

УДК 528.7:629.78

Л.А. Міхеєнко, В.І. Микитенко

МЕТОДИ, ЗАСОБИ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КАЛІБРУВАННЯ ЕТАЛОННИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ

Вступ

Постійне удосконалення прецизійної фотометричної апаратури потребує випереджаючого розвитку відповідного еталонного та вимірювального забезпечення. Ця задача, одна з найбільш складних та важливих у сучасній оптичній метрології, в умовах України значно ускладнюється рядом додаткових факторів – відсутністю сертифікованих еталонів та повірочних схем для енергетичних вимірювань (є тільки проект ДСТУ), моральним та фізичним зношенням елементної фотометричної бази (особливо в розряді зразкових засобів вимірювань), недостатнім розвитком наукового і методичного забезпечення оптико-фізичних вимірювань [1].

Особливо гостро ця ситуація проявилась при розробці систем вимірювання енергетичних характеристик прецизійних цифрових відеосистем (ЦВС) з багатoelementними приймачами випромінювання, наприклад, установок для калібрування вітчизняних багатоспектральних скануючих пристроїв космічного базування [2].

Постановка задачі

Метою даної статті є огляд, аналіз та розробка методів калібрування еталонних випромінювачів для вимірювання енергетичних характеристик прецизійних ЦВС у видимій та ближній інфрачервоній ділянках спектра на основі поширеної та доступної в Україні елементної бази.

Засоби калібрування еталонних випромінювачів

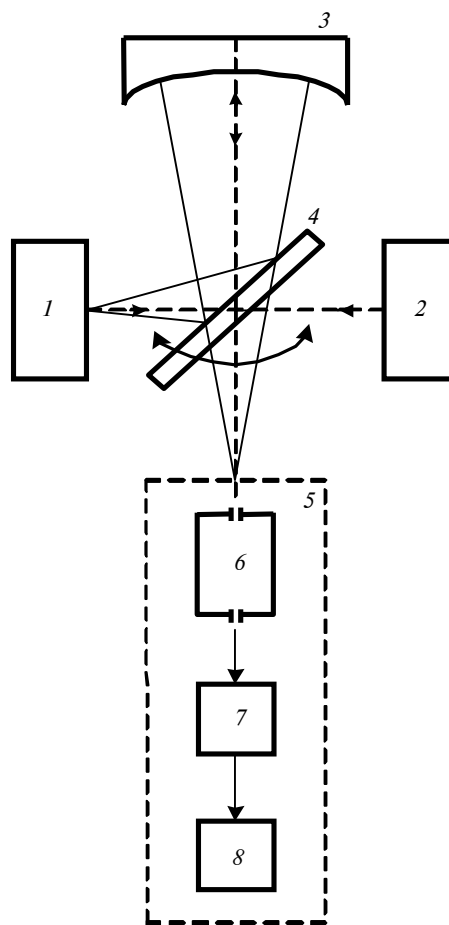
У більшості установок для вимірювання енергетичних характеристик ЦВС в еталонних джерелах випромінювання використовуються дифузні випромінювачі на основі інтегруючої сфери [3], типові характеристики яких наведено в табл. 1. Їх калібрування, зазвичай, здійснюється за спектральною густиною енергетичної яскра-

Таблиця 1. Типові характеристики вимірювальних випромінювачів

Характеристика	Значення
Інтегральна яскравість, Вт/ср·м ²	500–2000
Спектральний діапазон, мкм	0,4–1,8
Динамічний діапазон зміни яскравості	10 ² –10 ⁵
Вихідна апертура, м	Ø0,0025–Ø0,25
Середньоквадратична похибка відтворення одиниці яскравості	10 ⁻² –10 ⁻¹

вості (СГЕЯ), що найбільш повно відтворює енергетичні характеристики випромінювача.

Для переносу одиниці СГЕЯ від первинного еталона до робочих засобів вимірювання використовується проекційна схема, яка показана на рисунку.



Структурна схема установки передачі одиниці СГЕЯ: 1 – еталонне джерело випромінювання; 2 – джерело випромінювання, що калібрується; 3 – проекційний об'єктив; 4 – комутатор (плоске дзеркало); 5 – спектрокомпаратор; 6 – монохроматор; 7 – вимірювальний приймач випромінювання; 8 – підсилювально-реєструючий пристрій

Елемент ділянки кожного з випромінювачів за допомогою дзеркального об'єктива з комутатором почергово проектується на вхід спектрокомпаратора, який об'єднує монохроматор та вимірювальний приймач випромінювання. При цьому вхідна щільність монохроматора оптично спряжена з випромінюючою площиною, а вихідна — з приймальним елементом приймача. Калібрування здійснюється порівнянням сигналів від первинного (еталонного) та вторинного (того, що калібрується) випромінювачів у вузькій смузі пропускання монохроматора. Змінюючи довжину хвилі, на яку налаштовано монохроматор, проводять калібрування в заданому спектральному діапазоні.

Основними характеристиками калібрувальних систем є: спектральний діапазон, в якому здійснюється перенос одиниці СГЕЯ, смуга пропускання монохроматора, похибка переносу одиниці СГЕЯ, монохроматичний потік на вході монохроматора, спектральний фотосигнал на виході приймача випромінювання.

Задачею синтезу калібрувальної системи є вибір елементів (еталонних та робочих випромінювачів, об'єктива, монохроматора та приймача випромінювання), що забезпечують отримання прийнятних характеристик та параметрів вимірювальної установки — мінімальної похибки передачі одиниці СГЕЯ при заданому відношенні сигнал/шум.

Елементна база вимірювальних установок

Із врахуванням вимог до вимірювальних установок, що розглядаються [2], для практичного застосування були відібрані такі типи вимірювальних ламп: світловимірювальні лампи розжарення (табл. 2) [4], спеціальні галогенні лампи (табл. 3) [5], вимірювальні приймачі випромінювання (табл. 4) [6, 7] та монохроматори (табл. 5) [8, 9]. Наведені в таблицях дані дали змогу розробити методику обґрунтування елементного складу установки калібрування ЦВС.

Таблиця 2. Лампи розжарення, світловимірювальні

Тип випромінювача	Країна, фірма	Електричні параметри		Фотометричні параметри			Стабільність	Габарити тіла розжарення, мм ²	Вимірювана величина
		P, Вт	U, В	T, К	I, кд	Φ, Вт			
СИС 107-500	Росія	365	107	2800	500	—	15 год/18 міс	25×30	Сила світла
СИС 107-1500	”	915	107	2860	1500	—	15 год/13 міс	28×35	”
СИП 107-500	”	74	107	2800	—	500	25 год/18 міс	25×15	Світловий потік
СИП 107-1500	”	260	107	2800	—	3500	25 год/18 міс	25×15	”
СИРШ 6-100	”	100	6	2840	—	—	200 год/12 міс	2×8	Яскравість
СИРШ 8,5-200	”	212	8,5	3000	—	—	300 год/12 міс	2×10	”
WI 14	Німеччина, Osram	90	5	2400	—	—	—	1,6×8	”
LF 300	Великобританія, Polaron	300	100	2750	—	4000	1%/100 год	—	Світловий потік
LIS 3000	”	616	19,2	3000	740	—	1%/100 год	10×15	Сила світла

Таблиця 3. Лампи розжарення, галогенні та температурні

Тип випромінювача	Країна, фірма	Електричні параметри		Фотометричні параметри		Тривалість горіння, год	Габарити тіла розжарення, мм ²	Вимірювана величина
		P, Вт	U, В	T, К	Φ, лм			
КГМ 12-100	Росія	100	12	3000	3000	85	44×12,5	Яскравість

Кінець табл. 3

Тип випромінювача	Країна, фірма	Електричні параметри		Фотометричні параметри		Тривалість горіння, год	Габарити тіла розжарення, мм ²	Вимірювана величина
		$P, \text{Вт}$	$U, \text{В}$	$T, \text{К}$	$\Phi, \text{лм}$			
КГМ 24-150	Росія	150	24	3000	5000	50	47×12,5	Яскравість
КГМ 24-150-3	”	250	24	3000	8500	150	70×12,5	”
КГМ 30-300-2	”	300	30	3200	—	55	55×16	”
КГМ 36-400	”	400	36	3200	14500	50	60×18	”
ТРУ 1100-2350	”	300	10	2350	—	50	50×72	”
ТРШ 2850-3000	”	440	55	2850	—	255	39×460	”
Halostar 64435	Німеччина, Osram	100	12	3000	2200	1000	33×9,5	”
FEL (Ge Lamp)	США	1000	120	3200	27500	375	70×22	”

Таблиця 4. Вимірювальні приймачі випромінювання

Тип приймача	Країна, фірма	Матеріал чутливого шару	Спектральний діапазон, мкм	Чутливість	Розмір чутливої площадки, мм	Габаритні розміри, мм×мм
ФД-24К	Росія	Si	0,47–1,0	60 А/лк	Ø10	6,5×19,6
S 1227	Японія, Hamamatsu	Si	0,19–1,0	0,12 А/Вт	10×10	17×17
S 2281	”	Si	0,19–1,1	0,5 А/Вт	Ø10	25×10
LI6Si-8A4-R03M-Se	США, Judson technologies	Si, Ge	0,4 –1,0	0,45 А/Вт	Ø5	—
		“Sandwich”	1,1–1,8	0,65 А/Вт	Ø3	
G-050	США, EOS	Ge	1,0–1,8	0,9 А/Вт	10×10	17×17
РТН-10	Росія	Сур'мяна чернь	0,18–5,5	2 В/Вт	1,5×3	65×18
РТН-12	”	”	0,18	20 В/Вт	1,5×12	110×25
РТН-16	”	”	0,18	20 В/Вт	1×1	110×25
РТН-30	”	”	0,18	5,5 В/Вт	3×3	65×18

Таблиця 5. Монохроматори

Тип монохроматора	Країна, фірма	Спектральний діапазон, нм	Оптична система			Зворотна дисперсія, нм/мм	Точність установки довжини хвилі, нм	Ширина щілини, мм
			Схема	$f'_{об}, \text{мм}$	$D_{вт}/f_{об}$			
МДР-204	Росія	190–5000	Еберта Фасті	300	1/6	2,6	0,5	0–4
МДР-206	”	190–5000	—	180	1/4	4,3	0,5	0–4

Кінець табл. 5

Тип монохроматора	Країна, фірма	Спектральний діапазон, нм	Оптична система			Зворотна дисперсія, нм/мм	Точність установки довжини хвилі, нм	Ширина щілини, мм
МДР-40	Росія	200–25000	—	300	1/6	2,0	0,025	0–4
MS 2001	США	180–60000	Черні Тернер	200	1/3,6	4,2	0,12	0–2
MS 3501	”	180–60000	—	350	1/3,8	2,37	0,06	0–2
MS 750i	”	180–60000	—	750	1/8,9	0,9	0,015	0–2
MSDD 1000	”	180–60000	—	1000	1/5,9	0,78	0,012	0–2

Розглянемо дану методику стосовно багатоспектрального скануючого пристрою штучного супутника Землі Egiptat-1 [2].

Методика, зокрема, передбачає:

- попередній вибір елементів по спектральному діапазону, потужності джерел випромінювання та чутливості приймачів випромінювання;
- розрахунок втрат випромінювання в оптичному тракті вимірювальної схеми;
- розрахунок спектральних характеристик випромінювачів та визначення монохроматичного потоку, що потрапляє на вхід компаратора в заданому спектральному діапазоні;
- розрахунок корисних сигналів на виході компаратора, на кінцях та посередині спектрального діапазону.

Із врахуванням параметрів дифузного випромінювача установки (вихідний потік $\Phi_{\text{вих}} = 1200$ Вт; робочий спектральний діапазон $\Delta\lambda = 0,4\text{--}1,8$ мкм; діаметр вихідної зіниці $D_{\text{вих}} = 0,25$ м) [2], доцільно відібрати такі елементи:

- світловимірювальна лампа СИС 107-1500;
- галогенна лампа КГМ 30-300;
- стрічкова лампа СИРШ 2,5-200;
- вимірювальний фотодіод ФД-24К;
- неселективний термоелемент РТН-12.

Як оптичну систему було використано дзеркальний сферичний об'єктив із фокусною відстанню 1400 мм та відносним отвором 1:6 [10].

Результати енергетичного розрахунку подано в табл. 6. Вони дають змогу вибрати узгоджену пару джерело випромінювання—компаратор, яка забезпечує максимальний корисний сиг-

Таблиця 6. Порівняльна оцінка схем передачі одиниці СГЕЯ

Параметр	Випромінювач				
	ДВ (12 ламп КГМ 30-300)	СИРШ 8.5-200	СИС 107-1500	КГМ 30-300-2	ДВ (1 лампа СИП 107-1500)
Інтегральний потік на виході випромінювача Φ_i , Вт	144	22	300	100	6,5
Інтегральний коефіцієнт пропускання оптичного тракту τ_0	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$
Монохроматичний потік на виході монохроматора Φ_λ , Вт/мкм	$5,5 \cdot 10^{-9}$	$8,5 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-9}$
Сигнал на виході приймача випромінювання U_c , В	$2 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$
Порівняльна величина вихідного сигналу $U_0 = U_c/U_{c\text{max}}$, відн. од.	$2,7 \cdot 10^{-3}$	1,0	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}
Похибка передачі одиниці СГЕЯ δ	0,055–0,11	0,044–0,060	0,055–0,11	0,055–0,077	0,044–0,055

Кінець табл. 6

Параметр	Випромінювач				
	ДВ (12 ламп КГМ 30-300)	СИРШ 8.5-200	СИС 107-1500	КГМ 30-300-2	ДВ (1 лампа СИП 107-1500)
Порівняльна величина похибки передачі одиниці СГЕЯ* $\delta_0 = \delta/\delta_{\max}$, відн.од.	1,0	0,7	1,0	0,85	0,65
Коефіцієнт порівняння якості схеми передачі одиниці СГЕЯ $\xi = U_0/\delta_0$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	1,4	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Примітки	Випромінювач, що калібрується	Первинний еталон установки	Зразковий засіб вимірювання	Зразковий засіб вимірювання	Величина СГЕЯ визначається розрахунком

*Середнє значення.

нал у межах заданого спектрального діапазону і смуги пропускання монохроматора.

В основу метрологічного аналізу було покладено повірочні схеми Росії [11] та України ("Державна повірочна схема для засобів вимірювання спектральної густини енергетичної яскравості, в діапазоні довжин хвиль від 0,2 до 25 мкм" – проект). Узагальнена повірочна схема на основі вказаних документів показана в табл. 7 і дає загальне уявлення про послідовність та параметри передачі одиниці СГЕЯ від еталона до робочих засобів вимірювання. При аналізі було використано метрологічні характеристики елементів, які наведені в табл. 1–4. При розрахунках сумарної похибки передачі одиниці СГЕЯ окремі складові загальної похибки вважалися статистично незалежними, а довірчу ймовірність брали 0,95.

Результати аналізу наведені в табл. 6. Як узагальнений критерій порівняння було прийнято параметр ξ , що враховує: втрати випромінювання в оптичній системі для конкретної пари випромінювач–приймач, сигнал на виході спектрального компаратора, відносну похибку передачі одиниці СГЕЯ.

Як видно з табл. 7, кращі енергетичні та метрологічні характеристики забезпечують галогенні і стрічкові лампи розжарення. Однак останні в Україні не виробляються і є досить дефіцитними. Тому для вітчизняних розробників більш перспективними є галогенні лампи, велика номенклатура яких дозволяє розв'язати більшість фотометричних задач у видимій та ближній інфрачервоній областях спектра.

Таблиця 7. Узагальнена повірочна схема передачі одиниці СГЕЯ

Розряд носія одиниці СГЕЯ	Діапазон значень відтворюваної величини, Вт/ср·м ³ , мкм	Засіб вимірювання	Середньоквадратичне відхилення відтворюваної одиниці	Невиключена систематична похибка	Метод відтворення
Державний еталон	$4 \cdot 10^4$ – $3 \cdot 10^{11}$ 0,2–2,5	Модель чорного тіла	$0,5 \cdot 10^{-2}$ $0,5 \cdot 10^{-2}$ – $2,5 \cdot 10^{-2}$ *	$1,5 \cdot 10^{-2}$ $0,2 \cdot 10^{-2}$ – $2 \cdot 10^{-2}$ *	Непрямі вимірювання, компаратор
Робочий еталон	$4 \cdot 10^4$ – $3 \cdot 10^{11}$ 0,2–2,5	Модель чорного тіла, галогенні та стрічкові лампи	$2 \cdot 10^{-2}$ – $8 \cdot 10^{-2}$ $1,5 \cdot 10^{-2}$ – $8 \cdot 10^{-2}$ *	—	Непрямі вимірювання, компаратор
Робочі засоби вимірювання	$4 \cdot 10^4$ – 10^{12} 0,2–2,5	Галогенні та стрічкові лампи	$6 \cdot 10^{-2}$ – $15 \cdot 10^{-2}$ $2 \cdot 10^{-2}$ – $11 \cdot 10^{-2}$ *	—	Компаратор, яскравоміри

*Згідно з ГОСТ 8.195–89.

Висновки

У статті розглянуто методи, схеми та доступну в Україні елементну базу, які забезпечують калібрування прецизійних випромінювачів середньої потужності у видимій та ближній інфрачервоній ділянках спектра для вимірювання енергетичних параметрів ЦВС, розроблено інженерну методику та рекомендації щодо раціонального вибору основних елементів

схем калібрування випромінювачів. Енергетичний та метрологічний аналіз схем установок для передачі одиниці СГЕЯ, виконаний авторами, дає можливість кількісно оцінити параметри калібрування випромінювачів на початковій стадії розробки.

Отримані результати можуть використовуватись широким колом розробників прецизійного фотометричного обладнання

Л.А. Михеенко, В.И. Микитенко

МЕТОДЫ, СРЕДСТВА И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЛИБРОВКИ ЭТАЛОННЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Рассмотрены методы и средства калибровки излучателей для прецизионного фотометрического оборудования. Разработаны инженерная методика и рекомендации по выбору основных элементов.

L.A. Mikheenko, V.I. Mykytenko

THE APPROACHES, MEANS AND METROLOGICAL ASSURANCE OF CALIBRATION OF THE STANDARD RADIATORS

We consider the approaches and means of calibration of the standard radiators for precision photometric equipment. Moreover, we develop the engineering approaches and recommendations on choosing the primary elements of the equipment.

1. Купко А.Д., Назаренко Л.А. Метрологическое обеспечение световых измерений в Украине // Светотехника. — 2001. — № 5. — С. 38–40.
2. Вариченко Л.В., Колобродов В.Г., Ладыка Я.Е., Микитенко В.И., Михеенко Л.А. Методы и средства измерения энергетических характеристик оптико-электронных систем космического зондирования Земли // Космічна наука і технологія. — 2006. — 12, № 2/3. — С. 59–69.
3. Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Михеенко Л.А., Петрущенко Л.А. Теорія дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. — 2005. — № 4. — С. 106–114.
4. ГОСТ 10771–88. Лампы накаливания светоизмерительные рабочие. Технические условия.
5. Лампы накаливания галогенные // Электротехника СССР. — Информэлектро, 1988.
6. Ильин Л.С. Термoeлектрические приемники оптического излучения с пленочными и проволочными термопарами для прецизионных измерений // Метрология. — 2005. — № 11. — С. 19–30.
7. Кувалдин Э.В., Борисов В.А. Основные характеристики и методы испытаний измерительных фотодиодов // Импульсная фотометрия. — Л.: Машиностроение, 1984. — Вып. 8. — С. 71–81.
8. Выставочный материал. Монохроматоры.
9. <http://solartii.com>
10. Гайворонська Г.О., Михеенко Л.А., Сокурченко В.М. Оптическая система установки для передачи единиц фотометрических величин // Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Приладобудування. — 2007. — Вип. 33. — С. 29–36.
11. ГОСТ 8.195–89. Государственная поверочная схема для средств измерения спектральной плотности силы излучения и спектральной плотности энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,2–2,5 мкм.

Рекомендована Радою приладобудівного факультету НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
29 вересня 2008 року