

УДК 535.33/34

АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАСКИРОВОЧНОГО ПОКРЫТИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРА

А.Ю. Кузнецов^а, С.С. Сергеев^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: fellics@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 27.03.15, принята к печати 03.02.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-258-264

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Кузнецов А.Ю., Сергеев С.С. Анализ спектральных характеристик маскировочного покрытия с применением видеоспектрометра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 2. С. 258–264. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-258-264

Аннотация

Предмет исследования. Исследованы проблемы обнаружения и распознавания объектов на гиперспектральных снимках. Продемонстрирована возможность определения типа объекта на основе статистических методов. Рассмотрена возможность использования спектрального образа объекта для идентификации типа его данных. **Метод исследования.** Исследование выполнено с применением видеоспектральной аппаратуры для обнаружения объектов на подстилающей поверхности «Фрегат». Последующая обработка гиперспектральной информации произведена с использованием математической модели системы распознавания образов. Для оценки качества распознавания объектов применены вегетационные индексы TCHVI (Three-Channel Vegetation Index) и NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). В качестве инструмента определения различия объектов предложено использовать критерий Неймана–Пирсона. **Основные результаты.** Проведен анализ спектральных характеристик маскировочного покрытия летнего типа (Германия). Выполнен расчет плотности распределения вегетационных индексов. Получены статистические характеристики, необходимые для построения математической модели системы распознавания образов. Показана применимость вегетационных индексов при обнаружении летнего маскировочного покрытия на фоне зеленой растительности. Представлена математическая модель распознавания объектов на базе критерия Неймана–Пирсона. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть полезны специалистам в области обработки гиперспектральной информации при проведении мониторинга состояния земной поверхности.

Ключевые слова

видеоспектрометр, гиперспектральное изображение, вегетационный индекс, дистанционное зондирование, маскировочное покрытие

ANALYSIS OF CAMOUFLAGE COVER SPECTRAL CHARACTERISTICS BY IMAGING SPECTROMETER

A.Yu. Kouznetsov^а, S.S. Sergeev^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: fellics@yandex.ru

Article info

Received 27.03.15, accepted 03.02.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-258-264

Article in Russian

For citation: Kouznetsov A.Yu., Sergeev S.S. Analysis of camouflage cover spectral characteristics by imaging spectrometer. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 258–264. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-258-264

Abstract

Subject of Research. The paper deals with the problems of detection and identification of objects in hyperspectral imagery. The possibility of object type determination by statistical methods is demonstrated. The possibility of spectral image application for its data type identification is considered. **Method.** Researching was done by means of videospectral equipment for objects detection at "Fregat" substrate. The postprocessing of hyperspectral information was done with the use of math model of pattern recognition system. The vegetation indexes TCHVI (Three-Channel Vegetation Index) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) were applied for quality control of object recognition. Neumann-Pearson criterion was offered as a tool for determination of objects differences. **Main Results.** We have carried out analysis of the spectral characteristics of summer-type camouflage cover (Germany). We have calculated the density distribution of vegetation

indexes. We have obtained statistical characteristics needed for creation of mathematical model for pattern recognition system. We have shown the applicability of vegetation indices for detection of summer camouflage cover on a verdure background. We have presented mathematical model of object recognition based on Neumann-Pearson criterion. **Practical Relevance.** The results may be useful for specialists in the field of hyperspectral data processing for surface state monitoring.

Keywords

imaging spectrometer, hyperspectral image, vegetation index, remote sensing, camouflage coating

Введение

Дистанционное зондирование представляет собой процесс измерения характеристик интересующих пользователя объектов с помощью чувствительных датчиков, не находящихся в непосредственном контакте с предметом исследования. Подобные датчики устанавливаются, как правило, на борту авиационных и космических носителей. Как показывает международный опыт последних десятилетий, наибольшей эффективностью при дистанционном зондировании обладают бортовые видеоспектрометры (imaging spectrometers) [1, 2], основанные на поэлементной регистрации спектров и структуры рассматриваемых удаленных объектов. Они открывают широкие возможности зондирования Земли и околоземного пространства, преодолевая самые изощренные естественные и искусственные способы маскировки исследуемых объектов [3–5]. Основным достоинством видеоспектрального метода является то, что часто он позволяет наблюдать поверхность Земли в любое время суток, независимо от состояния атмосферы. Видеоспектрометры отличаются от аналогичных классических приборов тем, что, помимо обычной спектральной информации, они позволяют производить поэлементные измерения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ), а также обеспечивают получение высококачественных панорамных изображений исследуемого объекта в различных спектральных интервалах. При этом следует особо подчеркнуть, что видеоспектрометры, в отличие от классических аналогов, не интегрируют КСЯ по всей поверхности объекта, а обеспечивают поэлементную регистрацию этой характеристики.

Видеоспектрометры, работающие на различных участках ультрафиолетового, видимого и инфракрасного спектра, в настоящее время активно используются при решении научно-исследовательских и оперативных задач по мониторингу природных комплексов и антропогенных объектов Земли посредством дистанционных методов [6–9]. Приборы данного класса, по сравнению с многоспектральными системами оптического сканирования, существенно расширяют возможности обнаружения и распознавания объектов и фонов по их спектральным образам, что особенно важно для выявления закамуфлированных объектов.

Одной из основных составляющих гиперспектральной системы дистанционного зондирования Земли, помимо самого прибора, является средство обработки изображений, получаемых с помощью видеоспектрометров [10, 11]. На данный момент известны следующие системы обработки гиперспектральной информации, используемые в Российской Федерации [12]:

1. вычислительная система обработки данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования (разработка Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Московского физико-технического института, Института вычислительной математики РАН, Тверского государственного университета);
2. программно-аппаратный комплекс классификации объектов земной поверхности на основе средств искусственного интеллекта (разработка Рязанского государственного радиотехнического университета и ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» (г. Самара));
3. программный комплекс «Альbedo» для видеоспектральной системы «Лептон» [13];
4. система обработки многоспектральных и гиперспектральных снимков ENVI (производство США).

Программный продукт «Альbedo» разработан для призматических видеоспектрометров, но его спектральное разрешение непригодно для подробного анализа спектральных характеристик. Другие представленные программы являются более универсальными, но и они не позволяют в полной мере учитывать особенности конкретных видеоспектральных изображений. Следует отметить, что ни один из представленных программных продуктов не позволяет получать спектральные характеристики в значениях КСЯ. Это приводит к тому, что полученные значения спектральных характеристик для разных приборов будет значительно различаться. А это требует проектирования специального программного обеспечения для каждого отдельно взятого видеоспектрометра с учетом особенностей его приемно-регистрающей матрицы и оптической схемы в целом. Реализованные в данных программных продуктах алгоритмы классификации приспособлены для спектрального анализа всего изображения и не сообщают, где внутри получаемого изображения какой-либо объект расположен. При этом принятие решения о местоположении и принадлежности рассматриваемого объекта к конкретному классу вынужден принимать оператор.

В последнее время для обработки гиперспектральной информации чаще всего применяются эмпирические методы, направленные на уменьшение объема входных данных. К ним в первую очередь относится использование так называемых вегетационных индексов. В настоящей работе поставлена цель – продемонстрировать возможности нового способа обнаружения замаскированных объектов на фоне зеленой растительности на базе обработки информации, полученной от видеоспектрометра, на основе ве-

гетационных индексов, позволяющих создать математическую модель системы распознавания образов [14]. Для этой цели предложено использовать наиболее приемлемые индексы – TCHVI (Three-Channel Vegetation Index) и NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Информация о видеоспектрометре «Фрегат»

Видеоспектрометр «Фрегат», работающий в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра, разработан в 1985 г. в Ленинградском институте точной механики и оптики научно-исследовательской группой «КОСПЕКТР» в рамках космического проекта «Фобос». Для регистрации видеосигналов спектральных строк получаемых изображений в приборе использовалась разработанная на предприятии «Электрон» ПЗС-матрица, позволяющая получать до 288 спектральных каналов в диапазоне 400–1000 нм. Оптико-электронный блок видеоспектрометра совмещен с тремя видеокамерами, работающими в синем, зеленом и красном участках видимого диапазона спектра. В отличие от призменных видеоспектрометров «Фрегат» построен на дифракционном диспергирующем элементе. Благодаря этому он обладает постоянным спектральным разрешением во всем регистрируемом диапазоне электромагнитного спектра [15, 16]. На сегодняшний день приборы данного класса являются единственными в нашей стране дифракционными видеоспектрометрами.

Оптический блок прибора включает в себя входной (проецирующий) объектив с блендой 12 и полихроматор. Оптическая схема прибора представлена на рис. 1. В данном блоке полихроматор, содержащий элементы 2–9, расположен за входным проецирующим объективом 1. Полихроматор состоит из входной щели, совмещенной с плосковыпуклой линзой 2, коллиматорного объектива – вогнутого сферического зеркала 3, плоской отражательной дифракционной решетки 5, вогнуто-выпуклого мениска 6, камерного объектива – вогнутого сферического зеркала 8 и составной выпукло-плоской линзы 9, выполненной из двух соединенных встык полулинз из стеклянных светофильтров. Линза 9 крепится на защитное (выходное) окно 10, непосредственно примыкающее к конструкции ПЗС-матрицы 11. Плоские зеркала 4, 7 введены в оптическую схему для уменьшения габаритов системы.

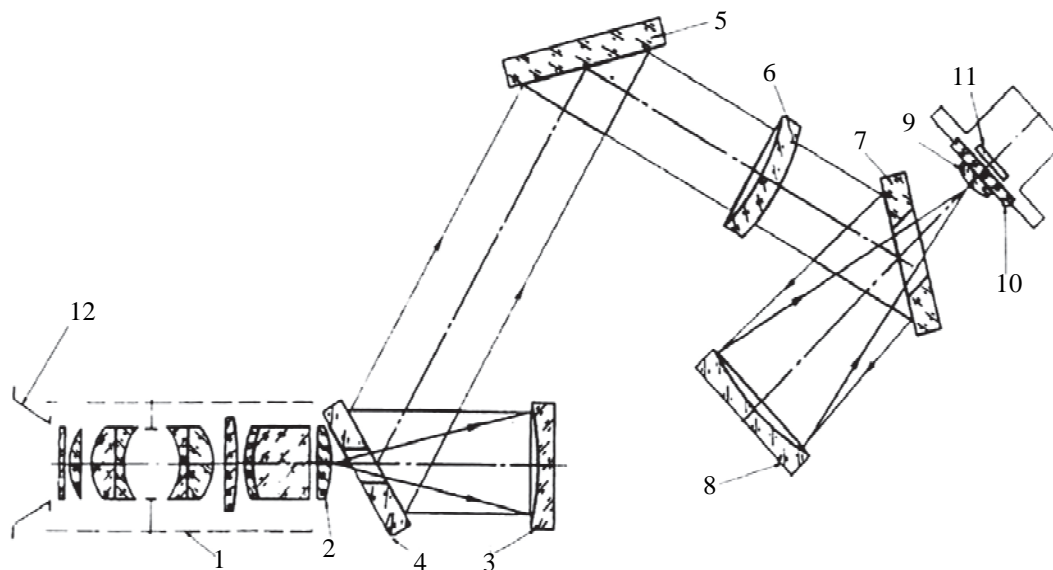


Рис. 1. Оптическая схема видеоспектрометра «Фрегат»

Составная выпукло-плоская линза 9 выполняет две основные функции:

- фильтрует высшие дифракционные порядки, так как каждая из соединенных встык полулинз выполнена, как упоминалось, из стеклянных светофильтров, не пропускающих излучения второго дифракционного порядка с длинами волн до 400 и 500 нм;
- компенсирует такую aberrацию, как кривизна поля изображения.

Обработка гиперспектрального изображения

Возможности видеоспектрометра «Фрегат» изучались на примере обнаружения объектов, замаскированных современным маскировочным покрытием летнего типа (разработка Германии). Видеоспектрометр работал в режиме биннинга, при котором получается 64 спектральных канала в диапазоне длин волн 490–960 нм. Исследовался макет реального объекта, укрытый маскировочной сетью, на фоне зеленой растительности (ель). Для получения точных значений коэффициентов спектральной яркости рядом с объектом располагался эталон в виде белой диффузной пластины с известным коэффициентом отражения. В ходе эксперимента производилось горизонтальное сканирование закамouflированного макета ар-

тиллеристского орудия на расстоянии 15 м при прямом освещении в безоблачную погоду. Всего проведено 10 сканирований с интервалами от 10 до 15 минут. Графики спектральных характеристик всех трех объектов представлены на рис. 2. Здесь можно заметить, что в области между 636,9 нм и 651,6 нм (каналы 21 и 23 соответственно) на спектральных характеристиках растительного покрова наблюдается локальный минимум. Этот факт обусловлен тем, что в данных спектральных диапазонах присутствуют полосы поглощения хлорофилла, характерные для всех типов растительности.

Для получения статистических данных и плотности распределения вегетационных индексов использованы 140 точек, соответствующих маскировочной сети, и 140 точек, соответствующих растительности. На сегодняшний день основной проблемой анализа гиперспектральной информации является большой объем данных. Эта проблема решается за счет применения вегетационных индексов. Под вегетационным индексом понимается показатель, рассчитываемый в результате операций с данными дистанционного зондирования, полученными в разных спектральных диапазонах (каналах). Этот параметр определяется параметрами растительности в данном пикселе снимка. Для более точного анализа спектральные характеристики были пересчитаны в значения КСЯ ($\beta(\lambda)$) по формуле

$$\beta(\lambda) = \frac{\rho(\lambda)}{\rho_0(\lambda)},$$

где $\rho(\lambda)$ – спектральные характеристики рассматриваемого объекта (в данном случае точки); $\rho_0(\lambda)$ – спектральные характеристики белой однородной пластины. На рис. 2 представлены спектры для трех основных объектов.

Для вычисления коэффициентов TCHVI и NDVI используются следующие показатели: r_{gr} – усредненное значение КСЯ в зеленой области спектра (540–580 нм); r_{red} – усредненное значение КСЯ в красной области спектра (640–680 нм); r_{nir} – усредненное значение КСЯ в ближней инфракрасной области спектра (701–800 нм) [17].

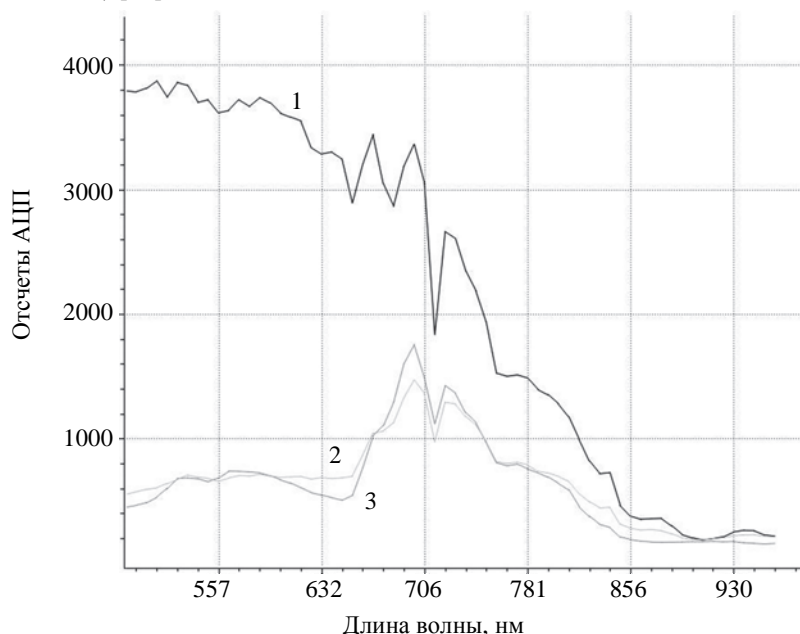


Рис. 2. Спектры излучения эталонной поверхности, растительности и маскировочной сети. АЦП – аналого-цифровой преобразователь (1 – эталонное излучение, 2 – излучение, отраженное маскировочной сеткой, 3 – излучение, отраженное растительностью)

Значения TCHVI и NDVI вычисляются по следующим формулам:

$$TCHVI = \frac{(r_{red} - r_{gr}) - (r_{nir} - r_{red})}{(r_{red} - r_{gr}) + (r_{nir} - r_{red})},$$

$$NDVI = \frac{(r_{nir} - r_{red})}{(r_{nir} + r_{red})}.$$

По получившимся значениям индексов для каждого участка изображения вычисляются плотность распределения F , математическое ожидание M и среднеквадратичное отклонение σ :

$$F(i) = \frac{N_i}{N_A}; M = \sum_{i=1}^n X_i F(i); \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2},$$

где N_i – количество одинаковых значений для i -го вегетационного индекса; N_A – количество значений вегетационного индекса в обрабатываемой области; X_i – значение i -го вегетационного индекса; $F(i)$ – вероятность появления значения X_i в обрабатываемой области; n – количество различных значений вегетационного индекса; \bar{X} – среднее значение вегетационного индекса в рассчитываемой области.

На рис. 3 представлены плотности распределения индекса NDVI маскировочной сети и растительного покрова.

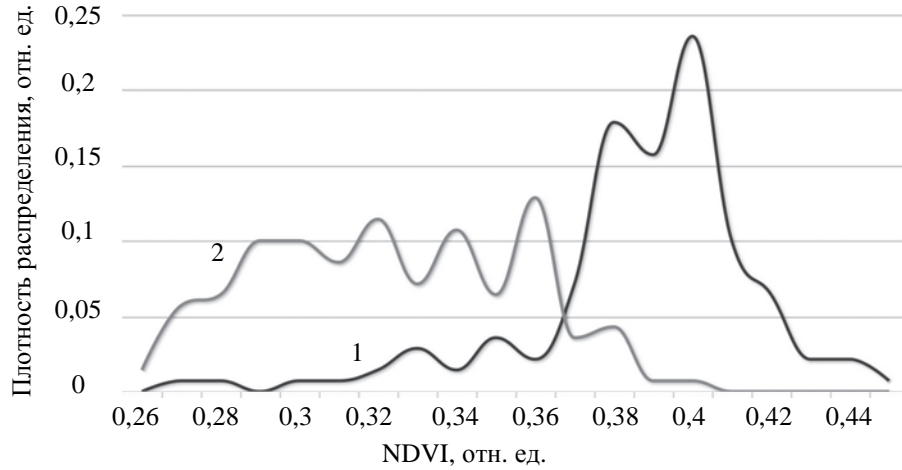


Рис. 3. Плотность распределения индекса NDVI: растительного покрова (1); маскировочной сети (2)

Из анализа графиков (рис. 3) видна разница плотности распределения NDVI для различных типов покрова. В случае с растительности плотность NDVI принимает максимальное значение в области от 0,38 до 0,42, в то время как в случае маскировочного покрытия видна резкая смена значений плотности индекса почти на всем множестве значений NDVI.

Математическое ожидание NDVI в случае растительного покрытия составляет 0,39, среднеквадратичное отклонение 0,03. Для случая маскировочной сети эти значения 0,32 и 0,03 соответственно.

Аналогично получены значения плотности распределения TSHVI маскировочной сети и растительного покрова (рис. 4). Видно, что распределение вегетационного индекса растительности и маскировочного покрытия близко к нормальному. Этот факт позволяет сделать вывод, что индекс TSHVI лучше всего подходит для обнаружения замаскированных объектов. При этом для плотности распределения TSHVI растительности величина математического ожидания составляет 0,73, среднеквадратичное отклонение 0,07. Для случая с маскировочной сетью аналогичные значения составляют 0,5 и 0,06 соответственно.

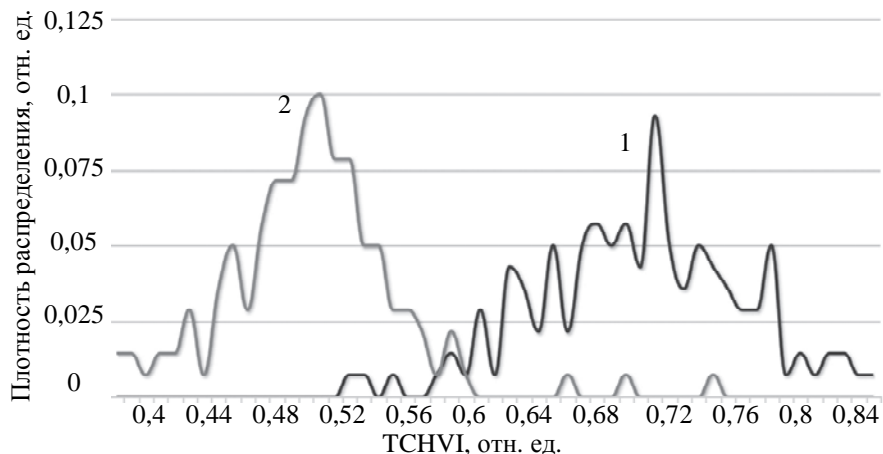


Рис. 4. Плотность распределения индекса TSHVI: растительного покрова (1); маскировочной сети (2)

Исходя из результатов вышеописанных расчетов, можно прийти к выводу, что вегетационный индекс TSHVI лучше подходит для идентификации разных типов поверхности. Точную оценку расхождения экспериментально полученных статистических характеристик (а следовательно, и распознавания объектов) дают методы математической статистики, основанные на разделении двух классов по определенному критерию, в частности, по критерию Неймана–Пирсона. Алгоритм распознавания заключается в следующем.

1. Определяется допустимое значение вероятности ошибки первого рода, исходя из решений, принимающихся на основании результатов распознавания неизвестных объектов.
2. Определяется граница между классами, соответствующая минимуму условной вероятности ошибки второго рода.

Используя значения математического ожидания и среднеквадратичного отклонения TCHVI растительности и маскировочной сети, решаются следующие уравнения:

$$Q_1 = \frac{1}{\sigma_{\alpha_1} \sqrt{2\pi}} \int_{\alpha_0}^{\infty} \exp \left\{ -0,5 \left[\frac{(\alpha - m_{\alpha_1})}{\sigma_{\alpha_1}} \right]^2 \right\} d\alpha,$$

$$Q_2 = \frac{1}{\sigma_{\alpha_2} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\alpha_0} \exp \left\{ -0,5 \left[\frac{(\alpha - m_{\alpha_2})}{\sigma_{\alpha_2}} \right]^2 \right\} d\alpha,$$

где Q_1 – вероятность ошибки первого рода; Q_2 – вероятность ошибки второго рода; σ_{α_1} – среднеквадратичное отклонение плотности распределения вегетационного индекса для объекта класса 1, σ_{α_2} – среднеквадратичное отклонение плотности распределения вегетационного индекса для объекта класса 2; m_{α_1} – математическое ожидание плотности распределения вегетационного индекса для объекта класса 1; m_{α_2} – математическое ожидание плотности распределения вегетационного индекса для объекта класса 2; α_0 – граничное значение вегетационного индекса, которое разделяет множество значений индексов на два соответствующих класса.

Приняв значение вероятности ошибки первого рода $Q_1 = 0,05$, вычисляем значение α_0 , используя математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение индекса TCHVI маскировочной сети. Решением уравнения является два корня, значения которых составляет 0,3123 и 0,6876. Исходя из пересечения графиков, представленных на рис. 4, граничное значение вегетационного индекса $\alpha_0 = 0,6876$.

Вычисление значения вероятности ошибки второго рода дает величину $Q_2 = 4,9434 \times 10^{-89}$. Следовательно, выбор граничного значения вегетационного индекса α_0 , разделяющего множество значений индексов на два класса, является правильным, и вероятность отнесения растительной поверхности к поверхностям, накрытым маскировочной сетью, ничтожно мала. Это показывает возможность применения критерия Неймана–Пирсона для распознавания образов в случае использования вегетационного индекса TCHVI.

Заключение

Наглядно продемонстрирована возможность определения типа объекта, используя в качестве данных для анализа его спектральные образы, полученные видеоспектрометром «Фрегат». Показана применимость для идентификации объектов вегетационных индексов. Показано, что наиболее информативным для обнаружения объектов является индекс TCHVI (Three-Channel Vegetation Index). Для распознавания объектов с использованием вегетационных индексов предложено использовать критерий Неймана–Пирсона. В дальнейшем при построении систем данного класса возникают вопросы разработки алгоритмов кластеризации гиперспектральных снимков, а также их потоковая обработка в режиме реального времени.

References

1. Dobrolensky Y.S., Krasavtsev V.M., Kuznetsov A.Y., Chikov K.N. The use of off-axis paraboloid mirror as a promising input lens ozonometer. *Proc. Int. Congress on Intelligent Systems and Information Technology, IS&IT*. Taganrog, Russia, 2013, pp. 352–357.
2. Feng C., Anees A. Design and modeling of a compact imaging spectrometer. *Optical Engineering*, 1995, vol. 34, no. 11, pp. 3217–3221.
3. Nouri H., Beecham S., Hassanli A.M., Kazemi F. Water requirements of urban landscape plants: a comparison of three factor-based approaches. *Ecological Engineering*, 2013, vol. 57, pp. 276–284. doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.04.025
4. De Benedetto D., Castrignanò A., Rinaldi M., Ruggieri S., Santoro F., Figorito B., Gualano S., Diacono M., Tamborrino R. An approach for delineating homogeneous zones by using multi-sensor data. *Geoderma*, 2013, vol. 199, pp. 117–127. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.08.028
5. Abrams L., Alberotanza L., Cavalli R.M. et. al. Satellite and airborne remote sensing data study the Venice lagoon. *Proc. 5th Int. Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*. San Francisco, 2001, art. 132.
6. Shilin B.V., Gruzdev V.N., Markov A.V., Mochalov V.F. Using spectral aerial imaging for ecological monitoring. *Journal of Optical Technology*, 2001, vol. 68, no. 12, pp. 900–907.
7. Brovkina O.V., Grigor'eva O.V., Gruzdev V.N., Zakharov S.V., Ponomarev S.A., Chapurskii L.I., Chikov K.N. Equipment, methods and results of the materials usage in videospectral and thermal aerial surveys for

- environmental monitoring of land and water areas. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2007, vol. 4, no. 1, pp. 209–215. (In Russian)
8. Chikov K.N., Gud V.V., Krasavtsev V.M. Onboard videospectral complex for geological and environmental mapping. *Nauchnye Issledovaniya Vysshei Shkoly po Ekologii i Ratsional'nomu Prirodopol'zovaniyu. Sb. Statei* [Research at Higher School of Ecology and Environmental Management. Articles Collection]. St. Petersburg, SPbMI Publ., 2000, pp. 173–175. (In Russian)
 9. Kuzmin A.K., Chikov K.N. Perspective panoramic auroral imager and its opportunities for tomographic mapping and diagnostics of ionospheric characteristics from the satellite. *Advances in Space Research*, 2003, vol. 31, no. 5, pp. 1321–1326. doi: 10.1016/S0273-1177(02)00946-8
 10. Chikov K.N., Gud V.V., Krasavtsev V.M. Development of videospectral bases of aerospace methods for remote sensing in the optical range. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2005, no. 7 (23), pp. 64–73.
 11. Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V. *Subject Processing of Multispectral and Hyperspectral Space Images*. Moscow, MFTI Publ., 2013, 224 p. (In Russian)
 12. Kuznetsov A. Yu. Processing methods for hyperspectral data. *Sbornik Tezisev Dokladov Kongressa Molodykh Uchenykh. Vypusk 1* [Abstracts of the Young Scientists Congress. Issue 1]. St. Petersburg, NIU ITMO Publ., 2013, pp. 96–97.
 13. Chapurskii L.I., Alekseev A.A., Astakhova E.I. et al. Experience in using a prism videospektrometra "Lepton" to measure the reflection properties of the target elements of the terrestrial test environment. *Sbornik Tezisev Dokladov Konferentsii "Giperspektral'nye Pribory i Tekhnologii"* [Proc. Conf. on Hyperspectral Instruments and Technologies]. Krasnogorsk, Russia, 2013, pp. 99–100. (In Russian)
 14. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody Raspoznavaniya* [Recognition Methods]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1977, 222 p.
 15. Palazov K.I., Bochev A.I.Z., Spaso St., Manev A., Kuzmin A.K., Stepanov V.I.A., Eysmont N.A., Prohorenko V.I., Chikov K.N., Auroral phenomena as seen by coordinated measurements of SKA-3, UVSIPS and IMAP-3 experiments on board the INTERBALL-2 satellite. *Advances in Space Research*, 2003, vol. 31, no. 5, pp. 1341–1346. doi: 10.1016/S0273-1177(03)00017-6
 16. Artyukhina N.K., Kotov M.N. Features of construction remote sensing imaging spectrometers from space. *Devices and Methods of Measurements*, 2010, no. 1, pp. 56–62.
 17. Nouri H., Beecham S., Anderson S., Nagler P. High spatial resolution WorldView-2 imagery for mapping NDVI and its relationship to temporal urban landscape evapotranspiration factors. *Remote Sensing*, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 580–602. doi: 10.3390/rs6010580

Кузнецов Александр Юрьевич	– ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, al.ur.kouznetsov@gmail.com
Сергеев Сергей Сергеевич	– студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, fellics@yandex.ru
Alexander Yu. Kouznetsov	– assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, al.ur.kouznetsov@gmail.com
Sergey S. Sergeev	– student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, fellics@yandex.ru