

УДК 528.811

**С. А. Станкевич**

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

## **Информативность оптических диапазонов дистанционного наблюдения Земли из космоса: практические алгоритмы**

*Представлено 03.09.07*

Описано алгоритми, що дозволяють практично оцінювати інформативність оптичних діапазонів дистанційного спостереження Землі з космосу з урахуванням спектральних характеристик типових об'єктів ландшафту та атмосфери. Наведено кількісні оцінки інформативності оптичних спектральних діапазонів при вирішенні уніфікованих тематичних задач, що може бути корисним при розробленні нових і конфігуруванні існуючих супутникових сенсорів.

Оценивание информативности спектральных диапазонов регистрации электромагнитного излучения Земли важно при разработке новых образцов сенсоров дистанционного наблюдения и на этапе планирования космической съемки для рационального выбора состава и характеристик спектральных каналов бортовой аппаратуры с возможной минимизацией финансовых затрат [12].

Оценка информативности космической системы наблюдения не тождественна вероятностным характеристикам решения конкретных тематических задач. Особенность оценки информативности состоит в существенно приближенном характере, поскольку при этом априорная информация ограничивается, как правило, только общими усредненными характеристиками объектов наблюдения и условий съемки, причем часто в неполном объеме и с определенными допущениями [5].

Тематические задачи дистанционного наблюдения различаются в общем случае практической целью, ради достижения которой они решаются. Это может быть выявление тех или иных

объектов (или явлений, процессов), определение их качественных и измерение количественных характеристик, создание тематических карт их пространственного распределения, прогнозирование развития наблюдаемых ситуаций, принятие различных научных, управленческих или специальных решений. Поскольку сама технология дистанционного наблюдения основана на регистрации электромагнитного излучения, то определяющими при решении тематических задач являются спектральные характеристики объектов съемки, а точнее — их типовых классов, а также принципиальные возможности их обнаружения и разделения при помощи дистанционных сенсоров [9].

Полный спектральный диапазон электромагнитного излучения дистанционного наблюдения простирается от ультрафиолетового до радиоволнового и в соответствии с физическими свойствами излучения подразделяется на оптический (ультрафиолетовый, видимый и инфракрасный), микроволновой и радиолокационный. Основная часть информации об объектах дистанционного наблюдения поступает с оптических каналов

регистрации. Разные объекты имеют неодинаковые отражательные и излучательные характеристики, поэтому информативность спектральных диапазонов будет различаться.

Исходным для количественной оценки информативности должен быть перечень решаемых задач дистанционного наблюдения Земли с указанием списка типовых объектов (лесные массивы, сельскохозяйственные насаждения, водные поверхности, урбанизированные территории, зоны чрезвычайных ситуаций) для каждой задачи. В наиболее часто используемые перечни унифицированных тематических задач дистанционного наблюдения включаются геология — поиск полезных ископаемых и энергоносителей, изучение геотектонических процессов, анализ горных пород; землепользование — картографирование, земельный кадастр, изучение урбанизированных и промышленных территорий; сельское хозяйство — инвентаризация угодий, прогнозирование урожая, оценка почв и агроресурсов; экосистемы и лесное хозяйство — измерение биомассы и разнообразия экосистем, запасов и состояния лесов, оценка экологического неблагополучия и убытков; океанография и наблюдение побережья — изучение океанских ресурсов, выявление загрязнений и их источников; контроль водных ресурсов — гидрологическое районирование, оценка гидроресурсов, их экологического состояния и загрязненности; метеорология и климатология — анализ ледово-снегового покрова, профилирование и контроль загрязненности атмосферы, наблюдение облачности, прогнозирование климатических изменений; мониторинг чрезвычайных ситуаций — моделирование природных и техногенных катастроф, наблюдение зон бедствий, оценка убытков [1].

Количественно информативность  $\lambda$ -го спектрального диапазона  $C_1(\lambda)$  наблюдения или комбинации  $m$  спектральных диапазонов  $C_m(\lambda)$  определяется объемом информации, полезной в контексте решаемой тематической задачи. В этом смысле информативность принципиально отличается от понятия информационной емкости  $C_0$  (шенноновской пропускной способности) спектрального диапазона. Последняя на практике определяется числом элементов пространственного разрешения  $n$  и количеством градаций каждого элемента  $w$  [3]:

$$C_0 = n \log_2 w. \quad (1)$$

Число элементов разрешения одномерных дискретных изображений обратно пропорционально квадрату удвоенного размера эффективного разрешения  $r$ , а количество градаций определяется отношением «сигнал — шум»  $\psi$  в канале регистрации [7]. Поскольку размер  $d_0$  характерного подлежащего различению элемента объекта наблюдения одинаков во всех спектральных диапазонах, то на практике оценку информативности можно привязать к нему, а количество информативности оценивать в битах, приходящихся на один пиксел дискретного изображения  $d$ . Для одномерного изображения  $r \geq d$  и  $w \leq 1 + \psi$ .

С практической точки зрения решение тематических задач дистанционного наблюдения Земли из космоса в оптическом диапазоне сводится к классификации соответствующих панхроматических, многоспектральных или синтезированных цифровых изображений, а классификация, в свою очередь, — к разделению классов объектов в соответствующем признаковом пространстве. Поэтому для практического оценивания информативности спектральных диапазонов перечень унифицированных задач дистанционного наблюдения следует преобразовать в перечень типовых объектов наблюдения, попарное различение которых требуется для их решения. Каждый типовой объект при этом полностью описывается своей спектральной характеристикой во всем наборе оцениваемых спектральных диапазонов. Полная информативность набора из  $s$  объектов составляет [9]

$$C(\lambda) = \sum_{j=1, q=1}^s C_{jq}(\lambda). \quad (2)$$

Информативность для пары объектов  $j, q$  со спектральными характеристиками  $E_j(\lambda)$  и  $E_q(\lambda)$  может быть описана соотношением

$$C_{jq}(\lambda) = \frac{D_{jq}(\lambda)}{4r_{jq}(\lambda)} \log_2(1 + \psi_{jq}(\lambda)). \quad (3)$$

Здесь  $D_{jq}(\lambda)$  — взаимная информация Кульбака-Лейблера между вероятностными распределениями спектральных сигналов объектов  $f_j(\lambda)$  и  $f_q(\lambda)$ ,  $r_{jq}(\lambda)$  — эффективное пространственное разрешение относительно объектов  $j$  и  $q$ ,  $\psi_{jq}(\lambda)$

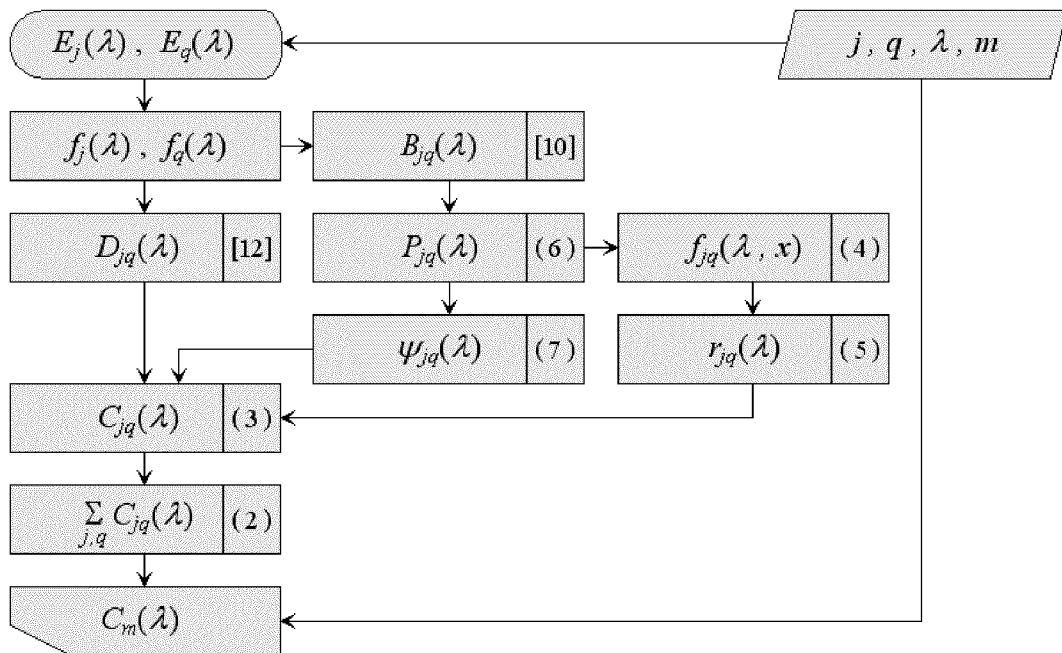


Рис. 1. Схема алгоритма оценки информативности оптических диапазонов дистанционного наблюдения Земли из космоса

— эффективное отношение «сигнал — шум» [8].

Прядок определения как пространственного разрешения, так и отношения «сигнал-шум» достаточно разработан и не вызывает трудностей для одномерных — панхроматических или зональных дистанционных изображений [2], однако для многоспектральных и тем более гиперспектральных изображений сами эти понятия становятся неопределенными.

Базовой основой устранения неопределенности при расчетах эффективного пространственного разрешения и эффективного отношения «сигнал-шум» может стать принцип эквивалентности разделения многомерных радиометрических полей, соответствующих разным объектам на многомерных дистанционных изображениях. Принцип эквивалентности превозглашает равенство вероятностей правильного разделения объектов на многомерном и эквивалентном ему одномерном дискретных изображениях, при этом эквивалентное пространственное разрешение описывает пространственное, а эквивалентное отношение «сигнал — шум» — радиометрическое распределение данной вероятности [8]. Если известно пространственное распределение

$P_{jq}(\lambda, x)$  вероятности правильного разделения спектральных сигналов  $E_j(\lambda, x)$  и  $E_q(\lambda, x)$ , то можно построить распределение плотности этой вероятности  $f_{jq}(\lambda, x)$  как

$$f_{jq}(\lambda, x) = \frac{\partial P_{jq}(\lambda, x)}{\partial x}, \quad (4)$$

и далее найти эквивалентное пространственное разрешение  $r$  из условия

$$\int_x^{x+r} f(x) dx \equiv \alpha, \quad (5)$$

где  $\alpha$  — заданный порог вероятности (уровень значимости).

Вероятность  $P_{jq}(\lambda)$  может быть найдена как [13]

$$P_{jq}(\lambda) \cong 1 - \exp(-B_{jq}(\lambda)), \quad (6)$$

где  $B_{jq}(\lambda)$  — статистическое расстояние Бхаттария между распределениями  $E_j(\lambda)$  и  $E_q(\lambda)$ , а эквивалентное отношение «сигнал — шум» — как [6]

$$\begin{aligned} \psi_{jq}(\lambda) &\cong \text{erf}^{-1}[2P_{jq}(\lambda) - 1] \cong \\ &\cong \text{erf}^{-1}[1 - 2\exp(-B_{jq}(\lambda))]. \end{aligned} \quad (7)$$

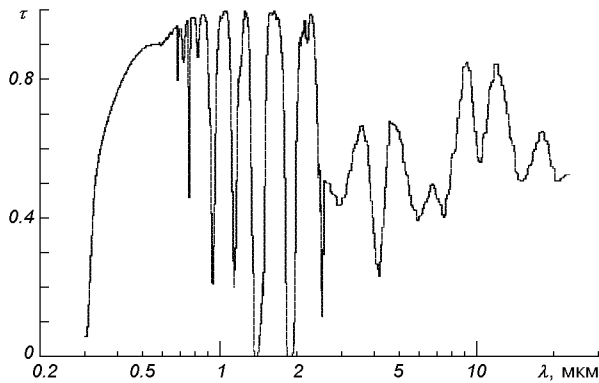


Рис. 2. Спектральное пропускание атмосферы в оптическом диапазоне дистанционного наблюдения

Общий алгоритм оценки информативности оптических диапазонов дистанционного наблюдения описывается рис. 1.

Важным этапом оценивания информативности является переход от имеющихся квазинепрерывных спектров типовых объектов в пространство дискретных спектральных сигнатур, присущих фиксированному спектральному диапазону. Спектральные сигнатуры определяются не только отражательными свойствами объектов наблюдения, но и спектральным распределением интенсивности падающего излучения  $E_0(\lambda)$  и спектральным пропусканием атмосферы. Усредненная зависимость спектрального коэффициента пропускания атмосферы  $\tau(\lambda)$  от длины волны электромагнитного излучения показана на рис. 2 [14].

Спектр излучения объектов земной поверхности складывается из спектров отраженного солнечного излучения и собственного теплового излучения. Спектральный состав светимости Солнца с высокой точностью совпадает со светимостью абсолютно черного тела с максимумом на длине волны  $\lambda_* = 0.47$  мкм [4], и на границе атмосферы Земли описывается законом Планка:

$$E_*(\lambda) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{h c b}{k \lambda \lambda_*}\right) - 1 \right]} \left(\frac{R_*}{D_*}\right)^2, \quad (8)$$

где  $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Вт·с<sup>2</sup> — постоянная Планка,

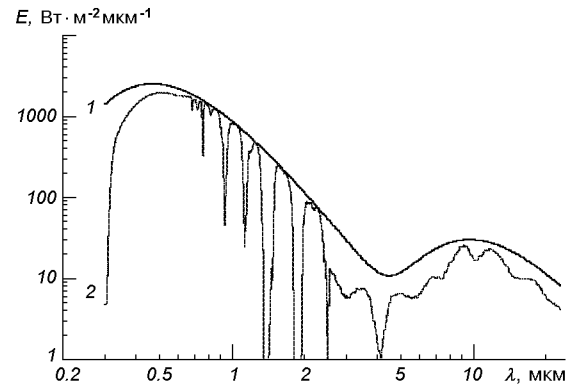


Рис. 3. Спектральная интенсивность излучения объектов ландшафта в оптической области спектра: 1 — теоретическая в соответствии с законом Планка, 2 — с учетом спектрального пропускания атмосферы

$c = 2.998 \cdot 10^5$  км/с — скорость света в вакууме,  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Вт·с<sup>2</sup>/К — постоянная Больцмана,  $b = 2898$  мкм·К — постоянная Вина,  $R_* = 6.96 \cdot 10^7$  км — радиус Солнца,  $D_* = 1.496 \cdot 10^8$  км — среднее расстояние от Солнца до Земли.

Поэтому в видимом и ближнем инфракрасном спектральных диапазонах преобладает отраженное солнечное излучение, в среднем — смесь отраженного и собственного излучения, а в дальнем — преимущественно собственное тепловое излучение объектов ландшафта  $E_0(\lambda)$ . Соответствующие распределения спектральной плотности энергетической светимости показаны на рис. 3.

Окончательный регистрируемый сигнал от объекта наблюдения  $E(\lambda + \Delta\lambda)$  в пределах спектрального диапазона с длинами волн от  $\lambda$  до  $\lambda + \Delta\lambda$  модулируется его спектральными отражательной  $\rho(\lambda)$  и излучательной  $\varepsilon(\lambda)$  характеристиками и составляет

$$E(\lambda + \Delta\lambda) = \int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} \left( E_*(\lambda) \tau(\lambda) \rho(\lambda) + E_0(\lambda) \varepsilon(\lambda) \right) \tau(\lambda) d\lambda, \quad (9)$$

где  $E_0(\lambda)$  также описывается законом Планка

$$E_0(\lambda) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{h c}{k \lambda T_0}\right) - 1 \right]}, \quad (10)$$

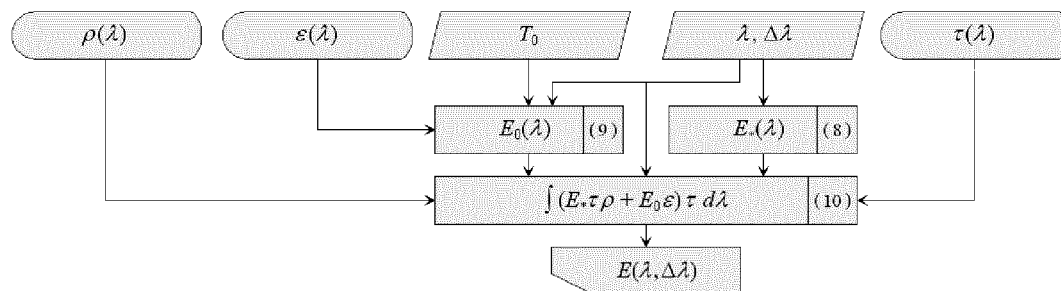


Рис. 4. Схема алгоритма расчета спектральных сигнатур объектов дистанционного наблюдения в оптическом диапазоне

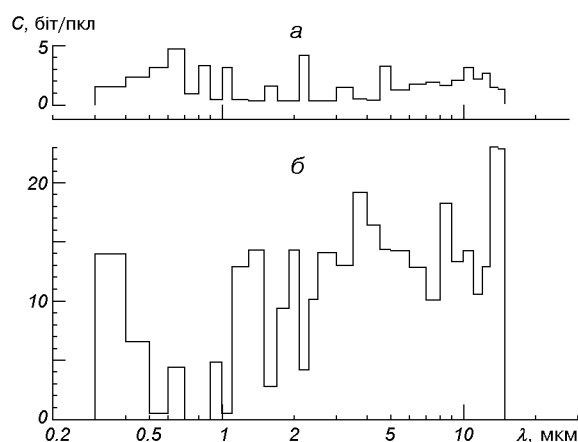


Рис. 5. Информативность оптических диапазонов дистанционного наблюдения Земли из космоса: *а* — для одиночных диапазонов, *б* — для оптимальных комбинаций

где  $T_0$  — собственная температура объекта.

Алгоритм расчета спектральной сигнатуры объекта поясняется рис. 4.

Полученные спектральные сигнатуры объектов уже позволяют практически рассчитывать информативность (3) для каждого произвольного спектрального диапазона. Однако в рамках принципа эквивалентности совместное использование нескольких специально подобранных спектральных диапазонов может обеспечить значительно более высокую информативность, нежели их суммарная — так называемый синергетический эффект многоспектральности [11]. Для поиска оптимальной по информативности комбинации спектральных диапазонов наблюдения известны соответствующие вычислительные процедуры [10].

В качестве примера проведена оценка информативности 30 спектральных оптических диапазонов 0.3—15 мкм для восьми групп тематических задач дистанционного наблюдения Земли из космоса, предполагающих попарное различие от 3 до 10 типовых объектов в каждой. На рис. 5 приведены диаграммы информативности для одиночных спектральных диапазонов и для их оптимальных комбинаций.

В каждую оптимальную комбинацию входят от 3 до 23 спектральных диапазонов, которые обеспечивают повышение информативности в среднем в 2—14 раз. При этом оптимизация приводит еще и к перераспределению относительной информативности между спектральными диапазонами. Для одиночных же можно выделить как наиболее информативные — 0.6—0.7 мкм, 2.1—2.3 мкм, 4.5—5 мкм, 10—11 мкм, так и наименее информативные — 0.9—1 мкм, 1.1—1.5 мкм, 1.7—2.1 мкм, 3.5—4.5 мкм — оптические диапазоны.

Таким образом, предложенные алгоритмы могут послужить теоретической основой для рационального выбора оптических диапазонов дистанционного наблюдения Земли из космоса при синтезе вновь разрабатываемой или конфигурировании уже существующей бортовой оптико-электронной аппаратуры.

1. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В. І. Лялько, М. О. Попова. — Київ: Наук. думка, 2006.—360 с.
2. Кононов В. И. Обоснование методики определения разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 91—102.

3. Кононов В. И., Станкевич С. А. Сравнительная оценка информативности цифровых аэрокосмических изображений высокого и низкого разрешения // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского.—2004.—17, № 2.—С. 88—95.
4. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. — М.: Сов. радио, 1978.—400 с.
5. Попов М. А., Станкевич С. А. Методы оптимизации числа спектральных каналов в задачах обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — М.: ИКИ РАН, 2006.—Т. 1.—С. 106—112.
6. Сивяков И. Н. Расчет разрешения оптико-электронных систем // Оптический журн.—1998.—65, № 2.—С. 60—63.
7. Станкевич С. А. Статичні аспекти визначення функції передавання модуляції аерокосмічних іконічних систем з дискретними фотоприймачами // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. — Львів: Львівська Політехніка, 2005.—Вип. II.—С. 142—147.
8. Станкевич С. А. Імовірнісно-частотна оцінка еквівалентної просторової розрізненності багатоспектральних аерокосмічних знімків // Космічна наука і технологія.—2006.—12, № 2/3.—С. 79—82.
9. Станкевич С. А. Кількісне оцінювання інформативності гіперспектральних аерокосмічних знімків при вирішенні тематичних задач дистанційного зондування Землі // Доп. НАН України.—2006.—№ 8.—С. 53—58.
10. Станкевич С. А. Оптимизация состава спектральных каналов гиперспектральных аэрокосмических изображений при решении тематических задач дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія.—2007.—13, № 2.—С. 25—28.
11. Станкевич С. А., Шолоник О. В. Адаптивное многомерное вероятностное преобразование многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков // Тезисы Первой науч. конф. «Науки о Земле и космосе — обществу». — Киев: ЦАКИЗ, 2007.
12. Федоровський О. Д., Якимчук В. Г. Моделювання процесу одержання інформації космічними системами зондування Землі // Геоінформатика.—2005.—№ 1.—С. 41—48.
13. Фукунага К. Ведение в статистическую теорию распознавания образов / Пер. с англ. — М.: Наука, 1979.—368 с.
14. Staenz K., Secker J., Gao B.-C., et al. Radiative transfer codes applied to hyperspectral data for the retrieval of surface reflectance // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing.—2002.—57, N 3.—P. 194—203.

---

#### INFORMATIVITY OF EARTH REMOTE SENSING OPTICAL BANDS: PRACTICAL ALGORITHMS

*S. A. Stankevich*

The algorithms for practical evaluation of informativity of Earth remote sensing optical bands using spectral responses of landscape standard objects and atmosphere are presented. We give quantitative estimations of informativity of optical spectral bands in solving unified thematic tasks. This can be useful for the elaboration of new satellite sensors and for configuring of existing ones.