

СИСТЕМА ОПТИЧЕСКИ-СОПРЯЖЕННЫХ ИНТЕГРИРУЮЩИХ СФЕР И ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ ЧАСТЬ 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, МЕТРОЛОГИЯ

В статье произведен энергетический и метрологический анализ фотометрических систем на основе оптически-сопряженных интегрирующих сфер на примере диффузного излучателя переменной яркости. Проанализирована зависимость выходной яркости фотометрической системы от основных ее параметров и установлены способы повышения энергетических характеристик. Получены аналитические выражения, описывающие погрешность установки выходной яркости и предложены меры по их уменьшению.

Ключевые слова: фотометрические приборы, интегрирующие сферы.

L. A. MIKHEENKO, M. S. MAMUTA

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

SYSTEM OF OPTICALLY CONNECTED INTEGRATION SPHERES AND PHOTOMETRIC DEVICES ON ITS BASIS PART 2. ENERGETIC ANALYSIS AND METROLOGY

Energetic and metrological analysis of photometric devices with optically connected integration spheres is realized in the article. Dependence of output radiance of photometric devices from its constructive parameters is analyzed. Methods for improvement energetic characteristics are determined. Analytical expressions for output radiance errors are found and proposed measures for their reduction.

Keywords: photometric devices, integration spheres.

Введение

В настоящее время в прецизионной фотометрии все чаще используются приборы на основе оптически-сопряженных интегрирующих сфер (ИС), – диффузные излучатели переменной яркости (ДИПЯ), оптические ослабители, фотометры, компараторы и др. В части первой настоящей работы [1] была рассмотрена обобщенная математическая модель таких устройств и получены аналитические выражения, описывающие их работу. В этой части основное внимание уделено энергетическому и метрологическому анализу фотометрических систем на основе оптически-сопряженных интегрирующих сфер (СОСИС) и разработке основ их проектирования. При этом рассмотрение ведется на примере одного из самых сложных устройств – ДИПЯ, однако полученные результаты будут справедливы (с соответствующей коррекцией) и для других устройств рассматриваемого класса фотометрических приборов.

Конструктивная схема и особенности ДИПЯ

Диффузные излучатели переменной яркости могут использоваться для измерения энергетических характеристик и радиометрической калибровки прецизионных фотометрических приборов и цифровых видеосистем с многоэлементными приемниками излучения и широкоапертурной оптикой [2].

Конструктивная схема ДИПЯ показана на рис. 1.

Как видно из рис. 1, источники излучения 1 расположены в первичных интегрирующих сферах 2, а поток, поступающий из них во вторичную интегрирующую сферу 3, регулируется набором калибровочных диафрагм 4 переменного сечения. В выходной апертуре 5 вторичной сферы формируется однородное, переменное по величине яркостное поле, с фотометрическим телом, приближающимся к фотометрическому телу ламбертовского излучателя.

Основные преимущества ДИПЯ:

1. Излучатель позволяет получать переменное по величине однородное яркостное поле в пределах значительной выходной апертуры. При этом изменение выходной яркости происходит без изменения спектрального состава излучения.

2. За счет использования большого числа источников излучения в первичных сферах и значительного числа калибровочных диафрагм, выполненных с высокой точностью, существенно расширяется диапазон воспроизводимых яркостей (особенно в сторону больших значений) и повышается точность их установки при неизменном спектральном составе излучения.

3. Вынесением источников излучения из вторичной интегрирующей сферы, которая непосредственно формирует выходное яркостное поле, достигается более благоприятная интегрирующая и антибликовая обстановка, что существенно улучшает равномерность распределения яркости в пределах выходной апертуры.

4. Так как калибруемые фотометрические приборы устанавливаются непосредственно в выходной апертуре излучателя, отпадает необходимость применения согласующей и коллимирующей оптики, а требование к точному позиционированию калибруемых приборов относительно установки практически отпадает.

5. Существенно упрощается процедура и повышается точность абсолютизации измерений, так как

для калибровки излучателя и переноса единицы яркости могут использоваться яркомеры, устанавливаемые непосредственно в выходной апертуре без точного позиционирования и применения согласующей оптики.

Энергетический анализ ДИПЯ

При энергетическом анализе ДИПЯ и других фотометрических систем на основе оптически-сопряженных интегрирующих сфер необходимо учитывать:

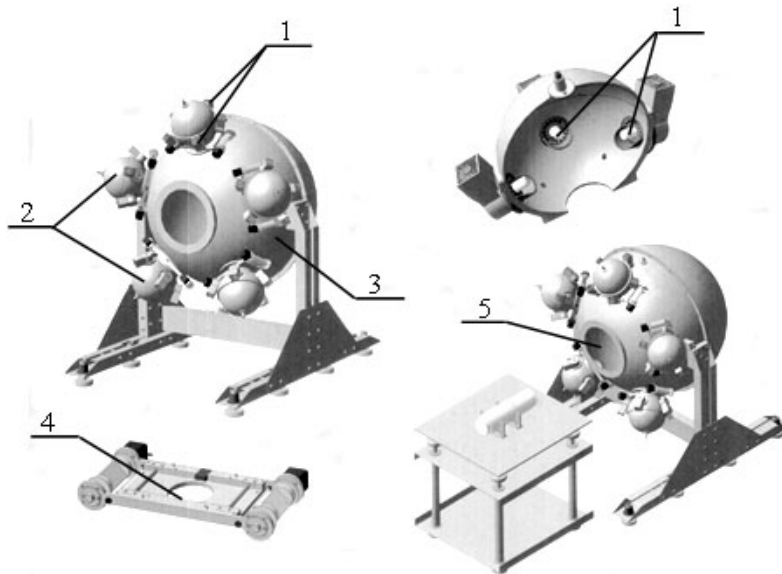


Рис. 1. Конструктивная схема ДИПЯ

а) задача является многопараметрической, причем связь между параметрами является сложной и часто косвенной;

б) часть параметров ДИПЯ (коэффициент яркости и спектральная характеристика покрытия; расположение и конструктивные особенности источников излучения, их арматура и методы установки и т.д.) не имеют аналитического выражения;

в) большинство параметров имеют схематехнические и конструктивные ограничения, которые сложно непосредственно учесть в аналитических выражениях.

В связи с этим, для энергетического анализа ДИПЯ был использован численно-

аналитический метод, при котором часть зависимостей устанавливалась расчетами, часть конструктивной проработкой и схематехническим моделированием, а часть получена аналитически.

В качестве исходного принималось выражение для L_B , полученное в [1]:

$$L_B = \frac{N_1 N_{\text{ш}} \Phi_{\text{ш}} A_K}{\pi (\pi D_1 D_2)^2} \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{\left(1 - \rho_1 \frac{\pi D_1^2 - A_{K1}}{\pi D_1^2}\right) \left[1 - \rho_2 \frac{\pi D_2^2 - A_K N_1 \frac{\pi}{2} D_2^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D_B}{D_2}\right)^2}\right)}{\pi D_2^2}\right]} \quad (1)$$

При численном анализе энергетических характеристик ДИПЯ использовались следующие, оправданные конструктивными соображениями и применением в аналогичных системах, параметры:

1. Относительное отверстие ДИПЯ (геометрический фактор) $G = \frac{D_0}{D_2}$, где D_0 – диаметр эквивалентного отверстия во вторичной сфере, площадь которого A_0 равна сумме площади выходной апертуры и всех калибровочных диафрагм: $A_0 = A_B + A_{K\Sigma}$.

При анализе величина G принималась равной $\frac{1}{3}, \frac{1}{3.5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4.5}, \frac{1}{5}$. Среднее значение $G = \frac{1}{4}$.

2. Энергетический параметр излучателя P , равный отношению суммарной площади калибровочных диафрагм к площади выходной апертуры: $P = \frac{A_{K\Sigma}}{A_B}$.

Значения P при анализе – 0.1, 0.5, 1, среднее значение $P = 0.5$.

3. Количество первичных излучателей $N_1 = 3, 5, 7, 9$. Среднее значение при анализе $N_1 = 5$.

4. Относительное отверстие первичного излучателя G_1 , равное отношению максимального диаметра калибровочной диафрагмы $D_{K \max}$ к диаметру первичной интегрирующей сферы D_1 ($G_1 = \frac{D_{K \max}}{D_1}$). В расчетах G_1 принималось равным $\frac{1}{2.5}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3.5}$ со средним значением $G_1 = \frac{1}{3}$.

5. Коэффициент заполнения источников излучения первичной сферы Q ($Q = \frac{N_{ин}}{D_1}$).

Использовались значения $Q = 10, 20, 30 \frac{1}{м}$, при среднем значении $Q = 20 \frac{1}{м}$.

6. Величина потока, излучаемого одним источником излучения принималась равной 100 Вт (галогенная лампа КГМ – 30 – 300 – 2 [3]).

7. Покрытие первичной и вторичной интегрирующих сфер – сернокислый барий, “Spectralon” и “Infragold” со значениями интегрального коэффициента отражения $\rho = 0.927, 0.99$ и 0.911 соответственно [4-7].

8. Диаметр выходной апертуры D_B принимался равным 0.25 м.

В результате анализа определялось значение яркости выходной апертуры ДИПЯ L_B или другой промежуточной характеристики, при изменении перечисленных параметров в указанных пределах. При этом в каждом конкретном расчете изменялся один из параметров, а остальным присваивались средние значения. Результаты численного анализа представлены на рис. 2-7.

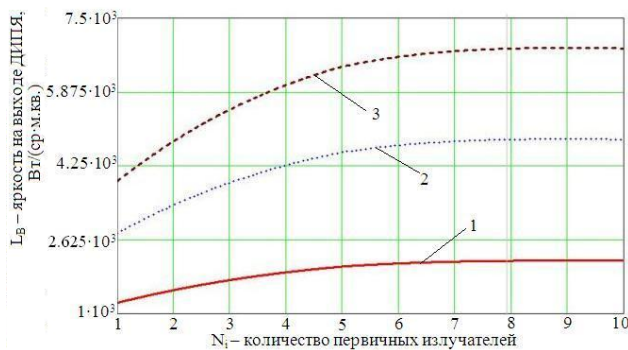


Рис. 2. Графики зависимости выходной яркости ДИПЯ L_B от

количества первичных излучателей N_i :

- 1 – зависимость $L(N_i)$ для $P = 0,1$;
- 2 – зависимость $L(N_i)$ для $P = 0,5$;
- 3 – зависимость $L(N_i)$ для $P = 1$

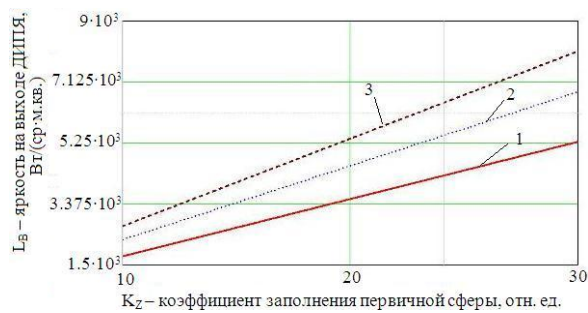


Рис. 3. Графики зависимости выходной яркости ДИПЯ L_B

от коэффициента заполнения Q :

- 1 – зависимость $L(Q)$ для 3-х первичных излучателей; 2 –
- зависимость $L(Q)$ для 5-ти первичных излучателей; 3 –
- зависимость $L(Q)$ для 7-ми первичных излучателей

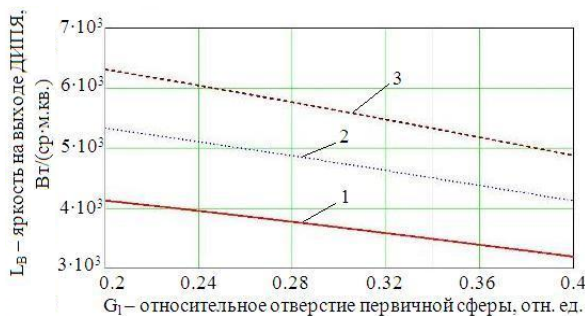


Рис. 4. Графики зависимости выходной яркости ДИПЯ L_B от

относительного отверстия первичного излучателя G_1 :

- 1 – зависимость $L(G_1)$ для 3-х первичных излучателей; 2 –
- зависимость $L(G_1)$ для 5-ти первичных излучателей;
- 3 – зависимость $L(G_1)$ для 7-ми первичных излучателей

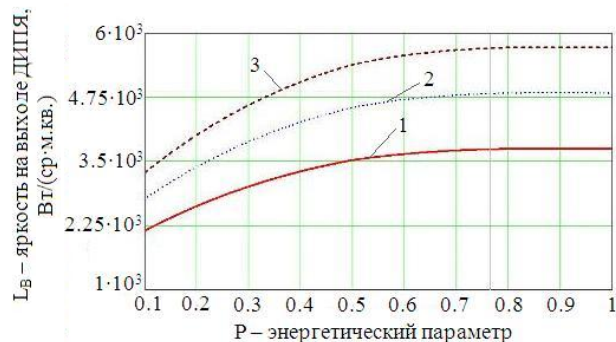


Рис. 5. Графики зависимости выходной яркости ДИПЯ L_B от

энергетического параметра P :

- 1 – зависимость $L(P)$ для 3-х первичных излучателей;
- 2 – зависимость $L(P)$ для 5-ти первичных излучателей;
- 3 – зависимость $L(P)$ для 7-ми первичных излучателей

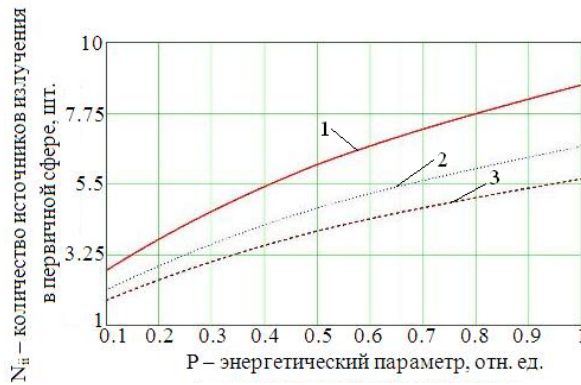


Рис. 6. Графики зависимости количества источников излучения в первичной сфере от энергетического параметра P :

- 1 – зависимость $N_{ii}(P)$ для 3-х первичных излучателей;
- 2 – зависимость $N_{ii}(P)$ для 5-ти первичных излучателей;
- 3 – зависимость $N_{ii}(P)$ для 7-ми первичных излучателей



Рис. 7. Графики зависимости выходной яркости ДИПЯ L_B от коэффициента отражения покрытия интегрирующих сфер

ρ и энергетического параметра P :

- 1 – зависимость $L(\rho)$ для $P = 0,1$;
- 2 – зависимость $L(\rho)$ для $P = 0,5$;
- 3 – зависимость $L(\rho)$ для $P = 1$

Проведенный анализ показал:

1. Увеличение числа первичных излучателей (N_1) более эффективно для повышения выходной яркости ДИПЯ, чем увеличение количества источников излучения в них при малом значении N_1 .
2. Существует оптимальное соотношение размеров калибровочной диафрагмы и выходной апертуры ДИПЯ (энергетический параметр P), при котором яркость ДИПЯ максимальна. Значение P составляет при этом 0.55 ... 0.85.
3. Увеличение относительного отверстия первичного излучателя (G_1) целесообразно до значений $1/3 \dots 1/3.5$ при большом значении N_1 ($N_1 \geq 3$). Дальнейшее увеличение G_1 ведет к виньетированию калибровочной диафрагмы входным отверстием вторичной сферы. При малом N_1 ($N_1 < 3$) этот эффект проявляется намного раньше и с ростом D_1 происходит монотонное изменение яркости ДИПЯ.
4. Наиболее эффективной мерой повышения яркости ДИПЯ является использование высокоотражающих покрытий с $\rho > 0.98$.

3 Метрологический анализ ДИПЯ

Основные погрешности формирования яркостного поля в выходной апертуре ДИПЯ связаны с деградацией отражающих покрытий (ρ_1 и ρ_2), флуктуациями потока источников излучения ($\Phi_{ии}$) из-за нестабильности напряжения питания, температурными колебаниями размеров конструктивных элементов (D_1, D_2, D_K, D_B), изменением характеристик среды внутри интегрирующих сфер и рядом других факторов. При этом отметим, что часть погрешностей ДИПЯ, по сравнению с другими СОСИС, будут влиять на суммарную погрешность в большей, а часть в меньшей степени. В частности, из-за более напряженного теплового режима первичных излучателей, более высокие требования будут предъявляться к конструктивным элементам первичной ИС, и, особенно, к калибрующей диафрагме. Вместе с тем, погрешности вторичной ИС, освобожденной от источников излучения и их арматуры, будут сказываться в значительно меньшей степени. Проанализируем эти вопросы более подробно.

Если считать, что ДИПЯ находится в установившемся энергетическом режиме, а факторы, влияющие на яркость выходной апертуры, являются статистически независимыми, то погрешность установки выходной яркости ΔL_B , обусловленная частными погрешностями $\Delta \Phi_{ии}$, $\Delta \rho_1$, $\Delta \rho_2$, ΔD_1 , ΔD_2 , ΔD_K и ΔD_B в первом приближении описывается выражением [8]:

$$\frac{\Delta L_B}{L_B} = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \Phi_{ии}}\right)^2 \left(\frac{\Delta \Phi_{ии}}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \rho_1}\right)^2 \left(\frac{\Delta \rho_1}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \rho_2}\right)^2 \left(\frac{\Delta \rho_2}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_1}\right)^2 \left(\frac{\Delta D_1}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_2}\right)^2 \left(\frac{\Delta D_2}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_K}\right)^2 \left(\frac{\Delta D_K}{\bar{L}_B}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_B}\right)^2 \left(\frac{\Delta D_B}{\bar{L}_B}\right)^2} \quad (2)$$

где $\frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \Phi_{ин}}, \frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \rho_1}, \frac{\partial \bar{L}_B}{\partial \rho_2}, \frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_1}, \frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_2}, \frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_K}, \frac{\partial \bar{L}_B}{\partial D_B}$ – частные производные относительных первичных

погрешностей или их коэффициенты влияния на суммарную погрешность.

Формулы для расчета соответствующих коэффициентов влияния, полученные из (2) приведены в табл. 1.

При численном анализе суммарной погрешности установки яркости выходной апертуры были использованы параметры ДИПЯ, рассчитанного для энергетической калибровки оптико-электронной зондирующей системы украинско-египетского спутника Земли “Egypsat-1” [2], а именно $\Phi_{ин} = 100$ Вт, $D_1 = 0.25$ м, $D_2 = 1$ м, $D_{K\max} = 0.05$ м, $D_B = 0.2$ м, $N_1 = 3$, $N_{ин} = 5$. Покрытие интегрирующих сфер – Spectralon SRS-99 с коэффициентом отражения $\rho_1, \rho_2 = 0.99$.

Соответствующие числовые значения коэффициентов влияния, для указанных значений параметров представлены в табл. 1, а рассчитанные по (2) зависимости погрешности установки яркости выходной апертуры $\frac{\Delta L_B}{L_B}$ от первичных погрешностей $\Delta \Phi_{ин}$, $\Delta \rho_1$, $\Delta \rho_2$, ΔD_1 , ΔD_2 , ΔD_K и ΔD_B показаны на рис. 8.

Отметим, что наибольший вклад в суммарную погрешность ДИПЯ вносят нестабильности покрытий ИС, а изменение их геометрических параметров менее существенно, что значительно упрощает конструирование излучателя. Это характерно и для других типов СОСИС.

Проанализируем основные погрешности более детально.

Нестабильность внутреннего покрытия ИС обусловлена различными факторами – деградацией материала, его гигроскопичностью, запыленностью и т. д.. Для каждого вида покрытий эти факторы проявляются в различной степени, но для большинства традиционных, используемых в отечественном приборостроении (BaSO₄, MgO, Al и др.) суммарная нестабильность превышает 0.05 % в час [4, 9-10]. Существенно лучшими характеристиками обладают новые материалы на основе политетрафторэтилена [5, 6]. Например, изменение коэффициента отражения покрытия Spectralon SRS-99 [7] может обеспечить стабильность характеристик излучателя с погрешностью менее 0.01 %. К тому же, такие покрытия надежно работают при большом перепаде температур, что особенно важно для первичных интегрирующих сфер.

Таблица 1

Коэффициенты влияния первичных погрешностей ДИПЯ

Источник погрешности	Коэффициент влияния первичной погрешности	Числовое значение коэф. влияния
1	2	3
Нестабильность источника излучения $\Delta \Phi_{ин}$	$\frac{\partial L_B}{\partial \Phi_{ин}} = \frac{N_1 N_{ин} \rho_1 \rho_2 A_K}{\pi \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot \left[1 - \rho_1 \frac{A_1 - A_K}{A_1} \right] \cdot \left[1 - \rho_2 \frac{A_2 - N_1 A_K - A_B}{A_2} \right]}$	34.2 ср ⁻¹ ·м ⁻²
Нестабильность внутреннего покрытия $\Delta \rho_1$	$\frac{\partial L_B}{\partial \rho_1} = \frac{N_1 N_{ин} \Phi_{ин} \rho_2 A_K A_1}{\pi \cdot (A_1 - \rho_1 A_1 + \rho_1 A_K)^2 \cdot (A_2 - \rho_2 A_2 + \rho_2 N_1 A_K + \rho_2 A_B)}$	1.74·105 Вт/(ср·м ²)
Нестабильность внутреннего покрытия $\Delta \rho_2$	$\frac{\partial L_B}{\partial \rho_2} = \frac{N_1 N_{ин} \Phi_{ин} \rho_1 A_K A_1}{\pi \cdot (A_1 - \rho_1 A_1 + \rho_1 A_K) \cdot (A_2 - \rho_2 A_2 + \rho_2 N_1 A_K + \rho_2 A_B)^2}$	1.6·105 Вт/(ср·м ²)
Изменение диаметра первичной сферы ΔD_1	$\frac{\partial L_B}{\partial D_1} = 8 \cdot \frac{N_1 N_{ин} \Phi_{ин} \rho_1 \rho_2 A_K D_1 (\rho_1 - 1)}{(\pi \cdot D_1^2 (\rho_1 - 1) - \rho_1 A_K)^2 \cdot (4 A_2 - 4 \rho_2 A_2 + 4 \rho_2 N_1 A_K + 4 \rho_2 A_B)^2}$	-8.86·103 Вт/ [(ср·м ²)·м]
Изменение диаметра вторичной сферы ΔD_2	$\frac{\partial L_B}{\partial D_2} = -8 \cdot \frac{N_1 N_{ин} \Phi_{ин} \rho_1 \rho_2 A_K D_2 (\rho_1 - 1)}{(A_1 (\rho_1 - 1) - \rho_1 A_K) \cdot (\pi D_1^2 (\rho_1 - 1) - 4 \rho_2 (N_1 A_K + A_B))^2}$	-1.8·103 Вт/ [(ср·м ²)·м]

1	2	3
Нестабильность размеров калибровочной диафрагмы ΔD_K	$\frac{\partial L_B}{\partial D_K} = -8 \cdot N_1 N_{ин} \Phi_{ин} \rho_1 \rho_2 D_K \times$ $\times \frac{[16 \cdot A_1 A_2 (\rho_2 + \rho_1 - \rho_1 \rho_2 - 1) + 16 A_1 A_B \rho_2 (\rho_1 - 1) + \pi^2 D_K^4 \rho_1 \rho_2 N_1]}{(4 A_1 - 4 \rho_1 A_1 + \pi \rho_1 D_K^2)^2 \cdot (4 A_2 - 4 \rho_2 A_2 + \pi \rho_2 N_1 D_K^2 + 4 \rho_2 A_B)^2}$	$5.72 \cdot 10^4$ Вт/ [(ср·м ²)·м]
Нестабильность диаметра выходной апертуры ΔD_B	$\frac{\partial L_B}{\partial D_B} = - \frac{1}{2 \cdot [A_1 - \rho_1 (A_1 - A_2)] \cdot \sqrt{1 - (D_B/D_2)^2}} \times$ $\times \frac{N_1 N_{ин} \Phi_{ин} \rho_1 \rho_2^2 A_K D_B}{\left[A_K - \rho_2 \cdot \left[A_2 - N_1 A_K - 1/2 \pi D_2^2 \left(1 - \sqrt{1 - (D_B/D_2)^2} \right) \right] \right]^2}$	$-1.6 \cdot 10^4$ Вт/ [(ср·м ²)·м]

Нестабильность питания источников излучения приводит к изменению как величины излучаемого потока, так и его спектрального состава. Погрешность установки яркости, вызванной этими изменениями может быть определена по формулам [11]:

$$\frac{\Delta L_B}{L_B} = \frac{\Phi_{ин}(\lambda, T) \pm \Phi_{ин}(\lambda + \Delta\lambda, T + \Delta T)}{\Phi_{ин}(\lambda, T)}, \quad \Delta\lambda = \frac{2897}{T} - \frac{2897}{T \left[1 \pm \dot{U} \right]^{16.2}}, \quad (3)$$

где $\Phi_{ин}(\lambda, T)$ – изменение потока излучения, обусловленное колебаниями питающего напряжения; $\Delta\lambda$ – смещение максимума спектральной характеристики.

Числовые значения этих погрешностей, полученных для различной величины пульсации питающего напряжения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Погрешности источников излучения, вызванные нестабильностью источников питания

Нестабильность питающего напряжения $\pm \dot{U} \cdot 100\%$	Смещение максимума СПЭЯ $\pm \Delta\lambda$, нм	Изменение яркости $\pm \Delta L_{ин} / L_{ин}$, %
1	8.1	3.1
0.1	0.8	0.32
0.01	0.08	0.032

Отметим, что приведенная величина $\Delta L_{ин} / L_{ин}$ относится к анализу источника излучения.

Эффективным методом уменьшения рассмотренных погрешностей, кроме применения высокостабильных источников напряжения, является отдельно-групповое подключение источников излучения к электрически-развязанным блокам питания. Например, питание источников излучения ДИПЯ с 15 галогенными лампами группами по 5 ламп от трех блоков питания уменьшает погрешность установки выходной яркости в 1.7 раза.

Изменение параметров конструктивных элементов ДИПЯ при правильном выборе материала и рациональной конструкции интегрирующей сферы может быть доведена до долей процента, даже при весьма жестком температурном режиме первичного излучателя. В табл. 3 приведены рассчитанные по коэффициентам линейного температурного расширения отклонения размеров интегрирующих сфер и калибровочных диафрагм для различных материалов и температурных режимов.

Очевидно, что для пассивных СОСИС перечисленные температурные погрешности будут не столь существенны.

Асферичность и аналогичные погрешности формы интегрирующих сфер мало влияют на изменение выходной яркости, носят систематический характер и могут быть учтены при калибровке ДИПЯ.

На рис. 9 показаны зависимости установки выходной яркости от первичных погрешностей основных элементов ДИПЯ с учетом их реальных величин, полученных выше. При этом были использованы максимальные значения. Однако, даже и в этом случае максимальная погрешность установки яркости не превышает 0.1 %, что достаточно для калибровки даже перспективных прецизионных фотометрических систем.

Учитывая, что ДИПЯ работает в значительном диапазоне яркости ($10^4 - 10^6$) представляет интерес зависимость погрешности установки яркости от ее абсолютной величины. В табл. 4 приведены численные значения суммарной погрешности установки выходной яркости в разных точках динамического диапазона

ДИПЯ при первичных погрешностях основных элементов на уровне 0.1 %, рассчитанных с использованием выражений, приведенных в табл. 3.

Таблица 3

Температурные отклонения параметров конструктивных элементов ДИПЯ

	Материал	Нагрев Δt , °C	Начальное знач. парам.	Рассчетное отклонение парам., %
Первичная сфера	Дюралюминий	100	$D_1 = 0.25$ м	0.22
	Латунь			0.19
	Сталь			0.10
Вторичная сфера	Полистирол	50	$D_2 = 1$ м	0.40
	Фторопласт			0.12
	Дюралюминий			0.11
Калибровочная диафрагма	Латунь	100	$D_K = 0.05$ м	0.19
	Сталь			0.10
	Инвар (36.1%)			0.009

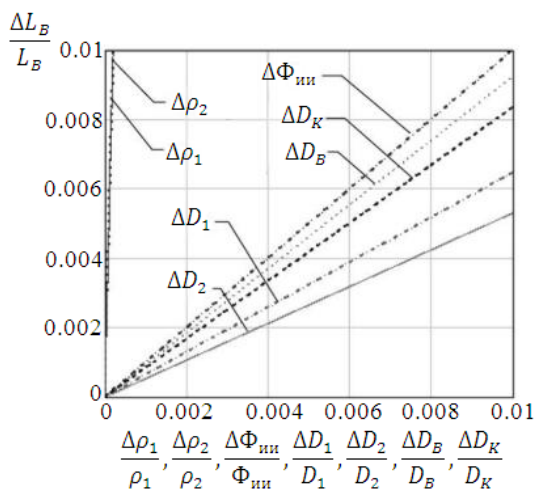


Рис. 8. Графики зависимости суммарной погрешности установки выходной яркости ДИПЯ от погрешности основных элементов

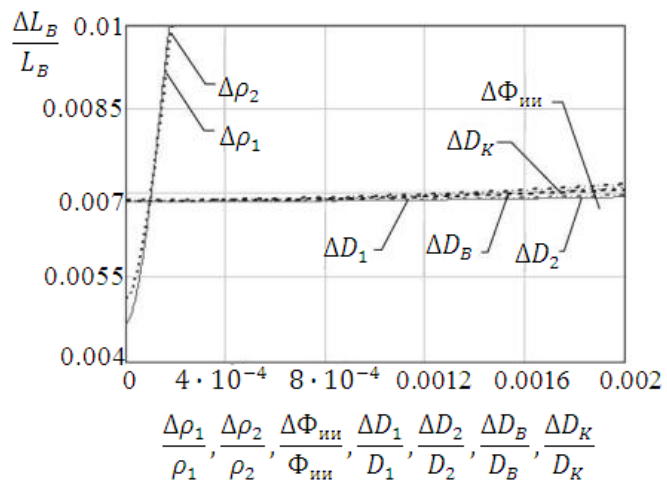


Рис. 9. Графики зависимости установки выходной яркости ДИПЯ от первичных погрешностей основных элементов при $D_K = 0.05$ м, $\Phi_{ини} = 100$ Вт, $\rho_1 = \rho_2 = 0.99$, $D_1 = 0.25$ м, $D_2 = 1$ м, $D_B = 0.2$ м, $N_1 = 3$, $N_{ини} = 5$

Таблица 4

Погрешность установки выходной яркости ДИПЯ в различных точках динамического диапазона

Отклонение параметров ДИПЯ по уровню 0.1%	Погрешность $\Delta L_B / L_B$, %			
	$D_K = 0.001$ м	$D_K = 0.005$ м	$D_K = 0.05$ м	$D_K = 0.1$ м
$\Delta \rho_1 / \rho_1$	10	10	5	2
$\Delta \rho_2 / \rho_2$	5.1	5.1	4.5	3.6
$\Delta D_1 / D_1$	1.39	1.35	0.7	0.43
$\Delta D_K / D_K$	1.39	1.35	0.7	0.43
Суммарная погрешность, %	17.88	17.8	10.9	6.46

Из табл. 4 видно, что погрешность установки выходной яркости ДИПЯ существенно повышается в режиме малых яркостей. Уменьшить эти погрешности можно отключением части источников излучения при средних значениях отверстий калибровочных диафрагм. Как показали экспериментальные исследования, количество одновременно работающих источников излучения в первичной сфере за счет эффективного интегрирования, мало отражается на фотометрическом теле, формируемом на выходе калибровочных диафрагм и практически не влияет на выходное яркостное поле ДИПЯ. Следует, однако, отметить, что при этом увеличивается время термостабилизации излучателя.

Энергетический и метрологический анализ других типов СОСИС может быть выполнен по

приведенной методике, но с учетом специфических особенностей конкретных систем. Результаты такого анализа будут опубликованы позже.

Выводы

На примере диффузного излучателя переменной яркости выполнен энергетический и метрологический анализ фотометрических приборов на основе оптически-сопряженных интегрирующих сфер. При энергетическом анализе был использован численно-аналитический метод определения значения яркости выходной апертуры ДИПЯ L_B в зависимости от основных его параметров. При метрологическом анализе учитывались факторы, влияющие на погрешность формирования яркостного поля в выходной апертуре ДИПЯ.

Результаты энергетического анализа показали, что для улучшения энергетических характеристик ДИПЯ в первую очередь необходимо увеличивать количество первичных излучателей (рекомендуемые значения $N_1=5\ldots7$), выдерживать отношение площади калибрующих диафрагм к площади выходной апертуры в пределах 0,55...0,75 и применять высокоотражающие покрытия на основе политетрафторэтилена с коэффициентом отражения более 0,99.

В результате метрологического анализа ДИПЯ было установлено, что наибольший вклад в погрешность установки выходной яркости вносят колебания отражающих свойств покрытий интегрирующих сфер, нестабильность источников излучения и изменения геометрических параметров калибровочных диафрагм и выходной апертуры. Получены аналитические выражения, описывающие эти погрешности и предложены конструктивные меры по их уменьшению до 0,1...0,2%.

Полученные результаты будут справедливы и для других типов фотометрических приборов на основе оптически-сопряженных интегрирующих сфер с учетом их специфических особенностей.

Литература

1. Михеенко Л. А. Система оптически-сопряженных интегрирующих сфер и фотометрические устройства на их основе. Часть 1. Математическая модель / Л. А. Михеенко, М. С. Мамута // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – №2. – С. 30-37.
2. Вариченко Л. В. Методы и средства измерения энергетических характеристик оптико-электронных систем космического зондирования Земли / Л. В. Вариченко, В. Г. Колобродов, Я. Е. Ладыка, В. И. Микитенко, Л. А. Михеенко // Космічна наука і технологія. – 2006. – Т.12 – №2/3. – С. 59 – 69.
3. Лампы накаливания // Электроника СССР. – М.: Информэлектрон. – 1988. – 26 с.
4. Азаренок В. В. К вопросу покрытия фотометрических шаров / В. В. Азаренок // Светотехника. – 1978. – №10. – С. 7 – 9.
5. Гуминецкий С. Г. Спектрофотометрические свойства покрытия из материала «Полихром 1» / С. Г. Гуминецкий, Л. С. Ловинский, Я. П. Мачук // ОМП. – 1990. – №2. – С. 19 – 21.
6. Weidner V. R. Reflection properties of pressed polytetrafluorethylene powder / V. R. Weidner, J. J. Hsia // J. Opt. Soc. Of Amer. – 1981. – 71. – P. 856 – 861.
7. A Guide to Integrating Sphere Theory and Application [Электронный ресурс] / Labsphere. – Режим доступа: <http://labsphere.com>.
8. Кушнир Ф. В. Электрорадиоизмерения. – Л.: Энергоиздат, 1983. – 320 с.
9. Гутников Б. Я. Фотометрические свойства алюминиевых рассеивателей / Б. Я. Гутников, В. А. Слепова, К. А. Смирнова и др. // ОМП. – 1972. – №8. – С. 54 – 56.
10. Левизон А. И. Покрытие для интегрирующих сфер спектрофотометрических приборов / А. И. Левизон // ОМП. – 1974. – №11. – С. 33 – 37.
11. Гуревич М. М. Фотометрия (теория, методы и приборы). – Л. Энергоиздат. – 1983. – 272 с.

References

1. Mikheenko L. A. System of optically connected integration spheres and photometric devices on its basis. Part 1. Mathematical model / L. A. Mikheenko, M. S. Mamuta // Measuring and computing devices in technological processes. – 2015. – №2. – P. 30-37
2. Varichenko L. V. Metody i sredstva izmereniya energeticheskikh kharakteristik optiko-elektronnykh sistem kosmicheskogo zondirovaniya Zemli / L. V. Varichenko, V. G. Kolobrodov, Ya. Ye. Ladyka, V. I. Mikitenko, L. A. Mikheenko // Kosmichna nauka i tehnologiya. – 2006. – T.12 – №2/3. – S. 59 – 69.
3. Lampy nakalivaniya // Elektronika SSSR. – M.: Informelektro. – 1988. – 26 s.
4. Azarenok V. V. K voprosu pokrytiya fotometricheskikh sharov / V. V. Azarenok // Svetotekhnika. – 1978. – №10. – S. 7 – 9.
5. Guminetskiy S. G. Spektrofotometricheskiye svoystva pokrytiya iz materiala «Polikhrom 1» / S. G. Guminetskiy, L. S. Lovinskiy, Ya. P. Machuk // OMP. – 1990. – №2. – S. 19 – 21.
6. Weidner V. R. Reflection properties of pressed polytetrafluorethylene powder / V. R. Weidner, J. J. Hsia // J. Opt. Soc. Of Amer. – 1981. – 71. – P. 856 – 861.
7. A Guide to Integrating Sphere Theory and Application [Elektronnyi resurs] / Labsphere. – Rezhym dostupa: <http://labsphere.com>.
8. Kushnir F. V. Elektroradioizmereniya. – L.: Energoizdat, 1983. – 320 s.
9. Gutnikov B. Ya. Fotometricheskiye svoystva alyuminiyevykh rasseivateley / B. Ya. Gutnikov, V. A. Slepova, K. A. Smirnova i dr. // OMP. – 1972. – №8. – S. 54 – 56.
10. Levizon A. I. Pokrytiye dlya integriruyushchikh sfer spektrofotometricheskikh priborov / A. I. Levizon // OMP. – 1974. – №11. – S. 33 – 37.
11. Gurevich M. M. Fotometriya (teoriya, metody i pribory). – L. Energoizdat. – 1983. – 272 s.