

КАЛИБРОВКА ИЗОБРАЖАЮЩЕГО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА

В.В. Подлипов^{1,2}, Р.В. Скиданов^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

² Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

Аннотация

Приводится описание точной калибровки гиперспектрометра на основе схемы Оффнера. Рассматривается влияние калибровки на точность регистрации спектральных распределений. Приводятся данные экспериментальных исследований в сравнении с результатами точных измерений спектральных распределений на высокоточном лабораторном спектрометре MS7504i.

Ключевые слова: гиперспектрометр, калибровка, перестраиваемый лазер, дистанционное зондирование Земли.

Цитирование: Подлипов, В.В. Калибровка изображающего гиперспектрометра / В.В. Подлипов, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 6. – С. 869-874. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-869-874.

Введение

В настоящее время возникает всё больше задач мониторинга поверхности Земли, в связи с этим всё более важную роль в дистанционном зондировании Земли играют бортовые гиперспектрометры. За последнее время создано несколько десятков гиперспектрометров авиационного и космического базирования [1–7].

Однако в публикациях довольно редко уделяется внимание калибровке приборов, хотя от этой процедуры зависит достоверность снимаемой информации. Очень часто это приводит к тому, что спектральные изображения одного и того же объекта, снятые с разных спектрометров, не совпадают, что не позволяет вести сравнительный анализ спектров, полученных на разных спектрометрах [9]. Связано это с целым рядом факторов, которые нужно учитывать при съёмке спектральных изображений. Так, нужно точно знать зависимость чувствительности матрицы, используемой в приборе, от длины волны, при этом не всегда можно полагаться на данные, которые даёт фирма-производитель, т.к. в этом случае даётся некая усреднённая функция чувствительности матрицы. Эта функция может заметно отличаться для конкретной реализации той же матрицы. Ещё один важный фактор – спектральная функция источника освещения, при естественном освещении – это спектральная функция солнечного света, которая достаточно хорошо изучена, при искусственном освещении необходимо точно знать функцию спектральной светимости источника света. Также надо учитывать, что дифракционная решётка, используемая в приборе, имеет дифракционную эффективность, зависящую от длины волны. При этом если для геометрически правильных профилей дифракционных решёток можно довольно точно посчитать эту дифракционную эффективность, то для профиля решётки сложной неправильной формы это сделать довольно сложно. Все эти факторы можно учитывать и вводить в процедуру калибровки по отдельности, но при этом с добавлением каждого нового калибровочного коэффициента будет расти ошибка построения спектрального изображения, которая в конечном итоге может стать неприемлемой.

Только в некоторых современных публикациях затрагивается тема калибровки изображающих гиперспектрометров, однако это рассмотрение носит реферативный характер [9, 10].

В настоящей работе рассматривается двухэтапная процедура калибровки гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, использующая когерентные источники света и высокоточный лабораторный спектрометр.

Калибровка положения спектральных каналов

На первом этапе необходимо правильно сопоставить линии разложения спектра на светочувствительной матрице длинам волн. Калибровка осуществлялась для изображающего гиперспектрометра на основе схемы Оффнера [11, 12], который был собран в облегчённом варианте без использования стандартных оптомеханических креплений и подвижек (рис. 1).

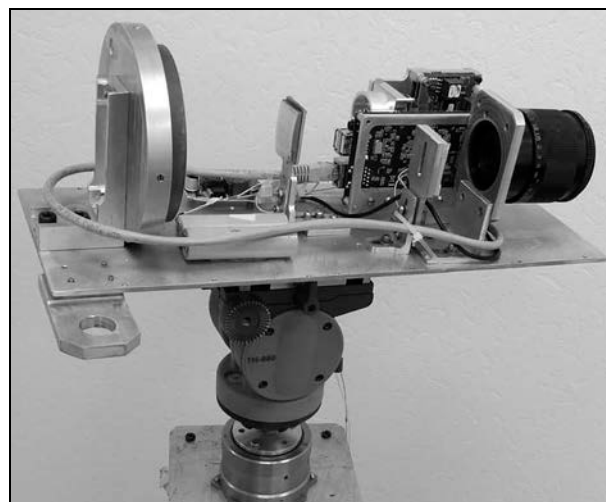


Рис. 1. Внешний вид гиперспектрометра без защитного корпуса

При регистрации изображения гиперспектрометром на светочувствительной матрице CMV 4000 формируется картина, представленная на рис. 2.

Несмотря на жёсткость конструкции гиперспектрометра, картина, представленная на рис. 2, может в зависимости от температурных условий, смещаться на 1–2 пиксела по матрице.

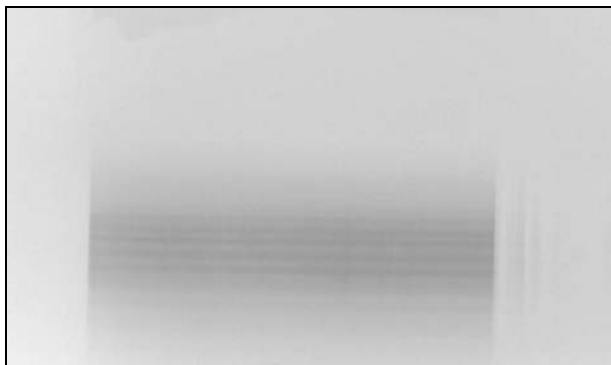


Рис. 2. Разложение в спектр на светочувствительной матрице от изображения на целевой диафрагме (инвертированные яркости)

Поэтому для съёмки точных спектральных изображений необходимо использовать первый этап калибровки, который заключается в том, что на щелевой диафрагме формировалось изображение участка белого экрана, на который попадали пучки нескольких лазеров, длина волны которых была хорошо известна. Изображение, которое при этом получилось, показано на рис. 3.

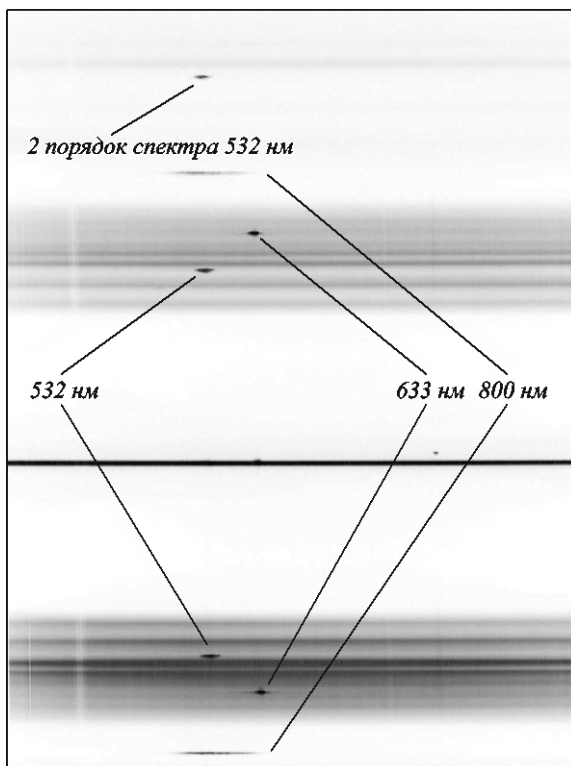


Рис. 3. Разложение в спектр изображения белого экрана с несколькими лазерными пучками

На рис. 3 показано изображение со всей светочувствительной матрицы, в том числе виден и -1 порядок, который хоть и имеет меньшую интенсивность, но все равно достаточно мощный, что связано с неправильной формой профиля дифракционной решётки [11]. Рис. 3 снят для демонстрационного эффекта при достаточно высокой интенсивности лазерных пучков на фоне матового белого экрана, освещённого галогеновой лампой. Поэтому именно это изображе-

ние затруднительно использовать для калибровки. Калибровочные изображения снимались при проецировании на белый матовый экран двух лазерных пучков с минимальной мощностью, достаточной для регистрации на гиперспектрометре. На рис. 4а представлено сечение такого спектра.

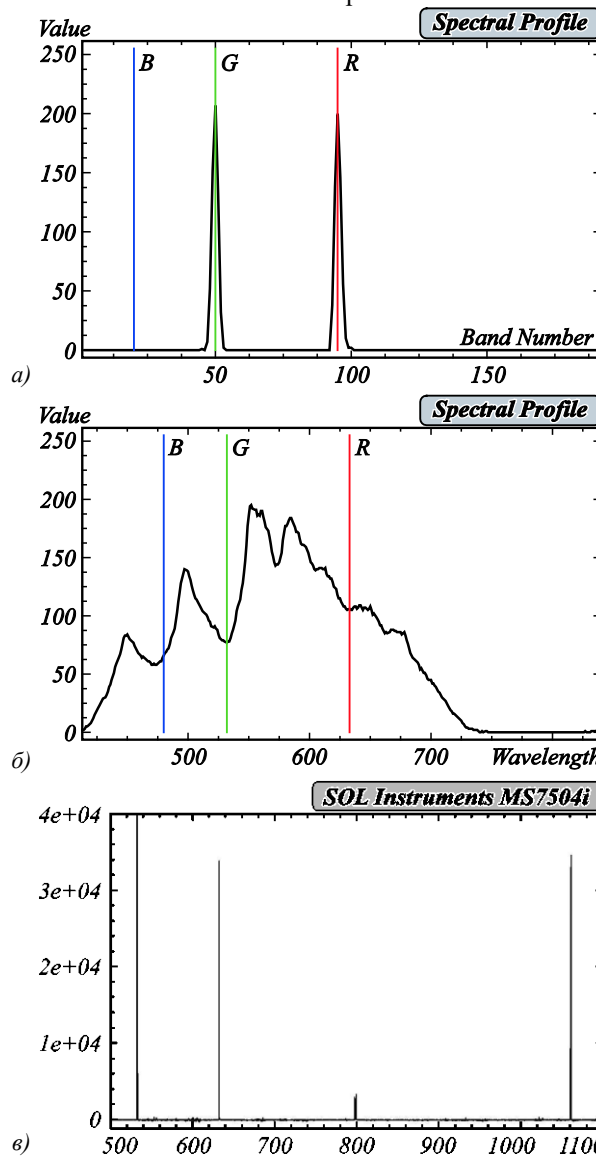


Рис. 4. Положение спектральных линий, соответствующих длинам волн 532 нм, 633 нм (а), спектр галогеновой лампы с отметками лазерных длин волн (б), эталонный спектр, снятый на спектрометре MS7504i (в)

Как видно из рис. 4а, ширина лазерных линий в спектре составляет примерно 3–4 пикселя на матрице, что при размере пикселя в 5,5 мкм даёт нам ширину линии в 17–21 мкм, что примерно соответствует ширине функции рассеяния точки используемого объектива Гелиос-44-2. Положение максимумов на рис. 4а позволяет точно выставить длины волн, так что это уширение на точность калибровки практически не влияет. Далее эти длины волн используются в качестве границ спектральных отрезков для точного определения длин волн в спектре. Так, на рис. 4б показан спектр источника белого света (галогеновой

лампы) с отметками этих длин волн. Для сравнения были измерены длины волн нескольких лазеров в спектрометре MS7504i (рис. 4б), который в дальнейшем использовался на второй стадии калибровки.

Калибровка уровня спектральных каналов

Конечно, наиболее точным процессом калибровки было бы использование перестраиваемого лазера, например, NT242, который позволяет получать когерентный свет с разной длиной волны с шагом настройки в 1 нм. Однако такая процедура занимает значительное время и возможна только в лаборатории, в то время как процедуру калибровки желателен повторять при каждом изменении условий съёмки. Поэтому необходима процедура, которая позволяла бы сделать это максимально быстро.

Второй этап калибровки предназначен для компенсации тех искажений, которые перечислялись во введении. Для калибровки был использован проектор (рис. 5а), который проецировал изображение цветной светотехнической таблицы (рис. 5б) на экран, установленный перед спектрометром MS7504i. Одновременно эта же таблица сканировалась изображающим гиперспектрметром. Процедура проходила в полностью автоматическом режиме; светотехническая таблица перемещалась по экрану, и в поле зрения обоих приборов попеременно попадали разные её участки. Эти участки в силу разного сочетания RGB-компонент имеют разное спектральное распределение.

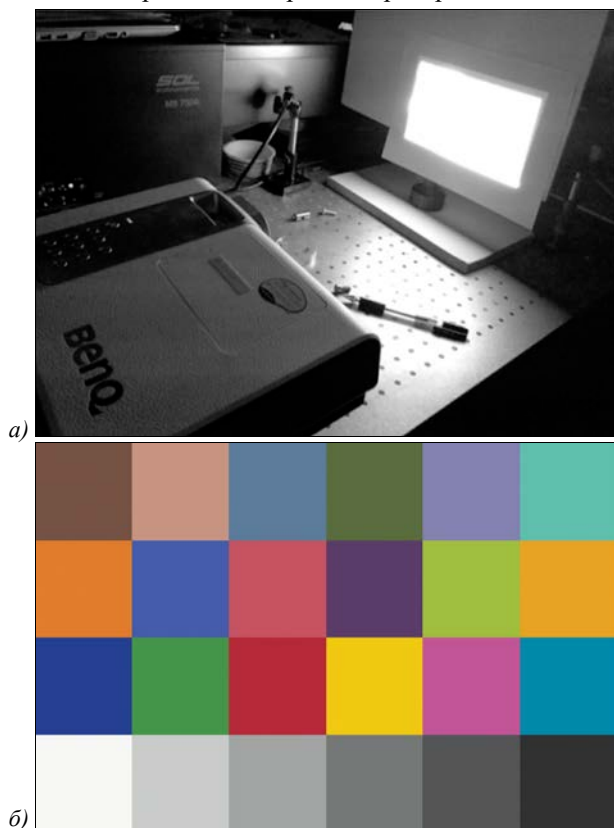


Рис. 5. Фотография экспериментальной установки (а), светотехническая цветная таблица (б)

Каждый из цветных квадратов обладает собственным спектральным распределением. В качестве калибровочного спектра был выбран спектр белого квадрата (рис. 6) в таблице на рис. 5б, поскольку он практически совпадает со спектром галогеновой лампы (рис. 4б). На рис. 6 представлены спектральные распределения, полученные для белого квадрата на MS7504i и на изображающем гиперспектрметре.

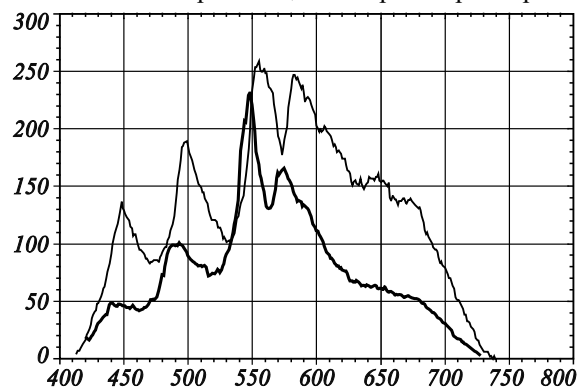


Рис. 6. Спектральное распределение отраженного света от белого экрана в белом квадрате светотехнической таблицы, полученное на спектрометре MS7504i (нижняя кривая), полученное на изображающем гиперспектрметре (верхняя кривая)

Как видно из рис. 6, спектры совпадают между собой только качественно, т.е. максимумы и минимумы в спектрах совпадают по положению. Но уровень спектров различается очень существенно (среднеквадратичное отклонение более 0,7), несмотря на то, что при формировании спектра на гиперспектрметре была учтена зависимость чувствительности матрицы от длины волны, взятая с интернет-ресурса производителя (рис. 7) [13].

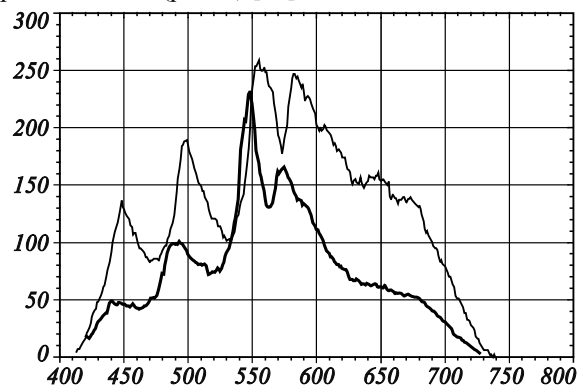


Рис. 7. Спектральная чувствительность матрицы CMV 4000

Очевидно, что попытка учесть последовательно все факторы, перечисленные во введении, не сильно улучшит результат. Связано это с неизбежным накоплением ошибки при использовании каждого корректирующего коэффициента. При этом ошибка может быть связана как с погрешностью измерений, так и с неточным представлением исходных данных. Так, зависимость, представленная на рис. 7, есть только в этом графическом виде. Производитель не предоставляет эту информацию в виде таблицы, а пе-

ревод графика на рис. 7 в числа приводит к довольно существенной ошибке.

Для исключения накопления ошибки предлагается следующая процедура калибровки. Спектр, полученный на MS7504i, принимается за эталон. Спектр, снятый на гиперспектрометре, должен с этим эталоном совпадать.

Для такого совпадения введём коэффициент калибровки K , который определяется по формуле

$$K = \frac{I_h(\lambda)}{I_e(\lambda)}, \quad (1)$$

где $I_h(\lambda)$ – уровень спектральной компоненты, снятой на гиперспектрометре, $I_e(\lambda)$ – уровень соответствующей спектральной компоненты, снятой на спектрометре MS7504i.

Процедура калибровки была проведена для белого квадрата светотехнической таблицы (рис. 5б). Выбор был обусловлен тем, что спектр в данном квадрате наиболее широкий и наиболее гладкий из всей светотехнической таблицы. На рис. 8а показаны спектральные распределения для белого квадрата, снятые на спектрометре MS7504i (серая кривая), и спектральное распределение, снятое на гиперспектрометре (чёрная кривая).

По формуле (1) был рассчитан коэффициент калибровки для каждой из длин волн, для которых спектральные распределения отличны от 0 (рис. 8б). На рис. 8б также показаны доверительные интервалы, которые были рассчитаны для отдельных точек спектра. При этом в расчёте принималась во внимание только ошибка в регистрации уровня спектрального канала, полученного на гиперспектрометре. Ошибку в уровне спектрального канала, снятого на MS7504i, не учитывали, поскольку при 14-разрядной матрице прибора её уровень относительно невысок (менее 0,1%) и не внесёт существенного вклада. Видно, что точность определения калибровочного коэффициента падает к граничным областям спектра, связано это с тем, что интенсивности крайних спектральных каналов относительно невысоки и $I_h(\lambda)$ определяется всего с 3–4 уровнями квантования, что даёт относительную ошибку в 25–30%. В центральных же областях значение относительной ошибки уровня спектрального канала очень невелико и не превышает 2–3%. Затем этот калибровочный коэффициент был использован для корректировки спектрального распределения, полученного для желтого квадрата светотехнической таблицы (рис. 5б). Результат представлен на рис. 8в.

Как видно из рис. 8в, после процедуры калибровки наблюдается очень хорошее соответствие спектральных распределений, полученных на MS7504i и на гиперспектрометре. Среднеквадратичное отклонение составляет всего 0,1.

Заключение

Процедура калибровки, проходящая в два этапа, позволяет без получения информации о точном значении таких параметров, как: спектральная зависимость светочувствительности матрицы, спектральная зависимость пропускания оптической системы, зави-

симость эффективности дифракционной решётки от длины волны, – получить малую погрешность измерения спектральных распределений.

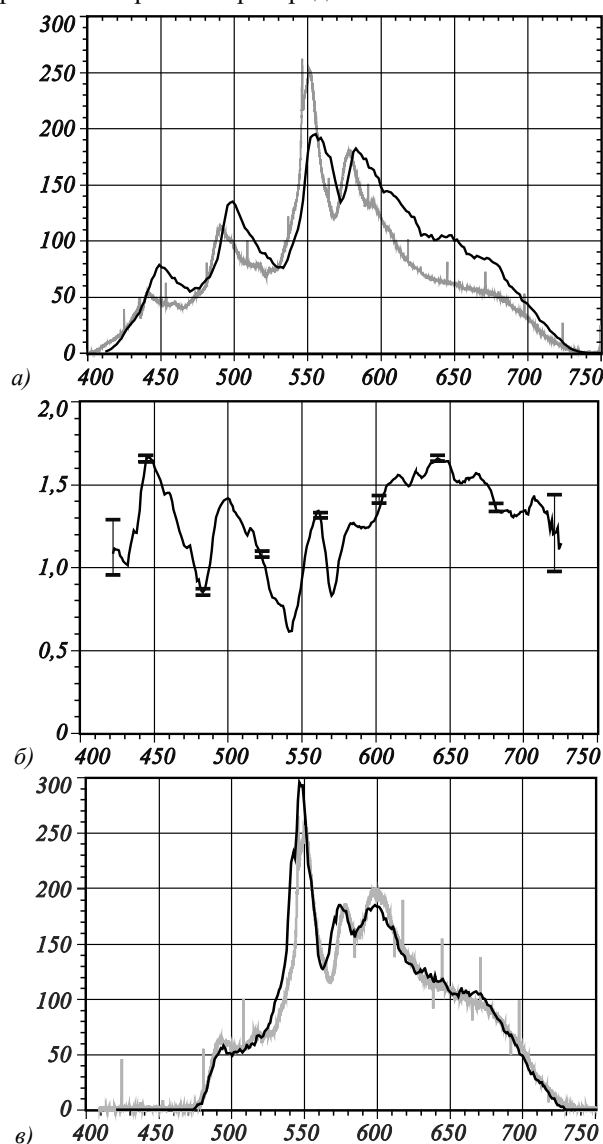


Рис. 8. Спектральные распределения от белого квадрата, снятые на спектрометр MS7504i (чёрная линия) и гиперспектрометр (серая линия) (а), зависимость коэффициента калибровки от длины волны (б), спектральное распределение от желтого квадрата после процедуры калибровки (гладкая линия, чёрная) в сравнении с этим же спектральным распределением, снятым на спектрометр MS7504i (линия со стыковочными отметками, серая) (в)

Если первый этап позволяет просто правильно расставить спектральные каналы, то на втором этапе простая и быстрая процедура позволила, даже с учётом не оптимального выбора источника света, уменьшить среднеквадратичное отклонение спектрального распределения от эталонного с 0,7 до 0,1. Процедура такой калибровки требует использования как можно более широкополосных источников света. В идеале желательно будет охватить весь диапазон чувствительности матрицы от 0,4 мкм до 1 мкм.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госзадания, проект № 3.3025.2017/8.9.

Литература

1. **Lee, J.H.** A very compact imaging spectrometer for the micro-satellite STSAT3 / J.H. Lee, K.I. Kang, J.H. Park // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – Vol. 32, Issue 14. – P. 3935-3946. – DOI: 10.1080/01431161003801328.
2. **Mouroulis, P.** Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy / P. Mouroulis, R.G. Sellar, D.W. Wilson, J.J. Shea, R.O. Green // Optical Engineering. – 2007. – Vol. 46, Issue 6 – 063001. – DOI: 10.1117/1.2749499.
3. **Patent EP 0961920 B1 G01J 3/14, G01J 3/28.** Imaging spectrometer / D.R. Lobb, EP19980907058, filed of February 24, 1998, published of May 12, 2004.
4. **U.S. Patent 7,944,559 B2 G01J 3/28 356/328.** Airborne hyperspectral imaging system / M. Oskotsky, M.J. Russo, Jr., US 12/381,785, filed of March 17, 2009, publisher of May 17, 2011.
5. **Prieto-Blanco, X.** Off-plane anastigmatic imaging in Offner spectrometers / X. Prieto-Blanco, H González-Núñez, R. de la Fuente // Journal of the Optical Society of America A – 2011. – Vol. 28, Issue 11 – P. 2332-2339. – DOI: 10.1364/JOSAA.28.002332.
6. **U.S. Patent 7,944,559 B2 H01L 21/00, H01L 31/0232, G02B 5/22, 359/885.** Graded order-sorting filter for hyperspectral imagers and methods of making the same / W.E. Tennant, US 12/347,435, filed of December 31, 2008, published of May 3, 2011.
7. **Казанский, Н.Л.** Моделирование работы гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в рамках геометрической оптики / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, А.В. Карсаков, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38. № 2. – С. 271-280.
8. **Силлюк, О.О.** Методика и результаты кросс-калибровки изображений Белорусского космического аппарата и других съёмочных систем / О.О. Силлюк, Л.В. Катковский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 4. – С. 261-270. – DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-261-270.
9. **Виноградов, А.Н.** Бортовой гиперспектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазона с высоким пространственным разрешением / А.Н. Виноградов, В.В. Егоров, А.П. Калинин, А.И. Родионов, И.Д. Родионов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 3. – С. 101-107.
10. **Виноградов, А.Н.** Разработка и исследование гиперспектрометра ближнего инфракрасного диапазона БИК1 / А.Н. Виноградов, В.В. Егоров, А.П. Калинин, А.И. Родионов, А.И. Родионов, И.П. Родионова. – Москва: ИКИ РАН, 2017. – 20 с. – ISBN: 978-5-00015-015-3.
11. **Карпеев, С.В.** Исследование дифракционной решётки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, С.И. Харитонов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 211-217. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-211-217.
12. **Карпеев, С.В.** Юстировка и исследование макетного образца гиперспектрометра по схеме Оффнера / С.В. Карпеев, С.Н. Хонина, А.Р. Мурдагулов, М.В. Петров // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2016. – Т. 15, № 1. – С. 197-206. – DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-197-206.
13. CMV4000. – URL: http://www.cmosis.com/products/product_detail/cmV4000 (date request 5.10.2017).

Сведения об авторах

Сведения об авторе **Скиданов Роман Васильевич** см. стр.846 этого номера.

Подлипов Владимир Владимирович, инженер НИЛ-35 и ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета, инженер лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук. Область научных интересов: математическое моделирование, электронно-лучевая литография и оптимизация технологических процессов травления в микроэлектронике, дифракционной оптике, технологии обработки и контроля поверхности. E-mail: podlipnovvv@ya.ru.

ГРНТИ: 29.31.29.

Поступила в редакцию 25 октября 2017 г. Окончательный вариант – 1 декабря 2017 г.

CALIBRATION OF AN IMAGING HYPERSPECTROMETER

V.V. Podlipnov^{1,2}, R.V. Skidanov^{1,2}

¹ Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia,

² Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

We describe a precise calibration procedure for an Offner imaging hyperspectrometer. We analyze the influence of the calibration on the accuracy of the spectral distribution registration. We conduct a comparative analysis of the experimental data with the results of the precise measurements of spectral distributions made using a high-precision laboratory spectrograph MS7504i.

Keywords: hyperspectrometer, calibration, tuned laser, Earth remote sensing.

Citation: Podlipnov VV, Skidanov RV. Calibration of an imaging hyperspectrometer. Computer Optics 2017; 41(6): 869-874. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-869-874.

Acknowledgements: The work was funded by the Russian Federation Ministry of Education and Science under state-assigned task No. 3.3025.2017/8.9.

References

- [1] Lee JH, Kang KI, Park JH. A very compact imaging spectrometer for the micro-satellite STSAT3 International Journal of Remote Sensing 2011; 32(14): 3935-3946. DOI: 10.1080/01431161003801328.
- [2] Mouroulis P, Sellar RG, Wilson DW, Shea JJ, Green RO. Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy. Opt Eng 2007; 46(6): 063001. DOI: 10.1117/1.2749499.
- [3] Lobb DR. Imaging spectrometer. Patent EP 0961920 B1 of May 12, 2004.
- [4] Oskotsky M, Russo MJ Jr. Airborne hyperspectral imaging system. Patent US 7944559 B2 of May 17, 2011.
- [5] Prieto-Blanco X, González-Nuñez H, de la Fuente R. Off-plane anastigmatic imaging in Offner spectrometers. J Opt Soc Am A 2011; 28(11): 2332-2339. DOI: 10.1364/JOSAA.28.002332.
- [6] Tennant WE. Graded order-sorting filter for hyperspectral imagers and methods of making the same. Patent US 7936528 B2 of May 3, 2011.
- [7] Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Karsakov AV, Khonina SN Modeling action of a hyperspectrometer based on the Offner scheme within geometric optics 2014; - 38(2): 271-280.
- [8] Siliuk OO, Katkovsky LV. Methods and results of image cross-calibration of the Belarusian satellite and other sensors. Current problems in remote sensing of the earth from space 2016; 13(4): 261-270. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-261-270.
- [9] Vinogradov AN, Egorov VV, Kalinin AP, Rodionov AI, Rodionov ID. On board visual and near UV-band hyperspectrometer with high spatial resolution. Current problems in remote sensing of the earth from space 2012; 9(3): 101-107.
- [10] Vinogradov AN, Egorov VV, Kalinin AP, Rodionov AI, Rodionov ID, Rodionova IP. Design and examination of the near infrared band hyperspectrometer BIK1 [In Russian]. Moscow: SRI RAS; 2017. ISBN: 978-5-00015-015-3.
- [11] Karpeev SV, Khonina SN, Kharitonov SI. Study of the diffraction grating on the convex surface as a dispersive element. Computer Optics 2015; 39(2): 211-217. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-211-217.
- [12] Karpeev SV, Khonina SN, Murdagulov AR, Petrov MV. Alignment and study of prototypes of the Offner hyperspectrometer [In Russian]. Vestnik of Samara University 2016; 15(1): 197-206. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-197-206.
- [13] CMV4000. Source: http://www.cmosis.com/products/product_detail/cmv4000.

Authors' information

The information about author **Roman Vasilevich Skidanov** you can find on page 847 of this issue.

Vladimir Vladimirovich Podlipnov, an engineer at Samara National Research University's Lab-35, an engineer of the laboratory of Micro- and Nanotechnology of Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences. His research interests: mathematical modeling, electron-beam lithography, optimization of etching procedures in microelectronics, diffractive optics and techniques for surface processing and inspection. E-mail: podlipnovvv@ya.ru.

Received October 25, 2017. The final version – December 1, 2017.