

УДК 528.7:629.78

Л.А. Міхеєнко, В.А. Шишкін

## ДИFUЗНИЙ ВИПРОМІНЮВАЧ ЗМІННОЇ ЯСКРАВОСТІ ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ ЦИФРОВИХ ВІДЕОСИСТЕМ

### Вступ

Останнім часом спостерігається швидкий розвиток прецизійних цифрових відеосистем із багатоелементними приймачами випромінювання — цифрових фотоапаратів, веб-камер, камер для оптичної мікроскопії, астрономії і найбільш досконалих цього типу систем, тобто багатоспектральних скануючих пристроїв космічного базування [1, 2]. Однак подальше вдосконалення таких систем значною мірою стримується недостатнім рівнем методів і засобів вимірювання їх енергетичних характеристик. Хоч в цей час розроблено досить довершені методи і установки для вимірювання енергетичних характеристик серійних багатоелементних приймачів випромінювання, їх використання для калібрування перспективних цифрових відеосистем високого амплітудного і просторового розділення, що розробляються зараз, натрапляє на ряд серйозних труднощів. При цьому основними проблемами, на думку фахівців, є труднощі одержання змінного за величиною поля яскравості з високою інтенсивністю і однорідністю в межах значної апертури, недостатній динамічний діапазон вимірювання яскравості, складність і низька точність абсолютизації вимірювань [1–3].

### Постановка задачі

Метою даної статті є розробка нового методу вимірювання енергетичних характеристик і калібрування прецизійних цифрових відеосистем на базі запропонованого дифузного випромінювача змінної яскравості, що дає змогу розв'язати задачу вдосконалення прецизійних цифрових відеосистем нового покоління, і в першу чергу — багатоспектральних скануючих пристроїв космічного базування, які зараз розробляються в Україні.

### Загальна концепція вимірювання енергетичних характеристик цифрових відеосистем

Звичайно при енергетичному калібруванні цифрових відеосистем розв'язуються такі задачі [3, 4]:

- вимірювання відносної функції передачі сигналу (ФПС) — залежності вихідного сигналу цифрової відеосистеми від величини освітленості вхідної апертури або яскравості тест-об'єкта;
- вимірювання зонної характеристики (ЗХ) — відносної нерівномірності чутливості пікселів багатоелементного приймача випромінювання при рівномірній освітленості вхідної апертури або проекції тест-об'єкта з рівною скривою випромінювальною площадкою;
- вимірювання темногового сигналу і шумів багатоелементного приймача;
- абсолютизація вимірювань ФПС (а в окремих випадках і ЗХ) через передачу одиниці яскравості від еталона до робочих випромінювачів вимірювальної установки.

При цьому установки для вимірювання перелічених характеристик багатоспектральних скануючих пристроїв повинні задовольняти такі вимоги [3, 4]:

- робота в спектральному діапазоні 0,4–1,8 мкм і більше;
- забезпечення освітлення вхідної апертури цифрової відеосистеми в межах 0,05–0,2 м з нерівномірністю менше, ніж 0,1–0,5 %;
- зміна яскравості випромінювача, що калібрує в динамічному діапазоні  $10^3$ – $10^4$  при величині максимальної яскравості не менше  $600 \text{ Вт}/(\text{см} \cdot \text{м}^2)$ ;
- забезпечення високої повторюваності результатів вимірювань із середньоквадратичною похибкою не більше 7 % та абсолютизація вимірювань через передачу одиниці яскравості від еталона з похибкою не більше 3–5 %.

Для вимірювання ФПС у відомих установках використовується випромінювач змінної яскравості (рис. 1, а), побудований, як правило, за схемою обернених квадратів [3, 4]. Але через незначну апертуру поля яскравості, сформованого такими випромінювачами, вимірювання ФПС здійснюється тільки для кількох пікселів, а дані для інших елементів матриці знаходяться екстраполяцією за результатами вимірювань зонної характеристики. Додамо, що динамічний діапазон відомих випромінювачів змінної яскравості становить  $10^2$ – $10^3$ , а його подальше

збільшення пов'язане із значним ростом габаритів і, звичайно, не реалізується.

Для вимірювання ЗХ звичайно використовується дифузний випромінювач на основі інтегруючих сфер (рис. 1, б), який забезпечує рівномірну освітленість всіх пікселів багатоелементного приймача, але його яскравість навіть у кращих установках не перевищує 20–30 % від максимально необхідної [4]. Тому ЗХ для верхніх значень динамічного діапазону знаходяться екстраполяцією даних вимірювань ФПС. Інакше кажучи, вимірювання ФПС і ЗХ здійснюється практично або для невеликої кількості пікселів, або для малої початкової ділянки динамічного діапазону.

Абсолютизація вимірювань звичайно виконується переносом одиниці спектральної щільності енергетичної яскравості (СЩЕЯ) від ета-

лонного випромінювача до дифузного через об'єкти, що їх сполучає, і компаратор (рис. 1, в), а від дифузного випромінювача до випромінювача змінної яскравості – через цифрову відеосистему, яку калібрують. У такий спосіб дифузний випромінювач виконує роль вторинного еталона установки, а калібрування випромінювача здійснюється паралельно і в два етапи.

### Проблеми калібрування прецизійних цифрових відеосистем

Описана вище традиційна методика вимірювання енергетичних характеристик прецизійних цифрових відеосистем, крім очевидної громіздкості, зниження точності через подвійну екстраполяцію (при вимірюванні ФПС і ЗХ) і двоступінчасту процедуру абсолютизації вимірювань, має ще один істотний недолік, який практично виключає можливість її використання для калібрування цифрової відеосистеми високого амплітудного розділення. Розглянемо це питання докладніше, скориставшись графіками на рис. 2.

Якщо два суміжних пікселя цифрової відеосистеми (1 і 2) мають різні світлові характеристики  $R = f(E)$ , де  $R$  – реакція пікселя, а  $E$  – величина його освітленості, то контраст  $V$  елементарного зображення (електронного і візуального), сформованого цими двома пікселями  $K = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max} + R_{\min}}$ , почне зміню-

ватись залежно від рівня освітленості і буде різним у різних точках динамічного діапазону, навіть якщо освітленість всього поля зору буде рівномірною. Виникне мерехтіння зображення, еквівалентне дії шуму. Очевидно також, що часто застосовувана електронна корекція чутливості пікселів за даними вимірювань ЗХ тільки в одній точці динамічного діапазону істотного ефекту не дасть.

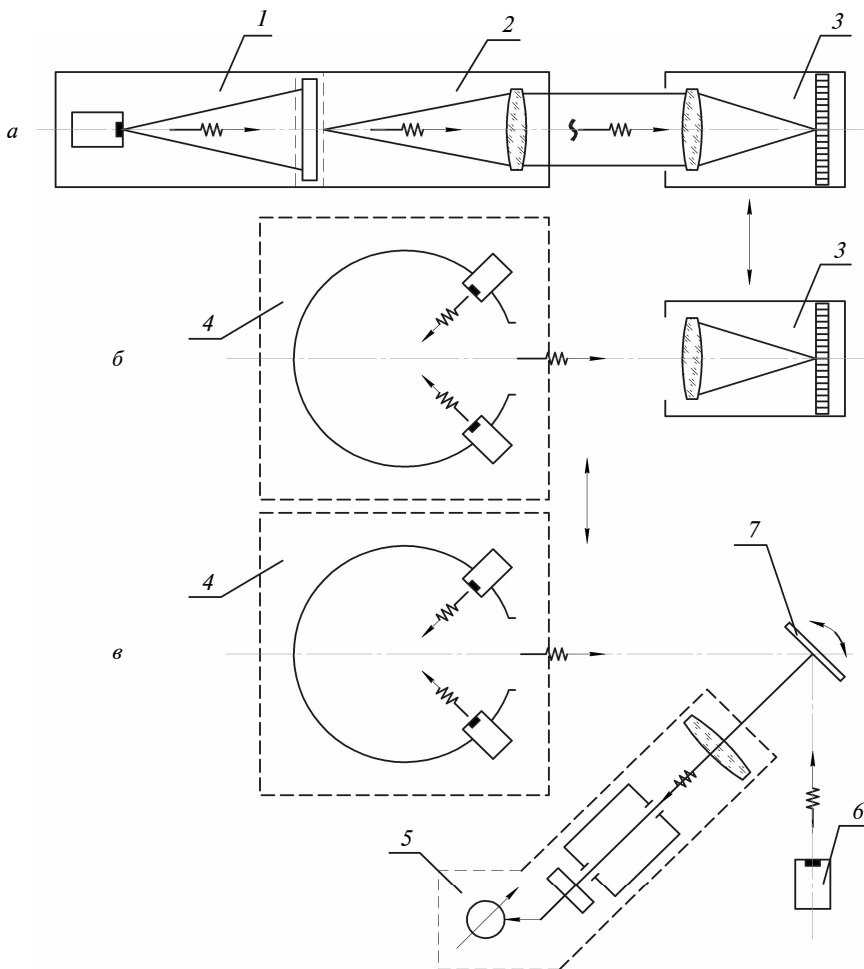


Рис. 1. Структурні схеми вимірювання енергетичних характеристик цифрової відеосистеми: а – функції передачі сигналу; б – зонної характеристики; в – калібрування; 1 – випромінювач змінної яскравості; 2 – коліматор; 3 – цифрова відеосистема; 4 – дифузний випромінювач; 5 – компаратор; 6 – еталонний випромінювач; 7 – комутатор

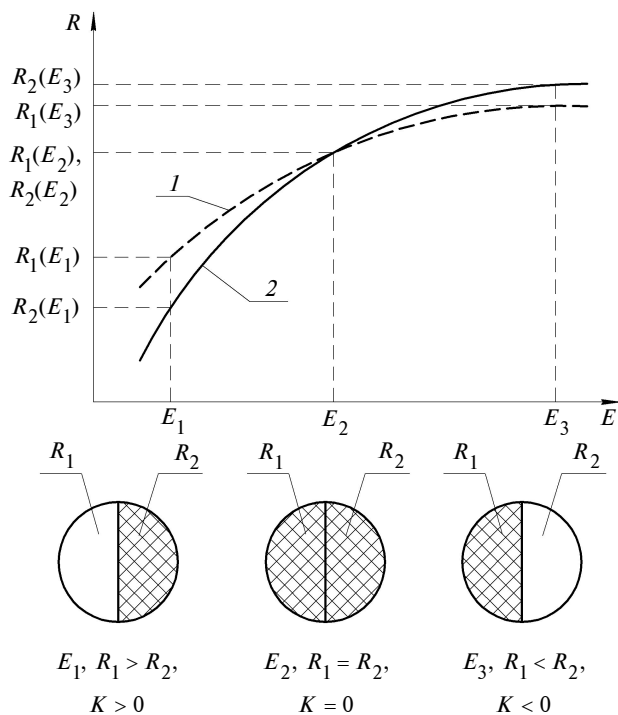


Рис. 2. Зміна контрасту елементарного зображення при розходженні світлових характеристик суміжних пікселів цифрової відеосистеми: 1, 2 – світлові характеристики пікселів 1 і 2, відповідно;  $K = \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2}$

Треба, однак, зазначити, що використання розглянутої методики – вимушена міра, викликана відсутністю випромінювачів, які дають можливість створювати змінне поле яскравості одночасно у великому динамічному діапазоні і для великих апертур при незмінному спектральному складі випромінювання.

**Методика калібрування з використанням дифузного випромінювача змінної яскравості**

Авторами запропонована нова методика калібрування цифрової відеосистеми високого амплітудного розділення, вільна від перелічених вище недоліків. Схему установки, яка реалізує цю методику, показано на рис. 3. Її основу становить оригінальний дифузний випромінювач змінної яскравості на базі оптично сполучених інтегруючих сфер [5].

Як видно з рис. 3, джерела випромінювання 2 розміщені в первинних інтегруючих сферах 1, а потік, що надходить у вторинну інтегруючу сферу 4, регулюється набором калібрувальних діафрагм 3 змінних отворів. У вихідній апертурі 5 вторинної сфери формується од-

норідне змінне поле яскравості з фотометричним тілом, яке наближається до фотометричного тіла ламбертівського випромінювача. Це дає змогу розміщати цифрову калібровану відеосистему безпосередньо у вихідній апертурі дифузного випромінювача змінної яскравості без застосування додаткової оптичної з'єднувальної системи.

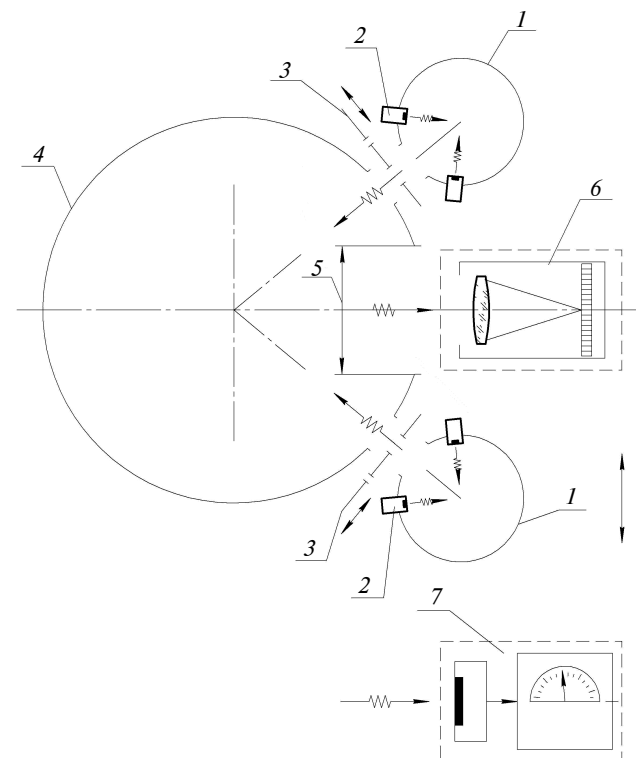


Рис. 3. Структурна схема перспективної установки для енергетичного калібрування цифрової відеосистеми: 1 – первинна інтегруюча сфера; 2 – джерело випромінювання; 3 – калібрувальна діафрагма; 4 – вторинна інтегруюча сфера; 5 – вихідна апертура; 6 – цифрова відеосистема; 7 – яскравимір

Основні переваги запропонованої методики такі:

- одночасно висвітлюються всі пікселі багатоелементного приймача у всьому динамічному діапазоні вимірюваної яскравості;
- за рахунок використання великої кількості джерел випромінювання в первинних сферах істотно підвищується рівень максимально відтворюваної яскравості і значно розширюється динамічний діапазон;
- винесенням джерел випромінювання із вторинної інтегруючої сфери, що безпосередньо формує вихідне поле яскравості, істотно поліпшуються її інтегруючі характеристики та

підвищується рівномірність яскравості в межах вихідної апертури;

- при установці цифрової каліброваної відеосистеми безпосередньо у вихідній апертурі дифузного випромінювача змінної яскравості відпадає необхідність застосування погоджувальної і колімуючої оптики, а вимоги до точного позиціонування цифрової відеосистеми щодо випромінювача значно знижуються;

- істотно спрощується процедура і підвищується точність абсолютизації вимірювань, оскільки для калібрування дифузного випромінювача змінної яскравості можуть бути використані яскравиміри, встановлені за аналогією з попереднім пунктом у вихідній апертурі випромінювача без точного позиціонування і застосування погоджувальної оптики.

### Проектування дифузного випромінювача змінної яскравості

Досить повна теорія дифузного випромінювача на базі інтегруючої сфери розглядалася в [6, 7], а його експериментальне дослідження обговорювалось у [8]. Тут наводяться тільки основні розрахункові співвідношення, що дають можливість визначити основні параметри дифузного випромінювача змінної яскравості за заданими характеристиками цифрової каліброваної відеосистеми.

Вважаючи вихідну апертуру дифузного випромінювача змінної яскравості ламбертівським випромінювачем, яскравість  $L_B$  розраховуємо за формулою [5]

$$L_B = \frac{N_1 N_{д.в} \Phi_{д.в} \rho_1 \rho_2}{\pi^3 d_1^2 d_2^2 \left(1 - \rho_1 \frac{\pi d_1^2 - A_{12}}{\pi d_1^2}\right)} \times \left[ \frac{1}{1 - \rho_2 \frac{\pi d_2^2 - N_1 A_{12} - \frac{\pi}{2} d_2^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d_D}{d_2}\right)^2}\right)}{\pi d_2^2}} \right], \quad (1)$$

де  $N_1$  – кількість первинних випромінюючих сфер;  $N_{д.в}$  – кількість джерел випромінювання у первинній сфері;  $\Phi_{д.в}$  – потік випромінювання, створюваний одним джерелом;  $\rho_1, \rho_2$  – інтегральні коефіцієнти відбиття первинних і

вторинної інтегруючих сфер, відповідно;  $d_1, d_2$  – діаметри первинних і вторинної інтегруючих сфер, відповідно;  $A_{12}$  – сумарна площа калібрувальних діафрагм між первинними і вторинною інтегруючими сферами;  $d_D$  – діаметр вихідної апертури.

При конструюванні дифузного випромінювача змінної яскравості можна користуватися відповідними напівемпіричними співвідношеннями.

1. Діаметр вихідної апертури має бути на 15–20 % більшим діаметра вхідної зони цифрової каліброваної відеосистеми [3, 5].

2. Діаметри первинних і вторинної інтегруючих сфер вибираються з умови, що збільшення діаметра сфери при незмінному діаметрі вихідної апертури поліпшує інтегруючі властивості випромінювача, а зменшення – збільшує випромінюваний потік. Найчастіше береться

співвідношення  $\frac{d_D}{d} = \frac{1}{5}$  [3, 5], однак для первинних випромінювачів, які меншою мірою впливають на вихідне яскравісне поле, але від яких потрібна більша випромінювана потужність, це співвідношення можна збільшити до  $\frac{1}{4} - \frac{1}{3}$  [7]. Із цих же співвідношень вибирається і максимальний діаметр калібрувальних діафрагм.

3. Кількість первинних випромінюючих сфер, потужність і кількість джерел випромінювання в них визначається необхідною яскравістю вихідної апертури (1), але при цьому слід враховувати, що використання менше трьох випромінюючих сфер погіршує рівномірність яскравісного поля, а більше семи – помітно ускладнює конструкцію. Оптимальним треба вважати використання трьох–п'яти випромінювачів.

4. Кількість джерел випромінювання в первинній сфері визначається коефіцієнтом заповнення  $K$ , який у дифузному випромінювачі змінної яскравості середніх розмірів (від 0,25 до 1,5 м) набуває значень 0,015–0,025 шт/мм. Для кращого змішування потоків їх кількість має бути непарною. Найбільш раціональною кількістю джерел випромінювання є 5–9 для значень  $D$  від 0,1 до 0,25 м [7].

Спектральна характеристика дифузного випромінювача змінної яскравості  $L_B(\lambda)$  залежить від спектра джерел випромінювання і спектральних характеристик покриттів інтег-

руючих сфер  $\rho_1(\lambda)$  і  $\rho_2(\lambda)$ . У першому наближенні маємо

$$L_B(\lambda) = \frac{N_1 N_{д.в} \Phi_{д.в} \dot{\Phi}_{д.в}(\lambda) \rho_1 \rho_2 \dot{\rho}_1(\lambda) \dot{\rho}_2(\lambda)}{\pi A_1 A_2 \left(1 - \rho_1 \dot{\rho}_1(\lambda) \frac{A_1 - A_{12}}{A_1}\right)} \times \frac{1}{\left(1 - \rho_2 \dot{\rho}_2(\lambda) \frac{A_2 - N_1 A_{12} - A_D}{A_2}\right)}, \quad (2)$$

де  $\dot{\Phi}_{д.в}(\lambda)$ ,  $\dot{\rho}_1(\lambda)$ ,  $\dot{\rho}_2(\lambda)$  – відносні спектральні характеристики джерел випромінювання і покриттів первинних та вторинної інтегруючих сфер;  $A_1, A_2$  – площі їх внутрішніх поверхонь.

Із врахуванням зазначених вище вимог до випромінювача (максимальна яскравість не менше  $600 \text{ Вт}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2)$ ) і робота у спектральному діапазоні не вужче  $0,4\text{--}1,8 \text{ мкм}$  найбільш доцільними випромінювачами для дифузного випромінювача змінної яскравості можна вважати малогабаритні галогенні лампи (КГМ 12-100, КГМ 24-150, КГМ 30-300, КГМ 36-400). У свою чергу, малогабаритні галогенні лампи використовуються у відомих дифузних випромінювачах на базі інтегруючої сфери (CrownTech, Bentham, ElectroOptical Ind, Gigahertz-Optik, International Light Tech, LabSphere, Optronic Lab, OPTRONIK-LabSphere, SphereOptics, а також у випромінювачах вітчизняних установок типу "Камелія", "Спектр", установках науково-дослідного підприємства "Конекс" та ін.).

Як перспективні джерела випромінювання, особливо для вимірювання енергетичних характеристик фотоапаратів та веб-камер у дифузному випромінювачі змінної яскравості, можуть використовуватись і світлодіоди високої потужності типу LuxDrive 7007-PWC-10-3  $\Phi_V = 540 \text{ лм}$ ,  $W \times H \times L = 21 \times 20 \times 4 \text{ мм}$ , який нині є одним із найпотужніших світлодіодів. Але слід відзначити, що в такому випадку максимальна яскравість випромінювача знижується за розрахунками запропонованої конструкції випромінювача з  $965 \text{ Вт}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2)$  при КГМ 30-300-2 до  $68 \text{ Вт}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2)$  при LuxDrive 7007-PWC-10-3, а спектральний діапазон обмежується до  $0,42\text{--}0,77 \text{ мкм}$ .

Однак у майбутньому матимемо те, що їх позитивною характеристикою буде низьке

тепловиділення, малі габарити та зручна для дифузного випромінювача змінної яскравості індикатриса яскравості. Невисока стабільність і значно менший порівняно з галогенними лампами потік випромінювання унеможливило б їх використання як основного джерела при проведенні вимірювань, які потребують значної оптичної потужності, а саме у випадку калібрування цифрових відеосистем космічного базування. У майбутньому з покращенням метрологічних характеристик їх застосування буде доцільним.

Як покриття можна запропонувати або традиційні матеріали на основі  $\text{BaSO}_4$  і  $\text{MgO}$ , або більш якісні, але дефіцитніші на основі політетрафторетилену [10]. В останньому випадку можна забезпечити випромінювання у спектральному діапазоні від ближньої УФ- до ближньої ІЧ-ділянок спектра. Спектральні характеристики покриттів і розраховані з їх використанням спектральні характеристики дифузного випромінювача змінної яскравості показано на рис. 4.

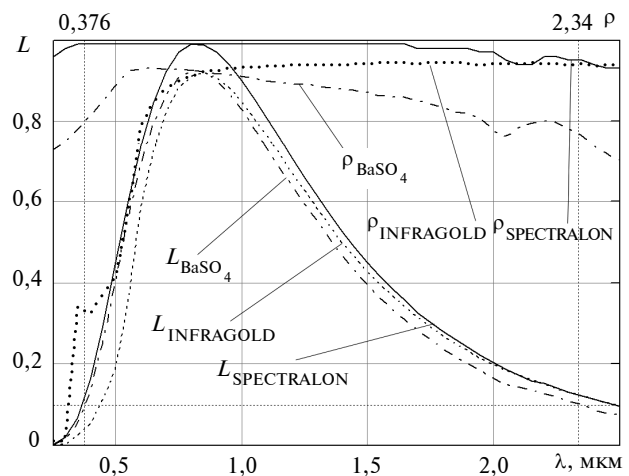


Рис. 4. Спектральні характеристики дифузного випромінювача змінної яскравості з різними покриттями

На рис. 5 наведено графіки залежності вихідної яскравості дифузного випромінювача змінної яскравості від його конструктивних параметрів.

Макетування і експериментальні дослідження дифузного випромінювача змінної яскравості з розмірами вторинної сфери  $0,5 \text{ м}$  повністю підтвердили отримані раніше розрахункові параметри (див. рис. 5). При цьому обмірювана нерівномірність поля яскравості не перевищувала  $0,1\%$  у всіх випадках.

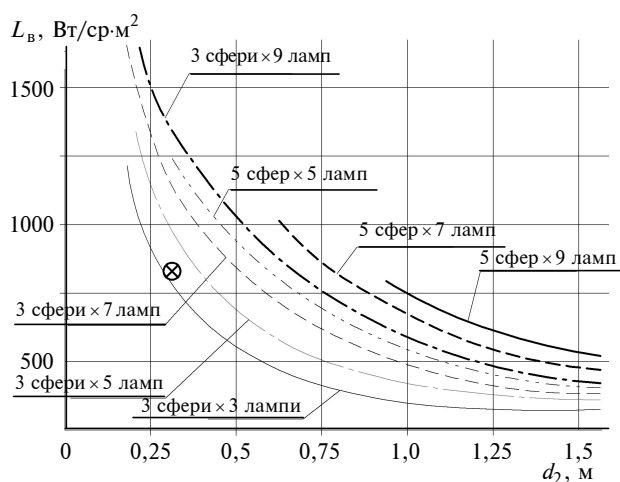


Рис. 5. Залежність яскравості вихідної апертури від конструктивних параметрів дифузного випромінювача змінної яскравості; ⊗ – експериментальні дані

Дослідження проводилися за методикою і на установці, описаній у [8], а для абсолютних вимірювань яскравості використовувався яскравовимір ТЕС-0693 фірми “Тензор” [11]. Похибка вимірювань не перевищувала 7%.

## Висновки

Запропонована і обґрунтована методика енергетичного калібрування цифрових відеосистем високої роздільної здатності за метрологічними характеристиками значно перевищує існуючі аналоги.

Синтезовані напівемпіричні співвідношення конструктивних параметрів сфери забезпечують оптимальне інтегрування потоку з достатнім рівнем рівномірності та максимальної вихідної яскравості випромінювача.

Розглянуто можливі варіанти покриття внутрішньої поверхні випромінювача та надано спектральні характеристики випромінювача з різним типом покриття і проаналізовано можливі варіанти використання джерел випромінювання та обґрунтовано використання саме малогабаритних галогенних ламп у даному випромінювачі.

В подальшому буде розглянуто питання точності запропонованої установки та результатів її використання при калібруванні цифрових мікроскопів.

Л.А. Михеенко, В.А. Шишкин

ДИФФУЗНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОЙ ЯРКОСТИ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ЦИФРОВЫХ ВИДЕОСИСТЕМ

Предложена новая схема измерения энергетических характеристик и калибровки прецизионных цифровых видеосистем (ЦВС) на базе оригинального диффузного излучателя переменной яркости, который обеспечивает лучшие метрологические характеристики калибровки нового поколения ЦВС высокого разрешения, а именно ЦВС космического базирования. Рассмотрены типы покрытий внутренней поверхности излучателя.

L.A. Mikheyenko, V.A. Shyshkin

DIFFUSE LIGHT SOURCE WITH VARIABLE RADIANCE FOR CALIBRATION OF PRECISE DIGITAL VIDEO SYSTEMS

This study provides insights into a new scheme for measuring radiant characteristics and calibration of precise digital video systems, based on the original diffuse light source with variable radiance. This source provides better metrological characteristics of the calibration of new generation of digital space-based video systems of high definition. We also analyze the types of the inner surface coating of the source. Different variants of light sources were reviewed and just miniature tungsten halogen lamps were validated for an appliance in these irradiator.

1. Горелов В.А., Лукашевич Е.Л., Стрельцов В.А. Состояние и тенденции развития космических средств дистанционного зондирования высокого разрешения // ГИС-ассоциация. Информационный бюллетень. – № 1 (38). – С. 6–10; № 2 (39). – С. 44–45.
2. Hand W.G. A practical guide to digital microscopy // Photonics Spectra. – 2001. – N 11. – P. 100–104.
3. Вариченко Л.В., Колобродов В.Г., Ладыка Я.Е. и др. Методы и средства измерения энергетических харак-

- теристик оптико-электронных систем космического зондирования Земли // Космічна наука і технологія. – 2006. – 12, № 2/3. – С. 59–69.
4. Киселев И.А., Коростылев 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.

5. *Михеенко Л.А., Боровицкий В.Н.* Излучатель переменной яркости на основе сопряженных интегрирующих сфер // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* – 2006. – № 6 (66). – С. 61–64.
6. *Сахновский М.Ю., Гуминский С.Г., Кравцов В.Е.* Об особенностях измерения потока излучения светодиодов с помощью фотометрического шара // *Оптика и спектроскопия.* – 1965. – XVIII, вып. 3. – С. 486–494.
7. *Михеенко Л.А., Боровицкий В.Н.* Осветительный канал цифрового оптического микроскопа на базе диффузного излучателя // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* – 2006. – № 1(61). – С. 20–27.
8. *Михеенко Л.А., Боровицкий В.Н., Гордиенко Ю.А.* Экспериментальные исследования диффузного излучателя на основе интегрирующей сферы // *Вісн. НТУУ "КПІ". Сер. Приладобудування.* – 2007. – Вип. 34. – С. 60–68.
9. *Лампы накаливания галогенные: Каталог продукции.* – М.: Информэлектро, 1988.
10. *Weidner, Hisia J.J.* Reflection properties of press polite-trafluorethylene powder // *J. Opt. Soc. Of Amer.* – 1981. – 71. – P. 856–861.
11. *Столяревская Р.И.* Методы исследования метрологических характеристик. Приборы для измерения световых величин // *Светотехника.* – 1988. – № 6. – С. 21–26.

Рекомендована Радою  
приладобудівного факультету  
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції  
5 листопада 2008 року