

Методика распознавания растительности на основе цветового и текстурного анализа *RGB* изображений

М.Ю. КАТАЕВ¹, М.М. ДАДОНОВА²

Томский государственный университет систем управления, Томск

¹ E-mail: kataev.m@sibmail.com

² E-mail: mashadad@mail.ru

Аннотация

В статье говорится, что *RGB*¹ изображения, полученные при помощи цифровых камер, можно использовать для решения задач распознавания типов поверхности Земли (растений). Приводится набор шагов, которые необходимо реализовать, чтобы обрабатывать изображения, полученные с борта беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), в режиме реального времени. Применение аналога вегетационного индекса позволяет выделить на *RGB* изображении растения, что увеличивает вероятность правильного распознавания типов поверхности (растений). Рассматриваются методики предварительной и тематической обработки изображений, необходимой для уверенного распознавания типов поверхности. Для задачи распознавания типа растительности применяется текстурный анализ. Приводятся результаты обработки реальных изображений.

Ключевые слова: изображения, беспилотные летательные аппараты, обработка изображений, текстурный анализ, типы поверхности.

1. Введение

Задача распознавания типов земной поверхности является важной для научной и практической деятельности. Одним из вариантов решения этой задачи является использование много- и гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли [1, 2]. Получение данных возможно с помощью космических и самолётных систем. Основные разработанные методики предполагают обработку изображений поверхности, полученных в отдельных спектральных каналах, расположенных в различных диапазонах спектра. Предварительное знание спектров отражения типов земной поверхности позволяет строить методики сегментации участков земной поверхности, а значит, автоматически устанавливать их принадлежность к определённым типам. Однако у этих наблюдений имеется характерная особенность, связанная со значительным влиянием на измерения искажающих факторов: измерительного прибора, освещённости земной поверхности и состояния атмосферы. Все эти факторы вносят неопределённость в проявление спектральных свойств изучаемых объектов (типов поверхности), а значит, приводят к уменьшению вероятности отличия одного объекта от другого.

Повысить эффективность обнаружения и распознавания объектов позволяет применение данных спектральных измерений, произведённых с борта беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Этот вид измерений используется для решения практических задач сельского хозяйства,

геологии, геофизики и МЧС [3]. Для этих целей разработано множество методик, основанных на анализе данных, полученных в специально подобранных сочетаниях спектральных каналов, в различных диапазонах спектра. Сложность обработки много- и гиперспектральных [4] данных связана с учётом особенностей процесса измерения и объёмом полученных данных. Получаемое многомерное изображение содержит пространственно-спектральную информацию, где каждый пиксель содержит вектор проявления спектрального поведения участка поверхности, состоящей из подучастков разных типов. Перед обработкой таких данных требуется предварительно учитывать особенности прохождения солнечного излучения через атмосферу до территории, занимаемой (отображаемой) данным пикселем. Изменчивость получаемых спектров для конкретного пикселя достаточно велика и зависит от времени года и состояния атмосферы.

Цифровые изображения, полученные с борта БПЛА, для целей обнаружения и распознавания применяются редко. В данной статье рассматривается подход, основанный на сочетании текстурного и цветового анализа [5, 6] получаемых изображений для выделения на изображении растительности и распознавания отдельных её типов.

2. Постановка задачи

Цифровая камера позволяет получить (измерить) изображение, обработка которых возможна методами компьютерного зрения [7]. Затем полученную информацию, чаще всего, *RGB* изображение или многоспектральные данные, обрабатывают с помощью соответствующих алгоритмов. Информация на *2D*-изображении представляет собой зафиксированное излучение, отражённое от объектов *3D*-мира. Качество изображения определяется техническими характеристиками измерительного устройства (цифровой камеры), интенсивностью отражённого излучения (зенитный и азимутальный углы солнца), типом, удалённостью отражающего объекта и фоном (сценой) [8]. Методы компьютерного зрения способны извлекать большое количество информации (цвет, геометрия, форма и др.) из изображений. В области обработки результатов измерений, полученных с помощью БПЛА, методы компьютерного зрения связаны с извлечением информации из полученных данных и их анализом.

Цифровое *RGB* изображение можно рассматривать как три двумерных матрицы, где каждая отдельная позиция в матрице соответствует пикселю. Для 8-битных изображений, значение измеренной величины в каждом пикселе меняется в диапазоне [0–255]. При разработке методик обработки необходимо понимать, что на изображении представлена информация, которая определяется, главным

¹ Цифровая модель изображения.

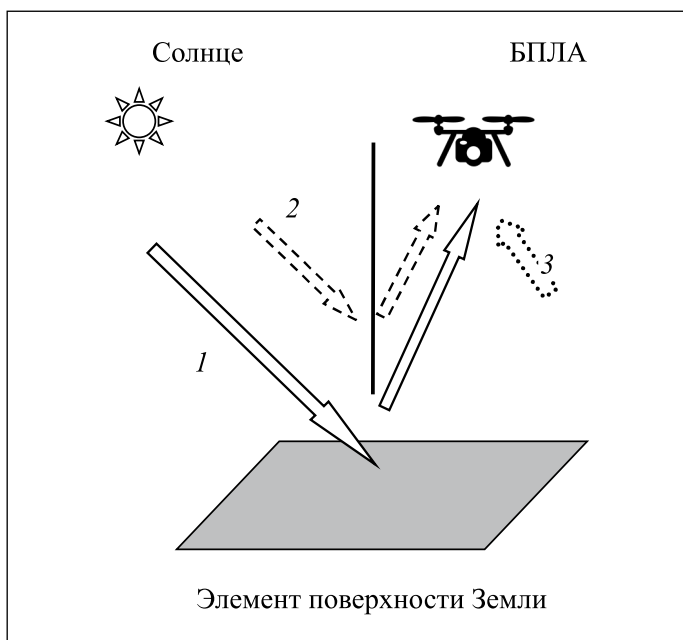


Рис. 1. Потoki солнечного излучения, попадающие на оптическое приёмное устройство, расположенное на борту БПЛА: 1 – излучение, отражённое от рассматриваемого участка, 2 – рассеянное в атмосфере излучение, 3 – диффузное излучение

образом, прямым и отражённым от различных типов поверхности солнечным излучением. При работе с изображениями, полученными оптическими измерителями, необходимо учитывать их радиометрические характеристики, параметры съёмки и состояние атмосферы. На рис. 1 приведена упрощённая схема того, как оптический измеритель, установленный на борту БПЛА на определённой высоте над поверхностью Земли, записывает информацию, которая зависит и от времени суток.

Как показано на рисунке, падающее на приёмник излучение определяется отражённым, рассеянным и диффузным потоками излучения солнца. Излучение солнца частично поглощается газами; или рассеивается в атмосфере, часть его поглощается и отражается различными типами поверхности. Измеренные данные нельзя напрямую сопоставить с отражением тех или иных типов поверхности, так как имеется множество факторов, от которых зависит попадающее на приёмник излучение, таких как: характеристики приёмника, настройки цифровой камеры, высота и угол наблюдения (съёмки), условия съёмки (азимут и высота солнца), атмосферные условия (газовый и аэрозольный состав атмосферы), отражательная способность поверхности. Поэтому перед тем, как обрабатывать полученные изображения, переводя содержащиеся в них данные в отражательную способность поверхности, необходимо выполнить геометрическую и радиометрическую калибровку [9].

3. Калибровка измеренных изображений с борта БПЛА

Совместная геометрическая и радиометрическая калибровка особенно необходима при сравнении наборов данных, собранных в течение нескольких периодов времени. Естественно, что в разные периоды времени приёмные устройства от одной и той же территории регистрируют

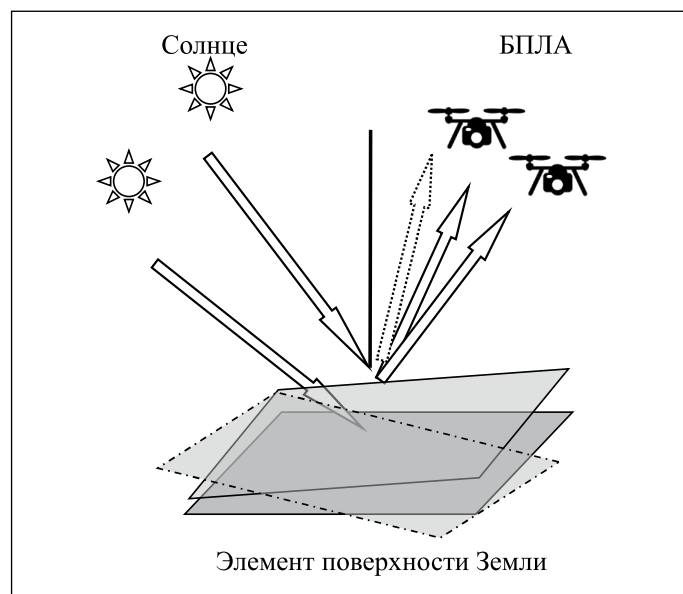


Рис. 2. Влияние условий измерения и угла наклона поверхности на потоки солнечного излучения, попадающие на оптическое приёмное устройство, расположенное на борту БПЛА

отличающиеся друг от друга данные, которые определяются условиями освещения и съёмки. Одним из отличий, регулярно возникающим при измерениях в реальном масштабе времени, является изменение высоты полёта и угла наблюдения, который зависит от скорости и направления ветра. Так как цифровые камеры имеют широкий угол поля зрения, то один и тот же участок поверхности будет измеряться в различных ракурсах, а различия во времени суток, в которое проводятся измерения, и состоянии атмосферы определяют изменение освещённости (рис. 2). Особенно это важно, когда поверхность имеет некоторый наклон, что приводит к изменению измеряемой величины, которая зависит от угла наклона измеряемой поверхности. Изменение положения БПЛА в зависимости от направления ветра приводит к изменению ориентации изображения относительно полученного ранее (см. рис. 2).

Радиометрическая коррекция позволяет привести все измеренные излучения к одинаковым условиям, т.е. учесть в измерениях значения зенитного и азимутного углов солнца, топографии и освещения (день года) [10,11]. Влияние атмосферы обусловлено рассеянием на аэрозолях и поглощением газами. Как правило, атмосферная коррекция при низкой высоте полёта БПЛА (100 м и ниже) практически не требуется. Однако в некоторых случаях, когда оптическая толщина аэрозоля или поверхностной дымки может достигать существенных значений, атмосферная коррекция должна быть применена [12]. Поскольку большинство природных объектов имеют анизотропные характеристики отражения, необходима компенсация топографического эффекта [13].

Коррекция измеренного изображения I_m на геометрию освещения солнцем и рельеф может быть представлена выражением:

$$I(i, j) = I_m(i, j) \cdot \cos(Z) / \{ \cos(Z) \cdot \cos(S(i, j)) + \sin(Z) \cdot \sin(S(i, j)) \cdot \cos(Az - As(i, j)) \}, \quad (1)$$

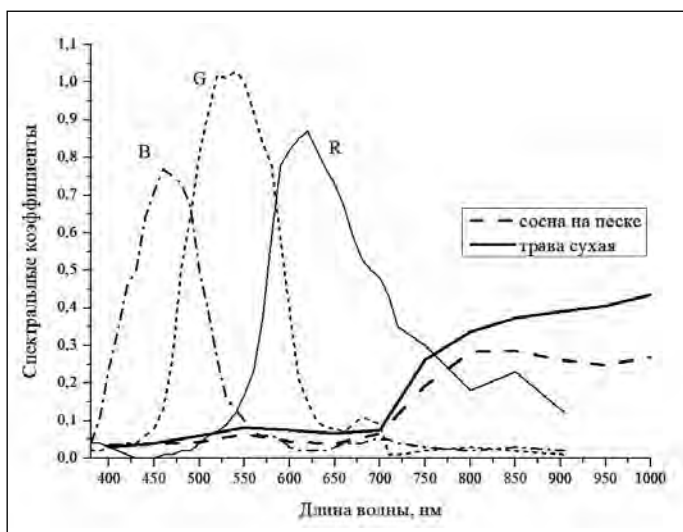


Рис. 3. Спектральный отклик в каналах RGB цифровой камеры Canon и спектральные коэффициенты отражения растительности

где $I(i, j)$ – скорректированное изображение, (i, j) – индексы текущего пикселя изображения, Z – зенитный угол солнца, S – угол наклона поверхности, Az – азимутальный угол солнца, As – азимутальный угол поворота поверхности относительно направления на север. Параметры рельефа (As и S) можно рассчитать по формулам, приведённым в [14, 15].

Геометрическая коррекция полученных изображений, обусловленная отклонениями траектории полёта от заданной под воздействием ветра, может быть выполнена с помощью методик, приведённых в [16, 17].

Следующим аспектом, требующим внимания для каждого изображения, полученного при полёте БПЛА над исследуемой территорией, является цветовая коррекция. Нами предлагается использовать для этих целей методику «серый мир» [18], когда предполагается, что сумма всех цветов на изображении даёт серый цвет. Рассчитав средние яркости по каждому из каналов, можно выполнить масштабирование всех последующих изображений относительно первого. Это приведёт к выравниванию яркости во всех измеренных изображениях.

Средняя яркость для каналов RGB может быть рассчитана по формулам:

$$\begin{aligned} \langle R \rangle &= \sum \sum R(i, j) / (N \cdot M); \langle G \rangle = \\ &= \sum \sum G(i, j) / (N \cdot M); \langle B \rangle = \sum \sum B(i, j) / (N \cdot M), \end{aligned} \quad (2)$$

где R, G и B – яркости для каналов R, G и B соответственно, N и M – число пикселей по горизонтали и вертикали изображения соответственно.

Рассчитать значение серого цвета изображения можно по формуле:

$$Grey = (w1 \cdot \langle R \rangle + w2 \cdot \langle G \rangle + w3 \cdot \langle B \rangle) / 3, \quad (3)$$

где $w1, w2$ и $w3$ – эмпирически подобранные коэффициенты (например, при анализе яркости $w1 = 0,213, w2 = 0,715, w3 = 0,072$, а при анализе освещённости $w1 = 0,299, w2 = 0,587, w3 = 0,114$).

Тогда преобразование яркости в каждом из каналов будет проводиться по формулам:

$$\begin{aligned} Rn(i, j) &= R(i, j) \cdot Grey / \langle R \rangle; Gn(i, j) = \\ &= G(i, j) \cdot Grey / \langle G \rangle; Bn(i, j) = B(i, j) \cdot Grey / \langle B \rangle, \end{aligned} \quad (4)$$

где Rn, Gn и Bn – новые значения в каналах изображения R, G, B , соответственно.

4. Индексы растительности

После того, как будут подготовлены измеренные изображения, можно решать разнообразные задачи тематической обработки. На первом шаге обработки необходимо решить задачу выделения зелени на остальном фоне (земля, строения и др.). Один из способов связан с расчётом цветового индекса растительности (*Color Vegetation Index*) [19], который объединяет отражённое от поверхности излучение двух или более спектральных полос, связанных с спектральными коэффициентами RGB цифровой камеры и характеристиками растительности (рис. 3). Для расчёта характеристик растительности из космоса популярным является нормализованный разностный вегетационный индекс (*NDVI – Normalised Difference Vegetation Index* [20]) так как он рассчитывается на основе зелёного (500 нм) и ближнего инфракрасного (800 нм) каналов. Вычисление разности между излучениями с этими двумя длинами волн позволяет выделить растительность на спутниковом изображении. Для типичной цифровой камеры, установленной на БПЛА, отсутствует ближнеинфракрасный канал, а красный канал лишь частично захватывает максимум спектрального коэффициента отражения растительности (рис. 3).

Тем не менее, вегетационный индекс *NDVI* можно рассчитать на основе данных цифровой камеры:

$$NDVI = (G - R) / (G + R). \quad (5)$$

Индекс видимой растительности (*VVI – visible vegetation index*) обеспечивает меру количества растительности согласно формуле [23]:

$$\begin{aligned} VVI &= [(1 - |(R - Ro) / (R + Ro)|) \times (1 - |(G - Go) / (G + Go)|) \times \\ &\times (1 - |(B - Bo) / (B + Bo)|)]^{(1/w)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где R, G, B – красный, зелёный и синий каналы изображения, Ro, Go, Bo – эталонные значения каналов R, G, B для определённой цветовой схемы [24], а w – весовой показатель (чаще всего его полагают равным 1).

Можно рассчитать и такой индекс, как *Excess Green Index (ExG)*:

$$ExG = 2 \cdot G - R - B. \quad (7)$$

Одним из популярных вегетационных индексов для выделения растительности на RGB изображении является индекс *CC (canopy cover)*:

$$CC = (1 + L) \times ((G - R) \times (G + R + L)), \quad (8)$$

где L – почвенный фактор, равный $L = 0$ для чистой растительности и $L = 1$ для чистой почвы (типично принимают $L = 0,5$).

Текстурные коэффициенты для шаблона изображения капусты (см. рис. 5)

Текстурный коэффициент	Среднее значение	Дисперсия
$P1$	$2,592 \cdot 10^{-5}$	$6,528 \cdot 10^{-7}$
$P2$	$2,782 \cdot 10^4$	$9,342 \cdot 10^2$
$P3$	$2,857 \cdot 10^5$	$5,191 \cdot 10^3$
$P4$	$1,419 \cdot 10^2$	1,262
$P5$	$8,883 \cdot 10^{-4}$	$6,945 \cdot 10^{-5}$
$P6$	6,322	$7,962 \cdot 10^{-2}$
$P7$	$1,811 \cdot 10^{-3}$	$1,449 \cdot 10^{-4}$
$P8$	$2,101 \cdot 10^{-3}$	$1,521 \cdot 10^{-4}$
$P9$	$5,057 \cdot 10^{-2}$	$1,320 \cdot 10^{-3}$

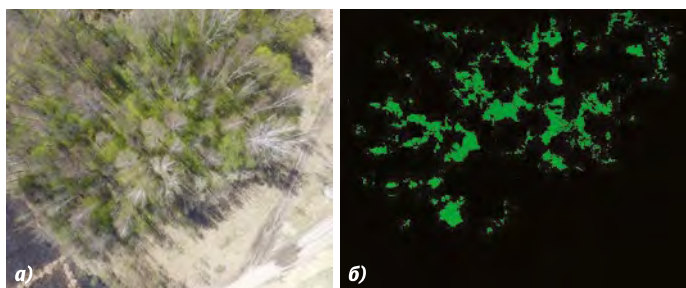


Рис. 4. Выделение растительности на изображении БПЛА: а – исходное RGB изображение, б – двухцветная маска растительности

Индексы (5) – (8) позволяют выделить на изображении области, которые заняты растительностью, а не другими объектами. На рис. 4 показан результат выделения растительности на изображении, полученном БПЛА с высоты 15 м, с использованием фильтров на основе формул (7) – (8).

5. Методика распознавания растений с помощью текстурного анализа

После того, как было подвергнуто коррекции полученное с борта БПЛА изображение и проведено выделение растений на изображении (рис. 4б), можно применить метод текстурного анализа для определения типа растения. Для распознавания типа растения необходимо на предварительном этапе обработать изображение с известным растением и получить некоторый шаблон (фон убран и присутствует только растение). Далее, проведя сравнительный цветовой и текстурный анализ нового изображения и шаблона, можно определить тип растения. Выделенное растение обладает определённой формой, площадью и контур которой можно измерить.

Для решения этой задачи необходимо представить изображение в виде оттенков серого, используя выражение:

$$I_g = 0,299 \cdot B + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot R. \quad (9)$$

Далее, для серого изображения находим текстурные признаки:

– Среднеквадратичное значение:

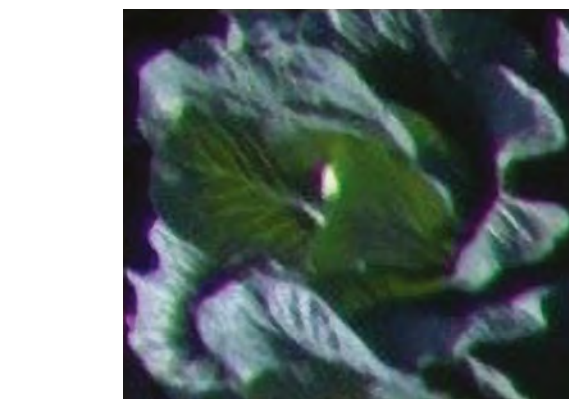


Рис. 5. Шаблон изображения капусты

$$P1 = \frac{\sum \sum (I_n(i, j))^2}{(N \cdot M)}, \quad (10)$$

где $I_n(i, j) = I_g(i, j) / \sum \sum I_g(i, j)$.

– Коэффициент корреляции:

$$P2 = \frac{\sum \sum (I_n(i, j) - P1)(I_n(i, j))}{\sum \sum (I_n(i, j))}. \quad (11)$$

– Контраст (отображает перепады яркости на разных участках изображения):

$$P3 = \sum \sum (i-j)^2 I_g(i, j). \quad (12)$$

– Несходство (разброс, перепады значений):

$$P4 = \sum \sum |i-j| I_g(i, j). \quad (13)$$

– Гомогенность (относительно маленькие значения этого параметра свидетельствуют о малом отличии данных друг от друга):

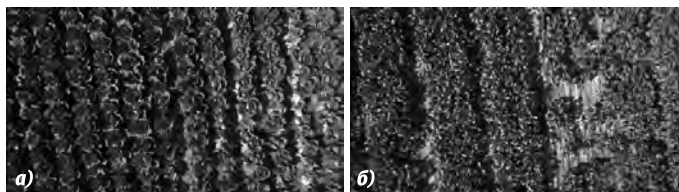
$$P5 = \sum \sum \{I_g(i, j) / (1 - (i-j)^2)\}, \quad (14)$$

или

$$P9 = \sum \sum \{I_g(i, j) / (1 - |i-j|)\}. \quad (15)$$

– Энтропия (мера необратимого рассеивания энергии):

Рис. 6. Тестовые изображения
изображения участков поля,
засеянные: а – капустой, б – свёклой



$$P6 = \sum \sum \{I_g(i, j) \cdot I_g(i, j)\}. \quad (16)$$

– Максимум (максимальное значение интенсивности пикселя (i, j)):

$$P7 = \max(I_g(i, j)). \quad (17)$$

– Энергия (характеризует протяжённость и изломанность контура):

$$P8 = \sum \sum I_g(i, j)^2. \quad (18)$$

Далее, рассчитав по формулам (10) – (18) текстурные признаки для шаблона искомого объекта и произвольно взятой области изображения, посредством сравнения можно определить принадлежность области к объекту. Сравнение проводится посредством расчёта близости значений текстурных признаков с учётом знака:

$$C = \sum \{(P_s(i) - P(i)) / (P_s(i))\}, \quad (19)$$

где P_s, P – текстурные признаки для шаблона и области изображения.

6. Результаты численных экспериментов

В качестве примера работы предлагаемой нами методики были взяты результаты съёмки территории поля с посевами капусты и свёклы. На рис. 5 показан шаблон изображения капусты, для которого были проведены все представленные в статье процедуры коррекции и вычислены текстурные коэффициенты, приведённые в таблице.

На рис. 6 показаны тестовые изображения участков поля засеянные капустой (6а) и свёклой (6б).

Затем изображения обрабатывали с целью разделить их на блоки, содержащие отдельные, однородные области, для которых по формулам (10) – (18) рассчитывались текстурные $P1 - P9$, которые сравнивались с признаками для шаблона по формуле (19). В итоге, в среднем по всем блокам для изображения 6а процент верного угадывания для критерия $C > 0.9$ составил 88 %, а при сопоставлении шаблона с изображением 6б он был равным 5 %. Часть изображений, на которых находилась открытая земля, была нераспознаваема.

7. Заключение

Технологии мониторинга с помощью беспилотных летательных аппаратов постепенно проникают во многие сферы науки и практики. Технологические задачи разработки БПЛА, построения маршрутов, измерений уже переведены в обычный, рутинный режим. Однако программ обработки и, тем более, анализа получаемой с борта БПЛА информации пока недостаточно, и решаются лишь некото-

рые задачи. Одной из задач, которая чаще всего решается с помощью много- и гиперспектральной аппаратуры, является классификация типов поверхности. Такой тип измерений позволяет решать задачи классификации с хорошей точностью, но является достаточно дорогостоящим и требовательным по условиям измерений. Более простой способ, предлагаемый в статье, основывается на использовании обычной *RGB* цифровой камеры. Так как атмосферные условия получения цифровых изображений постоянно меняются, то для приведения всех изображений к одним условиям проводится геометрическая и радиометрическая коррекция. Для решения задачи распознавания типов поверхности (в статье рассматриваются несколько видов растений) нами используется текстурный анализ. Приведённые в работе результаты говорят о хорошей точности распознавания типов растений по *RGB* изображениям с борта БПЛА. Отметим, что алгоритм текстурного анализа, применённый в данной работе, является достаточно простым, и при использовании более сложных модификаций должен позволить получить более значимые точности распознавания типов поверхности земли и, в частности, растений.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект № 8.8184.2017/8.9 «Методология создания систем энергогенерирующих и энергопреобразующих устройств для наземных и бортовых комплексов наземного, космического и подводного базирования» и молодёжного проекта по программе «УМНИК».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кашкин В.Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: учеб. пособие / В.Б. Кашкин, А.И. Сухонин. – М.: Логос, 2001.– 264 с.
2. Чандра А.М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А.М. Чандра, С.К. Гош. – М.: Техносфера, 2008.– 312 с.
3. Фетисов В.С. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние. – Уфа: Фотон, 2014.– 217 с.
4. Старовойтов В.В. Цифровые изображения: от получения до обработки / В.В. Старовойтов, Ю.И. Голуб. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2014.– 202 с.
5. Янишин В.В., Калинин Г.А. Обработка изображений на языке Си для IBM PC: Алгоритмы и программы. – М.: Мир, 1994.– 240 с.
6. Прэнт У. Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982, Т. 1–2.– 1104 с.
7. Шатицко Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение = Computer Vision. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006.– 752 с.
8. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Бондаренко А.В, Ососков М.В., Моржисин А.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. – М.: Физматкнига, 2010.– 672 с.
9. Hruska, R., Mitchell, J. Anderson, M., Glenn, N.F. Radiometric and geometric analysis of hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle // Remote Sens.– 2012. – No. 4. – P. 2736–2752.

Китай разрабатывает первую космическую солнечную электростанцию

Китай планирует построить на околоземной орбите первую в истории космическую солнечную электростанцию (КСЭ). Её соберут на высоте 36 тыс. км над Землёй, где независимо от времени суток, метеорологических условий и атмосферного воздействия планеты, она сможет эффективно и, главное, постоянно проводить сбор солнечной энергии для последующей её передачи на наземные станции.



Вырабатываемая ею электроэнергия будет преобразовываться в «микроволны или лазерный луч» для передачи на специальные коллекторы на Земле. Проект станции был предложен китайскими инженерами ещё в 2015 г., и сейчас специалисты Китайской академии космических технологий (КАКТ) ведут разработку раннего экспериментального образца КСЭ.

КСЭ сможет обеспечивать поставку электроэнергии практически постоянно и в 6 раз эффективнее, чем любая имеющаяся на Земле солнечная ферма.

Реализация проекта будет проходить в несколько этапов. В течение 2021–2025 гг. в стратосферу планируется запустить несколько компактных образцов КСЭ для сбора солнечной энергии и проведения испытаний по её передаче на наземный коллектор. К 2030 г. учёные хотят вывести на околоземную орбиту КСЭ мегаваттного класса, а к 2050 г. – гигаваттного.

По словам вице-президента КАКТ, Китай может стать первой в мире страной, которая создаст КСЭ, обладающую реальной практической ценностью.

Отмечается, что основная техническая сложность в развёртывании подобной станции на орбите заключается не в технологиях сбора солнечной энергии – необходимые разработки уже есть. Главная проблема – это вес станции, который, согласно текущим оценкам, будет составлять около 1000 т. Вес той же МКС более, чем вдвое меньше и составляет около 400 т.

В настоящий момент китайские специалисты изучают как один из способов решения этой проблемы использование роботов и технологии 3D-печати для непосредственного строительства КСЭ прямо в космосе. Кроме того, поскольку собранную КСЭ энергию планируется преобразовывать в энергию СВЧ излучения для передачи на наземные коллекторы, учёные также хотят изучить вопрос потенциального влияния СВЧ излучения станции на атмосферу и экологию планеты.

Ожидается, что орбитальная КСЭ поможет снизить загрязнение воздуха от многочисленных наземных электростанций, работающих на ископаемых видах топлива. Кроме того, в качестве одной из возможных перспектив называется использование КСЭ как источника энергии для нужд развивающейся программы освоения дальнего космоса.

Источник новости добавляет, что Япония, Индия, а также некоторые Европейские страны тоже ведут обсуждение идей использования солнечной энергии в космосе.

hi-news.ru
16.02.2019

10. *Shepherd, J.D., Dymond, J.R.* Correcting satellite imagery for the variance of reflectance and illumination with topography // *Int. J. Remote Sens.*– 2003. – Vol. 24. – P. 3503–3514.

11. *Hruska, R., Mitchell, J., Anderson, M., Glenn, N.F.* Radiometric and geometric analysis of hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle // *Remote Sens.*– 2012. – No. 4. – P. 2736–2752.

12. *Colomina, I., Molina, P.* Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review // *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*– 2014. – Vol. 92. – P. 79–97.

13. *Huang, W., Zhang, L., Li, P.-X.* A Topographic Correction Approach for Radiation of RS Images by Using Spatial Context Information // *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica.*– 2006. – Vol. 35, No. 8. – P. 286–290.

14. *Dybayah, R., Rich, P.* Topographic solar radiation models for GIS // *International Journal of Geographical Information Systems.*– 1995. – No. 9. – P. 405–419.

15. *Bolstad, P.V., Smith, J.L.* An Evaluation of DEM Accuracy: Elevation, Slope Aspects // *Photographic Engineering and Remote Sensing.*– 1994. – Vol. 60, No. 11. – P. 1327–1332.

16. *Toutin, T.* Geometric Processing of Remote Sensing Images: Models, Algorithms and Methods // *International Journal of Remote Sensing.*– 2004. – Vol. 25, No. 10. – P. 1893–1924

17. *Kim, J., Kim, T.* Fast and robust geometric correction for mosaicking UAV images with narrow overlaps // *International Journal of Remote Sensing.*– 2017. – Vol. 38, No. 8–10. – P. 2557–2576.

18. *Reinhard, E., Adhikmin, M., Gooch, B. Shirley, P.* Color transfer between images // *IEEE Computer graphics and applications.*–2001. – Vol. 21, No. 5. – P. 34–41.

19. *Meyer, G.E., Neto, C.J.* Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications // *Computers and electronics in agriculture.*– 2008. – Vol. 63, No. 2. – P. 282–293.

20. *Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., Huete, A.R.* A review of vegetation indices // *Remote Sensing Reviews.*– 1995. – Vol. 13. – P. 95–120.

21. *Haralick, R.M.* Statistical and structural approaches to texture // *Proc. of the IEEE.*– 1979. – Vol. 67, No. 5. – P. 786–804.

22. *Palm, C.* Color texture classification by integrative cooccurrence matrices // *Pattern Recognition.*– 2004. – Vol. 37, No. 5. – P. 965–976.

23. <http://phl.upr.edu/projects/visible-vegetation-index-vvi>.

24. <https://colorscheme.ru>.



Катаев Михаил Юрьевич, доктор техн. наук. Закончил Томский государственный университет по специальности «Инженер оптик-исследователь» (1984 г.). Профессор кафедры автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), профессор Юргинского технологического института (филиала) Национального исследовательского Томского политехнического университета. Научный руководитель Центра космического мониторинга Земли ТУСУР



Даднова Мария Михайловна. Магистрант кафедры автоматизированных систем управления (АСУ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)