

УДК 528.8

**ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ  
РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ  
МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ,  
ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**А. А. Ломако, Г. С. Литвинович**

*Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем  
имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета,  
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь, [alekseylomako@gmail.com](mailto:alekseylomako@gmail.com)*

В работе указывается на необходимость радиометрической коррекции изображений, регистрируемых мультиспектральными камерами, установленными на беспилотные летательные аппараты. Описывается математическая модель пересчета цифровых значений яркости пикселей изображений в абсолютные значения физических величин яркости. Представлены известные варианты определения функций спектрального отклика и коэффициентов радиометрической калибровки каналов мультиспектральных камер, а также разработанный способ, основанный на использовании высотного пункта радиометрических калибровок в физическом эксперименте.

**Ключевые слова:** калибровка; спектральный отклик; БПЛА; спектральные каналы; высотный калибровочный пункт.

**RADIOMETRIC CORRECTION PARAMETERS ESTIMATION  
FEATURES FOR MULTISPECTRAL IMAGES  
OBTAINED WITH UAV**

**A. A. Lamaka, H. S. Litvinovich**

*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University,  
7 Kurchatov str., 220045, Minsk, Belarus, [alekseylomako@gmail.com](mailto:alekseylomako@gmail.com)*

The paper shows the need for radiometric correction of images obtained with multispectral cameras mounted on unmanned aerial vehicles. A mathematical model is described for converting digital values of images pixel brightness into physical quantities absolute values. Known estimation variants for the spectral response functions and the radiometric calibration coefficients of multispectral cameras bands are presented. The alternative method based on the use of a high-altitude radiometric calibration station in a physical experiment is also presented.

**Keywords:** calibration; spectral response; UAV; spectral bands; high-altitude calibration station.

На сегодняшний день использование в исследованиях данных дистанционного зондирования Земли, зарегистрированных с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), является одним из наиболее быстро развивающихся направлений. При этом БПЛА применяется при мониторинге состояния растительности, в точном земледелии, лесном хозяйстве и т. д. Такой подход обеспечивает высокое пространственное разрешение регистрируемых изображений, быстроту сбора информации, относительно низкую стоимость [1].

Одним из вариантов съемочной аппаратуры, которая устанавливается на БПЛА, являются мультиспектральные камеры. В настоящее время в большей части исследований при использовании данных от таких камер вследствие сложности не учитываются функции чувствительности сенсоров и не применяются радиометрические калибровки [2]. Вместо этого используются нормализованные вегетационные индексы, причем наиболее часто рассчитывается индекс NDVI [3], который является неинформативным в большинстве задач. Тем не менее, радиометрическая коррекция сигнала, регистрируемого камерами, является крайне важной для возможности сопоставления зарегистрированных БПЛА мультиспектральных изображений с данными, зарегистрированными на других уровнях измерений, например, со спутниковыми снимками. Кроме того, применение такой калибровки позволяет осуществлять расчет значений ненормализованных вегетационных индексов, которые часто позволяют с большей точности определять специализированные параметры (например, индексы GEMI [4] и LCI [5], которые могут быть использованы при мониторинге состояния деревьев [6]).

В данном исследовании радиометрическая коррекция осуществляется для камеры DJI Phantom 4 Multispectral (далее – P4M) [7]. Она позволяет регистрировать RGB-изображения (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зеленый; B — *англ.* blue, синий), а также изображения в пяти спектральных каналах: синем ( $450 \pm 16$  нм), зеленом ( $560 \pm 16$  нм), красном ( $650 \pm 16$  нм), красном крае (*англ.* red edge — RE) ( $730 \pm 16$  нм) и ближнем инфракрасном (*англ.* near infrared — NIR) ( $840 \pm 26$  нм). В то же время, описываемая методика может быть применена и к другим мультиспектральным камерам.

В общем виде математическую модель преобразования «сырых» значений яркости пикселей  $j$ -го канала мультиспектральной камеры в физические значения спектральной плотности энергетической яркости можно определить по формуле:

$$I_j = \frac{C_j (D_j(\tau) - n_j(\tau))}{\tau_j}, \quad (1)$$

где  $C_j$  – калибровочный коэффициент для пересчета значений яркости  $j$ -го канала;  $D_j(\tau)$  – «сырые» значения яркости пикселей, полученные при экспозиции  $\tau$ ;  $n_j(\tau)$  – значение уровня шумового сигнала на сенсоре, зависящее от экспозиции;  $I_j$  – абсолютные значения яркости.

Немаловажную роль в определении калибровочных коэффициентов также играет функция спектрального отклика каналов. С физической точки зрения абсолютные значения яркости отраженного излучения, определяемые в (1), можно представить в следующем виде:

$$I_j = \frac{\int_{\lambda} R_j(\lambda) E(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} R_j(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения;  $R_j(\lambda)$  – функция спектрального отклика для  $j$ -го канала камеры;  $E(\lambda)$  – истинный энергетический спектр отраженного солнечного излучения.

Для определения функций спектрального отклика каналов камеры существует большое количество методик, в том числе, по результатам физического эксперимента с использованием монохроматического излучения [8] или по математической модели с использованием глубокого обучения [9]. Для определения калибровочных коэффициентов пересчета значений яркости в каналах камеры может применяться калибровка по фотометрической сфере [10]. Однако в случае с камерой Р4М существует особенность, связанная с автоматическим подбором времени экспозиции от яркости кадры и невозможностью жесткой установки величины экспозиции. Следствием этого становится сложность получения полного набора данных для определения калибровочных коэффициентов по фотометрической сфере, а также невозможность прямого определения величины шумового сигнала на различных экспозициях.

Для разрешения неопределенностей, описанных выше, предлагается с целью определения коэффициентов радиометрической коррекции использовать опытный образец стационарного высотного калибровочного пункта, предназначенного для валидации измерений и калибровки спутниковых сенсоров [11]. Он представляет собой сканирующую систему, одной из функций которой является регистрация гиперспектральных изображений тестовых объектов в диапазоне 400-900 нм (далее – система «СКАН»). При этом каждый пиксель такого изображения может быть представлен в виде спектра в величинах спектральной плотности энергетической яркости за счет проведенных

лабораторных калибровок по фотометрической сфере. В случае, если синхронно с регистрацией гиперкуба данных системой «СКАН» провести съемку этих же тестовых объектов камерой Р4М (рисунок), за счет разнородности объектов с использованием формул (1) и (2) можно определить значения калибровочных коэффициентов в каналах камеры.



Схема проведения эксперимента для калибровки

Дискретные функции спектрального отклика необходимо получить экспериментально (например, при использовании монохроматического излучения). А далее можно определить калибровочные коэффициенты, решив задачу оптимизации с использованием следующей формулы:

$$C_j = \frac{\tau_j^k \sum_{\lambda} R_{\lambda}^j E_{\lambda}^k}{(D_j^k - n_j^{\tau}) \sum_{\lambda} R_{\lambda}^j},$$

где  $R_{\lambda}^j$  – значения дискретной функции спектрального отклика  $j$ -го канала, зависящие от длины волны  $\lambda$ ;  $E_{\lambda}^k$  – абсолютные значения спектральных отражательных характеристик, зарегистрированных системой «СКАН» для  $k$ -го тестового участка;  $D_j^k$  – «сырые» значения яркости пикселей камеры Р4М для  $k$ -го тестового участка;  $\tau_j^k$  – значение экспозиции в  $j$ -м канале при съемке  $k$ -го тестового участка;  $n_j^{\tau}$  – значение уровня шума для заданной экспозиции.

Таким образом, в работе предложен способ определения функций спектрального отклика и коэффициентов радиометрической калибровки в каналах мультиспектральной камеры DJI Phantom 4 Multispectral. Описанный способ позволяет решить проблему пересчета значений пикселей мультиспектральных изображений для возможности их сопоставления со спутниковыми данными. Проведение радиометрической коррекции данных позволяет осуществлять мультивременные научные исследования с использованием спектральных сенсоров, а также использовать в исследованиях ненормированные вегетационные индексы.

## Библиографические ссылки

1. *Lu H, Fan T, Ghimire P, Deng L.* Experimental evaluation and consistency comparison of UAV multispectral minisensors // *Remote Sensing*. 2020. V. 12(16). Article 2542.
2. *Di Gennaro S.F., Toscano P., Gatti M. et al.* Spectral Comparison of UAV-Based Hyper and Multispectral Cameras for Precision Viticulture // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. Article 449.
3. *Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environment*. 1979. V. 8(2). P. 127–150.
4. *Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A. R.* A review of vegetation indices // *Remote Sensing Reviews*. 1995. V. 13. No. 1. P. 95–120.
5. *Datt B.* A new reflectance index for remote sensing of chlorophyll content in higher plants: tests using Eucalyptus leaves // *J. Plant Physiology*. 1999. No. 154. P. 30–36.
6. *Ломако А. А.* Методика обработки данных авиационных мультиспектральных измерений для мониторинга состояния отдельных деревьев // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 5. С. 9–27.
7. P4 Multispectral [Electronic resource]. URL: <https://www.dji.com/p4-multispectral> (date of access: 08.02.2024).
8. *Tominaga S., Nishi S., Ohtera R.* Measurement and Estimation of Spectral Sensitivity Functions for Mobile Phone Cameras // *Sensors*. 2021. V. 21. Article 4985.
9. *Dong H., Jian W., Yiming Q., Yee-Hong Y.* Learning to Recover Spectral Reflectance from RGB Images // *Journal of Latex Class Files*. 2021. V. 14. No. 8. P. 1 – 13.
10. Методика радиометрической калибровки метрологического комплекса «Камея» / И. М. Цикман, Ю. В. Беляев, А. П. Попков // *Приборостроение 2014: материалы 7-ой Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19-21 ноября 2014 г. / БНТУ; редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]*. Минск: БНТУ, 2014. С. 227-228.
11. Опытный образец высотного калибровочного пункта для калибровки спутниковых сенсоров и валидации измерений / П. В. Ивуть, Н. Г. Щербаков, А. В. Гуторов, А. А. Ломако, Ю. В. Голубев, Б. И. Беляев, В. А. Сосенко, Г. С. Литвинович, А. Д. Хомицевич // *Приборостроение-2023 : материалы 16-й Международной научно-технической конференции, 15-17 ноября 2023 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]*. Минск: БНТУ, 2023. С. 328-329.