

УДК 528.852.5:519.615.7

С. А. Станкевич

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Оптимизация состава спектральных каналов гиперспектральных аэрокосмических изображений при решении тематических задач дистанционного зондирования Земли

Надійшла до редакції 26.10.06

Запропоновано підхід до оптимального вибору комбінації спектральних каналів гіперспектральних аерокосмічних зображень на основі критерію інформативності, який враховує розділимість спектральних характеристик об'єктів ДЗЗ як дивергенцію Кульбака — Лейблера, еквівалентну просторову розрізненість даної комбінації спектральних каналів для даних об'єктів ДЗЗ та еквівалентне відношення «сигнал-шум» при ідентифікації об'єктів ДЗЗ за їх багатовимірними оптичними сигналами. Визначено механізм оптимізації складу спектральних каналів гіперспектральних аерокосмічних зображень при вирішенні тематичних задач ДЗЗ на основі процедури псевдоградієнтного пошуку в просторі можливих комбінацій спектральних каналів. Наведено кількісні результати оптимізації складу спектральних каналів багато- і гіперспектральних аерокосмічних зображень при вирішенні деяких тематичних задач ДЗЗ.

Сегодня с использованием методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) успешно решаются тематические задачи в таких отраслях, как геология, землепользование, сельское хозяйство, экосистемы и лесное хозяйство, океанография и наблюдение побережья, контроль водных ресурсов, метеорология и климатология, мониторинг чрезвычайных ситуаций и других. Крайне важным является уточнение и унификация типовых задач для каждой отрасли в соответствии с особенностями соответствующих объектов и используемых технологических методик [2].

Гиперспектральные аэрокосмические изображения за счет регистрации тонких структур спектров объектов позволяют существенно повысить качество решения тематических задач ДЗЗ в ряде научных и народно-хозяйственных областей. Вместе с тем гиперспектральные аэрокосмические изображения имеют существенную информационную избыточность, которая в ряде случаев является не только бесполезной, но и

вредной — за счет «растворения» полезной информации об объектах ДЗЗ в общем ее шумовом фоне. Кроме того, автоматизированная обработка гиперспектральных изображений сильно усложнена вследствие их высокой размерности и очень больших физических объемов, а визуальная — практически невозможна.

Поэтому обоснованный отбор информативных спектральных каналов при решении тематических задач ДЗЗ с использованием гиперспектральных аэрокосмических изображений позволит существенно повысить информационную ценность и сократить вычислительные затраты на их интерпретацию. Информативность гиперспектрального аэрокосмического изображения относительно конкретной тематической задачи определяется количеством информации, полезной для правильного разделения объектов, характерных для этой задачи. Поскольку информация о разделимости объектов содержится в спектральных распределениях оптических сиг-

налов, ее количество описывается через взаимные статистическо-информационные меры этих распределений. В данной работе используется критерий информативности $C(\lambda)$ [5]:

$$C(\lambda) = \frac{D(\lambda)}{4R^2(\lambda)} \cdot \log_2[1 + \psi(\lambda)], \quad (1)$$

который учитывает разделимость спектральных характеристик объектов ДЗЗ как *дивергенцию Кульбака — Лейблера* $D(\lambda)$ — многомерный аналог контраста для одномерных панхроматических изображений, *эквивалентное пространственное разрешение* $R(\lambda)$ данной комбинации спектральных каналов для данных объектов ДЗЗ и *эквивалентное отношение «сигнал-шум»* $\psi(\lambda)$ при идентификации объектов ДЗЗ по их многомерным оптическим сигналам. Критерий $C(\lambda)$ является обобщением известного информационного критерия Кононова [4] на случай многомерных оптических сигналов, регистрируемых гиперспектральными аэрокосмическими сенсорами. При этом основой обобщения выбрана вероятность правильного разделения типовых объектов наблюдения, присущих каждой тематической задаче ДЗЗ. Именно в смысле вероятности правильного выявления объектов рассматриваются эквивалентности пространственного разрешения $R(\lambda)$ и отношения «сигнал-шум» $\psi(\lambda)$ комбинаций спектральных каналов гиперспектральных аэрокосмических изображений [6].

Целью оптимизации состава спектральных каналов гиперспектральных аэрокосмических изображений является получение максимума полезной в смысле (1) информации в выбранных спектральных диапазонах. Рассмотрим вектор выбора спектральных каналов $W = \{W(\lambda)\}^T$, $\lambda = 1, \dots, n$, элементы которого равны единице, если соответствующий спектральный канал выбран, или нулю — если нет. Информативность (1) будет зависеть от вектора выбора и составит

$$C(W) = \frac{D(W)}{4R^2(W)} \cdot \log_2[1 + \psi(W)]. \quad (2)$$

Задача оптимизации состава спектральных каналов гиперспектрального аэрокосмического изображения состоит в определении такого вектора оптимального выбора W^* , который обеспечивает максимум целевой функции (2):

$$W^* = \operatorname{argmax} C(W). \quad (3)$$

Оптимизация выбора подмножества спектральных каналов — математическая задача нахождения лучшего в смысле критерия (2) набора спектральных диапазонов гиперспектрального сенсора. При известных спектральных характеристиках объектов наблюдения это — задача аналитической безусловной дискретной оптимизации [8]. Основными составляющими процедуры безусловной глобальной оптимизации являются локальные оптимизаторы, основанные на теореме о плотности информации, и глобальное решающее правило, выбирающее один из совокупности найденных локальных экстремумов [10]. В качестве механизмов локальной оптимизации могут выступать поисковые методы, метод возможных направлений, метод ветвей и границ и т. д. [12].

По степени гарантированности оптимального результата используемым алгоритмом глобальная оптимизация разделяются на неполную (строится на более-менее обоснованных эвристиках), асимптотически полную — оптимальность обеспечивается с известной точностью или вероятностью и строгую — оптимальность достигается с заданной точностью, толерантной к ошибкам вычислений [11].

Вычислительная сложность алгоритмов дискретной оптимизации состава спектральных каналов гиперспектральных сенсоров экспоненциально зависит от их общего их числа n и не может быть решена переборными методами. В такой ситуации особое значение приобретают гибридные методы оптимизации, обеспечивающие возможность сокращения времени решения задачи за счет объявления отдельных подмножеств переменных заведомо бесперспективными [1]. Пока не построена соответствующая общая теория, поскольку проблема нахождения решения, обеспечивающего заданную степень приближения к оптимуму, для большинства трудно решаемых задач оказывается также труднорешаемой [3]. В данной работе для оптимизации состава спектральных каналов используются множественный случайный старт псевдоградиентного поиска на регулярной решетке в пространстве переменных выбора бинарного вектора W размерности n :

$$W_0 = \{1\}^T,$$

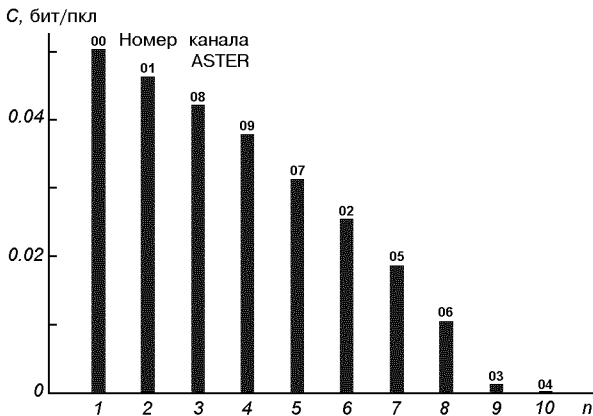


Рис. 1. Информативность комбинаций спектральных каналов спектро радиометра ASTER при классификации видового состава растительного покрова

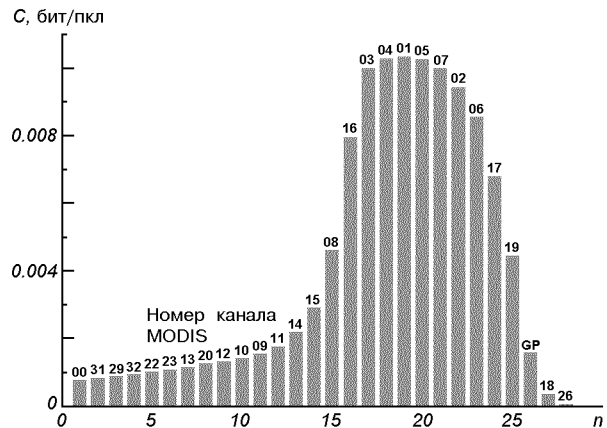


Рис. 2. Информативность комбинаций спектральных каналов спектро радиометра MODIS при оценке нефтегазоносной перспективности участков морского шельфа

$$W_k = W_{k-1} + \mu \cdot \text{grad } C(W_{k-1}), \quad (4)$$

$$\text{grad } C(W^*) = 0,$$

где $\text{grad } C(W)$ — оценка градиента целевой функции $C(W)$, μ — скорость изменения координат в выбранном направлении [9].

Описанный механизм оптимизации позволяет определять оптимальные комбинации спектральных каналов аэрокосмических сенсоров при решении тематических задач ДЗЗ. Для многоспектральных изображений оптимальные комбинации зачастую включают все спектральные каналы, как, например, при классификации видового состава растительности по девятиканальным снимкам спутникового спектро радиометра среднего пространственного разрешения ASTER (рис. 1).

Для переходных от многоспектральных к гиперспектральным изображений уже четко выделяются оптимальные комбинации спектральных каналов, включающие меньшинство из общего их числа, как, например, при оценке нефтегазоносной перспективности участков морского шельфа по тридцатиканальным снимкам спутникового спектро радиометра низкого пространственного разрешения MODIS (рис. 2).

Для классических гиперспектральных изображений оптимальные комбинации спектральных каналов в десятки раз уступают по количеству общему их числу, во столько же превосходя по информативности, как, например, при выявлении загрязненных участков почвы в пределах

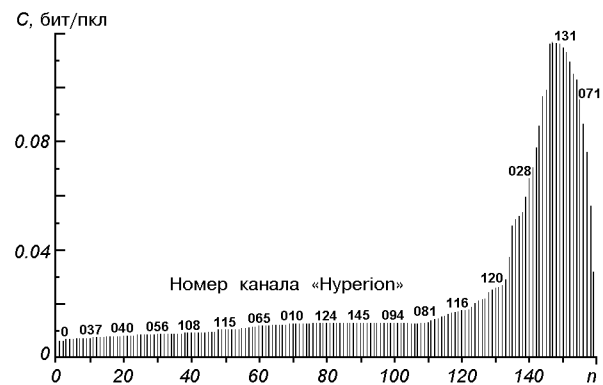


Рис. 3. Информативность комбинаций спектральных каналов гиперспектрального сенсора «Hyperion» при выявлении загрязненных участков почвы

урбанизованных территорий по двухсотканальным снимкам спутникового гиперспектрального сенсора среднего пространственного разрешения Hyperion (рис. 3).

На рис. 1—3 по оси абсцисс отложены номера итераций в ходе оптимизации (4) с указанием спектральных каналов, исключенных на данной итерации. Оптимальная комбинация, следовательно, содержит все спектральные каналы, находящиеся правее максимума информативности.

Оптимизация спектральных каналов гиперспектральных аэрокосмических изображений

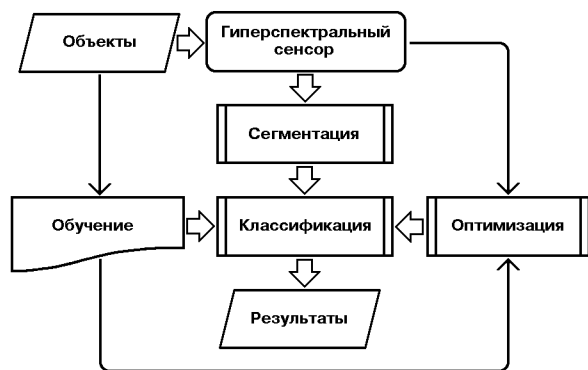


Рис. 4. Адаптивная классификация гиперспектральных аэрокосмических изображений

позволяет не только повысить качество и оперативность решения конкретных тематических задач ДЗЗ, но и открывает значительные перспективы в плане совершенствования технологий цифровой обработки гиперспектральных снимков. Например, выполнение оптимизации непосредственно в процессе обработки приводит к новому методу адаптивной классификации гиперспектральных аэрокосмических изображений, когда оптимальная комбинация спектральных каналов определяется индивидуально для каждой пары сегментов изображения. Порядок операций при адаптивной классификации поясняется схемой рис. 4.

В будущем процедура оптимизации состава спектральных каналов должна стать естественной неотъемлемой составляющей перспективных технологий и сервисов обработки гиперспектральных аэрокосмических изображений [7].

1. Алексеев О. Г. Комплексное применение методов дискретной оптимизации. — М.: Наука, 1987.—278 с.
2. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В. І. Лялько, М. О. Попова. — Київ: Наук. думка, 2006.—360 с.
3. Глебов Н. И., Кочетов Ю. А., Плясунов А. В. Методы оптимизации. — Новосибирск: НГУ, 2003.—74 с.
4. Кононов В. И., Станкевич С. А. Сравнительная оценка

информативности цифровых аэрокосмических изображений высокого и низкого разрешения // Ученые записки Таврического нац. ун-та им. В. И. Вернадского.—2004.—17, № 2.—С. 88—95.

5. Станкевич С. А. Кількісне оцінювання інформативності гіперспектральних аэрокосмічних знімків при вирішенні тематичних задач дистанційного зондування Землі // Доповіді НАН України.—2006.—№ 8.—С. 53—58.
6. Станкевич С. А. Імовірнісно-частотна оцінка еквівалентної просторової розрізненості багатоспектральних аэрокосмічних знімків // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 2/3.—С. 79—82.
7. Станкевич С. А. Оценка оптических передаточных функций и восстановление цифровых аэрокосмических изображений методом инверсной фильтрации // Проблемы управления и информатики.—2006.—№ 3.—С. 116—123.
8. Jones D. R. A taxonomy of global optimization methods based on response surfaces // J. Global Optimization.—2001.—21.—P. 345—383.
9. Landgrebe D. A. Signal theory methods in multispectral remote sensing. — Hoboken: John Wiley, 2003.—512 p.
10. Local search in combinatorial optimization / Eds E. H. L. Aarts, J. K. Lenstra. — Chichester: John Wiley, 1997.—512 p.
11. Neumaier A. complete search in continuous global optimization and constraint satisfaction // Acta Numerica / Ed. by A. Iserles. — Cambridge: Univ. Press, 2004.—P. 1—99.
12. Nocedal J., Wright S. J. Numerical optimization. — Berlin: Springer Verlag, 1999.—656 p.

HYPERSPECTRAL AEROSPACE IMAGERY SPECTRAL BANDS OPTIMAL SELECTION IN SOLVING REMOTE SENSING THEMATIC TASKS

S. A. Stankevich

We offer an approach to hyperspectral aerospace imagery optimal spectral bands selection on the basis of informativity criterion which includes remote sensing objects spectra separability as the Kullback-Leibler divergence, the equivalent spatial resolution of the given spectral bands combination for given remote sensing objects and the equivalent signal-to-noise ratio during the detection of remote sensing objects by their multi-dimensional optical signals. The logic of hyperspectral aerospace imagery optimal spectral bands selection in solving remote sensing thematic tasks on the basis of pseudogradient search of possible combinations of spectral bands in space is specified. We present quantitative results of multi- and hyperspectral aerospace imagery optimal spectral bands selection in solving some thematic tasks of the remote sensing.