

УДК 528.7:621.37:630:52 (045)

Особливості застосування лідарів для вивчення земних ландшафтів

М.В. Косарев, С.О. Ясенев

Національний авіаційний університет, м. Київ

Лідар — це технологія отримання та обробки інформації дистанційного зондування за допомогою активних оптичних систем (лазерів), що використовують, в тому числі, явища відбиття світла від поверхні Землі з проведенням високоточних вимірювань X , Y , Z координат. Встановлено, що точність підвищується при застосуванні апостеріорної інформації і розбитті сцени на однорідні ділянки.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИДАРОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЗЕМНЫХ ЛАНДШАФТОВ, Косарев Н.В., Ясенев С.А. — Лидар — это технология получения и обработки информации дистанционного зондирования с помощью активных оптических систем (лазеров), использующих, в том числе, явления отражения света от поверхности Земли с проведением высокоточных измерений X , Y , Z координат. Установлено, что точность повышается при применении апостериорной информации и разбиение сцены на однородные участки.

FEATURES OF LIDAR USAGE FOR EARTH'S LANDSCAPE EXPLORATION, by Kosarev N.V., Yasenev S.A. — Lidar is a technology for data processing and remote sensing using active optical systems (laser), including the phenomena of light reflection from the surface of the Earth to conduct precision measurements of X , Y , Z coordinates. It's established that accuracy increases when using a posteriori information and partition the scene into homogeneous areas.

Ключевые слова: лидар; дистанционное зондирование; оптические системы; ландшафт; координаты.

Key words: lidar; remote sensing; optical systems; landscape; coordinates.

1. ВСТУП

Лідар — це активний оптичний сенсор, що випускає лазерні промені в бік цілі під час руху транспортного засобу за спеціальними знімальним маршрутам. Відбивання лазерного променя від об'єкта приймається і аналізується сенсором. Приймачі записують точний час, що минув з моменту випускання лазерного імпульсу системою до моменту його повернення, для того, щоб обчислити відстань між сенсором і поверхнею землі. Спільно з інформацією про внутрішнє і зовнішнє позиціонування (GPS і INS), ці відстані перетворюються в тривимірні точки, які створюють поверхню відображення лазерних імпульсів.

Точкові дані піддаються подальшій обробці після збору, з урахуванням діапазону часу роботи лазера, кута сканування, координат GPS, інформації про внутрішнє позиціонування (INS), що дозволяє отримати точні координати x, y, z [6].

Крім позиційних значень x, y, z системою зберігається також додаткова інформація. Для кожного лазерного імпульсу записуються і зберігаються наступні атрибути: інтенсивність, номер відбиття, кількість відображених сигналів, значення класифікації точки, крайні точки лінії польоту, значення RGB, час GPS, кут і напрямок сканування.

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Здатність електромагнітного випромінювання поширюватися з постійною швидкістю дає можливість визначати дальність до об'єкта. Так, при імпульсному методі вимірювання дальності використовується наступне співвідношення:

$$L = \frac{ct}{2n}, \quad (1)$$

де L — відстань до об'єкта, c — швидкість світла у вакуумі, t — час проходження імпульсу до цілі і назад, n — показник заломлення середовища, у якому поширюється випромінювання. Це співвідношення показує, що потенційна точність виміру дальності визначається точністю вимірювання часу проходження імпульсу енергії до об'єкта і назад. Ясно, що чим коротше фронт імпульсу, тим краще.

На відміну від радіохвиль, ефективно віддзеркалюваних тільки від досить великих металевих цілей, світлові хвилі схильні до поширення в будь-яких середовищах, в тому числі в повітрі, тому можливо не тільки визначати відстань до непрозорих (відбивають світло) дискретних цілей, а й фіксувати інтенсивність розсіювання світла в прозорих середовищах. Відбитий сигнал, повертаючись, проходить через ту ж розсіювальну товщу, що і промінь від джерела, піддається вторинному розсіюванню, тому відновлення дійсних параметрів розподіленого оптичного середовища — досить складна задача, розв'язувана як аналітичними, так і евристичними методами (рис. 1).

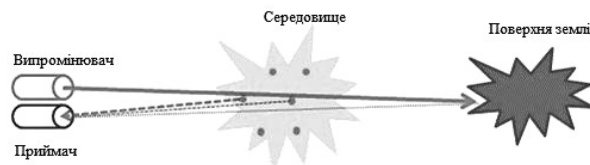


Рис. 1. Принцип дії лідара

Удосконалення методів інтерпретації даних лідарного зондування ландшафтів в даний час набуває особливої актуальності.

Представлення картографічної інформації про місцевість з наступним відображенням у вигляді об'ємних сцен є однією з головних задач аерокосмічних досліджень [2–4, 7].

3. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз літератури на тему застосування лідарів для вивчення земних ландшафтів показав, що найбільш оптимальною моделлю побудови баз даних, котрі можуть використовуватись у геоінформаційних системах і забезпечення їх надійної роботи, є формат LAS — це відкритий / публічний стандартний формат файлів, що використовується для обміну лідарними даними. Це бінарний формат, що підтримує специфічну інформацію лідарних даних і спосіб обміну даними для постачальників і споживачів зі збереженням всієї специфічної інформації.

Хмари точок — це великі групи просторово пов'язаних вимірів точок, які зняті технікою дистанційного зондування. Вихідні хмари точок — це величезні набори висотних 3D точок, які мають значення x, y, z , а також додаткову атрибутику, наприклад, час GPS. Конкретні поверхні, що відбили сигнал, можуть класифікуватися після початкової обробки хмари точок [5, 10], котра вже отримала широке розповсюдження.

На сьогоднішній день існує ряд проблем використання таких даних, які можуть бути використані як для задач вивчення земних ландшафтів [3, 5, 8, 9].

Над цим питаннями працюють такі вчені, як О.М.Берлянт, Б.Гоффман-Велленгоф, А.А.Лященко, Ю.О.Карпінський, К.Легат, М.Візер, М.ДеМерс, Ю.Давідсон, А.А.Зарудний, В.Г.Плетенєв, П.Дейтс, А.Д.Єгоров, Р.Блакелі, Р.Сіца, І.А.Єгорова, А.Бегрент, І.А.Потапова, Н. Накамура, Т.Цуда, Ю.Б.Ржонсницька, К.Краус, Н.Пфайфер та ін.

4. ПРИСТРІЙ

В абсолютній більшості конструкцій випромінювачем служить лазер, що формує короткі імпульси світла високої миттєвої потужності. Періодичність проходження імпульсів або модулююча частота вибираються так, щоб пауза між двома послідовними імпульсами була не меншою, ніж час відгуку від цілей. Вибір довжини хвилі залежить від функції лазера і вимог до безпеки приладу, найбільш часто застосовуються Nd: YAG-лазери і довжини хвиль в нанометрах: 1550 нм — інфрачервоне випромінювання, 1064 нм — ближнє інфрачервоне випромінювання неодимових і іттербієвих лазерів, 532 нм — зелене випромінювання неодимового лазера, ефективно «пробиває» маси води, 355 нм — ближнє ультрафіолетове випромінювання.

Важливу роль відіграє динамічний діапазон приймального тракту. Щоб уникнути перевантаження приймача інтенсивної засвіченню від розсіювання в «ближній зоні», в системах далекого радіусу дії застосовують високошвидкісні механічні затвори, фізично блокують приймальний оптичний канал. У пристроях ближнього радіусу з часом відгуку менше мікросекунди такої можливості немає.

5. АЕРОКОСМІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЕМЛІ

Сучасні космічні проекти розділилися на два напрямки — удосконалення «атмосферних» систем і геодезичні лідари, здатні сканувати рельєф земної поверхні з прийнятною роздільною здатністю. Лідари можуть застосовуватися як на орбіті Землі, так і на орбітах інших планет, практичний приклад тому — бортовий лідар АМС Марс Глобал Сервейор.

Особливий напрямок, що застосовується на практиці в сейсмонебезпечних районах США — диференціальне вимірювання висот з метою виявлення локальних зрушень земних мас в районі розломів.

Космічні і авіаційні лідари дозволяють визначити висоту рослинності, зокрема лісу. Таким чином, з'являється можливість уточнити поширення лісів, обчислити їх параметри (фітомаса, запас деревини) і здійснювати моніторинг за динамікою лісового покриву.

Лідар, розміщений на височині (на пагорбі або на щоглі), сканує горизонт і здатний розрізняти аномалії в повітрі, породжені вогнищами пожеж. Технологія з радіусом виявлення димів в 20 км була вперше заявлена в 1990 році, активні пошуки оптимальних конфігурацій систем ведуться і донині.

6. ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА ОСНОВА ЗАДАЧІ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ СИГНАЛУ

Дані лідарного зондування атмосфери, яка покладається на зверненні лідарного рівняння, записаного для коротких імпульсів зондування і в зближенні однократного розсіювання:

$$P(\vec{\mathbf{R}}_i, \vec{\mathbf{r}}_j) = P_*(\vec{\mathbf{R}}_i) + Af\beta(\vec{\mathbf{r}}_j) \cdot \exp\left(-2 \int_{C_{i,j}} \sigma(\vec{\mathbf{r}}) d\vec{\mathbf{r}}\right) \quad (2)$$

де P — потужність сигналу зворотного розсіювання;

$\vec{\mathbf{r}}_j$ — радіус-вектор елемента розсіювання, що зондується;

$\vec{\mathbf{R}}_i$ — радіус-вектор точки відправлення світлових імпульсів і прийому сигналів зворотного розсіювання, до того ж розглядається як однопозиційне зондування, так і багатопозиційне зондування з фіксованим радіус-вектором $\vec{\mathbf{R}}_i$, так і багатопозиційне (i -й точці розміщення приймача-передавача відповідає радіус-вектор $\vec{\mathbf{R}}_i$, $i = 1, 2, \dots$);

$f = K(\vec{\mathbf{r}}_j - \vec{\mathbf{R}}_i)^{-2}$ — геометричний фактор лідара;

K — коефіцієнт заповнення;

A — постійна лідара;

β — коефіцієнт зворотного розсіювання;

σ — коефіцієнт послаблення;

$\vec{\mathbf{r}}$ — поточний радіус-вектор точки прямої, що проходить через точки i, j ;

$C_{i,j}$ — відрізок $[\vec{\mathbf{R}}_i, \vec{\mathbf{r}}_j]$, по ньому вираховується інтеграл рівняння (2);

$d\vec{\mathbf{r}}$ — елемент довжини відрізка;

P_* — потужність сонячного випромінювання, розсіяного атмосферою в напрямку на приймальний пристрій лідара, що залежить від положення точки посилки імпульсів і пов'язаного з ним напрямку на досліджуваний об'єм.

Якщо фоновая засвітка P_* не визначена експериментально, вона може бути знайдена з рішення рівняння (2). Коефіцієнт ослаблення, його похідні і похідні коефіцієнта зворотного розсіювання визначаються тоді (поза ближньої зони лідара — при $K = 1$) на підставі розв'язання рівнянь:

$$\frac{1}{W_i} \left[(\ln \beta)_i'' + 2 \left(\frac{1}{R_i^2} - \sigma_i' \right) \right] + W_i = (\ln P_i')', \quad i = 1, 2, \dots, 8, \quad (3)$$

де

$$(\ln \beta)_i'' = \frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial x^2} \cos^2 \alpha_i + \frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial y^2} \sin^2 \alpha_i + 2 \frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial x \partial y} \sin \alpha_i \cos \alpha_i, \quad (4)$$

$$W_i = (\ln \beta)_i' - 2 \left(\frac{1}{R_i} + \sigma \right), \quad (5)$$

$$(\ln \beta)_i' = \frac{\partial \ln \beta}{\partial x} \cos \alpha_i + \frac{\partial \ln \beta}{\partial y} \sin \alpha_i, \quad (6)$$

$$\sigma_i' = \frac{\partial \sigma}{\partial x} \cos \alpha_i + \frac{\partial \sigma}{\partial y} \sin \alpha_i, \quad (7)$$

де α_i — кут місця.

При виконанні умови, яку можна розглядати як рівняння, що визначає коефіцієнт ослаблення однорідної атмосфери, система може бути розв'язана.

Розв'язок (3), що включає процедуру диференціювання, піддається значній випадковій похибці. Воно може бути реалізоване, наприклад, на ділянках з досить однорідною атмосферою. На таких ділянках відмінність логарифмічних похідних сигналів, прийнятих з різних напрямків, не повинна бути значущою. Інша можливість реалізації точного рішення рівняння (2) пов'язана з існуванням фізичних причин, що сприяють утворенню в атмосфері горизонтально однорідних шарів.

Для того, щоб закінчити формальний опис лазерно-локаційних даних, доповнімо набір параметрів X_p, Y_p, Z_p , що характеризують кожну лазерну точку значенням t — час реєстрації даної лазерної точки і значенням інтенсивності I . В результаті з'являється можливість формально визначити таке поняття, як набір лазерно-локаційних даних, а саме:

$$L = [X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi}, I_i, t_i], \quad i = 1, \dots, N, \quad (8)$$

де L означає весь аналізований набір лазерно-локаційних даних, N — загальна кількість лазерних точок в наборі L .

7. ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЛІДАРІВ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ЗЕМНИХ ЛАНДШАФТІВ

Моделювання ландшафтних сцен дає можливість з потрібним ступенем деталізації досягнути процеси, які в них відбуваються і статистичні дані з тим, щоб отримати як точні кількісні оцінки, так і забезпечити проведення якісного аналізу динамічної обстановки [4].

Проте, лазерні імпульси відбиваються як від поверхні землі, так і від інших об'єктів: від рослинного покриву, будівель, мостів і т.д. Будь-який лазерний імпульс зазнає кілька відбивань при його русі до земної поверхні, розділяючись на стільки частин, від якої кількості поверхонь він відбився.

Перший повернутий сигнал є найбільш показовим і відповідатиме найвищому об'єкту ландшафту, такому як, наприклад, верхівка дерева або дах будівлі. Перший відбитий сигнал може також відповідати і земній поверхні. В цьому випадку буде захоплено тільки одне відбивання.

Велика кількість повернень використовується для отримання висот кількох об'єктів, що знаходяться на шляху лазерного імпульсу. Відбиті сигнали із середини "спектра" зазвичай відповідають рослинності, а останні відбиті сигнали використовуються для моделей власне поверхні землі.

Геоінформаційну модель ландшафту ми можемо формально представити у вигляді:

$$\Lambda = f(i_{cm}, i_{cx}, o_{air}, o_l, a, t), \quad (9)$$

де Λ — ландшафт; i_{cm} — внутрішня компонента; i_{cx} — внутрішня комплексна підсистема; o_{cx} — зовнішня комплексна підсистема; o_{air} — атмосфера та її вплив; o_l — підсистема рослинно-грунтового покриву; a — антропогенний фактор; t — час.

Сукупність відбитих лазерних імпульсів формуються в цифрову модель поверхні. Генерація точок відбитих лазерних імпульсів потребує розділення цих самих точок на певну класифікацію точок (які лежать на поверхні, а які — ні). До недавнього часу були розроблені алгоритми накладання фільтрів, але всі вони спирались на геометричну складову, відношення висоти до сусідніх точок, усунення точок, які лежать не на поверхні.

На сьогоднішній день застосовують техніку ієрархічного накладання фільтру. Процедура «грубого» накладання фільтру заснована на тому, що скупчення точок в вигляді кластерів, які лежать нижче, більш вірогідно відповідають поверхні, ніж точки, що лежать вище [7].

Можливості автоматизованої класифікації лідарних даних:

- **Класифікація.** Кожна точка може характеризуватися присвоєним їй класом класифікації, який визначає тип об'єкта, від якого відбився лазерний сигнал. Лідарні точки можуть бути класифіковані на кілька категорій, таких, в тому числі, як поверхня Землі, верхня межа пологі лісу і водна поверхня. Класам присвоюються цілочисельні значення кодів, що зберігаються в файлах LAS. Коди класифікації були затверджені Американським товариством фотограмметрії і дистанційного зондування
- **Висота над рівнем моря.** Відображення проводиться за значеннями висот точок — плавний перехід від найнижчої точки до найвищої.
- **Інтенсивність.** Відображення за інтенсивністю даних, де інтенсивність — це потужність відбитого лазерного імпульсу в даній точці. Вона залежить, частково, від відбивної здатності об'єкта, що опромінюється лазерним імпульсом. Відбивна здатність є функцією довжини хвилі. Зазвичай використовується ближня частина інфрачервоного діапазону. Сила повернень залежить від складу об'єкта на поверхні, що відбиває світло. Якщо дані лідара містять значення інтенсивності, по них можна отримати зображення, що нагадують чорно-білі аерофотознімки.
- **Відображення за забарвленням.** Відображення за значеннями червоного, зеленого і синього каналів. Даним лідара може бути присвоєний атрибут RGB. Ця атрибутивна інформація часто береться з зображень, які виходять одночасно з лазерною зйомкою.

8. ВИСНОВКИ

Аналіз відомих методів вивчення ландшафтів за допомогою обробки і використання лідарних даних дозволяє виділити деякі особливості, які необхідно враховувати: розмір ділянки місцевості, багатоярковий характер зйомки, об'єктно-орієнтований характер хмари точок. Для забезпечення точної математичної моделі повинна бути сформована картографічна база даних, яка повинна містити координати об'єктів і елементи їх взаємного орієнтування. Відповідність математичній моделі може бути досягнута лише в умовах досить однорідного середовища та ландшафту, коли виконуються критерії однорідності. Підвищення достовірності результатів інтерпретації даних лідарного зондування досягається за допомогою залучення апостеріорної інформації.

1. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б. Обращение лидарных сигналов малой мощности // Оптический журнал. — 2007. — **74**, № 10.
2. Потапова И.А. Метод интерпретации данных лидарного зондирования // В кн.: Труды III Международной конференции "Естественные и антропогенные аэрозоли". — СПб., 2003.
3. Behrendt A. Combined Raman lidar for the measurement of atmospheric temperature, water vapor, particle extinction coefficient, and particle backscatter coefficient // Applied Optics. — 2002. — **41**, № 36. — P. 7657–7666.
4. Behrendt A., Nakamura T., Tsuda T. Combined temperature lidar for measurements in the troposphere, stratosphere, and mesosphere // Applied optics. — 2004. — **43**, № 14. — P. 2930–2939.

5. *Blakely R.J., Wells R.E., Weaver C.S.*, 1999, Puget Sound aeromagnetic maps and data, U.S. Geological Survey Open-File Report 99-514.
6. *Deitz, P.H.* Atmospheric Effects on the Beam Propagation of the XM-23 Laser Rangefinder, Laser Range Instrumentation // SPIE Proceedings Vol. 11. Bellingham, WA: Society for Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1997, p.35
7. *Kraus K., Pfeifer N.* Determination of Terrain Models in Wooded Areas with Airborne Laser Scanner Data // ISPRS J. Photogramm. Remote. Sens. — 1998. — **53**. — P.193–203.
8. *Argall P.S., Vassiliev O.N., Sica R.J., et al.* Lidar measurements taken with a large-aperture liquid mirror. Sodium resonance-fluorescence system // Applied Optics. — 2000. — **39**, № 15. — P.2393–2400.
9. Lunar Geophysics, Geodesy, and Dynamics by James Williams Jean Dickey in 13th International Workshop on Laser Ranging, October 7–11, 2002, Washington, D. C.
10. *Yegorov A.D., Yegorova I.A.* Comparative analysis of multipositional remote sensing techniques // Image processing, and synthetic Aperture Radar for Remote sensing, proc. of SPIE. — 1997. — **3217**.

Надійшла до редакції 13.12.2014