

УДК 621.384.3

Л. А. Міхєєнко, В. М. Боровицький

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

СИСТЕМА РАДІОМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ЗОНДУВАЛЬНИХ СИСТЕМ КОСМІЧНОГО БАЗУВАННЯ «МУЛЬТИСФЕРА»

Пропонуються нові підходи, схеми та апаратні рішення для радіометричного калібрування оптико-електронних зондувальних систем космічного базування та для абсолютизації вимірювань енергетичних характеристик. Ці схеми та апаратні рішення використовують джерело випромінювання на основі оптично узгоджених інтегровальних сфер. Така конструкція джерела випромінювання забезпечує вихідну яскравість до $600 \text{ Вт}/(\text{см}^2)$ у динамічному діапазоні 10^6 та нерівномірність яскравості у площині вихідної апертури 0.5 %. Це гарантує високий метрологічний рівень вимірювань з використанням компонентів, доступних в Україні.

ВСТУП

Дистанційне зондування Землі є однією з найперспективніших космічних технологій. Воно дозволяє одержувати різноманітну інформацію про геосферу в різних діапазонах електромагнітного спектру для подальшого науково-прикладного використання. Оптико-електронні зондувальні системи (ОЕЗС) займають значне місце у складі супутникової та авіаційної зондувальної апаратури. Їм відводиться найсуттєвіша роль у вивченні природних ресурсів, попередженні глобальних гідрометеорологічних стихійних явищ, вивченні техногенного впливу на навколишнє середовище тощо [12, 17, 18, 23–25]. Якість та достовірність супутникових досліджень безпосередньо залежить від рівня їхнього метрологічного забезпечення і точності радіометричного калібрування ОЕЗС. Тому розробкою відповідних методів та засобів радіометричного калібрування займається більшість провідних держав світу. Найбільших успіхів у цьому напрямку досягли США, починаючи із систем радіометричного калібрування супутників серії «Landsat» [16, 18, 25], європейські країни, Японія та Росія, де у різний час були створені досить

досконалі калібрувальні системи для радіометричної апаратури супутників «Ресурс», «Фрагмент», «Метеор» та інших [1, 3, 15]. Такі роботи були започатковані в Україні, зокрема для радіометричного калібрування вітчизняних спектродіаметричних систем космічного базування, які встановлені на супутниках «Egypstsat-1», «Січ-2», «Січ-2М», та систем високої роздільної здатності нового покоління [2].

Слід зазначити, що вимірювання енергетичних характеристик та калібрування прецизійних ОЕЗС космічного базування на думку провідних фахівців в цій галузі є однією з найскладніших проблем в оптичній радіометрії. Розроблені до нашого часу системи радіометричного калібрування вже не відповідають сучасним вимогам щодо точності, спектрального діапазону, розмірів апертури вимірювальних випромінювачів, їхньої інтегральної яскравості та діапазону її зміни, однорідності поля яскравості, та деяких інших параметрів [11].

В Україні вирішення цієї проблеми додатково ускладнюється через недосконалість вітчизняної еталонної радіометричної бази, відсутність державних повірочних схем передачі деяких одиниць оптичних величин, фізичне та моральне старіння метрологічного обладнання та елемен-

тів тощо. Можливості сучасних методів та засобів радіометричного калібрування прецизійних спектродіаметричних приладів та систем, зокрема ОЕЗС, значною мірою вичерпані. Це суттєво ускладнює розробку нових перспективних приладів високої і надвисокої роздільної здатності для дистанційного зондування Землі та космічних досліджень.

СУЧАСНІ СИСТЕМИ РАДІОМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ

Основним завданням систем радіометричного калібрування (СРК) є вимірювання:

- функції передачі сигналу (ФПС) — залежності електричного сигналу на виході ОЕЗС до оптичного сигналу на її вході,
- зонної характеристики (ЗХ) — нерівномірності чутливості окремих пікселів багатовіментних приймачів випромінювання, які є основою ОЕЗС, при рівномірному полі яскравості об'єкта,
- спектральної характеристики (СХ),
- темнових та шумових характеристик ОЕЗС, параметрів електронного тракту системи вторинної обробки інформації.

На основі цих вимірювань визначаються інтегральна та спектральна чутливості, динамічний діапазон та нелінійність перетворення сигналу, порогові характеристики і параметри тощо.

Найважливішим етапом радіометричного калібрування є передача одиниці радіометричної величини від еталона до робочих випромінювачів СРК і приймачів ОЕЗС. На цьому етапі відбувається абсолютизація вимірювань характеристик і параметрів ОЕЗС і їхня прив'язка до національних та міжнародних еталонів і повірочних схем. Радіометричне калібрування частково відбувається на стадії виробничих процесів, є обов'язковим при передполітній підготовці. Зараз частіше ставиться питання про калібрування ОЕЗС (або її елементів) і під час експлуатації супутника на орбіті.

Порівняльний аналіз діючих СРК різних країн та методів покращення їхніх метрологічних характеристик показав, що незважаючи на деякі конструктивні та методичні відмінності, сучасні системи радіометричного калібрування викона-

но за схожими структурними схемами [1, 3, 15–17] (рис. 1). Вони включають:

- випромінювачі змінної яскравості (ВЗЯ) у більшості випадків на основі методу зворотних квадратів, для вимірювання ФПС,
- дифузні випромінювачі сталої яскравості на основі інтегрувальної сфери (ІС) для вимірювання ЗХ,
- монохроматичні випромінювачі на базі подвійних монохроматорів з дифракційними ґратками для вимірювання СХ,
- системи передачі одиниць радіометричних величин від еталонів до робочих випромінювачів.

В останніх найчастіше використовуються моделі високотемпературних чорних тіл або стріч-

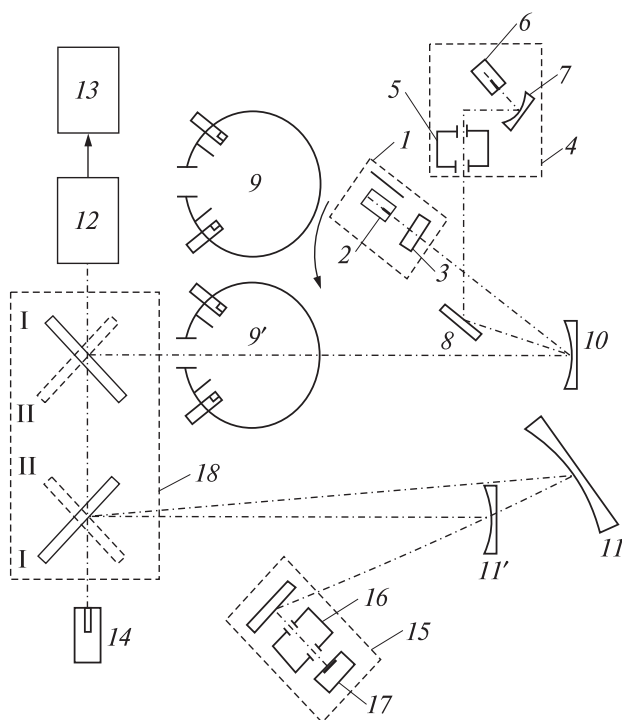


Рис. 1. Узагальнена схема радіометричного калібрування оптико-електронних зондувальних систем: 1 — випромінювач змінної яскравості; 2 — джерело випромінювання; 3 — молочне скло; 4 — спектральний випромінювач; 5 — монохроматор; 6 — джерело випромінювання; 7 — конденсор; 8 — дзеркало; 9, 9' — дифузний випромінювач; 10, 11, 11' — сферичні об'єктиви; 12 — калібрований пристрій; 13 — вимірювальний блок; 14 — еталонне джерело випромінювання; 15 — спектрокомпаратор; 16 — монохроматор; 17 — приймач випромінювання; 18 — блок комутаторів

кові лампи розжарення і проекційні дзеркальні оптичні системи. Радіометричною величиною тут є спектральна густина енергетичної яскравості (СГЕЯ).

До недоліків сучасних СРК слід віднести те, що ФПС через мале поле яскравості випромінювача змінної яскравості вимірюється тільки для невеликої кількості пікселів ОЕЗС, а для решти елементів — визначається екстраполяцією за результатами вимірювання ЗХ. У той же час вимірювання ЗХ через недостатню яскравість дифузного випромінювача здійснюється при рівнях, що не перевищують 20—30 % від максимального необхідного значення. Тобто, проблема полягає у тому, що вимірювання ФПС і ЗХ здійснюється або для невеликої кількості пікселів приймача випромінювання в усьому динамічному діапазоні яскравості, або для всіх пікселів, але тільки на початковій ділянці динамічного діапазону, що знижує точність калібрування.

Абсолютизація вимірювань ФПС і ЗХ зазвичай здійснюється у два етапи:

- на першому одиниця спектральної густини енергетичної яскравості переноситься від еталона до дифузного випромінювача через дзеркальний об'єктив,
- на другому одиниця передається від дифузного випромінювача, який є, таким чином, вторинним еталоном СРК, — до випромінювача змінної яскравості через ОЕЗС, яку калібрують.

Крім зниження точності за рахунок подвійної екстраполяції при вимірюванні ФПС і ЗХ та двоступеневій процедурі абсолютизації вимірювань, така методика не враховує відмінностей спектральних характеристик дифузного випромінювача та випромінювача змінної яскравості. Також не береться до уваги залежність шумових характеристик ОЕЗС від рівня вхідного сигналу.

ВИМОГИ ДО СУЧАСНИХ І ПЕРСПЕКТИВНИХ СИСТЕМ РАДІОМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ

Численні міжнародні дослідження в рамках Плану створення Глобальної системи супутникових спостережень Землі (GEOS), Робочої групи із калібрування та валідації (WGSV) та Комітету із

супутникових досліджень Землі GEOS [17, 22, 23] показали, що:

- інтегральна яскравість об'єктів, що реєструються ОЕЗС, повинна становити 200—300 Вт/ср·м²,
- діапазон зміни яскравості повинен перевищувати 10⁵,
- нерівномірність чутливості лінійки або матриці приймачів ОЕЗС не повинна перевищувати 1—2 %,
- гранична відносна похибка відтворення радіометричної величини має бути меншою, ніж 0.02—0.06.

Відповідні, але вищі метрологічні характеристики та параметри повинні забезпечувати калібрувальна апаратура. Крім того, на базі міжнародного стандарту EMVA 1288 було розроблено і проаналізовано енергетичну модель прецизійної ОЕЗС, що дозволило оцінити потенційні можливості таких систем і потенційні вимоги до СРК. Зокрема було визначено, що:

- максимальна енергетична яскравість калібрувальних випромінювачів повинна перевищувати 600 Вт/ср·м²,
- нерівномірність поля сформованої яскравості має бути меншою, ніж 0.5 %,
- динамічний діапазон зміни яскравості повинен перевищувати 10⁵—10⁶,
- спектральний діапазон випромінювачів повинен становити 0.3—3.0 мкм для ОЕЗС, що працюють у видимій та у ближній інфрачервоній ділянках спектру.

Аналіз відомих СРК, зокрема кращої російської установки «Камелія» [3] та закордонних систем калібрування NASA (США), Європейського космічного агентства, Японського космічного агентства та інших [16], показав, що вони задовольняють наведені вимоги лише на 30—40 %.

Таким чином, для суттєвого підвищення метрологічних характеристик СРК потрібно як вдосконалення методичної та елементної бази радіометричного калібрування сучасних ОЕЗС, так і створення принципово нових методів та засобів вимірювання енергетичних характеристик та радіометричного калібрування ОЕЗС космічного базування високої та надвисокої просторової та енергетичної роздільної здатності.

ДИFUЗНИЙ ВИПРОМІНЮВАЧ ЗМІННОЇ ЯСКРАВОСТІ НА ОСНОВІ ОПТИЧНО УЗГОДЖЕНИХ ІНТЕГРУВАЛЬНИХ СФЕР

Авторами запропоновано принципово новий тип дифузного випромінювача змінної яскравості (ДВЗЯ) на основі оптично узгоджених ІС, який дозволяє значно поліпшити метрологічні характеристики СРК [5, 14]. Конструктивну схему ДВЗЯ показано на рис. 2. Джерела випромінювання 1 розташовані у первинних інтегрувальних сферах 2, а випромінювання від них через набір калібрувальних діафрагм 3, що регулюють його величину, потрапляють у вторинну інтегрувальну сферу 4. У вихідній апертурі 5 вторинної ІС, де встановлюється ОЕЗС 6, формується змінне поле яскравості високої однорідності і з фотометричним тілом, що наближається до ламбертівського.

Основні переваги запропонованого випромінювача такі.

1. Велика кількість джерел випромінювання у первинних ІС дозволяє підвищити світловий потік, що потрапляє у вторинну ІС і тим самим значно збільшити яскравість вихідної апертури ДВЗЯ.

2. Наявність точних калібрувальних діафрагм змінного перерізу дозволяє регулювати вихідну яскравість ДВЗЯ у великому динамічному діапазоні без зміни спектрального складу випромінювання.

3. Відсутність джерел випромінювання, їхньої арматури та інших конструктивних елементів у вторинній ІС значно поліпшує її фотометричні властивості, що сприяє формуванню вихідного поля яскравості вищої однорідності, ніж у традиційних випромінювачів.

4. Змінне за величиною вихідне поле яскравості великої інтенсивності і апертури ДВЗЯ дозволяє одночасно опромінювати всі пікселі ОЕЗС у всьому динамічному діапазоні, тобто вимірювати одночасно ФПС і ЗХ при незмінній конфігурації установки, виключити екстраполяцію результатів і суттєво підвищити точність калібрування ОЕЗС.

5. За рахунок високої однорідності вихідного поля яскравості і ламбертівської форми його фотометричного тіла значно послаблюються вимо-

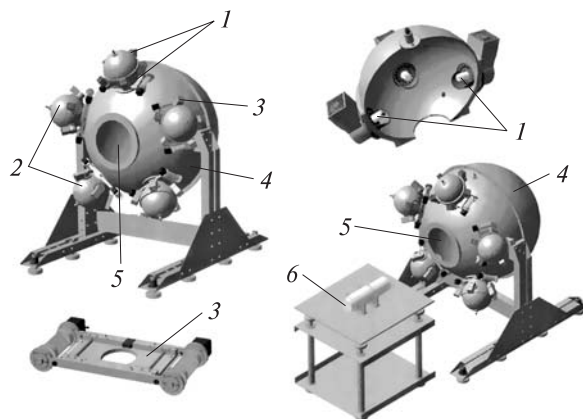


Рис. 2. Конструктивна схема дифузного випромінювача змінної яскравості

ги до точності розміщення ОЕЗС відносно ДВЗЯ і ДВЗЯ відносно спектрокомпаратора і вторинного еталона СГЕЯ. Практично ОЕЗС, що калібрується, може бути розташована безпосередньо у вихідній апертурі ДВЗЯ без додаткової оптичної системи.

6. Покращення фотометричних властивостей вторинної ІС дає змогу використовувати нові непрямі методи переносу одиниць радіометричних величин від еталона до випромінювача, зокрема з використанням еталона світлового потоку та вторинної ІС, що розширює і поліпшує методи абсолютизації вимірювань на установці.

Було розроблено та проаналізовано математичну модель ДВЗЯ [5, 14, 20], побудовану на методі послідовних відбиттів променів та енергетичному обміні випромінювання між первинними та вторинною ІС. Яскравість вихідної апертури ДВЗЯ описується виразом

$$L_v = \frac{N_1 N_{\text{дв}} \Phi_{\text{дв}} A_k}{(\pi D_1 D_2)^2} \cdot \frac{\rho_1}{1 - \rho_1 \left(1 - \frac{A_{k1}}{\pi D_1^2}\right)} \times \frac{\rho_2}{1 - \rho_2 (1 - 0.5 A_k N_1 (1 - \sqrt{1 - (D_B / D_2)^2})}), \quad (1)$$

де N_1 — кількість первинних інтегрувальних сфер, $N_{\text{дв}}$ — кількість джерел випромінювання в кожній ІС, $\Phi_{\text{дв}}$ — енергетичний потік джерела випромінювання, A_k — площа калібрувальної діафрагми, D_1 , D_2 та ρ_1 , ρ_2 — діаметри та

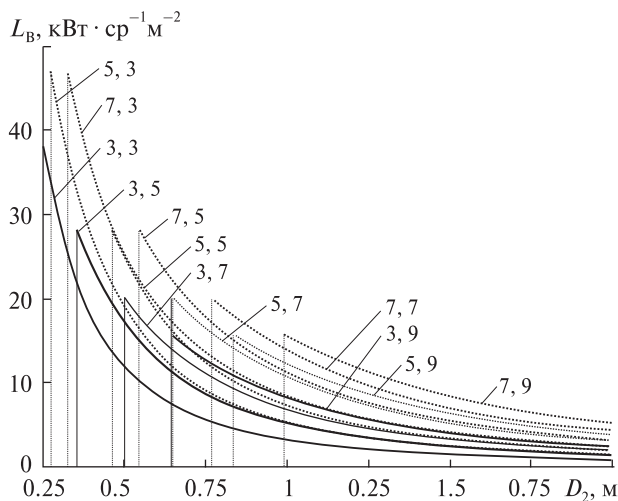


Рис. 3. Графіки залежності вихідної яскравості дифузного випромінювача змінної яскравості від основних конструктивних параметрів. Числа біля кривих — значення $N_1, N_{дв}$ відповідно

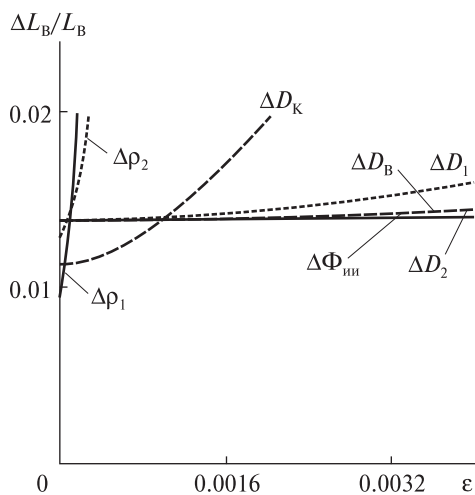


Рис. 4. Графіки залежності сумарної відносної похибки дифузного випромінювача змінної яскравості від первинних похибок ϵ основних конструктивних елементів (згідно з виразом (1))

коефіцієнти відбивання покриттів первинних і вторинної ІС відповідно, D_B — діаметр вихідної апертури.

Додаткова освітленість вторинної ІС, що створюється в результаті енергетичного обміну між первинними та вторинною сферами, описується виразом [21]

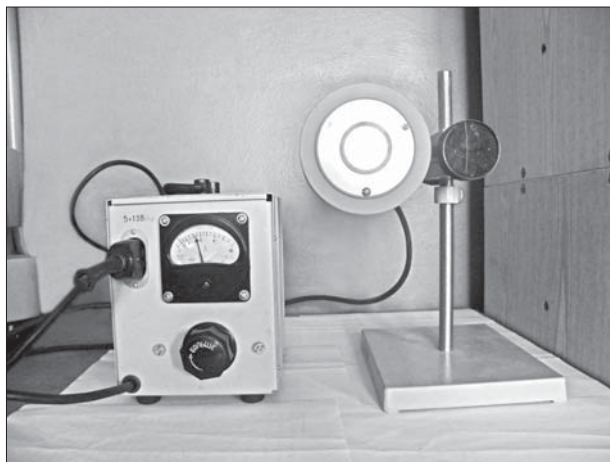


Рис. 5. Вторинний еталон спектральної густини енергетичної яскравості

$$E_{д\sigma}^{(2)} = \frac{\Phi_{дв} A_k^3}{A_1^2 A_2^2} \left(1 - \rho \frac{A_1 - A_k}{A_1}\right)^{-2} \left(1 - \rho \frac{A_2 - A_k - A_B}{A_2}\right)^{-2} \times \left[1 - \left(\frac{A_k^2}{A_1 A_2} \left(1 - \rho \frac{A_1 - A_k}{A_1}\right)^{-1} \left(1 - \rho \frac{A_2 - A_k - A_B}{A_2}\right)^{-1}\right)\right]^{-1},$$

де A_1, A_2 — площі внутрішніх поверхонь первинних та вторинної ІС відповідно.

Для обчислення спектральних характеристик ДВЗЯ у наведених виразах достатньо замінити інтегральні значення $\Phi_{дв}$ на відповідні спектральні залежності.

Графіки залежності вихідної яскравості ДВЗЯ від кількості N_1 первинних ІС, кількості $N_{дв}$ джерел випромінювання в кожній із них, та основних конструктивних розмірів наведено на рис. 3.

Енергетичний аналіз та експериментальне дослідження розробленої моделі ДВЗЯ показали наступне.

1. Його інтегральна яскравість та динамічний діапазон її зміни в 2.5—3.0 рази перевищує яскравість традиційних випромінювачів.

2. Неоднорідність поля яскравості зменшується в 2—3 рази, що достатньо для радіометричного калібрування перспективних ОЕЗС високої і надвисокої просторової й енергетичної роздільної здатності.

3. Спектральний діапазон ДВЗЯ при використанні внутрішніх покриттів на основі політетраф-

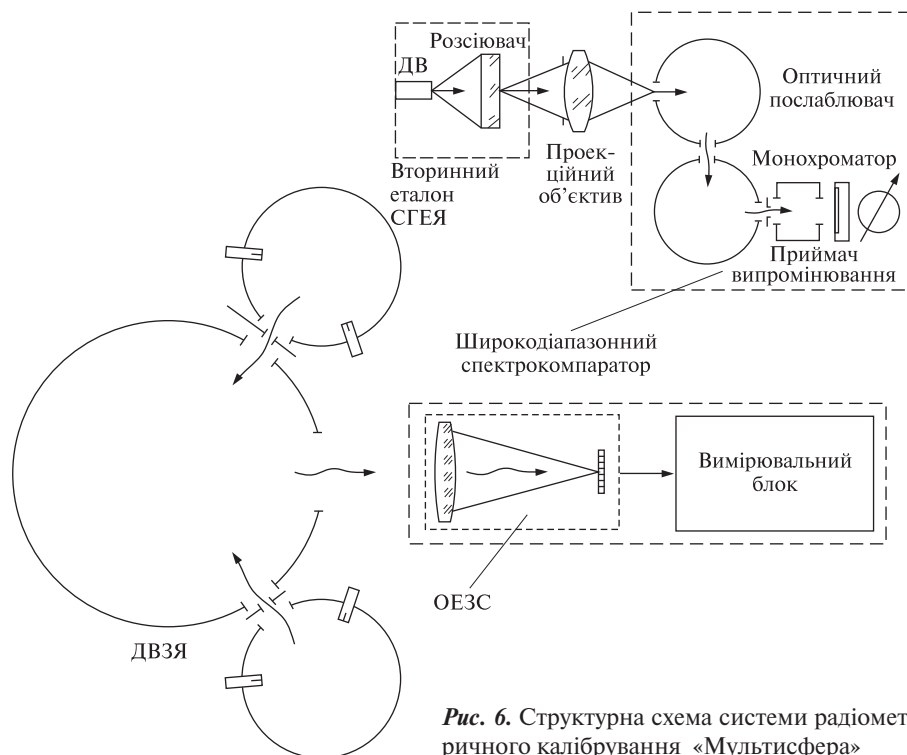


Рис. 6. Структурна схема системи радіометричного калібрування «Мультисфера»

торетилену («Spectralon SRS-44» і «Поліхром-1») складає не менше 0.35—2.20 мкм.

Аналіз похибок ДВЗЯ довів що найбільше впливають на сумарну похибку випромінювача нестабільність покриттів ІС та зміна розмірів калібрувальних діафрагм [10, 19]. Графіки залежності похибок установки вихідної яскравості від первинних похибок основних елементів ДВЗЯ наведено на рис 4. Аналіз умов мінімізації цих похибок показав, що їхнє виконання дозволяє зменшити сумарну похибку встановлення вихідної яскравості ДВЗЯ до 1—2 % навіть при напруженому тепловому режимі первинних ІС.

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ РАДІОМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ

З урахуванням вимог до СРК було виконано огляд та аналіз діючих еталонів, повірочних схем та елементної метрологічної бази України, Росії та держав СНД з метою їхнього вибору для застосування при радіометричному калібруванні вітчизняних ОЕЗС. На жаль, сучасна метрологічна

база України не дозволяє в повній мірі задовольнити вимоги, що висувуються до СРК нового покоління, тому авторами було запропоновано нові методи вирішення цієї проблеми [7].

Зокрема, було розглянуто можливість використання в якості вторинного еталона СГЕЯ галогенної лампи з розсіювачем із молочного скла замість стрічкової лампи, або моделі чорного тіла, які використовуються в СРК Росії, але в Україні не виробляються. На базі розробленої моделі випромінювача з розсіювальним елементом [6] був створений діючий макет такого зразкового випромінювача (рис. 5).

Дифузний випромінювач змінної яскравості на оптично-узгоджених ІС має великий значний динамічний діапазон. Тому процедура прямого компарування його вихідної яскравості чи СГЕЯ із вторинним еталонем дуже складна, бо найбільша точність переносу досягається лише при рівності компарованих величин. Автори запропонували оригінальний широкодіапазонний спектрокомпаратор на базі двох оптично узгоджених ІС із змінною діафрагмою між ними [9,

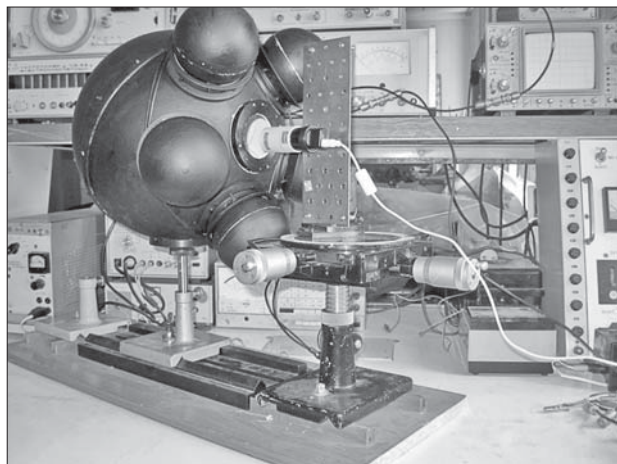


Рис. 7. Макетна установка системи радіометричного калібрування «Мультисфера»

Основні характеристики і параметри СРК «Мультисфера»

Спектральний діапазон	0.4—2.20 мкм
Діаметр вихідної апертури дифузного випромінювача	0.25 м
Максимальна інтегральна яскравість апертури дифузного випромінювача	600 Вт·ср ⁻¹ ·м ⁻²
Динамічний діапазон зміни вихідної яскравості	10 ⁶
Відтворюваний діапазон спектральної густини енергетичної яскравості	(0.05—700) Вт·ср ⁻¹ ·м ⁻² ·мкм ⁻¹
Нерівномірність яскравості вихідної апертури дифузного випромінювача	0.5 %

13]. Схему цього спектрокомпаратора показано на рис. 6.

На базі теорії ДВЗЯ було розроблено математичну модель, методи розрахунку і рекомендації щодо підбору основних елементів цього компаратора. Теоретично і експериментально було показано:

- сумарна похибка компарування не перевищує 0.2 % в динамічному діапазоні послаблення не меншому, ніж 10⁴,
- спектральний діапазон при використанні покриттів типу «Spectralon» чи «Поліхром-1» становить 0.35—2.20 мкм.

Важливо, що запропонований спектрокомпаратор не потребує точного розміщення проєкції випромінюючої площадки каліброваного випромінювача відносно вхідної апертури ІС та вхідної щілини монохроматора відносно її вихідної апертури.

З використанням розроблених елементів на основі ГОСТ 8.195-89 та ДСТУ 3193-95 було розроблено схему переносу одиниці СГЕЯ від первинного еталона до ДВЗЯ з кінцевою відносною похибкою 0.02—0.03, що достатньо для радіометричного калібрування сучасних і перспективних ОЕЗС з високою роздільною енергетичною здатністю.

СИСТЕМА РАДІОМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ «МУЛЬТИСФЕРА»

На основі виконаних досліджень авторами було запропоновано принципово нову СРК «Мультисфера» [4, 8], структурна схема та фотографія якої показана на рис. 6, 7. Крім ДВЗЯ, вона включає систему передачі одиниці СГЕЯ від вторинного еталона на базі галогенної лампи з розсіювачем та широкодіапазонний спектрокомпаратор з використанням послаблювача на основі оптично узгоджених ІС. ОЕЗС та спектрокомпаратор послідовно встановлюються перед вихідною апертурою ДВЗЯ. Основні характеристики і параметри прогнозованої СРК «Мультисфера» наведено в таблиці.

ВИСНОВКИ

Отримані в роботі результати становлять наукову основу для розробки і удосконалення систем радіометричного калібрування прецизійних ОЕЗС космічного базування з високою енергетичною і просторовою роздільною здатністю та значним динамічним діапазоном реєстрованої яскравості об'єктів.

1. Аванесов Г. А., Богданов А. А., Наумов А. П. Методика и аппаратура радиометрической градуировки в абсолютных энергетических единицах многозональной сканирующей системы «Фрагмент» // Исслед. Земли из космоса. — 1981. — № 6. — С. 79—88.
2. 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.
3. Киселёв И. А., Коростелев А. И., Нараева М. К. и др. Контроль энергетических характеристик многозональных сканирующих устройств ИСЗ «Ресурс-01» // Исслед. Земли из космоса. — 1991. — № 2. — С. 34—43.
 4. Михеенко Л. А. Проблемы и перспективы энергетической калибровки оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли высокого и сверхвысокого разрешения // Приладобудування 2011: стан і перспективи: тези доп. (міжнар. наук.-техн. конф., 19—20 квітня 2011 р.). — К., 2011. — С. 73—74.
 5. Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н. Излучатель переменной яркости на основе сопряженных интегрирующих сфер // Технология и конструирование радиоэлектронной аппаратуры. — 2006. — № 6 (66). — С. 61—64.
 6. Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н. Вторичный эталон яркости на базе галогенной лампы накаливания // Технология и конструирование радиоэлектронной аппаратуры. — 2008. — № 3 (75). — С. 61—64.
 7. Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н. Метрологическое обеспечение радиометрической калибровки оптико-электронных устройств дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія. — 2009. — **15**, № 5. — С. 3—15.
 8. Михеенко Л. А. Енергетичне калібрування оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі високої роздільної здатності // Приладобудування 2009: стан і перспективи: тези доп. (міжнар. наук.-техн. конф., 28 — 29 квітня 2009 р.). — К., 2009. — С. 42.
 9. Михеенко Л. А., Білінська І. Ю. Широкодіапазонний спектрокомпаратор // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Приладобудування. — 2009. — Вип. 38. — С. 30—38.
 10. Михеенко Л. А., Гордієнко Ю. О. Метрологічний аналіз дифузного випромінювача змінної яскравості на основі спряжених інтегровальних сфер // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2009. — № 5. — С. 88—95.
 11. Панфилов А. С., Бурдакин А. А., Иванов В. С. и др. Работы ВНИИОФИ в области метрологического обеспечения радиометрической калибровки и полетного контроля стабильности оптической аппаратуры наблюдения Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. статей. — 2007. — **1**, вып. 6. — С. 288—294.
 12. Панфилов А. С., Саприцкий В. И. Глобальная система наблюдения Земли и обеспечение единства измерений при её реализации // Измерит. техника. — 2005. — № 4. — С. 71—72.
 13. Пат. на корисну модель 52547 Україна, МПК G01J 1/02. Фотометричний ослаблювач / Л. А. Михеенко, І. Ю. Білінська. — № u201003426; Заявл.24.03.2010; Опубл.25.08.2010, Бюл. № 16.
 14. Пат. на корисну модель 58152 Україна, МПК G01J 1/10 602В 21/06. Випромінювач змінної яскравості на основі сполучених інтегровальних сфер / Л. А. Михеенко, Ю. О. Гордієнко. — № u201007694; Заявл.18.06.2010; Опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7.
 15. Тыннисон Т. А., Граф Р. Э., Мяртин Л. О. Поверочная установка «Спектр» для метрологической аттестации аэрокосмической радиометрической аппаратуры в диапазоне длин волн 0.3 — 2.5 мкм // Дистанционное зондирование атмосферы с борта орбитального комплекса «Салют-7» — «Космос-1686» — «Союз-Т14». — Тарту, 1989. — С. 54—66.
 16. Butler J. J., Brown S. W., Sauders R. D., Jonson B. C. Radiometric Measurement Comparison on the Integratny Sphere Source Used to Calibrate the Moderate Resolution Imaginy Spectroradiometer (MODIS) and the “Landsat 7” Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) // J. Res. Nat. Inst. Stand. and Tehnology. — 2003. — **108**, N 3. — P. 199—208.
 17. Global Earth Observation System GEOSS. 10-Year Implementation Plan. GEO 1000. — 2005. — 27 p.
 18. Mendenhall J. A., Lencioni D. E., Evans J. B. Spectral and radiometric calibration of the advanced land imager // Lincoln lab. J. — 2005. — N 2. — P. 207 — 223.
 19. Mikheenko L. A. Metrological advantages of the light source based on optically connected integration // Proc. SPIE. — 2012. — **8511**. — P. 39.1—39.12.
 20. Mikheenko L. A., Borovytsky V. N. Precise uniform light source based on optically connected integration spheres for optical instrument calibration // Proc. SPIE. — 2011. — **8154**. — P. 19.1—19.9.
 21. Mikheenko L. A., Borovytsky V. N. Energetic balance in the precise uniform light source based on optically connected integration spheres // Proc. SPIE. — 2013. — **8866**. — P. 8866IV.1 — 8866IV.12.
 22. Miura T., Huete A., Yoshioka R. Evaluation of sensor calibration uncertainties on vegetation indices for MODIS // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. — 2000. — **38**, N 3. — P. 1399 — 1409.
 23. Ohring G., Wielicki B., Spencer R., et al. Satellite Instrument Calibration for Measuring Global Climate Change // NIST Publ. — 2004. — N 7047. — 108 p.
 24. Suzuki N., Narimatsu Y., Nagura N., et al. Large integrating sphere of prelaunch calibration system for Japanese earth resources satellite optical sensors // Proc. SPIE. — 1991. — **1493**. — P. 48—57.
 25. Walker J. H., Cromer C. L. A technique for improving the calibration of large-area sphere sources // Proc. SPIE. — 1991. — **1493**. — P. 224—230.

Стаття надійшла до редакції 18.08.14

Л. А. Михеенко, В. М. Боровицкий

**СИСТЕМА РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ
ПРЕЦИЗИОННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ
ЗОНДИРУЮЩИХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО
БАЗИРОВАНИЯ «МУЛЬТИСФЕРА»**

Предлагаются новые подходы, схемы и аппаратные решения для радиометрической калибровки оптико-электронных зондирующих систем космического базирования и для абсолютизации измерений энергетических характеристик. Эти схемы и аппаратные решения используют источник излучения на основе оптически сопряженных интегрирующих сфер. Такая конструкция источника излучения обеспечивает выходную яркость до $600 \text{ Вт}/(\text{ст}\cdot\text{м}^2)$ в динамическом диапазоне 10^6 и неравномерность яркости в плоскости выходной апертуры 0.5 %. Это гарантирует высокий метрологический уровень измерений с использованием компонентов, доступных в Украине.

L. A. Mikheenko, V. N. Borovytskyi

**“MULTISPHERE” SYSTEM OF RADIOMETRIC
CALIBRATION OF PRECISE SPACE BORNE
OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS
FOR REMOTE SENSING**

We propose new procedures, schemes and apparatus for the calibration of precise electro-optical instruments for remote sensing and for the absolutization of measurements of energetic characteristics. The procedures and schemes apply the light source based on optically-interconnected integrating spheres. For typical light source design the output radiance is up to $600 \text{ W}/(\text{st}\cdot\text{m}^2)$ with dynamic range 1 000 000 and non-uniformity of the radiance throughout the output aperture is 0.5 %. That guarantees a high metrological level of the measurements using the components available in Ukraine.