



Научная статья

УДК 631.39

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188282>

EDN: <https://www.elibrary.ru/EZCAOU>

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ СПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ЗОНДИРОВАНИЯ, УСТАНОВЛЕННОЙ НА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ

Х.Г. Асадов✉, М.А. Мехтиев, Х.С. Алиева

Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджана,

г. Баку, Азербайджан

✉ asadzade@rambler.ru

Цитирование: Асадов Х.Г., Мехтиев М.А., Алиева Х.С. Вопросы оптимизации радиометрической калибровки спектральной аппаратуры зондирования, установленной на беспилотных летательных аппаратах // Труды МАИ. 2026. № 148. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188282>

Аннотация. Сформулирована методика эмпирической калибровки радиометрической аппаратуры беспилотных летательных аппаратов для идентификации некоторого подкласса объектов на земной поверхности, для которых справедливо определённое ограничительное условие в заданном диапазоне длин волн. Принимается, что для объекта указанного подкласса известно эмпирическое регрессионное уравнение, пригодное для радиометрической калибровки. Признаком обнаружения или идентификации такого объекта является достижение целевым функционалом минимума при заданном ограничительном условии. Если при удовлетворении ограничительного условия целевой функционал достигает минимума, то это означает обнаружение или идентификацию искомого объекта. Предложен метод обнаружения или идентификации объектов некоторого подкласса, базирующийся на результатах радиометрической калибровки объектов указанного подкласса и регрессионном уравнении, справедливом для данного подкласса объектов.

При этом, искомый объект считается идентифицированным, если функционал безусловной вариационной оптимизации, достигает минимума при вычисленном аналитическом выражении для первичных цифровых отсчетов в зависимости от длины волны.

Ключевые слова: БПЛА; радиометрия; измерения; калибровка; идентификация объектов.

OPTIMIZATION PROBLEMS OF RADIOMETRIC CALIBRATION FOR SPECTRAL SENSING INSTRUMENTS ON UAVs

H.G. Asadov✉, M.A. Mekhtiev, H.S. Aliyeva

National Aerospace Agency of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

✉ asadzade@rambler.ru

Citation: Asadov H.G., Mekhtiev M.A., Aliyeva H.S. Optimization problems of radiometric calibration for spectral sensing instruments on UAVs // Trudy MAI. 2026. No. 148. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188282>

Abstract. A methodology for empirical calibration of radiometric equipment installed on unmanned aerial vehicles has been formulated to identify a certain subclass of objects on the Earth's surface, for which a specific constraint condition holds within a given wavelength range. It is assumed that for an object of the specified subclass, an empirical regression equation suitable for radiometric calibration is known. The indicator of detection or identification of such an object is the minimization of the objective functional under the given constraint condition. If the objective functional reaches a minimum while satisfying the constraint condition, this indicates the detection or identification of the target object. A method for detecting or identifying objects of a certain subclass has been proposed; it is based on the results of radiometric calibration of objects of the specified subclass and on a regression equation valid for this subclass of objects.

In this case, the target object is considered to be identified if the functional of unconstrained variational optimization reaches a minimum for the calculated analytical expression of the primary digital samples as a function of wavelength.

Keywords: UAVs; radiometry; measurements; calibration; object identification.

Введение

Успешное выполнение разведывательной функции беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в значительной мере зависит от внедрения тех классических методов и способов, которые были разработаны в рамках решения задач дистанционного зондирования с применением БПЛА. Например, в работах [1-3] рассмотрены задачи исследования развития растительности с помощью БПЛА, на борту которого установлена мультиспектральная камера, в работах [4, 5] рассмотрены вопросы использования указанной аппаратуры для контроля природных разрушительных процессов, для контроля состояния окружающей среды [6, 7], для решения экологических задач сельскохозяйственного производства [8-11]. Освещены проблемы оптимизации и синтеза многофункциональных беспилотных летательных аппаратов с учетом воздействия шумов [12], а также вопросы оптимизации расположения центра приема и управления разведывательными БПЛА с учетом отражений от городских застроек [13]. В работе [14] рассмотрены вопросы разработки беспилотных летательных манипуляторов и особенности их функционирования. Построение оптимальных режимов функционирования БПЛА в беспроводных сетях передачи информации рассмотрены в [15].

Вместе с тем, решение различных задач в указанных областях науки и техники с применением БПЛА возможно при должной калиброванной и радиометрических каналов зондирующей аппаратуры установленной на борту летательного аппарата.

Общеизвестно, что успех разведывательной миссии БПЛА во многом зависит от успешного выполнения следующих требований:

- корректного выполнения требований к точности геолокации изучаемого объекта;
- успешной работы систем телекоммуникации, установленной на борту БПЛА (систем телеметрии);
- успешной работы силовых и энергетических узлов БПЛА;
- необходимой точности радиометрической аппаратуры, установленной на борту БПЛА;

–успешной работы узла управления, установленного на борту БПЛА.

Невыполнение одного из вышеуказанных требований неминуемо приводит к срыву успешного выполнения разведывательной функции БПЛА.

В настоящей работе рассматриваются вопросы обеспечения успешной работы разведывательного БПЛА в отношении выполнения требований к радиометрической аппаратуре, установленной на борту летательного аппарата, в частности к калибровке радиометрических узлов.

Как отмечается в работе [16], коррекция сигналов радиометрической аппаратуры, установленной на борту БПЛА дистанционного зондирования, включает такие операции, как устранение шумов путем учета сигнала «черного» канала, попиксельная корректировка сигнала, корректировка влияния дисторсии линз. При этом радиометрическая калибровка была осуществлена методом эмпирической линейной калибровки на базе построения линейной модели исходных данных. Согласно [16] радиометрическая калибровка улучшает качество полученных данных и содействует проведению их точного количественного анализа.

Согласно [17] качество изображений, получаемых с помощью БПЛА, зависит от погодных условий, положения Солнца. Для устранения соответствующих радиометрических искажений получаемых изображений в работе [17] предложен метод относительной радиометрической калибровки, который позволяет обеспечить высокую яркостную точность исходных отсчетов (DN) по всему полю полученного изображения.

Как отмечается в работе [18], традиционный метод эмпирической линейной калибровки радиометрических каналов не учитывает существующую корреляцию между сигналами различных каналов при большом числе таких каналов. Предлагаемый метод учета указанной корреляции позволяет повысить точность радиометрической калибровки до 3% в видимом диапазоне и до 12% в инфракрасном диапазоне.

В работе [19] сравнение двух методов радиометрической калибровки: эмпирического линейного метода и использование наземной серой панели показало, что при полетах БПЛА на большой высоте первый метод дает более удовлетворительные

результаты, тогда как при ясной погоде использование эталонной наземной калибровочной панели более выгодно. При облачной погоде необходимо применять более сложные методы, рассмотренные в [4].

Согласно работе [20] ценность радиометрической информации, т.е. разведывательной информации, полученной с помощью радиометрической аппаратуры, установленной на БПЛА, во многом зависит от установленного порядка соответствия между исходными отсчетами и коэффициентом отражения (альбедо) исследуемых наземных объектов.

Согласно работе [20] для качественного решения задачи радиометрической калибровки необходимо решение следующих подзадач:

- выбор оптимальных целей для калибровки;
- оценить влияние калибровки на мозаичные изображения;
- обосновать применение универсального уравнения калибровки, учитывающей влияние самой камеры и атмосферного ослабления.

В настоящей работе мы проанализируем предполагаемую связь между радиометрической калибровкой и задачей идентификации определенных земных объектов.

Известны работы [21, 22], посвященные оптимизации метода эмпирической калибровки радиометрического канала БПЛА, в которых изложены процедуры оптимизация линеаризованной модели экспоненциальных зависимостей между исходными DN и альбедо исследуемого земного объекта. Однако для данных работ свойственна методическая ошибка, заключающаяся в том, что не учтена спектральная зависимость существующих в эмпирических уравнениях модельных коэффициентов.

В настоящей работе сделана попытка устранения данного недостатка и построена оптимальная модель уравнения калибровки.

Материалы и методы

В работах [23] и [24] приведены эмпирические регрессионные уравнения, которые могут быть представлены в качестве калибрационных уравнений RGB измерителя:

Так, для красного (R) диапазона, согласно [23], имеет место следующее уравнение:

$$Y = 0,032 \exp(0,014 DN), \quad (1)$$

где Y – альbedo исследуемой земной поверхности.

В то же время, согласно [24], для R-справедливо

$$Y = 0,0022 \exp(0,0171 DN). \quad (2)$$

Аналогично вышеописанному для зеленого (G) диапазона в работах [23] и [24] соответственно приведены следующие уравнения:

$$Y = 0,32 \exp(0,013 DN), \quad (3)$$

$$Y = 0,027 \exp(0,0168 DN). \quad (4)$$

Для синего (B) диапазона в работе [23] представлено следующее уравнение:

$$Y = 0,029 \exp(0,013 DN). \quad (5)$$

Аналогичные уравнениям (1)-(5) кривые $Y = f(\lambda, DN, C_1, C_2)$, где $C_1, C_2 = \text{const}$ приведены на рисунке 1 [25].

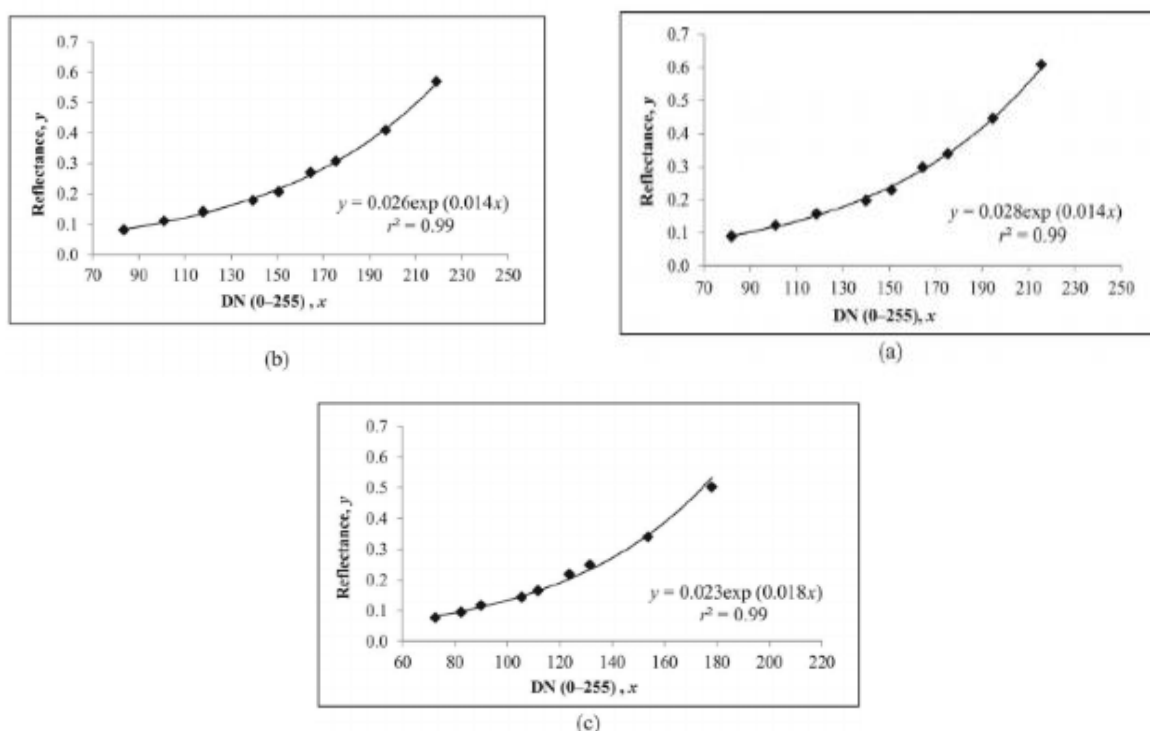


Рисунок 1 - Графики регрессионных калибровочных уравнений применительно к R, G, B диапазонам [25]: (a) – кривая для R-диапазона; (b) – кривая для G-диапазона; (c) – кривая для B-диапазона.

Эквивалентное уравнениям (1)-(5) обобщенное уравнение имеет вид

$$Y = a_1(\lambda) \exp [b_1(\lambda) DN]. \quad (6)$$

Рассмотрим возможность оптимизации радиометрической калибровки RGB измерителя. Отметим, что процедура калибровки может быть оптимизирована, т.е. можно потребовать минимизацию интегральной величины $Y_{ин}$, вычисляемой по длине волны:

$$Y_{ин} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Y(\lambda) d\lambda \rightarrow \min. \quad (7)$$

Отметим, что требование (7) справедливо только для определенного класса объектов, для которых в интервале длин волн $\lambda_1 \dots \lambda_2$ можно получить минимум отраженных излучений. Например, это может быть объекты, не отражающие красные, либо зеленые, либо синие объекты. Объектом, не отражающим красный цвет, может стать растительное поле, на котором не созрела определенная сельхозпродукция красного цвета, а объектом, не отражающим зеленый цвет, может стать не заросшее поле и т. д.

Следовательно, идентификация таких объектов может быть осуществлена по критерию (7) путем нахождения такой зависимости $DN=DN(\lambda)$, при которой при известных $a_1(\lambda)$ и $b_1(\lambda)$ удовлетворяется требование (7).

С учетом (6) и (7) можем составить функционал оптимизации (F_1)

$$F_1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} a_1(\lambda) \exp [b_1(\lambda) \cdot DN(\lambda)] d\lambda. \quad (8)$$

Для вычисления функции $DN(\lambda)$, при которой удовлетворяется требование (7), наложим на эту функцию следующее ограничение:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} DN(\lambda) d\lambda = C ; C = \text{const} \quad (9)$$

Учитывая выражения (8) и (9), сформируем целевой функционал (F_2) безусловной вариационной оптимизации:

$$F_2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} a_1(\lambda) \exp [b_1(\lambda) \cdot DN(\lambda)] d\lambda - \gamma \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} DN(\lambda) d\lambda - C \right]. \quad (10)$$

Решение оптимизационной задачи (10) осуществим по методу Эйлера, согласно которому оптимальная функция $DN(\lambda)$ удовлетворяет условию

$$\frac{d\{a_1(\lambda) \exp [b_1(\lambda) DN(\lambda)] - \gamma DN(\lambda)\}}{dDN(\lambda)} = 0. \quad (11)$$

Из условия (11) находим

$$b_1(\lambda) \cdot a_1(\lambda) \cdot \exp[b_1(\lambda)DN(\lambda)] - \gamma = 0 \quad (12)$$

и имеем

$$\exp[b_1(\lambda)DN(\lambda)] = \frac{\gamma}{b_1(\lambda) \cdot a_1(\lambda)}. \quad (13)$$

Из выражения (13) имеем

$$DN(\lambda) = \frac{1}{b_1(\lambda)} \ln \frac{\gamma}{b_1(\lambda) \cdot a_1(\lambda)}. \quad (14)$$

Следовательно, выражение (14) является решением оптимизационной задачи (10).

Согласно критерию Лагранжа при решении (14) функционал (10) достигает минимума, так как вторая производная подынтегрального выражения в (10) по искомой функции оказывается положительной величиной.

В то же время выполнение условия (14) является признаком того, что идентифицирован тот искомый объект, для которого выполняется условия (7) и ограничения (9).

Таким образом, видна связь между двумя задачами радиометрического характера: задачей радиометрической калибровки и радиометрической идентификации.

Результаты

В статье сформулирована и решена задача использования результатов и методики эмпирической линейной калибровки радиометрической аппаратуры БПЛА с целью идентификации некоторого подкласса объектов на земной поверхности. Ставится задача идентификации некоторого подкласса объектов на земной поверхности, для которых справедливо ограничительное условие (9) в некотором диапазоне длин волн $\lambda_1 \dots \lambda_2$. Допускается, что известно для объекта указанного подкласса эмпирическое регрессионное уравнение в виде (1)-(5). Признаком обнаружения или идентификации такого объекта является достижение значения функционалов F_1 и F_2 минимума при условии (14). Таким образом, если при удовлетворении условия (14) функционалы F_1 и F_2 достигают минимума, то это означает обнаружение или идентификацию искомого объекта.

Заключение

Авторами статьи предложен метод обнаружения или идентификации объектов некоторого подкласса с учетом погодных условий и внешних факторов позволяющий улучшить качество распознавания объекта данного подкласса. Применение данного метода на беспилотных летательных аппаратах может привести к качественному повышению показателя обнаружения объектов и возможности определения их из типов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Multispectral remote sensing from unmanned aircraft: image processing workflows and applications for rangeland environments / A.S. Laliberte, M.A. Goforth, C. M. Steele, A. Rango // International Journal of Remote Sensing. 2011. Vol. 3. P. 2529–2551. DOI 10.3390/rs3112529.
2. UAS, sensors, and data processing in agroforestry: a review towards practical applications / L. Padua, J. Vanko, T. Adao, J. Hruška, E. Peres, R. Morais, J.J. Sousa // [International Journal of Remote Sensing](#). 2017. [Vol.38](#), [iss. 8-10](#). P. 2349–2391.
3. Bonnet S., Lisein J., Lejeune P. Comparison of UAS photogrammetric products for tree detection and characterization of coniferous stands // International Journal of Remote Sensing. 2017. Vol. 38, iss. 19. P. 5310–5337. DOI [10.1080/01431161.2017.1338839](#)
4. UAV photogrammetry for mapping and 3D modelling current status and future perspectives / F.L. Femondimo, L. Barazzetti, F. Nex, M. Scaioni, D. Sarazzi // The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. 2011. Vol. XXXVIII-1/C22. P. 25–30.

5. Unmanned aircraft in nature conservation: an example from plant invasions / J. Mullerova, T. Bartalos, J. Bruna, M. Vitkova // International Journal of Remote Sensing. 2017. Vol. 38, iss. 810 P. 2177–2198. DOI [10.1080/01431161.2016.1275059](https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1275059).
6. Babapour H., Mokhtarzade M., Valadan Zoej M.J. A novel post-calibration method for digital cameras using image linear features International Journal of Remote Sensing. 2016. Vol. 38, iss. 8-10 P. 2698–2716. DOI [10.1080/01431161.2016.1232875](https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1232875).
7. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture / J. Primicerio, S.F. Gennaro, E. Fiorillo L. Genesio, E. Lugato, A. Matese, F.P. Vaccari // Precision Agriculture. 2012. Vol. 13 (4). P. 517–523. DOI [10.1007/s11119-012-9257-6](https://doi.org/10.1007/s11119-012-9257-6).
8. Gomez-Candon D., De Castro A.I., Lopez-Granados F. Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat // Precision Agriculture. 2014. Vol.15. P. 44–56. DOI [10.1007/s11119-013-9335-4](https://doi.org/10.1007/s11119-013-9335-4).
9. Bagheri N. Development of a high-resolution aerial remote sensing system for precision agriculture // International Journal of Remote Sensing. 2016. Vol. 37, iss. 21. P. 1 –13. DOI [10.1080/01431161.2016.1225182](https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1225182).
10. Thiel C., Schmulius C. Comparison of UAV photograph-based and airborne lidar-based point clouds over forest from a forestry application perspective // International Journal of Remote Sensing. 2016. Vol. 38, iss. 8. P. 1–16. DOI [10.1080/01431161.2016.1225181](https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1225181).
11. Akar O. Mapping land use with using Rotation Forest algorithm from UAV images // European Journal of Remote Sensing. 2017. Vol. 50, iss. 1. P. 269–279. DOI [10.1080/22797254.2017.1319252](https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1319252).
12. Агаев Ф.Г., Асадов Х.Г., Асланова А.Б. Многофункциональные беспилотные летательные аппараты. Оптимизация и синтез с учетом воздействия шумов // Труды МАИ: электрон. журнал. 2021. № 117. DOI [10.34759/trd-2021-117-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-16).
13. Ахмедов Э. Вопросы оптимизации расположения центра приема и управления разведывательными БПЛА с учетом отражений сигнала от городских застроек // Труды МАИ. 2025. № 142. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185108>.

14. Ронжин А.Л., Нгуен В.В., Соленая О.Я. Анализ проблем разработки беспилотных летательных манипуляторов и физического взаимодействия БЛА с наземными объектами // Труды МАИ: электрон. журнал. 2018. № 98. URL: http://mai.ru//upload/iblock/3ee/Ronzhin_Nguen_Solenaya_rus.pdf.

15 Агаев Ф.Г., Асадов Х.Г., Зульфугарлы П.Р. Исследование оптимальных режимов функционирования БПЛА в беспроводных сетях передачи информации // Труды МАИ: электрон. журнал. 2021 № 119. URL: http://mai.ru//upload/iblock/473/obayd7eifdkhrp2e48xqdm4v5luxr68u/15_Agaev_Asadorov_Zulfugarly_rus_eng.pdf. DOI: 10.34759/trd-2021-119-15.

16. Kelcey J., Lucieer A. Sensor correction and Radiometric calibration of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing // [The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences](#). Vol. 39. P. 393 – 398. DOI [10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-393-2012](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-393-2012).

17. Ban S., Kim T. Relative radiometric calibration of UAV images for image mosaicking // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2022. Vol. XLIII-B1-2022. (XXIV ISPRS Congress 6–11 June 2022).

18. Radiometric calibration of UAV remote sensing image with spectral angle constraint / Kaiqiu Xu, Yan Gong, Shenghui Fang, Ke Wang, Zhiheng Lin, Feng Wan // [Remote Sensing](#). 2019. Vol. 11, iss. 11. P. 1291. DOI [10.3390/rs11111291](https://doi.org/10.3390/rs11111291).

19. Identifying the optimal radiometric calibration method for UAV-based multispectral imaging / L. Daniels, E. Eeckhout, J. Wieme, Y. Dejaegher, K. Audenaert, W. H. Maes // [Remote Sensing](#). 2023. Vol. 15, iss. 11 P. 2909. DOI [10.3390/rs15112909](https://doi.org/10.3390/rs15112909).

20. Radiometric Calibration for Multispectral Camera of Different Imaging Conditions Mounted on a UAV Platform / Yahui Guo, J. Senthilnath, Wenxiang Wu, Xueqin Zhang, Zhaoqi Zeng, Han Huang // [Sustainability](#). 2019. Vol. 11, iss. 4. 978. DOI [10.3390/su11040978](https://doi.org/10.3390/su11040978).

21. Гумбатов А.Д. Вопросы радиометрической викариозной калибровки ортомозаичных снимков цифровых камер, установленных на борту БПЛА // Гелиогеофизические исследования. 2023. Вып. 39. С. 32–37 DOI [10.5425/2304-7380_2023_39_32](https://doi.org/10.5425/2304-7380_2023_39_32).

22. Асадов Х.Г., Алиева А.Дж., Гумбатов Д.А. Вопросы радиометрической калибровки устройств дистанционного зондирования установленных на борту БПЛА // Вестник СГУиТ.2024. Т. 29, № 2.DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-41-50.

23. Development of a simplified radiometric calibration framework for water-based and rapid deployment unmanned aerial system (UAS) operations / C.M. Zarzar, P. Dash, J.L. Dyer, R. Moorhead, L. Hathcock / Drones. 2020. Vol. 4 (2). P. 17. <https://www.mdpi.com/2504-446X/4/2/17>.

24. Radiometric calibration framework for ultra-high-resolution UAV-derived orthomosaics for large-scale mapping of invasive alien plants in semi-arid woodlands: *Harrisia pomanensis* as a case study / M. Mafanya, P. Tsele, J.O. Botai, P. Manyama, G.J. Chirima, T Monate // International Journal of Remote Sensing. 2018. Vol. 39 (19). DOI 10.1080/01431161.2018.1490503.

25. 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, iss 5. DOI [10.1109/JSTARS.2015.2422716](#).

References

1. Laliberte A.S., Goforth M.A, Steele C.M., Rango A. Multispectral remote sensing from unmanned aircraft: image processing workflows and applications for rangeland environments. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, vol. 3, pp. 2529–2551. DOI 10.3390/rs3112529.

2. Padua L., Vanko J., Adao T., Hruška J., Peres E., Morais R., Sousa J.J.UAS, sensors, and data processing in agroforestry: a review towards practical applications. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, vol. 38, iss. 8-10, pp. 2349–2391.

3. Bonnet S., Lisein J., Lejeune P. Comparison of UAS photogrammetric products for tree detection and characterization of coniferous stands. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, vol. 38, iss. 19. pp. 5310–5337. DOI 10.1080/01431161.2017.1338839.

4. Femondimo F.L., Barazzetti L., Nex F., Scaioni M., Sarazzi D. UAV photogrammetry for mapping and 3D modelling current status and future perspectives. *The international*

archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2011, vol. XXXVIII-1/C22. pp. 25–30.

5. Mullerova J., Bartalos T., Bruna J., Vitkova M. Unmanned aircraft in nature conservation: an example from plant invasions. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, Vol. 38, iss. 8-10, pp. 2177–2198. DOI 10.1080/01431161.2016.1275059.

6. Babapour H., Mokhtarzade M., Valadan Zoej M.J. A novel post-calibration method for digital cameras using image linear features. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, vol. 38, iss. 8-10. pp. 2698–2716. DOI 10.1080/01431161.2016.1232875.

7. Primicerio J., Gennaro S.F., Fiorillo E., Genesio L., Lugato E., Matese A., Vaccari F.P. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 2012, vol. 13 (4), pp. 517–523. DOI 10.1007/s11119-012-9257-6.

8. Gomez-Candon D., De Castro A.I., Lopez-Granados F. Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Precision Agriculture*, 2014, vol. 15, pp. 44–56. DOI 10.1007/s11119-013-9335-4.

9. Bagheri N. Development of a high-resolution aerial remote sensing system for precision agriculture. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, vol. 37, iss. 21, pp. 1–13. DOI 10.1080/01431161.2016.1225182.

10. Thiel C., Schmullius C. Comparison of UAV photograph-based and airborne lidar-based point clouds over forest from a forestry application perspective. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, vol. 38, iss. 8. pp. 1–16. DOI 10.1080/01431161.2016.1225181.

11. Akar O. Mapping land use with using Rotation Forest algorithm from UAV images. *European Journal of Remote Sensing*, 2017, vol. 50, iss. 1. pp. 269–279. DOI 10.1080/22797254.2017.1319252.

12 Agayev F.G., Asadov H.G., Aslanova A.B. *Trudy MAI: elektron. zhurn*, 2021, no. 117. Available at: http://mai.ru//upload/iblock/b91/6a4ao0wdr2m9mp0fgyeuzmn6z61gwtv0/Agayev_Asadov_Aslanova_rus.pdf. DOI 10.34759/trd-2021-117-16.

13 Akhmedov E.M. *Trudy MAI: elektron. zhurn*, 2025, no. 142. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185108>.

14. Ronjin A.L., Nguyen V.V., Salty O.Ya. *Trudy MAI: elektron. zhurn*, 2018, no. 98. Available at: http://mai.ru//upload/iblock/3ee/Ronzhin_Nguen_Solenaya_rus.pdf.
15. Agaev F.G., Asadov H.G., Zulfugarly P.R. *Trudy MAI: elektron. zhurn*, 2021, no. 119. Available at: http://mai.ru//upload/iblock/473/obayd7eifdkhrp2e48xqdm4v5luxr68u/15_Agaev_Asadov_Zulfugarly_rus_eng.pdf. DOI: 10.34759/trd-2021-119-15.
16. Kelcey J., Lucieer A. Sensor correction and Radiometric calibration of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2012, vol. 39, pp. 393–398. DOI 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-393-2012.
17. Ban S., Kim T. Relative radiometric calibration of UAV images for image mosaicking. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022, vol. XLIII-B1-2022. (XXIV ISPRS Congress 6–11 June 2022).
18. Kaiqiu Xu, Yan Gong, Shenghui Fang, Ke Wang, Zhiheng Lin, Feng Wan. Radiometric calibration of UAV remote sensing image with spectral angle constraint. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, iss. 11. pp. 1291. DOI 10.3390/rs11111291.
19. Daniels L., Eeckhout E., Wieme J., Dejaegher Y., Audenaert K., Maes W.H. Identifying the optimal radiometric calibration method for UAV-based multispectral imaging. *Remote Sensing*, 2023, vol. 15, iss. 11. pp. 2909. DOI 10.3390/rs15112909.
20. Yahui Guo, J. Senthilnath, Wenxiang Wu, Xueqin Zhang, Zhaoqi Zeng, Han Huang. Radiometric calibration for multispectral camera of different imaging conditions mounted on a UAV platform. *Sustainability*, 2019, vol. 11, iss. 4. pp. 978. DOI 10.3390/su11040978.
21. Humbatov A.D. *Geliogeofizicheskie issledovaniya*, 2023, vol. 39. pp. 32–37. DOI 10.5425/2304-7380_2023_39_32.
22. Asadov H.G., Alieva A.J., Gumbatov D.A. *Vestnik SGUiT*, 2024. vol. 29, no 2. DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-41-50.
23. Zarzar C.M., Dash P., Dyer J.L., Moorhead R., Hathcock L. Development of a simplified radiometric calibration framework for water-based and rapid deployment

unmanned aerial system (UAS) operations. *Drones*, 2020, vol. 4 (2). pp. 17. Available at: <https://www.mdpi.com/2504-446X/4/2/17>.

24. Mafanya M., Tsele P., Botai J.O., Manyama P., Chirima G.J., Monate T. Radiometric calibration framework for ultra-high-resolution UAV-derived orthomosaics for large-scale mapping of invasive alien plants in semi-arid woodlands: *Harrisia pomanensis* as a case study. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, vol. 39 (19). DOI 10.1080/01431161.2018.1490503.

25. 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, iss. 5. DOI 10.1109/JSTARS.2015.2422716.

Информация об авторах

Асадов Хикмет Гамид оглы, профессор, Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика; e-mail: asadzade@rambler.ru

Мехтиев Мехти Азер оглы, аспирант, Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика; e-mail: mehdi.mehdiyev218@gmail.com

Алиева Хумар Сабир гызы, к.т.н., Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика; e-mail: A.khumar.1962@gmail.com

Information about the authors

Hikmet G. Asadov, Professor, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan; e-mail: asadzade@rambler.ru

Mekhti A. Mekhtiev, PhD Student, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan; e-mail: mehdi.mehdiyev218@gmail.com

Khumar S. Aliyeva, Candidate of Technical Sciences, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan; e-mail: A.khumar.1962@gmail.com