

Особенности использования многоспектральных аэрокосмических изображений при количественной оценке видового разнообразия растительного покрова

М.А. Попов, С.А. Станкевич, А.А. Козлова

*Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины
Украина, 01601, Киев, ул. Олеся Гончара, 55-б
E-mail: pop@casre.kiev.ua*

Изложен подход к количественной оценке видового разнообразия растительного покрова на основе использования многоспектральных аэрокосмических изображений. Описаны требования к качеству необходимой при этом аэрокосмической информации. Предлагаются алгоритм контролируемой байесовской классификации растительного покрова на базе метрики Бхаттачария и специальная процедура согласования пространственного разрешения изображений, полученных в разных спектральных диапазонах. Для анализа видового разнообразия растительного использован информационный индекс Шеннона и дана методика его расчета на основе аэрокосмических снимков, позволяющая повысить точность на 5–15%.

Существование огромного числа биологических существ неразрывно связано с наличием растительного покрова. Для одних биологических видов растительность является продуктом питания или сырья, для других – местом постоянного или сезонного обитания. Именно растительный мир в целом обеспечивает восстановление содержания кислорода в атмосфере до уровня, отвечающего потребностям жизнедеятельности живых существ. Поэтому площадь растительного покрова и особенно его видовое разнообразие на изучаемой территории являются важными показателями общего состояния экосистемы.

Традиционно эти показатели вычислялись на основе информации, собираемой специалистами методом *in-situ*, в процессе полевых исследований [1, 2]. Такой метод, хотя и позволяет получать потенциально наиболее достоверную информацию о растительном покрове, однако имеет ряд ограничений. Во-первых, далеко не любая территория доступна для исследования методом *in-situ*. Во-вторых, если территория и доступна для проведения полевых работ, но имеет большую площадь, то получение необходимой информации сопряжено со значительными затратами времени и людских ресурсов.

По указанным причинам в последние годы активно изучаются возможности оценивания видового разнообразия растительного покрова территорий с использованием технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Преимуществами подхода на основе ДЗЗ, как показано в [3, 4], являются оперативность получения количественных оценок растительного покрова, возможность их периодической актуализации, сравнительно невысокая стоимость выполнения работ.

В работах [5, 6] сформулированы основные требования, которым должна отвечать исходная аэрокосмическая информация. Показано, что для анализа видового состава растительности необходимо располагать аэро- или космическими многоспектральными изображениями территории, полученными в видимом (в первую очередь, в зеленой и красной зонах), ближнем и среднем инфракрасных диапазонах электромагнитного спектра. Полезные дополнительные дешифровочные признаки могут нести изображения, полученные в дальнем инфракрасном (тепловом) диапазоне.

Пространственная точность результатов анализа зависит от линейного разрешения соответствующих снимков. Для гарантированной пространственной погрешности конечного информационного продукта не более 70 м требуется детальность на местности не хуже 35 м при среднеквадратических погрешностях геодезического геодезирования не хуже 50 м - для космического снимка и не хуже 15 м - для заверочных данных [5].

Кроме того, при классификации растительного состава методом ДЗЗ накладываются дополнительные ограничения относительно периода съемки (обычно это май-октябрь) и облачности

(желательно не более 10 % общей площади снимка).

Анализ показывает, что указанным требованиям пространственной точности и необходимых спектральных диапазонов удовлетворяют изображения, формируемые оптико-электронными сенсорами ASTER и ETM+, установленными соответственно на космических аппаратах (КА) EOS-1 и Landsat-7, а также сенсорами HRVIR и LISS (соответственно КА SPOT-4 и IRS-1D), частично – многоспектральным устройством МСУ-Э (КА “Метеор-3М”).

Основные характеристики некоторых космических систем ДЗЗ (в том числе украинской системы “Сич-2”, планируемой к запуску в 2007 году), могущих быть использованными для оценивания видового состава растительного покрова, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики некоторых космических систем ДЗЗ

Космический аппарат	Высота орбиты, км	Сенсор	Спектральные диапазоны, мкм	Пространственное разрешение, м	Ширина полосы обзора, км	Периодичность обзора, сут.
Landsat-7	705	ETM+	0,45 – 0,52 0,52 – 0,60 0,63 – 0,69 0,75 – 0,90 1,55 – 1,75 10,4 – 12,5 2,08 – 2,35 0,52 – 0,90	30 30 30 30 30 60 30 15	185	16
EOS-1	685	ASTER	0,52 – 0,60 0,63 – 0,69 0,76 – 0,86 1,60 – 1,70 2,145 – 2,185 2,185 – 2,225 2,235 – 2,285 2,295 – 2,365 2,360 – 2,430 8,125 – 8,475 8,475 – 8,825 8,925 – 9,275 10,25 – 10,95 10,95 – 11,65	15 15 15 30 30 30 30 30 30 90 90 90 90 90	60	16
Spot-4	832	HRVIR	0,50 – 0,59 0,61 – 0,68 0,78 – 0,89 1,58 – 1,75 0,49 – 0,69	20 20 20 20 10	117	26
IRS-1D	817	LISS-III	0,52 – 0,59 0,62 – 0,68 0,77 – 0,86 1,55 – 1,75	23,5 23,5 23,5 70,5	142	25
Метеор-3М	1018	МСУ-Э	0,5-0,6 0,6-0,7 0,8-0,9	32 32 32	76	7
Сич-2	668	МС-2-8	0,50 – 0,59 0,61 – 0,68 0,79 – 0,89 0,50 – 0,80 1,55 – 1,70	7,8 7,8 7,8 7,8 39,5	46,6	4

Классификация растительного покрова с использованием материалов ДЗЗ проводится в несколько этапов.

Первый этап состоит в накоплении наземной информации о видовом составе растительности и ее первичной обработке с целью получения спектральных характеристик отдельных классов растений по многоспектральным аэрокосмическим снимкам.

На втором этапе проводится предварительный анализ многоспектрального снимка с целью создания интегральных сигнатур классов растительного сообщества, характерного для данной территории. По каждому из тестовых участков (Region of interest - ROI) получают параметры статистического распределения спектральных сигналов разных классов, а также строятся спектральные гистограммы для сравнительного анализа.

Третий этап заключается в проведении собственно классификации исследуемой территории по распределению видов растительности. Для этой цели авторами разработан алгоритм контролируемой байесовской классификации растительного покрова на базе метрики Бхатачария. Алгоритм основывается на предположении, что вероятность ошибочного отнесения ε_j многомерного оптического сигнала, который соответствует пикселу многоспектрального изображения, к классу j оценивается сверху как

$$\varepsilon_j = \exp(-b_j), \quad (1)$$

где

$$b_j = \frac{1}{8} \Delta E_j^T \times \left(\frac{\text{Var}_j + \text{diag } \mathbf{1}_n}{2} \right)^{-1} \times \Delta E_j + \frac{1}{2} \ln \frac{\det \text{Var}_j + 1}{2\sqrt{\det \text{Var}_j}} - \quad (2)$$

расстояние Бхатачария [7], ΔE_j – вектор отклонений многоспектрального сигнала пиксела от вектора средних класса j ; Var_j – ковариационная матрица сигналов класса j ($j=1, \dots, m$).

Априорная вероятность правильной классификации класса p_k для класса k будет $1-\varepsilon_j$, при этом апостериорная вероятность p_j отнесения пиксела к классу j составляет

$$p_k = \frac{1 - \varepsilon_k}{\sum_{j=1}^m (1 - \varepsilon_j)}. \quad (3)$$

Решение про принадлежность пиксела определенному классу принимается при условии максимума апостериорной вероятности p_j при соблюдении требования сепарабельности:

$$\varepsilon_j \leq 0,1. \quad (4)$$

Блок-схема разработанного алгоритма классификации растительного покрова показана на рис. 1.

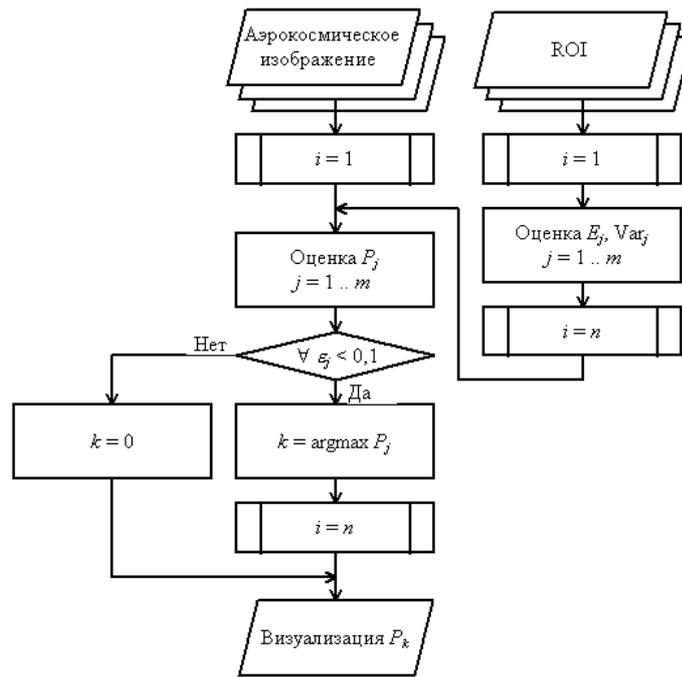


Рис. 1. Блок-схема алгоритма классификации растительного покрова

Необходимо отметить, что исходные изображения, в силу особенностей их формирования на борту, имеют неодинаковое пространственное разрешение в разных спектральных диапазонах. Это означает, что размерности матриц, которыми представляются спектральные изображения при их цифровой обработке, отличаются друг от друга, а данное обстоятельство создает сложности при совместной их обработке и классификации.

В современных пакетах для выравнивания пространственного разрешения разных спектральных диапазонов многоспектральных космических снимков используются разнообразные алгоритмы ресемплирования или разные варианты пан-шерпенинга (pan-sharpening), при котором панхроматическое аэрокосмическое изображение высокого разрешения накладывається на многоспектральное аэрокосмическое изображение меньшего разрешения одной и той же сцены путем определенного набора формальных арифметико-логических операций [8]. В результате достигается эффект псевдоповышения пространственного разрешения изображения, что облегчает его визуальное дешифрирование.

Однако при автоматической классификации изображений обычное ресемплирование или пан-шерпенинг не дают нужного эффекта. Поэтому в дополнение к разработанному алгоритму авторами была предложена следующая вычислительная процедура [9]. В исходном комплекте многоспектральных аэрокосмических изображений высокого и низкого пространственного разрешения одной и той же сцены каждому элементу разрешения многоспектрального аэрокосмического изображения низкого разрешения поставлено в соответствие определенное количество элементов разрешения многоспектрального аэрокосмического изображения высокого разрешения, которые “жестко” связаны с ним. Проводится предварительный анализ сцены при помощи комплекта многоспектральных аэрокосмических изображений высокого и низкого разрешения, по результатам которого из спектральной библиотеки отбирается набор спектров объектов сцены. Выполняется пересчет отобранных спектров на многоспектральных аэрокосмических изображений высокого и низкого разрешения по формуле

$$r^{(j)} = \frac{1}{\Delta \lambda^{(j)}} \int_{\lambda^j}^{\lambda^j + \Delta \lambda^j} r(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

где $r^{(j)}$ – интегральная спектральная характеристика, которую можно определить в любом j -м спектральном диапазоне с длинами волн от $\lambda^{(j)}$ до $\lambda^{(j)} + \Delta\lambda^{(j)}$, если в пределах сцены есть объект с известной спектральной характеристикой отражения (излучения) $r(\lambda)$.

Для установления системы коэффициентов передачи каналов сенсора проводится радиометрическая калибровка многоспектральных аэрокосмических изображений высокого и низкого разрешения по формуле

$$E^{(j)} = \alpha^{(j)} r^{(j)}, \quad (6)$$

где $\alpha^{(j)}$ – коэффициент передачи (усиления) сенсора в j -м канале.

На основе соответствия элементов разрешения многоспектральных аэрокосмических изображений высокого и низкого разрешения выполняется ресемплирование многоспектрального аэрокосмического изображения низкого разрешения до пространственного разрешения многоспектральных аэрокосмических изображений высокого разрешения. Далее для каждого элемента разрешения откалиброванного многоспектральных аэрокосмических изображений высокого разрешения и ресемплированного откалиброванного многоспектрального аэрокосмического изображения низкого разрешения проводится классификация спектральной сигнатуры элемента разрешения по набору спектральных сигнатур объектов сцены одним из известных способов. По результатам классификации проводится коррекция радиометрических значений сигналов каждого элемента разрешения каждого спектрального диапазона ресемплированного откалиброванного многоспектрального аэрокосмического изображения низкого разрешения при условии сохранения среднего радиометрического значения сигнала в соответствующем элементе разрешения нересемплированного откалиброванного многоспектрального аэрокосмического изображения низкого разрешения.

При этом, при условии неискажения исходного многоспектрального аэрокосмического изображения низкого разрешения, в каждом j -м спектральном диапазоне должно выполняться ограничение

$$E^{(j)} = \frac{\alpha^{(j)}}{n^{(j)}} \sum_{i=1}^{n^{(j)}} r^{(j)}, \quad (7)$$

где $n^{(j)}$ – количество элементов разрешения многоспектрального аэрокосмического изображения высокого разрешения, соответствующие одному элементу разрешения многоспектрального аэрокосмического изображения низкого разрешения.

Рис. 2 иллюстрирует механизм перехода от одного спектрального диапазона к другому при расчетах величин оптических сигналов одного и того же объекта ДЗЗ в разных спектральных каналах.

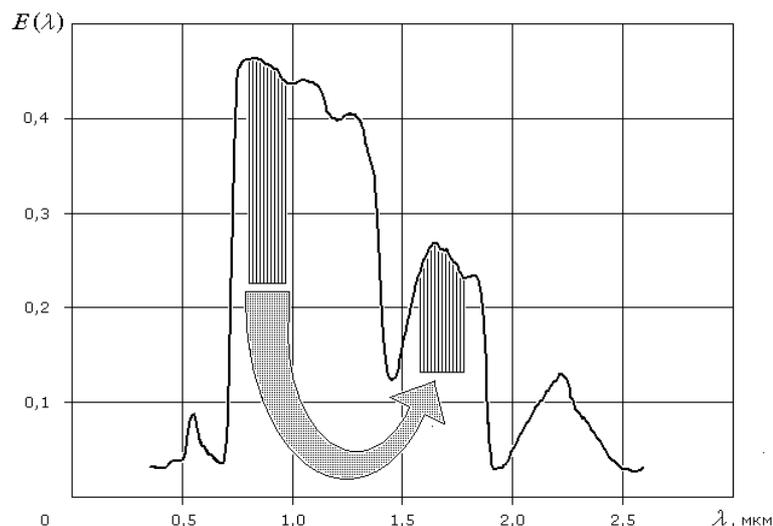


Рис. 2. Иллюстрация перехода от одного спектрального диапазона к другому при расчетах величин оптических сигналов

После коррекции пространственное разрешение ресемплированного откалиброванного многоспектрального аэрокосмического изображения низкого разрешения становится равным пространственному разрешению многоспектрального аэрокосмического изображения высокого разрешения, т. е. ресемплированное откалиброванное многоспектральное аэрокосмическое изображение низкого разрешения превращается в откалиброванное многоспектральное аэрокосмическое изображение повышенного разрешения.

В заключение проводится повторная классификация многоспектрального аэрокосмического изображения с привлечением спектральных каналов повышенного пространственного разрешения. Это позволяет улучшить точность классификации в отдельных субпикселах изображения низкого разрешения и тем самым уточнить пространственное распределение классов для мелких объектов, а также границ крупных объектов.

Точность классификации растительного покрова, к примеру, по снимкам Landsat ETM+ видимого, ближнего и среднего инфракрасного диапазонов предложенная процедура позволяет повысить на 0,14-1,20% в расчете на один канал [10].

Анализ видового разнообразия растительного покрова должен включать в себя его количественные оценки. С этой целью широко применяется информационный индекс Шеннона [2]:

$$I = - \sum_{j=1}^m p_j \log_2 p_j , \quad (8)$$

где m – количество видов, p_j – значимость вида j .

Современные цифровые технологии обработки аэрокосмических изображений предоставляют значительные возможности статистического анализа многоспектральных данных. Особенно, большинство статистических алгоритмов классификации является наличие некоторой количественной оценки принадлежности данного пиксела аэрокосмического изображения каждому классу земной поверхности [11]. Между тем ее применение при последующей обработке аэрокосмических изображений, основанных на результатах классификации, позволяет получить дополнительную информацию и повысить общую точность решения задачи.

Рассмотрим аэрокосмическое изображение из n пикселов, которое содержит m классов, учитываемых при оценке разнообразия. Оценка количества пикселов n_k в классе k может быть проведена по формуле:

$$n_k = \sum_{i=1}^n p_i^{(k)} , \quad (9)$$

где $p_i^{(k)}$ - апостериорная вероятность класса k в пикселе i . Ее можно оценить, используя байесовский подход, как

$$p_i^{(k)} = \frac{f_i^{(k)}}{\sum_{j=1}^m f_i^{(j)}} , \quad (10)$$

где $f_i^{(j)}$ - функция принадлежности пиксела i классу j ; вычисляется по результатам работы алгоритма классификации.

Оценка общего количества пикселов по всем классам n осуществляется по формуле

$$n = \sum_{j=1}^m n_j . \quad (11)$$

Таким образом, указанные особенности статистических алгоритмов могут приниматься во внимание при расчете шенноновского индекса видового разнообразия по формуле

$$I = \sum_{k=1}^m \frac{n_k}{n} \cdot \log_2 \frac{n_k}{n} . \quad (12)$$

Практика показує, що описана процедура розрахунку індексу Шеннона на основі аерокосмічних знімків дозволяє підвищити точність кінцевого результату на 5–15% [10]. Изложенный подход является особенно удобным при использовании аерокосмічних знімків невисокого просторового розрешення.

Литература

1. Географія і моніторинг біорізноманітності. - М.: Издательство Научного и учебно-методического центра, 2002. - 432 с.
2. *Протасов А.А.* Біорізноманітність і його оцінка: Концептуальна диверсикологія. - Київ: Інститут гідробіології НАН України, 2002. - 107 с.
3. *Liang S.* Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. - Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. - 560 p.
4. *Turner W.* Remote sensing for biodiversity and conservation // Trends in Ecology and Evolution, 2003. - Vol.18.- No.6.- P.306-314.
5. *Сахацький О.І., Ходоровський А.Я., Левчик О.І., Станкевич С.А., Козлова А.О.* Оцінка видового різноманіття рослинного світу зон відчуження з використанням багатозональних космічних знімків // Зб. матеріалів науково-практичної конференції "Актуальні проблеми військової екології". - Київ: ННДЦ ОТ і ВБ України, 2005, - с. 65-75.
6. *Landgrebe D.A.* Signal Theory Methods in Multispectral Remote Sensing. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. – 508 p.
7. *Фукунага К.* Ведение в статистическую теорию распознавания образов. - М.: Наука, 1979. - 368 с.
8. *Rees W.G.* Physical Principles of Remote Sensing. - Cambridge: University Press. – 2001. – 306 p.
9. *Попов М.О., Станкевич С.А., Козлова А.О.* Удосконалена процедура класифікування багатоспектральних аерокосмічних зображень при оцінюванні біорізноманіття Північно-Причорноморського регіону України. // Зб. наук. праць "Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу", 2006, вип. 14. – Севастополь: МГІ НАН України, с. 406-410.
10. *Станкевич С.А., Козлова А.О.* Особливості розрахунку індексу видового різноманіття Шеннона за результатами статистичної класифікації аерокосмічних знімків // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского, 2006, т. 19, - с. 144-150.
11. *Попов М.А., Лялько В.И., Подорван В.Н., Сахацкий А.И.* Методика классификации природных объектов на многоспектральных космических изображениях на основе последовательного слияния информации // Материалы Второй открытой Всероссийской научной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". - М.: ИКИ РАН, 2004. - С. 46-47.