

Труды МАИ. 2024. № 135  
Trudy MAI, 2024, no. 135

Научная статья

УДК 629.7

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179699>

## **ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЭМПИРИЧЕСКОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ДЛЯ ВИКАРИОЗНОЙ КАЛИБРОВКИ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ БПЛА**

**Амида Джабраиль гызы Алиева**

Национальное аэрокосмическое агентство,

Баку, Азербайджанская Республика

[amidec.b@mail.ru](mailto:amidec.b@mail.ru)

*Аннотация.* В настоящее время для обработки изображений, полученных с БПЛА, в частности для получения из данных, относящихся к оптической радиации, данные о коэффициентах отражения широко используется метод эмпирической линеаризации. Суть этого метода заключается в размещении на специальных полигонах калибрационных панелей и получении на этой основе линейных соотношений между DN (т.е. первичными цифровыми отсчетами) и коэффициентами отражения при условии наличия данных об отражательных характеристиках этих панелей. Для наилучшей аппроксимации линейной зависимости используется пара таких панелей, одна светлая, другая темная Рассмотрена возможность применения двухпанельного эмпирического метода линеаризации применительно к мультиспектрометру с достаточно большим количеством спектральных каналов. Суть двухточечного (двухпанельного) метода заключается в преобразовании цифровых отсчетов в

показатель (коэффициент) отражения. Реализация этого метода предусматривает выполнение следующих операций:(1) Нормализация цифровых отсчетов по следующей формуле.(2) Перевод  $DC_{norm}$  каждого пикселя в коэффициент отражения объекта. Предложен адаптивный режим работы мультиспектрометра при котором время экспозиции фиксированного пикселя на используемом спектральном канале зависит от некоторого технологического показателя  $b_i/g_i$ , а также определяет величину  $DN_{raw}$ . При этом на входе мультиспектрометра устанавливается жидкокристаллический преобразователь, последовательно формирующий на выходе гармоники входного сигнала с управляемым временем экспозиции. Оптимизирован процесс последовательного формирования узкополосных коэффициентов отражения исследуемых объектов при калибровке мультиспектрометра, калибруемого с помощью двух (светлого и темного) калибровочных панелей.

Решена оптимизационная задача применительно к мультиспектрометру с последовательной оцифровкой и формированием спектральных каналов на базе жидкокристаллического преобразователя, суть которой заключается в достижении вычисленной усредненной по спектру величина коэффициента отражения максимального значения.

**Ключевые слова:** БПЛА, эмпирический метод линеаризации, жидкокристаллический преобразователь, радиометрические измерения, калибрация

**Для цитирования:** Алиева Амида Джабраиль гызы. Вопросы оптимизации применения метода эмпирической линеаризации для викариозной калибровки радиометрической аппаратуры БПЛА // Труды МАИ. 2024. № 135. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179699>

Original article

## ISSUES OF OPTIMIZING THE APPLICATION OF THE EMPIRICAL LINEARIZATION METHOD FOR VICARIOUS CALIBRATION OF UAV RADIOMETRIC EQUIPMENT

**Amida J. Aliyeva**

National Aerospace Agency,  
Baku, Republic of Azerbaijan  
[amidec.b@mail.ru](mailto:amidec.b@mail.ru)

**Abstract.** Currently, the empirical linearization method is widely applied to process images obtained from the UAVs, in particular to obtain data on reflection coefficients from optical radiation data. The gist of this method consists in placing calibration panels on special polygons and obtaining on this basis linear ratios between the DN (i.e. primary digital readings) and reflection coefficients, provided that data on the reflective characteristics of these panels are available. To ensure the best approximation of the linear dependence, a pair of such panels is employed: one is light, and the other is dark. The author regarded the possibility of applying a two-panel empirical linearization method in relation to a multispectrometer with a sufficiently large number of spectral channels. The gist of the two-point (two-panel) method consists in converting digital samples into an indicator (coefficient) of reflection. This method realization involves the following operations: (1)

Digital counts normalizing according to the following formula. (2) Converting the  $DC_{norm}$  of each pixel into the reflection coefficient of the object. The author proposed an adaptive mode of a multispectrometer operation, in which the exposure time of a fixed pixel on the spectral channel used depends on some technological indicator  $b_i/g_i$ , as well as determines the value of the  $DN_{raw}$ . A liquid crystal converter herewith is installed at the input of the multispectrometer, forming sequentially harmonics of the input signal with a controlled exposure time at the output. The process of sequential formation of narrow-band reflection coefficients of the studied objects is optimized during calibration of a multispectrometer calibrated by the two (light and dark) calibration panels. An optimization problem has been solved in relation to a multispectrometer with sequential digitization and formation of spectral channels based on a liquid crystal converter, which essence consists in reaching the computed spectrum-averaged value of the reflection coefficient of the maximum value.

**Keywords:** UAV, empirical linearization method, liquid crystal converter, radiometric measurements, calibration

**For citation:** Aliyeva Amida J. Issues of optimizing the application of the empirical linearization method for vicarious calibration of UAV radiometric equipment. *Trudy MAI*, 2024, no. 135. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=179699>

## Введение

Беспилотные летательные аппараты открыли новую эру в проведении мониторинга окружающей среды в локальном масштабе. На борту БПЛА могут быть установлены малогабаритные мультиспектральные и гиперспектральные приборы,

позволяющие получить изображения с высоким пространственным разрешением для оценки воздействия различных опасностей [1, 2], осуществления контроля состояния окружающей среды [3–5], управления природными ресурсами [6–8] и др. Хорошо известно, что для получения высокого пространственного разрешения БПЛА, оснащенные сканирующей спектрорадиометрической аппаратурой, летят на низких высотах, где влиянием атмосферы можно пренебречь [1-4]. В настоящее время для обработки изображений, полученных с БПЛА, в частности для получения из данных, относящихся к оптической радиации, данные о коэффициентах отражения широко используется метод эмпирической линеаризации [5-7]. Суть этого метода заключается в размещении на специальных полигонах калибрационных панелей и получении на этой основе линейных соотношений между DN (т.е. первичными цифровыми отсчетами) и коэффициентами отражения при условии наличия данных об отражательных характеристиках этих панелей. Для наилучшей аппроксимации линейной зависимости используется пара таких панелей, одна светлая, другая темная [8]. Вместе с тем, отметим, что существуют работы, согласно которым линейная зависимость существует между необработанными значениями DN и величиной коэффициента отражения, а для калибровки достаточно использовать одну панель [9].

Для проведения радиометрических измерений с применением БПЛА компанией MicaSense разработан малогабаритный мультиспектрометр “MicaSense RedEdge” позволяющий осуществить одновременную съемку на пяти фиксированных оптических диапазонах. Этот прибор содержит также узел, измеряющий на этих же диапазонах оптическую нисходящую радиацию. Измерения осуществляются на синем (475 нм); зеленом (560 нм); красном (668 нм), в конце красного диапазона (717

нм) и на ближнем ИК диапазоне (840 нм) при полуширине окна пропускания (10-40 нм).

Согласно [10], на вход сенсора поступает следующая суммарная радиация:

$$L_s(\lambda) = \left[ \frac{E'_{solar}(\lambda)}{\pi} \cos(\sigma') \tau_1(\lambda) \rho(\lambda) + L_{\downarrow solar}(\lambda) \cdot \rho_d(\lambda) \right] \cdot \tau_2(\lambda) + L_{\uparrow solar}(\lambda) + L_a \quad (1)$$

где:  $E'_{solar}(\lambda)$ -внеатмосферная солнечная спектральная радиация;  $\sigma'$ -угол подъёма Солнца;  $\tau_1(\lambda)$ -коэффициент спектрального пропускания на дистанции “небо-объект”,  $\tau_2(\lambda)$ -коэффициент спектрального пропускания на дистанции “объект-сенсор”;  $\rho(\lambda)$ -функция направленного спектрального диффузного отражения объекта;  $\rho_d(\lambda)$ -спектральное диффузное отражение объекта;  $L_{\downarrow solar}$ -небесная диффузная нисходящая радиация в сторону объекта;  $L_{\uparrow solar}(\lambda)$ -солнечная спектральная рассеянная радиация возникающая между объектом и сенсором;  $L_a(\lambda)$ -радиация рассеянная близлежащими объектами, расположенными вблизи исследуемого объекта. Действующая величина входной радиации каждого диапазона вычисляется путем интегрирования (1) с учетом спектральных ответных функций [11]. Далее, в настоящей статье рассматривается возможность оптимизации двухпанельного варианта метода эмпирической линеаризации.

## Материалы и методы

Суть двухточечного (двухпанельного) метода заключается в преобразовании цифровых отсчетов в показатель (коэффициент) отражения. Реализация этого метода предусматривает выполнение следующих операций:

Нормализация цифровых отсчетов по следующей формуле, выполняемая для каждого из диапазонов.

$$DC_{norm} = DC_{raw} \left( \frac{t_{min}}{t} \right) \left( \frac{g_{min}}{g} \right) \left( \frac{2^n - 1}{2^m - 1} \right) \quad (2)$$

где  $DC_{raw}$ -величина цифрового отсчета для каждого пикселя;  $t_{min}$ -наименьше возможная величина времени экспозиции сенсора, равная 0,066 тс;  $t$ -время экспозиции текущего кадра;  $g_{min}$ -минимальное усиление сенсора;  $g$ -текущее усиление при воспроизведении кадра;  $n$ -количество битов в нормализованном цифровом от счете;  $m$ -количество битов в сенсоре.

Перевод  $DC_{norm}$  каждого пикселя в коэффициент отражения объекта осуществляется по формулам

$$\rho = b_1 DC_{norm} + b_0 \quad (3)$$

$$b_1 = \frac{\rho_{bright} - \rho_{dark}}{DC_{norm,bright} - DC_{norm,dark}} \quad (4)$$

$$b_0 = \rho_{bright} - b_1 DC_{norm,bright} \quad (5)$$

где индексы “bright” и “dark” обозначают принадлежность к светлой и соответственно, темной калибрационной панели.

Рассмотрим предлагаемую схему оптимизации проведения радиометрических измерении в плане осуществления двухпанельной (двухточечной) калибровки.

Приняв  $b_1 = const$  с учетом (2) и (3) напишем

$$\rho = b_1 DC_{raw} \left( \frac{t_{min}}{t} \right) \left( \frac{g_{min}}{g} \right) \left( \frac{2^n - 1}{2^m - 1} \right) \quad (6)$$

Далее, для определенного  $i$ -го спектрального диапазона и фиксированного пикселя выражение (6) перепишем как

$$\rho_i = \frac{\gamma_i A_i}{t_i} \quad (7)$$

где

$$\gamma_i = b_i \cdot \frac{DC_{raw}}{g_i} \quad (8)$$

$$A_i = (t_{min})(g_{min}) \left( \frac{2^n - 1}{2^m - 1} \right) \quad (9)$$

$$A_i = const = C_i$$

Далее, допустим, величина  $t$  может принимать значения из некоторого упорядоченного множества

$$T = \{t_i\}; i = \overline{1, n} \quad (10)$$

где  $t_i = t_{i-1} + \Delta t$ ;  $\Delta t = const$ ;  $t_0 = 0$ .

Также допустим наличие упорядоченного множества

$$y = \{\gamma_i\} \quad (11)$$

где

$$\gamma_i = \gamma_{i-1} + \Delta \gamma; \Delta \gamma = const; \gamma_0 = 0 \quad (12)$$

Введем на рассмотрение функцию адаптивного управления

$$t_i = \psi(\gamma_i) \quad (13)$$

которая устанавливается для некоторого фиксированного пикселя время экспозиции.

Далее, потребуем, что для выбранного некоторого пикселя выполнялся условие

$$\sum_{i=1}^n t_i = C_1; C_1 = const \quad (14)$$

Условие (14) физически означает, что суммарное время последовательно выполняемой экспозиции спектральных диапазонов не должна превышать величину  $C_1$ . При этом, рассматривается модель применения двухточечной методики не

конкретно для “Mica Sense” а для мультиспектрометра с числом каналов  $n \gg 5$ , включая и гиперспектрометры, у которых число каналов может достигать несколько сотен.

При этом на входе мультиспектрометра устанавливается жидкокристаллический преобразователь, последовательно формирующий на выходе гармоники входного сигнала с управляемым временем экспозиции. Очевидно, что режим управляемого времени экспозиции каналов может быть создано и другими техническими средствами и этот вопрос в статье далее не обсуждается.

С учетом вышеизложенного, сумма спектральных коэффициентов отражения может быть определена как

$$\rho_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i A_i}{\psi(\gamma_i)} \quad (15)$$

Применительно к условию  $n \rightarrow \infty$  модели (14) и (15) запишем в непрерывном виде,

$$\rho_0 = \frac{1}{\gamma_{max}} \int_0^{\gamma_{max}} \frac{\gamma A}{\psi(\gamma)} d\gamma \quad (16)$$

где  $\rho_0$ -широкополосная усредненная величина коэффициента отражения;  $\gamma_{max}$ -максимально возможная величина  $\gamma$ ;

$$\int_0^{\gamma_{max}} \psi(\gamma) d\gamma = C_2; C_2 = const \quad (17)$$

С учетом выражений (16) и (17) сформулируем вариационную оптимизационную задачу, целевой функционал  $F$  которого имеет вид

$$F = \frac{1}{\gamma_{max}} \int_0^{\gamma_{max}} \frac{\gamma A}{\psi(\gamma)} d\gamma + \lambda \left[ \int_0^{\gamma_{max}} \psi(\gamma) d\gamma - C_2 \right] \quad (18)$$

Согласно [12], решение оптимизационной задачи (18) должно удовлетворить условию

$$\frac{d\left\{\frac{\gamma A}{\gamma_{max}\psi(\gamma)} + \lambda\psi(\gamma)\right\}}{d\psi(\gamma)} = 0 \quad (19)$$

Из условия (19) получим

$$-\frac{\gamma A}{\gamma_{max}\psi(\gamma)^2} + \lambda = 0 \quad (20)$$

Из выражения (20) находим

$$\psi(\gamma) = \sqrt{\frac{\gamma A}{\lambda\gamma_{max}}} \quad (21)$$

С учетом (17) и (21) получим

$$\int_0^{\gamma_{max}} \sqrt{\frac{\gamma A}{\lambda\gamma_{max}}} d\gamma = C_2 \quad (22)$$

Из выражения (22) получим

$$\sqrt{\lambda} = \frac{1}{C_2} \int_0^{\gamma_{max}} \sqrt{\frac{\gamma A}{\lambda\gamma_{max}}} d\gamma = \sqrt{\frac{A}{\gamma_{max}}} \cdot \frac{2\gamma_{max}^{\frac{3}{2}}}{3C_2} = \frac{2\sqrt{A}\gamma_{max}}{3C_2} \quad (23)$$

Из (23) находим

$$\lambda = \frac{4A\gamma_{max}^2}{9C_2^2} \quad (24)$$

С учетом (21) и (24) находим

$$\psi(\gamma) = \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{max} \frac{4\gamma_{max}^2}{9C_2^2}}} = \frac{3\sqrt{\gamma}C_2}{2\gamma_{max}} \quad (25)$$

При решении (25) функционал  $F$  достигает минимума, т.к. производная (20) по  $\psi(\gamma)$  является всегда положительной величиной.

## Обсуждение

Таким образом, рассмотрена возможность применения двухточечного эмпирического метода линеаризации применительно к мультиспектрометру с достаточно большим количеством спектральных каналов. Предложен адаптивный режим работы мультиспектрометра при котором время экспозиции фиксированного пикселя на некотором спектральном канале зависит от некоторого технологического показателя  $b_i/g_i$ , а также определяет величину  $DC_{raw}$ . Поставлена и решена оптимизационная задача применительно к мультиспектрометру с последовательной оцифровкой и формированием спектральных каналов на базе жидкокристаллического преобразователя, суть которой заключается в вычисленной усредненной по спектру величина коэффициента отражения достигает максимального значения.

## Заключение

1. Сформулирована и решена задача применения двухточечного варианта викариозной калибровки радиометрической спектральной аппаратуры, устанавливаемой на борту БПЛА.
2. Оптимизирован процесс последовательного формирования узкополосных коэффициентов отражения исследуемых объектов при калибровке мультиспектрометра, калибруемого с помощью двух (светлого и темного) калибровочных панелей.
3. Определен адаптивный режим мультиспектрометра снабженного на входе жидкокристаллическим последовательным монохроматором, суть которого состоит в адаптивном изменении времени экспозиции в зависимости от технологического показателя  $b_i/g_i$  а также  $DN_{raw}$ .

4. Определена оптимальный вид вновь введенный функции  $t = \psi(\gamma)$ , при которой усредненная по спектру широкополосная величина коэффициента отражения объекта достигает максимума.

#### Список источников

1. Aanstoos J.V., Hasan K., Ohara C.G., Prasad S., Dabbiru L., Mahrooghy M., Nobrega R., Lee M., Shrestha B. Use of remote sensing to screen earthen levees // In proc. of the 2010 IEEE 39<sup>th</sup> applied imagery pattern recognition workshop (AIPR), IEEE, 2010. pp. 1-6.
2. Антонов Д.А., Жарков М.В., Кузнецов И.М., Лунев Е.М., Пронькин А.Н. Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения и инерциальных измерений // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=75632>
3. Ананенков А.Е., Марин Д.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В. К вопросу о наблюдении малоразмерных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75662>
4. Frew E.W., Elston J., Argrow B., Houston A., Rasmussen E. Sampling severe local storms and related phenomena: using unmanned aircraft systems // IEEE Robotics & Automation Magazine, 2012, vol. 19, pp. 85-95. DOI: [10.1109/MRA.2012.2184193](https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2184193)
5. Агринский М.В., Голицин А.В., Старцев В.В. Проект комплекса гиперспектрального дистанционного зондирования земель с помощью БПЛА // Фотоника. 2019. Т. 13. № 6. С. 564-568

6. Каримов А.Х. Цели и задачи, решаемые беспилотными авиационными комплексами нового поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26767>
7. Каримов А.Х. Возможности беспилотных авиационных систем следующего поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26768>
8. Кривичев А.И., Заленкий А.В. Беспилотные авиационные технологии мониторинга сфер человеческой деятельности на примере крупнейших производителей и эксплуатантов в России // Известия Высших Учебных Заведений. Геодезия и Аэрофотосъемка. 2018. Т. 62. № 2. С. 186-195.
9. Messina G., Pena J.M., Vizzari M., Modica G. A comparison of UAV and satellites multispectral imagery in monitoring onion crop. An application in the “cipolla rossa di tropea” (Italy) // Remote sensing, 2020, vol. 12, pp. 3424. DOI: [10.3390/rs12203424](https://doi.org/10.3390/rs12203424)
10. Wang Y., Ryu D., Park S., Fuentes S., Oconnell M. Upscaling UAV-borne high resolution vegetation index to satellite resolutions over a vineyard // In proceedings of the 22<sup>nd</sup> international congress on modelling and simulation (MODSIM2017), Hobart, Australia, 3-8 december 2017, pp. 978-984.
11. Lukas V., Novak J., Neudert L., Svobodova I., Rodriguez-Moreno F., Edrees M., Kren J. The combination of UAV survey and Landsat imagery for monitoring of crop vigor in precision agriculture // The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B8, 2016, pp. 953-957. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLI-B8-953-2016](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B8-953-2016)

12. Kavvadias A., Psomiadis E., Chanioti M., Gala E., Michas S. Precision agriculture comparison and evaluation of innovative very high resolution (UAV) and Landsat data // Conference: International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture Food and Environment-HAICTA, 2015, vol. 1498, pp. 376-386.
13. Iqbal F., Lucieer A., Barry K. Simplified radiometric calibration for UAS-mounted multispectral sensor // European Journal of Remote Sensing, 2018, pp. 301-313. DOI: [10.1080/22797254.2018.1432293](https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1432293)
14. Pozo S.D., Rodriguez-Gonzalvez P., Hernandez-Lopez D., Felipe-Garcia B. Vicarious radiometric calibration of multispectral camera on board unmanned aerial system // Remote Sensing, 2014, vol. 6 (3), pp. 1918-1937. DOI: [10.3390/rs6031918](https://doi.org/10.3390/rs6031918)
15. Lei D., Hao X., Mao Z., Yan Y., Jie S., Zhang A. A subband radiometric calibration method for UAV-based multispectral remote sensing // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, vol. 11, no. 8, pp. 2869-2880. DOI: [10.1109/JSTARS.2018.2842466](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2842466)
16. Baugh W., Groeneveld D. Empirical proof of the empirical line // International journal of Remote Sensing, 2008, vol. 29 (3), pp. 665-672. DOI: [10.1080/01431160701352162](https://doi.org/10.1080/01431160701352162)
17. Wang C., Myint S.W. A simplified empirical line method of radiometric calibration for small unmanned aircraft systems-based remote sensing // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, vol. 8 (5), pp. 1876-1885. DOI: [10.1109/JSTARS.2015.2422716](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2422716)
18. Schott J. Remote sensing: the image chain approach, Oxford university press, USA, 2007, 666 p.

19. Mamaghani B.G., Sasaki G.V., Connal R.J., Kha K., Knappen J.S. et al. An initial exploration of vicarious and in-scene calibration techniques for small unmanned aircraft systems // *Electrical Engineering and Systems Science*, 2018. DOI: [10.1117/12.2302744](https://doi.org/10.1117/12.2302744)
20. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. - М.: Наука, 1974. - 432.с.

## References

1. Aanstoos J.V., Hasan K., Ohara C.G., Prasad S., Dabbiru L., Mahrooghy M., Nobrega R., Lee M., Shrestha B. Use of remote sensing to screen earthen levees, *In proc. of the 2010 IEEE 39th applied imagery pattern recognition workshop (AIPR)*, IEEE, 2010. pp. 1-6.
2. Antonov D.A., Zharkov M.V., Kuznetsov I.M., Lunev E.M., Pron'kin A.N. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75632>
3. Ananenkov A.E., Marin D.V., Nuzhdin V.M., Rastorguev V.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75662>
4. Frew E.W., Elston J., Argrow B., Houston A., Rasmussen E. Sampling severe local storms and related phenomena: using unmanned aircraft systems, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2012, vol. 19, pp. 85-95. DOI: [10.1109/MRA.2012.2184193](https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2184193)
5. Agrinskii M.V., Golitsin A.V., Startsev V.V. *Fotonika*, 2019, vol. 13, no. 6, pp. 564-568.
6. Karimov A.Kh. *Trudy MAI*, 2011, no. 47. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26767>
7. Karimov A.Kh. *Trudy MAI*, 2011, no. 47. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26768>

8. Krivichev A.I., Zalenkii A.V. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Geodeziya i Aerofotos'emka*, 2018, vol. 62, no. 2, pp. 186-195.
9. Messina G., Pena J.M., Vizzari M., Modica G. A comparison of UAV and satellites multispectral imagery in monitoring onion crop. An application in the “cipolla rossa di tropea” (Italy), *Remote sensing*, 2020, vol. 12, pp. 3424. DOI: [10.3390/rs12203424](https://doi.org/10.3390/rs12203424)
10. Wang Y., Ryu D., Park S., Fuentes S., Oconnell M. Upscaling UAV-borne high resolution vegetation index to satellite resolutions over a vineyard, *In proceedings of the 22nd international congress on modelling and simulation (MODSIM2017)*, Hobart, Australia, 3-8 december 2017, pp. 978-984.
11. Lukas V., Novak J., Neudert L., Svobodova I., Rodriguez-Moreno F., Edrees M., Kren J. The combination of UAV survey and Landsat imagery for monitoring of crop vigor in precision agriculture, *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B8, 2016, pp. 953-957. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLI-B8-953-2016](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B8-953-2016)
12. Kavvadias A., Psomiadis E., Chanioti M., Gala E., Michas S. Precision agriculture comparison and evaluation of innovative very high resolution (UAV) and Landsat data, *Conference: International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture Food and Environment-HAICTA*, 2015, vol. 1498, pp. 376-386.
13. Iqbal F., Lucieer A., Barry K. Simplified radiometric calibration for UAS-mounted multispectral sensor, *European Journal of Remote Sensing*, 2018, pp. 301-313. DOI: [10.1080/22797254.2018.1432293](https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1432293)

14. Pozo S.D., Rodriguez-Gonzalvez P., Hernandez-Lopez D., Felipe-Garcia B. Vicarious radiometric calibration of multispectral camera on board unmanned aerial system, *Remote Sensing*, 2014, vol. 6 (3), pp. 1918-1937. DOI: [10.3390/rs6031918](https://doi.org/10.3390/rs6031918)
15. Lei D., Hao X., Mao Z., Yan Y., Jie S., Zhang A. A subband radiometric calibration method for UAV-based multispectral remote sensing, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, vol. 11, no. 8, pp. 2869-2880. DOI: [10.1109/JSTARS.2018.2842466](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2842466)
16. Baugh W., Groeneveld D. Empirical proof of the empirical line, *International journal of Remote Sensing*, 2008, vol. 29 (3), pp. 665-672. DOI: [10.1080/01431160701352162](https://doi.org/10.1080/01431160701352162)
17. Wang C., Myint S.W. A simplified empirical line method of radiometric calibration for small unmanned aircraft systems-based remote sensing, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, vol. 8 (5), pp. 1876-1885. DOI: [10.1109/JSTARS.2015.2422716](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2422716)
18. Schott J. *Remote sensing: the image chain approach*, Oxford university press, USA, 2007, 666 p.
19. Mamaghani B.G., Sasaki G.V., Connal R.J., Kha K., Knappen J.S. et al. An initial exploration of vicarious and in-scene calibration techniques for small unmanned aircraft systems, *Electrical Engineering and Systems Science*, 2018. DOI: [10.1117/12.2302744](https://doi.org/10.1117/12.2302744)
20. El'sgol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie* (Differential equations and calculus of variations), Moscow, Nauka, 1974, 432 p.

Статья поступила в редакцию 02.04.2024

Одобрена после рецензирования 06.04.2024

Принята к публикации 26.04.2024

The article was submitted on 02.04.2024; approved after reviewing on 06.04.2024; accepted for publication on 26.04.2024