

Коррекция освещённости многовременных *RGB*-изображений, получаемых с помощью беспилотного летательного аппарата

М.Ю. КАТАЕВ¹, М.М. ДАДОНОВА², Д.С. ЕФРЕМЕНКО

Томский государственный университет систем управления
и радиозлектроники (ТУСУР), Томск
E-mail: kataev.m@sibmail.com¹, mashadad@mail.ru²

Аннотация

Статья посвящена изучению и оптимизации многовременных *RGB*-изображений, получаемых с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Установленная на борту БПЛА цифровая камера позволяет получать данные с высоким временным и пространственным разрешением наземных объектов. В рассмотренном в статье случае объектом изучения были сельскохозяйственные поля, для которых на основе многочисленных изображений, покрывающих сельскохозяйственное поле, строились мозаики изображений (ортофотопланы). Время получения каждого ортофотоплана составляло минимум несколько часов, что приводило к изменению освещённости каждого изображения в отдельности. Ортофотопланы, полученные в разные отрезки времени года (в несколько месяцев), также отличны друг от друга по освещённости. Для сравнительного анализа разных участков поля (ортофотоплана), полученных в одном временном отрезке, или сравнения участков за разные промежутки времени требуется их выравнивание по освещённости. В настоящее время, большинство подходов выравнивания преимущественно опирается на цветовые (*RGB*-) методы, что не во всех случаях даёт эффективные решения, особенно при необходимости получения количественного результата. В статье предложен метод, учитывающий изменение освещённости во время получения каждого изображения. Рассматривается общая постановка задачи световой коррекции *RGB*-изображений в смысле оценки цветового вегетационного индекса *Greenness*. Приводятся результаты обработки реальных измерений.

Ключевые слова: *RGB*-изображение, радиометрическая коррекция, освещённость, отражение, пропускание, БПЛА, ортофотоплан.

Введение

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве платформ дистанционного зондирования в последние годы увеличивается линейно. Использование этих платформ связано с их масштабируемостью, гибкостью использования, разработанностью технологий управления полётом, визуализацией и возможностью получать изображения больших территорий, а также с их способностью летать в опасных условиях. Применение БПЛА возможно во многих областях, связанных с сельским, лесным, водным, автомобильным хозяйствами и др. Получаемые изображения с высоким пространственным (для *RGB*-изображений) и спектральным разрешением (для многоспектральных и гиперспектральных приборов) с помощью БПЛА, открывают совершенно новые возможно-

сти дистанционного зондирования в различных отраслях народного хозяйства [1].

В мировой практике для мониторинга состояния растений на *CX* полях чаще всего используются многоспектральные спутниковые изображения¹ за разные промежутки времени. Тематическая обработка (например, вычисление вегетационных индексов [2]) этих изображений позволяет проводить мониторинг состояния растений на *CX* полях. Анализ получаемых результатов о состоянии растений и почвы позволяет принимать точные решения по внесению заданных объёмов удобрений или гербицидов, участкам полива или мелиорационных работ, выполнению иных *CX* мероприятий. Спутниковые изображения обладают высокой степенью охвата одним снимком больших площадей поверхности. Изображения получаются на разных длинах волн УФ, видимого и ИК диапазонов оптического спектра. Основные характеристики спутниковых изображений связаны с достаточно высоким пространственным разрешением (10–300 м) и высокой чувствительностью. Набор узких особо расположенных спектральных каналов позволяет проводить расчёт как нормализованного относительного индекса растительности *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*), так и других индексов (*LAI*, *NDSI*, *SAVI* и др.). Изучение поведения *NDVI* во времени и пространстве позволяет оценивать состояние растительности на *CX* полях. Важно и временное разрешение, которое характеризует частоту проведения съёмки над одной и той же географической точкой, которая меняется от нескольких часов, до нескольких дней в течение всего года. Однако у этого способа мониторинга есть значительный минус, связанный с отсутствием получения данных при наличии сплошной или разорванной облачности. Соответственно, важный плюс измерений с помощью БПЛА – их возможность летать ниже облаков, что увеличивает их эффективность при проведении мониторинга определённой территории за счёт устойчивости к атмосферным воздействиям (ветер до 10 м/с и слабые осадки) [3].

Для разных практических приложений дистанционного зондирования, например, в лесном, водном, автомобильном или *CX* мониторинге важная задача – радиометрическая калибровка, поскольку тщательность анализа особенностей *RGB*-изображений позволяет извлекать исследуемую цветовую информацию пространством более точно. Кроме коррекции шумовых характеристик измерительного датчика, радиометрическая калибровка должна позволять сводить к минимуму все неточности, связанные с измене-

¹ С помощью спутниковых приборов *LANDSAT* [<https://landsat.gsfc.nasa.gov>], *SENTINEL* [<https://sentinel.esa.int>], *MODIS* [<https://modis.gsfc.nasa.gov>], *VEGETATION* [www.spot-vegetation.com] или др.

нием освещённости [4, 5]. При изучении пространственно-временных характеристик типов поверхности, расположенных на СХ поле (например, пшеницы), возникает необходимость получения множества изображений, которые перекрывают друг друга (степень перекрытия может достигать 50–70 %). Получение изображений (во время полёта БПЛА) проводится в разное время, при этом меняется угловое положение Солнца, возникают тени, связанные с облачным покрытием или расположенными объектами вдоль кромки поля (как правило это лесные насаждения).

Для устранения этих цветовых артефактов на изображениях используют разнообразные методики. Одна из них связана с использованием эффекта двунаправленной функции распределения отражательной способности (*Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF*) [6]. Другая методика основана на анализе изменения отражения от поверхности земли (например, основываясь на ламбертовском законе отражения) [7]. Менее известный подход к коррекции изображений БПЛА состоит в использовании модели переноса излучения [8]. Есть и технический способ компенсации проблемы, вызываемой меняющимися условиями освещения для каждого изображения, который связан с установкой датчика освещённости на земле или на борту БПЛА [9]. Можно также использовать и табличные функции интенсивности излучения Солнца при разных углах его склонения для разных оптических масс [10].

Цель настоящей работы – разработка подхода к коррекции БПЛА-изображений, получаемых для одной и той же территории в разное время.

Методика получения RGB-изображений с помощью БПЛА

Цифровая камера, расположенная на БПЛА, измеряет уровень отражённого солнечного излучения от поверхности. На рис. 1 показаны основные источники формирования БПЛА-изображения, связанные с прямым (E_1), переотражённым (E_2), рассеянным и отражённым (E_3) солнечным излучением. При этом солнечное излучение, падающее под углом φ , попадает на площадку (элемент рельефа), которая имеет высоту h , наклон под углом α и угол β относительно направления Север-Юг.

Цель оптических датчиков, работающих в спектральном диапазоне 0,3–3 мкм (к таким относится и цифровая камера) – регистрация солнечного излучения, отражённого от поверхности. Однако фиксируемые датчиком значения (*Digital Numbers, DN*) не соответствуют отражательной способности земной поверхности. Это связано с такими параметрами датчика, как алгоритмы обработки цвета, настройки камеры, виньетирование, чувствительность (зависимость от высоты полёта) и др. Это также связано с изменением таких факторов, как азимут и высота солнца, атмосферные условия (туман или наполнение атмосферы аэрозолями (например, дым пожаров)) и отражательная способность типов изучаемой поверхности.

По этой причине следует преобразовать DN в коэффициент отражения поверхности. Этот процесс известен как радиометрическая калибровка и выполняется на стадии предварительной обработки измеренных изображений. Измеряемая величина, фиксируемая цифровой камерой в каждом пикселе изображения, зависит от освещён-

ности поверхности солнечным излучением, прошедшим толщу атмосферы:

$$E(\lambda, \varphi_{\text{sun}}, \varphi_{\text{uav}}, \theta_{\text{sun}}, \theta_{\text{uav}}) = E_o(\lambda) \cdot \cos(\varphi_{\text{sun}}) \cdot d^2 \times \\ \times \rho(\lambda, \varphi_{\text{sun}}, \varphi_{\text{uav}}, \theta_{\text{sun}}, \theta_{\text{uav}}) \cdot \text{Surf}(h, \alpha, \beta) \times \\ \times T_{\text{sun}}(\lambda) \cdot T_{\text{uav}}(\lambda), \quad (1)$$

$$DN(i) = c_1 + c_2 \cdot S(i),$$

$$S(i) = A \cdot \omega \cdot \tau \cdot \int (E(\lambda) \cdot A_i(\lambda) d\lambda) / \int A_i(\lambda) d\lambda,$$

где $S(i)$ – измеренная величина отражённого солнечного излучения от поверхности в спектральных каналах ($i = R, G, B$); $E(\lambda) = E_1(\lambda) + E_2(\lambda) + E_3(\lambda)$ – освещённость территории на длине волны λ в видимом спектральном диапазоне за счёт эффектов отражения от поверхности и рассеяния в воздухе; $\rho(\lambda)$ – *BRDF* на длине волны λ ; $A_i(\lambda)$ – аппаратная спектральная функция для каждого канала ($i = R, G, B$); A, ω, τ – площадь детектора, угол поля зрения, время экспозиции; $\varphi_{\text{sun}}, \varphi_{\text{uav}}, \theta_{\text{sun}}, \theta_{\text{uav}}$ – зенитный угол освещения и наблюдения БПЛА, азимутальный угол положения Солнца и БПЛА; d^2 – функция расстояния между Солнцем и Землёй в течение года ($d^2 = 1 + 0,0033 \cdot \cos(360 \cdot \text{day}/365)$), здесь day – порядковый номер дня года); c_1 и c_2 – постоянные линейного преобразования сигнала; $\text{Surf}(h, \alpha, \beta)$ – функция, описывающая рельеф с высотой над уровнем моря h и углами α и β , которые представляют наклон площадки к земной поверхности и поворот её относительно направления Север-Юг; $T_{\text{sun}}(\lambda)$ и $T_{\text{uav}}(\lambda)$ – функции пропускания на оптической трассе Солнце-земная поверхность и поверхность-БПЛА. Выражение (1) приведено в предположении, что $E_2 = 0$ и $E_3 = 0$, хорошо выполняющемся при малой высоте полёта БПЛА (10–100 м).

Для каждой цифровой камеры функция $A_i(\lambda)$ уникальна и зависит от технических и оптических характеристик [11].

Калибровка изображений

В данной работе авторы стремились внедрить в процесс обработки изображений, получаемых с помощью БПЛА, данные о зависимости отражательной способности поверхности от её рельефа и положения Солнца. Предложенная методика не требует дополнительных измерений с помощью панелей отражения с известным коэффициентом отражения. Для решения задачи коррекции требуется лишь чётко знать географическое положение (широту и долготу) и время получения изображений, чтобы рассчитать угловое положение Солнца. Угол, под которым Солнце наблюдается из точки на земной поверхности, зависит от ежедневного вращения Земли, годового вращения и географической широты рассматриваемой поверхности.

Угол склонения δ есть угловое положение Солнца в солнечный полдень относительно плоскости экватора. Он изменяется от $-23,45^\circ$, в день зимнего солнцестояния, до $+23,45^\circ$, в день летнего солнцестояния, в соответствии с формулой [12]

$$\delta = 23,45 \cdot (\pi / 180) \cdot \sin[2\pi \cdot (284 + \text{day}) / 365].$$

Ориентация области отражения относительно Солнца лучше всего описывается углом θ , который связан с широтой, днём года и временем как

$$\cos \theta = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \Omega, \quad (2)$$

где $\Omega = (24 / \pi) \cdot \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \delta)$.

Заметим, что в течение дня при наличии дымки, облачности или леса вокруг поля для каждого изображения СХ поля будет наблюдаться разное соотношение значений E_1 , E_2 и E_3 . Наиболее значима в полдень доля E_1 , а доли E_2 и E_3 растут в утренние и вечерние часы при отсутствии тумана над поверхностью, что, как правило, к 10 ч местного времени выполняется с хорошей точностью. Учёт этого обстоятельства важен для коррекции изображений, получаемых с БПЛА, с целью точного определения состояния растительности.

Поверхности СХ полей отражают солнечный свет анизотропно (уровень отражённого излучения меняется в зависимости от угла наблюдения и геометрии освещения). Кроме того, на отражение существенно влияют такие факторы, как тип растительности (плотность расположения, листовая плотность, листовое содержание воды и азота, структура почвы (влажность и шероховатость)). Эта информация фиксируется в *RGB*-изображениях БПЛА и может использоваться в практике СХ работ. Извлечение из *RGB*-изображений информации об отражательной способности – сложный процесс, на который влияют условия освещения, рассеивающие процессы в атмосфере (дымка и облачность), прилегающие к полю объекты (лес или здания), а также топография поля. Кроме того, на поле могут образовываться участки затенения, в которых уровни E_1 , E_2 и E_3 иные, чем в местах прямого освещения. Поэтому получение важной количественной информации по *RGB*-изображению предполагает проведение комплексных исследований по воздействию и значению этих факторов при различных условиях. Данная статья лишь частично снимает возникающие вопросы.

Радиометрическая калибровка особенно необходима при сравнении наборов данных, собранных в течение нескольких периодов времени, «между» датчиками или при разных условиях освещения в одной и той же области. Последнее особенно важно при работе с БПЛА, т.к. камера снимает несколько изображений, которые будут накладываться друг на друга для генерации ортофотоплана. Для формирования правильного ортофотоплана, необходимого для количественных оценок параметров растительности, требуется, чтобы все изображения отвечали схожим условиям измерений. Однако такое бывает редко, т.к. в каждом БПЛА-изображении проявляются следствие солнечного движения (изменение освещённости) и влияние сплошной и разорванной облачности на освещение исследуемой области (тёмные и светлые области). Результат этого – плохое сшивание перекрывающихся областей изображений, что приводит к получению неоднородного по освещённости ортофотоплана. Это, в свою очередь, приводит к снижению точности оценки отражательной способности и, следовательно, точности расчётов индексов растительности и последующих результатов идентификации типов растительности [13]. Эта проблема имеет тенденцию к росту с увеличением площади обследования.

Методы калибровки изображений делятся на абсолютные и относительные. Абсолютные методы связывают значения DN изображения с функцией отражения земной поверхности, используя соответствующие приборы во время измерений, установленные на поле. Относительные методы применяются, когда невозможно использовать дополнительные приборы, в основном работающие с известными функциями (например, моделями *BRDF*) и нормализацией изображений. Важно отметить, что во многих статьях не затрагивается процесс коррекции изображений и к тому же для изображений БПЛА систематический, выполнимый и удобный метод радиометрической калибровки пока не создан. В какой-то мере данная работа способствует уменьшению этой неопределённости.

Одним из эффектов, снижающих качество изображения, получаемого для количественного анализа, является эффект виньетирования, который связан с радиальным спадом яркости от основной точки изображения. Во многом величина этого эффекта зависит от высоты измерений БПЛА и угла поля зрения, пиксельного разрешения и чувствительности цифровой камеры. Другой эффект, требующий коррекции, связан с темновым током. Этот вопрос решается вычитанием из всех изображений кадра, полученного при закрытом объективе. Ещё влияет на изображение топографический эффект. Топография (рельеф поверхности) добавляет различия в условия освещения, так как освещённость локальной поверхности прямо пропорциональна косинусу угла падения на неё солнечного излучения (см. выражения (1) и (2)).

Определение характеристик растительности по *RGB*-изображению

Растительность важна для выживания человека и играет важную роль в глобальном углеродном цикле. Развитие технологий дистанционного зондирования позволяет получать информацию о растительности в виде вегетационных индексов, используя специально расположенные в спектральной области каналы (красный и ближний ИК). Однако открытые для свободного доступа спутниковые изображения дистанционного зондирования имеют низкое пространственное разрешение (10–300 м) и проблемы со временем задержки, вызванные наличием сплошной или

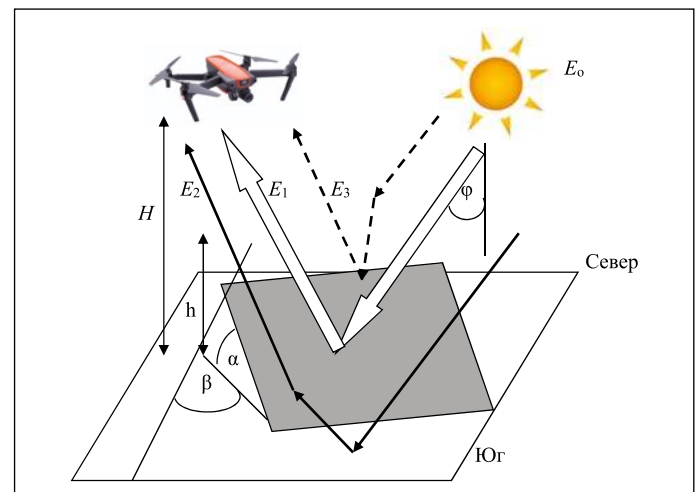


Рис. 1. Источники формирования БПЛА-изображения

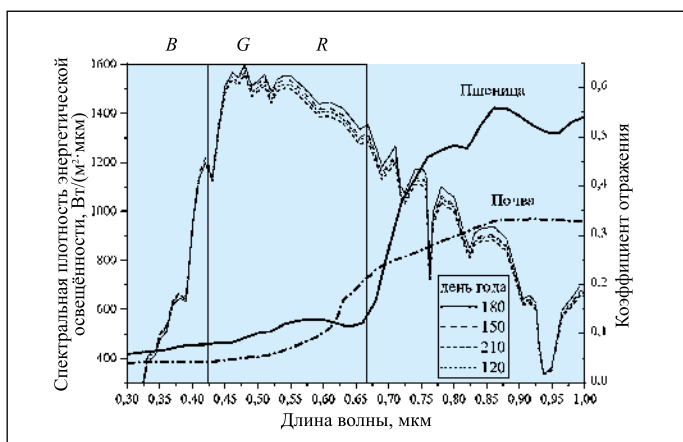


Рис. 2. Спектр солнечного излучения, достигающего земной поверхности и спектральные коэффициенты отражения разных типов поверхности

разорванной облачности. Это не позволяет получать точную информацию о растительности с небольших площадей СХ полей. Кроме того, из-за влияния сложных топографических особенностей поля возникают особенности интерпретации получаемых данных. Применение БПЛА в сельском хозяйстве связано с полётами на малой высоте (10–100 м). При обработке полученных в ходе полёта данных (изображений) многие исследователи не учитывают влияние атмосферных факторов на процесс получения изображения, тем самым внося погрешности в восстанавливаемые количественные показатели. При этом важно отметить, что сами изображения в виде визуальной (качественной) информации не несут значимых погрешностей.

Индексы растительности (*Vegetation indices, VI*) объединяют поверхностную отражательную способность в двух или более спектральных полосах для изучения разных характеристик растительности и возможности их взаимного сравнения. База данных индекса (проект <https://www.indexdatabase.de/info/feedback/>) содержит более 150 *VI*, но только некоторые из них применимы для *RGB*-изображений. Посредством *VI*, рассчитываемых на основе *RGB*-изображений, появляется возможность измерять уровни роста растений и их стресса от (обилия или отсутствия) воды и питательных веществ, урожайности и др. Как сказано выше, все эти показатели, их качество и достоверность существенно зависят от радиометрической коррекции. Вот несколько популярных *VI*:

$$Greenness1 (ExGI) = (2 \cdot G - R - B), \quad (3.1)$$

$$Greenness2 (NDGRI) = (G - R) / (G + R), \quad (3.2)$$

$$Greenness3 (GI) = G / R, \quad (3.3)$$

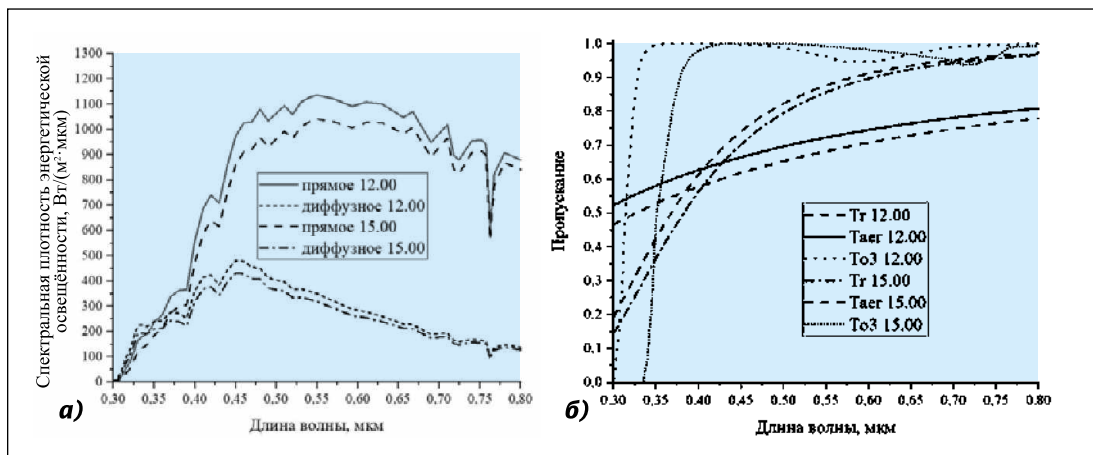
$$Greenness4 (MGRVI) = (G^2 - R^2) / (G^2 + R^2). \quad (3.4)$$

Оценка состояния растительности и прогнозирование урожайности СХ культур являются основой для точного земледелия в рамках цифрового сельского хозяйства. Состояние растительности может определяться «на глаз», на основе опыта наблюдений за растениями, или с помощью спектральных приборов, к которым относится и обычный фотоаппарат. Спектральные характеристики растений зависят от многих факторов, включая строение листьев (форма, площадь), содержание влаги и углекислого газа в воздухе и почве и др. Кроме того, эти характеристики (для стебля и листьев) зависят от типа растения, времени после посадки, атмосферных условий, рельефа, почвы и др. Соответственно, указанные выше факторы в сумме влияют на состояние растений и могут определяться по спектральным характеристикам отражения от растения солнечного излучения. Тщательное изучение состояния растений предполагает рассмотрение детальных спектров отражения для выявления малейших нюансов состояния растения, что, однако, не всегда возможно ввиду дороговизны подходящих приборов, сложности калибровки и обработки изображений. Один из других вариантов оценки состояния растений – использование аналога вегетационных индексов – коэффициента *Greenness* (зелёность). Для расчёта *Greenness* используется комбинация уровней отражения на двух длинах волн – 0,65 и 0,75 мкм – в области «ближнего ИК склона» (*red edge*) кривой спектра отражения растительности (рис. 2).

На рис. 2 показаны изменения, вызываемые солнечным излучением, попадающим на цифровую камеру после отражения от земной поверхности, представленной пшеницей и почвой. Для моделирования считаем, что параметры атмосферы постоянны и меняется только угол падения солнечного излучения на одну и ту же площадку².

² Здесь это делается специально для показа необходимости учёта изменения солнечного излучения, так как пренебрежение им влияет на точность определения аналога вегетационного индекса (*Greenness*).

Рис. 3. Спектры солнечного излучения, достигающего земной поверхности для 120 дня и местного времени 12 и 15 ч, (а) и пропускания в эти моменты основных компонент атмосферы – Рэ-ля (T_r), аэрозольного (T_{aer}) и озона (To_3) (б). (Поясное время – согласно [<https://scienceforum.ru/2014/article/2014002119>]). Расчёты выполнены с помощью специальной программы [15]



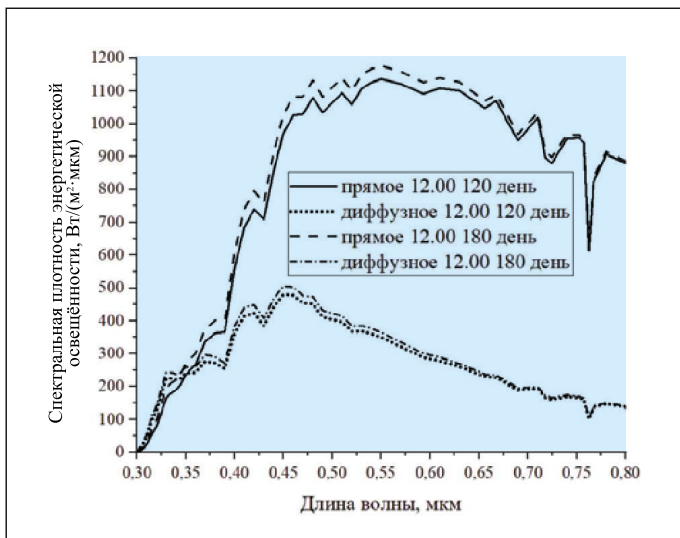


Рис. 4. Спектры солнечного излучения, достигающего земной поверхности для 120 и 180 дней и 12 ч местного времени

Из рис. 2 хорошо видно, что синий канал меняется слабо, а наиболее изменчивы – зелёный и красный каналы цифрового изображения.

Учитывая, что пропускание атмосферы на трассе между земной поверхностью и БПЛА незначительно, можно переписать уравнение (1) для излучения, попадающего на цифровую камеру при отражении от плоской поверхности ($Surf = 1$), в RGB -каналах в виде

$$E_R(\varphi_{sun}) = E_{oR} \cdot \cos \varphi_{sun} \cdot d^2 \cdot \rho_R \cdot T_R(\varphi_{sun}), \quad (4.1)$$

$$E_G(\varphi_{sun}) = E_{oG} \cdot \cos \varphi_{sun} \cdot d^2 \cdot \rho_G \cdot T_G(\varphi_{sun}), \quad (4.2)$$

$$E_B(\varphi_{sun}) = E_{oB} \cdot \cos \varphi_{sun} \cdot d^2 \cdot \rho_B \cdot T_B(\varphi_{sun}), \quad (4.3)$$

т.е. для каждого канала – свой уровень солнечного излучения, своё отражение от поверхности и своё пропускание атмосферы.

Касательно спутниковых измерений известно, что так как отражение в указанных спектральных каналах для каждого типа поверхности различно вегетационный индекс [14] для определённой территории позволяет выделять достаточно много типов поверхности с хорошей точностью. Однако спутниковые изображения имеют ограничение по регулярности появления безоблачных снимков. Поэтому использование RGB -изображений, получаемых с помощью БПЛА, даже в облачной ситуации позволяет получать информацию о состоянии растений на исследуемой территории. При этом необходимо выполнять соответствующую коррекцию изображений таким образом, чтобы извлекать информацию об отражении растений с минимальными погрешностями.

Подставив уравнения для RGB -каналов (4.1–4.2) в (3.1) и (3.2), получим:

$$Greenness1 = \frac{\cos \varphi_{sun} \cdot d^2 (2 \cdot \rho_G - g_1 \cdot \rho_R \cdot t_1 - g_2 \cdot \rho_B \cdot t_2)}{E_{oG} \cdot T_G(\varphi_{sun})}, \quad (5)$$

$$Greenness2 = \frac{\rho_G - \rho_R \cdot g_1 \cdot t_1}{\rho_G + \rho_R \cdot g_1 \cdot t_1}. \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что $Greenness2$ в большей мере зависит от состояния атмосферы в R - и G -каналах изображения по сравнению с $Greenness1$, где задействованы все три канала. Показатели внеатмосферного солнечного спектра в R - и B -каналах могут рассчитываться заранее ($g_1 = E_{oR}/E_{oG}$, $g_2 = E_{oB}/E_{oG}$) и учитываться при расчётах. При этом изменения атмосферного состояния на R - и B -каналах сказываются, но отношения $t_1 = T_R(\varphi_{sun})/T_G(\varphi_{sun})$ или $t_2 = T_B(\varphi_{sun})/T_G(\varphi_{sun})$ меняются слабее самих функций пропускания атмосферы.

Заметим, что пропускание всей толщи земной атмосферы в видимой области спектра (0,35–0,65 мкм) определяется закономерностями рэлеевского и аэрозольного ослаблений солнечного излучения и значимым является поглощение озоном. Остальные газы (SO_2 , NO_2) мало влияют на пропускание всей толщи атмосферы.

С учётом приведённых на рис. 3 и 4 данных нами выполнены расчёты по формулам (4.1–4.3) и на их основе получены значения $Greenness1$ и $Greenness2$. Зная, что истинные значения $Greenness$ связаны с $\rho(\lambda)$ растений, можно для соответствующих каналов RGB -изображения построить точные значения этих величин. Оказалось, что (без учёта шумовых помех при измерениях) уровень влияния безоблачной атмосферы на $Greenness2$ для местного времени 12 ч и 120-го дня (30.04.2019 [https://fincalculator.ru/kalkulyator-dnej]) составляет 22,5 % (для 180-го дня 2,5 %) и для времени 15 ч того же дня – 9,5 %. Понятно, что включение в расчёты более сложной модели переноса солнечного излучения в атмосфере позволит получать более верные значения отклонений от точного значения, рассчитанного по $\rho(\lambda)$ как для безоблачной, так и для облачной ситуаций.

Следует заметить, что при коррекции БПЛА-изображений на практике возникает сложность, связанная с определением параметров в уравнениях (5) и (6). Одна из самых простых – коррекция на такие параметры, как $\cos \varphi_{sun}$, d^2 ,



Рис. 5. БПЛА-изображение поля пшеницы в разные дни полевого сезона

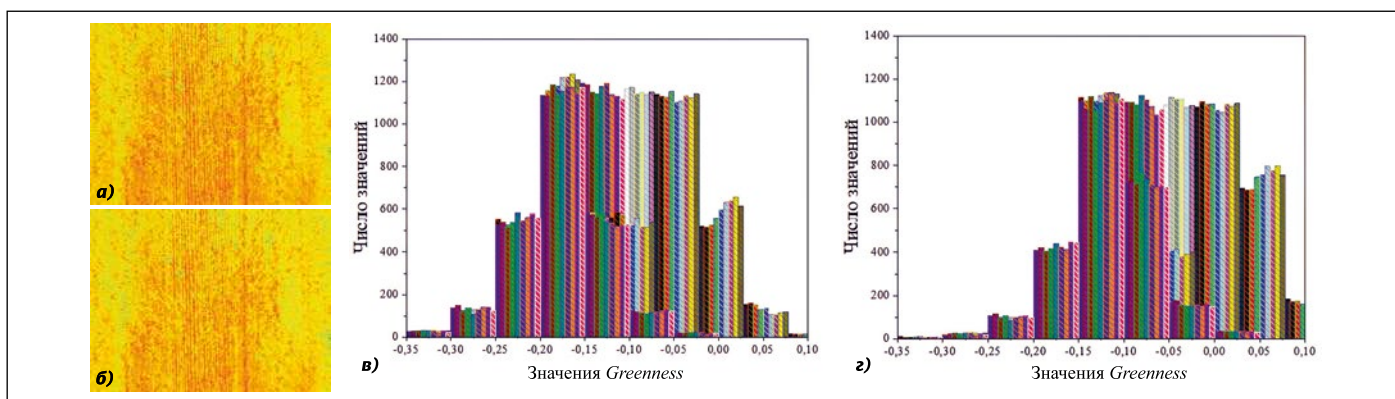


Рис. 6. Изображение *Greenness1* (а, б) и гистограммы значений индекса (в, з) поля пшеницы за 06.07.2019 без коррекции (а, в) и с коррекцией (б, з)

g_1 , g_2 , когда они могут рассчитываться заранее для любого дня года и времени дня. Учёт атмосферы происходит через параметры t_1 и t_2 , которые могут широко меняться согласно атмосферной ситуации. Одна из компонент пропускания, которая может учитываться достаточно точно и которая является определяющей по величине в солнечной области, – функция пропускания Рэлея. Учитывая, что коэффициент пропускания определяется как $T = \exp(-\tau/\cos\varphi_{\text{sun}})$, где τ – оптическая толщина аэрозольного и молекулярного рассеяния и поглощения газов, рассчитываемая как $\tau = \tau_{\text{aer}} + \tau_{\text{rel}} + \tau_{\text{gas}}$, где τ_{aer} , τ_{rel} , и τ_{gas} – оптические толщины аэрозоля, Рэлея и поглощения газами соответственно.

Поскольку рэлеевское рассеяние в атмосфере стабильно [16], его можно выделять из общей функции пропускания и на него выполнять коррекцию. Учёт в изображениях поглощения газами и аэрозольного рассеяния требует непосредственных измерений на поле, во время съёмки или использования модельных значений. Учёт по модели тоже важен в том смысле, что появляющийся остаток от реального пропускания будет существенно меньше текущих вариаций пропускания атмосферы.

Рассмотрим БПЛА-изображения (рис. 5), полученные за период с 06.07.2019 по 17.08.2019 над пшеничным полем при высоте полёта 10 м, показывающие разные периоды развития растений на СХ поле. Время измерений выбиралось одинаковым, с 11 до 13 ч местного времени при безоблачных или частично облачных условиях. Рассчитывая индекс *Greenness*, можно убедиться, что средняя яркость изображения связана с состоянием атмосферы и временем измерения, и все изменения (рис. 3, а и 4) будут влиять на значение индекса, и, значит, на точность оценки состояния растений, что, несомненно, следует корректировать.

На рис. 6 показаны изображения *Greenness1* до и после коррекции для поля пшеницы за 06.07.2019. На первый взгляд различия между рис. 6, а и б невелики, но они есть, и для более полного понимания различий рассчитаны гистограммы значений индекса *Greenness1* (рис. 6, в и з). Анализируя рис. 6, в и з, можно отметить, что изменился центр кривой распределения (было $-0,05$, стало $-0,1$) и амплитуда (было 1100, стало 1200), а структура кривой практически не изменилась. Учитывая это, можно сказать, что предлагаемая методика уменьшает систематическую ошибку, вызванную неучётом влияния положения Солнца и, частично, атмосферных эффектов.

Заключение

Разработан алгоритм атмосферной коррекции для устранения вариаций освещённости для получаемых с помощью БПЛА *RGB*-изображений. Процесс коррекции проводился на основе учёта изменения модельных характеристик переноса излучения с набором параметров, соответствующих конкретному географическому району. Проведено тематическое исследование для анализа полезности алгоритма в практике СХ работ. Результаты расчётов показали, что БПЛА-изображения содержат информацию о функции (спектре) пропускания атмосферы на оптической трассе между входом солнечного излучения в атмосферу и земной поверхностью. Разработанный алгоритм дал надёжный метод получения требуемых точных данных для расчёта вегетационных индексов *Greenness*.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ, проект *FEWM-2020-0036*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлёв В.Н., Журавлёв П.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в отраслях экономики: состояние и перспективы // Научный вестник МГТУ ГА. – 2016. – № 226. – С. 156–164.
2. Candiano S., Remondino F., De Giglio M., Dubbini M., Gattelli M. (2015) Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images // *Remote Sens.* – 2015. – Vol. 7. – P. 4026–4047.
3. Mogili U.R., Deepak B. Review on application of drone systems in precision agriculture // *Procedia Comput. Sci.* – 2018. – Vol. 133. – P. 502–509.
4. Brede B., Suomalainen J., Bartholomeus H., Harold M. Influence of solar zenith angle on the enhanced vegetation index of a Guyanese rainforest // *Remote Sens. Lett.* – 2015. – Vol. 6. – P. 972–981.
5. Jakob S., Zimmermann R., Gloaguen R. The Need for Accurate Geometric and Radiometric Corrections of Drone-Borne Hyperspectral Data for Mineral Exploration: MEPhySto – A Toolbox for Pre-Processing Drone-Borne Hyperspectral Data // *Remote Sens.* – 2017. – Vol. 9, No. 1. – P. 88.
6. Yuan Y., Sun C., Zhang X. Measuring and Modeling the Spectral Bidirectional Reflection Distribution Function of Space Target's Surface Material // *Acta Photonica Sin.* – 2010. Yuan Y., Sun C., Zhang X. Measuring and Modeling the Spectral Bidirectional Reflection Distribution Function of Space Target's Surface Material // *Acta Photonica Sin.* – 2010. – Vol. 59. – P. 2097–2103.

7. 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.

8. 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. – Vol. 4, No. 9. – P. 2736–2752.

9. Hakala T., Honkavaara E., Saari H., Makynen J., Kaivosoja J., Pesonen L., Polonen I. Spectral imaging from UAVs under varying illumination conditions / In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences; International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS): Christian Heipke, Germany, 2013.* – P. 189–194.

10. Habte A., Sengupta M., Lopez A. Evaluation of the National Solar Radiation Database (NSRDB): 1998–2015. NREL/TP-5D00–67722. – 2017. – 38 p.

11. Lin S., Gu J., Yamazaki S., Shum H.-Y. Radiometric calibration from a single image. In *Proc. IEEE Conf. on Comp. Vision and Pattern Recog.*, 2004. – P. 938–945.

12. Demain C., Journee M., Bertrand C. Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined surfaces // *Renew. Energy.* – 2013. – Vol. 50. – P. 710–721.

13. Катаев М.Ю., Даданова М.М. Методика распознавания растительности на основе цветового и текстурного анализа RGB изображений. // *Светотехника.* – 2019. – № 2. – P. 34–39.

14. Черепанов А.С. Вегетационные индексы // *Геоматика.* – 2011. – № 2. – С. 98–102

15. Gueymard C. Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine. – Florida Solar Energy Center, FSEC Report PF-270–95, 1995. – 84 p.

16. Bodhaine B.A., Wood N.B., Dutton E.G., Slusser J.R. On Rayleigh optical depth calculations // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* – 1999. – Vol. 16, No. 11. – P. 1854–1861.

Новая диодная УФ лампа DELOLUX 504 ускоряет отверждение клеёв

Компания DELO представила новую диодную лампу для УФ-отверждения специальных клеёв, которые теперь можно найти почти в каждом автомобиле и мобильном телефоне, а также в самолётах (в число клиентов DELO входят Bosch, Daimler, Huawei, Osram, Siemens и Sony). Точечный источник света DELOLUX 504 содержит УФ-диоды последнего поколения, яркость которых втрое выше, чем у предыдущей модели DELOLUX 502. Он разработан для высокоскоростного производства в электронной и автомобильной промышленности, где требуется облучение небольших площадей и простая интеграция оборудования в существующие системы.



Высокая облучённость, 4 Вт/см², на длине волны 365 нм даёт двойные преимущества: ускоряет УФ-отверждение клея, сокращая время цикла, и позволяет размещать лампу подальше, что обеспечивает большую гибкость в её интеграции в производственные линии.

Из-за ограниченности места для установки в таких системах DELO придал лампе очень компактную конструкцию. При этом оптимизированное управление температурой гарантирует, что тепло, выделяемое диодами, быстро рассеивается за счёт прямого подсоединения к радиатору, что повышает срок службы диодов; и такое (пассивное) охлаждение позволяет использовать лампы в чистых помещениях. Зона выхода света имеет эллиптическую форму, что позволяет избирательно облучать только определённые области.

Ещё одно преимущество – разъёмный присоединительный кабель лампы. В отличие от многих других ламповых конструкций, головку лампы можно легко заменять, например, в конце её срока службы, без необходимости разбирать всю производственную линию.

led-professional.com
21.10.2020

Проекторы со светодиодами в качестве фар

Принцип работы новых фар с СД «Digital Matrix LED» (DML) для электромобилей автоконцерна Audi напоминает кинопроекторы – каждая фара состоит из 1,3 млн микрозеркал, которые проецируют мощный пучок света на дорогу. Полный набор возможностей проекторов появится в Европе, а в США, из-за нормативных ограничений, электромобили будут только «здороваться» и «прощаться» с водителем, а также позволят избежать «ослепляющего» эффекта для встречного транспорта.

Впервые DML будет реализована в обновлённых электромобилях Audi «e-tron Sportback» и «e-tron SUV».

Приветствие владельца – лишь малая часть того, на что способны DML-фары, заявляют представители Audi. Главная особенность устройства – это «световой ковёр» длиной в 50 м, который освещает ближайшую часть дороги и не мешает другим автомобилям. Более того, динамичные СД могут менять положение до 5 тыс. раз в секунду, что пригодится при смене полос движения – фары будут расширять освещаемую область, когда водитель решит перестроиться. Предполагается, что последняя функция значительно снизит количество аварий, связанных со слепыми зонами автомобилей.

Audi сотрудничает с государственными регуляторами США, чтобы открыть доступ к полному набору функций «Digital Matrix LED» для покупателей из США.

Audi – не первый автопроизводитель, который решил переизобрести передние фары. В 2018 г. Mercedes-Maybach, подразделение концерна Daimler AG, ответственное за производство премиальных автомобилей, представило аналогичную систему для автомобилей S-класса. Однако Mercedes не удалось довести технологию до массового потребителя, а Audi планирует вывести «Digital Matrix LED» на массовый рынок уже в следующем году.

nanonewsnet.ru
18.10.2020



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



Даданова Мария Михайловна, магистрант кафедры автоматизированных систем управления (АСУ) ТУСУР



Ефременко Дмитрий Сергеевич, доктор техн. наук. Окончил в 2009 г. МЭИ. Научный сотрудник Института дистанционного зондирования (IMF) Германского аэрокосмического центра (DLR) в Оберпфaffenхофене, Германия, и доцент Мюнхенского технического университета. Область научных интересов: перенос излучения, дистанционное зондирование, анализ больших данных