МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Эквализация условий съемки на основе спектральных моделей для нужд точного земледелия с использованием $\mathbf{Б}\Pi \mathbf{J}\mathbf{A}^1$

М.А. Павлова, Д.С. Сидорчук, Д.О. Кущев, Д.А. Бочаров, Д.П. Николаев

Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия Поступила в редколлегию 11.12.2022

Аннотация—Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) – широко используемый источник данных для мониторинга состояния сельскохозяйственных участков. В отличие от спутниковой съёмки, где аппараты зачастую имеют солнечно-синхронную траекторию движения, данные с БПЛА могут характеризоваться большой вариативностью условий съемки, что осложняет аналитику данных. В этой работе рассматривается задача эквализации условий съемки гиперспектрального снимка с использованием специальных пространственных зон изображения (ключей), для которых известны значения, полученные в целевых условиях. Показано, что аффинная модель спектра освещенности сенсора на тестовой выборке обладает большей точностью, чем линейная. Для аналитического метода вычисления параметров аффинной модели показано наличие неустойчивости в спектральных областях, в которых изображения ключевых областей имеют близкие значения. Предложен регуляризованный численный метод оценки параметров аффинной модели лишенный этого недостатка. На основе аффинной модели предложен новый метод эквализации, который позволяет приблизить изображения, полученные в исходных условиях, к изображениям, полученным в целевых условиях, сократив ошибку в 4,6 раза. Для экспериментального исследования моделей и метода эквализации был подготовлен специальный набор данных, состоящий из гиперспектральных снимков AVIRIS, полученных для одной и той же местности в сильно различающихся условиях освещения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), эмпирическая коррекция, беспилотный летательный аппарат (БПЛА), эквализация условий съемки

DOI: 10.53921/18195822 2022 22 4 404

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в сельском хозяйстве для мониторинга состояния земель всё чаще используется съемка с БПЛА. Такой вид съемки предоставляет возможность управлять процессом зондирования: дата и время съемки, местность интереса, высота полета и широта поля зрения являются контролируемыми параметрами, что является важным преимуществом в сравнении со спутниковым мониторингом. С другой стороны, это сопровождается существенным недостатком, который заключается в искажениях, вызванных вариативностью условий съемки [1]. Так, снимки, полученные при закатном Солнце или в условиях сильной облачности, будут заметно отличаться от изображений, зарегистрированных в ясную погоду при Солнце, находящемся в зените, что является следствием сильно отличающихся спектральных составов источников освещения. Данная проблема актуальна именно для съемки со средних и малых высот, так как траектории спутников и время съемки с них специально выбирают так, чтобы минимизировать вариативность освещения: например, спутники Sentinel-2A, Sentinel-2B имеют солнечно-синхронную траекторию полёта.

 $^{^1}$ Работа выполнена при поддержке гранта Российского Научного Фонда (проект № 20-61-47089).

В области трехканального компьютерного зрения в видимом диапазоне (RGB) задача оценки отражающей способности поверхностей, снятой при неизвестном освещении известна как задача цветовой константности [2]. В области дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) существует схожая задача оценки отражающей способности, также известная как радиометрическая или спектральная калибровка. Специфика ДЗЗ состоит в том, что сенсор удален от объектов съемки на расстояние от сотни метров для БПЛА до сотен километров для спутниковой съемки. Поэтому при оценке отражающей способности основной компонентой выступает атмосферная коррекция [3]. Для калибровки данных аэросъемки (высота 20 км) коррекция на спектр источника освещения уже является частью стандартного алгоритма [4]. Большинство существующих мультиспектральных систем нуждаются в повторной калибровке при изменении условий освещения [5].

Существуют работы, посвященные задаче оценки отражений в сложных условиях освещения. В работе [6] рассматриваются изменения освещения, связанные с наклонами поверхностей. Предлагается метод для коррекции этого вида искажений. Для тестирования используются двускатные крыши домов. В нашей работе мы ориентируемся в первую очередь на нужды земледелия, где поля в основном расположены плоско. В работе [7] алгоритм радиометрической калибровки оценивался для данных БПЛА, снятых в разных условиях освещения. Различие состояло в том, что часть снимков была сделана при ясном небе, а часть в условиях плотной облачности. В нашей работе для тестирования используется другой вид проблемного освещения, а именно большие отклонения Солнца от зенита, в своей крайней форме проявляющиеся на рассвете и закате.

Перечисленные выше работы посвящены методам специальной радиометрической калибровки с учетом освещения. Однако условия съемки не исчерпываются условиями освещения, наравне с которыми влияние также оказывает атмосфера. Мы исследуем другой подход, основанный на эквализации условий съемки, после которой может быть применена стандартная радиометрическая калибровка. Мы предлагаем называть эквализацией задачу оценки изображения в целевых условиях на основе изображения, полученного в исходных условиях. Радиометрическая калибровка не является обязательной компонентой любого анализа ДЗЗ и ей не исчерпывается актуальность нашей работы. Так, например, вегетационные индексы, вычислением которых во многих случаях и ограничивается точное земледелие, рассчитываются непосредственно по сигналам мультиспектральных каналов (digital numbers). Сложные условия освещения могут существенно искажать сигналы, и, соответственно, вычисляемые на их основе индексы. В нашей работе мы используем для тестирования гиперспектральные данные, а исследование применимости методов для мультиспектрального случая считаем перспективным направлением развития текущей работы.

Для решения задачи эквализации мы предлагаем использовать эмпирические модели спектра освещенности сенсора. Оценка параметров таких моделей производится на основе ключевых зон (в англоязычной литераторе – kernels [8]). Это отдельные зоны изображения, для которых известны значения не только в исходных условиях, но и в целевых, к которым требуется преобразовать всё изображение. Аналогичный подход на основе ключей известен как вне области ДЗЗ, где в качестве ключей могут использоваться например лица людей [9], так и в области ДЗЗ для радиометрической калибровки [8, 10, 11].

Данная работа устроена следующим образом. В разделе 2 описывается предлагаемый эмпирический подход к эквализации, соответствующие модели и метод в подразделе 2.1. Раздел 3 посвящен описанию данных, собранных в различных условиях освещения и подходящих для исследования выбранной задачи. В разделе описывается результаты экспериментов по оценке предлагаемых моделей и метода 4. Завершает работу раздел 5.

2. ЭМПИРИЧЕСКАЯ ЭКВАЛИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ СЪЕМКИ

Задачу эквализации мы формулируем как задачу оценки оптического изображения в целевых условиях съемки на основе изображения в исходных условиях. Оптическое изображение $L(\lambda,x,y)$ предполагает пространственное разрешение (x,y), но в этой работе рассмотрение ограничено спектром в одном пикселе, который далее будем называть спектром освещенности сенсора $L(\lambda)$. Мы предлагаем использовать эмпирические модели формирования спектра освещенности сенсора – линейную и аффинную.

- Линейная модель: $L(\lambda) = x(\lambda)R(\lambda),$
- Аффинная модель: $L(\lambda) = a(\lambda)R(\lambda) + b(\lambda)$,

здесь λ — длина волны, $L(\lambda)$ — спектр освещенности сенсора, $R(\lambda)$ — спектр отражения поверхности, $x(\lambda), a(\lambda), b(\lambda)$ — параметры моделей. Эмпирической линейной модели может соответсвовать физическая линейная модель формирования спектрального стимула, а эмпирической аффинной — модель искажения изображения туманом.

Вслед за моделями формирования $L(\lambda)$ выводятся соответствующие модели эквализации $L(\lambda)$:

- Линейная модель: $L_{target}(\lambda) = k^l(\lambda) L_{input}(\lambda)$,
- Аффинная модель: $L_{target}(\lambda) = k_1^a(\lambda) L_{input}(\lambda) + k_2^a(\lambda)$,

где L_{input} – спектр освещенности сенсора в исходных условиях съемки, L_{target} – спектр освещенности сенсора в целевых условиях, $k^l(\lambda), k^a_1(\lambda), k^a_2(\lambda)$ – параметры моделей.

Для оценки параметров моделей эквализации предлагается использовать ключи — специальные зоны, совпадающие на обоих снимках и обладающие спектром отражения, мало меняющимся с течением времени. Естественными ключами могут выступать не вегетирующие участки, например асфальт, крыши домов, песок и т.д. Детекция этих зон в нашей работе для проверки производится вручную, однако в будущем интерес представляет исследование возможности использовать в качестве ключей результаты автоматической классификации [12,13]. Также в качестве ключей могут использоваться искусственные объекты, как в работе [14], где на земле расстилались огромные полотна площадью в несколько сотен квадратных метров. Использование искусственных ключей весьма трудоемко.

Аналитический метод вычисления параметров линейной модели требует минимум один ключ [15]:

$$L_{clue}^{n}(\lambda) = x^{n}(\lambda)R_{clue}(\lambda), \qquad L_{clue}^{d}(\lambda) = x^{d}(\lambda)R_{clue}(\lambda),$$

$$L_{test}^{n}(\lambda) = x^{n}(\lambda)R_{test}(\lambda), \qquad L_{test}^{d}(\lambda) = x^{d}(\lambda)R_{test}(\lambda),$$
(1)

$$L_{test}^{n}(\lambda) = \frac{L_{clue}^{n}(\lambda)}{L_{clue}^{d}(\lambda)} L_{test}^{d}(\lambda), \tag{2}$$

где L^n_{clue} — спектр освещенности сенсора, соответствующий области ключа, полученный в целевых условиях, L^d_{clue} — спектр освещенности сенсора, соответствующий области ключа, полученный в исходных условиях, L^n_{test} — спектр освещенности сенсора, соответствующий тестовой области, полученный в целевых условиях, L^d_{test} — спектр освещенности сенсора, соответствующий тестовой области, полученный в исходных условиях, R_{clue} — спектр отражения ключа, R_{test} — спектр отражения тестовой области.

Аналитический метод вычисления параметров аффинной модели требует минимум два ключа:

$$L_{clue1}^{n}(\lambda) = a^{n}(\lambda)R_{clue1} + b^{n}(\lambda), \qquad L_{clue1}^{d}(\lambda) = a^{d}(\lambda)R_{clue1} + b^{d}(\lambda),$$

$$L_{clue2}^{n}(\lambda) = a^{n}(\lambda)R_{clue2} + b^{n}(\lambda), \qquad L_{clue2}^{d}(\lambda) = a^{d}(\lambda)R_{clue2} + b^{d}(\lambda),$$

$$L_{test}^{n}(\lambda) = a^{n}(\lambda)R_{test} + b^{n}(\lambda), \qquad L_{test}^{d}(\lambda) = a^{d}(\lambda)R_{test} + b^{d}(\lambda),$$

$$(3)$$

$$L_{test}^{n}(\lambda) = \frac{L_{clue1}^{n}(\lambda) - L_{clue2}^{n}(\lambda)}{L_{clue1}^{d}(\lambda) - L_{clue2}^{d}(\lambda)} L_{test}^{d}(\lambda) + \frac{L_{clue2}^{n}(\lambda)L_{clue1}^{d}(\lambda) - L_{clue1}^{n}(\lambda)L_{clue2}^{d}(\lambda)}{L_{clue1}^{d}(\lambda) - L_{clue2}^{d}(\lambda)}.$$
 (4)

Аналитический метод 4 обладает неустойчивостью на участках λ , где изображения ключевых областей имеют близкие значения: рис. 1а. Схожая проблема неустойчивости была описана в работе [8] для задачи эмпирической радиометрической калибровки.

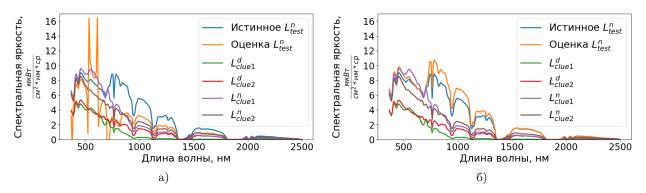


Рис. 1. Эквализация освещенности сенсора по формуле 4, оценка L^n содержит значительные ошибки (а); применение регуляризованной оптимизации (формула 5) позволяет значительно улучшить результат (б).

Мы предлагаем численный метод оценки параметров аффинной модели, в рамках которого вычисление формулы 4 производится в форме оптимизации регуляризованного функционала:

$$\sum_{i=1}^{\#clues} \left\| L_i^d(\lambda) k_1^a(\lambda) + k_2^a(\lambda) - L_i^n(\lambda) \right\|_2 + \alpha \|\nabla k_1^a(\lambda)\|_2 + \beta \|\nabla k_2^a(\lambda)\|_2 \underset{k_1^a(\lambda), k_2^a(\lambda)}{\longrightarrow} \min.$$
 (5)

Такая регуляризация функционала позволяет решить проблему недоопределенности (рис. 16). Другим преимуществом оптимизационной постановки задачи является возможность находить приближенное решение задачи, основанное на любом числе ключей, а не только минимально необходимом.

2.1. Метод эквализации условий съемки

Модели эквализации могут применяться на практике в рамках следующего метода эквализации условий съемки.

- 1. Детектировать зоны-ключи;
- 2. Оценить параметры модели, проведя оптимизацию функционала 5;
- 3. Эквилизировать условия с использованием формулы 4.

В качестве ключей мы предлагаем использовать крыши домов, детектирование которых является хорошо разработанной задачей [16].

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ТОМ 22 № 4 2022

3. ДАННЫЕ

Один из сценариев, при котором эффект эквализации условий съемки может быть хорошо заметен является эквализация снимков, сделанных в сложном освещении, и снимков, сделанных в нормальном освещении. Спутниковые программы зондирования Земли не содержат данных такого типа, так как траектории спутников и время съемки согласуются с движением Солнца. Данных съемки с БПЛА, включающих снимки с разными освещением, в открытом доступе обнаружено не было. Среди данных аэросъемки по уровню доступности и большому объему, включающему многократные пролеты над одной и той же местностью в разных условиях, выделяется программа Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer (AVIRIS) [17]. Сенсор AVIRIS обладает высоким спектральным разрешением (10 нм), функции спектральной чувствительности сенсора являются сравнительно узкими. Это делает данные AVIRIS пригодными для тестирования моделей и методов эквилизации спектра освещенности сенсора. Помимо собственно гиперспектральных изображений предоставляется много дополнительных параметров. Для задачи цветовой константности особенную важность имеет параметр зенитного угла, под которым Солнце освещает поверхность Земли.

Мы отбирали такие пары пролетов над одной и той же местностью, чтобы в одном зенитный угол был маленьким, что предполагает нормальное освещение, а в другом большой, что мы будем считать сложным освещением (рис. 2). Согласно работе [18] в такой задаче как классификация качество постепенно снижается при отклонении угла солнца от зенита и резко падает при углах более 45 градусов.





(а) Нормальное освещение. Дата съемки: 28.05.2014 (b) Сложное освещение. Дата съемки: 07.05.2014

Рис. 2. Фрагменты AVIRIS-снимков одной и той же местности, снятой при разных значениях зенитного угла.

Другим полезным для нашего исследования свойством данных AVIRIS является наличие географических координат для всех снимков. Это значительно упрощает задачу точного выравнивания эквилизируемых снимков для последующей оценки качества моделей и методов. Для тестирования на данных без геопривязки, например данных съемки с БПЛА, требуется предварительно выполнить сопоставление снимков, сделанных в разных условиях освещения [19, 20].

Для эксперимента были выбраны два мультиспектральных снимка, сделанных над югозападом США, штат Калифорния. Даты съемки в нормальном и сложном освещении – 28 и 7
мая 2014 года соответственно. Зенитный угол для нормального освещения составлял 16, 47°, а в
сложном – 48, 75°. Разметка т.н. ключей производилась вручную по двум RGB-изображениям,
полученным на основе данных AVIRIS. Всего было размечено 13 пар областей средней площадью 72 пикселя, в числе которых крыши зданий (3 пары), леса (3 пары), поверхности воды
(3 пары) и прибрежные зоны (4 пары). В данном исследовании в качестве ключевых зон мы
использовали участки леса, исходя из предположения, что за малый промежуток времени
между съемками спектр отражения таких областей не претерпевал существенных изменений.
На рисунке 3 представлены примеры размеченных ключей, представляющих собой пару из
изображений в нормальном и сложном освещении.

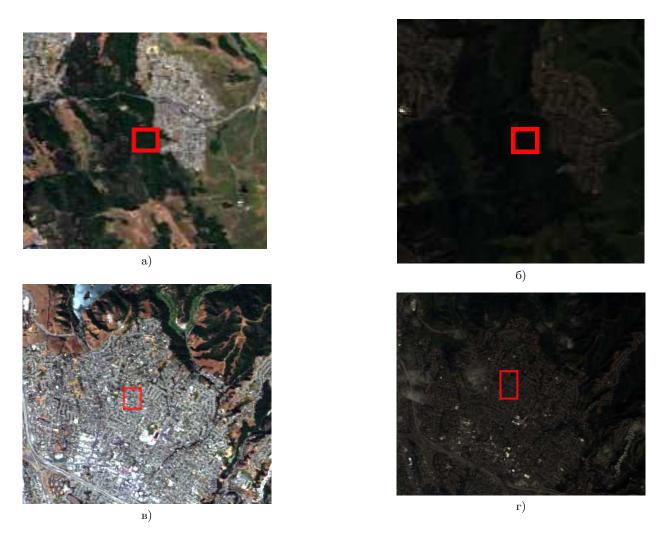


Рис. 3. Примеры зон-ключей выделены красной рамкой: (а, б) - лес в нормальном и сложном освещении, (в, г) - городская застройка в нормальном и сложном освещении.

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты были проведены на изображениях ключевых зон, описанных в предыдущем разделе. Оценка качества включает визуальный анализ спектров освещенности сенсора, а так-

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ТОМ 22 № 4 2022

же вычисление усредненной по исследуемым зонам среднеквадратической ошибки (MSE). Для каждой i-й зоны MSE рассчитывалась следующим образом:

$$MSE_i = \frac{1}{n} \sum_{\lambda} (\widehat{L_i^n}(\lambda) - L_i^n(\lambda))^2,$$

где n — количество каналов гиперспектрального снимка, $\widehat{L_i^n}(\lambda)$ — оценка спектральной яркости i-й зоны, $L_i^n(\lambda)$ — истинное значение спектральной яркости в i-й зоне, усредненное по всем пикселям зоны. Кроме этого вычислялась ошибка, усредненная по всем зонам: $MSE = \frac{1}{k} \sum_i^k MSE_i$, где k — количество исследуемых зон.

Качественная оценка линейной и аффинной моделей показывает, что во многих случаях обе модели позволяют получить полезную оценку, так как результат эквализации находится ближе к референсному спектру освещенности сенсора в нормальных условиях, чем был исходный спектр освещенности в условиях сложного освещения. Примеры представлены на рис. 4.

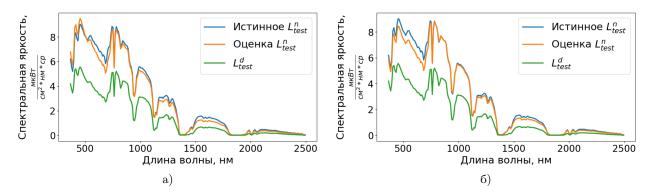


Рис. 4. Примеры эквализации, проведенной на основе линейной (а) и аффинной (б) моделей.

Далее модели были оценены с точки зрения их способности совместно описывать изображения всех ключевых зон. Для этого в задаче 5 множество #clues, по которому идет суммирование, было расширено до множества всех размеченных областей. Среднее значение ошибки для линейной модели составило 0,952, а для аффинной - 0,718.

Также мы протестировали метод эквализации условий освещения. Вместо автоматического детектирования крыш на первом шаге мы использовали два ключа-крыши из размеченного нами вручную набора. Остальные размеченные зоны были использованы для оценки качества. Параметры оценивались на основе аффинной модели. На рисунке 5 представлены примеры эквализации тестовых зон по ключам-крышам. Среднее качество составило 1,132, против уровня 5,195, которым обладают исходные спектры освещенности сенсора, полученные в сложных условиях, до эквализации.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была рассмотрена проблема изменчивости условий съемки, характерная для съемки с БПЛА. Была сформулирована задача эквализации условий съемки. Были рассмотрены эмпирические модели формирования спектра освещенности сенсора и основанные на них модели эквализации. Для оценки параметров моделей было предложено использовать зоны-ключи. Описан регуляризованный численный метод оценки параметров аффинной модели, обладающий устойчивостью в спектральных областях, где изображения ключевых обла-

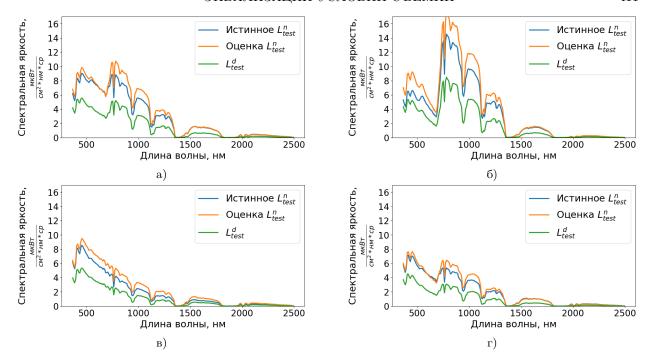


Рис. 5. Примеры результатов работы метода эквализации освещения по ключам-крышам.

стей имеют близкие значения. На основе аффинной модели был предложен метод эквализации освещения.

Для тестирования на базе данных AVIRIS был собран набор снимков, сделанных в нормальных и сложных условиях освещения. Условия освещения определялись углом Солнца при котором велась съемка. На снимках вручную были размечены зоны-ключи. Было показано что обе модели позволяют приблизить исходные спектры освещенности сенсора, полученные в сложных условиях, к целевым спектрам, полученным в нормальных условиях освещения. Аффинная модель оказалась точнее линейной с точки зрения способности совместно описать весь набор ключевых зон. Также было показано что алгоритм эквализации, использующий крыши домов в качестве ключей, позволяет получать полезный результат приближая входные спектры освещенности сенсора к данным, полученным при нормальном освещении, сокращая ошибку в 4,6 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Liu Z., Zhang Y., Yu X., Yuan C. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, 2016, vol. 41, pp. 71-93.
- 2. Николаев П. П. О новых методах оценки цветности освещения в алгоритмах цветовой константности. *Сенсорные системы*, 2007, том 21, № 1, стр. 29-44.
- Belov A. M., Myasnikov V. V. Atmospheric correction of hyperspectral images based on approximate solution of transmittance equation. Seventh international conference on machine vision (icmv 2014), 2015, vol. 9445, pp. 150-154.
- 4. Gao B. C., Heidebrecht K. B., Goetz A. F. H. Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data. *Remote sensing of Environment*, 1993, vol. 44, no. 2-3, pp. 165-178.
- 5. Khan H. A., Thomas J. B., Hardeberg J. Y., Laligant O. Illuminant estimation in multispectral imaging. *JOSA A*, 2017, vol. 34, no. 7, pp. 1085-1098.
- Wiemker R. The Color Constancy Problem in Multispectral Remote Sensing-On the Impact of Surface Orientation on Spectral Signatures. Diss. Universität Hamburg, 1997.

- 7. Tagle Casapia M. X. Study of radiometric variations in Unmanned Aerial Vehicle remote sensing imagery for vegetation mapping. *Lund University GEM thesis series*, 2017.
- 8. Collings S., Caccetta P., Campbell N., Wu X. Empirical models for radiometric calibration of digital aerial frame mosaics. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, vol. 49, no. 7, pp. 2573-2588.
- 9. Bianco S., Schettini R. Color constancy using faces. 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition., 2012, pp. 65-72.
- Kennedy R. E., Cohen W. B., Takao G. Empirical methods to compensate for a view-angle-dependent brightness gradient in AVIRIS imagery. Remote Sensing of Environment, 1997, vol. 62, no. 3, pp. 277-291.
- 11. Smith G. M., Milton E. J. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. *International Journal of remote sensing*, 1999, vol. 20, no. 13, pp. 2653-2662.
- Фирсов Н. А., Подлипнов В. В., Николаев П. П., Машков С. В., Ишкин П. А., Скиданов Р. В., Никоноров А. В. Нейросетевая классификация гиперспектральных изображений растительности с формированием обучающей выборки на основе адаптивного вегетационного индекса. Компьютерная оптика, 2021, том 45, № 6, стр. 887-896
- Shkanaev A. Y., Sholomov D. L., Nikolaev D. P. Unsupervised Domain Adaptation for DNN-based Automated Harvesting. Twelfth International Conference on Machine Vision (ICMV 2019), 2020, vol. 11433, pp. 243-249.
- 14. Liu Y., Wang T., Ma L., Wang N. Spectral calibration of hyperspectral data observed from a hyperspectrometer loaded on an unmanned aerial vehicle platform. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, vol. 7, no. 6, pp. 2630-2638.
- 15. Kordecki A., Bal A. Capturing the best hyperspectral image in different lighting conditions. *Eighth International Conference on Machine Vision (ICMV 2015)*, 2015, vol. 9875, pp. 229-233.
- 16. Тепляков Л. М., Григорьев А. С., Кунина И. А., Гладилин С. А. Апробация подхода к распознаванию объектов, заданных формальным описанием наблюдаемых свойств, на примере задачи поиска объектов на аэрофотоснимках. *Сенсорные системы*, 2018, том 32, №3, стр. 260-268.
- 17. Airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). Source: https://aviris.jpl.nasa.gov/
- 18. Kerekes J. P., Landgrebe D. A. Simulation of optical remote sensing systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, vol. 27, no. 6, pp. 762-771.
- 19. Волков В.В., Швец Е.А. Набор данных и метод для оценки алгоритмов сопоставления оптических и радиолокационных изображений на основе устойчивых точек. *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2021, № 2, стр. 44-57.
- 20. Волков В.В. Модифицирование метода поиска и дескрибирования устойчивых точек sift для сопоставления оптических и радиолокационных изображений. *Сенсорные системы*, 2022, том 36, № 4, стр. 349-365.

Equilization of shooting conditions based on spectral models for the needs of precision farming using UAVs

M.A. Pavlova, D.S. Sidorchuk, D.O. Kushchev, D.S. Bocharov, D.P. Nikolaev

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are a widely used data source for monitoring the condition of agricultural parcels. Unlike satellite imagery, where satellite often have a sun-synchronous trajectory, UAV data can be characterized by a large variability in shooting conditions, which complicates data analytics. In this paper, we consider the problem of equalizing the shooting conditions of a hyperspectral image using special spatial image zones (keys), for which the values obtained under the target conditions are known. It is shown that the affine irradiance model on the test dataset is more accurate than the linear one. For the analytical

method of calculating the parameters of the affine model, the presence of instability in the spectral regions, in which the images of key regions have close values, is shown. A regularized numerical method for estimating the parameters of an affine model is proposed that does not have this drawback. On the basis of the affine model, a new equalization method is proposed that makes it possible to bring images obtained under initial conditions closer to images obtained under target conditions, reducing the error by 4.6 times. For the experimental study of the models and the equalization method, a special dataset was prepared, consisting of AVIRIS hyperspectral images obtained for the same area in very different lighting conditions.

KEYWORDS: remote sensing, illumination equalization, empirical correction, unmanned aerial vehicle