

Методологічні принципи фрактально-текстурного аналізу зображень і поверхонь за даними НЛС

В. М. Мельник, Н. В. Муляр

Paper received 23.06.17; Accepted for publication 28.06.17.

Анотація. У статті розглядаються методологічні принципи фрактально-текстурного аналізу зображень та дискретних масивів координатних точок, які визначаються методами наземного лазерного сканування. Деталізовані питання частотно-контрастної фільтрації напівтонових зображень Марра-Хілдрета. В загальних рисах теоретично висвітлені фотограмметричні аспекти сканів та процесів їх resampling-у. Значна увага надана визначенню фрактальної розмірності дискретного поля координатних точок НЛС за методом спектрального розкладу.

Ключові слова: фрактально-текстурний аналіз, напівтонові зображення і поверхні, наземне лазерне сканування, оператор Марра-Хілдрета, фрактальна розмірність.

Вступ. Одним із важливих питань є коректна і строго науково-обґрунтована характеристика просторового розподілу природних структур, наприклад, сільсько-господарських угідь. Можливим вирішенням цієї проблеми є застосування принципів фрактальної геометрії [1, 2].

За своєю суттю фрактальність враховує ступінь організованості природних структур. У результаті фрактального аналізу космічних знімків різного масштабу доведено доцільність застосування такого підходу. Дослідження виконані для різних фізико-географічних регіонів Росії та Польщі, і є достатньо обґрунтованими.

В останні роки досить широко та успішно застосовується наземне лазерне сканування найрізноманітніших об'єктів, зокрема, будівель, архітектурних пам'яток, скульптур тощо [3, 4]. Для лазерних сканерів різного виробництва важливо встановлювати умови їх оптимального застосування. Неоднозначною є думка серед науковців і практиків щодо впливу текстурних особливостей досліджуваних об'єктів. Важливим та актуальним є питання інтеграції фотограмметричних методів у практику наземного лазерного сканування. В статті розглядаються методологічні принципи фрактально-текстурного аналізу зображень та дискретних масивів точок, які визначаються методами наземного лазерного сканування.

Аналіз останніх публікацій. На сьогодні різними фірмами-виробниками розроблені високоточні та швидкодіючі наземні лазерні сканери третього покоління, застосування яких в інженерно-технічних задачах є надзвичайно перспективним. Однак, немає однозначності стосовно точності і можливостей сканерів різних виробників. Для вирішення цих питань опублікована низка публікацій.

Відзначимо такі дослідження [5, 6, 8, 9, 10]:

– Чибунічев А. Г., Валижев А. Б.: «Автоматическое сопоставление облаков точек, полученных в результате НЛС с использованием ориентационных гистограмм», 2008, с. 112-119;

– Михайлов А. П., Синькова М. Г.: «Применение стереоскопического метода для наблюдения и обработки результатов трехмерного лазерного сканирования», Геодезия и картография, 2003, с. 38-41.

Особливо значимими і вагомими є дослідження д.т.н. Шульца Р. В. «Теорія і практика використання наземного лазерного сканування в задачах інженерної геодезії» (автореферат докторської дисертації), Київ, КНУБА, 28 с.

Варто виділити також і оригінальний навчальний посібник проф. Дорожинського О. Л.: «Наземне лазерне сканування в фотограмметрії», Львів, 2014, 95 с.

Мета. Розглянути концептуальні основи фрактально-текстурного аналізу напівтонових зображень і поверхонь, досліджуваних методами тривимірного лазерного сканування.

Виклад основного матеріалу

1. Попередня обробка. При застосуванні матеріалів наземного лазерного сканування часто використовується диференціальний оператор Марра-Хілдрета, який порівняно з традиційними фільтрами Собеля, Робертса та ін. має ряд переваг. Оператор Марра-Хілдрета має дві особливості. По-перше, він реалізує диференціальний оператор, який враховує першу або другу просторову похідну зображення. По-друге, він адаптований на роботу на необхідному масштабному рівні для того, щоб оператори, призначені для обробки великих фрагментів зображення, можна було використовувати для виявлення границь на розмитих, затемнених ділянках зображення, і, навпаки, призначені для обробки малих фрагментів зображення – для виявлення малих елементів зображення на його добре сфокусованих ділянках.

Марр і Хілдрет показали, що в найбільш загальному випадку цим вимогам відповідає поєднання Лапласа [7]

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

який загострює границі, із згладжуючим фільтром, що задається гаусівською функцією

$$G(x, y) = \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{2\pi\sigma^2} \right], \quad (2)$$

де σ^2 – дисперсія нормального розподілу.

Регулюючий оператор Марра-Хілдрета має вигляд $\nabla^2 G(r) = -1/\pi\sigma^2 (1 - r^2/2\sigma^2) \exp(-r^2/2\sigma^2)$, (3)

де r – відстань до даної точки від центра фільтра.

Вибір оператора $\nabla^2 G$ -типу здійснюється в основному за рахунок гаусівської кривої G .

Практика застосування оператора Марра-Хілдрета підтвердила його ефективність при аналізі матеріалів лазерного сканування спільно з цифровими зображеннями.

2. Фотограмметрія окремого скана. Математичною основою є рівність координат точок сканування і координат міток калібрувального поля [3, 5, 6]

$$\begin{aligned} F(F_x, F_y, F_z) &= 0, \\ F_x &= X_i - x_i, \\ F_y &= Y_i - y_i, \end{aligned} \quad (4)$$

$$F_z = Z_i - z_i,$$

де X_i, Y_i, Z_i – координати міток калібрування; x_i, y_i, z_i – просторові координати точок сканування.

У лінеаризованому вигляді рівняння (4) матиме вигляд:

$$F = F^0 + \sum_1^n A_i t_i + l_i = 0. \quad (5)$$

Звідси рівняння поправок матиме вигляд:

$$\sum_1^n A_i t_i + l_i = V_i, \quad (6)$$

де A_i – частинні похідні за відповідними змінними

$$A_i = \frac{\partial F}{\partial t_i}.$$

Розв'язок системи рівнянь поправок виконується за стандартною схемою методу найменших квадратів і передбачає отримання матриці напрямних косинусів. Стосовно особливостей НЛС вона має такий вигляд:

$$A \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi - \Delta\varphi) \cos(\chi - \Delta\chi) \\ \sin(\varphi - \Delta\varphi) \cos(\chi - \Delta\chi) \\ \sin(\chi - \Delta\chi) \end{bmatrix} \cdot (r - \Delta r), \quad (7)$$

$$r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2},$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right),$$

$$\chi = z / \sqrt{x^2 + y^2}.$$

3. Фотограмметрія пари сканів. Математичною основою фотограмметричної пари сканів може бути рівняння компланарності

$$\varphi = \begin{vmatrix} X_{s_1} & Y_{s_1} & Z_{s_1} & 1 \\ X_{s_2} & Y_{s_2} & Z_{s_2} & 1 \\ X_{m_1} & Y_{m_1} & Z_{m_1} & 1 \\ X_{m_2} & Y_{m_2} & Z_{m_2} & 1 \end{vmatrix} = 0. \quad (8)$$

Рівняння (8) – нелінійне, тому потрібна його лінеаризація. Проте, при сучасній обчислювальній техніці замість лінеаризації можна застосовувати ітеративне растрове перетворення координат Хельмерта

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{s_1} = m \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z & \varepsilon_y \\ \varepsilon_z & 1 & -\varepsilon_x \\ -\varepsilon_y & \varepsilon_x & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{s_2} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_{s_1-s_2}, \quad (9)$$

де $S_1(X, Y, Z)$ і $S_2(x, y, z)$ – пара сканів; m – масштабний коефіцієнт; $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$ – кути Ейлера взаємного орієнтування координатних систем S_1XYZ та S_2xyz сканів S_1 і S_2 .

У випадку спільного опрацювання більше двох сканів фотограмметрична модель модифікується за принципами самокалібрування.

4. Resampling методом RANSAC. Багаточисельні дослідження доктора наук Шульца Р. В. [1] підтвердили ефективність зшивання окремих сканів, отриманих з різних станцій, з використанням ітераційного методу найближчої точки у поєднанні з RANSAC-модулем.

Для реалізації методу зшивання лазерних сканів за ітераційним методом найближчої точки пропонується використовувати сучасний метод математичної статистики, який іменується в літературі як метод вибору випадкової послідовності [5].

Алгоритм RANSAC вперше було запропоновано Fisher та Bolles в 1981 р. для оцінки параметрів моделей, дані для яких були спотворені грубими помилками. Результати їх досліджень підтвердили, що цей метод є надзвичайно стійким і за теоретичними висновками може правильно оцінити параметри моделі,

коли кількість грубих помилок досягає 50 %. Незважаючи на існуючі модифікації RANSAC-методу всі вони працюють в два кроки:

1. **Гіпотеза.** Перший мінімальний тест за випадково вибраними даними, за якими однозначно визначаються моделі.

2. **Тест.** Перевірка всієї множини точок на відповідність їх визначеній в першому кроці моделі.

Робота алгоритму припиняється, коли ймовірність знайти найкращу комбінацію досягає порогового значення.

Ключовим моментом роботи RANSAC-методу є вибір випадкової послідовності. Очевидно, що відрізати грубі помилки від безпомилкових даних однозначно неможливо. Якщо випадковим членом вибрати з усієї множини n точок, за якими будується модель, то з певною ймовірністю можна стверджувати, що така модель є близькою до істинної, для цього виконують \square ітерацій. Якщо відома наближена кількість грубих помилок, то можна обчислити ймовірність, з якою \square вибірок дозволить отримати оптимальну, близьку до істинної моделі. Кількість необхідних вибірок знаходять, виходячи з заданої ймовірності

$$p = 1 - (1 - (1 - \varepsilon)^k)^m, \quad (10)$$

де p – задана ймовірність; k – кількість точок, необхідна для обчислення моделі; ε – відсоток грубих помилок; m – кількість вибірок [5].

Враховуючи перспективність методу RANSAC в останні роки розроблено ряд його модифікацій:

Крок 1. Повторити вибірку m разів.

Крок 1.1. Вибрати підмножину з $s^{(h)}$ елементів.

Крок 1.2. Визначити параметри моделі $\theta^{(h)}$ для поточної підмножини.

Крок 1.3. Визначити відповідність T моделі.

Крок 2. Визначити найбільш відповідну T модель з обчислених.

У схемі виділяються два окремих алгоритми, які й утворюють модифікації при створенні удосконалених RANSAC-подібних методів:

– вибір підмножини;

– визначення відповідності моделі вихідним даним.

У самому RANSAC в якості алгоритму вибору підмножини взято вибір $s^{(h)}$ елементів, кожен з яких вибирається з однаковою ймовірністю з усієї множини точок. А ступінь відповідності моделі і даних визначається за кількістю грубих помилок.

Фрактально-спектральний аналіз. Спектральний аналіз здійснюється на основі Фур'є-перетворення [11]

$$\Phi(u, v) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} f(i, j) \cdot \exp\left\{\frac{-2\pi i}{M}(ui + vj)\right\}, \quad (11)$$

де u, v – перетворення в i -му та j -му напрямках. При використанні двовимірного спектру кожної величини $\Phi(u, v)$ відповідає еквівалентне радіальне число згідно співвідношення $r = (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}$.

Двовимірна спектральна енергетична щільність S_{2j} для кожного хвильового моменту k_j обчислюється за формулою

$$S_{2j} = \frac{1}{N_j} \sum_1^n |\Phi(u, v)|^2, \quad (12)$$

де N_j – число коефіцієнтів $\Phi(u, v)$.

У випадку фрактального аналізу важлива наступна пропорційність

$$S_{2j}(k_j) \propto k_j^{-1-\beta}, \tag{13}$$

де $\beta = 2 \cdot H + D_T$, H – фрактальна розмірність, D_T – топологічна розмірність.

Стосовно фрактально-текстурного аналізу поверхонь за даними НЛС практичне застосування мають пряме і обернене двовимірне Фур'є-перетворення, які в стандартному записі мають вигляд [1, 2]:

$$G_{n,m} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} z_{k,j} W_N^{-n,k} W_M^{-m,j}, \tag{14}$$

$$z_{k,j} = \frac{1}{NM} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} G_{n,m} W_N^{n,k} W_M^{m,j}, \tag{15}$$

тут Z – висоти рельєф-досліджуваних поверхонь методами НЛС.

6. Приклади застосування. Для ілюстрації оцінок фрактальності геопросторових структур приведено дані, отримані відомими вченими-фотограмметристами [11, 12, 13]. За даними фрактального аналізу космоснімків різного масштабу Landsat-TM і МКФ-6 отримані фрактальні розмірності просторових структур розподілу посівних площ с/г культур окремих регіонів Польщі і Росії.

Результати наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Фрактальні розмірності просторових структур розподілу посівних площ с/г культур окремих регіонів Польщі і Росії

Регіон Росія			Польща		
Клас	D_f	D_i	Клас	D_f	D_i
Пшениця	1,41	1,39	Пшениця	1,75	1,59
Ячмінь	1,18	1,16	Просапні	1,68	1,54
Пар	0,97	0,96	Трави	1,49	1,33
Просапні + трави	1,79	1,67	Рапс	1,35	1,35
			Ліс	1,47	1,45

Для різнотипових геопросторових структур обчис-

лені фрактальні розмірності D_f і D_i (D_f – фрактальна розмірність, D_i – інформаційна розмірність). Всі значення D_f і D_i не цілі числа і більші топологічних розмірностей D_T , що однозначно підтверджує фрактальність просторових геоструктур різних фізико-географічних регіонів та неоднакової організації землекористування.

Геопросторові структури територій Росії та Польщі мають різну фрактальність, для Росії – однорідну, а для Польщі, через нерівномірну територіальну диференціацію, – неоднорідну.

Про вплив текстурних особливостей різних за своїм призначенням об'єктів можна судити за результатами досліджень, виконаними за дорученням ISRPS.

Коротко охарактеризуємо об'єкти дослідження. Перша модель – церква м. Вартбург. Сканування здійснювалось сканером Riegl LMS-Z390i. В процесі вимірювань для кожної точки фіксувались три просторові координати та інтенсивність відбитого сигналу. Друга модель – готичний собор. Сканування виконувалось сканером Trimble GX при двох різних положеннях сканера. Третя модель – грецька церква Самарина. Сканування здійснювалось із використанням сканера Сугах 2500 з восьми станцій, проте в процесі обчислень було використано три найбільш інформативні моделі. Четверта модель – середньовічний замок Вельфеншлос. Особливістю цього об'єкта є наявність великої кількості дерев перед фасадом (15% від усієї кількості точок моделі), які суттєво утруднювали безпосередньо обчислювальний процес. Для отримання необхідної точності точки дерев були успішно відфільтровані. Сканування проводилось лазерним сканером Riegl LMS-Z360.

Досліджувані об'єкти були різної конфігурації і складності, з суттєво неоднаковою текстурою, однак, до них не застосовувались спеціальні методи текстурної корекції.

Більш детальні відомості про досліджувані об'єкти наведені у таблиці 2.

Таблиця 2. Відомості про досліджувані об'єкти

№	Назва об'єкту	Тип сканера	К-сть моделей НЛС	К-сть точок в одному скані	Крок сканування, см	Швидкість сканування, т/с	Точність, см/к-сть точок
1	Церква м. Вартбург	Riegl LMS-Z390i	4	50000	2,40	11000	2,20/25180
2	Готичний собор	Trimble GX	2	60000	3,10	–	5,10/23400
3	Грецька церква Самарина	Сугах 2500	8(3)	110000	1,00	1000	0,71/49540
4	Замок Вельфеншлос	Riegl LMS-Z360	12	110000	2,40	–	2,12/83443

Висновки. Розглянуті загальні методологічні принципи цифрової фільтрації та фотограмметрії аерокосмособразень та архітектурних будівель за

даними лазерного сканування. Висвітлені особливості комп'ютерного опрацювання надзвичайно великої кількості масивів просторових координат.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мельник В. М. Кількісна стереомікрофрактографія (монографія) / В. М. Мельник, А. В. Шостак. – Луцьк: ПВД “Твердиня”, 2010. – 460 с.
2. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М.; Мир, 1992. – 260 с.
3. Дорожинський О. Л. Наземне лазерне сканування в фотограмметрії: навч. посіб. / О. Л. Дорожинський. – Л.: Вид-во Львів. політехніки, 2014. – 95 с.
4. Monserrat O. Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching / O. Monserrat, M. Crosetto // Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2008. – № 63 (1). – P. 142-154.
5. Шульц Р. В. Теорія і практика використання наземного лазерного сканування в задачах інженерної геодезії: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія / Шульц Р. В. – К.: Київський нац. ун-т буд-ва і архітектури, 2012. – 32 с.

6. Шульц Р. В. Использование нечеткого моделирования для выбора модели наземного лазерного сканера / Р. В. Шульц // Изв. вузов. Серия «Геодезия и аэрофото-съемка». – 2011. – № 2. – С. 103–107.
7. Русин Б. П. Системы синтезу, обробки та розпізнавання складно-структурованих зображень / Б. П. Русин. – Л.: Вертикаль. – 1997. – 264 с.
8. Dold C. Extended Gaussian images for the registration of terrestrial scan data / C. Dold // ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop “Laser scanning 2005”, Enschede, the Netherlands, September 12-14. – P. 180-185.
9. Sipahi M. A novel approach for differentiating etiology of gallstone formation: Sistocholedochal angle / M. Sipahi, M. F. Erkoç, H. I. Serin, H. Börekçi, O. Banli // European Review for Medical and Pharmacological Sciences. – 2015. – Vol. 19. – № 6. – P. 1063-1067.
10. Журавель І. М. Аналіз текстури фрактографічних зображень на основі спектра фрактальних розмірностей Реньї / І. М. Журавель // Искусственный интеллект. – 2013. – № 1. – С. 204-208.
11. Леготкин Р. Л. Исследование методов фрактального анализа для целей тематического дешифрирования аэрофотоизображений: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.34 / Р. Л. Леготкин. – М.: Моск. гос. ун-т геод. и картографии, 2002.
12. Васильев Л. Н. Фрактальность пространственных структур геосистем / Л. Н. Васильев, А. С. Тюфлин // Исследование Земли из космоса. – 1991. – № 4. – С. 53-66.
13. Чибуничев А. Г. Автоматическое сопоставление облаков точек, полученных в результате наземного лазерного сканирования, с использованием ориентационных гистограмм / А. Г. Чибуничев, А. Б. Велижев // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2008. – № 3. – С. 112-119.

REFERENCES

1. Melnyk V. M. Kilkisna stereomikrofraktohrafiia (monohrafiia) / V. M. Melnyk, A. V. Shostak. – Lutsk: PVD “Tverdnyia”, 2010. – 460 s.
2. Feder E. Fraktaly / E. Feder. – М.; Myr, 1992. – 260 s.
3. Dorozhynskiy O. L. Nazemne lazernye skanuvannya v fotohrammetrii: navch. posib. / O. L. Dorozhynskiy. – L.: Vyd-vo Lviv. politekhniki, 2014. – 95 s.
4. Monserrat O. Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching / O. Monserrat, M. Crosetto // Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2008. – № 63 (1). – P. 142-154.
5. Shults R. V. Teoriia i praktyka vykorystannia nazemnoho lazernoho skanuvannya v zadachakh inzhenernoi heodezii: avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.24.01 – heodeziia, fotohrammetriia ta kartohrafiia / Shults R. V. – K.: Kyivskiy nats. un-t bud-va i arkhitektury, 2012. – 32 s.
6. Shults R. V. Yspolzovanye nechetkoho modelyrovanyia dlia vybora modely nazemnoho lazernoho skanera / R. V. Shults // Yzv. vuzov. Seryia «Heodeziya y aэrofotosъemka». – 2011. – # 2. – S. 103–107.
7. Rusyn B. P. Systemy syntezy, obrobky ta rozpoznavannia skladno-strukturovanykh zobrazhen / B. P. Rusyn. – L.: Vertykal. – 1997. – 264 s.
8. Dold C. Extended Gaussian images for the registration of terrestrial scan data / C. Dold // ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop “Laser scanning 2005”, Enschede, the Netherlands, September 12-14. – P. 180-185.
9. Sipahi M. A novel approach for differentiating etiology of gallstone formation: Sistocholedochal angle / M. Sipahi, M. F. Erkoç, H. I. Serin, H. Börekçi, O. Banli // European Review for Medical and Pharmacological Sciences. – 2015. – Vol. 19. – № 6. – P. 1063-1067.
10. Zhuravel I. M. Analiz tekstury fraktohrafiichnykh zobrazhen na osnovi spektra fraktalnykh rozmirnostei Reni / I. M. Zhuravel // Yskusstvennyy intellekt. – 2013. – # 1. – S. 204-208.
11. Lehotkyn R. L. Yssledovanye metodov fraktalnoho analiza dlia tselei tematycheskoho deshyfyrovanyia aэrofotozobrazhenyi: avtoref. dyss. ... kand. tekhn. nauk: 25.00.34 / R. L. Lehotkyn. – М.: Mosk. hos. un-t heod. y kartohrafiyy, 2002.
12. Vasylev L. N. Fraktalnost prostranstvennykh struktur heosystem / L. N. Vasylev, A.S. Tiuflyn // Yssledovanye Zemly yz kosmosa. – 1991. – # 4. – S. 53-66.
13. Chybunychев A. H. Avtomatycheskoe sopostavlenye oblakov tocheк, poluchennykh v rezultate nazemnoho lazernoho skanyrovanyia, s yspolzovanyem oryentatsyonnykh hystohramm / A. H. Chybunychев, A. B. Velyzhev // Heodeziya y aэrofotosъemka. – 2008. – # 3. – S. 112-119.

Методологические принципы фрактально-текстурного анализа изображений и поверхностей по данным НЛС

В. Н. Мельник, Н. В. Муляр

Аннотация. В статье рассматриваются методологические принципы фрактально-текстурного анализа изображений и дискретных массивов координатных точек, определяемых методами наземного лазерного сканирования. Детализированы вопросы частотно-контрастной фильтрации полутонных изображений Марра-Хилдрета. В общих чертах теоретически освещены фотограмметрические аспекты сканов и процессов их resampling-а. Значительное внимание предоставлено определению фрактальной размерности дискретного поля координатных точек НЛС методом спектрального разложения.

Ключевые слова: фрактально-текстурный анализ, полутонные изображения и поверхности, наземное лазерное сканирование, оператор Марра-Хилдрета, фрактальная размерность.

Methodological principles of fractal-texture analysis of images and surfaces according to TLS data

V. M. Melnik, N. V. Mulyar

Abstract. The article reveals with the methodological principles of fractal-texture analysis of images and discrete arrays of coordinate points, which are determined by ground-based laser scanning methods. Questions of frequency-contrast filtration of Marra-Hildreth halftone images are detailed. In general, the photogrammetric aspects of scans and their resampling processes are theoretically covered. Considerable attention is given to the fractal dimension definition of the discrete field of the TLS coordinate points according the method of spectral decomposition.

Keywords: fractal-texture analysis, halftone images and surfaces, terrestrial laser scanning, Marra-Hildreth operator, fractal dimension.