

УДК 519.7

МЕТОД ОПТИМАЛЬНОЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ. ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛАНДШАФТА

Асадов Хикмет Гамид оглы¹,
д-р техн. наук, профессор,
e-mail: asadzade@rambler.ru,

Сулейманова Егане Джалал гызы¹,
канд. техн. наук,

¹Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика

В целях решения задач дистанционного зондирования изучаемых ландшафтов цветовая сегментация в настоящее время преимущественно реализуется на основе проводимого мульти- и гиперспектрального анализа. Вопрос об оценке информативности сигналов гиперспектрометров неразрывно связан с оценкой отношения сигнал/шум на выходе этих приборов. В статье проанализированы шумовые характеристики современной мульти- и гиперспектральной техники. Предложен экстремально-информационный подход цветовой сегментации мульти- и гиперспектральных изображений. Сформулирована и решена оптимизационная задача наилучшей в информационном смысле оценки изменений, происшедших в ландшафте, с применением метода вариационной оптимизации. Предложена методика для оценки динамики изменения состояния элементов ландшафта.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, гиперспектрометр, цветовая сегментация, ландшафт, оптимизационная задача

THE METHOD OF OPTIMAL HYPERSPECTRAL SEGMENTATION OF AERIAL AND SPACE IMAGES. APPLICATION FOR ASSESSING THE DYNAMICS OF CHANGES IN THE STATE OF LANDSCAPE ELEMENTS

Asadov H.H. ogly¹,
doctor of technical sciences, professor,
e-mail: asadzade@rambler.ru,

Suleymanova Y.J. gyzy¹,
candidate of technical sciences,

¹Azerbaijan National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

In order to solve the problems of remote sensing of the studied landscapes, color segmentation is currently mainly implemented on the basis of multi- and hyperspectral analysis. The issue of assessment of the informative value of hyperspectrometer signals is inextricably linked with the evaluation of the signal-to-noise ratio at the output of these devices. The article analyzes the noise characteristics of modern multi- and hyperspectral technology. An extreme information approach to color segmentation of multi- and hyperspectral images is proposed. The optimization problem of the best assessment of changes, in terms of information, that have occurred in the landscape using the variational optimization method is formulated and solved. A technique for assessing the dynamics of changes in the state of landscape elements is proposed.

Keywords: remote sensing, hyperspectrometer, color segmentation, landscape, optimization problem

DOI 10.21777/2500-2112-2022-2-43-48

Введение

Как отмечается в работе [1], сегментация является процессом, в результате которого изображение разделяется на отдельные зоны или объекты, имеющие подобные свойства или характеристики. Для панхроматических изображений это означает деление изображений на зоны или кластеры, выделяя, например, все пиксели с одинаковым уровнем «серого». Применительно к дистанционному зондированию сегментация реализуется также на основе проводимого спектрального анализа. Согласно [2], одним из широко используемых способов сегментации изображений является цветовая сегментация, т.е. выделение в изображении зон, имеющих гомогенную цветность. Методы цветовой сегментации широко используются при исследовании минералов, горных пород, растительности, водных поверхностей, почв, антропогенных объектов [3].

Современной технической базой для получения спектральной информации о состоянии объектов внешней среды, безусловно, являются мульти- и гиперспектрометры. Информативность гиперспектральных измерений часто ограничивается различными шумами на выходе измерителя, приводящими к снижению такого важнейшего показателя, как отношение сигнал/шум. Согласно [4], шумы в гиперспектральных изображениях могут быть классифицированы следующим образом:

- фотонный шум, хорошо характеризуемый законом Планка;
- гауссовские белые шумы, имеющие гомоскедастическую аддитивность.

Вопрос об оценке информативности сигналов гиперспектрометров неразрывно связан с оценкой отношения сигнал/шум на выходе этих приборов. Этому вопросу в настоящее время посвящено достаточно большое количество работ (см. например, [5; 7]). Совершенствование методов гиперспектральной сегментации аэрокосмических снимков является актуальной задачей.

1. Шумовые характеристики современной мульти- и гиперспектральной техники

Экспериментальные исследования, проведенные в [5], показали, что в интервале длин волн $550 \div 1000$ нм отношение сигнал/шум на выходе модели гиперспектрометра линейно уменьшается. Аналогичные результаты получены для отношения сигнал/шум на выходе спутникового гиперспектрометра NICO, используемого в целях исследования состояния загрязнения водоемов. На рисунке 1 приведено семейство кривых отношения сигнал/шум этого устройства в виде синтетически сгенерированного спектра [6].

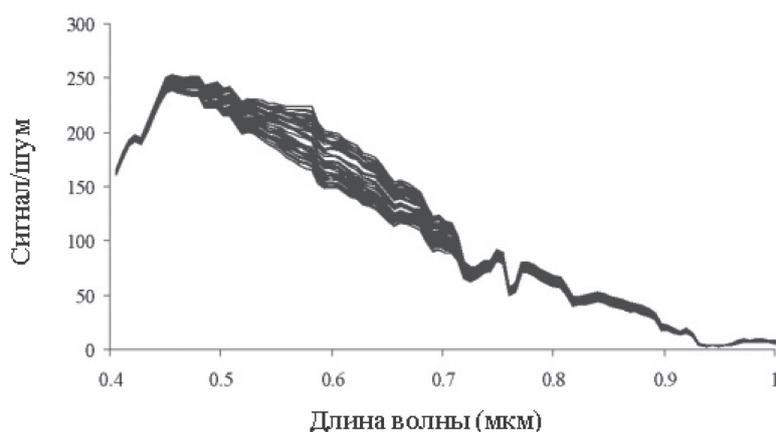


Рисунок 1 – Семейство кривых синтезированных спектров, указывающих зависимость отношения сигнал/шум от длины волны в диапазоне $0.4 \div 1.0$ мкм гиперспектрометра NICO [6]

Исследования, проведенные в [7], показали, что применительно к спектрометрическим Landsat OLI и Sentinel-2A MSI зависимость отношения сигнал/шум от длины волны близка к линейным и экспоненциальным кривым (рисунок 2).

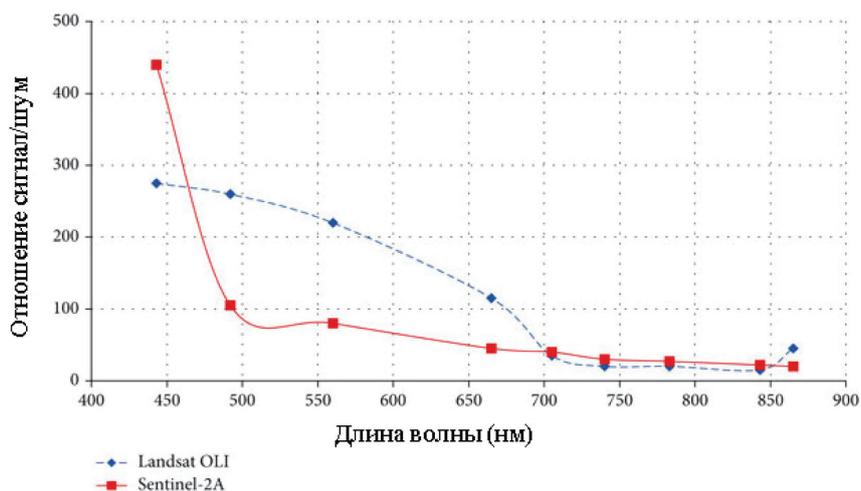


Рисунок 2 – Кривые отношения сигнал/шум в зависимости от длины волны на выходе спектрорадиометров Landsat (OLI) и Sentinel-2A MSI [7] при исследовании водной поверхности

С учетом вышеизложенного краткого обзора шумовых характеристик современной мульти- и гиперспектральной техники рассмотрим информационные характеристики метода цветовой сегментации, широко используемого для оценки динамики изменения состояния элементов ландшафта [2]. Далее излагается предлагаемый экстремально-информационный метод цветовой сегментации мульти- и гиперспектральных изображений.

2. Экстремально-информационный метод цветовой сегментации мульти- и гиперспектральных изображений

Согласно [2], метод цветовой сегментации изображений предполагает разделение гиперспектрального снимка на слои, содержащие объекты окружающей среды с одинаковым гомогенным цветом. Проанализируем суммарную информативность таких слоев.

Допустим, что некоторое модельное гиперспектральное изображение разделено на n слоев, где i -й слой содержит пиксели изображения, имеющие окраску, соответствующую длине волны λ_i . Количество таких пикселей обозначим как N_i . Примем предположение о том, что функция $N_i = \varphi(\lambda_i)$ является монотонной и дважды дифференцируемой.

В этом случае верно обратное предположение о существовании обратной функции

$$\lambda_i = \varphi^{-1}(N_i) = f(N_i). \quad (1)$$

Примем второе предположение о том, что имеет место множество $\{N_i\}$, которое упорядочено, т.е. имеет место соотношение

$$N_i = N_{i-1} \pm \Delta N; \quad \Delta N = const; \quad i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

В этом случае имеет место следующее равенство:

$$\sum_{i=1}^n f(N_i) = C_1; \quad C_1 = const. \quad (3)$$

Физически C_1 определяет тот спектральный диапазон, в котором осуществляются гиперспектральные измерения.

Что касается информативности сегментационных слоев, содержащих пиксели с длиной волны λ_i , то указанные слои могут быть охарактеризованы суммарной информативностью, определяемой количеством информации M_0 , вычисляемой в первом приближении как

$$M_0 = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \log_2 SNR(\lambda_i). \quad (4)$$

С учетом кривых, представленных на рисунках 1, 2, функцию $SNR(\lambda_i)$ будем аппроксимировать линейной функцией в виде

$$SNR(\lambda_i) = SNR(\lambda_0) - k \cdot \lambda_i, \quad (5)$$

где $SNR(\lambda_0)$ – отношение сигнал/шум на длине волны $\lambda_0 = 0.5$ мкм;

k – коэффициент ослабления.

С учетом (4) и (5) получим

$$M_0 = \sum_{i=1}^n N_i \cdot [\log_2 [SNR(\lambda_0) - k \cdot \lambda_i]]. \quad (6)$$

С учетом (1) и (6) M_i определим в качестве функционала, зависящего от функции $f(N_i)$, т.е.

$$M_0 = \sum_{i=1}^n N_i \cdot [\log_2 [SNR(\lambda_0) - k \cdot f(N_i)]]. \quad (7)$$

На основе выражений (3) и (7) можно составить задачу Лагранжа, относящуюся к методам вариационной оптимизации, решение которой заключается в поиске такой функции $f(N_i)$, при которой нижеуказанный целевой дискретный функционал достигает экстремума:

$$F = \sum_{i=1}^n N_i \cdot [\log_2 [SNR(\lambda_0) - k \cdot f(N_i)]] + \gamma \left[\sum_{i=1}^n f(N_i) - C_1 \right], \quad (8)$$

где γ – множитель Лагранжа.

Рассмотрим непрерывный аналог функционала (8) F_{11} на предмет поиска оптимальной функции $f(N)$

$$F_{11} = \int_{N_{\min}}^{N_{\max}} N [\log_2 [SNR(\lambda_0) - k \cdot f(N)]] dN + \gamma \left[\int_{N_{\min}}^{N_{\max}} f(N) dN - C \right]. \quad (9)$$

Согласно [8], экстремаль функционала (9) удовлетворяет условию

$$\frac{d \left\{ N [\log_2 [SNR(\lambda_0) - k \cdot f(N)]] + \gamma f(N) \right\}}{df(N)} = 0. \quad (10)$$

Из (10) получаем

$$\frac{-N \cdot k}{(\ln e) \cdot [SNR(\lambda_0) - k \cdot f(N)]} + \gamma = 0. \quad (11)$$

Из (11) находим

$$f(N) = \frac{SNR(\lambda_0)}{k} - \frac{N}{\gamma \ln e}. \quad (12)$$

С учетом (12) и непрерывного аналога (3) имеем

$$\int_{N_{\min}}^{N_{\max}} \frac{SNR(\lambda_0)}{k} dN - \int_{N_{\min}}^{N_{\max}} \frac{N}{\gamma \ln e} dN = C_1. \quad (13)$$

Из (13) имеем

$$\gamma = \frac{\Delta N^2 \cdot k}{2(\ln e) SNR(\lambda_0) \Delta N - C_1 \cdot k}, \quad (14)$$

где $\Delta N = N_{\max} - N_{\min}$.

С учетом (12) и (14) получим

$$f(N)_{opt} = \frac{SNR(\lambda_0)}{k} - \frac{2N [SNR(\lambda_0) \Delta N - C_1 \cdot k]}{\Delta N^2 \cdot k}. \quad (15)$$

Легко проверить, что при решении (15) целевой функционал (9) достигает максимума. Для этого достаточно взять производную левой части (11) по $f(N)$ и убедиться, что она всегда отрицательна.

С учетом основной части функционала (9) и решения (15) вычислим максимально достижимое количество информации M_{\max} в сегментированном изображении

$$M_{0 \max} = \int_{N_{\min}}^{N_{\max}} N \cdot \log_2 \left[\frac{2N(SNR(\lambda)_0 \Delta N - C_1 \cdot k)}{\Delta N^2} \right] dN. \quad (16)$$

Таким образом, максимальное количество информации, достижимое при проведении цветовой сегментации мульти- и гиперспектральных изображений ландшафта, может быть оценено по формуле (16).

На основе полученного результата разработана методика определения степени изменения ландшафта за определенный промежуток времени.

3. Методика для оценки динамики изменения состояния элементов ландшафта на основе информационных характеристик

Допустим, что за определенный промежуток времени ΔT характеристика ландшафта $SNR(\lambda)$ изменилась и может быть аппроксимирована линией

$$SNR(\lambda)_{\Delta T} = SNR(\lambda_0)_{\Delta T} - k_{\Delta T} \lambda. \quad (17)$$

В этом случае с учетом (17) максимальное количество информации в сегментированном новом изображении ландшафта определим как

$$M_{0 \max, \Delta T} = \int_{N_{\min(\Delta T)}}^{N_{\max(\Delta T)}} N \cdot \left[\log_2 \frac{2N [SNR(\lambda_0)_{\Delta T} \cdot \Delta N_{\Delta T} - C_1 k_{\Delta T}]}{\Delta N_{\Delta T}^2} \right] dN. \quad (18)$$

Показатель разности ΔM , предлагаемый в качестве информационной оценки ландшафтных изменений, определим как

$$\Delta M = M_{\max} - M_{\max(\Delta T)}. \quad (19)$$

Таким образом, при известных ΔN , $SNR(\lambda_0)$, C_1 , k , вычисленных к началу и концу ΔT , формулы (18), (19) позволяют вычислить ΔM – информационную оценку изменений, происшедших в рассматриваемом ландшафте за промежуток времени ΔT .

С учетом (16) и (18) получим

$$\Delta M = \left[\log_2 \frac{[SNR(\lambda_0) \Delta N - C_1 \cdot k] \cdot \Delta N_{\Delta T}^2}{[SNR(\lambda_0)_{\Delta T} \cdot \Delta N_{\Delta T} - C_1 \cdot k_{\Delta T}] \cdot \Delta N^2} \right] \left(\frac{N_{\max}^2 - N_{\min}^2}{N_{\max \Delta T}^2 - N_{\min \Delta T}^2} \right). \quad (20)$$

Динамика изменений элементов ландшафта χ с учетом (19) может быть оценена как отношение

$$\chi = \frac{\Delta M}{\Delta T}. \quad (21)$$

Таким образом, формулы (18)–(21) составляют основу предлагаемой методики анализа информативности цветовой сегментации гиперспектральных изображений.

Заключение

Цветовая сегментация бортовых изображений поверхности земли в настоящее время преимущественно реализуется на основе проводимого мульти- и гиперспектрального анализа в целях обработки результатов дистанционного зондирования изучаемых ландшафтов. Вопрос об оценке информативности сигналов гиперспектрометров неразрывно связан с оценкой отношения сигнал/шум на выходе этих приборов. Сформулирована и решена оптимизационная задача наилучшей в информационном смысле оценки изменений, происшедших в ландшафте. Предложен метод оптимальной гиперспектральной сегментации аэрокосмических снимков. Получены расчетные формулы для вычисления информационных характеристик сегментированных изображений. Представлена методика для оценки динамики изменения состояния элементов ландшафта.

Список литературы

1. *Zaitoun N.M., Aqel M.J.* Survey on image segmentation techniques // International Conference on Communication, Management and Information Technology (ICCMIT). – 2015. – Vol. 65. – P. 797–806.
2. *Bleyer M., Gelautz M.* A layered stereo matching algorithm using image segmentation and global visibility constraints [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/221122946_A_layered_stereo_algorithm_using_image_segmentation_and_global_visibility_constraints (дата обращения: 13.06.2022).
3. *Тронин А.А., Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш.* Спектральные методы дистанционного зондирования в геологии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8, № 4. – С. 23–26.
4. *Colom M., Morel J-M.* Full – spectrum denoising of high – SNR hyperspectral images [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.doi.org/10.1364/JOSAA.36.000450> (дата обращения: 20.05.2022).
5. Signal to noise ratio (SNR) in hyperspectral imagers [Электронный ресурс]. – URL: https://www.resonon.com/content/files/SNR-in-Hyperspectral-Imagers_Resonon_26Sept2019.pdf (дата обращения: 13.06.2022).
6. *Moses W.J., Bowles J.H., Lucke R.L., Corson M.R.* Impact of signal to noise ratio in a hyperspectral sensor on the accuracy of biophysical parameter estimation in case II waters // Optics Express. – 2012. – Vol. 20, No. 4. – P. 4309.
7. *Ouma Y.O., Noor K., Herbert K.* Modelling reservoir chlorophyll-a, TSS and turbidity using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI Satellite sensors with empirical multivariate regression [Электронный ресурс] // Hidawi Journal of Sensors. – 2020. – P. 21. – URL: <https://www.doi.org/10.1155/2020/8858408> (дата обращения: 20.05.2022).
8. *Эльсгольц Л.Э.* Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: Наука, 1974. – 424 с.

References

1. *Zaitoun N.M., Aqel M.J.* Survey on image segmentation techniques // International Conference on Communication, Management and Information Technology (ICCMIT). – 2015. – Vol. 65. – P. 797–806.
2. *Bleyer M., Gelautz M.* A layered stereo matching algorithm using image segmentation and global visibility constraints [Elektronnyj resurs]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/221122946_A_layered_stereo_algorithm_using_image_segmentation_and_global_visibility_constraints (data obrashcheniya: 13.06.2022).
3. *Tronin A.A., Gornyj V.I., Kricuk S.G., Latypov I.Sh.* Spektral'nye metody distancionnogo zondirovaniya v geologii // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2011. – Т. 8, № 4. – S. 23–26.
4. *Colom M., Morel J-M.* Full – spectrum denoising of high – SNR hyperspectral images [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://www.doi.org/10.1364/JOSAA.36.000450> (data obrashcheniya: 20.05.2022).
5. Signal to noise ratio (SNR) in hyperspectral imagers [Elektronnyj resurs]. – URL: https://www.resonon.com/content/files/SNR-in-Hyperspectral-Imagers_Resonon_26Sept2019.pdf (data obrashcheniya: 13.06.2022).
6. *Moses W.J., Bowles J.H., Lucke R.L., Corson M.R.* Impact of signal to noise ratio in a hyperspectral sensor on the accuracy of biophysical parameter estimation in case II waters // Optics Express. – 2012. – Vol. 20, No. 4. – P. 4309.
7. *Ouma Y.O., Noor K., Herbert K.* Modelling reservoir chlorophyll-a, TSS and turbidity using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI Satellite sensors with empirical multivariate regression [Elektronnyj resurs] // Hidawi Journal of Sensors. – 2020. – P. 21. – URL: <https://www.doi.org/10.1155/2020/8858408> (data obrashcheniya: 20.05.2022).
8. *El'sgol'c L.E.* Differencial'nye uravneniya i variacionnoe ischislenie. – М.: Nauka, 1974. – 424 s.