

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Л.В.Вариченко, В.Г.Колобродов, Я.Е.Ладыка, В.И.Микитенко, Л.А.Михеенко

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",
Киев, Государственное научно-исследовательское предприятие "Конекс"

Предложены методики измерений и схемотехнические решения стендового оборудования для калибровки и аттестации оптико-электронных изображающих систем дистанционного зондирования Земли. Разработаны рекомендации по составу и конструкции отдельных блоков стенда.

Часть 1. Методы измерения

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время значительно возрос интерес к оптико-электронным системам дистанционного зондирования Земли из космоса, позволяющим эффективно решать ряд научных и прикладных задач. Разработкой и эксплуатацией таких систем занимаются США, Россия, Китай, ряд европейских стран [12, 23, 25]. Начались такие работы и в Украине.

Одной из важных проблем создания оптико-электронных систем космического базирования является их предполетная аттестация. При этом к контрольной аппаратуре и испытательным стендам предъявляются весьма специфические и достаточно жесткие требования как по точностным так и по энергетическим параметрам [15, 16, 23]. В настоящий момент стендов такого класса в Украине не существует. Более того, почти отсутствует и соответствующая элементная и метрологическая базы. Поэтому не только разработка новых аттестационных установок, но даже повторение известных технических решений становится в таких условиях сложной научно-технической задачей.

В данной статье рассматриваются схемно-метрологические аспекты этой задачи и обсуждаются предложения по их решению с учетом современных требований. При этом основное внимание уделяется имеющейся и доступной элементной базе, что позволяет уменьшить как стоимость, так и время разработки.

МНОГОЗОНАЛЬНОЕ СКАНИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО

Основой современного комплекса космических систем дистанционного зондирования Земли является многозональное сканирующее устройство (МСУ) высокого разрешения, предназначенное для синхронного измерения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) системы "атмосфера - земная поверхность" в узких спектральных зонах при сканировании малым мгновенным полем зрения.

Несмотря на значительные функциональные и конструктивные различия разработанных в настоящее время МСУ, их основные характеристики и параметры достаточно близки и отличаются высокими требованиями к чувствительности, амплитудному и спектральному разрешению, линейности функции передачи сигнала (ФПС), стабильности [6, 12, 15, 16, 23, 25]. Важной особенностью таких систем является высокий уровень освещенности приемника излучения в сочетании с очень большим динамическим диапазоном ($10^5 \dots 10^6$). В качестве иллюстрации, в табл.1 приведены основные энергетические характеристики МСУ, разрабатываемого в настоящее время в Украине.

Таблица 1. Основные энергетические характеристики МСУ

Спектральные характеристики	Спектральные зоны, мкм				
	0,50 – 0,59	0,61 – 0,68	0,79 – 0,89	0,5 – 0,89	1,55 – 1,7
Максимальная измеряемая энергетическая яркость, Вт/ср·м ²	32,1	22,1	18,7	1,04·10 ²	5,67
Облученность приемника излучения, Вт/м ²	0,448	0,309	0,261	1,45	4,73·10 ⁻²
Обобщенные характеристики	Область спектра				
	Видимая	ИК			
Фокусное расстояние объектива, мм	860	445			
Диаметр входного зрачка, мм	170	100			
Коэффициент центрального экранирования	0,41	-			
Коэффициент пропускания объектива	0,55	0,21			
Светорассеяние, %	5,5	6			
Количество пикселей в приемнике	6000	1500			
Размер пикселя, мкм	10	25			
Шаг пикселей, мкм	10	25			

Для реализации указанных характеристик, МСУ проходят метрологическую аттестацию, как на стадии предполетной подготовки, так и во время функционирования на орбите. Стадия предполетной подготовки обычно включает измерение следующих энергетических характеристик и параметров [15, 16, 23]:

- относительной функции передачи сигнала $U_{sn}(L)$ - зависимости электрического сигнала на выходе МСУ от яркости L тест-объекта;
- относительной спектральной характеристики $U_{sn}(\lambda)$ - зависимости электрического сигнала на выходе МСУ от длины волны λ зондирующего излучения;
- относительной зонной характеристики $R_{Dn}(N_{ij})$ - неравномерности чувствительности элементов (пикселей) ПЗС линейки (N_{ij} - номер пикселя в ПЗС линейке).

Затем после переноса единицы СПЕЯ от эталона к метрологическим элементам (излучателям) аттестационной установки производится абсолютизация их шкал относительной яркости и определяются основные параметры МСУ по измеренным ранее относительным характеристикам: интегральная, зонная и абсолютная спектральная чувствительность, динамический диапазон. Одновременно на этом же этапе измеряется средне-квадратическое значение напряжения шума и определяются пороговые характеристики системы.

Структурные схемы установок, обычно используемых для измерения энергетических характеристик, показаны на рис. 1.

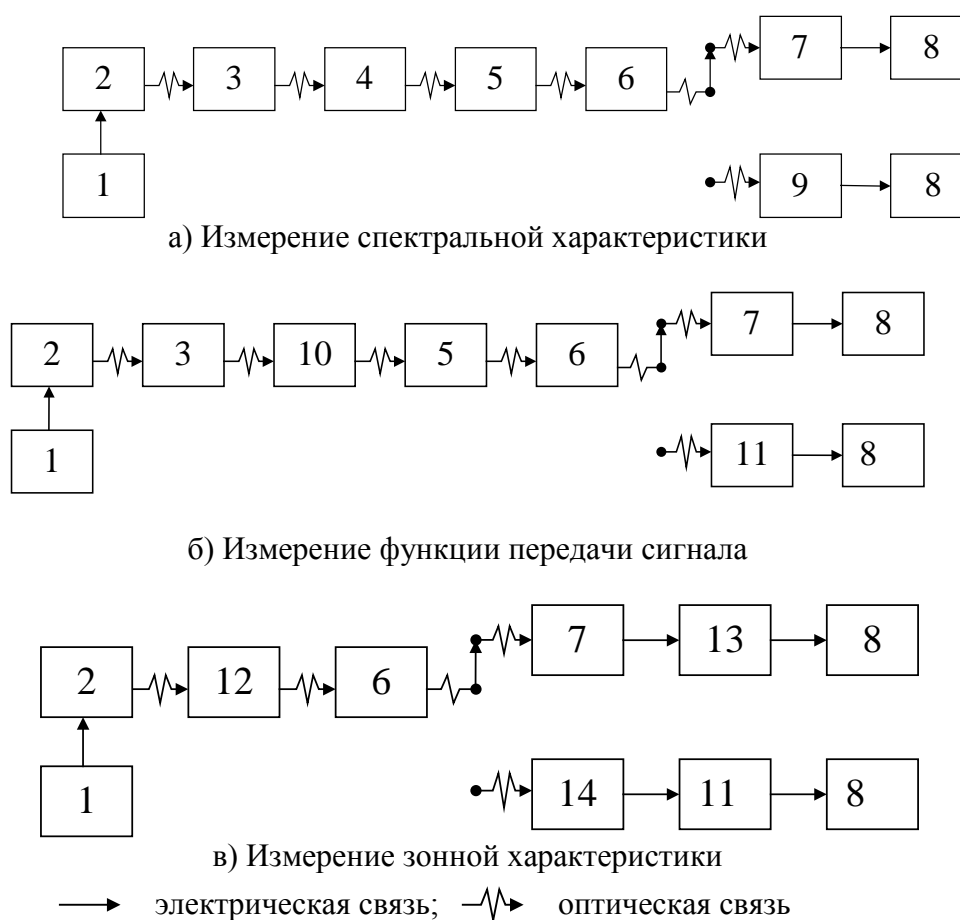


Рис. 1. Структурные схемы измерения энергетических характеристик МСУ: 1- блок питания; 2 – источник излучения; 3 – конденсор; 4 – монохроматор; 5 – коллиматор; 6 – коммутатор; 7 – МСУ; 8 – регистрирующее устройство; 9 – неселективный приемник излучения; 10 – калиброванный ослабитель излучения; 11 – фотоэлектрический компаратор; 12 – диффузный элемент; 13 – система опроса приемников МСУ; 14- зонная диафрагма.

Контроль характеристик МСУ во время полета обычно заключается в сопоставлении сигнала при визировании природных тест-объектов с измеряемыми на стенде и внесении соответствующих поправок. В этом случае требуется поиск и исследование природных тест-объектов, прецизионные измерения их СПЕЯ (в соответствующем спектральном диапазоне) и пропускания атмосферы над объектом в момент съемки, а также расчет переноса излучения в атмосфере для получения значения сигнала на входном зрачке МСУ [15]. В результате может быть достигнута точность контроля порядка единиц процентов в видимой и ближней ИК области спектра.

ИЗМЕРЕНИЕ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА

К методам и аппаратуре для измерения функции передачи сигнала МСУ предъявляются следующие основные требования:

- обеспечение максимальной интегральной (в диапазоне 0,4...1,8 мкм) энергетической освещенности приемника излучения не ниже 15 Вт/м²;
- динамический диапазон изменения энергетической освещенности на приемнике излучения не менее 10⁵;

- нелинейность градуировочной характеристики излучателя не более 1%.

Желательно также обеспечить освещенность как можно большего числа элементов ПЗС-линейки (для возможной статической обработки результатов) при минимальной мощности излучателя.

Не останавливаясь на детальном анализе возможных способов калиброванного ослабления излучения, достаточно полно рассмотренных в [4, 26], отметим, что большинство известных решений этим требованиям не удовлетворяют. Одним из наиболее перспективных можно считать метод, основанный на перемещении источника излучения относительно рассеивающей площадки, установленной в фокальной плоскости объектива градуировочного коллиматора. Причем такая площадка может работать как в проходящем, так и в отраженном свете.

Однако, насколько нам известно, исследований метрологических и фотометрических характеристик таких устройств не проводилось. С учетом этого, нами разработана математическая модель интегрального излучателя (ИИ) и выполнено его численное и экспериментальное исследование. Схема ИИ показана на рис. 2.

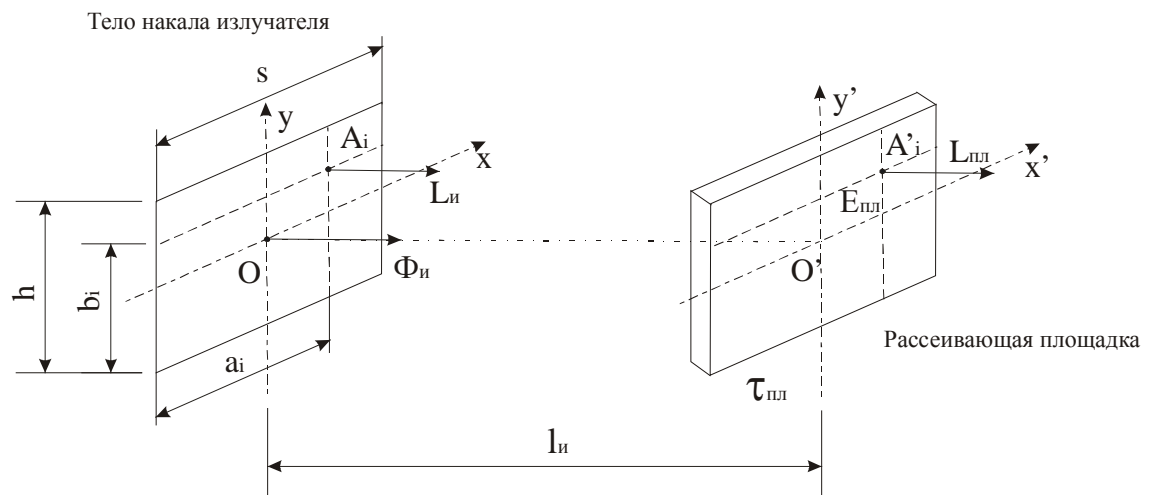


Рис. 2. Модель интегрального излучателя.

Учитывая, что поле освещенности ПЗС-линейки должно иметь прямоугольную форму, тело накала источника излучения также должно быть прямоугольным с размерами $s \times h$. При нормальном расположении плоскостей излучателя и рассеивающей площадки к оптической оси, освещенность точки A'_i , лежащей напротив точки A_i , от участка размерами $a_i \times b_i$ (рис. 2), может быть описана выражением [11]:

$$E_{A'_i} = \frac{L_u}{2} R_i, \quad (1)$$

где L_u – яркость тела накала излучателя; R_i – параметр, который определяется как

$$R_i = \frac{a_i}{\sqrt{l_u^2 + a_i^2}} \arctg \frac{b_i}{\sqrt{l_u^2 + a_i^2}} + \frac{b_i}{\sqrt{l_u^2 + b_i^2}} \arctg \frac{a_i}{\sqrt{l_u^2 + b_i^2}};$$

l_u – расстояние между точками A_i и A'_i .

Полная освещенность площадки в точке A'_i может быть получена суммированием освещенностей от четырех прямоугольных зон, на которые разбито тело накала излучателя. Тогда с учетом коэффициентов пропускания (отражения) площадки $\tau_{пл}$ ($\rho_{пл}$) и считая ее

вторичным Ламбертовским излучателем получаем выражение для яркости $L_{nлA}$ площадки в точке A' :

$$L_{nлA} = 2 \frac{L_u}{\pi} \tau_{nл} \sum_{i=1}^4 R_i \quad (2)$$

Для получения зависимости распределения яркости $L_{nл}(l_u, s, h)$ по сечению площадки повторяем процедуру определения $L_{nлA}$ для каждой точки этого сечения.

Аналогично может быть получено выражение для требуемой мощности источника излучения при заданной облученности площадки $E_{nл}$:

$$\Phi_u(l_u) = \frac{\pi E_{nл} \cdot s \cdot h}{\sum_{i=1}^4 R_i} \quad (3)$$

При численном анализе (2), (3) использовались следующие исходные данные:

$$L_u = 3 \cdot 10^4 \frac{Вт}{ср \cdot м^2} \text{ (для обеспечения энергетической освещенности приемника } E_{пш} = 15 \frac{Вт}{м^2}),$$

$$\tau_{nл} = 0,5, l_{u \min} = 2,5 \cdot 10^{-3} м, S \cdot h = 3 \cdot 1,75 мм^2 \text{ (тело накала лампы КГМ-30-300-2)}.$$

Результаты численного анализа (2), (3) для различных случаев работы ИИ показаны на рис. 3 и позволяют сделать следующие выводы:

- градуировочная характеристика ИИ подчиняется закону обратных квадратов в большом диапазоне (более 10^5), но в ближней зоне (на расстоянии до площадки менее 0,01 м) эта зависимость нарушается; отклонение тем больше, чем больше размеры тела накала;
- распределение яркости по поверхности площадки нелинейно убывает от центра, причем неравномерность тем больше, чем меньше расстояние до тела накала;
- размер излучающей площадки с нелинейностью яркости менее 1% составляет в ближней зоне не более 0,1 мм, что соответствует освещаемой зоне в плоскости приемника сканера порядка 30...40 мкм (3-4 пикселя). Очевидно, что измерение ФПС может производиться только для нескольких пикселей;
- уход из ближней зоны для обеспечения линейности приводит к значительному (в 6...10 раз) росту требуемой мощности источника излучения и уменьшению динамического диапазона в 2...3 раза, что так же нежелательно.

На основании изложенного можно заключить, что для обеспечения требований, предъявляемых к ИИ, целесообразно использовать малогабаритные галогенные лампы мощностью 200...400 Вт с размером тела накала 2...5 мм и диаметром колбы не более 10...15 мм (для обеспечения необходимого расстояния до рассеивающей площадки).

Спектральные характеристики ИИ определяются спектром излучения источника и пропусканием $\tau(\lambda)$ или отражением $\rho(\lambda)$ [11, 20]. Отметим интересный метод получения почти неселективной отражающей площадки, построенной на базе комбинации стекол МС-23 и МС-20 [21]. Коэффициент отражения такой системы составляет около 70 % и изменяется не более, чем на 3% в спектральном диапазоне 0,4...2,0 мкм. Во всех остальных случаях селективность материала обязательно должна учитываться.

ИЗМЕРЕНИЕ ЗОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Основной проблемой измерения зонной характеристики является создание диффузного излучателя (ДИ) с неравномерностью яркостного поля менее 3 – 5%, размерами в 1,2...1,3 раза большими размера поля зрения МСУ, обладающего достаточной для калибровки энергетической яркостью (ориентировочно 20...100 Вт/ср·м²).

В известных системах аттестации МСУ эта задача решается двумя способами – с помощью рассеивающего экрана либо интегрирующей сферы (фотометрического шара) с

отверстием, превышающим размер входного зрачка сканера [12, 15, 29]. Преимущества рассеивающего экрана – относительно небольшие габариты и простота. Например, описанная в [29] панель имела размеры 1x0,5 м². Однако для калибровки такого экрана требуется прецизионный фотометр с точно известным полем зрения, а для обеспечения необходимой энергетической яркости нужно использовать мощные дуговые лампы.

Интегрирующая сфера обеспечивает лучшие метрологические характеристики – прежде всего более равномерное распределение лучистости в выходном зрачке. Получить аналитическую зависимость распределения яркости от параметров сферы очень сложно. Но практика показала, что этот параметр тем лучше, чем больше диаметр сферы и меньше отношение размера выходного зрачка к этому диаметру. В табл. 2 приведены характеристики различных диффузных излучателей с интегрирующей сферой [28, 30]. Можно заметить, что отношение $D_{зр.вых}/D_{сф.} = 1/4 \dots 1/6$ можно считать вполне приемлемым как с метрологической, так и с энергетической точек зрения.

Таблица 2. Основные характеристики диффузных излучателей.

Измерительная установка	Диаметр сферы $D_{сф}$, м	Диаметр выходного зрачка $D_{зр.вых}$, м	$D_{зр.вых}/D_{сф}$	Неравномерность яркости в выходном зрачке не более, %
Jena-Optronic (ФРГ)	2	0,8	0,4	4
ТМ (США)	1,22	0,41	0,336	0,5
NEC Corporation (США)	1	0,28	0,28	0,3
Камелия (Россия)	1	0,28	0,28	0,5

Расчет СПЕЯ ДИ также встречает ряд трудностей. Известно выражение для расчета яркости выходного зрачка фотометрического шара [11]:

$$L_{зр.вых} = \frac{\Phi_{и}}{4\pi^2 R_{сф}^2} \frac{1}{1 - \rho \left(\frac{A_{сф} - A_{отв}}{A_{сф}} \right)}, \quad (4)$$

где $A_{сф}$ и $A_{отв}$ – площадь внутренней поверхности сферы и суммарная площадь отверстий соответственно.

Коэффициент отражения стенок ρ только в первом приближении может считаться неселективным. Аналитического выражения функция $\rho(\lambda)$ обычно не имеет и ее учет достаточно сложен. Более того, как показано в [22], дополнительный вклад в селективность ДИ вносит поглощение среды, заполняющей сферу, особенно при больших $D_{сф}$.

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Измерение относительной спектральной характеристики МСУ может проводиться по стандартной методике [5] с использованием неселективного фотометра сравнения. Основными проблемами является обеспечение достаточно высокой монохроматизации зондирующего излучения (граница разделена по длинам волн менее 0,01 мкм) и относительно малой погрешности (менее 3 %) при значительном уровне сигнала на ПЗС-линейке сканера.

Для диапазона 0,4...1,8 мкм в спектральном излучателе могут использоваться двойные монохроматоры МДР-41, МДР-204 и МДР-206; причем две последние модели значительно дешевле. МДР-204 обеспечивает обратную линейную дисперсию 2,6 нм/мм, а МДР-206 – 4,3

нм/мм при относительном отверстии объектива 1/6 и 1/4 соответственно. Погрешность установки длинны волны менее 0,5 нм.

С монохроматорами хорошо согласуются ленточные лампы типа СИРШ 6-100 и СИРШ 8,5-200 с цветовой температурой 2840 К и 3000 К соответственно. В качестве неселективных приемников можно использовать термоэлектрические приемники РТН-12 и РТН-20 с сапфировыми окнами [19], работающие в диапазоне 0,18 – 5,5 мкм с погрешностью преобразования не более 6 %.

КОМПАРАТОРЫ

Относительные методы измерений предусматривают наличие в канале сравнения высокостабильного фотоэлектрического компаратора с большим диапазоном линейности, высоким амплитудным разрешением и незначительным зонным эффектом. В качестве такого компаратора может использоваться система из фотодиода с интегрирующим элементом, подключенным к операционному усилителю [5]. Хорошими метрологическими характеристиками обладают кремневые фотодиоды, работающие в области 0,2...1,2 мкм [18, 19]. К их достоинствам следует отнести большой динамический диапазон и высокую стабильность. Например предел линейности фотодиода ФД-24к составляет в импульсном режиме 0,25 А, а в непрерывном 0,02 А при темновом токе менее 1 мкА. Утомление фотодиода практически отсутствует как в импульсном так и в непрерывном режиме. Для измерения сигнала можно использовать вольтметр В7-34А, имеющий на пределах 1...10 В случайную погрешность менее 10^{-5} [1].

Серьезной проблемой является неравномерность чувствительности приемника излучения по поверхности. Среди известных методов уменьшения этой погрешности [2, 5] наиболее эффективной мерой считается применение интегрирующей сферы из молочного стекла (например, МС-20). Измеряемое излучение вводится через одно из отверстий в сфере, а в другое - перпендикулярно к оптической оси - устанавливается фотодиод. Недостатком установки является значительное (до 200 раз) ослабление излучения и некоторая селективность по спектру.

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

К оптике, входящей в состав установок для измерения энергетических характеристик МСУ, предъявляются, по существу, те же требования, что и к оптическим элементам сканеров – минимальные потери энергии в рабочем диапазоне длин волн, минимальные искажения по полю зрения, стабильность оптических свойств во всем диапазоне изменения окружающих условий. Однако, учитывая достаточно широкий спектральный диапазон МСУ и высокие требования к точности измерения спектральной характеристики, к оптической системе предъявляется еще одно требование – она не должна искажать спектральный состав излучения источника. Критерием качества в этом случае может служить коэффициент использования потока ξ . В соответствии с [18], оптическая система не должна изменять ξ более чем на 3 %, т.е. необходимо, чтобы выполнялось условие

$$1 - \frac{\int_0^{\infty} \varphi(\lambda) S(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi(\lambda) S(\lambda) d\lambda} \leq 0,03, \quad (5)$$

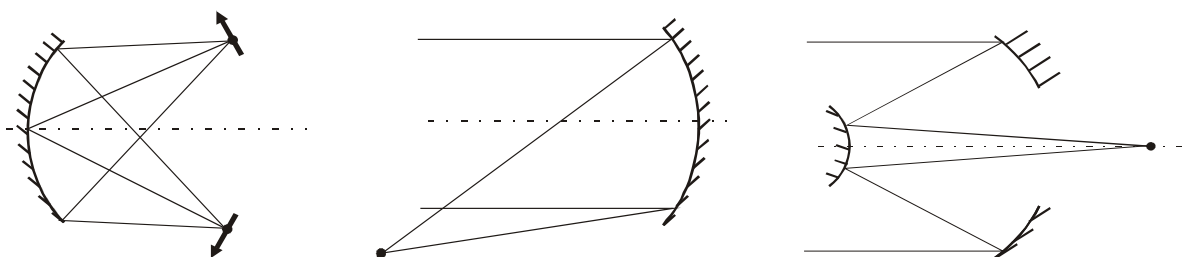
где $\varphi(\lambda)$ – спектральная плотность потока излучения источника; $S(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность МСУ; $\tau(\lambda)$ – относительная спектральная характеристика оптической системы.

При измерении энергетических характеристик оптическая система должна создать равномерную облученность приемника излучения МСУ с минимальными спектральными

искажениями. Поэтому требования к монохроматическим aberrациям оптической системы не очень высоки. Более существенным является хорошая коррекция хроматических aberrаций, что обычно выполняется в зеркальных системах.

В установках, где допустимо малое относительное отверстие оптической системы, наиболее часто используют схему Гершеля, особенно в качестве конденсоров (рис. 4,а) и коллиматоров (рис. 4,б).

Конденсоры типа, показанного на рис. 4,а, применяют в тех случаях, когда необходимо перенести в определенную плоскость изображение источника. Например, осветить входную щель монохроматора. Коллиматоры используют в тех случаях, когда требуется обеспечить параллельный ход лучей на выходе системы. Рассмотренные внеосевые системы со сферической оптикой, достоинством которых является простота изготовления и юстировки, могут применяться до тех пор, пока углы падения осевых лучей не превышают $5...7^\circ$. При больших углах заметно ухудшается качество изображения за счет aberrации комы, что может явиться источником дополнительной погрешности измерений.



а) Схема Гершеля для конденсора б) Схема Гершеля для коллиматора в) Схема Кассегрена

Рис. 4. Оптические системы установок для измерения энергетических характеристик МСУ.

При необходимости получения большей светосилы, следует использовать осевые зеркальные системы, построенные по схеме Кассегрена (рис. 4,в). В классическом варианте этой системы входное зеркало имеет параболическую поверхность, а выходное - гиперболическую. В этом случае система свободна от сферической aberrации и практически не имеет комы.

Использование линзовых систем (даже ахроматизированных) не позволяет обеспечить измерение в широком спектральном диапазоне с необходимой точностью, поэтому их применение в установках для измерения энергетических характеристик МСУ ограничено

Часть 2. Измерительная установка

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Учитывая высокие требования к точности и стабильности (повторяемости) измерения энергетических характеристик МСУ, метрологическое обеспечение аттестационной установки является весьма серьезной проблемой, осложняемой недостаточностью в Украине фотометрической базы соответствующего ранга.

Возможны два принципиально различных подхода к метрологическому обеспечению рассматриваемых измерений – с использованием образцового (эталонного) источника излучения либо - на основе абсолютного радиометра [3, 13, 24].

Использование абсолютного радиометра имеет ряд положительных моментов и в ряде стран этот метод находит применение даже в государственных эталонах фотометрических величин [2, 13]. Коэффициент преобразования такого радиометра определяется с помощью специальной обмотки замещения, омический нагрев которой сравнивается термобатареей с оптической мощностью, поглощаемой в радиометре. Спектральная чувствительность

оптического канала корректируется специальными (обычно жидкостными) светофильтрами [3, 13]. Основными недостатками радиометров является сложноучитываемая неэквивалентность тепловых полей при радиационном и электрическом нагреве, низкая чувствительность (0,05...1 В/Вт) и высокая стоимость. Кроме этого, высокая точность измерения (погрешность около 0,3 %) обеспечивается при уровнях облученности 800...1400 Вт/м², в то время как в рассматриваемой задаче эта величина существенно меньше.

Большее распространение получил метод аттестации с использованием эталонных излучателей, прежде всего ламп накаливания [7, 9, 24]. В принципе для этой цели можно использовать различные излучатели – галогенные, ленточные, дейтериевые. Однако, с учетом существующей фотометрической базы, наиболее целесообразным нам представляется применение светоизмерительных ламп типа СИС, аттестованных по СПЭЯ. Их достоинством является высокая стабильность воспроизведения единицы, долговечность, простота эксплуатации, приемлемая оптическая мощность. Эти излучатели, благодаря высоким метрологическим характеристикам, используются в действующем эталоне канделлы России, а также как образцовые средства в системах переноса единицы эталона [24]. Кроме того, при использовании светоизмерительных ламп возможна дополнительная калибровка установки по силе излучения (с пересчетом на габаритную энергетическую яркость). Хотя такой способ менее точен, его можно применять для предварительной оценки характеристик излучателей. В зависимости от точности компаратора, погрешность передачи единицы СПЭЯ от ламп типа СИС может составлять 2...8 %, что вполне приемлемо. Например погрешность передачи единицы СПЭЯ при калибровке системы ТМ спутника Landsat [27] и системы SPOT/HRV составила около 6,8 % [28].

В качестве вторичного эталона или образцового излучателя установки (ОИУ) можно также использовать ленточные лампы типа СИРШ, но их стабильность хуже, чем у светоизмерительных ламп, а излучаемая мощность меньше, что требует расширения динамического диапазона компаратора и, как следствие, приведет к снижению точности.

Учитывая уровни калибровочных сигналов, а также рассмотренные ранее методы измерения энергетических характеристик сканеров, для аттестации и калибровки излучателей установки можно рекомендовать поверочную схему, показанную на рис. 5. В соответствии с ней, используя ДИ в качестве вторичного эталона установки, вначале определяется чувствительность всех пикселей ПЗС-линейки при средних условиях облученности, а затем измеряется ФПС нескольких определенных пикселей во всем динамическом диапазоне. Полученные результаты с соответствующими поправками интерполируются (экстраполируются) на остальные пиксели. Перенос единиц яркости от диффузного излучателя к интегральному осуществляется, таким образом, через приемник сканера. Аналогично калибруется и спектральный излучатель. Похожие методы используются и в некоторых других установках [15, 23].

Кроме этого, предложенная схема позволяет производить перенос единицы СПЭЯ от вторичного эталона установки к интегральному и спектральному излучателям через компаратор.

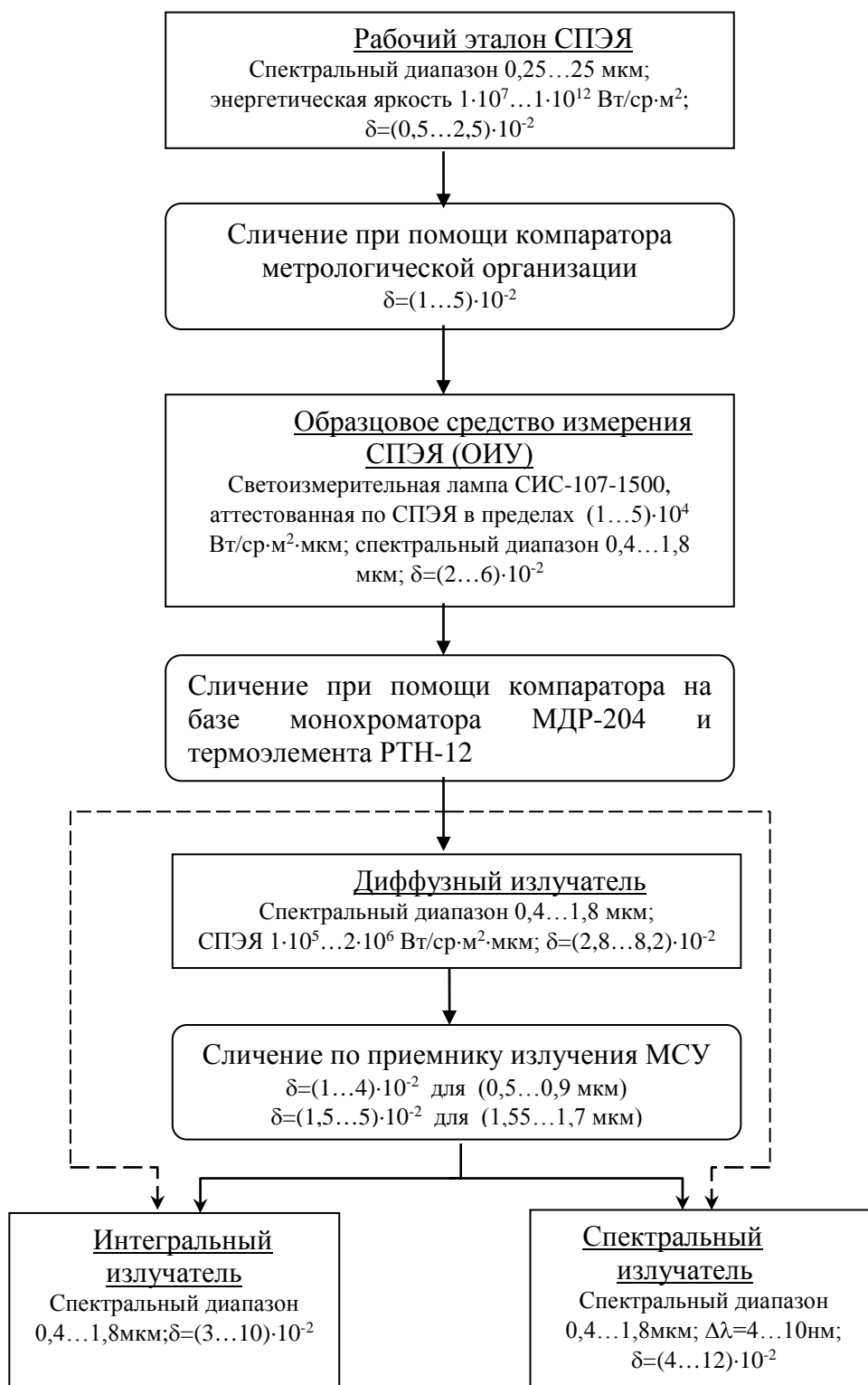


Рис. 5. Поверочная схема для измерительной установки: δ - среднеквадратическое отклонение случайной погрешности.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Примерная схема установки, реализующей рассмотренные выше методы измерений, показана на рис. 6. Ее основные особенности:

- учитывая относительно малый ресурс работы излучателей, обусловленный напряженным тепловым режимом, в состав установки входит калибровочный блок,

позволяющий проводить периодическую калибровку излучателей как по ДИ так и по ОИУ (в схеме на рис. 5 эта связь обозначена пунктирной линией);

- измерительный и калибровочный блоки функционально и конструктивно объединены, что позволяет сохранить метрологическую конфигурацию и параметры установки постоянными. При этом улучшается повторяемость измерений;
- отсутствует перемещение основных элементов измерительной схемы – сопряжение осуществляется через коммутирующее зеркало, что уменьшает погрешность геометрической привязки.

Режимы работы установки:

- коммутирующее зеркало 9 в положении I, плоское зеркало 13 – в положении I. ДИ подключен к компаратору – передача единицы СПЭЯ от компаратора к ДИ;
- плоское зеркало 13 в положении II. ОИУ подключен к компаратору – передача единицы СПЭЯ от ОИУ к компаратору;
- коммутирующее зеркало 9 в положении II. ДИ подключен к сканеру – измерение зонной характеристики;
- коммутирующее зеркало 9 в положении I, коллимирующий объектив 7 в положении I. ИИИ подключен к сканеру – измерение функции передачи сигнала;
- коммутирующее зеркало 9 в положении I, коллимирующий объектив 7 в положении II. СИ подключен к сканеру – измерение спектральной характеристики;
- коммутирующее зеркало 9 в положении III, измерительный блок подключен к калибровочному. Калибровка ИИИ и СИ по ОИУ.

Эквивалентные измерительные схемы, реализующие эти режимы показаны на рис.7.

В установке использованы фокусирующий и коллимирующий объективы с относительными отверстиями 1/6 и 1/8, фокусными расстояниями 1,4 м и 2 м соответственно. Диаметр интегрирующей сферы (ДИ) 1 м, диаметр выходного зрачка 0,28 м. Для питания источников излучения целесообразно использовать стабилизированные по току блоки питания БП-120 ВНИИОФИ (эталонный излучатель) и МТКС-15 и МТКС-30 (ИИИ и ДИ).

Типовые параметры сигналов установки, обеспечивающие измерение приведенных в табл.1 параметров МСУ, указаны в табл.3.

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Суммарная погрешность измерения энергетических характеристик МСУ на рассмотренной установке содержит ошибки метрологических средств и инструментальную ошибку сканера.

С учетом статистической независимости погрешностей градуировок излучателей суммарная случайная ошибка δ измерения характеристик может быть рассчитана в соответствии с [10] как:

$$\delta = k_{\beta} \sqrt{\sum \delta_i^2},$$

где k_{β} - коэффициент учитывающий величину доверительной вероятности ($k_{\beta} = 1,1$ при $\beta = 0,95$); δ_i - составляющие погрешностей.

Тогда отдельные составляющие погрешностей можно рассчитать следующим образом.

Погрешность измерения относительной функции передачи сигнала МСУ $\delta_{\text{фпс.о}}$:

$$\delta_{\text{фпс.о}} = k_{\beta} \sqrt{\delta_u^2 + \delta_{\sigma}^2 + \delta_o^2},$$

где δ_u - погрешность градуировки ИИИ; δ_{σ} - геометрическая погрешность базирования; δ_o - погрешность обработки выходного сигнала. Оценка $\delta_{\text{фпс.о}}$ дает величину 2,7 %.

Погрешность измерения функции передачи сигнала в абсолютных величинах $\delta_{\text{фпс.а}}$:

$$\delta_{\text{фпс.а}} = k_{\beta} \sqrt{\delta_{\text{ЭИ}}^2 + \delta_i^2 + \delta_{\sigma}^2 + \delta_o^2},$$

где $\delta_{ЭИ}$ - погрешность переноса единицы от вторичного эталона к ИИ. Оценка $\delta_{фмс.а}$ дает величину 7,12 % .

Погрешность измерения относительной спектральной характеристики $\delta_{с.о}$:

$$\delta_{с.о} = k_{\beta} \sqrt{\delta_c^2 + \delta_{\sigma}^2 + \delta_o^2} ,$$

где δ_c - погрешность градуировки СИ. Оценка $\delta_{с.о}$ дает величину 3,6 %.

Погрешность измерения спектральной характеристики в абсолютных величинах $\delta_{с.а}$:

$$\delta_{с.а} = k_{\beta} \sqrt{\delta_{ЭС}^2 + \delta_c^2 + \delta_{\sigma}^2 + \delta_o^2} ,$$

где $\delta_{ЭС}$ - погрешность передачи единицы от вторичного эталона к СИ. Оценка $\delta_{с.а}$ дает величину 7,54 % .

Погрешность измерения относительной зонной характеристики $\delta_{з.о}$:

$$\delta_{з.о} = k_{\beta} \sqrt{\delta_d^2 + \delta_{\sigma}^2 + \delta_o^2} ,$$

где δ_d - погрешность градуировки диффузного излучателя. Оценка $\delta_{з.о}$ дает величину 1,9 % .

Оценка систематических ошибок элементов измерительной установки может быть выполнена только после ее окончательной сборки и настройки и является предметом отдельных исследований. Однако практика показывает, что величина суммарной систематической погрешности может в несколько раз превосходить случайную компоненту и требуется серьезная работа по ее исключению или минимизации.

Определение инструментальной погрешности МСУ не входит в задачу данной статьи. Отметим только, что различные источники [15, 23] оценивают ее в пределах 2,9...5,4 %, а суммарную ошибку аттестации МСУ (без учета систематических погрешностей) величинами порядка 7,1 % для относительных и 11,4 % для абсолютных измерений. Предложенная установка, как видно из проведенного анализа, обеспечивает близкие результаты. Но при этом используется более простая и доступная база.

ВЫВОДЫ

Полученные в настоящей работе результаты были положены в основу установки, разрабатываемой Государственным научно-исследовательским предприятием «Конекс» (г. Львов) совместно с кафедрой оптических и оптико-электронных приборов Национального технического университета Украины «КПИ». Установка предназначена для предполетной аттестации природоресурсного ИСЗ Egyptsat-1 в рамках космической программы Украины и Арабской республики Египет.

После предварительной настройки установки будет проведено экспериментальное исследование ее метрологических характеристик, включающее предварительную аттестацию излучателей, исключение (минимизацию) систематических ошибок, оценку суммарной погрешности и разработку рабочих методик измерения в соответствии с требованиями сертификации аппаратуры спутника.

Список литературы

1. Бирюков А. Г., Маслов В. А., Медведев В. И. Цифровой прямопоказывающий импульсный фотометр малых энергий с автоматическим выбором диапазона измерений // Импульсная фотометрия. – Л.: Машиностроение, 1981. - Вып.7. – С. 92-95.
2. Бухштаб М. А., Максимов В. Н., Резчиков В. Н. Малогабаритные фотометры широкого применения ФПМ // Там же. – 1979. – Вып. 6. – С. 120 – 122.
3. Веревичева М. А. , Саприцкий В. И., Столяревская Р. И. И др. Коррекция кремниевых фотометров-компараторов // Светотехника. – 1987. - №6. – С. 14 – 16.

4. Воронков Г. Д. Ослабители оптического излучения. Л.: Машиностроение, 1980, 280 с.
5. Воропай Е. С., Торпачев П. А. Техника фотометрии высокого амплитудного разрешения. Минск: Университетская, 1988. – 208 с.
6. Гончаров А.К., Кондратьев Ю.М., Стожкова В.Н. и др. Методы и средства контроля характеристик бортовой информационно-измерительной аппаратуры для изучения природных ресурсов Земли //ВНИГМИ-МЦД. – Обнинск. – 1989. – 66 с.
7. ГОСТ 10771-88. Лампы накаливания –светоизмерительные рабочие. Технические условия.
8. ГОСТ 17333-80. Приборы фотоэлектронные. Методы измерения спектральной чувствительности.
9. ГОСТ 8.195-89. Государственная поверочная схема для средств измерения спектральной плотности энергетической яркости в диапазоне длин волн 0,2 – 2,5 мкм, спектральной плотности силы излучения и спектральной плотности энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,2 – 2,5 мкм.
10. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений.
11. Гуревич М. М. Фотометрия. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.
12. Зюмних К. Х. Многоканальный спектрометр МСК-М: лабораторные исследования, калибровка и проверка ее сохранности в полете // Исследование Земли из космоса. – 1989. - №2. – С. 71 – 77.
13. Ивашкова Л. Ю., Ильин А. С., Павлович М. Н. И др. Абсолютный радиометр // Измерительная техника. – 1987. - №8. – С. 23 – 25.
14. Ильин А. С., Весельницкий И. М., Степанов Б. М. Термоэлектрические и балометрические приемники излучения. // Измерительная техника – 1985 - №3. – с. 74-75.
15. Киселев И. А., Коростелев А. Н, Караева М. К. и др. Контроль энергетических характеристик многозональных сканирующих устройств ИСЗ «Ресурс-01» // Исследование Земли из космоса. – 1991. – №2. – С. 34 – 43.
16. Колобродов В. Г., Микитенко В. І., Міхеєнко Л. А. Стендова апаратура для вимірювання енергетичних характеристик оптико-електронних приладів космічного базування // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2003. - №3. – С. 98 –104.
17. Космическая система «Ресурс» для исследования природных ресурсов Земли и контроля окружающей среды / Под ред. Л. И. Гузева. – М: Главкосмос, 1988. – 294 с.
18. Кувалдин Э. В., Борисов В. А. Основные характеристики и методы испытаний измерительных фотодиодов // Импульсная фотометрия. – Л.: Машиностроение, 1984. Вып. 8. – С. 71- 81.
19. Мартынюк А. С. метрологические характеристики кремневых фотодиодов. Методы точных измерений лазерного излучения // Сб. тр. ВНИИФПРИ. – М.: 1985. –С. 55-62.
20. Машковская Т. Я., Хазанов В. С., Шкляева М.А. к метрологии белых платинок // Светотехника – 1987. – №2. – С.18 – 19.
21. Михайлов О.М. Неселективный отражатель из молочного стекла //Оптика и спектроскопия. – 1970. – Т.28, вып.4. – С. 801-802.
22. Міхеєнко Л. А., Корніяка С. О. Малогабаритна сферична кювета для експрес-аналізу газових сумішей // Вісник НТУУ “КПІ” – 2003, №25. – С. 84 – 88.
23. Мухамедяров Р. Д., Глушков А. С., Михайлов А. С., Хисамов Р. Ш. Метрологическая аттестация многоспектрального сканирующего устройства высокого разрешения // Исследование Земли из космоса. – 1991. - №1. – С. 64 – 74.
24. Саприцкий В. И. Метрологическое обеспечение световых измерений. // Светотехника. – 1985. – №5.- С. 19 – 22.
25. Селиванов А. С, Тучин Ю. М. Оперативная система наблюдения Земли «Ресурс-01» // Исследование Земли из космоса. – 1988. - №3. – С.101 – 106.

26. Смолко Г. П., Фаерман Г. П. Сравнительный анализ фотометрических систем ослабления света. // ОМП – 1978 - №1 – с.53 – 59.
27. Barker J. I., Ball D. I., Leung K. C. , Walker J. A. Prelaunch absolute radiometric calibration of the reflective bands of the Landsat 4 prototype thematic mapper // Proc. Landsat-4 Early Results Symp. (NASA Coddard Space Flight Center). – 1979.
28. Dinguirard M., Maisoneuve J. M., Dispositif d’etalonnage sur le soleil la camera HRV du projet SPOT // Passegna Internazionale Elettronica Nucleare ed aerospazi ale (Rome, Italy, marzo 7 – 16, 1980). – 1980. P. 1173 – 1180.
29. Kastner C. I., Slater P. N. In-flight radiometric calibration of advanced // Proc SPIE. – 1982. – 356. – P. 358 – 465.
30. Norwood V. I., Lansing J. C. Electro-optical imaging sensors // American Society of Photogrammetry. –1983. – P. 367 – 372.