

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСВЕЩЁННОСТИ В ПЛОСКОСТИ РЕГИСТРАТОРА КОСМИЧЕСКОГО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА, ОСНОВАННОГО НА СХЕМЕ ОФФНЕРА

А.А. Расторгуев¹, С.И. Харитонов^{2,3}, Н.Л. Казанский^{2,3}

¹Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс», Самара, Россия,

²Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия,

³Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

Аннотация

Рассмотрено моделирование распределения освещённости в фокальной плоскости оптической схемы, состоящей из объектива и спектрометра, основанного на схеме Оффнера. Рассчитана освещённость в плоскости регистратора гиперспектрометра в приближении геометрической оптики. В расчётах использованы модели яркости атмосферы, освещённости Земли, спектрального пропускания атмосферы.

Ключевые слова: гиперспектрометр, схема Оффнера, освещённость, моделирование, спектральное пропускание атмосферы.

Цитирование: Расторгуев, А.А. Моделирование распределения освещённости в плоскости регистратора космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера / А.А. Расторгуев, С.И. Харитонов, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 3. – С. 399-405. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-399-405.

Введение

На сегодняшний день в мире происходит рост рынка дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), развитие методов обработки и классификации информации. Это обусловлено в первую очередь ростом числа активных космических аппаратов (КА), а также видов информации ДЗЗ, получаемых с КА. Аппаратура ДЗЗ позволяет проводить периодическую съёмку земной поверхности и таким образом наблюдать за изменениями окружающей среды [1]. Гиперспектральное ДЗЗ является перспективным направлением развития рынка ДЗЗ. Оно позволяет решать множество тематических задач. Области и разделы тематических задач, решаемых с использованием гиперспектральных систем, представлены в [2].

Помимо развития методов обработки, на сегодня существует тенденция к уменьшению массогабаритных характеристик самой гиперспектральной аппаратуры. В данном отношении перспективной является конструкция аппаратуры, основанной на схеме Оффнера [3–6]. Концепция данного компактного гиперспектрометра для малого КА представлена в работах [7–10].

Проектирование такой аппаратуры должно исходить:

- из класса решаемых тематических задач ДЗЗ [2],
- условий функционирования в космическом пространстве.

К космическим условиям функционирования относятся: высота, угол, время съёмки, энергетическая яркость подстилающей поверхности на момент съёмки и пр.

Одним из требований к рабочим характеристикам аппаратуры является отношение сигнал/шум на фотоприёмном устройстве в заданных условиях съёмки. При оценках данного отношения важно учитывать энергетические характеристики электромагнитного излучения, приходящего в единицу времени на единицу площади фокальной плоскости аппаратуры.

В работах [3–11] приведено описание различных конструкций гиперспектрометра на основе схемы Оффнера.

В работе [12] проведено экспериментальное исследование дифракционной решётки на поверхности выпуклого зеркала. Показано, что распределение энергии по порядкам дифракции согласуется с результатами моделирования.

В работе [13] также рассмотрен математический аппарат для расчёта распределения освещённости для спектрометра на основе схемы Оффнера в лабораторных условиях.

Актуальным является вопрос оценки уровня освещённости в плоскости регистратора гиперспектрометра для космических условий функционирования.

1. Постановка задачи

Величина потока в плоскости изображения оптической телескопической системы, с одной стороны, определяется площадью и яркостью в предметной плоскости объектива, с другой – величиной его передней апертуры, экранированием и виньетированием элементами конструкции, диафрагмами, крепёжными устройствами и пр. Для расчёта освещённости в плоскости регистратора космического гиперспектрометра необходимо провести трассировку лучей в его оптической системе (ОС) с учётом аберраций и потока энергии, приходящего на входной зрачок.

Для расчёта освещённости была взята математическая модель гиперспектрометра, изображённого на рис. 1.

Параметры объектива:

- дифракционно ограниченный катадиоптрический телескоп,
- фокусное расстояние ~300 мм,
- диаметр главного зеркала (ГЗ) – 60 мм,
- диаметр вторичного зеркала (ВЗ) – 30 мм.

Параметры гиперспектрального блока на основе схемы Оффнера [11–13]:

- радиус кривизны большого сферического зеркала (БЗ) – 159,6 мм,
- радиус кривизны зеркала с дифракционной решёткой (ЗсДР) – 80,6 мм, частота штрихов – 30 линий на 1 мм.

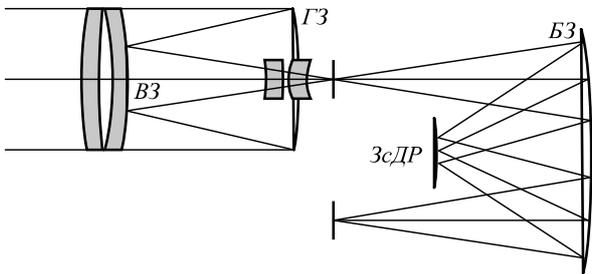


Рис. 1. Оптическая схема гиперспектрометра

На выходе расположен регистратор, представляющий фотоматрицу, которая преобразует оптический сигнал в электрический.

2. Исходные данные

В качестве исходных данных в предметной плоскости для моделирования могут быть взяты табличные значения:

– $E_1(\lambda, h_s)$ – спектральной облучённости подстилающей поверхности Земли в зависимости от высот Солнца над горизонтом (высота Солнца над горизонтом равна углу падения солнечных лучей на поверхность Земли),

– $L_2(\lambda, h_s, \psi)$ – спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) атмосферы (дымки) Земли для различных высот Солнца над горизонтом и углов визирования,

– $\tau_{амм}(\lambda)$ – интегрального по оптическому пути, спектрального коэффициента пропускания атмосферы.

Выражение для спектральной плотности энергетической яркости при условии, что поверхность Земли рассеивает излучение во всех направлениях полупространства равномерно, имеет вид:

$$L_1(\lambda, h_s, \rho) = (E_1(\lambda, h_s)/\pi)\rho, \quad (1)$$

где L_1 – СПЭЯ участка поверхности, $E_1(\lambda, h_s)$ – спектральная облучённость поверхности Земли, λ – длина волны, h_s – высота Солнца над горизонтом, ρ – альbedo поверхности (альbedo называется коэффициентом диффузного отражения).

Обозначим суммарную яркость в направлении визирования объектива:

$$L(\lambda, h_s, \rho, \psi) = L_1(\lambda, h_s, \rho, \psi)\tau_{амм}(\lambda)^{(1/\cos(\psi))} + L_2(\lambda, h_s, \psi), \quad (2)$$

где $\tau_{амм}(\lambda)$ – интегральный коэффициент пропускания атмосферы в надир, ψ – угол визирования, $L_2(\lambda, h_s, \psi)$ – СПЭЯ атмосферы (дымки) в направлении визирования.

3. Моделирование освещённости в плоскости детектора в приближении геометрической оптики

Выполним оценку уровня освещённости в плоскости регистратора гиперспектрометра. Для расчёта бу-

дем использовать метод трассировки лучей через оптическую систему, изображённую на рис. 1.

Разобьём предметную плоскость на элементарные площадки. Рассмотрим расчёт освещённости от элементарной площадки. Набор k лучей, исходящих из центра элементарной площадки S_k с яркостью L в направлении визирования ψ , создают поток на входном зрачке ОС [15]:

$$\Delta\Phi_k(\lambda, h_s, \rho, \psi, \Omega_k) = S_k L(\lambda, h_s, \rho, \psi) \Delta\Omega_k. \quad (3)$$

$\Delta\Omega_k$ – телесный угол конуса лучей с вершиной в центре элементарной площадки и с основанием на входном зрачке ОС:

$$\Delta\Omega_k = (S_{B3} \cdot \cos(\epsilon))/r^2, \quad (4)$$

где S_{B3} – площадь элемента входного зрачка ОС, ϵ – угол падения на входной зрачок, r – расстояние между S_k и S_{B3} . При условии космической съёмки за величину r можно принять дальность съёмки.

Выражение для потока излучения прошедшего ОС объектива [15]:

$$\Delta\Phi_k^1(\lambda, h_s, \rho, \psi, \Omega_k) = \tau_k(\lambda) \Delta\Phi_k(\lambda, h_s, \rho, \psi, \Omega_k), \quad (5)$$

где $\tau_k(\lambda)$ – коэффициент пропускания оптической системы.

На основании результатов, приведённых в работах [13, 15], выражение для распределения освещённости, формируемое площадкой ΔS_k , расположенной в предметной плоскости (на Земле) в направлении визирования ψ , можно представить в виде:

$$H_{mk}(x, y, \lambda) = C_m(\lambda) \int_{\Delta S_k} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \Delta\Omega_k \tau_k(\lambda) L(\lambda, h_s, \rho, \psi) \times \delta(x - \tilde{x}_k(u, v, \theta, \phi, \lambda), y - \tilde{y}_k(u, v, \theta, \phi, \lambda)) \times \sin^2 \theta d\theta d\phi du dv, \quad (6)$$

$H_{mk}(x, y, \lambda)$ – освещённость в плоскости регистратора в точке с декартовыми координатами (x, y) для длины волны λ , $\delta(x, y)$ – регулярная аппроксимация сингулярной функции Дирака, \tilde{x}_k, \tilde{y}_k – координаты прихода луча в плоскость регистратора, исходящего из k -й площадки предметной плоскости в направлении, определяемом углами (θ, ϕ) , $C_m(\lambda)$ – интенсивность порядка дифракции с номером m . Интегрирование ведётся по всем точкам с декартовыми координатами (u, v) площадки ΔS_k предметной плоскости и по всем направлениям лучей, которые попадают в плоскость регистратора. В качестве регулярной аппроксимации сингулярной функции Дирака используется следующая гладкая функция

$$\delta(x, y) = (1/2\pi\sigma^2) \exp(-(x^2 + y^2)/2\sigma^2), \quad (7)$$

где $6\sigma = \Delta$, Δ – размер пиксела фотоприемника. Функция $H_{mk}(x, y, \lambda)$ с точностью до нормировки практически совпадает с функцией рассеяния точки (ФРТ) гиперспектрометра, так как размер площадки достаточно мал и его можно считать точечным источником. В отличие от ФРТ, $H_{mk}(x, y, \lambda)$ измеряется в энергетиче-

ских единицах. Её можно использовать для определения характеристик фотоматрицы регистратора. Полученную функцию в дальнейшем можно использовать для расчёта характеристик гиперспектрального изображения. Освещённость изображения в плоскости регистратора при съёмке произвольного участка Земли является суммой освещённостей элементарных участков ΔS_k . Общая формула для расчёта освещённости в плоскости регистратора на основе ФРТ приведена в работе [13].

4. Результаты расчёта освещённости в плоскости регистратора гиперспектрометра от элементарной площадки на поверхности Земли

В расчётах под условиями космического функционирования были приняты: высота съёмки $H=600$ км, угол визирования ψ , высота Солнца над горизонтом h_s , альbedo поверхности ρ .

Для расчёта была взята площадка подстилающей поверхности, центр которой расположен на оси визирования гиперспектральной аппаратуры. При расчётах площадка размером $30 \times 30 \text{ м}^2$ разбивалась на 100 равных частей. Среднее альbedo поверхности $\rho=0,4$. Распределение освещённости в плоскости изображения гиперспектрометра представлено на рис. 2, результаты расчёта средней освещённости засвеченной зоны от уровня не ниже 1/2 максимальной освещённости представлены в табл. 1.

Табл. 1. Расчётная средняя освещённость от уровня не ниже 1/2 максимальной освещённости в плоскости изображения при съёмке в надир (от площадки $30 \times 30 \text{ м}^2$), в относительных единицах $E_0, \text{ Вт/м}^2$

| Длина волны, нм | Высота солнца | | |
|-----------------|---------------|--------|--------|
| | 10 | 40 | 70 |
| 500 | 0,5248 | 1,9666 | 2,9905 |
| 600 | 0,4520 | 1,8149 | 2,7733 |
| 700 | 0,3980 | 1,5637 | 2,3616 |

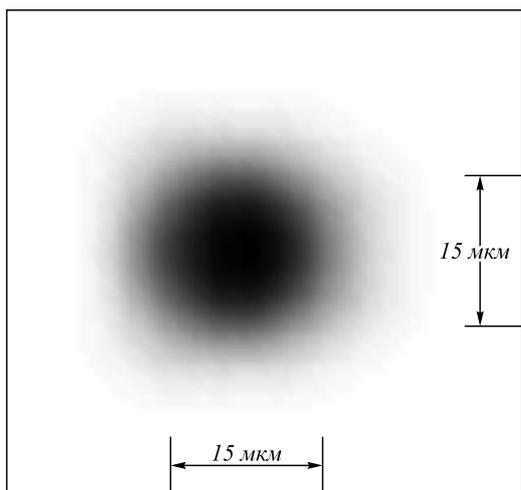


Рис. 2. Распределение освещённости распределения (для длины волны 500 нм) в плоскости регистратора гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, полученное от площадки размером $30 \times 30 \text{ м}^2$, с высоты 600 км

Значение освещённости для порядка дифракции можно оценить по формуле:

$$E = C_m E_0, \tag{8}$$

где C_m – интенсивность дифракционного порядка, E_0 – описывает освещённость, не распределённую по порядкам дифракции.

5. Оценка адекватности результатов расчёта освещённости

Оценку освещённости в плоскости изображения объектива также можно провести с использованием известных параксиальных формул:

$$\Phi = \pi \cdot L \cdot S_{B3} \cdot \sin^2(u),$$

$$E = \varepsilon \cdot \tau \cdot \Phi / S_{\Phi\Pi}, \tag{9}$$

$$\varepsilon = 1 - (D_2/D_1)^2,$$

где Φ – световой поток на входном зрачке, E – освещённость в фокальной плоскости, L – яркость площадки S_k , $S_{\Phi\Pi}$ – площадь изображения, u – апертурный угол объектива, τ – пропускание ОС, ε – коэффициент центрального экранирования, D_1 – диаметр главного зеркала, D_2 – диаметр вторичного зеркала. Формулы приведены без учёта величины виньетирования светового потока объективом.

Пусть съёмка проводится в надир, альbedo – 0,4, высота солнца – 70° , длина волны $\lambda = 500 \text{ нм}$. Параметры атмосферы следующие:

- спектральная облучённость земной поверхности $E_1(\lambda, h_s) = 1810 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{нм}$,
- СПЭЯ дымки $L_2(\lambda, h_s, \psi) = 45,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{нм} \cdot \text{ср}$,
- интегральный по оптическому пути спектральный коэффициент пропускания атмосферы $\tau_{атм} = 0,69$.

Параметры оптической системы указаны в п. 1 данной статьи, где интегральный коэффициент пропускания оптики $\tau = 0,8$.

Если принять в расчёт площадку земной поверхности размерами $30 \times 30 \text{ м}^2$, снимаемую с высоты $H = 600 \text{ км}$, то несложно получить, что:

$$S_{\Phi\Pi} = 15 \times 15 \text{ мкм}^2, \Phi = 1,1565 \cdot 10^{-9} \text{ Вт},$$

$$E = 3,8550 \text{ Вт/м}^2,$$

где $S_{\Phi\Pi}$ – площадь изображения, Φ – поток, падающий на фокальную плоскость, E – средняя освещённость в фокальной плоскости объектива.

Расчётное значение потока на входном зрачке и средней освещённости (от уровня не ниже 1/2 максимальной освещённости) в плоскости изображения гиперспектрометра при тех же модельных параметрах ОС и атмосферы:

$$\Phi = 1,0326 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}, E = C_m \cdot 2,9905 \text{ Вт/м}^2.$$

Полученные значения можно использовать для подбора характеристик фотоматрицы регистратора.

Заключение

В работе рассмотрены основные соотношения для моделирования освещённости, численные методы расчёта освещённости, проведен расчёт освещённости для гиперспектрометра, состоящего из объектива и спек-

рометра на основе схемы Оффнера, с использованием табличных значений параметров спектральной облучённости подстилающей поверхности Земли, спектральной плотности яркости дымки Земли, спектрального коэффициента пропускания атмосферы в зависимости от высот Солнца над горизонтом и угла визирования. Результаты расчетов можно использовать для выбора параметров фотоматрицы регистратора.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-29-09528 офи_м).

Литература

1. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с. – ISBN: 978-5-94836-244-1.
2. Классификатор тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов дистанционного зондирования Земли. – Редакция 7. – Иркутск: ООО «Байкальский центр», 2008. – 80 с.
3. **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 (9 p.). – DOI: 10.1117/1.2749499.
4. **Mouroulis, P.** Convex grating types for concentric imaging spectrometers / P. Mouroulis, D.W. Wilson, P.D. Maker, R.E. Muller // Applied Optics. – 1998. – Vol. 37, Issue 31. – P. 7200-7208. – DOI: 10.1364/AO.37.007200.
5. **Prieto-Blanco, X.** The Offner imaging spectrometer in quadrature / X. Prieto-Blanco, C. Montero-Orille, H. González-Nuñez, M.D. Mouriz, E.L. Lago, R. de la Fuente // Optics Express. – 2010. – Vol. 18(12). – P. 12756-12769. – DOI: 10.1364/OE.18.012756.
6. **Prieto-Blanco, X.** Analytical design of an Offner imaging spectrometer / X. Prieto-Blanco, C. Montero-Orille, B. Couce, R. de la Fuente // Optics Express. – 2006. – Vol. 14(20). – P. 9156-9168. – DOI: 10.1364/OE.14.009156.
7. **Lee, J.H.** Optical design of a compact imaging spectrometer for STSAT3 / J.H. Lee, T.S. Jang, H.-S. Yang, S.-W. Rhee // Journal of the Optical Society of Korea. – 2008. – Vol. 12, Issue 4. – P. 262-268.
8. **Lee, J.H.** Optomechanical design of a compact imaging spectrometer for a microsatellite STSAT3 / J.H. Lee, C.W. Lee, Y.M. Kim, J.W. Kim // Journal of the Optical Society of Korea. – 2009. – Vol. 13, Issue 2. – P. 193-200.
9. **Lee, J.H.** A very compact imaging spectrometer for the microsatellite 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.
10. **Lee, J.H.** Flight model development of a compact imaging spectrometer for a microsatellite STSAT3 / J.H. Lee, T.S. Jang, K.I. Kang, S.-W. Rhee // Proceedings of the Conference "Optical Remote Sensing of the Environment", Tucson, AZ, June 7, 2010. – DOI: 10.1364/ORSE.2010.OMB3.
11. **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 СГАУ. – 2016. – Т. 15, № 1. – С. 197-206. – DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-197-206.
12. **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.

13. **Казанский, Н.Л.** Моделирование работы космического гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, Л.Л. Досколович, А.В. Павельев // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 1. – С. 70-76. – DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-1-70-76.
14. **Казанский, Н.Л.** Моделирование работы гиперспектрометра, основанного на схеме Оффнера, в рамках геометрической оптики / Н.Л. Казанский, С.И. Харитонов, С.И. Карсаков, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 271-280.
15. Техническая оптика / Г. Шрёдер, Х. Трайбер. – пер. с нем. Р.Е. Ильинского. – М.: Техносфера, 2006. – 424 с. – ISBN: 5-94836-075-X.
16. **Слюсарев, Г.Г.** Методы расчёта оптических систем / Г.Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение, 1969. – 670 с.
17. **Владимиров, В.С.** Уравнения математической физики / В.С. Владимиров. – М.: Наука, 1981. – 512 с.

Приложение А.

Моделирование потока на входном зрачке оптической системы

Для расчёта потока удобно разбить входной зрачок ОС на равновеликие площадки. В случае круглого входного зрачка полярные координаты центров ячеек вычисляются по формулам [15, 16]:

$$\phi_k = \pi(2k-1)/N_\phi,$$

$$\rho_m = (D_{B3}/2)\sqrt{(2m-1)/2N_\rho},$$
(10)

где N_ϕ, N_ρ – число ячеек входного зрачка, $k=1..N_\phi$, $m=1..N_\rho$. Для $N_\phi, N_\rho=14$ и $D_{B3}=60$ мм границы и центры ячеек показаны на рис. 3.

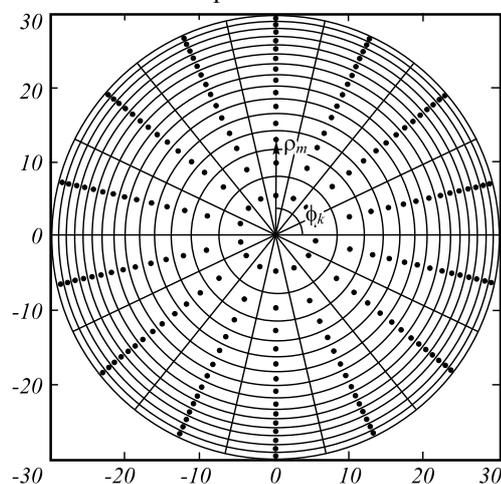


Рис. 3. Границы и центры входного зрачка, мм

В приближении того, что расстояние до входного зрачка r много больше его площади S_{B3} , величина элементарного телесного угла для ячейки на входном зрачке вычисляется по формуле:

$$\Delta\Omega_{k,m} = (S_{B3}/N_\phi N_\rho) \cdot (r_z/r^2),$$
(11)

$$r = r(\phi_k, \rho_m) - \tilde{r},$$
(12)

$$r_z = (r_z(\phi_k, \rho_m) - \tilde{r}_z)/r,$$

где $r(\phi_k, \rho_m)$ – радиус-вектор определяющий положение центра ячейки входного зрачка, \tilde{r} – радиус-

вектор положения центра элементарной площадки S_k в предметной плоскости, r – радиус-вектор, соединяющий центры S_k и S_{B3} , r_z – нормированная проекция вектора r на ось z .

В приближении того, что поверхность Земли излучает по закону Ламберта, поток на элементарной ячейке входного зрачка объектива определяется как:

$$\Phi_k(\lambda, h_s, \rho, \psi, \Omega_k) = L(\lambda, h_s, \rho, \psi) \times (S_k S_{B3} (r_z(\phi_k, \rho_m) - \tilde{r}_z) / (r(\phi_k, \rho_m) - \tilde{r})^3). \quad (13)$$

Для оценки потока на входном зрачке и расчёта освещенности в плоскости изображения трассировку лучей через ОС необходимо проводить по нормированному вектору r .

Приложение Б. Метод расчёта интеграла от распределения потока в плоскости изображения

Разобьём плоскость изображения гиперспектрометра на элементарные ячейки. Если считать, что стороны элементарной ячейки $\Delta x = \Delta y = 1$ ед. длины шага сетки, то, разбив полученный график функции на элементарные отсчёты (рис. 4) и используя известное свойство смешанного произведения векторов, суммарный поток в плоскости изображения рассчитывается как:

$$\Phi = \frac{1}{6} \sum_{x,y} \det \begin{vmatrix} AC_0 \\ AD_0 \\ AA_0 \end{vmatrix} + \det \begin{vmatrix} AC_0 \\ AB_0 \\ AA_0 \end{vmatrix} + \det \begin{vmatrix} AC \\ AD \\ AD_0 \end{vmatrix} + \det \begin{vmatrix} AC \\ AC_0 \\ AD_0 \end{vmatrix} + \det \begin{vmatrix} AB_0 \\ AB \\ AC \end{vmatrix} + \det \begin{vmatrix} AB_0 \\ AB \\ AC_0 \end{vmatrix} + \det \begin{vmatrix} AB \\ AC \\ AC_0 \end{vmatrix}, \quad (14)$$

где каждое из слагаемых равно 1/6 части величины объёма параллелепипеда, в составе которого находится тетраэдр с заданными векторами.

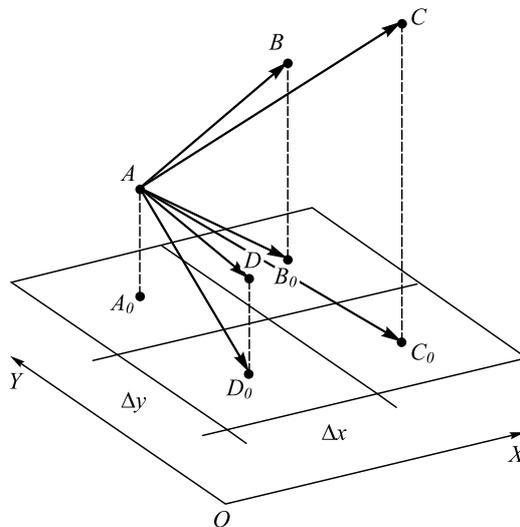


Рис. 4. К расчёту освещенности в плоскости изображения

В некоторых случаях для расчётов можно использовать менее точный, но более быстрый способ вычисления подынтегральной функции через «среднюю высоту параллелепипеда»:

$$\Phi = \frac{1}{4} \sum_{x,y} (|AA_0| + |BB_0| + |CC_0| + |DD_0|). \quad (15)$$

Сведения об авторах

Расторгуев Андрей Алексеевич, 1984 года рождения, в 2006 году окончил физический факультет Самарского государственного университета по специальности «Оптика», работает ведущим инженером-конструктором в научно-производственном отделе целевой эффективности и подтверждения ТТХ КК и КС гиперспектральных комплексов. С 2016 года обучается в аспирантуре Самарского университета. Область научных интересов: дистанционное зондирование Земли, моделирование работы гиперспектральной аппаратуры. E-mail: d1133@samspace.ru.

Сведения об авторе **Харитонов Сергей Иванович** см. стр.345 этого выпуска.

Казанский Николай Львович, 1958 года рождения. В 1981 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (1996 год), профессор, работает руководителем Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики Самарского университета. Ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прорывных технологий дистанционного зондирования Земли в Самарском университете, заведующий базовой (Самарского университета в ИСОИ РАН) кафедрой высокопроизводительных вычислений. Является членом международных научных обществ OSA, SPIE и IAPR. Н.Л. Казанский – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Н.Л. Казанского 290 статей, 12 монографий, 53 авторских свидетельства и патента. Страница в интернете: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazanskiy.htm>. E-mail: kazanskiy@ssau.ru.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 18 марта 2017г. Окончательный вариант – 8 июня 2017г.

MODELING THE ILLUMINANCE DISTRIBUTION IN THE DETECTION PLANE OF A SPACEBORNE OFFNER HYPERSPECTROMETER

A.A. Rastorguev¹, S.I. Kharitonov^{2,3}, N.L. Kazanskiy^{2,3}

¹Joint Stock Company "Rocket and Space Center" Progress", Samara, Russia,

²Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences - Branch of the FSRS "Crystallography and Photonics" RAS, Samara, Russia,

³Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

The modeling of the illuminance distribution in the detection plane of an optical scheme composed of an objective and an Offner spectrometer is conducted. We calculate the illuminance distribution in the detection plane of the hyperspectrometer in the geometric optics approximation. The calculations use models of the atmospheric brightness, earth's surface irradiance, and the spectral transmission of the atmosphere.

Keywords: hyperspectrometer, Offner scheme, illumination, modeling, spectral atmospheric transmittance.

Citation: Rastorguev AA, Kharitonov SI, Kazanskiy NL. Modeling the illuminance distribution in the detection plane of a spaceborne Offner hyperspectrometer. *Computer Optics* 2017; 41(3): 399-405. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-3-399-405.

Acknowledgement: Russian Foundation for Basic Research financially supported this work (grant No. 16-29-09528-ofi_m).

References

- [1] Schowengerdt RA. Remote sensing. Models and methods of image processing. Orlando, FL, USA: Academic Press, Inc.; 2006. ISBN: 978-0-12369-407-8.
- [2] Classifier of thematic tasks of assessment of natural resources and the environment, solved using the Earth remote sensing materials. Revision 7. Irkutsk: Baikal Center LLC Publisher, 2008.
- [3] Mouroulis P, Sellar RG, Wilson DW, Shea JJ, Green RO. Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy. *Optical Engineering* 2007; 46(6): 063001. DOI: 10.1117/1.2749499.
- [4] Mouroulis P, Wilson DW, Maker PD, Muller RE. Convex grating types for concentric imaging spectrometers. *Applied Optics* 1998; 37(31): 7200-7208. DOI: 10.1364/AO.37.007200.
- [5] Prieto-Blanco X, Montero-Orille C, González- Nuñez H, Mouriz MD, Lago EL, de la Fuente R. The Offner imaging spectrometer in quadrature. *Optics Express* 2010; 18(12): 12756-12769. DOI: 10.1364/OE.18.012756.
- [6] Prieto-Blanco X, Montero-Orille C, Couce B, de la Fuente R. Analytical design of an Offner imaging spectrometer. *Optics Express* 2006; 14(20): 9156-9168. DOI: 10.1364/OE.14.009156.
- [7] Lee JH, Jang TS, Yang H-S, Rhee S-W. Optical design of a compact imaging spectrometer for STSAT3. *Journal of the Optical Society of Korea* 2008; 12(4): 262-268.
- [8] Lee JH, Lee CW, Kim YM, Kim JW. Optomechanical design of a compact imaging spectrometer for a microsatellite STSAT3. *Journal of the Optical Society of Korea* 2009; 13(2): 193-200.
- [9] 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.
- [10] Lee JH, Jang TS, Kang KI, Rhee S-W. Flight Model Development of a Compact Imaging Spectrometer for a Microsatellite STSAT3. ORSE 2010. DOI: 10.1364/ORSE.2010.OMB3.
- [11] Karpeev SV, Khonina SN, Murdagulov AR, Petrov MV. Alignment and study of prototypes of the Offner hyperspectrometer [In Russian]. *Vestnik SSAU* 2016; 15(1): 197-206. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-1-197-206.
- [12] Karpeev SV, Khonina SN, Kharitonov SI. Study of the diffraction grating on a convex surface as a dispersive element. *Computer Optics* 2015; 39(2): 211-217. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-211-217.
- [13] Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Doskolovich LL, Pavelyev AV. Modeling the performance of a spaceborne hyperspectrometer based on the Offner scheme. *Computer Optics* 2015; 39(1): 70-76. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-1-70-76.
- [14] Kazanskiy NL, Kharitonov SI, Karsakov SI, Khonina SN. Modeling action of a hyperspectrometer based on the Offner scheme within geometric optics. *Computer Optics* 2014; 38(2): 271-280.
- [15] Schroeder G, Traiber H. Technical optics: translated from germ. Ilinsky RE. Moscow: "Technosphere" Publisher; 2006.
- [16] Slyusarev GG. Methods of calculating optical systems. Leningrad: "Mashinostroenie" Publisher; 1969.
- [17] Vladimirov VS. Equations of mathematical physics. Moscow: "Nauka" Publisher; 1981.

Authors' information

Andrey Alekseevich Rastorguev, born in 1984, in 2006 graduated from Physics department of Samara State University, specializing in Optics, working as a leading design engineer in the Research and Production department of the Target Efficiency and Confirmation of TTCSC and SS hyperspectral complexes. Since 2016, he has been studying at the post-graduate course of Samara University. Area of scientific interests: remote sensing of the Earth, modeling of hyperspectral equipment.

The information about author **Sergey Ivanovich Kharitonov** you can find on page 346 of this issue.

Nikolay Lvovich Kazanskiy (b. 1958), graduated with honors (1981) from S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, S.P. Korolyov Samara National Research University), majoring in Applied Mathematics. He received his Candidate in Physics & Maths (1988) and Doctor in Physics & Maths (1996) degrees from Samara University. He is the director of Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), also holding a part-time position of a professor at Technical Cybernetics sub-department of Samara University, a leading researcher at the laboratory of Advanced Technologies for Earth Remote Sensing at Samara University, holding the chair at the sub-department of High-Performance Computing at IPSI RAS. He is an OSA-, SPIE- and IAPR-member. He is co-author of 290 scientific papers, 12 monographs, 53 inventions and patents. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics. Website: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazanskiy.htm> . E-mail: kazanskiy@ssau.ru .

Received March 18, 2017. The final version – June 8, 2017.
