

УДК 528.852.5

С. А. Станкевич, О. В. Шолоник

Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины, Киев

Адаптивное многомерное вероятностное преобразование многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков

Представлено 25.06.07

Предложено адаптивное многомерное вероятностное преобразование (АМВП) многоспектральных и гиперспектральных цифровых аэрокосмических снимков, реализующее оптимизацию состава спектральных каналов для каждого анализируемого пиксела цифрового изображения. Использование АМВП позволяет более качественно определять эквивалентные функции передачи модуляции многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков, и следовательно, обеспечивать более высокое эквивалентное пространственное разрешение многоспектральной и гиперспектральной аэрокосмической съемки.

Подавляющее большинство современных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) оснащаются многоспектральными сенсорами на основе многоэлементных дискретных фотоприемников [10]. Широкое применение многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков приводят к настоятельной необходимости разработки автоматизированной технологии количественной оценки их информативности [1]. Очень грубое представление о возможностях системы ДЗЗ дает величина геометрической проекции пиксела цифрового аэрокосмического снимка на поверхность Земли, которую почему-то называют пространственным разрешением. На самом деле пространственное разрешение — это минимальное расстояние между компактными элементами объектов ДЗЗ, еще позволяющее различать их на снимке [2]. Очевидно, что пространственное разрешение зависит не только от величины геометрической проекции пиксела, но и от ряда других факторов, например от радиометрических характеристик объектов и шумов тракта передачи оптического сигнала от объектов к изображению [11].

Проблема количественной оценки пространственного разрешения многоспектральных аэрокосмических снимков усугубляется различиями радиометрических характеристик объектов и шумов в разных спектральных каналах. Например, в некоторых из них объект может вообще не обнаруживаться, то есть пространственное разрешение стремится к бесконечности, а совместное использование не-

скольких спектральных каналов может обеспечить лучшее обнаружение, чем любой из них по отдельности — синергетический эффект многоспектральности [3].

Однако указанные трудности сравнительно легко преодолеваются при исследовании характеристик достижимости конечного результата — выявления объектов по многоспектральным аэрокосмическим снимкам. Одинаковость характеристик выявления одних и тех же объектов на разных многоспектральных снимках должна свидетельствовать об одинаковости обеспечиваемого пространственного разрешения — принцип *эквивалентности*. Поскольку процессы выявления объектов на изображениях принципиально стохастические, то определение эквивалентного пространственного разрешения должно базироваться на статистических моделях [4].

Классическим методом оценки разрешения одномерных изображений, в том числе и дискретных, является пространственно-частотный анализ, основанный на функциях передачи модуляции (ФПМ) звеньев тракта передачи оптического сигнала. Суммарная ФПМ полностью описывает передаточные свойства иконических систем, имеет объективный характер измерения и базируется на хорошо разработанном математическом аппарате. Кроме того, ФПМ используются при синтезе иконических систем.

Функция передачи модуляции определяется как действительный модуль комплексной оптической передаточной функции системы — отношения ком-

плексного пространственно-частотного спектра сигнала на выходе системы к комплексному пространственно-частотному спектру сигнала на ее входе. Физически ФПМ представляет собой коэффициент изменения амплитуды пространственной синусоиды на различных пространственных частотах при передаче ее иконической системой.

Функция передачи модуляции растровой системы ДЗЗ может быть экспериментально определена по цифровому аэрокосмическому снимку этой системы как модуль комплексного дискретного преобразования Фурье (ДПФ) от дискретной производной нормированной переходной характеристики (пограничной кривой) — изображения на снимке идеального скачка радиометрических характеристик оптического сигнала [5]. Для панхроматического цифрового снимка — это скачок интенсивности, для многоспектрального — скачок интенсивности всех спектральных каналов. Многомерная пограничная кривая может быть измерена по многоспектральному цифровому аэрокосмическому снимку автоматически — снятием отсчетов цифрового изображения вдоль нормали к разделу однородных полей яркости, соответствующих резкой границе раздела контрастных объектов на снимке [6].

Для выделения значащих границ раздела радиометрических полей на цифровых аэрокосмических снимках используется вероятностное преобразование, вычисляющее для каждого пиксела цифрового изображения вероятность P правильного разделения статистически различающихся радиометрических полей [9]:

$$P(x, \theta) = 1 - \exp[-B(x, \theta)], \quad (1)$$

где x — пространственная координата вдоль выбранного направления θ на снимке, B — статистическое расстояние Бхаттачария между вероятностными распределениями сигналов в радиометрических полях. Вероятностное преобразование легко обобщается для многоспектральных аэрокосмических снимков путем оценивания вероятности по многомерным статистическим распределениям радиометрических характеристик.

Если многоспектральный аэрокосмический снимок имеет всего несколько спектральных каналов, то все они, как правило, являются достаточно информативными и необходимыми при выявлении большинства объектов ДЗЗ. Гиперспектральные же (десятки-сотни спектральных каналов) аэрокосмические снимки для большинства объектов являются информационно-избыточными и имеют единицы (редко — десятки) оптимальных каналов, в которых обеспечивается максимальная вероятность обнаружения объектов, а добавление неинформативных каналов приводит к ее снижению. Информативность комбинации спектральных каналов много-

спектрального аэрокосмического снимка определяется статистическими характеристиками совместного распределения плотностей вероятности разделяемых объектов. Оптимизация состава спектральных каналов — необходимый этап решения тематических задач ДЗЗ с использованием гиперспектральных аэрокосмических снимков [7].

Нахождение оптимальной комбинации спектральных каналов само по себе представляет достаточно простую задачу, однако практическая сложность заключается в том, что оптимальный состав спектральных каналов гиперспектрального аэрокосмического снимка различен для разных пар объектов (фон). Обычно стараются обеспечить оптимальность состава спектральных каналов по некоторому общему критерию (средняя вероятность, суммарная информативность и т. д.), однако при этом не гарантируется максимум вероятности выявления всех объектов. Вместе с тем, для пары объектов, не граничащих между собой в пределах многоспектрального аэрокосмического снимка, выполнять оптимизацию не требуется. Поэтому, вообще говоря, оптимизация должна быть контекстуально зависимой от состава и взаиморасположения объектовых сегментов сцены ДЗЗ на снимке:

$$\Lambda^*(x, \theta) = \operatorname{argmax} P(x, \theta, \Lambda), \quad (2)$$

где Λ — логический вектор-селектор спектральных каналов размерности, равной их количеству в исходном многоспектральном изображении [8].

Концепция вероятностного преобразования (1) как раз и заключается в поэлементном анализе многоспектрального аэрокосмического снимка с учетом статистических характеристик некоторой окрестности текущего пиксела. И ничто не мешает выполнять оптимизацию состава спектральных каналов всякий раз при вычислении вероятности правильного разделения радиометрических полей.

Предлагается *адаптивное* многомерное вероятностное преобразование (АМВП) многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков, вычисляющее для каждого элемента цифрового изображения вероятность правильного разделения статистически различающихся радиометрических полей по оптимальной комбинации спектральных каналов (2). Адаптивное многомерное вероятностное преобразование, как и неадаптивное, может быть использовано при нахождении эквивалентных переходных характеристик на многоспектральных цифровых аэрокосмических снимках, однако возможности обнаружения объектов и разделения многомерных радиометрических полей при этом используются наиболее полно. Дальнейшее пространственное дифференцирование и применение ДПФ позволит перейти от эквивалентной вероятностной переходной характеристики к эквивалентной ФПМ много-



Рис. 1. Космический снимок гиперспектрального сенсора Hyperion спутника EO1 (центральная часть Киева, 1 сентября 2002 года)

а

б

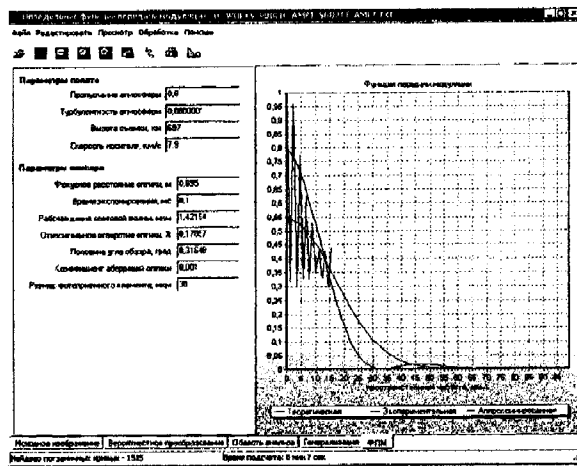
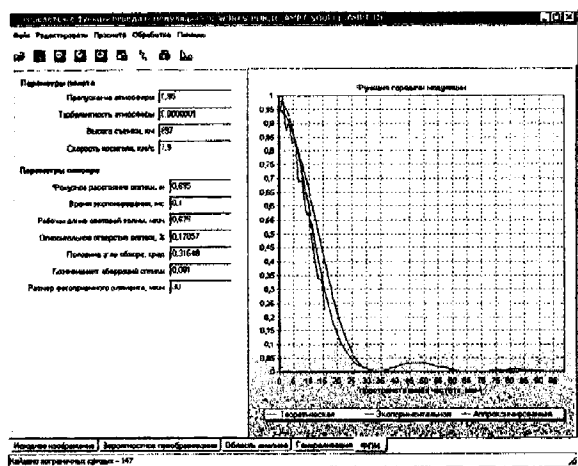


Рис. 2. Эквивалентные функции передачи модуляции гиперспектрального цифрового аэрокосмического снимка: а — для фиксированной комбинации спектральных каналов, б — для адаптивно-оптимальной комбинации спектральных каналов

спектрального цифрового аэрокосмического снимка и таким образом свести проблему определения его эквивалентного пространственного разрешения к классической задаче пространственно-частотного анализа.

Практический пример определения эквивалентной ФПМ гиперспектрального цифрового аэрокосмического снимка центра Киева (рис. 1, сенсор Nuregion спутника EO1, 1 сентября 2002 г.) для среднеоптимальной (рис. 2, а) и адаптивно-оптимальных комбинаций (рис. 2, б) спектральных каналов показал, что использование АМВП позволяет получить более качественную эквивалентную ФПМ и обеспечить более высокое эквивалентное пространственное разрешение многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков. Улучшение эквивалентного пространственного разрешения для названного снимка составило 15—30 %.

Таким образом, предложенное адаптивное многомерное вероятностное преобразование многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков может быть использовано для повышения качества цифровой обработки и последующей интерпретации материалов многоспектральной аэрокосмической съемки при решении различных тематических задач ДЗЗ.

1. Волошин В. И., Корчинский В. М., Негода А. А. Повышение информативности панхромных цифровых изображений дистанционного зондирования Земли // *Космична наука і технологія*.—2004.—10, № 5/6.—С. 178—181.
2. ДСТУ 4220—2003. Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення. — Київ: Держспоживстандарт України, 2003.—18 с.
3. Лялько В. И., Попов М. И., Подорван В. Н., Сахацкий А. И. Методика классификации площадных объектов на многоспектральных космических изображениях на основе последовательного слияния информации // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сб. науч. ст.* — М.: ИКИ РАН, 2005.—Т. 1.—С. 88—94.

4. Станкевич С. А. Статистичний підхід до визначення порогової модуляції цифрових аэрокосмічних зображень // *Космічна наука і технологія*.—2005.—11, № 3/4.—С. 81—84.
5. Станкевич С. А. Статичні аспекти визначення функції передавання модуляції аэрокосмічних іконічних систем з дискретними фотоприймачами // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: Зб. наук. пр.* — Львів: Львівська Політехніка, 2005.—Вип. II.—С. 142—147.
6. Станкевич С. А. Імовірно—частотна оцінка еквівалентної просторової розрізненості багатоспектральних аэрокосмічних знімків // *Космічна наука і технологія*.—2006.—12, № 2/3.—С. 79—82.
7. Станкевич С. А. Кількісне оцінювання інформативності гіперспектральних аэрокосмічних знімків при вирішенні тематичних задач дистанційного зондування Землі // *Доповіді НАН України*.—2006.—№ 10.—С. 136—139.
8. Станкевич С. А. Оптимізація складу спектральних каналів гіперспектральних аэрокосмічних зображень при розв'язанні тематичних задач дистанційного зондування Землі // *Космічна наука і технологія*.—2007.—13, № 2.—С. 25—28.
9. Станкевич С. А., Шкляр С. В. Удосконалений алгоритм визначення перехідної функції на цифровому аэрокосмічному зображенні // *Ученые записки Таврического национального ун-та им. В. И. Вернадского*.—2005.—18 (57), № 2.—С. 97—102.
10. Aspinall R. J., Marcus W. A., Boardman J. W. Considerations in collecting, processing, and analyzing high spatial resolution hyperspectral data for environmental investigations // *J. Geograph. Syst.*—2002.—N 4.—P. 15—29.
11. Nelson T., Wulder M., Niemann K. O. Spatial resolution implications of digitizing aerial photography for environmental applications // *Imaging Sci. J.*—2002.—49.—P. 223—232.

ADAPTIVE MULTIDIMENSIONAL PROBABILISTIC TRANSFORMATION FOR MULTISPECTRAL DIGITAL AEROSPACE IMAGES

S. A. Stankevich, O. V. Sholonik

Adaptive multidimensional probabilistic transformation (AMPT) for multispectral and hyperspectral digital aerospace images is offered. This transformation realizes realized spectral bands optimal selection for every analyzing pixel of digital image. AMPT allows one to evaluate equivalent modulation transfer functions of multispectral digital aerospace images with higher accuracy and, hence, to provide higher equivalent spatial resolution of multispectral and hyperspectral aerospace imagery.