

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРЕДПОЛЕТНОЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ КОСМИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН

А.С. Панфилов, С.П. Морозова, С.А. Огарев, Б.Б. Хлевной, В.И. Саприцкий

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений

119361, Москва, ул. Озерная, 46

E-mail: panfilov-m4@mail.ru

Рассматривается состояние метрологического обеспечения радиометрической калибровки космических датчиков изображений, определяющего их радиометрическую точность на предполетном этапе. Представлены данные по российской радиометрической эталонной базе и используемым калибровочным установкам. Даны точностные характеристики технических средств и показаны перспективы их улучшения.

Введение

Согласно [1, 2], радиометрическая точность датчиков изображений (ДИ) на предполетном этапе в основном определяется калибровочной составляющей суммарной стандартной неопределенности. Поэтому целесообразно рассмотреть состояние метрологического обеспечения предполетной радиометрической калибровки космических ДИ в настоящее время и возможности его улучшения в перспективе.

Составляющими метрологического обеспечения являются методическая, техническая и нормативная базы. Методическая часть включает:

- определение измеряемых величин и их единиц измерения;
- метод измерений как логическую последовательность операций, описанную в общем виде и реализуемую в методике измерений;
- единый подход к оцениванию точности результатов измерений.

Применительно к рассматриваемой тематике она изложена в работах [1, 2].

В качестве технической основы используются системы

- эталонов, калибровочных установок и устройств,
- передачи размеров единиц физических величин,
- метрологической аттестации калибровочных (поверочных) установок и устройств.

Использование современной элементной базы и технологий при создании ДИ приводит к тому, что именно техническая составляющая метрологического обеспечения определяет уровень точности предполетной радиометрической калибровки. Поэтому ей и посвящено основное содержание данной работы.

Нормативная база включает правила и нормы метрологического обеспечения.

1. Эталонная база

Эталонная база является основой обеспечения единства измерений. От первичного эталона размер единицы физической величины передается подчиненным эталонам, в том числе рабочим, входящим в состав калибровочных установок, с помощью которых проводится калибровка рабочих средств измерений (в нашем случае – ДИ). Их взаимосвязь с эталонными и принципы применяемых методов передачи размеров единиц физических величин в России определяются разрабатываемыми для этих целей поверочными схемами [3, 4].

Договоренность на международном уровне о взаимном признании национальных эталонов, калибровочных и измерительных сертификатов под эгидой Международного комитета мер и весов [5] и проводимые сличения средств измерений [6, 7] дают возможность обеспечения международного единства измерений.

Для формирования радиометрических шкал многие ведущие национальные метрологические центры используют черные тела (ЧТ) [6]. Во главе российской эталонной базы, на которой основывается радиометрическая калибровка ДИ видимого и ближнего ИК (ВБИК) диапазонов длин волн, стоит первичный эталон единиц радиометрических величин в спектральном диапазоне 0,25 - 25,00 мкм [3], разработанный и хранимый во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений (ВНИИОФИ). Он обеспечивает воспроизведение шкал спектральной плотности энергетической яр-

кости (СПЭЯ), спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО), спектральной силы излучения, энергетической освещенности и силы излучения. Для воспроизведения размеров единиц спектральных величин в диапазоне 0,25 - 3,00 мкм в составе эталона используется ЧТ с рабочим диапазоном температур (1800 - 3000) К.

Размер единицы СПЭЯ от первичного эталона передается вторичным и рабочим эталонам в виде моделей ЧТ и ленточных вольфрамовых ламп. Передача размера осуществляется с помощью спектрокомпараторов. Получаемые при этом точностные характеристики в рассматриваемом диапазоне длин волн, согласно [3], даны в таблице 1.

2. Техническая реализация схемы радиометрической калибровки датчиков изображений

Согласно [1], в процессе радиометрической калибровки ДИ ВБИК диапазонов длин волн измеряются их градуировочные и спектральные характеристики, пространственная равномерность чувствительности и отношение сигнал/шум; осуществляется передача

Таблица 1. Точностные характеристики средств измерений спектральной плотности энергетической яркости

Длина волны излучения, мкм	1×10^{-2}	
	Средние квадратические отклонения сличений вторичных эталонов с государственным	Пределы допускаемых относительных погрешностей рабочих эталонов
0,40	1,00	2,80
0,50	0,60	1,60
0,60	0,50	1,50
0,65	0,50	1,50
0,70	0,50	1,55
0,80	0,50	1,60
0,90	0,50	1,65
1,00	0,50	1,75

размера единицы СПЭЯ. Необходимым условием выполнения этих технологических операций является наличие следующих источников излучения:

- источник излучения для передачи размера единицы СПЭЯ датчику изображений,
- источник излучения с переменной яркостью для измерения градуировочных характеристик в относительных единицах,
- монохроматический источник излучения для измерения относительных спектральных характеристик чувствительности,
- источник излучения для измерения пространственной неравномерности сигнала при визировании равномерно окрашенной поверхности.

Помимо этих источников излучения в схемы калибровки входят оптические элементы, согласующие геометрические параметры ДИ и используемых излучателей; прецизионные устройства позиционирования ДИ; системы питания, контроля и регистрации; вычислительный комплекс с программным обеспечением. Перечисленные устройства могут объединяться в достаточно сложные калибровочные установки, монтируемые, как правило, на массивных виброустойчивых основаниях [8 - 12], но могут быть и комплексом отдельных устройств [13 - 16]. Рассмотрим типичные схемы для выполнения технологических операций радиометрической калибровки ДИ.

2.1. Передача размера единицы СПЭЯ

Для обеспечения единства измерений осуществляется передача размера единицы СПЭЯ калибруемому ДИ в соответствии с поверочной схемой, возглавляемой национальным эталоном. В практике радиометрической калибровки аэрокосмических ДИ ВБИК диапазонов длин волн применяются два основных типа схем передачи. Это схемы с близкорасположенными протяженными излучателями [8 - 10, 13 - 21] и коллиматорные схемы [11, 12, 22].

2.1.1 Схемы с протяженными излучателями

Протяженные излучатели должны обладать:

- возможностью реализации необходимого размера излучающей поверхности, который позволяет заполнить поле зрения как узкоугольных, так и широкоугольных ДИ, в том числе и с большими входными зрачками;
- пространственной и угловой равномерностью яркости излучающей поверхности;
- высокой стабильностью параметров излучения.

Наличие этих свойств и возможностей у протяженных излучателей в виде интегрирующих сфер определило их преобладающее использование в практике радиометрической калибровки ДИ ВБИК диапазонов длин волн. По опубликованным материалам в таблице 2 представлены основные характеристики используемых в аэрокосмической практике интегрирующих сфер.

Таблица 2. Характеристики интегрирующих сфер для калибровки аэрокосмической аппаратуры

Принадлежность	Размер выходного отверстия, мм	Количество используемых ламп	Пространственная неоднородность, %	Стабильность во времени, %	СКО СПЭЯ, %
NOAA (США)	300	12			0,7 – 0,8
NASA (США)	450 и 250	12	< 1	~ 1	0,7 – 0,8
JPL (США)	400	4	1	1,1	3,1
TRW (США)		1		0,1	0,3 – 0,5
CNES (Франция)	600	10	< 1		
РНИИКП (Россия)	230	12	< 1		3,25

Для передачи размера единицы СПЭЯ самим интегрирующим сферам используются:

1. Метод сличения с рабочим эталоном единицы СПЭЯ в виде ленточной вольфрамовой лампы накаливания с помощью спектрокомпаратора, состоящего из монохроматора, проектирующей оптической системы и радиометра [8 – 10, 13, 19];
2. Метод сличения с диффузно-отражающим экраном, облучаемым эталонной лампой накаливания, откалиброванной по СПЭО [18, 20];
3. Метод сличения с абсолютным диффузным излучателем, откалиброванным по эталонному источнику [21].

Реализуемые при этом значения СКО определения СПЭЯ интегрирующих сфер лежат в пределах 2,5 – 5%. Значительно выше, по данным [14], точность СПЭЯ интегрирующей сферы, входящей в состав калибровочного оборудования фирмы TRW. Предельное значение погрешности составляет $\pm 1\%$. Для этой сферы также характерна высокая временная стабильность излучения, составляющая $\pm 0,1\%$ на протяжении нескольких часов.

Из таблицы 2 следует, что пространственная равномерность распределения яркости выходного отверстия интегрирующих сфер характеризуется неоднородностью $\leq 1\%$. Это позволяет использовать их для измерения пространственной неравномерности сигнала ДИ при визировании равнояркой поверхности.

Наличие в составе интегрирующей сферы нескольких ламп позволяет изменять ее яркость в зависимости от числа включенных ламп и использовать ее для измерения градуировочных характеристик ДИ. При этом число уровней яркости в пределах динамического диапазона зависит от общего количества ламп в сфере. Например, в интегрирующей сфере, использовавшейся для радиометрической калибровки немецкого видеоспектрометра DAIS-7915 [21], их было 18. Для ослабления излучения сферы применяются ирисовые диафрагмы [14], турели с набором диафрагм различного диаметра [18, 19]. Если яркость сферы не регулируется, как, например, в установке [9, 10], то для измерения градуировочных характеристик ДИ используется дополнительный излучатель, обеспечивающий переменный входной поток с неизменным спектральным составом излучения.

Пример использования диффузноотражающего экрана для передачи размера единицы СПЭЯ радиометру описан в [20]. Эталонная кварцевая галогенная лампа, откалиброванная по спектральной плотности энергетической освещенности, облучает диффузноотражающий экран с отражательной способностью $\sim 0,99$. Отраженный поток равномерно заполняет поле зрения радиометра. Суммарное СКО формируемого потока оценивается значением $\sim 2,5\%$.

Коллиматорные схемы

Помимо схем с протяженными излучателями, для передачи размера единицы СПЭЯ используются коллиматорные схемы. Источник излучения помещается в фокальной плоскости коллиматора, а пучок излучения на его выходе, калиброванный по СПЭЯ, направляется во входной зрачок ДИ. При этом расходимость лучей на выходе коллиматорного источника, определяемая суммой углового размера излучателя и угловых аберраций коллиматорного объектива, должна быть меньше углового разрешения калибруемого ДИ. Световой диаметр коллиматора должен быть больше диаметра входного зрачка объектива ДИ, причем энергетическая яркость, наблюдаемая через различные зоны светового отверстия коллиматора, должна быть одинаковой. Коллиматоры обычно выполняются зеркальными и работают в широком спектральном диапазоне, что позволяет калибровать с их помощью многозональные ДИ. В качестве источника излучения в схемах КИМ 0.3-15 [22] и Лос-Аламосской национальной лаборатории [11, 12] использовались малые интегрирующие сферы. Данные по точности воспроизведения СПЭЯ измерительного метрологического комплекса КИМ 0.3-15 приведены в таблице 3.

Таблица 3. Погрешности измерительного метрологического комплекса КИМ 0.3-15

Параметр или характеристика	Численное значение
Основная погрешность воспроизведения спектральной плотности энергетической яркости при доверительной вероятности $P = 0.95$, % в спектральных диапазонах:	
0.3 - 0.4 мкм	≤ 4.9
0.4 - 0.8 мкм	≤ 3.9
0.8 - 1.2 мкм	≤ 3.2
1.2 - 2.5 мкм	≤ 2.8
Основная погрешность воспроизведения относительной спектральной характеристики излучения при $P = 0.95$, %	≤ 2.0

Предельная погрешность калибровки во ВБИК диапазонах длин волн (до 0,9 мкм) с помощью установки [11, 12] - 1 % при доверительной вероятности 0,99.

2.2. Измерение относительных спектральных характеристик

Измерение относительных спектральных характеристик чувствительности ДИ производится с помощью монохроматического источника излучения. Монохроматизация излучения может осуществляться как монохроматором, так и полосовыми фильтрами [23]. Более широкое распространение имеет первый вариант, в котором во ВБИК диапазонах длин волн поток излучения от лампы накаливания направляется во входную щель монохроматора. Его выходная щель находится в фокальной плоскости коллиматора, на выходе которого формируется коллимированный узкополосный пучок излучения. Относительная спектральная характеристика ДИ может измеряться методом сравнения, если этот пучок поочередно направляется во входной зрачок калибруемого датчика и на эталонный приемник излучения с известной относительной спектральной характеристикой чувствительности [15, 20].

Однако, в основном, в системах ДЗЗ применяется другой способ измерения относительных спектральных характеристик ДИ [2, 18]. Измерения проводятся с помощью описанной системы монохроматический источник излучения – коллиматор с известной функцией относительного спектрального распределения излучения на ее выходе. При этом СКО измерения относительных спектральных характеристик ДИ находится на уровне 1 %.

3. Калибровочные установки и перспективы улучшения их точностных характеристик

Приведем данные по отечественным установкам для радиометрической калибровки ДИ. ВНИИО-ФИ разработало серию идентичных калибровочных установок с использованием интегрирующих сфер [8 – 10, 17, 19], обеспечивавших калибровку в полном объеме. Помимо необходимых для этого излучателей, в состав установок входили эталонная ленточная вольфрамовая лампа, аттестованная по СПЭЯ, и спектрокомпаратор, с помощью которых аттестовывались интегрирующая сфера и монохроматический излучатель.

В настоящее время в России из числа этих установок действует и проходит периодическую метрологическую аттестацию метрологической службой только установка РНИИКП «Камелия». Точностные параметры этой установки, согласно [9, 10], следующие. Составляющие погрешности воспроизведения

абсолютной величины СПЭЯ для $\lambda = 0,99$ мкм интегрирующей сферы: СКО 3 % и неисключенная систематическая погрешность (НСП) 1,7%. СКО и НСП относительной СПЭЯ монохроматического источника излучения и интегрирующей сферы даны в таблице 4. Этими составляющими определяется суммарное СКО воспроизведения СПЭЯ 3,25 %, указанное в таблице 2.

Таблица 4. Погрешности воспроизведения СПЭЯ установки «Камелия»

Диапазон длин волн, мкм	Монохроматический излучатель			Диффузный излучатель		
	СКО, %	НСП, %	S_{Σ}	СКО, %	НСП, %	S_{Σ}
0,4 – 0,5	1,5	1,5	1,7	1,5	2,8	2,2
0,5 – 0,6	1,0	1,5	1,3	1,0	1,6	1,4
0,6 – 0,7	0,5	1,5	1,0	0,5	1,5	1,0
0,7 – 0,85	0,5	1,5	1,0	0,5	1,6	1,05
0,85 – 1,0	0,5	1,0	0,76	0,5	1,7	1.1

Примером коллиматорной установки является комплекс КИМ 0.3-15 [22]. Его основные точностные характеристики приведены в таблице 3.

Рассмотрим перспективы повышения точности воспроизведения СПЭЯ в калибровочных установках. В первую очередь можно рекомендовать проведение передачи размера единицы СПЭЯ рабочему эталону, входящему в состав установки, непосредственно от первичного эталона. При этом условия функционирования установки должны соответствовать новому более высокому уровню точности. Согласно таблице 1, это обеспечит уменьшение СКО воспроизведения СПЭЯ рабочим эталоном с 0,75 – 1,4 % до 0,5 – 1 %. Использование современных средств передачи размера единицы СПЭЯ в сочетании с максимальной тщательностью проведения этих операций, демонстрируемые, например, в РТВ – Германия [24], позволят уменьшить СКО до 0,2 – 0,4 %.

Дальнейшие перспективы улучшения точностных характеристик эталонов связаны с проводимыми во ВНИИОФИ работами по разработке ЧТ на базе высокотемпературных фазовых переходов эвтектик - соединений металла и углерода [7, 25]: Ir-C (2563 K), Re-C (2748 K), TiC-C (3034 K), ZrC-C (3154 K) и HfC-C (3458 K). В круглых скобках указаны температуры фазовых переходов. Многочисленные радиометрические измерения, проведенные с этими ЧТ во ВНИИОФИ, РТВ и NPL (Англия), продемонстрировали уникальную воспроизводимость СПЭЯ и СПЭО – отклонения в пределах 0,01 – 0,03 %. Это позволяет рассчитывать на создание радиометрических эталонов, характеризующихся стандартной неопределенностью воспроизведения величин на уровне 0,1 %. При этом нужно будет приложить усилия к тому, чтобы этот высокий уровень был максимально сохранен при передаче размера единицы СПЭЯ калибруемой аппаратуре.

Литература

1. Панфилов А.С. Метрологические аспекты измерений оптических характеристик системы «поверхность Земли-атмосфера» по результатам съемки из космоса // Исслед. Земли из космоса, 2002. №5. С.15-21.
2. Панфилов А.С., Глазкова И.А. Оценка точности предполетной радиометрической калибровки оптико-электронной съемочной аппаратуры видимого и ближнего ИК диапазонов длин волн // Исслед. Земли из космоса, 2003. № 5. С. 43-50.
3. ГОСТ 8.195-89 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения и спектральной плотности энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,25–25,00 мкм; силы излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,2–25,00 мкм.
4. ГОСТ 8.061-80 ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение.
5. Mutual Recognition of National Measurement Standards and of Calibration and Measurement Certificates Issued by National Metrology Institutes. BIPM. 1999.
6. Walker J.H., Saunders R.D., Jackson J.K., Mielenz K.D. Results of a CCPR Intercomparison of Spectral Irradiance Measurements by National Laboratories // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., 1991. V. 96. № 6. P. 647 – 668.
7. Khlevnoy B.B., Harrison N.J., Rogers L.J. et al. Intercomparison of radiation temperature measurements over the temperature range 1600 to 3300 K // Metrologia, 2003. V. 40. № 1. P. S39-S44.
8. Богданов А.А., Стожкова В.Н., Севастьянова О.И., Толстых Г.Н. О результатах метрологической аттестации измерительного поверочного комплекса "Крона-С" диапазона спектра 0,35-2,20 мкм // Труды ГосНИЦИПР, 1988. Вып. 32. С. 141-150.
9. Космическая система "Ресурс" для исследования природных ресурсов Земли и контроля окружающей среды. Оперативная подсистема "Ресурс-О" для наблюдения суши // Справочное пособие, под ред. Гусева Л.И. и др. М.: Главкосмос, 1988. 234 с.

10. *Киселев И.А., Коростелев А.Н., Нараева М.К. и др.* Контроль энергетических характеристик многозональных сканирующих устройств ИСЗ "Ресурс-О1" // Исслед. Земли из космоса, 1991. № 2. С. 34-43.
11. *Bender S., Maier W.B.II, Byrd D. et al.* The Los Alamos Calibration Laboratory for Multi-Spectral and Thermal Imaging Radiometer System // Proc. of the Fourth SDL/USU Symp. on Infrared Radiometric Sensor Calibration, Logan: SDL, USU, Utah 84321-1942. May 9-12, 1994.
12. *Maier W.B.II, Holland R., Bender S. et al.* Radiometric Sources for the Los Alamos Calibration Laboratory // Proc. of the Fourth SDL/USU Symp. on Infrared Radiometric Sensor Calibration, Logan: SDL, USU, Utah 84321-1942. May 9-12, 1994.
13. *Guenther B., Mc Lean J., Leroy M., Henry P.* Comparison of CNES Spherical and NASA Hemispherical Large Aperture Integrating Sources: I Using a Laboratory Transfer Spectroradiometer // Remote Sens. of Environ., 1990. V. 31. № 2. P. 85-95.
14. *Folkman M.A., Jareske P.J., Darnton L.A.* Enhancements to the radiometric calibration facility for the Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) instruments // Proc. SPIE, 1991. V. 1493. P. 255-266.
15. *Jareske P.J., Folkman M.A., Darnton L.A.* Radiometric calibration plan for the Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) scanning instrument // Proc. SPIE, 1991. V. 1493. P. 244-254.
16. *Cracknell A.P.* The Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) // London: Taylor&Francis, 1997. 534 pp.
17. *Аванесов Г.А., Богданов А.А., Наумов А.П. и др.* Методика и аппаратура радиометрической градуировки в абсолютных энергетических единицах многозональной сканирующей системы «Фрагмент» // Исслед. Земли из космоса, 1981. № 6. С.79-88.
18. *Vane G., Chrien T.G., Miller E.A., Reimer J.H.* Spectral and radiometric calibration of the Airborne Visible/Infrared Spectrometer // Proc. SPIE, 1987. V. 834. P. 91 - 105.
19. *Тыннисон Т.А., Граф П.Э., Мяртин Л.О.* Поверочная установка "Спектр" для метрологической аттестации аэрокосмической радиометрической аппаратуры в диапазоне длин волн 0,3-2,5 мкм // В сб.: Дистанционное зондирование атмосферы с борта орбитального комплекса "Салют-7" - "Космос-1686" - "Союз-Т14", Тарту: 1989. С. 54-66.
20. *Sromovsky L.A., Fry P.M.* Calibration of the Galileo Net Flux Radiometer // Proc. of the Fourth SDL/USU Symp. on Infrared Radiometric Sensor Calibration, Logan: SDL, USU, Utah 84321-1942. May 9-12, 1994.
21. *Oertel D., Morozova S.P.* Universal calibration facility for VIS-TIR wide-angle videospectrometric airborne sensors // Proc. SPIE, 1994. V. 2223. P. 288-299.
22. *Мухамедяров Р.Д., Глушков А.С., Михайлов А.С., Хисамов Р.Ш.* Метрологическая аттестация многоспектрального сканирующего устройства высокого разрешения // Исслед. Земли из космоса, 1991. № 1. С. 5-29.
23. *Wyatt C.L.* Radiometric Calibration: Theory and Methods // Orlando: FL: Acad. Press, Inc. 1978. 119 pp.
24. *Friedrich R., Fischer J.* New spectral radiance scale from 220 nm to 2500 nm // Metrologia, 2000. V. 37. P. 539 - 542.
25. *Sapritsky V.I., Ogarev S.A., Khlevnoy B.B. et al.* Development of metal-carbon high-temperature fixed-point blackbodies for precision photometry and radiometry // Metrologia, 2003. V. 40. № 1. P. S128-S131.