

Структурный анализ спектральных данных дистанционного зондирования на основе использования компонент коэффициента корреляции

А.В. Лапко^{1,2}, В.А. Лапко^{1,2}, Ю.П. Юронен¹

¹ Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 660037, г. Красноярск, пр. «Красноярский рабочий», д. 31;

² Институт вычислительного моделирования СО РАН; 660036, Россия, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50, стр. 44

Аннотация

Описывается методика структурного анализа данных дистанционного зондирования, основанная на декомпозиции области значений спектральных признаков и разработке алгоритма оценивания принадлежности контрольных ситуаций обнаруженным классам. Для декомпозиции области значений спектральных признаков используются компоненты коэффициента корреляции, которые определяются произведением нормированных значений пары спектральных признаков. На основе знаков составляющих компонент коэффициента корреляции определяются четыре класса, которым соответствуют нормированные значения спектральных признаков: положительные, отрицательные и знакопеременные. Обнаруженные классы характеризуются зависимостью между спектральными признаками. На этой основе по исходным статистическим данным формируется решающее правило для оценивания принадлежности спектральных признаков контрольной ситуации к одному из четырёх классов. Приводятся и анализируются оценки плотностей вероятностей компонентов коэффициента корреляции в классах. Рассматриваются методика оптимизации непараметрических оценок плотностей вероятностей. Эффективность предлагаемой методики подтверждается результатами декомпозиции данных дистанционного зондирования лесного массива по двум спектральным признакам (красный, ближний инфракрасный NIR). В этих условиях обосновывается декомпозиция лесного массива на лиственные, хвойные, повреждённые древостои и участки с их отсутствием. Анализируются непараметрические оценки плотностей вероятностей компонент коэффициента корреляции в обнаруженных классах.

Ключевые слова: структурный анализ данных, автоматическая классификация, компоненты коэффициента корреляции, ядерная оценка плотности вероятности, данные дистанционного зондирования, спектральные признаки, лесной массив, индекс NDVI.

Цитирование: Лапко, А.В. Структурный анализ спектральных данных дистанционного зондирования на основе использования компонент коэффициента корреляции / А.В. Лапко, В.А. Лапко, Ю.П. Юронен // Компьютерная оптика. – 2026. – Т. 50, № 3. – 1746. – DOI: 10.18287/COJ1746.

Citation: Lapko AV, Lapko VA, Yuronen YP. Structural analysis of spectral remote sensing data based on the use of correlation coefficient components. Computer Optics 2026; 50(3): 1746. DOI: 10.18287/COJ1746.

Введение

Структурный анализ данных дистанционного зондирования природных объектов является одним из основных этапов установления свойственных им закономерностей. Для обнаружения компактных групп наблюдений в пространстве значений спектральных признаков данных дистанционного зондирования природных объектов используются алгоритмы автоматической классификации [1–3]. Полученные результаты необходимы для оценивания состояний природных объектов по данным дистанционного зондирования. Альтернативный упрощённый подход структуризации спектральных данных дистанционного зондирования состоит в использовании нормализованного относительного индекса растительности NDVI и соответствующих ему порогов [4–7]. Состояние природного объекта, соответствующее элементу земной поверхности, определяется не только значениями спектральных признаков, но и зависимостью между ними. Данное утверждение подчеркивает необходимость развития методики обработки данных дистанционного зондирования. Для частичного решения этой проблемы предложены методы корреляционного анализа, которые основаны на сегментации исходного снимка, вычислении коэффициентов корреляции и их анализе [8–10]. При этом не проводится анализ составляющих компонент оценки коэффициента корреляции, которые являются количественными характеристиками элементов земной поверхности в конкретных условиях. Одно из перспективных исследований в этом направлении состоит в декомпозиции области значений спектральных признаков по типу их зависимости. Получены результаты решения отдельных задач этой проблемы на основе методов корреляционного анализа [11, 12].

В работе предлагается методика декомпозиции двумерных спектральных признаков данных дистанционного зондирования на основе знаков составляющих компонент оценки коэффициента корреляции и её применение при обработке данных дистанционного зондирования лесного массива.

1. Методика декомпозиции и анализа области значений двумерных спектральных признаков

Имеются данные дистанционного зондирования, представленные выборкой $V = (x_1^i, x_2^i, z_1^i, z_2^i, i = \overline{1, n})$, составленной из наблюдений спектральных признаков x_1, x_2 и соответствующих им координат (z_1, z_2) элементов земной поверхности. За основу анализа зависимости между x_1 и x_2 в конкретных условиях x_1^i, x_2^i примем компоненты их коэффициента корреляции.

Представим статистическую оценку коэффициента корреляции между случайными величинами x_1, x_2 в виде

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_1^i - \bar{x}_1}{\bar{d}_1} \right) \left(\frac{x_2^i - \bar{x}_2}{\bar{d}_2} \right) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n r_1^i r_2^i, \quad (1)$$

где $\bar{d}_v = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_v^i - \bar{x}_v)^2 \right)^{1/2}$ – оценка среднего квадратического отклонения x_v , а $\bar{x}_v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_v^i$ – среднее значение признака x_v , $v = 1, 2$; $r_1^i = (x_1^i - \bar{x}_1) / \bar{d}_1$, $r_2^i = (x_2^i - \bar{x}_2) / \bar{d}_2$.

Оценка коэффициента корреляции (1) формируется на основе её составляющих $r_1^i, r_2^i, i = \overline{1, n}$, значения произведения $r^i = r_1^i r_2^i$ которых характеризуют относительную зависимость между случайными величинами x_1, x_2 в конкретных условиях x_1^i, x_2^i .

Будем различать типы качественной зависимости $\Omega_j, j = \overline{1, 4}$, между переменными x_1, x_2 , которые характеризуются положительными и отрицательными значениями составляющих r_1, r_2 компонент оценки коэффициента корреляции R . Определим через $\Omega_j, j = \overline{1, 4}$, области значений x_1, x_2 , соответствующие условиям: r_1, r_2 – положительные, отрицательные и знакопеременные (r_1 – положительный, а r_2 – отрицательный; r_2 – положительный, а r_1 – отрицательный).

Основными вероятностными характеристиками распределения случайных величин $r = r_1 r_2$ в области их значений Ω_j являются плотности вероятностей $p_j(r), j = \overline{1, 4}$. Для их оценивания сформируем массивы данных V_j из $\Omega_j, j = \overline{1, 4}$, соответствующие областям декомпозиции V по значениям r_1 и r_2 :

$$x^i \in \Omega_1, \text{ если } r_1^i > 0 \text{ и } r_2^i > 0; \quad (2)$$

$$x^i \in \Omega_2, \text{ если } r_1^i < 0 \text{ и } r_2^i < 0; \quad (3)$$

$$x^i \in \Omega_3, \text{ если } r_1^i > 0 \text{ и } r_2^i < 0; \quad (4)$$

$$x^i \in \Omega_4, \text{ если } r_1^i < 0 \text{ и } r_2^i > 0; \quad (5)$$

где $x^i = (x_1^i, x_2^i), i = \overline{1, n}$.

Для характеристики областей $\Omega_j, j = \overline{1, 4}$, областей значений показателей зависимостей между случайными величинами x_1, x_2 будем использовать непараметрические оценки плотностей вероятностей компонент $r = r_1 r_2$ их оценки коэффициента корреляции в классах, которые являются актуальной информацией для эксперта при оценивании результатов декомпозиции спектральных данных. Непараметрическая оценка плотности вероятности Розенблатта – Парзена, восстанавливаемая по выборке V_j из области $\Omega_j, j = \overline{1, 4}$, представляется в соответствии с правилами в виде [13, 14]

$$p_j(r) = \frac{1}{n_j c_j} \sum_{i \in I_j} \Phi \left(\frac{r - r^i}{c_j} \right), j = \overline{1, 4}. \quad (6)$$

Здесь I_j – множество номеров элементов выборки V_j , а n_j – их количество. Ядерные функции $\Phi(u)$ в статистике (6) удовлетворяют условиям [14]:

$$\Phi(u) = \Phi(-u), 0 \leq \Phi(u) < \infty, \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(u) du = 1, \int_{-\infty}^{\infty} u^m \Phi(u) du < \infty, 0 \leq m < \infty.$$

Выбор коэффициентов размытости ядерных функций в статистике (6) осуществляется из условия минимума среднеквадратических отклонений непараметрических оценок плотностей вероятностей $\bar{p}_j(x)$ от $p_j(x)$ с использованием метода случайного поиска наилучшей пробы [15, 16]

$$W_j(c) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}_j^2(r) dr - \frac{2}{n} \sum_{t \in I_j} \bar{p}_j(r^t), j = \overline{1, 4}. \quad (7)$$

Например, при ступенчатой ядерной функции

$$\Phi\left(\frac{r-r^i}{c_j}\right) = \begin{cases} 0,5, & \text{если } |r-r^i| \leq c_j \\ 0, & \text{если } |r-r^i| > c_j, \end{cases}$$

составляющие первого слагаемого в выражении (7) определяются значениями

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi\left(\frac{r-r^i}{c_j}\right) \Phi\left(\frac{r-r^q}{c_j}\right) dr = \begin{cases} (2c_j - |r^i - r^q|)/4, & \text{если } |r^i - r^q| < 2c_j \\ 0, & \text{если } |r^i - r^q| \geq 2c_j. \end{cases}$$

Для составляющих второго слагаемого в выражении (7) значения ядерной функции

$$\Phi\left(\frac{r-r^q}{c_j}\right) = \begin{cases} 0,5, & \text{если } |r^i - r^q| \leq c_j \\ 0, & \text{если } |r^i - r^q| > c_j. \end{cases}$$

Структурный анализ данных дистанционного зондирования предполагает не только решение задачи автоматической классификации, но и разработку алгоритма оценивания принадлежности спектральных признаков элементов земной поверхности к обнаруженным классам. Для оценивания области значений Ω_j , $j = \overline{1, 4}$, при конкретных значениях x_v , $v = 1, 2$ используется методика, которая предполагает выполнение следующих действий:

1. Определить нормированные значения составляющих r_1, r_2 компонента оценки коэффициента корреляции (1) между спектральными признаками x_1 и x_2

$$r_1 = \left(\frac{x_1 - \bar{x}_1}{\bar{d}_1}\right), r_2 = \left(\frac{x_2 - \bar{x}_2}{\bar{d}_2}\right),$$

где оценки математических ожиданий $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ и среднеквадратических отклонений $\bar{d}_1, \bar{d}_2$ вычисляются по исходным статистическим данным V .

2. В соответствии с правилами (2) – (5) решение о принадлежности ситуации $x = (x_1, x_2)$ к одной из областей декомпозиции спектральных признаков Ω_j , $j = \overline{1, 4}$. Например, ситуация $x \in \Omega_2$, если значения $r_1 < 0$ и $r_2 < 0$.

2. Анализ результатов вычислительного эксперимента

Рассматривалось применение предлагаемой методики при анализе данных дистанционного зондирования лесного массива Бурлинского ленточного бора Алтайского края. Исходная информация определялась спектральными данными о состоянии участков лесного массива. Исследуемая территория характеризуется наличием хвойных, лиственных, повреждённых древостоев и участков с отсутствием древесной растительности.

Данные дистанционного зондирования $V = (x_v^i, v = \overline{1, 6}, i = \overline{1, n})$ объёма $n = 39644$ формировались на основе съёмки в 6 спектральных каналах элементов земной поверхности с пространственным разрешением 30 метров, произведённой спектрометром Landsat-8 в августе 2017 года (табл. 1).

Табл. 1. Характеристика используемых спектральных каналов аппарата Landsat-8

Спектральный канал	Диапазон спектра (мкм)	Название
x1	0,43–0,51	синий (blue)
x2	0,53–0,59	зеленый (green)
x3	0,64–0,67	красный (red)
x4	0,85–0,88	ближний инфракрасный NIR
x5	1,57–1,65	ближний инфракрасный SWIR 1
x6	2,11–2,29	ближний инфракрасный SWIR 2

В процессе вычислительного эксперимента определены спектральные признаки x_3, x_4 , при которых согласуются результаты применения предлагаемой методики и экспертного анализа исходного снимка (рис. 1а). Обнаруженная пара x_3, x_4 используется также для расчёта вегетационного индекса NDVI [4 – 7]. Для этих спектральных признаков оценка коэффициента корреляции равна значению 0,397. Введём обозначения Ω_1 и Ω_2 области элементов земной поверхности, для которых нормированные значения $r_v = (x_v - \bar{x}_v)/\bar{d}_v$, $v = 3, 4$, соответственно положительные либо отрицательные; Ω_3 – если значения $r_3 > 0$, а $r_4 < 0$; Ω_4 – если значения $r_3 < 0$, а $r_4 > 0$.

Состояния природных объектов по данным дистанционного зондирования определяются показателями зависимости между спектральными признаками и их количественными значениями. Произведение нормированных значений составляющих компонент оценки коэффициента корреляции двумерных спектральных признаков характеризует зависимость между ними в конкретных условиях и являются

знакопеременными. Появляется возможность осуществлять декомпозицию данных дистанционного зондирования лесного массива и определять соответствующие им типы древостоев либо их отсутствие.

На рис. 1б красным цветом отмечены участки земной поверхности, на которых отсутствует древесная растительность (область Ω_1), темно-зеленым – участки с хвойными древостоями (Ω_2); чёрным – повреждённые древостои (Ω_3), синим – лиственные древостои (Ω_4).

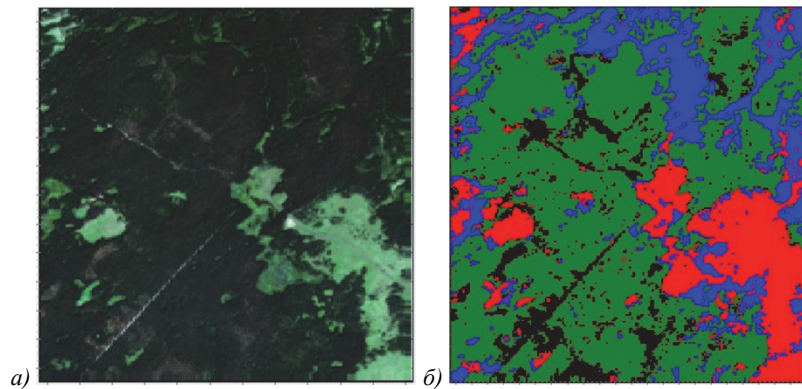


Рис. 1. Фрагмент съемки Landsat-8: (а) отображение комбинации каналов x_3 (красный), x_2 (зеленый), x_1 (голубой) в формате RGB, (б) пространственное отображение результатов декомпозиции области значений x_3, x_4

Непараметрические оценки плотностей вероятностей случайных величин $r = r_3 r_4$, соответствующих областям $\Omega_j, j = \overline{1, 4}$, приведены на рис. 2, а интервалы их значений – в табл. 2.

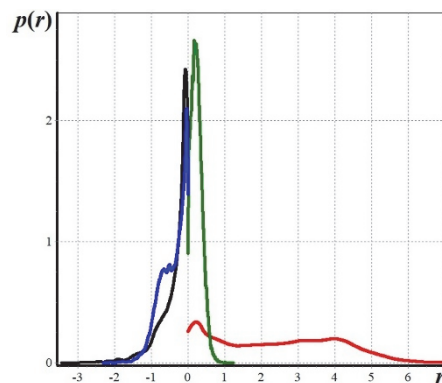


Рис. 2. Непараметрические оценки плотностей вероятностей $p(r)$ случайных величин $r = r_3 r_4$ для обнаруженных областей. Цвета кривых соответствуют пояснениям к рис. 1б

Табл. 2. Диапазоны изменения случайной величины r для областей, соответствующих выражениям (2) – (5)

Значение	Ω_1	Ω_2	Ω_3	Ω_4
r	(0; 13,54]	(0; 1,234]	[-3,45; 0)	[-2,3; 0)
Количество пикселей	6347	21861	3430	8006

Исследованы плотности вероятности $p_j(r)$ случайных величин r в областях $\Omega_j, j = \overline{1, 4}$. Плотности вероятностей $p_j(r)$ отличаются видом и интервалами изменения компонент r . Этот вывод характерен для областей Ω_1, Ω_2 , которые определяются участками земной поверхности с отсутствием древесной растительности и наличием хвойных древостоев соответственно. Плотности вероятностей $p_1(r), p_2(r)$ достоверно отличаются с уровнем значимости 0,05 в соответствии с критерием Смирнова–Колмогорова. В этих условиях наблюдается достоверное отличие плотностей вероятностей $p_1(r), p_2(r)$ от плотностей $p_3(r), p_4(r)$. Поэтому использование компонент r оценки коэффициента корреляции в качестве критерия декомпозиции области значений спектральных признаков x_3, x_4 позволяет обнаружить участки земной поверхности с отсутствием древесной растительности Ω_1 , хвойных древостоев Ω_2 и повреждённых лиственных древостоев (Ω_3, Ω_4).

Заключение

Упрощённым подходом структуризации данных дистанционного зондирования природных объектов по сравнению с алгоритмами автоматической классификации является анализ составляющих компонент оценки коэффициента корреляции двумерных спектральных признаков. Эти показатели являются знакопеременными, что позволяет обоснованно осуществлять декомпозицию данных дистанционного зондирования. Полученные выводы подтверждаются применением предлагаемой методики декомпозиции данных дистанционного

зондирования при анализе состояний лесного массива, характеризующегося наличием хвойных, лиственных, повреждённых древостоев и их отсутствием. Спектральные каналы, красный и ближний инфракрасный NIR, наиболее полно определяют полученные результаты декомпозиции лесного массива. В этих условиях применение предлагаемого подхода позволяет эффективно решить эту проблему. Традиционные методы автоматической классификации требуют использования значительных вычислительных ресурсов в условиях больших объёмов данных дистанционного зондирования. Анализ законов распределения компонент оценки коэффициента корреляции для x_3 , x_4 в обнаруженных классах подтверждает обоснованность предлагаемой методики декомпозиции спектральных данных лесного массива, характеризующих исследуемую территорию.

Дальнейшее развитие предлагаемой методики состоит в декомпозиции многомерных спектральных признаков данных дистанционного зондирования на основе анализа составляющих компонент оценки коэффициента корреляции между парами спектральных признаков. Перспективным направлением является разработка двухуровневой системы структурного анализа данных дистанционного зондирования, на первом уровне которой осуществляется анализ данных дистанционного зондирования по предлагаемой методике, а на втором уровне проводится автоматическая классификация компактных групп наблюдений, обнаруженных на первом уровне обработки информации.

References

- [1] Borzov SM, Potaturkin OI. Selection of the informative feature system for crops classification using hyperspectral data [In Russian]. *Avtometriya* 2020; 56(4): 134-44. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-779
- [2] Shipko VV, Borzov SM. Analysis of the efficiency of hyperspectral data classification under constraints on the quantization bit depth, the number of spectral channels, and spatial resolution [In Russian]. *Avtometriya* 2022; 58(3): 79-87. DOI: 10.15372/AUT20220309
- [3] Tuboltsev VP, Lapko AV, Lapko VA. Modified nonparametric algorithm for automatic classification of large-volume statistical data and its application. *Scientific and Technical Information Processing* 2024; 51(6): 592-7. DOI: 10.3103/S0147688224700552
- [4] Degermendzhi AG, Vysotskaya GS, Somova LA, Pisman TI, Shevynogov AP. Long-term NDVI dynamics of vegetation in Tundra of different classes depending on temperature and precipitation [In Russian]. *Doklady Earth Sciences* 2020; 493(2): 103-6. DOI: 10.31857/S2686739720080046
- [5] Shevynogov AP, Botvich IYu, Pisman TI, Volkova AI, Kononova NA, Ivanov SA. Informative value of spectral vegetation indices for the meadow and steppe vegetation monitoring of Khakassia by ground and satellite data [In Russian]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 2024; (1): 16-28. DOI: 10.31857/S0205961424010028
- [6] Sahu G, Garanayak M, Paikaray BK. Green vegetation detection in satellite imagery using the normalised difference vegetation index method. *International Journal of Bioinformatics Research and Applications* 2023; 19(4): 327-42. DOI: 10.1504/ijbra.2023.135367
- [7] Basit I, Faizi F, Mahmood Kh, Faizi R, Ramzan S, Parvez Sh, Mushtaq F. Assessment of vegetation dynamics under changed climate situation using geostatistical modeling. *Theoretical and Applied Climatology* 2024; 155(4): 3371-3386. DOI: 10.1007/s00704-024-04840-x
- [8] Sazonov DS. Correlation analysis of experimental remote sensing data and models of microwave rough sea surface emission [In Russian]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 2017; (3): 53-64. DOI: 10.7868/S020596141703006X
- [9] Lu Z, Mingsheng L, Limin Y, Hui L. Remote sensing change detection based on canonical correlation analysis and contextual bayes decision. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 2007; 73(3): 311-8. DOI: 10.14358/PERS.73.3.311
- [10] Im J, Jensen JR, Tullis JA. Object-based change detection using correlation image analysis and image segmentation. *International Journal of Remote Sensing* 2008; 29(2): 399-423. DOI: 10.1080/01431160601075582
- [11] Lapko AV, Lapko VA. Procedure for decomposing the values of two-dimensional spectral features of remote sensing based on the analysis of correlation coefficient components. *Measurement Techniques* 2024; 67(6): 427-432. DOI: 10.1007/s11018-024-02362-6
- [12] Lapko AV, Lapko VA, Im ST. Methodology for decomposition of spectral data from remote sensing of forest fires [In Russian]. *Informatika i sistemy upravleniya* 2024; 81(3): 112-20. DOI: 10.22250/18142400_2024_81_3_112
- [13] Parzen E. On estimation of a probability density function and mode. *Ann. Math. Statistic* 1962; 33(3): 1065-1076. DOI: 10.1214/aoms/1177704472.
- [14] Epanechnikov VA. Non-parametric estimation of a multivariate probability density. *Theory of Probability & Its Applications* 1969; 14(1): 156-161. DOI: 10.1137/1114019.
- [15] Rudemo M. Empirical choice of histogram and kernel density estimators. *Scandinavian Journal of Statistics* 1982; 9(2): 65-78. JSTOR: 4615859
- [16] Lapko AV, Lapko VA. Analysis of optimization methods for nonparametric estimation of the probability density with respect to the blur factor of kernel functions. *Measurement Techniques* 2017; 60(6): 515-522. DOI: 10.1007/s11018-017-1228-x

Сведения об авторах

Лапко Александр Васильевич, 1949 года рождения, в 1971 году окончил Фрунзенский политехнический институт по специальности «Автоматика и телемеханика», доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, профессор кафедры космических средств и технологий Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева. Область научных интересов: непараметрическая статистика; распознавание образов и анализ изображений; моделирование и

оптимизация неопределённых систем, дистанционное зондирование. E-mail: lapko@icm.krasn.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0664-3870>, <https://www.researcherid.com/rid/KFA-9046-2024>

Лапко Василий Александрович, 1974 года рождения, в 1996 году окончил Красноярский государственный технический университет по специальности «Управление и информатика в технических системах», доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий кафедрой космических средств и технологий Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева. Область научных интересов: непараметрическая статистика; распознавание образов и анализ изображений; моделирование неопределённых систем, дистанционное зондирование. E-mail: valapko@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0001-6938-9323>, <https://www.researcherid.com/rid/C-9863-2018>

Юронен Юрий Павлович, 1977 года рождения, в 1999 году окончил Красноярский государственный аграрный университет по специальности «Агроэкология», кандидат технических наук, доцент кафедры космических средств и технологий Сибирского государственного технического университета имени академика М.Ф. Решетнева. Область научных интересов: дешифрирование аэрокосмических снимков, анализ данных дистанционного зондирования Земли; системы распознавания образов; автоматизированная обработка данных аэрокосмической съемки; геоинформационные системы и технологии. E-mail: erdas@mail.sibsau.ru <http://orcid.org/0000-0002-0029-2555>

Поступила в редакцию 03 июня 2025 г. Окончательный вариант – 04 августа 2025 г.

Structural analysis of spectral remote sensing data based on the use of correlation coefficient components

A.V. Lapko ^{1,2}, V.A. Lapko ^{1,2}, Yu.P. Yuronen ¹

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,

Prospekt Krasnoyarsky Rabochy 31, Krasnoyarsk, 660037, Russia;

² Institute of Computational Modelling SB RAS, Akademgorodok 50, Krasnoyarsk, 660036, Russia

Abstract

The article describes a method for structural analysis of remote sensing data based on the decomposition of the range of values of spectral features and the development of an algorithm for assessing the membership of control situations in the detected classes. To decompose the range of values of spectral features, the components of the correlation coefficient are used, which are determined by the product of the normalized values of a pair of spectral features. Based on the signs of the components of the correlation coefficient, four classes are determined, which correspond to the normalized values of spectral features: positive, negative, and alternating. The discovered classes are characterized by the dependence between spectral features. On this basis, using the initial statistical data, a decision rule is formed for assessing the belonging of the spectral features of the control situation to one of the four classes. Estimates of the probability densities of the correlation coefficient components in the classes are presented and analyzed. Methods for optimizing nonparametric estimates of the probability densities are considered. The effectiveness of the proposed method is confirmed by the results of decomposition of remote sensing data of a forest area according to two spectral features (Red, Near Infrared or NIR). Under these conditions, breaking down the forest area into deciduous, coniferous, damaged stands and areas devoid of a tree cover is justified. Nonparametric estimates of the probability densities of the correlation coefficient components in the detected classes are analyzed.

Keywords: structural data analysis, automatic classification, components of the correlation coefficient, kernel probability density estimation, remote sensing data, spectral features, forest area, NDVI index.

Citation: Lapko AV, Lapko VA, Yuronen YuP. Structural analysis of spectral remote sensing data based on the use of correlation coefficient components. *Computer Optics* 2026; 50(3): 1746. DOI: 10.18287/COJ1746.

Author's information

Aleksander Vasilievich Lapko (b. 1949), graduated from Frunze Polytechnic Institute on speciality “Automation and telemechanics” in 1971. Doctor of Technical Sciences, professor, honored worker of science of the Russian Federation, chief researcher of the Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Professor of Space Facilities and Technologies department of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. Research interests: nonparametric statistics; pattern recognition and image analysis; modeling and optimization of uncertain systems; remote sensing. E-mail: lapko@icm.krasn.ru ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0664-3870> <https://www.researcherid.com/rid/KFA-9046-2024>

Vasily Aleksandrovich Lapko (b. 1974), graduated from Krasnoyarsk State Technical University on speciality “Management and Informatics in Technical Systems” in 1996. Doctor of Technical Sciences, professor, leading researcher at the Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Head of Space Facilities and Technologies department of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. Research interests: nonparametric statistics; pattern recognition and image analysis; modeling of uncertain systems; remote sensing. E-mail: valapko@yandex.ru ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6938-9323> <https://www.researcherid.com/rid/C-9863-2018>

Yuri Pavlovich Yuronen (b. 1977), graduated from the Krasnoyarsk State Agrarian University on speciality “Agroecology” in 1999. PhD in Technical Sciences, associate professor of Space Facilities and Technologies department of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. Research interests: interpretation of aerospace images, analysis of Earth remote sensing data; pattern recognition systems; automated processing of aerospace survey data; geoinformation systems and technologies. E-mail: erdas@mail.sibsau.ru ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0029-2555>

Received June 03, 2025. The final version – August 04, 2025.
