

УДК 528.7:629.78

Л. В. Вариченко¹, В. Г. Колобродов², Я. Е. Ладыка¹,
В. И. Микитенко², Л. А. Михеенко²

¹Державне науково-дослідне підприємство «Конекс», Львів

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

Методы и средства измерения оптико-электронных систем характеристик космического зондирования Земли

Надійшла до редакції 08.10.04

Пропонуються методики вимірювань і схемотехнічні рішення стендового обладнання для калібрування та атестації оптико-електронних зображенувальних систем дистанційного зондування Землі. Розроблено рекомендації щодо складу і конструкції окремих блоків стенду.

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 стенда姆 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 нет. Почти отсутствуют и соответствующие 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 нашей работе рассматриваются схемно-методологические аспекты этой задачи и обсуждаются предложения по их решению с учетом современных требований. При этом основное внимание уделяется доступной элементной базе, что позволяет уменьшить стоимость и время разработки оборудования.

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,

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	104	5.67
Облученность приемника излучения, Вт/м ²	0.448	0.309	0.261	1.45	0.0473
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		

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 ($10^5...10^6$). В табл. 1 приведены основные энергетические характеристики МСУ, разрабатываемого в настоящее время в Украине.

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 $U_{\text{sn}}(L)$ — зависимости электрического сигнала на выходе МСУ от яркости L тест-объекта;
- относительной спектральной характеристики $U_{\text{sn}}(\lambda)$ — зависимости электрического сигнала на выходе МСУ от длины волн λ зондирующего излучения;
- относительной зонной характеристики $R_{\text{Dn}}(N_{ij})$ — неравномерности чувствительности элементов ПЗС-лайнейки (N_{ij} — номер пикселя в ПЗС-лайнейке).

Затем после переноса излучения единичной СПЭЯ от эталона к метрологическим элементам

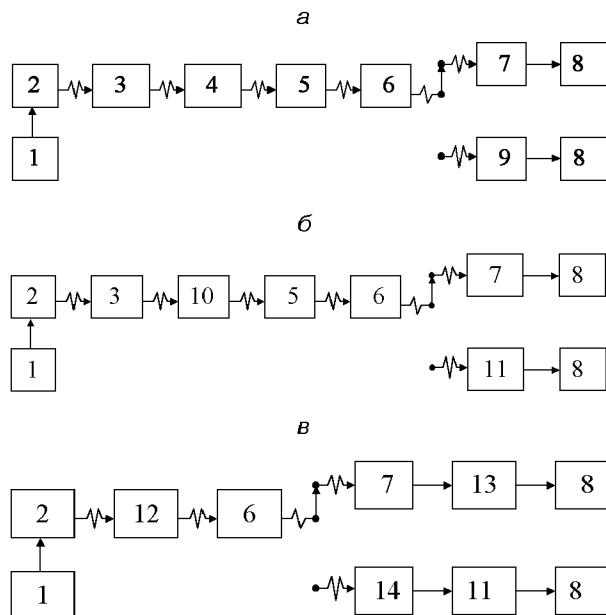


Рис. 1. Структурные схемы измерения энергетических характеристик МСУ: *а* — измерение спектральной характеристики, *б* — измерение функции передачи сигнала, *в* — измерение зонной характеристики (1 — блок питания, 2 — источник излучения, 3 — конденсор, 4 — монохроматор, 5 — коллиматор, 6 — коммутатор, 7 — МСУ, 8 — регистрирующее устройство, 9 — неселективный приемник излучения, 10 — калибрированный ослабитель излучения, 11 — фотоэлектрический компаратор, 12 — диффузный элемент, 13 — система опроса приемников МСУ, 14 — зонная диафрагма; электрические связи обозначены прямыми стрелками, оптические — зигзагами)

(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 среднее квадратичное значение напряжения шума и определяются пороговые характеристики системы.

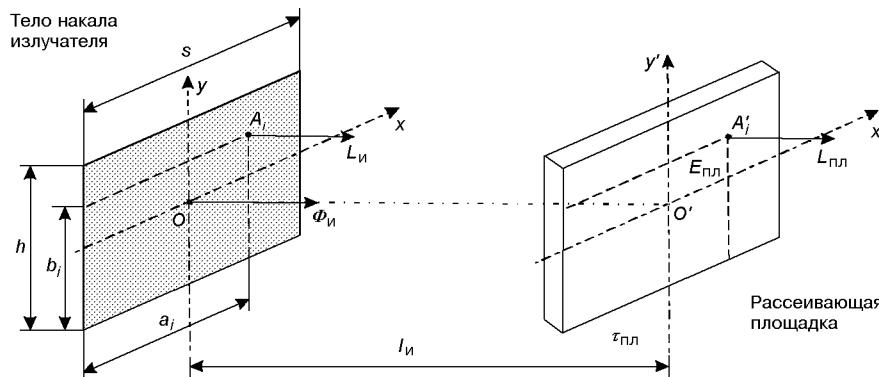
Структурные схемы установок, обычно используемых для измерения энергетических характеристик, показаны на рис. 1.

Контроль характеристик МСУ во время полета обычно заключается в сопоставлении сигнала, полученного при визировании природных тест-объектов, с измеренным на стенде и внесением соответствующих поправок. В этом случае требуется поиск и исследование природных тест-объектов, прецизионные измерения их СПЭЯ и коэффициента 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 нескольких 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 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 при минимальной мощности излучателя. Большинство возможных способов калиброванного ослабления излучения, рассмотренных в работах [4, 26], этим требованиям не удовлетворяют. Однако одним из наиболее приемлемых можно считать метод, основанный на перемещении источника излучения относительно рассеивательной площадки, установленной в фокальной плоскости объектива градуировочного коллиматора. Такая площадка может работать и в проходящем, и в отраженном свете. Для изучения метрологических и фотометрических характеристик такого устройства нами разработана математическая модель интегрального излучателя (ИИ) и выполнено его численное и экспериментальное исследование. Схема интегрального излучателя показана на рис. 2.

Поле освещенности ПЗС-линейки имеет прямоугольную форму. Тело накала источника излучения также прямоугольное 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]

$$E_i = \frac{L_u}{2} R_i, \quad (1)$$

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

$$+ \frac{b_i}{\sqrt{l^2 + b_i^2}} \arctg \frac{a_i}{\sqrt{l^2 + b_i^2}},$$

Рис. 2. Модель интегрально-го излучателя

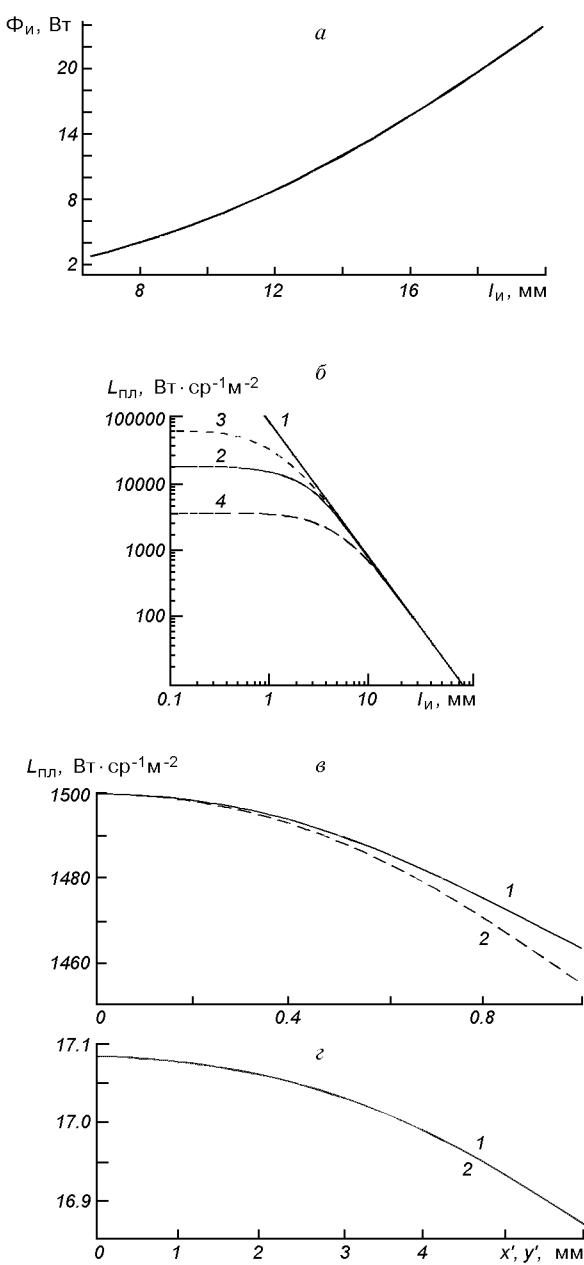


Рис. 3. а — зависимость мощности излучателя от расстояния до площадки для обеспечения ее яркости $L_{\text{пл}} = 1500 \text{ Вт}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2)$ при размерах тела накала $s = 3.5 \text{ мм}$, $h = 6 \text{ мм}$; б — зависимость энергетической яркости площадки $L_{\text{пл}}$ от расстояния l_i до тела накала при различных размерах тела накала (1 — точечное тело накала, 2 — $s = 3.5 \text{ мм}$, $h = 6 \text{ мм}$, 3 — $s = 1.75 \text{ мм}$, $h = 3 \text{ мм}$, 4 — $s = 7 \text{ мм}$, $h = 12 \text{ мм}$); в — распределение энергетической яркости по площадке в сагиттальном (1) и меридиональном (2) направлениях при $l_i = 7.5 \text{ мм}$; г — то же при $l_i = 75 \text{ мм}$

где L_u — яркость тела накала излучателя, l — расстояние между точками A_i и A'_i .

Полная освещенность площадки в точке A'_i может быть получена суммированием освещенности от четырех прямоугольных зон, на которые разбито тело накала излучателя. Считая площадку вторичным ламбертовским излучателем, получаем выражение для яркости $L_{\text{пл}A'}$ площадки в точке A' :

$$L_{\text{пл}A'} = 2 \frac{L_u}{\pi} \tau_{\text{пл}} \sum_{i=1}^4 R_i, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{пл}}$ — коэффициент пропускания площадки (либо $\rho_{\text{пл}}$ при работе в отраженном свете). Для получения зависимости распределения яркости $L_{\text{пл}}(l_i, s, h)$ по сечению площадки повторяем процедуру определения $L_{\text{пл}A'_i}$ для каждой точки этого сечения.

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

$$\Phi_u(l) = \frac{\pi E_{\text{пл}} \cdot s \cdot h}{\sum_{i=1}^4 R_i}. \quad (3)$$

Для дальнейших расчетов использовались следующие исходные данные: $L_u = 30 \text{ кВт}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2)$ (для обеспечения энергетической освещенности приемника $E_{\text{пи}} = 15 \text{ Вт}/\text{м}^2$), $\tau_{\text{пл}} = 0.5$, $l_{\text{имин}} = 2.5 \text{ мм}$, $s = 3 \text{ мм}$, $h = 1.75 \text{ мм}$ (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.

1. Градиуровочная характеристика ИИ подчиняется закону обратных квадратов в большом диапазоне расстояний, однако в ближней зоне ($l < 1 \text{ см}$) эта зависимость нарушается; отклонение тем больше, чем больше размеры тела накала (см. рис. 3, б).

2. Яркость поверхности площадки нелинейно убывает от центра, причем неравномерность распределения тем больше, чем меньше расстояние до тела накала (см. рис. 3, в).

3. Размер излучающей площадки с неоднородностью яркости менее 1 % составляет в ближней зоне не более 0.1 мм, что соответствует освещаемой зоне в плоскости приемника сканера по-

Таблица 2. Основные характеристики диффузных излучателей

Измерительная установка	Диаметр сферы $D_{\text{сф}}, \text{м}$	Диаметр выходного зрачка $D_{\text{зр.вых}}, \text{м}$	$D_{\text{зр.вых}}/D_{\text{сф}}$	Неравномерность яркости в выходном зрачке, не более
Jena-Optronic (ФРГ)	2	0.8	0.4	4 %
TM (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 %

рядка 30...40 мкм (3-4 пикселя). Очевидно, что измерение ФПС может производиться только для нескольких пикселей.

4. 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 также 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, а также коэффициентами пропускания $\tau(\lambda)$ или отражения $\rho(\lambda)$ [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 (ориентировано 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. Описанная в работе [29] панель имела размеры 1×0.5 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 личистости 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 диффузных излучателей с интегрирующей сферой [28, 30]. Можно заметить, что отношение $D_{\text{зр.вых}}/D_{\text{сф}} = 1/4...1/6$ можно считать приемлемым как с метрологической, так и с энергетической точек зрения.

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

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

где $A_{\text{сф}}$ и $A_{\text{отв}}$ — площадь внутренней поверхности сферы и суммарная площадь отверстий.

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

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 $\lambda\lambda = 0.4\dots1.8$ мкм в спектральном излучателе могут использоваться двойные монохроматоры МДР-41, МДР-204 и МДР-206; причем две последние модели значительно дешевле первой. 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 длины 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 в области $\lambda\lambda = 0.18\dots5.5$ мкм и с погрешностью преобразования не более 6 % можно использовать термоэлектрические приемники РТН-12 и РТН-20 с сапфировыми окнами [19].

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 кремниевые фотодиоды с рабочим диапазоном $\lambda\lambda = 0.2\dots1.2$ мкм [18, 19]. К их достоинствам следует отнести большой динамический диапазон и высокую стабильность. Например предел линейности фотодиода ФД-24к составляет 0.25 А в импульсном режиме и 0.02 А — в

непрерывном при темновом токе менее 1 мкА. Утомление фотодиода практически не наблюдается как в импульсном, так и в непрерывном режиме. Для измерения сигнала можно использовать вольтметр В7-34А, имеющий в диапазоне 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 эффективным считается применение интегрирующей сферы из молочного стекла (например МС-20). Измеряемое излучение вводится через одно отверстие 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. Кроме того, для обеспечения достаточно широкого спектрального диапазона МСУ и высокой точности измерения спектральной характеристики оптическая система 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 коэффициент ξ более чем на 3 %:

$$1 - \frac{\int_0^\infty \varphi(\lambda) S(\lambda)^0 \tau(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty \varphi(\lambda) S(\lambda)^0 d\lambda} \leq 0.03, \quad (5)$$

где $\varphi(\lambda)$ — спектральная плотность потока излучения источника; $S(\lambda)^0$ — относительная спектральная чувствительность МСУ; $\tau(\lambda)$ — относительная спектральная характеристика оптической системы.

Как показал анализ, в достаточной мере перечисленным требованиям удовлетворяет схема Гершеля. Однако для уменьшения влияния коэффициента углы падения лучей не должны превышать $5^\circ \dots 7^\circ$. При необходимости получения большей светосилы можно использовать осевые зеркальные системы, построенные по схеме Кассегрена, но общие габариты оптической части измерительной установки и ее стоимость значительно возрастают.

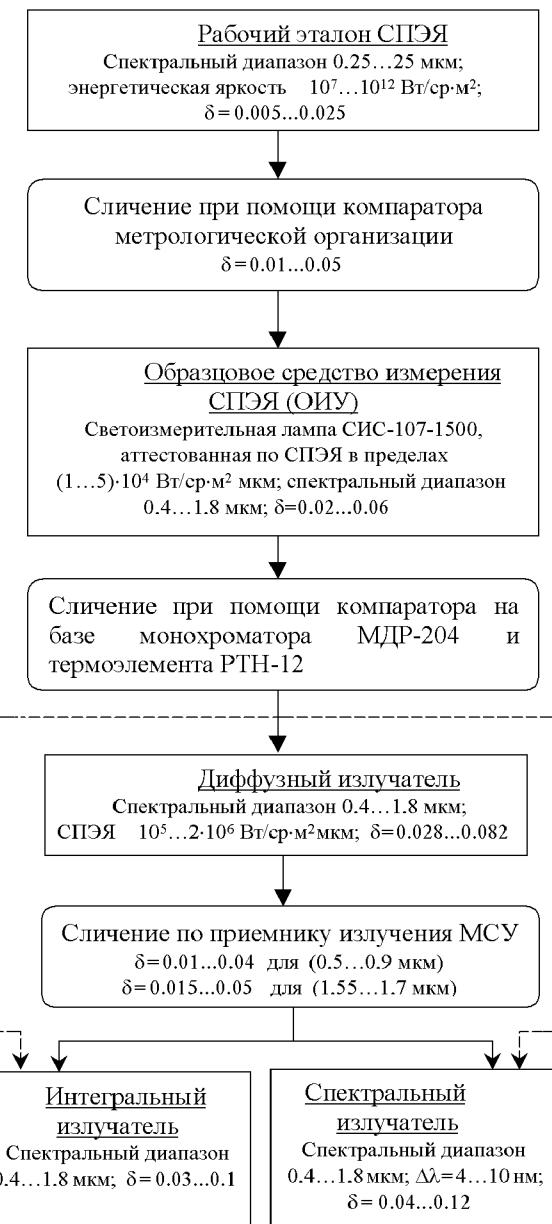
МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

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: сравнение с эталонным источником излучения либо использование 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 сложно учитываемая неэквивалентность тепловых полей при радиационном и электрическом нагреве, низкая чувствительность ($0.05 \dots 1 \text{ В/Вт}$) и высокая стоимость. Кроме этого, низкая погрешность измерения 0.3 % обеспечивается при уровнях облученности $800 \dots 1400 \text{ Вт}/\text{м}^2$, 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].



Для этой цели можно использовать различные излучатели — галогенные, ленточные, дейтериевые. Однако с учетом существующей фотометрической базы наиболее целесообразным представляется применение светоизмерительных

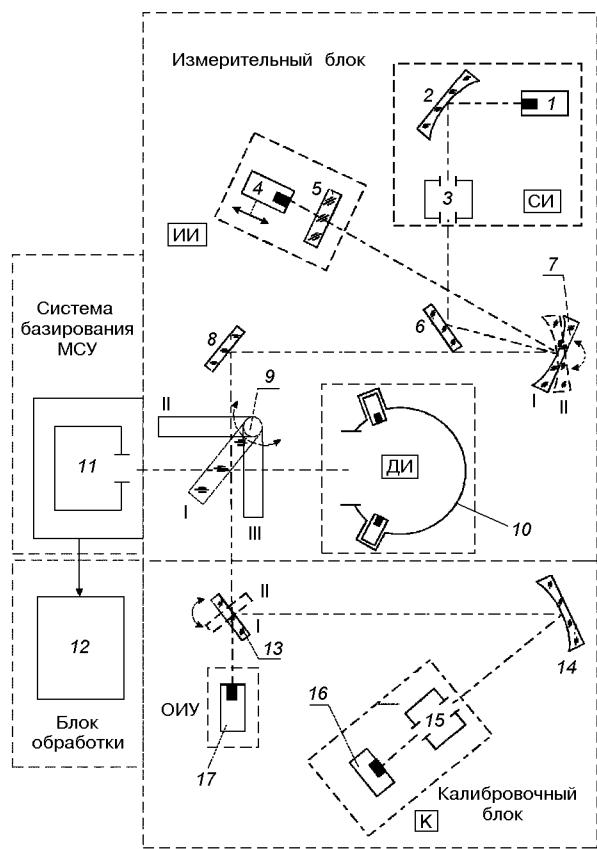


Рис. 5. Структурная схема измерительной установки: 1, 4, 17 — источники излучения; 2 — конденсор; 3, 15 — монохроматоры; 5 — рассеивающая площадка; 6, 8, 13 — плоские зеркала; 7 — объектив коллиматора; 9 — коммутирующее зеркало; 10 — диффузный излучатель; 11 — сканер; 12 — система обработки измерительной информации; 14 — фокусирующий объектив; 16 — приемник излучения; К — компаратор. Для геометрической привязки элементов схемы используются визирные лазеры (на рисунке не показаны)

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 канделяры 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 единичной 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. 4. В качестве вторичного эталона установки используется ДИ. 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.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Примерная схема установки, реализующей рассмотренные выше методы измерений, показана на рис. 5. Ее основные особенности:

- из-за относительно малого ресурса работы излучателей, обусловленного напряженным

Таблица 3. Типовые параметры сигналов аттестационной установки

Излучатель установки	Источник излучения			Поток излучения на входе приемника излучения, Вт	
	Тип, количество	Электрическая мощность, Вт	Нормируемый параметр и его величина	сканера	компаратора
Диффузный	KGM 30-300-2×12	300	Габаритная яркость $3.5 \cdot 10^7 \text{ кд}/\text{м}^2$	$1 \dots 1.5 \cdot 10^{-3}$	* $1 \dots 4 \cdot 10^{-5}$
Интегральный	KGM 30-300-2×1	—	—	** $10^{-8} \dots 5 \cdot 10^{-2}$	—
Спектральный	СИРШ8.5-200×1	212	—	* $5 \cdot 10^{-8} \dots 2 \cdot 10^{-7}$	* $5 \cdot 10^{-8} \dots 2 \cdot 10^{-7}$
Эталонный	СИС107-1500×1	915	Сила света 1500 кд	—	* $2.5 \cdot 10^{-7} \dots 10^{-6}$

* Монохроматический поток в полосе пропускания 4 нм (по уровню 0.5) в спектральном диапазоне 0.5—1.7 мкм

** Регулируемые пределы изменения потока в интегральном излучателе

- тепловым режимом, в состав установки входит калибровочный блок, позволяющий проводить периодическую калибровку излучателей как по ДИ, так и по ОИУ (на рис. 4 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;
 - основные элементы измерительной схемы не перемещаются — 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 единичной 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. ИИ 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 ИИ и СИ по ОИУ.

Эквивалентные измерительные схемы, реализующие эти режимы, показаны на рис. 6.

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 1 м, диаметр выходного зрачка 0.28 м. Для питания целесообразно использовать стабилизированные по току блоки питания БП-120 ВНИИОФИ (эталонный излучатель) и МТКС-15 и МТКС-30 (ИИ 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.

При использовании рассмотренной поверочной схемы погрешности измерений отдельных характеристик МСУ составляют:

- погрешность измерения функции передачи сигнала в относительных единицах не более 2.7 % и в абсолютных единицах — 7.2 %;
- погрешность измерения относительной спектральной характеристики не более 3.6 % и в абсолютных единицах не более 7.5 %;
- погрешность измерения относительной зонной характеристики не более 1.9 %.

Определение инструментальной погрешности МСУ не входит в нашу задачу. Отметим только,

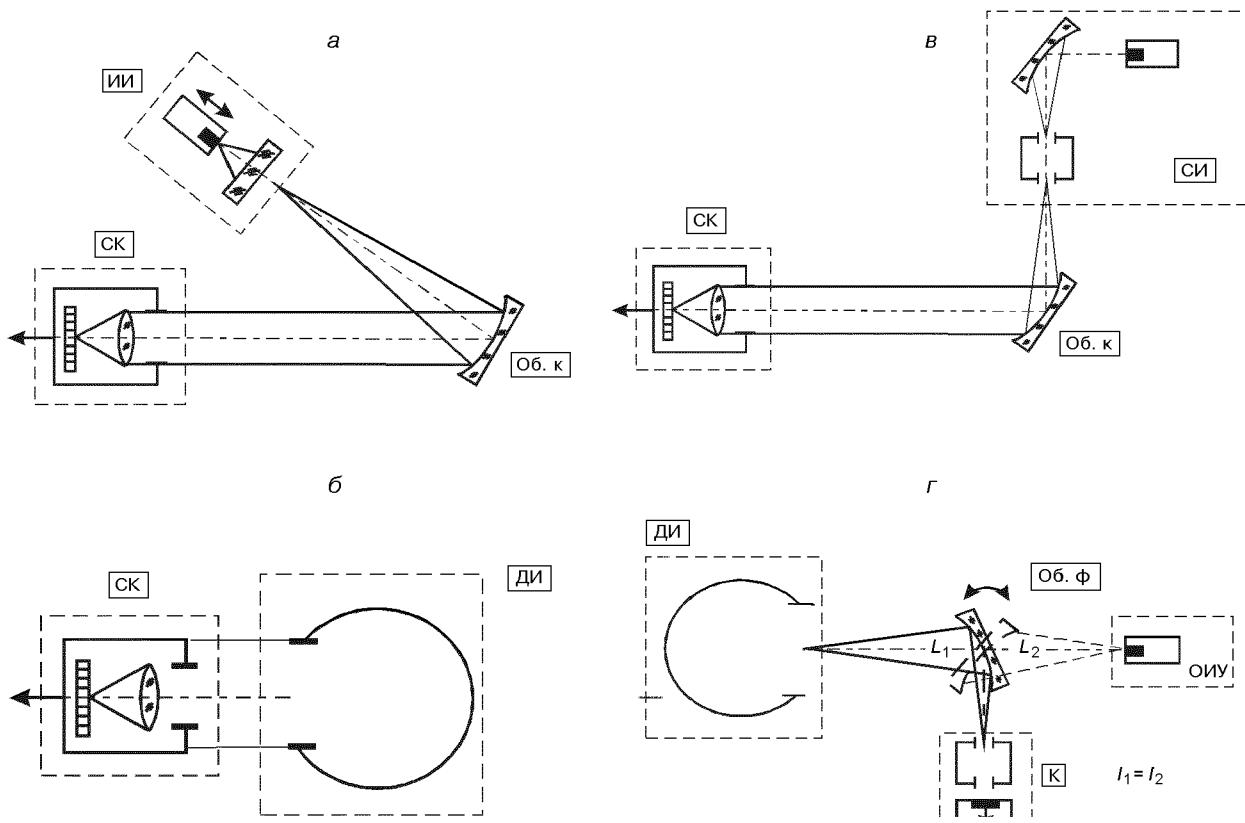


Рис. 6. Эквивалентные измерительные схемы (Об. к. — объектив коллиматора, Об. ф. — объектив фокусирующий): *а* — измерение функции передачи сигнала, *б* — измерение зонной характеристики, *в* — измерение спектральной характеристики, *г* — перенос единицы СПЭЯ от ОИУ к диффузному излучателю

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 элементная база.

Выводы

Полученные здесь 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

имени (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.

- Бирюков А. Г., Маслов В. А., Медведев В. И. Цифровой прямопоказывающий импульсный фотометр малых энергий с автоматическим выбором диапазона измерений // Импульсная фотометрия.—1981.—Вып. 7.—С. 92—95.

2. Бухштаб М. А., Максимов В. Н., Резчиков В. Н. Малогабаритные фотометры широкого применения ФПМ // Импульсная фотометрия.—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: Университетскае, 1988.—208 с.
6. Гончаров А. К., Кондратьев Ю. М., Стоjkова 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.—Введ.
8. ГОСТ 17333-80. Приборы фотоэлектронные. Методы измерения спектральной чувствительности.—Введ.
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 не длин волн 0.2—2.5 мкм.—Введ.
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 // Исслед. Земли из космоса.—1989.—№ 2.—С. 71—77.
13. Ивашикова Л. Ю., Ильин А. С., Павлович М. Н. и др. Абсолютный радиометр // Измерит. техника.—1987.—№ 8.—С. 23—25.
14. Ильин А. С., Весельницкий И. М., Степанов Б. М. Термоэлектрические и балометрические приемники излучения // Измерит. 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» // Исслед. Земли из космоса.—1991.—№ 2.—С. 34—43.
16. Колобров В. Г., Микитенко В. И., Михеенко Л. А. Стендова аппарата 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 кремниевых 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 пластинок // Светотехника.—1987.—№ 2.—С. 18—19.
21. Михайлов О. М. Неселективный отражатель из молочного стекла // Оптика и спектроскопия.—1970.—28, вып. 4.—С. 801—802.
22. Михеенко Л. А., Корняка 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 // Исслед. 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» // Исслед. Земли из космоса.—1988.—№ 3.—С. 101—106.
26. Смолко Г. П., Фаерман Г. П. Сравнительный анализ фотометрических систем ослабления света // Оптико-мех. пром-сть.—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., Maisonneuve J. M. Dispositif d'étalonnage sur le soleil la camera HRV du projet SPOT // Passegna Internazionale Elettronica Nucleare ed aerospaziale (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 // Amer. Soc. Photogrammetry.—1983.—P. 367—372.

SOME METHODS AND MEASUREMENT MEANS FOR ENERGETIC CHARACTERISTICS OF OPTOELECTRONIC EARTH REMOTE IMAGERS

L. V. Varichenko, V. G. Kolobrodov, Ya. Ye. Ladyka,
V. I. Mikitenko, L. A. Mikheenko

Some measuring methods and schematic design decisions on bench-top equipment are proposed for calibration and attestation of optoelectronic Earth remote imagers. Recommendations on structure and design of some test bench blocks are developed.