

Оперативное обнаружение целевых участков сельскохозяйственной растительности методом ортогональной проекции

А. В. Герус, О. Ю. Панова, В. П. Саворский

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия
E-mail: agierus@fryazino.net*

Предложен простой способ распознавания объектов, не обладающих определённой формой, в многоспектральном анализе. Способ основан на трёх основных идеях. Первая заключается в том, что рассматриваются не исходные спектры, а нормированные, что существенно уменьшает их вариативность, которая мешает распознаванию. Вторая — применение специальной калибровки, при которой все исходные спектры делятся на средний спектр интересующего объекта, что уменьшает искажение спектров атмосферой. Третья — вычисление скалярных проекций нормированного спектра исследуемого сигнала с фильтрами, составленными из ортогональных проекций к среднему спектру искомого объекта и возможных гипотез других объектов. Для интересующего объекта отношение вычисленных скалярных со «своим» фильтром к произведению с любым «чужим» должно быть больше единицы. Этот способ был проверен на выявлении полей, засеянных коноплей, при наличии яровых полей. Были исследованы семь полей с коноплей и девять яровых полей. Метод показал достаточно надёжную распознаваемость полей конопли в мае и абсолютную распознаваемость в июле и августе. Результаты оказались заметно лучше, чем при применении метода наименьших квадратов, лежащего в основе большинства других методик распознавания такого рода объектов. Данный метод может быть применён для анализа объектов в реальном времени.

Ключевые слова: ортогональная проекция, вариативность, расширенное многомерное пространство, техническая конопля, яровые зерновые, данные ДЗЗ, видимый диапазон, ИК-диапазон

Одобрена к печати: 17.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-77-85

Введение

В работе предложено решение задачи создания оперативного способа выявления участков незаконных посевов наркосодержащих растений на ранних стадиях роста. На этих стадиях выявление особенно сложно из-за того, что такие растения по своему спектральному составу и интегральному коэффициенту отражения при дистанционном зондировании практически неотличимы от посадок злаковых растений. Хорошо разработанные методы распознавания объектов в многомерном анализе, основанные не на изучении пространственной формы принятых сигналов, здесь не подходят. В данном случае приходится довольствоваться изучением только спектральных характеристик принятых сигналов при зондировании.

Решению такого рода задач посвящён целый ряд исследований (см. обзор (Саворский и др., 2018) и ссылки, приведённые в нём). При этом в работе (Саворский и др., 2018) отмечено, что методы интерпретации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для контроля и обнаружения посевов наркосодержащих растений до настоящего времени остаются достаточно примитивными, зачастую сводящимися к визуальному дешифрированию, как описано, например, в официальном отчёте UNODC (United Nations Office on Drugs and Crime — Управление ООН по наркотикам и преступности) по мониторингу посевов опиумного мака в Афганистане (Afghanistan..., 2017). Кроме того, следует отметить, что используемые в практике методы статистического анализа данных спутниковых измерений видимого и ближнего ИК-диапазонов достаточно громоздки (Саворский и др., 2018), а зачастую и вовсе непригодны для использования в режиме реального времени (см., например, описание

типовой методики в работе (Саворский и др., 2019)). Именно поэтому развитие новых оперативных методов обнаружения и контроля посевов наркосодержащих растений остаётся актуальной проблемой ДЗЗ и в настоящее время. Этим определяется основная целевая часть исследования, заключающаяся в разработке оперативного метода выявления посевов конопли на возможно более ранних этапах её развития. Для решения целевой задачи в работе развит впервые предложенный ранее способ конструирования ортогональных акустооптических фильтров для определения малых объектов (размером в один или несколько пикселей) на известном фоне (Герус, Герус, 2015). Этот способ реализован в цифровом виде (Герус и др., 2017, 2018), что позволило подтвердить его эффективность по сравнению с другими методами идентификации различных объектов по спутниковым данным.

Обнаружение целевых объектов методом ортогональной проекции

В мультиспектральном анализе наряду с одномерным представлением спектров принято использовать и многомерное пространство (Manolakis, Shaw, 2002). В работе (Герус, Герус, 2015) показано, что в целом ряде случаев полезно это пространство расширить отрицательными значениями, не имеющими физического смысла, но позволяющими ввести понятие вектора, ортогонального другому (физическому) вектору или группе векторов. В этом пространстве справедливо следующее утверждение: если есть три произвольных неколлинеарных вектора \mathbf{A} , \mathbf{B} и \mathbf{F} , то вектор \mathbf{F} всегда можно представить в виде:

$$\mathbf{F} = \alpha\mathbf{A} + \beta\mathbf{B} + \mathbf{C}, \quad (1)$$

где α и β — коэффициенты; \mathbf{C} — вектор, лежащий в плоскости, ортогональной векторам \mathbf{A} и \mathbf{B} , т.е. отвечающий условиям: $(\mathbf{AC}) = (\mathbf{BC}) = 0$. Пусть теперь все три вектора \mathbf{A} , \mathbf{B} и \mathbf{F} нормированы, т.е. каждый вектор, умноженный скалярно сам на себя, даёт единицу. Тогда соответствующим выбором коэффициентов α и β и вектора \mathbf{C} мы можем получить вектор \mathbf{F} , ортогональный либо вектору \mathbf{A} , либо \mathbf{B} . В работе (Герус, Герус, 2015) доказывается, что максимальное скалярное произведение с ненулевым вектором \mathbf{F} будет в том случае, если вектор \mathbf{C} тождественно равен нулю. В этом случае справедливы следующие выражения:

$$\mathbf{F}_a = \frac{\mathbf{B} - \mathbf{A}(\mathbf{AB})}{\sqrt{1 - (\mathbf{AB})^2}}, \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_b = \frac{\mathbf{A} - \mathbf{B}(\mathbf{AB})}{\sqrt{1 - (\mathbf{AB})^2}}, \quad (3)$$

где \mathbf{F}_a и \mathbf{F}_b — векторы, ортогональные \mathbf{B} и \mathbf{A} соответственно и имеющие максимальные проекции на \mathbf{A} и \mathbf{B} соответственно.

Пусть для неизвестного вектора-спектра \mathbf{P} необходимо установить, совпадает ли он с каким-либо из векторов \mathbf{A} или \mathbf{B} , а если нет, то с каким из них он более схож. Для того чтобы ответить на этот вопрос, нужно скалярно перемножить вектор \mathbf{P} на векторы \mathbf{F}_a и \mathbf{F}_b и оценить величину отношения:

$$s = \frac{(\mathbf{F}_a \mathbf{P})}{(\mathbf{F}_b \mathbf{P})}. \quad (4)$$

При этом критерий схожести формулируется следующим образом:

- 1) если $s = 0$, то \mathbf{P} совпадает с \mathbf{B} ;
- 2) если $s \rightarrow \infty$, то \mathbf{P} совпадает с \mathbf{A} ;
- 3) если $s > 1$, то вектор \mathbf{P} больше похож на \mathbf{A} ;
- 4) если $s < 1$, то вектор \mathbf{P} больше похож на \mathbf{B} .

При выборе в качестве векторов спектральных сигнатур полей технической конопли \mathbf{A} и яровых зерновых \mathbf{B} мы полностью формулируем критериальный подход, обеспечивающий оперативный способ обнаружения полей конопли на фоне яровых.

В работах (Герус и др., 2017, 2018) было показано, что в значительном ряде случаев полезно пользоваться не исходными спектрами, а нормированными, т. е. приведёнными к единичной длине в многомерном пространстве. Такая нормировка подобна приведению к одинаковой яркости, но всё же отличается от неё. При этой нормировке пропадает информация об абсолютной яркости объектов, которая при необходимости может быть использована в качестве вспомогательного параметра. Но при этом существенно уменьшается вариативность спектров полей одной природы.

В этих же исследованиях (Герус и др., 2017, 2018) показано, что целесообразно применять и специальную калибровку, заключающуюся в том, что спектры не просто нормируются, а предварительно каждая из компонент спектра делится на соответствующую компоненту среднего для всей совокупности полей конопли спектра, после чего и производится нормировка. При этом, поскольку данные со всех полей были получены почти одновременно (с одного спутника при одном проходе), такая калибровка уменьшала искажения спектров атмосферой.

Выбор спутниковых экспериментальных данных

Для верификации способа были использованы данные о спектрах семи полей технической конопли (которая по своим спектральным сигнатурам в видимом и ближнем ИК-диапазонах не отличается от наркосодержащей конопли (Саворский и др., 2018)) и девяти полей яровых зерновых, снятые в Орловской области России в 2002 г. (Саворский и др., 2019). В качестве таких данных выбраны результаты спутниковых наблюдений аппаратурой ETM+ Landsat-7, полученные с помощью сервисов информационной системы «ВЕГА-Science» (<http://sci-vega.ru/>). Эти сервисы обеспечивают доступ к долговременным сверхбольшим архивам спутниковых данных Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Кашницкий и др., 2016).

Для целей настоящей работы из архивов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» были извлечены данные видимого и ближнего ИК-диапазонов в семи спектральных каналах ETM+. Технические характеристики сканера ETM+ приведены в *табл. 1*. Данные теплового (6-го) канала не были использованы в настоящем исследовании. В состав анализируемой информации включены результаты наблюдений, проведённых в мае, июле и августе 2002 г.

Таблица 1. Основные технические характеристики сканера ETM+, установленного на спутнике Landsat-7 (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/the-enhanced-thematic-mapper-plus/>)

Номер спектрального канала	Спектральные диапазоны датчика ETM+, мкм	Пространственное разрешение, м	Радиометрическое разрешение	Зона обзора, км
1	0,45–0,52	30	8 бит (256 уровней)	185×185
2	0,53–0,61			
3	0,63–0,69			
4	0,76–0,90			
5	1,55–1,75			
6	10,4–12,5	60		
7	2,08–2,35	30		
Панхроматический	0,52–0,90	15		

Для каждого из контролируемых полей с использованием инструментов сервиса «ВЕГА-Science» (Кашницкий и др., 2015, 2016; Толпин и др., 2007, 2014) были определены средние и среднеквадратические значения коэффициентов отражения (КО) по результатам измерений интенсивности отражённого солнечного излучения на верхней границе атмосферы.

Результаты анализа

В результате анализа установлено, что в мае разброс (среднеквадратичное отклонение) средних значений КО по отдельным полям одной природы был около 4 %, в то время как различие между средними значениями коэффициентов отражения конопли и яровых зерновых составило менее 3 %. На *рис. 1* приведены спектры КО полей конопли и яровых зерновых. Видно, что экспериментальные данные указывают на малые различия спектров конопли и яровых зерновых не только по яркости, но и по спектральному составу. Это существенно осложняет решение задачи разделения данных типов полей. В более поздние периоды эти поля сильнее отличаются по спектральному составу и яркости. Так, в июле, когда средняя яркость полей конопли оказалась на 10 % выше, чем у яровых зерновых (а в августе, наоборот, на 15 % ниже), распознаваемость полей упростилась. Следует отметить также поле конопли № 3 (см. *рис. 1а*), спектр КО которого заметно отличается от спектров КО прочих проанализированных полей конопли.

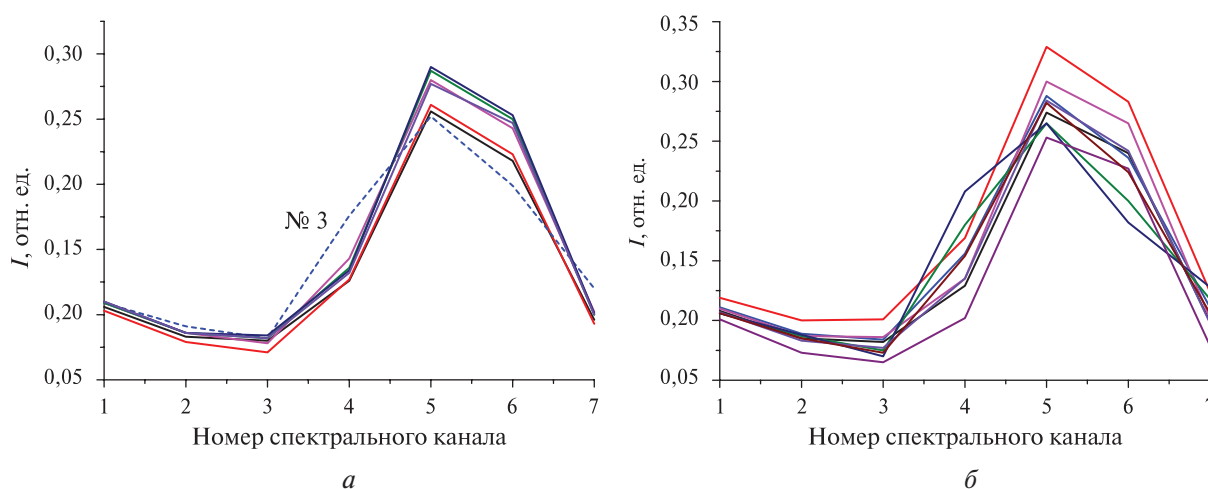


Рис. 1. КО полей конопли (*а*) и яровых зерновых (*б*). Орловская обл., май 2002 г.

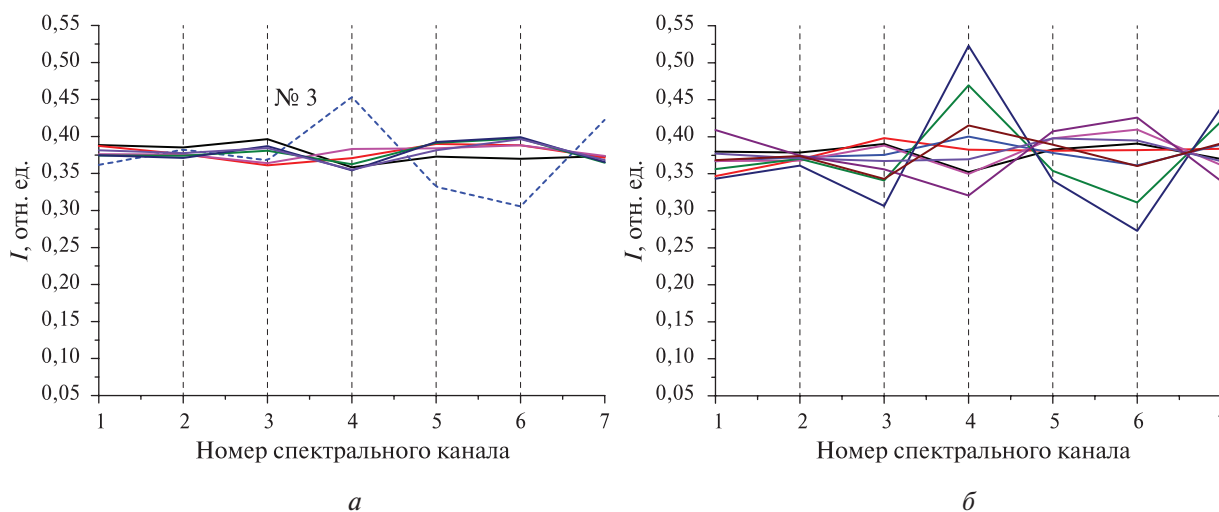


Рис. 2. Нормированные калиброванные КО полей конопли (*а*) и яровых зерновых (*б*). Орловская обл., май 2002 г.

На *рис. 2* приведены нормированные калиброванные (см. пояснения в разд. «Обнаружение целевых объектов методом ортогональной проекции») спектры КО полей конопли и яровых зерновых соответственно. Угол между средними нормированными калиброванными

спектрами КО полей конопли и полей яровых зерновых составляет $1,6^\circ$, в то время как среднее квадратичное значение вариаций угла между средним нормированным калиброванным спектром КО полей конопли и спектрами КО отдельных полей технической конопли составляет 3° . В июле и августе различие между спектральными характеристиками полей конопли и яровых зерновых возросло. Но при решении задачи раннего обнаружения участков полей, засеянных коноплей, именно полученные в мае показатели спутниковых наблюдений имеют принципиально большое значение.

На *рис. 2а*, как и на *рис. 1а*, цифрой 3 и пунктиром отмечено поле № 3. Видно, что нормированный калиброванный спектр КО этого поля мало похож на спектр КО остальных полей технической конопли. Видно также, что среди полей яровых зерновых есть спектры КО, более схожие со спектром поля № 3. В июле и августе спектр КО этого поля стал больше похож на спектры КО остальных полей технической конопли. Возможно, причиной является то, что данное поле было засеяно в более ранние или поздние сроки, чем остальные. В отличие от исходных спектров КО, изображённых на *рис. 1а* и *б*, спектры нормированных калиброванных КО конопли имеют некоторые отличия от яровых зерновых, что можно отметить визуально на *рис. 2*.

При получении спектров полей существенным является точность измерения самих спектров КО, а также величина естественных среднее квадратичных вариаций этих спектров по множеству пространственных точек, по которому проведено усреднение. Поэтому при принятии решения по выбору гипотезы о том, на какой из спектров больше похож исследуемый спектр, необходимо учитывать точность определения величины s (4), которая служит мерой схожести спектра. В данной работе мы исходили из того, что разумной точностью является величина в 20 %. Таким образом, если величина s была больше 1,2, то спектр КО относили к объекту **A**, если меньше 0,8 — к объекту **B**, а в случае $0,8 < s < 1,2$ результат считался сомнительным.

При идентификации участков, засеянных коноплей, могут возникать ошибки двух типов: 1-го рода — когда участки с коноплей определялись как засеянные яровыми зерновыми; 2-го рода — когда поля, засеянные яровыми зерновыми, идентифицировались как участки с коноплей. При выявлении полей с коноплей ошибки 1-го рода более опасные, чем 2-го, поскольку пропуск участка с коноплей имеет худшие последствия, чем проведение повторной проверки. Поэтому при выборе типа специальной калибровки из трёх вариантов (нормирование на усреднённый спектр КО конопли; нормирование на усреднённый спектр КО яровых; нормирование на полусумму этих спектров) мы остановились на первом варианте, поскольку он давал минимальную ошибку 1-го рода.

В работе также проведено сравнение результатов идентификации полей конопли по предложенному методу с методом наименьших квадратов. В последнем вычислялось отношение корней из суммы квадратов отклонений компонент исследуемого спектра от соответствующих компонент средних спектров полей конопли к такой же величине для полей яровых зерновых.

В *табл. 2* приведены результаты идентификации полей технической конопли в трёх вегетативных периодах: в мае, июле и августе. Вычислялась величина s для обеих методик. Ошибочные результаты идентификации выделены полужирным шрифтом, сомнительные — курсивом. Из *табл. 2* видно, что метод ортогональной проекции при проверке полей технической конопли в мае одно поле «пропустил». Это поле № 3, которое, как уже ранее отмечалось, в мае имеет спектр КО, визуально сильно отличающийся от спектров КО остальных полей. Метод наименьших квадратов в мае также неверно определил поле № 3. Кроме того, поля № 4, 5 и 6 по этому методу были отнесены к сомнительным. В июле и августе метод ортогональной проекции довольно уверенно идентифицировал все поля, засеянные коноплей. Метод же наименьших квадратов и в июле неверно определил поля № 1 и 2. В августе, когда поля конопли и яровых зерновых стали сильно отличаться по яркости, метод наименьших квадратов также дал точные результаты.

Результаты идентификации полей яровых зерновых культур приведены в *табл. 3*. Там таким же образом, как и в *табл. 2*, отмечены ошибочные и сомнительные результаты определения.

Из табл. 3 видно, что в мае метод ортогональной проекции из девяти полей дал ошибочный результат в пяти случаях, а метод наименьших квадратов — три неверных и один сомнительный результат. В июле и августе определение полей яровых зерновых методом ортогональной проекции было безошибочным, в то время как метод наименьших квадратов в июле неверно идентифицировал поле № 4.

Таблица 2. Идентификация полей технической конопли

Месяц	Номер поля						
	1	2	3	4	5	6	7
<i>Метод ортогональной проекции</i>							
5	2,3	7,9	0,7	4,2	2,7	2,2	2,2
7	1,3	2,9	22	14	4,6	6,6	10
8	2,2	2,7	6,2	14	5,3	6,0	10
<i>Метод наименьших квадратов</i>							
5	2,5	2,6	0,78	1,1	1,1	1,1	2,5
7	0,2	0,7	8,2	30	4,4	6,8	7,7
8	3,7	6,3	34	137	24	43	63

Таблица 3. Идентификация полей яровых зерновых культур

Месяц	Номер поля								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Метод ортогональной проекции</i>									
5	2,1	4,1	0,09	2,0	0,7	0,79	5,9	1,5	0,4
7	0,001	0,18	0,33	0,49	0,30	0,22	0,06	0,09	0,23
8	0,11	0,25	0,06	0,29	0,13	0,43	0,53	0,27	0,24
<i>Метод наименьших квадратов</i>									
5	4,4	0,77	0,27	0,9	0,74	0,81	1,78	1,7	0,28
7	0,27	0,3	0,26	5,9	0,24	0,16	0,23	0,10	0,20
8	0,03	0,08	0,06	0,10	0,03	0,14	0,39	0,36	0,09

Выводы

Использование процедуры нормирования спектров во многих случаях, в частности при идентификации участков полей, засеянных коноплей, приводит к уменьшению вариативности спектров каждой из культур, что даёт заметный выигрыш в распознаваемости.

Применение специальной калибровки в сочетании с нормировкой спектров также приводит к улучшению распознаваемости различных объектов. В отличие от использования исходных спектров, это позволяет даже визуально определить различие спектров полей технической конопли и яровых зерновых.

Метод ортогональной проекции, сочетающий использование нормированных спектров, специальной калибровки и процедуры ортогонализации в расширенном многомерном пространстве для ранней диагностики участков полей, засеянных коноплей, даёт заметно более уверенные результаты, чем метод наименьших квадратов, являющийся основой большинства методик идентификации различных объектов.

В случае, когда требуется определить посевы с наркосодержащими растениями на фоне нескольких возможных культур, процедуру идентификации можно производить независимо для каждой из возможных гипотез.

Рассмотренная процедура является достаточно простой и быстрой и может быть применена для идентификации не только наркосодержащих растений, но и других типов объектов, в том числе в режиме реального времени.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-29-09615 офи_м.

Литература

1. Герус А. В., Герус Т. Г. Акустооптические методы идентификации объектов в гиперспектральном анализе // Физические основы приборостроения. 2015. Т. 4. № 4(17). С. 70–83.
2. Герус А. В., Савченко Е. В., Саворский В. П. Алгоритм распознавания акустических, оптических электрических сигналов от слабых источников в присутствии известного фона // Электронный журн. «Журн. Радиоэлектроники». 2017. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/8/text.pdf>.
3. Герус А. В., Савченко Е. В., Саворский В. П. Использование метода ортогональной проекции для идентификации малых объектов в мультиспектральном анализе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 27–35.
4. Кашицкий А. В., Балашов И. В., Лупян Е. А., Толпин В. А., Уваров И. А. Создание инструментов для удаленной обработки спутниковых данных в современных информационных системах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 156–170.
5. Кашицкий А. В., Лупян Е. А., Балашов И. В., Константинова А. М. Технология создания инструментов обработки и анализа данных сверхбольших распределенных спутниковых архивов // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 9. С. 772–777.
6. Саворский В. П., Панова О. Ю., Савченко Е. В. Методы анализа данных спутникового мониторинга растительных ареалов для выявления участков незаконного земледелия при проведении специальных экспертиз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 13–30.
7. Саворский В. П., Кашицкий А. В., Панова О. Ю. Информационные инструменты распределенного анализа данных спутникового мониторинга растительных ареалов при проведении специальных экспертиз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16 (в печати).
8. Толпин В. А., Барталев С. А., Бурцев М. А., Ефремов В. Ю., Лупян Е. А., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Прошин А. А., Флитман Е. В. Оценка состояния сельскохозяйственных культур на основе межгодовой динамики с использованием данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 2. № 4. С. 380–389.
9. Толпин В. А., Лупян Е. А., Барталев С. А., Плотников Д. Е., Матвеев А. М. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7. С. 581–586.
10. Afghanistan Opium Survey 2017. Cultivation and Production: United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC) Research. Afghanistan, 2017. 73 p.
11. Manolakis D., Shaw G. Detection Algorithms for Hyperspectral Imaging Applications // IEEE Signal Processing Magazine. 2002. V. 19. No. 1. P. 378–384.

Rapid detection of target areas of agricultural vegetation using the orthogonal projection method

A. V. Gerus, O. Yu. Panova, V. P. Savorskiy

V.A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS,
Fryazino Branch, Fryazino 141190, Russia
E-mail: agierus@fryazino.net

A simple multispectral method, which is intended to use in recognition of objects that do not have a specific shape, is proposed. The method is based on three main ideas. The first is that not the original spectra of reflection coefficient (RC) are considered, but the normalized RC spectra, which significantly reduces their variability that interferes with the recognition. The second is the use of a special calibration, in which all the original values of RC spectra are divided by the average of RC spectrum values of the object of interest, which reduces the distortion of the spectra by the atmosphere. The third is the calculation of the scalar projections of the normalized RC spectrum of the signal under investigation with filters composed of orthogonal projections to the average RC spectrum of the object being searched for and possible hypotheses of other objects. For an object of interest, the ratio of the calculated scalar with "its" filter to the product with any "alien" must be greater than 1. This method was tested to identify fields sown with technical hemp, in the presence of spring fields. Seven fields with hemp and nine spring fields were investigated. The method showed a fairly reliable recognition of hemp fields in May and absolute recognizability in July and August. The results turned out to be much better than when using the method of least squares, which is the basis of most other methods of recognition of such objects. This method can be applied to the analysis of objects in real time.

Keywords: orthogonal projection, variability, extended multidimensional space, technical hemp, spring cereals, remote sensing data, visible range, IR range

Accepted: 17.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-77-85

References

1. Gerus A. V., Gerus T. G., Akustoopticheskie metody identifikatsii ob"ektov v giperspektral'nom analize (Acoustooptical methods for identifying objects in hyperspectral analysis), *Fizicheskie osnovy priborostroyeniya*, 2015, Vol. 4, No. 4, pp. 70–83.
2. Gerus A. V., Savchenko E. V., Savorskiy V. P., Algoritm raspoznavaniya akusticheskikh, opticheskikh elektricheskikh signalov ot slabyykh istochnikov v prisutstvii izvestnogo fona (Algorithm of recognition of acoustic, optical, electric signals from weak sources in the presence of a known background), *Zhurnal radioelektroniki*, 2017, Vol. 11, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/8/text.pdf>.
3. Gerus A. V., Savchenko E. V., Savorskiy V. P., Ispol'zovanie parametra ortogonal'noi proektsii dlya malyykh ob"ektov v mul'tispektral'nom analize (Using the orthogonal projection method to identify small objects in multispectral analysis) *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 23–35.
4. Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Loupian E. A., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Sozdanie instrumentov dlya udalenoj obrabotki sputnikovykh dannykh v sovremennykh informatsionnykh sistemakh (Development of software tools for satellite data remote processing in contemporary information systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 156–170.
5. Kashnitskii A. V., Loupian E. A., Balashov I. V., Konstantinova A. M., Tekhnologiya sozdaniya instrumentov obrabotki i analiza dannykh sverkhbol'shikh raspredelennykh sputnikovykh arkhivov (Technology for Designing Tools for the Process and Analysis of Data from Very Large Scale Distributed Satellite Archives), *Optika atmosfery i okeana*, 2016, Vol. 29, No. 9, pp. 772–777.
6. Savorskiy V. P., Panova O. Yu., Savchenko E. V., Metody analiza dannykh sputnikovogo monitoringa rastitel'nykh arealov dlya vyyavleniya uchastkov nezakonnoego zemledeliya pri provedenii spetsial'nykh ekspertiz (Methods for analyzing satellite monitoring data on plant areals to identify illegal crop fields in the conduct of special examinations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 5, pp. 13–30.

7. Savorskiy V. P., Kashnitskiy A. V., Panova O. Yu., *Informatsionnye instrumenty raspredelennogo analiza dannykh sputnikovogo monitoringa rastitel'nykh arealov pri provedenii spetsial'nykh ekspertiz* (Information tools for distributed data analysis of satellite monitoring of plant areas during special examinations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16 (in press).
8. Tolpin V. A., Bartalev S. A., Burtsev M. A., Efremov V. Yu., Loupian E. A., Mazurov A. A., Matveev A. M., Proshin A. A., Flitman E. V., *Otsenka sostoyaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur na osnove mezhgodovoi dinamiki s ispol'zovaniem dannykh MODIS* (Interannual dynamics based estimation of crops conditions by MODIS data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Vol. 4, No. 2, pp. 380–389.
9. Tolpin V. A., Loupian E. A., Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Matveev A. M., *Vozmozhnosti analiza sostoyaniya sel'skokhozyaistvennoi rastitel'nosti s ispol'zovaniem sputnikovogo servisa "VEGA"* (Capabilities satellite service "Vega" for analysis of condition of agricultural crops), *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 7, pp. 581–586.
10. *Afghanistan Opium Survey 2017, Cultivation and Production: United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC) Research*, Afghanistan, 2017, 73 p.
11. Manolakis D., Shaw G., *Detection Algorithms for Hyperspectral Imaging Applications*, *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, Vol. 19, No. 1, pp. 378–384.