



УДК 621.391.272:621.397

Н. В. Лысенко, Н. В. Игнатьева
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Спектрозональная обработка изображений в задачах экологического мониторинга

Разработаны методы описания фрагментов видеоизображений участков земной и водной поверхностей, полученных видеосъемкой с подвижного носителя. Изучены спектрозональные методы, реализующие многопрофильную обработку видеoinформации в оптическом диапазоне спектра на базе телевизионно-вычислительной системы дистанционного мониторинга, направленные на получение количественной информации о местонахождении и размерах аномальных участков поверхности воды и суши.

Обработка спектрозональной информации, признаковое пространство, оптический мониторинг, сегментация по цветности

Оптические методы мониторинга, обнаружения и классификации аномальных объектов, таких как лесные пожары и их последствия, участки засохшего леса, разливы нефти на воде, основаны на использовании закономерностей взаимодействия светового или другого электромагнитного излучения с отдельными участками контролируемого поля изображения. Электромагнитное излучение в этом случае выступает в качестве носителя информации о контролируемых объектах. Модуляция лучистого потока происходит как по энергии, так и по ее спектральному распределению и осуществляется в результате взаимодействия излучения с исследуемым веществом вследствие поглощения, отражения, рассеяния и других физических явлений. Именно эта информация и используется для решения задач мониторинга в оптических системах регистрации [1]. К числу наиболее часто используемых следует отнести метод, базирующийся на отражении электромагнитного излучения от исследуемой сцены. Объем информации, подлежащей анализу, настолько велик, что визуальные методы изучения регистрируемой картины могут удовлетворить лишь самые минимальные потребности практических задач сбора и обработки информации, особенно в реальных условиях.

Эффективное обнаружение аномальных объектов в поле изображения может быть осуществ-

лено путем регистрации изображений с использованием спектральных свойств излучения (отражения, поглощения) отдельных элементов в процессе съемки с подвижных носителей (вертолет, самолет). В таких случаях используют многозональную регистрацию пространственно-совмещенных изображений [2]. Многозональные фотографические и телевизионные системы давно применяют в биологии, астрофизике и других областях; в настоящее время их широко используют при анализе аэрокосмических снимков в интересах разведки, метеорологии и других целях [2].

Примерами многозональных сканирующих систем являются комплексы съемки поверхности Земли с аппаратов аэро- или космического базирования [3]. Принципы построения таких систем следующие. Изображение проецируется в плоскость детектора, состоящего из ряда однострочных преобразователей на базе ПЗС с числом спектральных зон регистрации Λ (обычно 4...6). Спектральные характеристики таких преобразователей вместе со светофильтрами охватывают видимый и инфракрасный диапазоны спектра. Кадровая развертка изображения осуществляется за счет непрерывного движения носителя.

Процедуры анализа определяются целевым назначением систем и, как правило, включают: выбор спектрального диапазона регистрации $\lambda_{\min} \dots \lambda_{\max}$, числа зон Λ , спектральных харак-

теристик чувствительности преобразователей (включая зональные фильтры) $\varepsilon_i(\lambda)$, метризацию рабочего пространства анализатора, построение решающих правил.

Формирование рабочих пространств основано на том, что для каждой функции $W(\lambda)$, отражающей спектральный состав излучения, с помощью фиксированной непрерывной финитной функции $\varepsilon_i(\lambda)$ можно найти число m_i , принадлежащее некоторому множеству M [4], [5]:

$$m_i(W, \varepsilon_i) = \int_0^{\infty} W(\lambda) \varepsilon_i(\lambda) d\lambda.$$

Так как $W(\lambda)$ – фиксированная и интегрируемая на конечном интервале функция, то в силу финитности $\varepsilon_i(\lambda)$ этот интеграл может быть взят по некоторому конечному интервалу. Если $i = 1, 2$, то функции $W(\lambda)$ можно сопоставить двумерное число $\mathbf{m} \{m_1, m_2\}$, если $i = 1 \dots 3$ – то трехмерное число $\mathbf{m} \{m_1, m_2, m_3\}$ и т. д.

Выбор конечного набора функций $\varepsilon_i(\lambda)$ приводит к классификации спектров излучений в Λ -мерном пространстве $M^\Lambda \{m_1, m_2, \dots, m_\Lambda\}$ или после нормировки по входной энергии в пространстве $M^{\Lambda-1}$ с координатами

$$\bar{m}_i = \frac{\int_0^{\infty} W(\lambda) \varepsilon_i(\lambda) d\lambda}{\sum_{i=1}^{\Lambda} \int_0^{\infty} W(\lambda) \varepsilon_i(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

$$\text{где } \sum_{i=1}^{\Lambda} \int_0^{\infty} W(\lambda) \varepsilon_i(\lambda) d\lambda = m_1 + m_2 + \dots + m_\Lambda.$$

Анализ спектрально-зональных изображений может быть осуществлен методами, аналогичными используемым в колориметрии. В этом случае рабочим пространством может служить система трехзонального преобразователя изображения $M(m_1, m_2)$ – цветового пространства, где $m_1 = s_1 / (s_1 + s_2 + s_3)$; $m_2 = s_2 / (s_1 + s_2 + s_3)$, причем s_1, s_2, s_3 – сигналы изображения соответствующих преобразователей.

Если аппарат теории функционального анализа, базируясь на феноменологической модели цветового зрения, применить для количественного описания цветности, то функции $\varepsilon_i(\lambda)$,

$i = 1 \dots 3$, должны соответствовать кривым спектральной чувствительности глаза. Именно это позволяет построить цветное пространство, а после нормировки найти отображение на плоскости, адекватное ощущениям цветности.

Спектральные характеристики могут быть представлены и в другом рабочем пространстве, координаты которого определяются (1). В частности, Λ может иметь размерность, принятую в колориметрии $\Lambda = 3$, но при этом не накладывается особых ограничений на вид функций $\varepsilon_i(\lambda)$ и на их положение по спектру (например, они могут охватывать инфракрасную, ультрафиолетовую или другую область). Выбор Λ и функций $\varepsilon_i(\lambda)$ определяется задачами исследований или регистрации. При реализации подобного автоматического многозонального регистратора $\varepsilon_i(\lambda)$ являются спектральными характеристиками преобразователя изображения.

Рассмотрим процедуру обработки спектрально-зонального изображения на примере наиболее распространенной системы с $\Lambda = 3$. Использование описанного ранее рабочего пространства признаков позволяет сегментировать изображение по выбранным параметрам. Сегментация цветных изображений базируется на методе цветовой фильтрации [2] с помощью фильтров цветности, осуществляющих разделение пространства цветности на два подпространства: $H \subset M$ и $\bar{H} = M \setminus H$.

Введем двоичную переменную:

$$Y(m) = \begin{cases} 1, & m \in H; \\ 0, & m \notin H, \end{cases}$$

которой во временной области будет соответствовать двоичный сигнал.

Реализация и использование фильтров цветности в канале многозональной системы позволяют выделить элементы изображения, цветность которых соответствует области, заданной окном H . При этом формируется бинарный транспарант, отражающий пространственную структуру анализируемого изображения с учетом заданных цветовых характеристик. Основными характеристиками фильтра в цветовом пространстве наряду с цветовыми координатами его характерной точки m_{10}, m_{20} являются форма границы и размеры окна. Границы H определяются конкретной задачей анализа с учетом статистики распределения цветности в исследуемых изображениях.

К наиболее простым техническим решениям приводят методы классификации, использующие

линейные решающие правила. К их числу относится формирование прямоугольного окна на плоскости цветовой диаграммы рабочего пространства. Двухзначный предикат $Y(m)$ для прямоугольного окна цветности имеет вид

$$Y(m) = \bigcap_{i=1}^4 Y_i(m) = \left[(a_{11}m_1 + a_{12}m_2 + a_{13} > 0) \wedge \right. \\ \left. \wedge (a_{21}m_1 + a_{22}m_2 + a_{23} > 0) \wedge \right. \\ \left. \wedge (a_{31}m_1 + a_{32}m_2 + a_{33} > 0) \wedge \right. \\ \left. \wedge (a_{41}m_1 + a_{42}m_2 + a_{43} > 0) \right] = 1,$$

где $Y_i(m)$ – решающие двухзначные предикаты, соответствующие четырем прямым, ограничивающим окном; $[\cdot]$ – отображение, которое ставит в соответствие истинным значениям предиката $Y(m)=1$, а ложным – $Y(m)=0$; a_{11} , a_{12} , a_{13} , a_{21} , ... – коэффициенты, определяющие положение прямых, которые могут быть определены через координаты вершин окна m_a , m_b , m_c , m_d .

Дискретное сканирование рабочего пространства с помощью фильтра цветности с прямоугольным окном позволяет оценить статистические свойства изображений, в частности их цветовое содержание, построением двумерной гистограммы цветности или ее отображения на цветовой диаграмме, называемого цветовым охватом. Цветовой охват представляет информативную область, в пределах которой локализованы возможные для данного класса изображений значения цветности. Его можно использовать в качестве признака при распознавании аномальных областей в процессе экологического мониторинга.

Изучение цветовых (трехзональных) характеристик с целью обнаружения областей с нарушениями экологического баланса природной среды, наблюдаемой через толщу атмосферы (аэрокосмическая съемка), и в других целях указывает на существенное влияние на спектральные характеристики (в частности, цвет) объектов оптических свойств среды, расположенной между исследуемыми объектами и телевизионной системой, изменение условий освещения (непостоянство во времени спектрального состава и нестабильность светового потока источника освещения) и др. [6]. Нестабильность сигналов на выходе преобразователей изображений является следствием временной нестабильности и шумов цветоделенных каналов и других побочных факторов. В процессе автоматической классификации с использованием

цвета или спектральных компонентов в качестве признаков вследствие указанных причин появляются ошибки в классификации [7].

Связь между свойствами рабочего пространства анализатора и физическими характеристиками изучаемых сцен определяется характеристиками для каждой конкретной системы. Уменьшение ошибок в процессе анализа достигается расширением набора признаков, разработкой аппаратно-программного обеспечения поисковых систем обнаружения проявления аномальных явлений, а также оптимизацией спектральных характеристик каналов преобразователя $\varepsilon_i(\lambda)$ [8].

Среди признаков, обеспечивающих многопараметрическую обработку изображений, особо важное место занимают яркостные, цветовые, геометрические и текстурные. Целесообразность использования текстурных признаков в задачах экологического мониторинга не вызывает сомнения, поскольку изображения, зарегистрированные техническими средствами дистанционного типа, как правило, относятся к классу текстурных [9]. Эффективность применения текстурной сегментации подтверждена экспериментальными исследованиями [10]. Использование цветовой фильтрации изображений позволяет свести процедуру анализа спектрально-цветных изображений к известным алгоритмам исследования геометрических характеристик: распределений фрагментов изображений:

- по размерам, площадям, периметрам и другим топологическим характеристикам;
- порядку узловых точек;
- связности;
- скоростям и направлениям движения.

Использование многопрофильной обработки информации за счет создания расширенной базы признаков описания анализируемой поверхности обеспечивает получение системно организованной и достоверной информации о состоянии природной среды в условиях экологических катастроф [11]. Развитие современных информационных технологий анализа и обработки изображений позволяет реализовать сопряженный (наземно-аэрокосмический) экологический мониторинг природной среды.

Методы классификации цветных изображений аномалий включают процедуры вычисления информативных признаков, обучение, классификацию и постобработку. В качестве первичных признаков выбираются координаты цветности изображений. В процессе обучения формируются статистические модели классов изображения, основанные либо на распределениях плотности вероятности классов,

либо на наборах их статистических параметров. Наборы параметров, которые называют вторичными признаками, содержат сведения о векторе средних значений и ковариационной матрице класса.

Обучение включает следующие процедуры:

- выбор статистически однородных фрагментов цветных изображений;
- определение фрагментов, входящих в обучающую последовательность;
- получение оценок вероятности ошибок для заданного классификатора по обучающей выборке данных;
- изучение возможностей использования цветных параметров, полученных при обучении, на иные изображения, разделенные во времени и(или) в пространстве.

Вычисленные на этапе обучения характеристики используются для нахождения решающих функций, с помощью которых определяется принадлежность наблюдаемого изображения к тому или иному классу. Тем самым на цветовой диаграмме формируется область, форма которой наилучшим образом согласована с цветовым охватом наблюдаемого класса изображения.

При определении цветового охвата на стадии обучения создается двумерная гистограмма цветности, для чего подсчитывается количество элементов изображения, цветность которых совпадает с параметрами окон цветности. Размеры этого окна и его местоположение можно изменять в пределах всего цветового пространства. Далее применяется один из алгоритмов сегментации. Сегментация разделяет изображение или объекты сцены на смысловые части, статистически однородные по отношению к информативным признакам – координатам цветности. Обычно сегментация основывается на двух подходах: пороговой обработке и кластеризации. Хорошие результаты могут быть получены при кластеризации двумерной гистограммы цветности. В результате такой процедуры в собственную область класса включается проекция гистограммы на цветовой график, причем используются только те значения гистограммы, которые превышают некоторый порог. Значение порога выбирается эмпирически и обычно составляет 1–10 % от максимального значения гистограммы. Такое пороговое ограничение позволяет отсеять случайные и малоинформативные отсчеты, попадающие в обучающую выборку.

После принятия решения о наличии искомого класса в изображении выполняется постобработка последнего, включающая две процедуры.

Первоначально элементы, определенные как принадлежащие анализируемому классу изображений, подсвечиваются на экране монитора определенным (например, голубым) цветом (на приведенных в настоящей статье монохромных иллюстрациях – серым тоном), что позволяет визуально наблюдать всю обнаруженную область в исследуемом изображении. Затем вычисляются площади исследуемого изображения и области, принадлежащей анализируемому классу. Определяется доля наблюдаемого изображения, отнесенная к обнаруженной области (результат выводится на экран монитора в процентах).

При последующей детализации для выделенного методом цветовой фильтрации изображения возможно выделение различающихся по текстуре участков (например, характеризующих степень зараженности лесных массивов, старый и молодой лес и т. д.). Для этого целесообразно применять методы, основанные на анализе пространственной взаимосвязи элементов изображений [10].

Описанная процедура цветовой фильтрации позволяет обнаруживать и выделять изображения полей, лесов, водные районы, отличать зараженные леса, лесные пожары и загрязненные участки воды.

Описанные методы иллюстрируются далее результатами обработки изображений лесных массивов и загрязненных водных поверхностей с помощью программы, написанной на языке программирования C++ и предназначенной для работы в среде MS WINDOWS.

Фотоизображения лесных массивов (рис. 1) условно можно разделить на две группы: старые горелые леса (2–3-годовой давности) (рис. 1, *a*) и лес, засохший в результате действия низового лесного пожара, кислотных дождей, или жизнедеятельности насекомых-вредителей (рис. 1, *в*). Результат сегментации по цветности изображения рис. 1, *a* представлен на рис. 1, *б*, аналогичный результат для рис. 1, *в* – на рис. 1, *г*.

При обработке изображений лесных пожаров и их последствий установлено, что обнаружение и сегментация участков поврежденных изображений лесных массивов дали хорошие результаты. Хотя на участках, пораженных пожаром 2–3 года тому назад, появились молодые зеленые растения, в целом такие участки хорошо поддаются сегментации по цветности. Значимые результаты получены при сегментации участков леса, засохшего, по-видимому, после прохождения низового пожара или кислотного дождя. Эти участки желто-коричневого цвета были выделены на фоне зеленого неповрежденного леса.

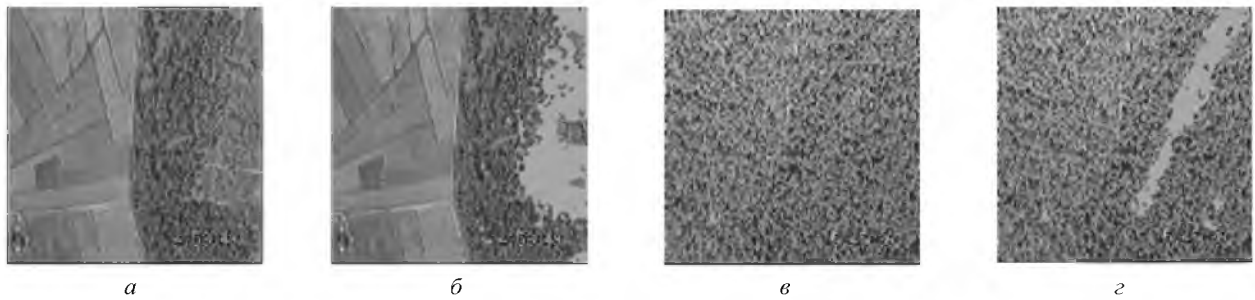


Рис. 1

Исследования разработанных методов проводились на отснятом с помощью телевизионной поисковой системы видеоматериале. В частности, в результате обработки отснятого видеоматериала на телевизионно-вычислительном комплексе методом цветовой фильтрации изображений надежно обнаружены нефтяные загрязнения (рис. 2, 3).

На рис. 2 приведено исходное изображение порта с нефтяными загрязнениями (а), его проекция на карту (б) и признаковое пространство в виде цветовой диаграммы (в). На изображении видно пятно в виде потока, тянущегося от берега в сторону открытой воды (рис. 2, а, 1). Рис. 3 отображает результаты сегментации: изображения выделенных нефтяных загрязнений (рис. 3, а, 1 и соседние области) и отображение результатов сегментации на цветовой диаграмме (рис. 3, в). Из сравнения рис. 2 и 3 следует, что обнаружены и выделены изображения нефтяных пятен, а также измерена доля загрязненной акватории (выведена под обработанным изображением, рис. 3, а). Изображения спроектированы на электронную карту местности (рис. 2, б и 3, б).

Для систематизации полученных результатов и их хранения создана база экологических данных, состоящая из изображений аномалий и их параметров. База разработана с помощью языка

программирования Delphi и предназначена для работы в среде MS WINDOWS. Для каждого занесенного в базу объекта в ней хранится следующая информация:

- название вида аномалии;
- координаты широты и долготы (градусы, минуты, секунды);
- дата и время видеосъемки;
- вид изображения (оригинальное, обработанное);
- доля выделенного изображения аномалии (в процентах от всего изображения);
- изображение аномальной зоны.

В основу алгоритмической обработки спектральной информации положены методы представления спектральных характеристик исследуемых изображений в трехмерном признаковом пространстве и сегментации элементов изображений по цветовым признакам. В целом программное обеспечение служит для обнаружения, сегментации, измерения площадей и картографирования цветных изображений аномальных областей (нефтяные и другие виды загрязнения на воде, пожары и их последствия на суше и т. д.) для решения задач экологического мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций.

Разработанные методы описания фрагментов видеоизображений участков земной и водной по-



Рис. 2



Рис. 3

верхностей и спектрзональные методы, реализующие многопрофильную обработку видеoinформации в оптическом диапазоне спектра на ба-

зе системы дистанционного мониторинга, подтвердили их эффективность при решении задач экологического мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков Р. Е., Игнатъева Н. В. Спектральные свойства изображений как информативный признак в задачах экологического мониторинга // Материалы Междунар. конф. "Критерии экологической безопасности". Санкт-Петербург, окт. 1994 г. С. 163.
2. Природные катастрофы и окружающая среда / В. Г. Бондур, В. Ф. Крапивин, И. И. Потапов, В. Ю. Солдатов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2012. № 1. С. 3–160.
3. Бондур В. Г., Крапивин В. Ф., Потапов И. И. Развитие технологии диагностики лесных экосистем // Экологическая экспертиза. 2012. № 3. С. 3–16.
4. Игнатъева Н. В., Титов Ю. М., Федченков К. А. Цветовая фильтрация в цветковых телевизионных системах // Изв. вузов. Приборостроение. 1980. Т. 23, № 9. С. 72–76.
5. Быков Р. Е., Игнатъева Н. В., Титов Ю. М. Телевизионные методы цветовой фильтрации в аэрокосмических исследованиях Земли // Исследование Земли из космоса. 1981. Т. 2. С. 76–81.
6. Беляев А. Ю., Быков Р. Е., Игнатъева Н. В. Инвариантные к источнику освещения алгоритмы анализа цветных изображений // Материалы Междунар. конф. "Телевидение: передача и обработка изобра-

- жений", Санкт-Петербург, 25, 26 июня 2000 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2000. С. 90–92.
7. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: БИНОМ, 2009. 763 с.
8. Быков Р. Е., Игнатъева Н. В., Сладков А. Ю. Технические средства контроля водных поверхностей // Человек и море / СПбГЭТУ (ЛЭТИ). СПб., 1994. С. 74–79. (Изв. ГЭТУ. Спец. вып.).
9. Медведева Е. В. Сегментация изображений в мониторинговых системах // XVI МНТК "Радиолокация, навигация, связь", Воронеж, 13–15 апр. 2010 г.: сб. докл. / ООО НПФ "САКВОЕЕ". Воронеж, 2010. Т. 1. С. 231–238.
10. Игнатъева Н. В., Коржик Ю. В. Метод оперативной сегментации цветных текстурных изображений // Матер. Междунар. симпозиума "Методы и средства мониторинга состояния окружающей среды", Санкт-Петербург, 25–28 апр. 1995 г. / СПбГЭТУ (ЛЭТИ). СПб., 1995. С. 21–23.
11. Быков Р. Е., Игнатъева Н. В., Сладков А. Ю. Обработка видеoinформации в задачах экологического мониторинга // Обработка сигналов в радиотехнических и телевизионных устройствах и системах. 1994. С. 58–61. (Изв. ГЭТУ. Вып. 473).

N. V. Lysenko, N. V. Ignatieva
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Multispectral image processing in problems of ecological monitoring

The methods developed for the description of fragments of video images of the earth's and water surfaces obtained by means of video recording with a moving carrier. Studied multispectral methods that implement multi-processing of video information in the optical spectrum on the basis of a television system remote monitoring aimed at obtaining quantitative information on the location and size of the anomalous areas of surface water and land.

Multispectral Information Processing, Feature Space, Optical Monitoring, Segmentation by Color

Статья поступила в редакцию 24 октября 2016 г.