

УДК 528.7: 629.78

Л. А. Михеенко, В. Н. Боровицкий

Национальный технический университет Украины «Київський політехнічний інститут», Київ

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Аналізуються методи, схеми і засоби абсолютизації вимірювань енергетичних характеристик і калібрування оптико-електронних приладів дистанційного зондування Землі. Запропоновано нові схеми і методи калібрування вітчизняних космічних систем високого амплітудного і просторового розділення, які гарантують високий метрологічний рівень вимірювань при використанні доступної в Україні еталонної, елементної і приладової бази.

ВВЕДЕНИЕ

Радиометрическая калибровка многоспектральных сканирующих устройств (МСУ) космического базирования является важнейшим этапом их предполетной подготовки, от метрологического уровня которой во многом зависит качество информации, получаемой с космического аппарата. Разработкой калибровочных установок и соответствующего метрологического обеспечения занимаются все ведущие космические организации мира [1, 3, 9, 20, 21]. Значительные успехи достигнуты в этом направлении Россией, где в различное время были созданы достаточно совершенные системы «Терек», «Поиск», «Камелия», «Крона», «Спектр» для калибровки бортовой аппаратуры искусственных спутников Земли «Ресурс», «Фрагмент», «Метер» и др. [21]. Начаты такие работы и в Украине, в частности для предполетной калибровки украинских МСУ типа «EgypTsat» и высокоразрешающих систем нового поколения [3, 16, 17].

Следует, однако, отметить, что задача метрологического обеспечения радиометрической калибровки и связанная с этим абсолютизация измерений является одной из самых сложных в современной радиометрии. Применительно к Украине решение этой задачи осложняется рядом дополнительных факторов. Среди них в первую очередь следует назвать несовершенство отечественной оптической эталонной базы, от-

сутствие государственных поверочных схем передачи большинства единиц энергетических величин, недостаток, физический и моральный износ большинства образцовых оптических средств измерений различного ранга и ряд других [12, 19].

Целью настоящей работы является разработка рекомендаций по метрологическому обеспечению измерений энергетических характеристик и радиометрической калибровке отечественных МСУ нового поколения на основе имеющейся и доступной в Украине эталонной и элементной базы.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКЕ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Многоспектральные сканирующие устройства, используемые в системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), существенно различаются по своим характеристикам и параметрам — спектральному диапазону, пространственному и амплитудному разрешению, полю зрения, апертуре, чувствительности и т. д. Для объективного сопоставления и эффективного использования результатов ДЗЗ, получаемых в различных полетных условиях, необходимо соответствующее метрологическое обеспечение, включающее выбор физической единицы измерений, передачу этой единицы от эталона к рабочим средствам

измерений, выбор оптимальной измерительной схемы и элементной базы калибровочной установки, минимизацию погрешности всего измерительного тракта.

В подавляющем большинстве случаев МСУ сканирует по ходу полета ИСЗ небольшой участок земной поверхности и регистрирует лучистый поток, поступающий на многоэлементный приемник излучения в различных участках спектра. И хотя мгновенное поле зрения, апертурный угол и спектральные диапазоны МСУ имеют конечные значения, по принципу работы МСУ относят к радиометрам-яркомерам. Поэтому в качестве радиометрической величины, количественно определяющей исследуемое излучение, принимают спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) [1, 3, 9, 19, 20, 21].

Отметим, что достаточно строго такой подход справедлив в отношении геометрических параметров МСУ – поля зрения и апертурного угла. В отношении же спектральных характеристик, особенно для МСУ с панхроматическими каналами, использование СПЭЯ связано с определенными метрологическими проблемами.

Действительно, связь между измеряемой МСУ радиометрической величиной и выходным сигналом приемника излучения определяется соотношением

$$G = \int_0^{\infty} L(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где G – выходная реакция приемника излучения МСУ, $L(\lambda)$ – спектральная яркость исследуемого участка земной поверхности как функция от длины волны λ , $S(\lambda)$ – абсолютная спектральная чувствительность МСУ. Отсюда интегральная чувствительность МСУ равна

$$S = \frac{G}{L} = \frac{\int_0^{\infty} L(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{L} = \frac{\int_0^{\infty} L(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} L(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

$$L = \int_0^{\infty} L(\lambda) d\lambda.$$

Здесь L – интегральная (полная) яркость излучателя.

Учитывая, что МСУ работают в спектральных диапазонах различной ширины $\Delta\lambda$, и при этом для их градуировки используются излучатели различного спектрального состава, общее выражение (2) для каждого конкретного случая калибровки (градуировки) принимает вид

$$S_U = \frac{\int_0^{\infty} L_{\text{ET}}^O(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} L_{\text{ET}}^O(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

$$S_{\Delta\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} L_{\text{ET}}^O(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} L_{\text{ET}}^O(\lambda) d\lambda}, \quad (4)$$

$$S_M = \frac{\int_0^{\infty} L_{\text{ET}}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} L_{\text{ET}}(\lambda) S^O(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

где S_U , $S_{\Delta\lambda}$, S_M – интегральная, абсолютная и «эффективная» [5] чувствительность спектрального канала МСУ, $L_{\text{ET}}(\lambda)$, $L_{\text{ET}}^O(\lambda)$ – абсолютная и относительная характеристики градуированного (калиброванного) излучателя, $S^O(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность спектрального канала МСУ.

На основании этого следует также уточнить и определение МСУ, сделанное ранее. В соответствии с (3)–(5) приборы этого типа целесообразно отнести к спектрально-несогласованным радиометрам-яркомерам.

Использование интегральной чувствительности S_U (3) при определении яркости исследуемого объекта целесообразно в том случае, когда градуировочный излучатель имеет спектральную характеристику, подобную спектру излучения исследуемого объекта. Выполнение этого условия достигается спектральной коррекцией градуировочного излучателя и возможно при калибровке широкодиапазонных МСУ для типо-

вых измерительных задач, либо при сравнительных оценках МСУ различного типа.

Градуировка МСУ по эффективной чувствительности $S_M(5)$ целесообразна при сохранении формы характеристик относительной спектральной чувствительности, одинаковой для всех спектральных каналов. Требования к градуировочному излучателю в этом случае несколько снижаются, так как различные спектральные характеристики исследуемых объектов и МСУ можно учесть введением нормирующих коэффициентов.

В связи с отмеченными особенностями различных определений чувствительности в работе [1] предложено при градуировке МСУ определять его чувствительность к СПЭЯ в соответствии с выражением

$$S_{\text{СПЭЯ}} = \frac{G}{L_{\text{ЕТ}}(\lambda_{\text{ТР}})} = \frac{\int_0^{\infty} L_{\text{ЕТ}}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{L_{\text{ЕТ}}(\lambda_{\text{ТР}})}, \quad (6)$$

где $S_{\text{СПЭЯ}}$ — определяемая чувствительность, $L_{\text{ЕТ}}(\lambda)$ — СПЭЯ градуировочного излучателя на длине волны $\lambda_{\text{ТР}}$ в пределах области чувствительности спектрального канала МСУ.

В качестве $\lambda_{\text{ТР}}$ рекомендуется выбрать такую длину волны, на которой отношение СПЭЯ градуировочного и измеряемого излучателя равно отношению их эффективных яркостей. В этом случае погрешность нормирования чувствительности МСУ будет равной нулю. Соответствующая эффективная длина волны [1] задается следующим отношением:

$$\frac{L_{\text{ЕТ}}(\lambda_{\text{ЭФ}})}{L(\lambda_{\text{ЭФ}})} = \frac{\int_0^{\infty} L_{\text{ЕТ}}(\lambda) S^{\text{O}}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} L(\lambda) S^{\text{O}}(\lambda) d\lambda}, \quad (7)$$

В этом методе необходимо точно знать СПЭЯ градуировочного излучателя или его спектральную характеристику и интегральное значение яркости. Техническая реализация в этом случае будет значительно проще, чем в предыдущих случаях.

Следует, однако, отметить, что и в этом случае сохраняется неопределенность идентификации

объектов, спектральные характеристики которых существенно различаются. Но эта неопределенность может быть существенно уменьшена различными методами нормировки [2, 4, 25].

Таким образом, калибровку МСУ наиболее целесообразно проводить по СПЭЯ либо непосредственно компарированием, что всегда точнее, либо косвенными методами, что часто технически проще и экономически целесообразней.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И КАЛИБРОВКИ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Обычно при радиометрической калибровке и аттестации МСУ космического базирования решаются следующие задачи [1, 3, 9, 19, 20, 21]:

- измерение относительной функции передачи сигнала (ФПС) — зависимости выходного сигнала МСУ от величины освещенности входной апертуры или яркости тест-объекта (при калибровке);
- измерение зонной характеристики (ЗХ) — относительной неравномерности чувствительности пикселей многоэлементного приемника излучения (МПИ) при равномерной освещенности входной апертуры или проекции тест-объекта с равной яркостью излучающей площадкой;
- измерение относительной спектральной характеристики (СХ) — зависимости амплитуды выходного сигнала от длины волны входящего в МСУ излучения при его постоянной и известной величине;
- измерение темнового сигнала и шумов МПИ;
- абсолютизация измерений ФПС (а в отдельных случаях и ЗХ) путем передачи единицы СПЭЯ от эталона к рабочим излучателям установки.

Требования к измерительной аппаратуре, используемой при их энергетической калибровке МСУ, разработанные на основе анализа характеристик МСУ высокого разрешения, представлены в табл. 1. Для сравнения в табл. 1 также представлены характеристики одной из лучших российских установок «Камелия» [9], которая в настоящее время находится в эксплуатации и проходит регулярную аттестацию как

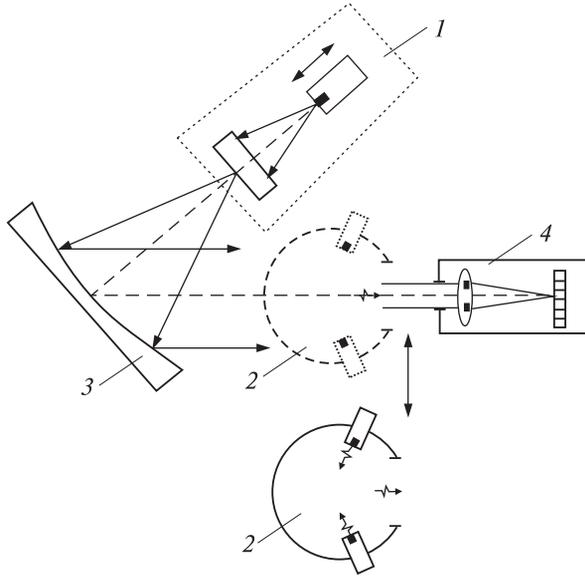


Рис. 1. Обобщенная структурная схема установки для энергетической калибровки МСУ: 1 — излучатель переменной яркости, 2 — диффузный излучатель постоянной яркости, 3 — коллимационный объектив, 4 — МСУ

образцовое средство измерения. Несмотря на некоторые конструктивные и приборные различия известных установок для измерения перечисленных характеристик и параметров МСУ, они выполнены по сходным структурным схемам, обобщенный вариант которых показан на рис. 1.

Для измерения ФПС используется излучатель переменной яркости 1, обычно построенный по схеме обратных квадратов [3, 9, 14]. Но ввиду

незначительной апертуры яркостного поля, формируемого такими излучателями, измерение ФПС производится только для нескольких пикселей, а данные для остальных элементов МПИ получают экстраполяцией результатов измерений ЗХ. Положительным моментом такого метода является то, что ФПС измеряется во всем динамическом диапазоне (который для современных установок составляет 1000—5000). Однако дальнейшее увеличение динамического диапазона связано со значительным ростом габаритов излучателя переменной яркости и обычно не реализуется [14].

Для измерения ЗХ в схему вводится диффузный излучатель 2, построенный в большинстве установок на базе интегрирующей сферы. Излучатель обеспечивает равномерную освещенность всех пикселей МПИ, но его яркость, даже в лучших установках, не превышает 20—30 % от максимально измеряемой [1, 9]. Поэтому значения ЗХ для верхних уровней измеряемой яркости также находятся экстраполяцией.

Другими словами, измерение ФПС и ЗХ производится практически либо для небольшого числа пикселей, либо для малого начального участка динамического диапазона.

Измерение относительной спектральной характеристики производится по схеме, которая показана на рис. 2. Оно осуществляется путем измерения сигнала на выходе МСУ при его облучении монохроматическим потоком, выходящим из монохроматора. Калибровка произво-

Таблица 1. Технические требования к аппаратуре для калибровке МСУ

Наименование параметра	Российская установка «Камелия»	Современные требования и ближайшая перспектива	Прогноз
Спектральный диапазон, мкм	0.4–1.2	0.4–1.8	0.3–3.0
Интегральная яркость градуировочного излучателя, Вт/(ср · м ²)	160	400–600	800–1000
Воспроизводимый диапазон СПЭЯ, Вт/(ср · м ² · мкм)	12–214	6–530	5–600
Динамический диапазон изменения яркости градуировочного излучателя, относительные единицы	10 ⁵	5 · 10 ⁵	10 ⁶
Выходная апертура градуировочного излучателя, м	0.23	0.6	0.6
Неравномерность яркости выходной апертуры градуировочного излучателя, %	5.0	1.0–2.0	0.5
Погрешность воспроизведения единицы СПЭЯ	0.065	0.02–0.06	0.005–0.015

дится либо через спектрокомпаратор, либо сравнением чувствительности МСУ с известной спектральной чувствительностью образцового приемника излучения.

Для абсолютизации измерения энергетических характеристик обычно используется метод переноса единицы яркости или СПЭЯ от эталонного излучателя к диффузному через объектив (обычно — зеркальный) и компаратор, а от диффузного излучателя к излучателю переменной яркости — через калибруемое МСУ (рис. 3). Таким образом, диффузный излучатель используется как вторичный эталон установки, а калибровка излучателя переменной яркости выполняется в два этапа, причем роль компаратора в этом случае выполняет МПИ калибруемой системы. Кроме очевидного снижения точности при двойной экстраполяции (при измерении ФПС и ЗХ) и двухступенчатой процедуры абсолютизации измерений, рассмотренная методика имеет еще один существенный недостаток, практически исключающий возможность ее использования для калибровки МСУ высокого разрешения — мерцание изображения при различных световых характеристиках отдельных пикселей МПИ в пределах его динамического диапазона [16].

Следует, однако, отметить, что использование рассмотренной методики в известных установках является вынужденной мерой, вызванной прежде всего отсутствием излучателей, позволяющих создавать переменное яркостное поле одновременно в большом динамическом диапазоне и для больших апертур при неизменном спектральном составе излучения.

В работах [16, 17] была предложена новая методика энергетической калибровки МСУ высокого разрешения, свободная от перечисленных выше недостатков и превосходящая по метрологическим характеристикам известные установки. Схема установки, реализующая эту методику, показана на рис. 4. Ее основу составляет оригинальный диффузный излучатель переменной яркости (ДИПЯ) на базе оптически сопряженных интегрирующих сфер [13, 16, 22].

Как показано на рис. 4, источники излучения *I* расположены в первичных интегрирующих

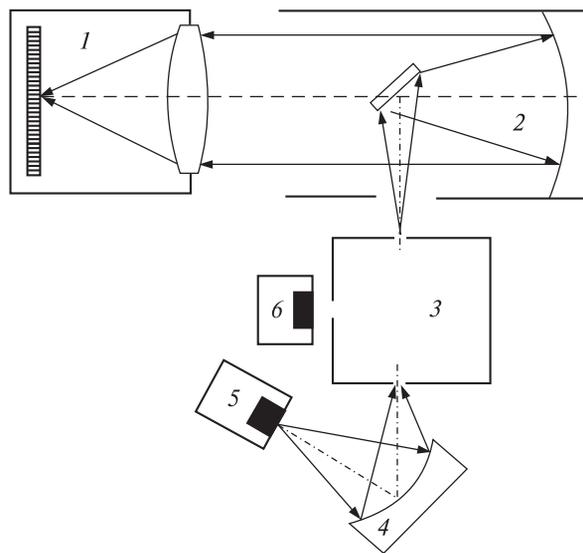


Рис. 2. Схема измерения относительной спектральной чувствительности: 1 — МСУ, 2 — коллимационный объектив, 3 — монохроматор, 4 — конденсор, 5 — широкодиапазонный источник излучения, 6 — образцовый приемник излучения

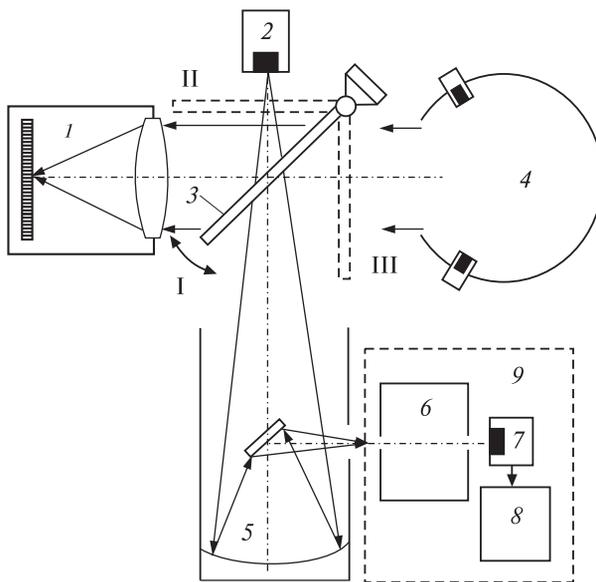


Рис. 3. Схема переноса единицы СПЭЯ диффузному излучателю и измерения абсолютной монохроматической чувствительности МСУ: I — калибровка диффузного излучателя; II — передача единицы СПЭЯ от диффузного излучателя к МСУ; III — перенос единицы СПЭЯ от эталонного излучателя к спектрокомпаратору; 1 — МСУ, 2 — эталонный излучатель, 3 — коммутатор, 4 — диффузный излучатель, 5 — сопрягающий объектив, 6 — монохроматор, 7 — приемник излучения; 8 — регистрирующее устройство, 9 — спектрокомпаратор

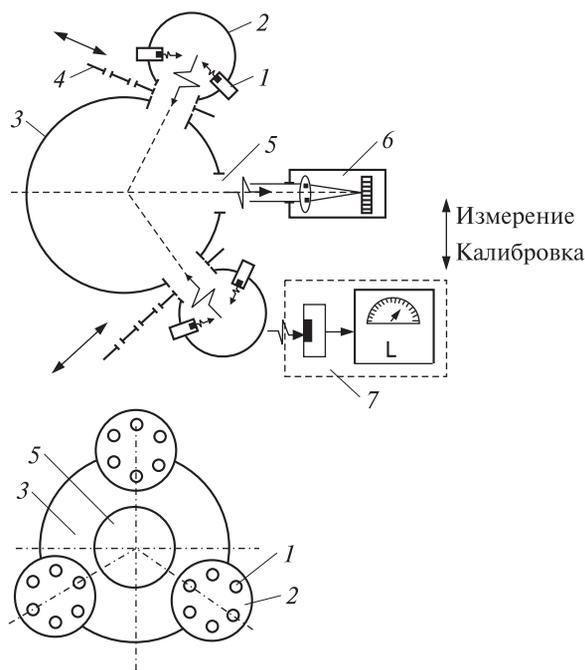


Рис. 4. Структурная схема перспективной установки для энергетической калибровки МСУ: 1 — источник излучения, 2 — первичная сфера, 3 — вторичная сфера, 4 — калибровочная диафрагма, 5 — выходная апертура, 6 — МСУ, 7 — яркомер

сферах 2, а поток, поступающий из них во вторичную интегрирующую сферу 3, регулируется набором калибровочных диафрагм 4 различного сечения. В выходной апертуре 5 вторичной сферы 3 формируется однородное и переменное по величине яркостное поле с фотометрическим телом, приближающимся к фотометрическому телу ламбертовского излучателя. Это позволяет размещать калибруемое МСУ 6 непосредственно в выходной апертуре ДИПЯ без применения дополнительной сопрягающей оптики.

Основные преимущества рассмотренной методики таковы.

1. Одновременно освещаются все пиксели МПИ во всем динамическом диапазоне измеряемой яркости. Другими словами, измерение ФПС и ЗХ производится одновременно при неизменной конфигурации установки, что исключает необходимость экстраполяции результатов и существенно повышает точность измерений.

Одновременно увеличивается эффективность электронной коррекции чувствительности пикселей МПИ, что позволяет исключить динамическое мерцание изображения.

2. За счет использования большого числа источников излучения в первичных сферах и значительного числа калибровочных диафрагм, выполненных с высокой точностью, значительно расширяется диапазон воспроизводимых яркостей (особенно в сторону больших значений) и повышается точность их установки при неизменном спектральном составе излучения.

3. Вынесением источников излучения из вторичной интегрирующей сферы, которая непосредственно формирует выходное яркостное поле, достигается более благоприятная интегрирующая и антибликовая обстановка, что заметно улучшает равномерность распределения яркости в пределах выходной апертуры.

4. Размещение МСУ непосредственно в выходной апертуре излучателя исключает необходимость применения согласующей и коллимирующей оптики, а также снижает требование к точному позиционированию МСУ относительно установки.

5. Существенно упрощается процедура и повышается точность абсолютизации измерений, так как для калибровки излучателя исключается двухэтапная процедура переноса единицы яркости (СПЭЯ). А для интегральных измерений могут использоваться яркомеры, устанавливаемые непосредственно в выходной апертуре без необходимости точного позиционирования и применения согласующей оптики (рис. 4).

Начиная с 2006 г. в России ведется разработка специального радиометрического комплекса для прецизионной калибровки МСУ нового поколения. Этот комплекс будет состоять из двух установок, которые работают в диапазонах от 0.3—3 мкм и 3—25 мкм [21]. Предполагаемые характеристики комплекса приведены в табл. 1. Известно также, что в этом комплексе будут использоваться высокоапертурные диффузные и монохроматические излучатели, а для их калибровки будут использоваться модели черных тел на точке фазового перехода.

ЭТАЛОНЫ И МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦ ЯРКОСТИ И СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЯРКОСТИ РАБОЧИМ ИЗЛУЧАТЕЛЯМ

Потенциальные возможности калибровки МСУ определяются используемыми эталонами, схемами передачи яркости или СПЭЯ и точностью используемых метрологических элементов. В значительной степени выбор эталона и поверочной схемы влияет на схему калибровочной установки, метод калибровки МСУ и выбор элементной базы. Поэтому эти вопросы были и остаются ключевыми при разработке калибровочных систем. Однако на разных этапах и в различных странах они решались по-разному.

Первые российские калибровочные установки использовали средства и методы фотомет-

рии, которые базировались на световых и температурных эталонах, а переход к энергетическим величинам осуществлялся путем пересчета [1]. При этом по известной температуре тела накала светоизмерительных ламп находилась его истинная температура, а затем по данным об излучательной способности вольфрама рассчитывалась спектральная яркость лампы. Такой пересчет, а также неопределенность используемых для расчета данных приводили к значительным погрешностям при градуировке. В некоторых случаях для калибровки рабочих излучателей использовались модели черных тел (МЧТ). Потенциальные возможности этого метода очевидны, и в будущем он станет основным для калибровки прецизионных установок, однако до некоторых пор МЧТ имели низкое качество, их метрологические характеристики были недос-

Таблица 2. Обобщенная поверочная схема передачи единицы СПЭЯ

Стандарт	Диапазон значений воспроизводимого параметра		Средство воспроизведения величины	Среднеквадратичное отклонение воспроизведения единицы	Неисключенная систематическая погрешность	Метод передачи единицы
	λ , мкм	СПЭЯ, Вт/(ср·м ³)				
<i>Государственные эталоны</i>						
ГОСТ 8.196-76	0.25...2.5	$10^7...10^{11}$	МЧТ, ленточные лампы	$0.1 \cdot 10^{-2}...1.5 \cdot 10^{-2}$	$0.2 \cdot 10^{-2}...2.0 \cdot 10^{-2}$	Компаратор Непосредственное сравнение $0.2 \cdot 10^{-2}...0.8 \cdot 10^{-2}$ Косвенные измерения, компаратор
ГОСТ 8.195-89	0.25...25	$10^7...10^{12}$		$0.1 \cdot 10^{-2}...1.5 \cdot 10^{-2}$	$0.2 \cdot 10^{-2}...2.0 \cdot 10^{-2}$	
Проект ДСТУ	0.2...2.5	$4 \cdot 10^4...3 \cdot 10^{11}$	МЧТ	$0.5 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	
<i>Рабочие эталоны</i>						
ГОСТ 8.196-76	0.25...2.5	$10^7...10^{11}$	Ленточные лампы, полостные лампы	$0.5 \cdot 10^{-2}...2.5 \cdot 10^{-2}$	—	Компаратор
ГОСТ 8.195-89	0.25...25	$10^7...10^{12}$	МЧТ, ленточные лампы	$0.5 \cdot 10^{-2}...2.5 \cdot 10^{-2}$	—	Прямые измерения, компаратор
Проект ДСТУ	0.2...2.5 0.2...25	$4 \cdot 10^4...3 \cdot 10^{12}$ $4 \cdot 10^4...10^{12}$	МЧТ, ленточные, галогенные лампы	$0.5 \cdot 10^{-2}...6 \cdot 10^{-2}$ $0.5 \cdot 10^{-2}...8 \cdot 10^{-2}$	—	Косвенные измерения, компаратор
<i>Образцовые средства измерения</i>						
ГОСТ 8.196-76	0.25...2.5	$10^7...10^{11}$	Ленточные лампы, полостные лампы	$1 \cdot 10^{-2}...4 \cdot 10^{-2}$	—	Компаратор
ГОСТ 8.195-89	0.25...10	$10^7...10^{12}$	МЧТ, ленточные, галогенные, дейтериевые лампы	$6 \cdot 10^{-2}...8 \cdot 10^{-2}$	—	Прямые измерения, компаратор
Проект ДСТУ	0.2...10	$4 \cdot 10^4...3 \cdot 10^{11}$	Ленточные лампы	$2 \cdot 10^{-2}...12 \cdot 10^{-2}$ $2 \cdot 10^{-2}...6 \cdot 10^{-2}$ (по Гос. эталону)	—	Косвенные измерения, компаратор

таточно изучены, а стоимость была достаточно высокой. Поэтому калибровка излучателей по МЧТ не получила широкого распространения.

Ситуация существенно изменилась после создания и введения в эксплуатацию в 1976 г. Государственных эталонов энергетической фотометрии СССР и соответствующих поверочных схем [11], которые регламентировали передачу единицы СПЭЯ в спектральном диапазоне 0.25...2.5 мкм. Начиная с системы «Фрагмент», все российские МСУ калибруются с использованием этих поверочных схем (см. табл. 2) [1]. В 1989 г. в СССР был введен ГОСТ 8.195, который регламентирует передачу единицы СПЭЯ, спектральной плотности силы излучения и энергетической освещенности в спектральном диапазоне 0.2...25.0 мкм. А в 2003 г. введен ГОСТ 8.023 для измерения световых величин непрерывного и импульсного излучения, который стал международным стандартом стран СНГ, но Украина к этому стандарту не присоединилась.

В 2000 г. в Харьковском государственном научно-исследовательском институте метрологии Госстандарта Украины был разработан документ «Державна повірочна схема для засобів вимірювання спектральної густини енергетичної яскравості у діапазоні довжин хвиль від 0.2 до 25 мкм, спектральної густини сили випромінювання та спектральної густини освітленості в діапазоні довжин хвиль від 0.2 до 2.5 мкм, потужності випромінювання, сили випроміню-

вання та енергетичної освітленості в спектральних інтервалах від $1 \cdot 10^{-1}$ до $2 \cdot 10^{-2}$ мкм в діапазоні довжин хвиль від 0.2 до 2.5 мкм» (разработчики Л. Назаренко, О. Купко, В. Каштаньер) с частичной отменой ГОСТ 8.195-89, который мог бы послужить хорошей базой для метрологического обеспечения калибровки отечественных МСУ. Фрагменты этой поверочной схемы, относящиеся к единицам СПЭЯ, приведены в табл. 2. Однако, насколько нам известно, до настоящего времени указанный стандарт в действие не введен.

В качестве рабочих эталонов для калибровки МСУ в России используются ленточные лампы типа СИ(СИРШ)-200У и СИ10-300У (см. табл. 3) [1]. Следует отметить, что кроме очевидных достоинств таких излучателей, они имеют два серьезных недостатка — неравномерность распределения яркости по площади вольфрамовой ленты и изменение этого распределения в процессе эксплуатации [10]. Первый недостаток частично устраняется использованием только небольшого участка ленты (примерно 0.5×1.2 мм), что реализуется конструктивными мерами, а второй — периодической калибровкой лампы по эталону. Отметим, что в Украине ленточные лампы не производятся, а парк имеющихся постоянно сокращается.

Поэтому для Украины весьма перспективным является использование в качестве эталонов яркости и СПЭЯ галогенных ламп с цветовой тем-

Таблица 3. Светоизмерительные лампы накаливания, рекомендуемые для калибровки МСУ

Тип излучателя	Страна и компания-производитель	Электрические параметры		Фотометрические параметры			Стабильность	Габариты тела накала, мм	Измеряемая величина
		P, Вт	U, В	T, К	I, кд	Φ, Вт			
СИС 107-500	Россия	365	107	2800	500	—	15 ч/18 мес	25 × 30	Сила света
СИС 107-1500	Россия	915	107	2860	1500	—	15 ч/13 мес	28 × 35	Сила света
СИП 107-500	Россия	74	107	2800	—	500	25 ч/18 мес	25 × 15	Световой поток
СИП 107-1500	Россия	260	107	2800	—	3500	25 ч/18 мес	25 × 15	Световой поток
СИРШ 6-100	Россия	100	6	2840	—	—	200 ч/12 мес	2 × 8	Яркость
СИРШ 8.5-200	Россия	212	8.5	3000	—	—	300 ч/12 мес	2 × 10	Яркость
WI 14	Германия, Osram	90	5	2400	—	—	—	1.6 × 8	Яркость
LF 300	Великобритания, Polaron	300	100	2750	—	4000	1 %/100 ч	—	Световой поток
LIS 3000	Великобритания, Polaron	616	19.2	3000	740	—	1 %/100 ч	10 × 15	Сила света

пературой 2300 К и 2800 К (см. табл. 4) [12]. Преимущества галогенных ламп особенно проявляются в сочетании с фотометрами, которые обеспечивают долговременную воспроизводимость передаваемых единиц. Для улучшения равномерности яркостного поля, которое формируется галогенными лампами, в работе [15]

предложен метод их использования совместно с диффузными рассеивателями из молочного стекла. При этом в зависимости от типа лампы и марки молочного стекла представляется возможность получить рабочую зону размером 18×30 мм с равномерностью яркости не ниже 99.95 %. Галогенные лампы имеют очень высо-

Таблица 4. Галогенные лампы, рекомендуемые для использования в качестве образцовых средств змерения и рабочих эталонов калибровочных установок

Тип излучателя	Страна и компания-производитель	Электрические параметры		Фотометрические параметры		Время жизни, ч	Габариты, мм	Измеряемая величина
		P , Вт	U , В	T , К	Φ , лм			
КГМ 12-100	Россия	100	12	3000	3000	85	44×12.5	Яркость
КГМ 24-150	Россия	150	24	3000	5000	50	47×12.5	Яркость
КГМ 24-150-3	Россия	250	24	3000	8500	150	70×12.5	Яркость
КГМ 30-300-2	Россия	300	30	3200	—	55	55×16	Яркость
КГМ 36-400	Россия	400	36	3200	14500	50	60×18	Яркость
ТРУ 1100-2350	Россия	300	10	2350	—	50	50×72	Яркость
ТРШ 2850-3000	Россия	440	55	2850	—	255	39×135	Яркость
Halostar 64435	Германия, Osram	100	12	3000	2200	1000	33×9.5	Яркость
FEL (Ge Lamp)	США	1000	120	3200	27500	375	70×22	Яркость

Таблица 5. Сравнительная оценка схем передачи единицы СПЭЯ

Излучатель	ДВ (12 ламп КГМ 30-300)	СИРШ 8.5-200	СИС 107-1500	КГМ 30-300-2 с рассеивателем	ДИПЯ(1 лампа СИП 107-1500)
Интегральный поток на выходе излучателя, Φ_0 , Вт	144	22	300	100	6.5
Интегральный коэффициент пропускания оптического тракта, τ_0	$1.4 \cdot 10^{-8}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-8}$
Монохроматический поток на выходе коллиматора, Φ_λ , Вт/мкм	$5.5 \cdot 10^{-9}$	$8.5 \cdot 10^{-6}$ $2.6 \cdot 10^{-7}$ **	$7.1 \cdot 10^{-8}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-9}$
Сигнал на выходе приемника излучения, U_C , В	$2 \cdot 10^{-4}$	$7.3 \cdot 10^{-2}$ $2.3 \cdot 10^{-3}$ **	$6 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$7.4 \cdot 10^{-5}$
Сравнительная величина выходного сигнала, $U_0 = U_C / U_{C_{MAX}}$, относительные единицы	$2.7 \cdot 10^{-3}$	1.0	$8.2 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}
Погрешность передачи единицы СПЭ, δ	0.055–0.11	0.044–0.060	0.055–0.11	0.055–0.077	0.044–0.055
Сравнительная величина погрешности передачи единицы СПЭЯ *, $\delta_0 = \delta / \delta_{MAX}$, относительные единицы	1.0	0.7	1.0	0.85	0.65
Коэффициент сравнения яркости схемы передачи единицы СПЭЯ, $\xi = U_0 / \delta_0$	$2.7 \cdot 10^{-3}$	1.4 $4.35 \cdot 10^{-2}$ **	$8.2 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$
Примечания	Калибруемый излучатель	Прямой перенос единицы СПЭЯ	Пересчет единицы СПЭЯ	Прямой перенос единицы СПЭЯ	СПЭЯ определяется косвенным методом и расчетом

* — среднее значение, ** — при использовании участка ленты 0.5×1.2 мм

кую кратковременную стабильность и постоянную рабочую зону. Полная теория излучателей на основе галогенных ламп с рассеивателями и результаты их экспериментального исследования приведены в работах [15, 18].

Как показал анализ известных установок [1, 3, 9, 20], калибровка рабочих излучателей по яркости и СПЭЯ сопровождается следующими основными погрешностями:

1. Погрешность передачи единицы СПЭЯ от эталона в соответствии с поверочной схемой.
2. Нестабильность калибровочных излучателей.
3. Нелинейность и нестабильность спектрокомпаратора.
4. Невоспроизводимость установки длин волн монохроматоров излучателя и компаратора.
5. Несогласованность спектральных характеристик излучателей установки.
6. Погрешности геометрического базирования калибровочной схемы.

Прогнозируется, что погрешности калибровки будут составлять от 1 до 3 % [1, 9, 19, 20, 21]. В упоминавшейся выше установке «Камелия» эти погрешности составляют 6.5 % [9]. С учетом перспективной поверочной схемы ДСТУ (табл. 2) можно предполагать снижение погрешностей калибровки излучателей до уровня 2—6 %. Очевидно, что достижение погрешности калибровки излучателей менее 1 % потребует принципиально нового подхода как к методам калибровки, так и к выбору эталона. В этом плане перспективным представляется использование в качестве эталона МЧТ на фазовых переходах [24], от которых единица СПЭЯ передается непосредственно рабочим излучателям установки. Представляет интерес и калибровка излучателей по световому потоку, что соответствует генеральному направлению современной оптической метрологии [7, 8]. Очевидно, что в этом случае схема калибровочной установки, предложенная в работах [16, 17], является наиболее перспективной.

В работе [19] рассмотрена инженерная методика подбора и оценки эталонного излучателя для передачи единицы СПЭЯ рабочим излучателям калибровочной установки. Эта методика предусматривает оценку как энергетических,

так и метрологических характеристик калибровочной схемы (рис. 3). В качестве обобщенного критерия принят параметр ξ , который учитывает потери энергии в измерительной схеме для конкретной пары излучатель-приемник, сигнал на выходе спектрокомпаратора и относительные погрешности передачи единицы. Результаты сравнительного анализа для наиболее перспективных излучателей и приемников представлены в табл. 5. Как и предполагалось, лучшие характеристики обеспечивают ленточные лампы и галогенные лампы с рассеивателями. Важным преимуществом применения галогенных ламп с рассеивателями является тот факт, что такие лампы изготавливаются в Украине.

КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ ГРАДУИРОВОЧНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Высокие фотометрические характеристики диффузных излучателей переменной яркости на базе интегрирующих сфер позволяют проводить абсолютизацию измерений по СПЭЯ косвенными методами с использованием радиометров. Эти методы, хотя и дают меньшую точность, но обеспечивают возможность использования имеющегося на Украине метрологического оборудования без обращения к дорогостоящим зарубежным эталонам яркости и СПЭЯ. Косвенные методы калибровки можно использовать и как вспомогательные, обеспечивающие лучшую воспроизводимость результатов в течение длительного времени.

Возможны три следующих направления использования косвенных методов:

- калибровка по интегральной яркости с последующим переходом к СПЭЯ по измеренным спектральным характеристикам ДИПЯ;
- калибровка по эталону светового потока с компарированием освещенности выходной апертуры;
- калибровка по измеренной освещенности выходной апертуры с последующим пересчетом СПЭЯ по известным геометрическим параметрам ДИПЯ и его спектральной характеристике.

Во всех этих случаях могут использоваться прецизионные отечественные люксметры, яр-

Таблица 6. Отечественные средства измерения фотометрических величин

Тип прибора	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Спектральный диапазон, мкм	Основная относительная погрешность, %
Кварц 01	Освещенность	$10^{-3} \dots 10^5$ лк	0.25 ... 1.05	5
	Мощность	$2 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^3$ мкВт	0.25 ... 1.05	7
Кварц 21	Освещенность	$10^{-1} \dots 10^5$ лк	0.38 ... 0.78	5...7
ТЭС 0693* (цифровой)	Освещенность	$10^{-1} \dots 10^5$ лк	0.38 ... 0.78	5
	Яркость	$10 \dots 2 \cdot 10^5$ кд/м ²	0.38 ... 0.78	7
РАТ – 2п	Энергетическая освещенность	$10 \dots 2 \cdot 10^4$ Вт/м ²	0.2 ... 2.5	6

* — по специальному заказу диапазон измерений может быть расширен и введена функция измерения энергетической освещенности

кометры и фотометры — «Кварц-01», «Кварц-02» и ТЭС 0693 (табл. 6) [23].

Как отмечалось выше, ДИПЯ имеют высокую однородность яркостного поля на выходной апертуре и фотометрическое тело, близкое к ламбертовскому излучателю. Поэтому точность позиционирования яркомера относительно излучателя принципиального значения не имеет. Кроме этого, высокая линейность градуировочной характеристики ТЭС 0693 позволяет проводить калибровку ДИПЯ практически во всем диапазоне воспроизводимых яркостей.

Наибольшую точность, которая в основном определяется точностью яркомера, обеспечивает первый метод. Измерение интегральной яркости при этом производится при установке яркомера непосредственно в выходной апертуре ДИПЯ (см. рис. 4), а его относительная спектральная характеристика измеряется по схеме, сходной с той, которая показана на рис. 2. Абсолютные значения вычисляются обычным способом. Основным недостатком и источником основной погрешности является относительно узкий спектральный диапазон яркомера. Этот метод также может использоваться для прямой калибровки излучателя по интегральной яркости в малом диапазоне длин волн.

Во втором методе внутри ДИПЯ устанавливается светоизмерительная лампа типа СИП. Эта лампа используется для калибровки по световому потоку, а в качестве компаратора освещенности выходной апертуры может быть исполь-

зован люксметр ТЭС 0693. Таким образом, непосредственно калибруются по потоку первичные излучатели ДИПЯ, а величина СПЭЯ определяется расчетом по геометрическим параметрам вторичной интегрирующей сферы и ее измеренной относительной спектральной характеристике. Отметим, что в этом методе вторичная интегрирующая сфера играет роль фотометрического шара. Очевидно, что точность калибровки по СПЭЯ будет существенно ниже. Тем не менее, этот метод является удобным для контроля стабильности и режима работы источников излучения, так как параметры интегрирующих сфер в значительной степени влияют на результат измерений. К достоинствам данного метода следует отнести доступность и распространенность ламп типа СИП, не критичность метода к выбору компаратора. Следует подчеркнуть, что хотя калибровка диффузного излучателя по потоку может применяться и в установках типа «Камелия», наличие в интегрирующей сфере значительного количества ламп с арматурой создает сложную систему бликов и засветок, которая отрицательно сказывается на точности калибровки.

Еще меньшую точность обеспечивает третий метод, который является в принципе расчетным и может использоваться только для грубой оценки фотометрических характеристик диффузного излучателя.

Основные энергетические и метрологические характеристики рассмотренных методов приведены в табл. 5.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены и проанализированы методы и схемы калибровки измерительных установок для предполетной аттестации МСУ космического базирования. Показано, что в качестве единицы измерения параметров МСУ целесообразно выбрать спектральную плотность энергетической яркости, передаваемой от эталона методом компарирования.

2. Сформулированы требования к калибровочным установкам нового поколения и показаны пути их схмотехнической реализации. Научно обоснованы преимущества калибровочных установок на основе ДИПЯ.

3. Проведено исследование эталонов и поверочных схем для передачи единицы СПЭЯ от эталонов к рабочим излучателям для калибровки измерительных установок. Предложено в качестве рабочего эталона использовать отечественные галогенные лампы с диффузным рассеивателем из молочного стекла. Такие рабочие эталоны обеспечивают метрологические характеристики, сопоставимые с характеристиками зарубежных ленточных ламп.

4. Выполнен анализ методов косвенной калибровки градуировочных излучателей с использованием отечественной фотометрической аппаратуры. Доказана возможность достижения точности калибровки на уровне 5–7 % при использовании доступной в Украине элементной и эталонной базы.

Полученные результаты будут представлять интерес для специалистов в области оптической радиометрии и метрологии, в особенности — разработчикам аппаратуры для энергетической калибровки МСУ высокого разрешения.

1. *Аванесов Г. А., Зиман Я. Л., Сычев А. Г. и др.* Метрологическое обеспечение измерений яркости земной поверхности многозональной сканирующей системой «Фрагмент» // Исслед. Земли из космоса. — 1981. — № 5. — С. 65–77.
2. *Богданов А. А., Налимов В. Н., Сычев А. Г. и др.* О возможном повышении спектрорадиометрической точности при дистанционных исследованиях Земли с помощью многозональных съемочных систем // Исслед. Земли из космоса. — 1981. — № 3. — С. 77–85.
3. *Вариченко Л. В., Колобродов В. Г., Ладыка Я. Е. и др.* Методы и средства измерения энергетических характеристик оптико-электронных систем космического зондирования Земли // Космічна наука і технологія. — 2006. — 12, № 2/3. — С. 59–69.
4. *Гогохия В. В.* Методы восстановления спектральной плотности энергетической яркости природных объектов по интегральным измерениям // Исслед. Земли из космоса. — 1982. — № 6. — С. 95–102.
5. *Горелов В. А., Лукашевич Е. Л., Стрельцов В. А.* Состояние и тенденции развития космических средств дистанционного зондирования высокого разрешения // ГИС — Ассоциация. Информ. бюл. — 2002. — № 4 (36). — С. 6–11.
6. *Горелов В. А., Лукашевич Е. Л., Стрельцов В. А.* Состояние и тенденции развития космических средств дистанционного зондирования высокого разрешения // ГИС — Ассоциация. Информ. бюл. — 2002. — № 5 (37). — С. 7–12, 43–45.
7. *Золотаревский Ю. М., Иванов В. С., Котюк Л. Ф. и др.* Методические основы и перспективы развития современной оптической радиометрии // Измерит. техника. — 2005. — № 11. — С. 8–12.
8. *Иванов В. С., Саприцкий В. И., Огарьев С. А. и др.* Международный проект по воспроизведению люмена // Светотехника. — 2002. — № 5. — С. 3–10.
9. *Киселев И. Л., Коростелев Л. Н., Караева М. К. и др.* Контроль энергетических характеристик многозональных сканирующих устройств ИСЗ «Ресурс-01» // Исслед. Земли из космоса. — 1991. — № 2. — С. 34–43.
10. *Ковальский В. Я., Мальцев В. В., Налимов В. Н. и др.* Методика учета неоднородности яркости образцовых ламп при градуировке фотометров // Оптико-мех. пром-сть. — 1980. — № 11. — С. 13–16.
11. *Котюк А. Ф., Панасюк В. С., Самойлов Л. Н. и др.* Единая система государственных эталонов энергетической фотометрии когерентного и некогерентного оптического излучения // Измерит. техника. — 1976. — № 3. — С. 17–24.
12. *Купко А. Д., Назаренко Л. А.* Метрологическое обеспечение световых измерений в Украине // Светотехника. — 2001. — № 5. — С. 38–40.
13. *Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н.* Излучатель переменной яркости на основе сопряженных интегрирующих сфер // Технол. и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 6 (66). — С. 61–64.
14. *Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н.* Теория и расчет диффузного излучателя переменной яркости на законе обратных квадратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2006. — № 1. — С. 73–80.
15. *Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н.* Вторичный эталон яркости на базе галогенной лампы с диффузным рас-

- сеивателем // Технол. и конструирование радиоэлектронной аппаратуры. — 2008. — № 3 (70). — С. 61–64.
16. Міхеєнко Л. А., Шишкін В. А. Дифузний випромінювач змінної яскравості для калібрування прецизійних цифрових відеосистем // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2009. — № 1. — С. 114–120.
17. Міхеєнко Л. А. Енергетичне калібрування оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі високої роздільної здатності // Тези доп. VII Міжнарод. наук.-техн. конф. «Приладобудування: стан і перспективи». — Київ: НТУУ «КПІ», 2009. — С. 42.
18. Міхеєнко Л. А., Коваленко А. В. Фізико-математична модель випромінювача з розсіюючим елементом // Вістник НТУУ «КПІ». Сер. Приладобудування. — 2008. — Вип. 36. — С. 31–37.
19. Міхеєнко Л. А., Микитенко В. І. Методи, засоби та метрологічне забезпечення калібрування еталонних випромінювачів // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2008. — № 6. — С. 94–99.
20. Мухмедяров Р. Д., Глушков А. С., Михайлов А. С. и др. Метрологическая аттестация многоспектрального сканирующего устройства высокого разрешения // Исслед. Земли из космоса. — 1991. — № 1. — С. 64–74.
21. Панфилов А. С., Бударкин А. А., Иванов В. С. и др. Работы ВНИИОФИ в области метрологического обеспечения радиометрической калибровки и полетного контроля стабильности оптической аппаратуры наблюдения Земли // 6-я Всерос. открытая ежегодная конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Сб. ст. — 2007. — С. 288–294.
22. Пат. України № 78609. Дифузний випромінювач / Л. А. Міхеєнко, В. Г. Колобродов, В. І. Микитенко та ін. // 2007. — Бюл. № 4.
23. Столяревская Р. И. Методы исследования метрологических характеристик. Приборы для измерения световых величин // Светотехника. — 1988. — № 6. — С. 21–26.
24. Хлевной Б. Б., Огарьев С. А., Саприцкий В. И. и др. Эталонные источники типа «черное тело» в диапазоне 100–3500 К для прецизионных измерений в радиометрии, фотометрии и оптической термометрии // Измерит. техника. — 2005. — № 11. — С. 29–35.
25. Холопов Г. К., Хисамов Р. Ш., Хузин Ф. Г. Нормирование чувствительности радиометрической аппаратуры для исследования природных ресурсов Земли // Исслед. Земли из космоса. — 1984. — № 4. — С. 81–88.

Надійшла до редакції 18.06.09

L. A. Mikheenko, V. N. Borovytsky

METROLOGICAL SUPPORT OF RADIOMETRIC CALIBRATION OF OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS FOR THE EARTH REMOTE SENSING

We present an analysis of techniques, schemes and apparatus for the absolutization of measurements of energetic characteristics and calibration of opto-electronic instruments for the Earth remote sensing. Some new schemes and techniques are proposed for the Ukrainian space systems of high amplitude and spatial resolution which guarantee a high metrological level of the measurements with the use of the components and instruments available in Ukraine.