцієнт пропускання оптичної системи.

Як видно з формули, енергія повернутого імпульсу є прямо пропорційною до випроміненої лазером оптичної енергії та обернено пропорційною квадрату відстані до об'єкта.

Виходячи із теоретичних засад дифузного відбиття, отримано формулу для обчислення відбитої оптичної енергії у випадку дзеркального відбиття.

За дзеркального відбиття променя сигнал буде розсіюватись не в тілесний кут півсфери 2π , а у кут рівний $\Omega = \left(\frac{\pi(2R \cdot \beta)^2}{4} \right) \cdot \frac{1}{R^2}$, де $\frac{\pi(2R \cdot \beta)^2}{4}$ – частина площі сфери, в яку розсіюється відбитий сигнал; β – розходження лазерного променя в радіанах. Звідси $\Omega = \pi \cdot \beta^2$. При обчисленні частини площі сфери, в яку буде розсіюватись відбитий сигнал, знехтуємо значенням проекції апертури на місцевість D_{tar} (рис.3).

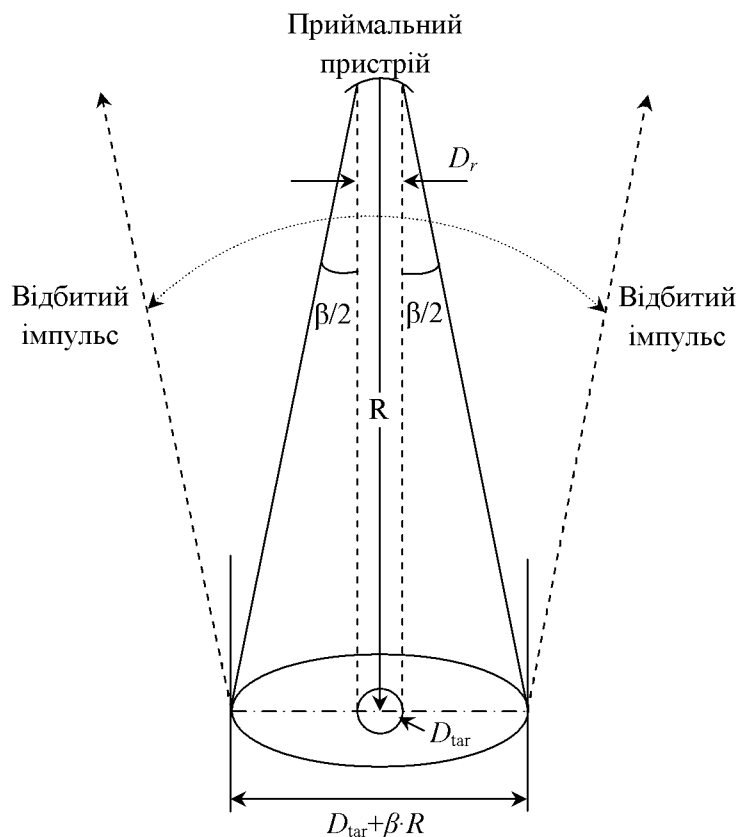


Рис.3. Геометрія проходження лазерного променя від випромінювача до цілі і в зворотному напрямку (кут падіння 0°)

Звідси запропонована формула матиме вигляд:

$$P_R = \rho \cdot \frac{A_r \cdot P_T \cdot T^2}{\pi \cdot R^2 \cdot \beta^2} \cdot \eta. \quad (8)$$

Розрахуємо енергію повернутого до приймача імпульсу за формулою (8) для типової системи. Параметри розрахунку: $P_T=2000\text{Вт}$, $\eta=0,8$, $\beta=0,3\text{рад}$, $D_r=0,1\text{м}$ (D_r – діаметр апертури приймального пристрою), $R=1000\text{м}$, $T=0,73$. Як показують попередні дослідження, для довжин хвиль близького інфрачервоного діапазону за малих кутів падіння значення $\rho=0,02$. Враховуючи тривалість лазерного імпульсу $T_p=10\text{нс}$, розраховане значення P_R запишемо в Джоулях: $P_R=1,4 \cdot 10^{-4}\text{ Вт} = 1,4 \cdot 10^{-12}\text{ Дж} = 1,4\text{пДж}$.

Як бачимо, отримане значення повернутої до приймача енергії є значно меншим порівняно з випроміненою енергією. Але навіть воно буде доступним тільки для ідеально гладкої водної поверхні і за нормального кута падіння (0°).

Для порівняння розрахуємо енергію повернутого імпульсу для дифузно відбиваючої поверхні за формулою (7), але коефіцієнт відбиття ρ приймемо рівним 0,5, що є типовим значенням для природних поверхонь (рослинність). Розраховане значення також подамо в Джоулях: $P_R=5,3 \cdot 10^{-7}\text{ Вт} = 5,3 \cdot 10^{-15}\text{ Дж} = 5,3\text{фДж}$.

Навіть з більшим на порядок коефіцієнтом відбиття, розраховане значення енергії повернутого імпульсу для дифузно відбивної поверхні майже у 1000 разів гірше, ніж для поверхні з дзеркальним відбиттям. Але потрібно зазначити, що таке значення для поверхні з дифузним відбиттям будемо отримувати за різних кутів падіння променя, а для дзеркальної поверхні – тільки за нормального кута падіння.

Розраховані значення отриманої енергії є теоретичними. В реальних умовах значення можуть бути ще меншими, так як сигнал не потрапляє на ідеально гладку поверхню.

Розрахунок параметра чутливості приймача. Часто для збільшення параметра чутливості в лазерних системах застосовують лавинні фотодіоди (APD – avalanche photodiode detectors), особливістю яких є внутрішнє підсилення сигналу за рахунок лавинного множення (визначається коефіцієнтом лавинного множення M). Основним параметром, який впливає на вибір того чи іншого фотодіоду є його чутливість, яка повинна бути якомога вищою і визначається за формулою

$$\mathfrak{R}_1 = \frac{\eta \cdot q}{h \cdot \nu} \cdot M. \quad (9)$$

де η – квантова ефективність; q – заряд електрона, елементарний заряд ($1,6 \cdot 10^{-19}\text{Кл}$); h – стала Планка ($6,626 \cdot 10^{-34}\text{Дж}\cdot\text{с}$); ν – частота фотону.

Квантовий коефіцієнт залежить від типу фотодіоду, зокрема від матеріалу, з якого виготовлено фотодіод, а також довжини хвилі випромінювання, яке ним фіксується. Для кремнієвих фотодіодів і довжини хвилі 1064нм квантовий коефіцієнт рівний 0,3. Лавинний множник для кремнієвих фотодіодів може досягати значення більшого, ніж 400. Для розрахунків приймемо типове значення, $M=120$. Тоді: $\mathfrak{R}_1 = 30,89$.

Розрахунок співвідношення сигнал/шум. Враховуючи різні типи шумів, зокрема фоновий, темновий та тепловий шуми, може виникнути ситуація, за якої рівень повернутого сигналу буде недостатнім, щоб перевищити порогове значення

приймача, і тому такий сигнал буде сприйматись як шум, тобто реєстрацію не буде здійснено.

Основною характеристикою, яка визначає здатність приймача фіксувати повернутий лазерний імпульс, є співвідношення сигнал/шум (SNR – signal to noise ratio) на виході з приймача. SNR обчислюється за формулою:

$$SNR = \frac{\mathfrak{R}_1 \cdot P_R \cdot G}{\sqrt{2q \cdot G^2 \cdot [I_{ds} + F(M) \cdot M^2 (I_{db} + \mathfrak{R}_0 [P_r + P_{bg}])] \cdot B + \sigma^2 B}}, \quad (10)$$

де I_{ds} – поверхневий темновий струм фотодіоду; I_{db} – об'ємний темновий струм фотодіоду; $F(M)$ – чинник надлишкового шуму фотодіоду; P_{bg} – рівень фонові радіації; B – ефективна смуга пропускання шуму; G – коефіцієнт підсилення підсилювача; σ – еквівалентний вхідний шум підсилювача (тепловий шум).

Тепловий шум суттєво впливає тільки за дуже малих значень повернутої енергії. Враховуючи те, що вхідний сигнал підсилюється лавинним фотодетектором, а також самим підсилювачем, тепловим шумом при розрахунках знехтуємо. Слід також зазначити, що в сучасних системах ефективно організоване охолодження системи, а це мінімізує значення шуму.

Значення масового темнового струму є меншим від поверхневого, тому ним можна знехтувати, або винести за дужки і додати до поверхневого шуму. Так як виробники переважно вказують на параметр загального темнового струму фотодіоду – I_D , формула (10) матиме вигляд:

$$SNR = \frac{\mathfrak{R}_0 \cdot P_R \cdot M}{\sqrt{2q \cdot (I_D + F(M) \cdot M^2 \cdot \mathfrak{R}_0 [P_r + P_{bg}]) \cdot B}}. \quad (11)$$

Чинник надлишкового шуму для лавинного фотодіоду визначається за формулою McIntyre:

$$F(M) = kM + \left(2 - \frac{1}{M}\right)(1 - k), \quad (12)$$

де k – відношення коефіцієнтів іонізації електронів і дірок.

Для pin -фотодіодів $F(M)$ рівне 1, так як $M=1$. Для лавинних фотодіодів він може приймати різні значення залежно від багатьох чинників. Типове значення $F(M)$ для кремнієвих фотодіодів знаходиться в межах від 3 до 7. Для розрахунків приймемо середнє значення – 5.

Рівень фонові радіації визначають за формулою:

$$P_{bg} = L_b(\lambda) A_r \Omega_r \Delta\lambda, \quad (13)$$

де $L_b(\lambda)$ – рівень фонові радіації відбитого сонячного світла [$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$]; A_r – площа апертури приймального пристрою [м^2]; Ω_r – тілесний кут апертури приймального пристрою [ср]; $d\lambda$ – еквівалентна спектральна ширина [мкм].

Для розрахунку фонові радіації приймемо значення $L_b(\lambda)$ для водної поверхні та довжини хвилі 1064нм рівним $20 \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$, а $d\lambda=10\text{нм}$. Тоді $P_{bg}=12,3 \cdot 10^{-15}$ Вт. Для розрахунків використаємо значення I_D для фотодіоду компанії Perkin Elmer Canada Inc. (модель С30954Е), що дорівнює $1 \cdot 10^{-7}$ А. Цей фотодіод може працювати в pin і APD режимах. Після фіксування фотодіодом отриманий фотострум перетворюється у електричну напругу.

Розрахуємо значення SNR для pin та лавинних фотодіодів за дзеркального і дифузного відбиття за формулою 11, прийнявши вище розраховані значення P_R , а $B=1/T_p$. Для порівняльних розрахунків підставимо значення P_R у 10 і 100 разів менші від розрахованого для дифузного відбиття. Результати подамо в таблиці 5.

Таблиця 5

Розраховані значення SNR для різних значень енергії повернутого імпульсу

P_R , Вт	SNR для pin	SNR для pin в Дб	SNR для APD	SNR для APD в Дб
$1,4 \cdot 10^{-4}$	885	59	396	51
$5,3 \cdot 10^{-7}$	41	32	24	28
$5,3 \cdot 10^{-8}$	6	15	7,7	18
$5,3 \cdot 10^{-9}$	1	0	2,4	7,6

Як бачимо, за достатнього рівня повернутої енергії, pin -фотодіоди дозволяють досягнути кращого співвідношення сигнал/шум. Для дуже малих значень лавинні фотодіоди є більш прийнятними.

Враховуючи співвідношення сигнал/шум, обчислимо точність вимірювання нахиленої відстані σ_R . Для сигналу ідеальної форми точність σ_R обчислюється за формулою:

$$\sigma_R = \frac{c}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{SNR}} \cdot T_p, \quad (14)$$

де c – швидкість світла, T_p – тривалість лазерного імпульсу ($T_p=10$ нс).

Обчислені значення σ_R подамо в таблиці 6.

Таблиця 6

Розраховані значення σ_R для різних значень SNR

Тип фотодіоду	SNR	σ_R , см
pin	885	3,6
APD	396	5,3
pin	41	16,5
APD	24	21,5
APD	7,7	38,2
pin	6	43,4
APD	2,4	68

Як бачимо, співвідношення сигнал/шум може суттєво впливати на точність вимірювання відстані, а відповідно й на точність визначення координат. Враховуючи інші джерела похибок, досягти заявленої точності в реальних умовах дуже важко. Виробники апаратури декларують точність вимірювання відстані до 1-2см для конкретних умов (прозорості атмосфери більше 23км і коефіцієнта відбиття поверхні більше 80%). В останні роки спостерігається тенденція до зменшення потужності вихідного сигналу лазера, що веде до зниження співвідношення сигнал/шум, тому досягти такої точності практично не реально.

У третьому розділі “Лазерне сканування для дослідження гідрографічних об’єктів” подано класифікацію гідрографічних об’єктів за обробки даних лазерного сканування, запропоновано методику опрацювання даних при моделюванні гідрографічних об’єктів та визначенні урізів води, запропоновано методику

оптимізації вхідної інформації для коректного відображення рельєфу у вигляді горизонталей на ділянках з гідрографічними об'єктами.

Для певної систематизації досліджень розділено гідрографічні об'єкти на такі категорії:

1. Озера, ставки, водосховища.
2. Вузькі гірські струмки, які на топографічному плані заданого масштабу відображаються однією лінією.
3. Гірські струмки, які на топографічному плані заданого масштабу відображаються двома лініями.
4. Річки та струмки на рівнинній території, які на топографічному плані заданого масштабу відображаються двома лініями:
 - а) річки та струмки на рівнинній території з притоками;
 - б) річки та струмки на рівнинній території з розгалуженим руслом або які протікають по заболоченій території.
5. Мережа каналів та каналів.

Вихідними даними для роботи були набори даних лазерного сканування, які включають файли:

1. Хмари точок лазерного сканування.
2. Точки лазерного сканування, відкласифіковані в клас “земля”.
3. Файли контрольних горизонталей, побудованих за всіма точками лазерного сканування, відкласифікованими в клас “земля”.
4. Ортофотоплани.
5. Растри інтенсивності – растри, побудовані за даними про інтенсивність відбитого сигналу.
6. Растри рослинності – растри, побудовані за точками лазерного сканування, які в процесі класифікації віднесені до класу “рослинність”.
7. Тіньові моделі рельєфу (hillshade) – растри, побудовані за всіма точками лазерного сканування, відкласифікованими в клас “земля”.

Дані лазерного сканування отримано лазерним сканером компанії Optech ALTM 3100EA. Висота польоту носія під час знімання становила 1000м. Точність визначення планових координат для цієї системи залежить від висоти сканування і обчислюється за формулою $m_{x,y}=1/5500 \cdot H$. Для $H=1000$ м, $m_{x,y}=0,18$ м. Точність визначення координати z для $H=1000$ м не перевищує 0,1м за даними виробника. За отриманими значеннями точності визначення координат точок всі об'єкти можна наносити на план масштабу 1:2000 з перерізом рельєфу не меншим, ніж 0,5м. Отримані значення точності розраховані виробником апаратури для видимості атмосфери 23км та коефіцієнта відбиття поверхні 0,8. Ми ж проводили розрахунки для видимості 6км та коефіцієнта відбиття поверхні 0,5, що є більш типовими значеннями, тому розраховані значення точності визначення координат є такими: $m_{x,y}=1/4000 \cdot H$, $m_{x,y}=0,25$ м, $m_z=16,5$ см.

Дослідження, пов'язані з нанесенням гідрографічних об'єктів за даними лазерного сканування, розділено на два етапи:

- ідентифікація гідрографічних об'єктів та визначення планового положення їхніх берегових ліній;
- визначення висотного положення гідрографічних об'єктів.

Ці два етапи відрізняються наборами похідних даних, які необхідно використовувати для визначення планового і висотного положення гідрографічних об'єктів.

Визначення планового положення берегових ліній гідрографічних об'єктів. Експериментальні дослідження стосувались уточнення елементів гідрографічної мережі для таких типів об'єктів: складного русла ріки з розгалуженими притоками; різкого повороту русла; вузьких проток, що зливаються; струмків, повністю закритих рослинністю; берегової лінії озер; мережі каналів. Роботи виконано на 11-ти різних за складністю ділянках. Для визначення планового положення гідрографічних об'єктів використано додаткові растри, які отримують з опрацювання вхідних даних лазерного сканування, а також ортофотоплани. Наявність таких додаткових даних дозволила в багатьох випадках уточнити берегові лінії гідрографічних об'єктів, особливо тих, які частково закриті рослинністю. Для ідентифікації об'єктів, які повністю знаходяться під кронами дерев використано контрольні горизонталі, за характерною витягнутою формою яких можна ідентифікувати наприклад вузький гірський струмок. Особливо складними для нанесення є мережа каналів та розгалужена річка на заболоченій території. Детальний опис методики відображення поданий у дисертаційній роботі.

Визначення висотного положення гідрографічних об'єктів. Без точного моделювання гідрографічних об'єктів неможливо створити коректну ЦМР. Правильне визначення висотного положення відіграє тут ключову роль. Саме від висоти залежить, наскільки правильно буде відображено рівень озера чи ставка, а також нахил води річки на різних ділянках.

За складністю визначення висотного положення гідрографічні об'єкти можна розділити на три групи:

1. Площинні об'єкти зі стоячою водою (озера, ставки та водосховища, яким потрібно визначити тільки рівень водойми);
2. Вузькі лінійні об'єкти, які відображають на топографічному плані однією лінією (струмки та канали, яким необхідно визначити позначки вузлових точок);
3. Лінійні об'єкти, які відображають двома лініями (річки, струмки та канали, яким необхідно визначити позначки всіх вузлових точок на обох берегах).

У випадку відсутності точок на поверхні визначити рівень водойми є складно. На берегах сигнал може відбиватись від прибережної низької рослинності, а тому реальний рівень води може бути нижчим. Побудова профілів через водойму дозволяє побачити різний рівень точок на різних берегах. Наявність великої кількості точок на поверхні водойми дозволить уточнити за ними висотне положення (рис.4). У такому випадку спочатку необхідно вилучити точки, які мають найбільші відхилення від середнього значення, тобто є помилковими, а потім за всіма іншими точками визначити рівень води.

Складним випадком є моделювання площинної річки. Додатковою вимогою до таких об'єктів є необхідність присвоєння однакових позначок на двох протилежних берегах. Присвоєння позначок виконують методом прив'язки при нанесенні за контрольними горизонталями. Так як точки землі на берегах не відповідають урізу води річки, то наявність точок на поверхні води дозволила б точніше визначити позначку. Найдієвішим методом є побудова профілю річки, який дозволить провести

аналіз в заданому місці. У випадку складних розгалужених систем узгоджувати необхідно всі притоки, забезпечивши при цьому однакові позначки у місцях їх злиття, а також збереження загального нахилу річкової системи.

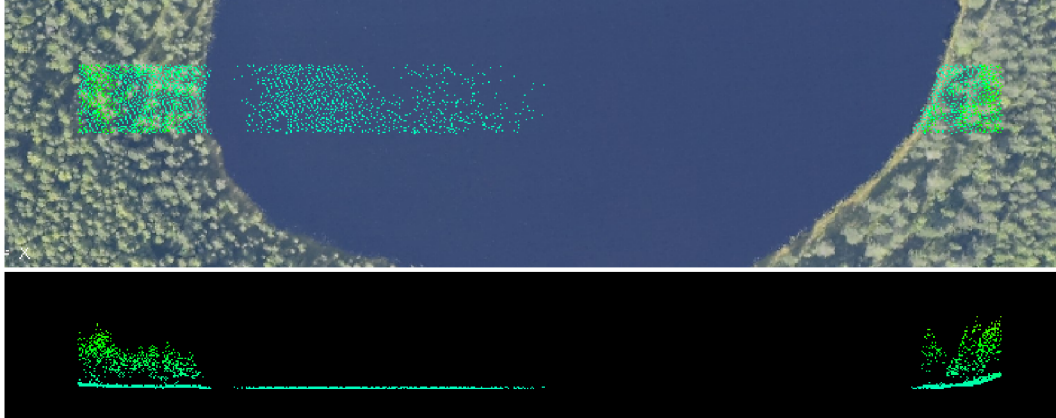


Рис.4. Побудова профілю через озеро з наявними точками на поверхні води

Фільтрація точок авіаційного лазерного сканування для побудови цифрової моделі рельєфу. Часто результатом лазерного сканування при картографуванні є відтворення рельєфу у вигляді горизонталей. Горизонталі, створені за всіма точками лазерного сканування класу “земля”, часто не відповідають вимогам до відображення рельєфу на топографічних планах і картах. Тому виконують фільтрацію вхідної ЦМР для отримання коректно побудованих горизонталей.

Наявність гідрографічних об’єктів ускладнює процедуру фільтрації. Це пов’язано із складним рельєфом поверхні, так як руслові процеси зумовлюють виникнення певних особливостей у відтворенні рельєфу (рис.5), які майже не зустрічаються за відсутності гідрографічних об’єктів. В таких місцях для забезпечення необхідної точності потрібно використовувати інші параметри фільтрації, або взагалі інший метод фільтрації. Після побудови горизонталей за оптимізованою ЦМР оператор повинен виконати контроль побудови, а за необхідності здійснити доопрацювання.

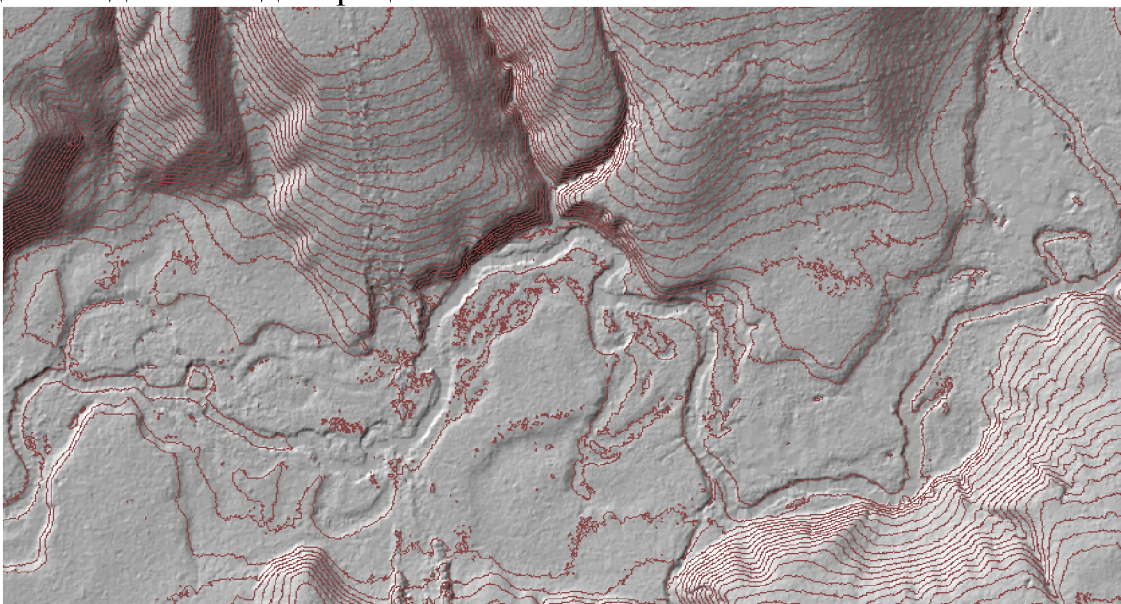


Рис.5. Тіньова модель рельєфу і горизонталі території з наявною річкою

Запропоновано метод фільтрації вхідної інформації, який полягає у використанні додаткових матеріалів: карт крутизни, кривизни, освітленості схилів.

Ці карти дають можливість вибрати отримати параметри фільтрації. На першому етапі будуємо карту крутизни схилів для класифікації поверхні. За картами кривизни і освітленості схилів визначаємо складність ділянок для вибору відповідного кроку сітки. На виході отримуємо регулярну ЦМР, в якій крок сітки змінюється залежно від типу рельєфу ділянки. Рельєф доповнюємо структурними лініями гідрографічних об'єктів. Для розрахунку позначок точок регулярної сітки можна використати різні способи. Зокрема нами використано метод середнього вагового. Схему запропонованої оптимізації вхідної інформації, отриманої за даними лазерного сканування, подано на рис.6. За алгоритмом фільтрації складено програму на мові програмування C Sharp.

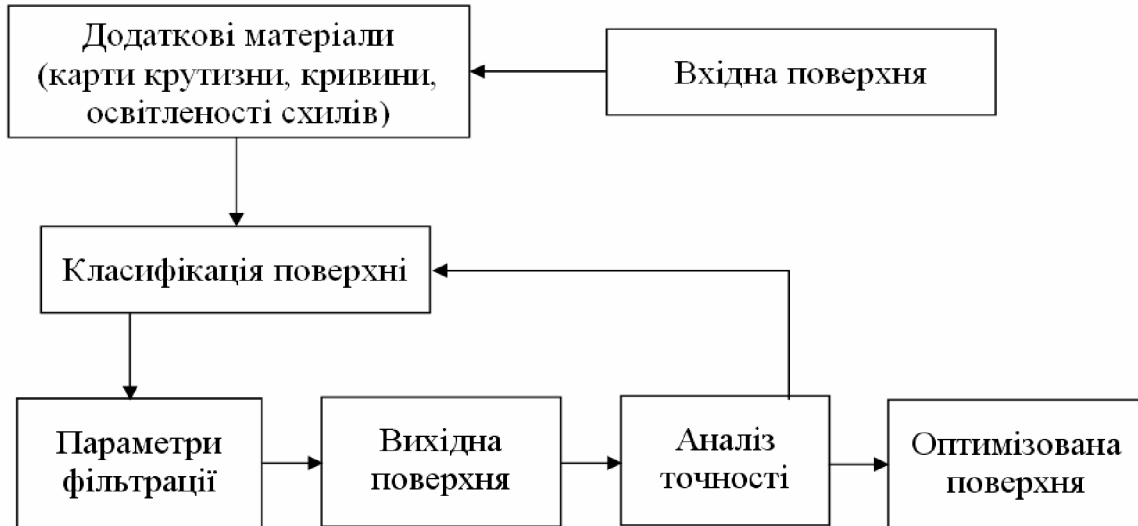


Рис.6. Схема оптимізації поверхні за даними повітряного лазерного сканування

Експериментальні дослідження для встановлення ефективності методу проводились на трьох тестових ділянках. Ділянку 1 з різними за складністю типами рельєфу подано на рис.7 (зелений колір – кути нахилу від 0° до 3° , жовтий – від 3° до 6° , синій – більше 6°).

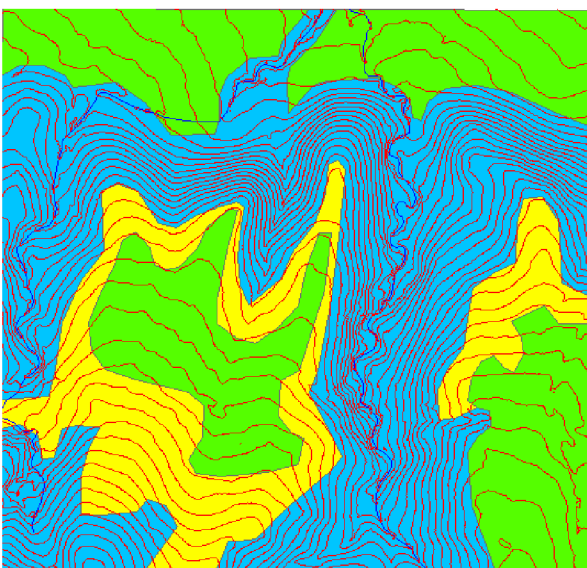


Рис.7. Ділянка 1 з нанесеними контрольними горизонталлями

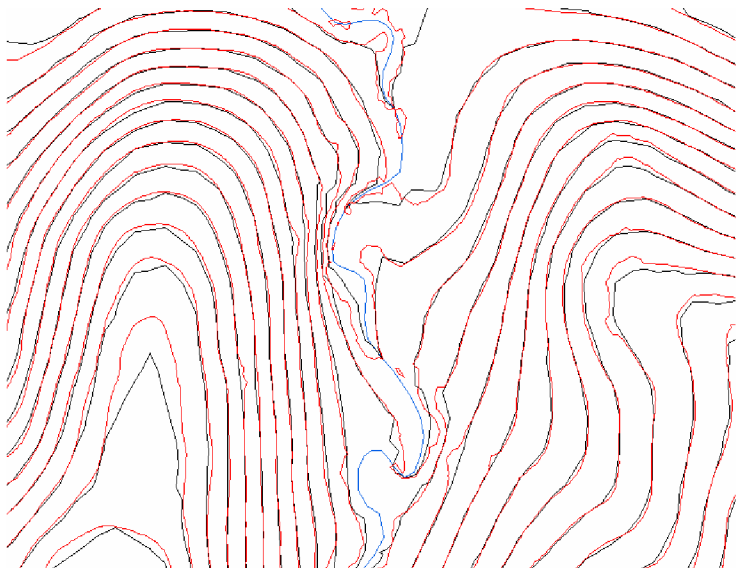


Рис.8. Фрагмент ділянки з побудованими горизонталлями за регулярною ЦМР та накладеними контрольними горизонталлями

Степінь фільтрації (таблиця 7) залежить від складності поверхні і може досягати до 220 разів.

В таблиці 8 подано результати досліджень для різнотипних гідрографічних об'єктів. Степінь фільтрації становить до 12 разів.

Таблиця 7

Результати експериментальних досліджень для трьох тестових ділянок

Номер ділянки	Розміри ділянки, м	Кути нахилу	Крок сітки, м	Кількість точок у вхідній ЦМР	Кількість точок після фільтрації ЦМР	Степінь фільтрації, разів
I	270×270	0° - 3°	12	34030	154	221
		3° - 6°	7	22320	267	84
		> 6°	4	56290	2266	12
II	225×275	0° - 3°	7	89232	786	114
		3° - 6°	4	27270	843	32
		6° - 70°	2	2209	319	7
		> 70°	-	2388	2388	1
III	210×154	0° - 3°	5	33576	857	39
		3° - 6°	3	4518	284	16
		> 6°	2	10306	1839	6

Таблиця 8

Результати експериментальних досліджень фільтрації точок на ділянках з різнотипними гідрографічними об'єктами

Тип гідрографічного об'єкту	Характеристика рельєфу	Кути нахилу рельєфу	Степінь фільтрації, разів
Вузкий гірський струмок	Гірський, з крутими берегами вздовж річки	Струмок: > 6° Беріг: > 6°	12
Річка на рівнинній території з притокою	Рівнинний, з крутими берегами вздовж річки	Річка: 0° - 3° Беріг: > 70°	1 - 1,4
Вузька звивиста річка на рівнинній території	Рівнинний з мікрорельєфом та крутими берегами вздовж річки	Річка: 0° - 3° Беріг: > 6° Окремі невеликі ділянки: > 70°	до 6

Фрагмент ділянки з побудованими горизонталями за відфільтрованою інформацією (*чорний колір*) та контрольними горизонталями (*червоний колір*) подано на рис.8.

З рис.8 видно, що загалом горизонталі, побудовані за оптимізованою ЦМР відповідають контрольним. Деякі розходження спостерігаються в місцях ускладненого рельєфу вздовж струмка. В таких місцях необхідне доопрацювання оператора.

Результати досліджень свідчать про ефективність методики, яка дозволяє без втрати точності суттєво зменшити кількість вхідної інформації.

ВИСНОВКИ

1. В результаті проведених досліджень встановлено, що основними чинниками, які зменшують рівень лазерного сигналу є втрата інтенсивності лазерного променя за рахунок впливу атмосфери, підстильної поверхні та приймальної апаратури.
2. За результатами визначених показників аерозольного послаблення, залежних від метеорологічної дальності видимості та довжини хвилі лазера, встановлено, що зимовий серпанок послаблює лазерний промінь більше порівняно з літнім. За несприятливих метеорологічних умов, зокрема за видимості до бкм, можна очікувати зниження інтенсивності сигналу в 5-7 разів, що веде до зменшення точності вимірювання відстані. Лазерні сканувальні системи з більшою довжиною хвилі менш чутливі до впливу аерозолей.
3. Втрати сигналу при скануванні водних об'єктів спричинені поглинанням та дзеркальним відбиттям променя від поверхні. Розраховано коефіцієнти поглинання інфрачервоного випромінювання водою та встановлено їх суттєвий вплив на рівень повернутого сигналу. Під час знімання місцевості з гідрографічними об'єктами сканування доцільно виконувати з кутами нахилу променя в межах від 0° до 6° , що необхідно враховувати під час проектування маршрутів польоту. Для витягнутих гідрографічних об'єктів (річки, струмки) маршрути повинні пролягати вздовж осі русла. Для таких водойм як озера, ставки, водосховища вісь маршруту доцільно прокладати через водойму з допустимими відхиленнями кута сканування.
4. На підставі аналізу загального випадку визначення рівня відбитої енергії від об'єктів з дифузним типом відбиття запропоновано формулу визначення рівня відбитої енергії для поверхонь з дзеркальним типом відбиття.
5. Із розрахунків встановлено, що для водних об'єктів за кутів сканування більших від 0° за збуреної поверхні доцільно використовувати як детектор лавинний фотодіод, що дозволяє збільшити кількість вимірних точок, а тим самим інформативність даних лазерного сканування в 2 рази.
6. Основними чинниками, які впливають на співвідношення сигнал/шум приймача, є потужність лазера та відстань до об'єкта. Для ідеальних умов знімання виробники апаратури декларують точність вимірювання відстані до 1-2см. Проведені розрахунки співвідношення сигнал/шум для реальних умов знімання вказують, що досягти такої точності практично неможливо і точність вимірювання відстані знижується в декілька разів залежно від умов знімання та типу апаратури.
7. Запропоновано та реалізовано метод побудови оптимізованої цифрової моделі рельєфу за даними лазерного сканування для ділянок з гідрографічними об'єктами, суть якого полягає у розбитті досліджуваної поверхні на класи відповідно до типу поверхні та виборі оптимального розміру регулярної сітки.
8. Створено програмний модуль та досліджено ефективність методу на трьох різних за складністю тестових ділянках з наявними гідрографічними об'єктами. Встановлено, що загалом кількість точок лазерного сканування для побудови ЦМР можна без втрати точності зменшити у 6-12 разів залежно від характеристик ділянок.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях:

1. Бабушка А.В. Вплив атмосфери на послаблення лазерного променя при скануванні місцевості. / Бурштинська Х.В., Бабушка А.В. // Міжвідомчий науково-технічний збірник “Геодезія, картографія і аерофотознімання”. Випуск 78. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2013. – С. 49–53.
2. Бабушка А.В. Особливості відбиття лазерного променя від водних об’єктів / Бабушка А.В. // Міжвідомчий науково-технічний збірник “Геодезія, картографія і аерофотознімання”. Випуск 76. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”, 2012. – С. 66–70.
3. Бабушка А. Методика відтворення контурів гідрографічних об’єктів за даними авіаційного лазерного сканування / Бабушка А. // Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК “Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва”, випуск II (22), ви-ва НУ “Львівська політехніка”, 2011. – С. 188–192.
4. Бабушка А. Використання даних лазерного сканування для побудови цифрових моделей рельєфу гідрографічних мереж гірських систем / Бурштинська Х., Бабушка А., Василюха І., Пікулик С. // Міжвідомчий науково-технічний збірник “Геодезія, картографія і аерофотознімання”. Випуск 71. – Львів: Національний університет “Львівська політехніка”. 2009. – С. 146–152.
5. Бабушка А. Особливості відтворення гідрографічних об’єктів за матеріалами лазерного сканування місцевості / Бурштинська Х., Бабушка А., Тарнавська О., Василюха І. // Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК “Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва”, випуск I (15), ви-ва НУ “Львівська політехніка”, 2008. – С. 200–213.
6. Бабушка А. Точність визначення площ затоплюваних земель за цифровою моделлю рельєфу. / Бурштинська Х., Бабушка А., Василюха І. // Збірник наукових праць. “Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва.” – Львів, – вид. НУ “Львівська політехніка”, - випуск I(13), 2007р. – С. 154–161.

Стаття в закордонному журналі:

7. Babushka A. The calculation of received optical power during airborne laser scanning of water object. / Babushka A., Burshtynska Kh., Babiy L. // Geomatics, Landmanagement and Landscape, Krakow, №3, 2014. – P. 7–16.

АНОТАЦІЯ

Бабушка А.В. **Оцінка інформативності авіаційного лазерного сканування для розв’язання гідрографічних задач. – На правах рукопису.** Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія. – Національний університет “Львівська політехніка”, Міністерства освіти і науки України, Львів, 2015.

В роботі розглянуто теоретичні засади та можливості застосування авіаційного лазерного сканування для розв’язання гідрографічних задач, зокрема моделювання гідрографічних об’єктів.

Досліджено і визначено основні чинники, які впливають на зменшення рівня повернутого лазерного сигналу. До них належать атмосфера, підстильна поверхня, та апаратура лазерного сканера. На підставі розрахунків впливу атмосфери на втрати сигналу встановлено, що показник аерозольного послаблення для довжин хвиль лазерних сканерів 1064 і 1560нм суттєво змінює точність визначення координат точок.

Проведено аналіз процесу відбиття лазерного променя від водної поверхні. Розраховано коефіцієнти відбиття Френеля для межі середовищ “повітря-вода” та встановлено їх залежність від кута падіння променя на поверхню води. Дзеркальний характер відбиття лазерного променя необхідно враховувати під час проектування маршрутів. Вісь маршруту при лазерному скануванні повинна пролягати вздовж гідрографічних об’єктів. Це збільшить кількість зареєстрованих від поверхні водою сигналів, що необхідно для коректної побудови ЦМР.

Запропоновано формулу обчислення рівня повернутої енергії для об’єктів з дзеркальним типом відбиття, за якою розраховано значення повернутої оптичної енергії від водної поверхні. Ці значення слугують для обчислень співвідношення сигнал/шум на виході з приймача. Визначено точність вимірювання нахиленої віддалі залежно від величини сигнал/шум. Встановлено, що для реальних умов знімання точність визначення координат точок може суттєво відрізнятись від декларованої виробниками точності.

Запропоновано та реалізовано методику оптимізації вхідної ЦМР для коректного відображення її у вигляді горизонталей, суть якої полягає у побудові регулярної сітки змінного кроку залежно від складності поверхні, з доповненням її структурними лініями гідрографічних об’єктів.

Створено програмний модуль та досліджено ефективність методу фільтрації на трьох різних за складністю тестових ділянках з наявними різнотипними гідрографічними об’єктами. Встановлено, що степінь фільтрації залежить від складності поверхні і може досягати до 220 разів, для різнотипних гідрографічних об’єктів степінь фільтрації становить до 12 разів без втрати точності.

Ключові слова: авіаційне лазерне сканування, гідрографічні об’єкти, співвідношення сигнал/шум, цифрова модель рельєфу.

АННОТАЦІЯ

Бабушка А.В. Оценка информативности авиационного лазерного сканирования для решения гидрографических задач. – На правах рукописи. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.24.01 – геодезия, фотограмметрия и картография. – Национальный университет “Львовская политехника”, Министерства образования и науки Украины, Львов, 2015.

В работе рассмотрены теоретические основы и возможности применения авиационного лазерного сканирования для решения гидрографических задач, в частности моделирования гидрографических объектов.

Исследованы и определены основные факторы, которые влияют на уменьшение уровня возвращенного лазерного сигнала. К ним относят атмосферу, подстилающую поверхность и аппаратуру лазерного сканера. На основании расчетов влияния

атмосферы на потери сигнала установлено, что показатель аэрозольного ослабления для длин волн лазерных сканеров 1064 и 1560нм существенно изменяет точность определения координат точек.

По результатам определенных показателей аэрозольного ослабления, зависящих от метеорологической дальности видимости и длины волны лазера, установлено, что зимняя дымка ослабляет лазерный луч больше по сравнению с летней.

Проведен анализ процесса отражения лазерного луча от водной поверхности, рассчитаны коэффициенты отражения Френеля для границы сред "воздух-вода" и установлено их зависимость от угла падения луча на поверхность воды. Зеркальный характер отражения лазерного луча необходимо учитывать при проектировании маршрутов. Ось маршрута при лазерном сканировании должна проходить вдоль гидрографических объектов. Это увеличит количество зарегистрированных на поверхности водоемов сигналов, что необходимо для корректного построения цифровой модели рельефа.

Предложена формула вычисления уровня возвращенной энергии для объектов с зеркальным типом отражения, по которой рассчитано значение возвращенной оптической энергии от водной поверхности. Эти значения служат для вычислений соотношения сигнал/шум на выходе из приемника. Определена точность измерения наклоненного расстояния в зависимости от величины сигнал/шум. Установлено, что для реальных условий съемки точность определения координат точек может существенно отличаться от точности, декларируемой производителями.

Осуществлена классификация гидрографических объектов при обработке данных лазерного сканирования. Предложено методику использования дополнительной информации авиационного лазерного сканирования в виде растров интенсивности, растительности и относительной освещенности склонов для моделирования гидрографических объектов. Представлена методика определения урезов воды гидрографических объектов при наличии точек на поверхности водоема.

Предложена и реализована методика оптимизации исходной ЦМР для корректного отображения ее в виде горизонталей, суть которой заключается в построении регулярной сетки с изменением шага в зависимости от сложности поверхности. Построенную ЦМР дополняют структурными линиями гидрографических объектов.

Создан программный модуль и исследована эффективность метода оптимизации на трех разных по сложности тестовых участках с имеющимися разнотипными гидрографическими объектами. Установлено, что для таких участков важны корректно смоделированные береговые линии при построении ЦМР. Установлено, что степень фильтрации зависит от сложности поверхности и может изменяться в 220 раз, для гидрографических объектов разного типа степень фильтрации составляет до 12 раз без потери точности.

Ключевые слова: авиационное лазерное сканирование, гидрографические объекты, соотношение сигнал/шум, цифровая модель рельефа.

ANNOTATION

Babushka A.V. The assessment of informativeness of airborne laser scanning for hydrographic tasks solving. – The Manuscript. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.24.01 - geodesy, photogrammetry and cartography. - Lviv National Polytechnic University, of Ministry of education and science of Ukraine, Lviv, 2015.

The thesis discusses the theoretical foundations and applications of airborne laser scanning solutions for hydrographic tasks, in particular the modelling of hydrographic objects.

The main factors which influence on the decrease of level of the returned laser signal are investigated and identified. Calculative study of the effect of the atmosphere on the signal loss is made. The aerosol attenuation for wavelengths 1064 and 1560 nm of laser scanners is determined.

The analysis of process of reflection of laser beam from the water surface is implemented, the Fresnel reflection coefficients are calculated for the boundary "air-water" and their dependence on the incidence angle of the beam on the water surface is established.

On the basis of the formula for calculating the level of recovered energy from the objects with diffuse reflection type it was proposed modified formula for the objects with a mirror reflection type. Using this formula there were calculated values of the returned optical energy from the water surface for determined values of atmospheric transmission coefficients and reflection coefficients of water surface.

Considering obtained values of the returned energy there was calculated signal/noise ratio at the output of the receiver. Measurement accuracy of tilted distance depending on the signal/noise ratio was determined. It was found that for real conditions of survey the accuracy of determination of point coordinates may considerably differ from the accuracy declared by the producers.

The classification of hydrographic objects when processing of laser scanning data is made. The technique of using additional information obtained by laser scanning for the modelling of hydrographic objects was developed. The technique of determining the water's edge for hydrographic objects on condition of the presence of points on water surface is presented.

There is proposed and implemented method of optimization of input original DEM to correctly display it in the form of contour lines. The essence of the method is to create a regular grid with variable step depending on the complexity of surface. The resulting DEM is complement with structural lines of hydrographic objects.

There was developed the program module and the effectiveness of the filtration method applying to three different according to difficulty test areas with existing heterogeneous hydrographic objects was investigated. It was established that for such areas it is important to implement correctly modelling of coastlines when DEM creation.

Keywords: airborne laser scanning, hydrographic objects, signal/noise ratio, digital elevation model.