

Бортовая спектральная радиометрическая калибровка гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли

© В.И. Заварзин, А.В. Ли

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Предложена схема блока бортовой спектральной радиометрической калибровки гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли, устанавливаемой на космических аппаратах. Для этой схемы представлена методика расчета радиометрических характеристик.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, гиперспектральная аппаратура, бортовая калибровка.

Информация дистанционного зондирования Земли (ИДЗЗ), получаемая с помощью оптико-электронной аппаратуры, которую устанавливают на космических аппаратах, используется сегодня для решения многих хозяйственных задач. Поэтому необходимо, чтобы специалисты по принятию решений (потребители информации, а также заказчики и производители космических комплексов) могли полагаться на качество ИДЗЗ и продуктов, сформированных на ее основе. В последнее время развиваются методики комплексирования ИДЗЗ, полученной различными аппаратами в разное время и при различных условиях съемки [1]. Конечно, для такого рода анализа необходима высочайшая точность и стабильность радиометрических измерительных характеристик аппаратуры. Особенно это касается ИДЗЗ, получаемой гиперспектральной аппаратурой (ГСА). Отличие гиперспектральных данных заключается в большом числе спектральных каналов (до нескольких сотен) при спектральном разрешении до единиц нанометров. Это позволяет наряду с видовой информацией с высоким пространственным разрешением проводить анализ спектральных сигнатур объектов на снимках. При использовании ГСА предъявляют повышенные требования к валидации и калибровке радиометрических и спектральных характеристик.

Процедура бортовой радиометрической калибровки предназначена для контроля изменений чувствительности информационного тракта ГСА в процессе эксплуатации, а также контроля привязки шкалы длин волн. Контроль необходим для учета влияния эксплуатационных факторов (невесомость, изменение температуры и дав-

ления, механические перегрузки на этапе выведения, вибрации носителя в орбитальном полете) на взаимное положение оптической системы ГСА и приемников изображения, а также на изменение чувствительности к входному сигналу (спектральной энергетической яркости), вызванного изменениями спектрального пропускания/отражения элементов оптической системы и чувствительности приемников изображения в процессе эксплуатации. Такой контроль выполняется с использованием блока калибровки (БК).

Энергия от источника питания преобразуется источником излучения в энергию излучения, затем в оптическом тракте БК проводится пространственное перераспределение и спектральная коррекция излучения (рис. 1).



Рис. 1. Функциональная схема блока калибровки

Конструктивное решение БК должно обеспечивать возможность проведения бортового относительного контроля радиометрических параметров:

во времени — контроль временной стабильности чувствительности;

в диапазоне изменения входных сигналов — контроль стабильности формы градуировочных характеристик (ГХ), представляющий собой зависимость выходного сигнала на любом элементе приемника от значений эффективной энергетической яркости;

в пространстве (в линейном поле изображения) — контроль относительного распределения чувствительности элементов дискретизации приемников изображения;

по спектру — контроль положения шкалы длин волн (ШДВ), определяющей спектральное распределение изображения по элементам приемника.

Центральным звеном БК, определяющим его основные светотехнические параметры (мощность излучения и его спектральное распределение, а значит, и уровень облученности приемников изображения) и их стабильность, является источник излучения.

Лампы накаливания (ЛН) с вольфрамовым телом накала, в том числе и малогабаритные в кварцевой колбе с галогенным циклом (типа КГМ), широко используются в метрологии в качестве стандартных источников излучения благодаря хорошей стабильности и воспроизводимости светотехнических параметров [2, 3]. Кроме того, лампы типа КГМ имеют малые габариты, высокую механическую

прочность, более высокую температуру тела накала при том же сроке службы, что и ЛН других типов.

Хорошая точность воспроизведения спектральных характеристик абсолютно черного тела (АЧТ) в диапазоне значений рабочих цветовых температур (порядка 2800...3500 К) дает возможность достаточно просто прогнозировать распределение энергетического потока ЛН в заданных спектральных областях.

Из существующих галогенных ЛН выбор следует проводить в первую очередь по соответствию технических условий ламп заданным условиям эксплуатации (внешние воздействия). Для последующей оценки была отобрана лампа КГМ 27-100 (ТУ 16-88, ИКВА675.173.003), номинальные характеристики которой приведены ниже:

Напряжение питания, В	27	24
Мощность, Вт	100	83*
Потребляемый ток, А	3,7*	3,5*
Минимальная наработка, ч	15	55*
Световой поток, лм	3 000	2 000*
Световая отдача, лм/Вт	30	24*
Цветовая температура тела накала, К	3 400*	3 250*
Допустимое пониженное атм. давление, Па (мм рт.ст.)	133·10 ⁻¹⁴ (10 ⁻¹⁴)	
Минимальные габариты тела накала, мм	Цилиндр поперек продольной оси лампы ~(4×1,1)	

* Расчетное значение характеристики.

Изменение характеристик ЛН при изменении напряжения питания в пределах 10 % можно определить с точностью 1...2 % по формуле

$$Y/Y_0 = (U/U_0)^z, \quad (1)$$

где Y/Y_0 — относительные изменения рассчитываемой характеристики; U/U_0 — относительное изменение напряжения питания; z — показатель степени, имеющий следующие значения для параметров лампы:

- $z = -11,2$ — для срока службы;
- $z = 1,6$ — для мощности лампы;
- $z = 3,6$ — для светового потока.

Расчетно-экспериментальные характеристики лампы КГМ27-100 для различных значений цветовой температуры приведены далее:

Цветовая температура, К	2 850	3 000	3 150	3 250	3 400
Напряжение питания, В	18	20	23	24	27
Потребляемый ток, А	2,9	3,1	3,4	3,5	3,7
Мощность, Вт	52	62	77	83	100
Минимальный срок службы, ч	1 400	430	90	55	15
Световая отдача, лм/Вт	13	16	22	24	30
Световой поток, лм	700	1 000	1 700	2 000	3 000

Напряжение питания, ток и мощность определены экспериментально на одном образце, срок службы и световой поток рассчитаны по напряжению. Данные эксперимента с достаточной точностью коррелируют с результатами расчетов.

На рис. 2 показано расчетное спектральное распределение энергетического потока излучения для лампы КГМ 27-100 при напряжении питания 27 В и 24 В и соответственно, цветовой температуре тела накала 3 400 К и 3 250 К, световом потоке 3 000 лм и 2 000 лм.

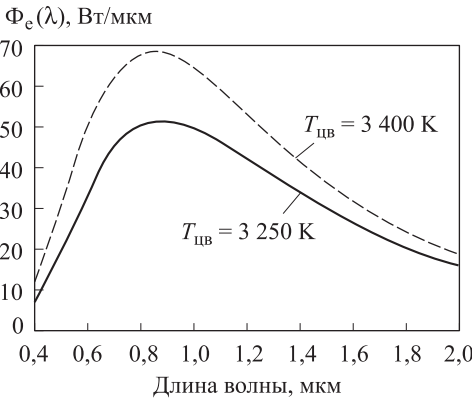


Рис. 2. Спектральное распределение энергетического потока излучения для лампы КГМ 27-100 при напряжении питания 27 В ($T_{цв} = 3\,400\text{ К}$) и 24 В ($T_{цв} = 3\,250\text{ К}$)

засветку углового поля излучением заданного спектрального распределения. При этом диффузно отражающую белую поверхность удобно располагать на внутренней стороне крышки входного окна аппаратуры.

Реализация схемы предполагает разработку специальной конструкции диффузора с высоким и стабильным коэффициентом отражения. Также он должен обладать стабильными характеристиками в случае применения его в условиях длительного орбитального полета. Предлагается использовать специальный материал типа Spektralop (или его аналог) на основе политетрафлуорорэтилена фирмы Labsphere [4]: его спектральный коэффициент отражения 94...99 % в области спектра 0,3...2,5 мкм (рис. 3). Материал обладает термостой-

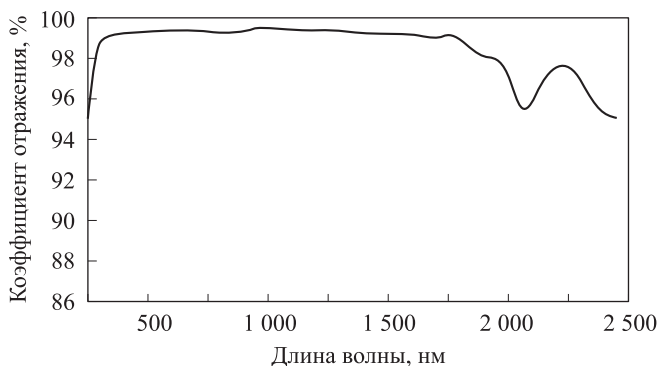


Рис. 3. Спектральный коэффициент отражения материала Spektralон

костью при температурах до 400 °С, сохраняет рабочие характеристики при давлении до $133 \cdot 10^{-6}$ Па.

Достоинством такой схемы является контроль информационного тракта в условиях, аналогичных штатной работе. При оптимально подобранных конструктивных параметрах диффузного отражателя и БК обеспечивается распределение облученности приемников, близкое к распределению при визировании равнорядкой поверхности. Периодический контроль относительного распределения чувствительности по всему угловому полю аппаратуры позволяет эффективно использовать данные замещающих калибровок (контроля радиометрических характеристик по наземным тестовым участкам, имеющим относительно небольшие размеры).

Предполагается использовать в БК четыре лампы КГМ 27-100 (рис. 4).

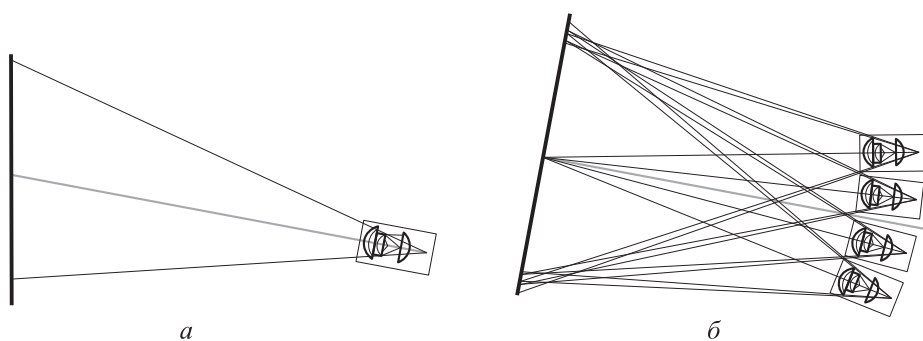


Рис. 4. Оптическая схема БК:

а — меридиональное сечение; *б* — сагиттальное сечение

Наличие такого числа ламп в БК позволяет получать не менее двух точек на ГХ, даже при отказе одной или двух ЛН. Количество контрольных точек на ГХ можно увеличивать за счет:

- различий в уровнях облученности от каждой лампы;

- изменения числа ламп, включаемых одновременно;
- дискретного изменения тока (напряжения) питания ламп;
- переменного времени экспонирования.

Для контроля положения ШДВ гладкая, близкая к АЧТ спектральная характеристика ЛН не подходит, поскольку невозможно будет проконтролировать сдвиги ШДВ аппаратуры в небольших пределах ввиду малого изменения спектральной характеристики. Устранить данный недостаток можно с помощью комбинации спектральных фильтров из цветного оптического стекла, встраиваемых в оптическую систему конденсора каждой ЛН. На рис. 5, *а* приведен пример спектральной характеристики коэффициента пропускания комбинации из двух фильтров, на рис. 5, *б* — спектрального распределения излучения, которое дает ЛН с комбинацией из двух фильтров.

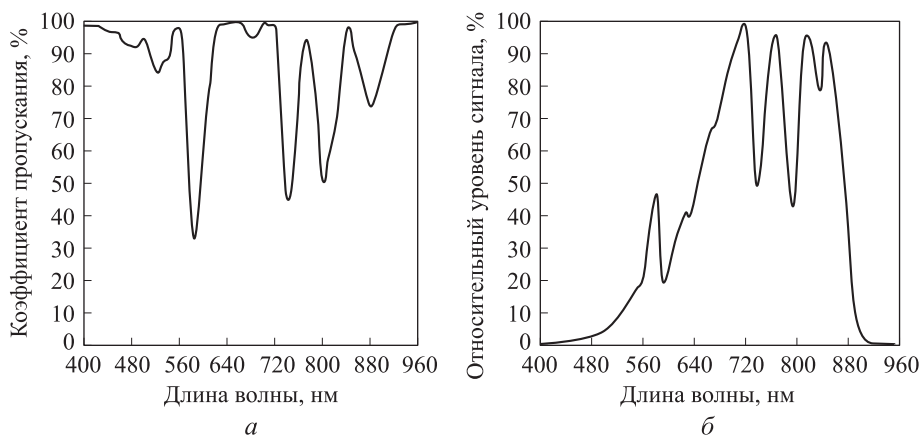


Рис. 5. Пример спектрального распределения:

а — коэффициента пропускания комбинации двух спектральных фильтров; *б* — излучения ЛН с комбинацией двух спектральных фильтров

На графиках спектрального распределения имеются несколько характерных максимумов и минимумов — спектральных реперов, которыми можно воспользоваться для контроля положения ШДВ в режиме бортовой калибровки аппаратуры. Эталонное (настроечное) положение спектральных реперов определяется при наземной радиометрической калибровке аппаратуры и записывается в формуляр радиометрических параметров.

Таким образом, контроль положения ШДВ в процессе эксплуатации заключается в проверке соответствия положения спектральных реперов их эталонному значению.

При радиометрической аттестации блока калибровки для каждого элемента приемника и каждой ЛН определяют эффективные яркости на входном зрачке. По этим данным в процессе эксплуатации для

любого элемента строки изображения в каждом спектральном канале можно получать ГХ методом суперпозиции в соответствии с выражением

$$N = f \left(\sum_{i=1}^n L_{\text{БК}_i} \right), \quad (2)$$

где $L_{\text{БК}_i}$ — эффективная яркость от i -й лампы БК; n — число включенных ламп БК; i — номера включенных ламп БК (лампы могут включаться в любом сочетании).

Спектральная плотность энергетической облученности диффузного отражателя БК определяют по формуле [2]

$$E_e(\lambda) = \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_{e_i}(\lambda) k \tau_{\text{осв}}(\lambda) \tau_{\text{с.ф}}(\lambda) \cos \alpha_i}{Q_i}, \quad (3)$$

где $\Phi_{e_i}(\lambda)$ — спектральная плотность энергетического потока излучения i -й ЛН; $k \approx 4$ — коэффициент усиления силы света источника в оптической схеме БК; $\tau_{\text{осв}}(\lambda) \approx 0,85$ — спектральный коэффициент пропускания оптической схемы БК; $\tau_{\text{с.ф}}(\lambda)$ — спектральный коэффициент пропускания спектральных фильтров; α_i — угол падения излучения от источника на диффузную поверхность в центре световой зоны.

Площадь Q_i , освещаемая каждым источником в плоскости установки диффузного отражателя, можно вычислить по формуле

$$Q_i = \frac{\pi R_i^2 \operatorname{tg} \omega}{\cos \alpha_i \operatorname{tg} \omega - \sin \alpha_i}, \quad (4)$$

где R_i — расстояние от источника излучения до диффузно отражающей поверхности; 2ω — угол при вершине конуса света, создаваемого каждым источником.

Поскольку диффузно отражающую поверхность можно считать ламбертовой в пределах узкого диапазона углов, то с учетом коэффициента отражения $\rho(\lambda)$ спектральная плотность энергетической яркости поверхности будет

$$L_e(\lambda) = \frac{\rho(\lambda) E_e(\lambda)}{\pi}. \quad (5)$$

Спектральная плотность энергетической яркости передается оптической системой аппаратуры на светочувствительную поверхность фотоприемного устройства. Расчет спектральной плотности энергии

тической облученности в плоскости приемников изображения определяют по формуле [5]

$$E'_e(\lambda) = \frac{\pi L_e(\lambda) \tau_{\text{ан}}(\lambda)}{4K^2}, \quad (6)$$

где $\tau_{\text{ан}}(\lambda) \approx 0,5$ — спектральный коэффициент пропускания оптической системы аппаратуры; K — диафрагменное число оптической системы аппаратуры.

Интегральная энергетическая облученность, регистрируемая каждым элементом фотоприемного устройства, определяется выражением

$$e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) E'_e(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) f(L_e(\lambda)) d\lambda, \quad (7)$$

где $S(\lambda)$ — спектральная чувствительность фотоприемного устройства, отн. ед.; λ_1, λ_2 — коротковолновая и длинноволновая границы падающего на элемент спектрального диапазона по ШДВ.

Зависимость выходного сигнала на любом элементе приемника от значений эффективной энергетической яркости L описывается равенством

$$N = AL + D, \quad (8)$$

где A — крутизна градуировочной характеристики; D — смещение градуировочной характеристики.

При наземной калибровке значения A и D с помощью коэффициентов коррекции чувствительности и темнового сигнала приводят к единым значениям для всех элементов строки. В процессе эксплуатации БК позволяет контролировать изменения значений A и D и уточнять при необходимости коэффициенты коррекции, восстанавливая тем самым ГХ аппаратуры.

Точность контроля чувствительности с помощью БК (точность бортовой калибровки) определяется в основном стабильностью светового потока ЛН, которая зависит от характеристик стабилизации источника питания. Относительные изменения светового потока лампы устанавливаются по уравнению (1) при значениях показателя степени:

$z = 6$ — по току;

$z = 3,6$ — по напряжению;

$z = 2,25$ — по мощности.

При вкладе источника питания в погрешность калибровки в пределах 1 % требуется точность стабилизации по напряжению 0,27 %, по току — 0,16 % и по мощности — 0,44 %.

Для метрологических целей выбрана стабилизация по току, при которой устраняются погрешности, связанные с изменением сопротивления цепи питания. Такая стабилизация благоприятна для продления ресурса лампы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Макаренков А.А., Москвитин А.Э. Информационные технологии комплексирования материалов гиперспектральной съемки Земли с данными от других съемочных систем. *Сб. материалов науч.-техн. конф. «Гиперспектральные приборы и технологии»*. Красногорск, 2013, с. 112.
- [2] Гуревич М.М. *Фотометрия (теория, методы и приборы)*. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград, Энергоатомиздат, 1983, 272 с.
- [3] Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Андреев А.Л., Польщиков Г.В. *Источники и приемники излучения*. Санкт-Петербург, Политехника, 1991, 240 с.
- [4] <http://www.labsphere.com/products/reflectance-materials-and-coatings/high-reflectance-materials/space.aspx> (дата обращения 15.06.2013).
- [5] Заказов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. *Теория оптических систем*. Москва, Машиностроение, 1992, 448 с.

Статья поступила в редакцию 24.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Заварзин В.И., Ли А.В. Бортовая спектральная радиометрическая калибровка гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования Земли. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/823.html>

Заварзин Валерий Иванович родился в 1956 г., окончил МВТУ им. Н. Э. Баумана в 1980 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований», декан факультета «Оптико-электронное приборостроение» МГТУ им. Н. Э. Баумана. Автор более 100 научных публикаций в области оптического приборостроения. e-mail: zavarzin@bmstu.ru

Ли Александр Викторович родился в 1987 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. Аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 научных публикаций. e-mail: alvik87@gmail.com