

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИФFUЗНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОЙ ЯРКОСТИ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИ-СОПРЯЖЕННЫХ ИНТЕГРИРУЮЩИХ СФЕР

Диффузные излучатели переменной яркости (ДИПЯ) на основе оптически-сопряженных интегрирующих сфер (ИС) имеют, по сравнению с традиционными излучателями, существенно лучшие фотометрические и метрологические характеристики [1-3]. Однако проектирование таких систем встречает известные трудности, вызванные, с одной стороны, тем, что задача является многопараметрической, причем связь между параметрами ДИПЯ является сложной и часто косвенной, а с другой стороны, часть параметров излучателя (коэффициент яркости и спектральная характеристика покрытия ИС, расположение и размеры источников излучения, размеры апертурных диафрагм и ряд других) не имеют аналитического описания.

Ключевые слова: диффузные излучатели, интегрирующая сфера, фотометрия, метрология.

L.A. MIKHEENKO, M.K. NOVITSKY

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute"

OPTIMIZATION OF CONSTRUCTIVE PARAMETERS OF A DIFFUSE EMITTER OF VARIABLE BRIGHTNESS BASED ON OPTICALLY CONJUGATE INTEGRATING SPHERES

Diffuse emitters of variable brightness based on optically conjugated integrating spheres (IS) have better photometric and metrological characteristics than traditional ones [1-3]. However, the design of such systems meets certain difficulties. Because the problem is multi-parametric and some of the parameters of the emitters (brightness factor, spectral characteristic of the covering of the IS, location and dimensions of radiation sources and others) have no analytical description.

Keywords: Diffuse emitter, integrating sphere, photometry, metrology.

Введение

Целью настоящей работы является разработка методов оптимизации конструктивных параметров ДИПЯ на основе оптически-сопряженных ИС с целью получения максимально возможной яркости выходной апертуры.

Яркость выходной апертуры ДИПЯ

Конструктивная схема ДИПЯ показана на рис. 1

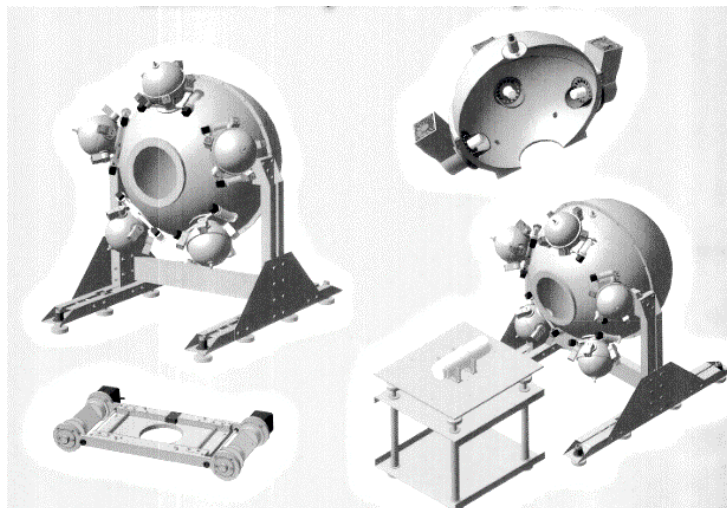


Рис. 1. Конструктивная схема ДИПЯ

Как видно из рисунка, 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 яркостное поле с фотометрическим телом, приближающимся к фотометрическому телу ламбертовского излучателя. Для получения аналогичного выражения, описывающего яркость выходной апертуры ДИПЯ, воспользуемся расчетной схемой, показанной на рис. 2.

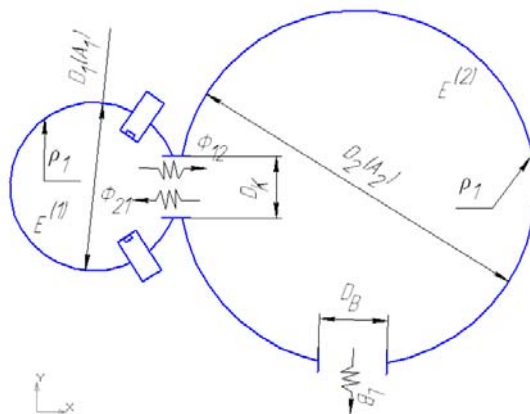


Рис. 2. Расчетная модель ДИПЯ

Освещенность внутренней поверхности первичной интегрирующей сферы E_1 определяется выражением [4]:

$$E_1 = \frac{N_{ин} \Phi_{ин}}{\pi D_1^2} \cdot \frac{\rho_1}{1 - \rho_1 \frac{\pi D_1^2 - A_{K1}}{\pi D_1^2}} \tag{1}$$

где $N_{ин}$ - количество источников излучения в первичной сфере;
 $\Phi_{ин}$ - поток излучения от одного источника излучения;
 D_1, D_1 - диаметр первичной сферы;
 ρ_1 - интегральный коэффициент отражения поверхности первичной сферы;
 A_{K1} - площадь выходной апертуры (калибровочной диафрагмы) первичной сферы.
 A_{K1} рассчитывается как площадь сферического сегмента:

$$A_{K1} = 2\pi \frac{D_1}{2} \left(\frac{D_1 - \sqrt{D_1^2 - D_{K1}^2}}{2} \right) = \frac{\pi}{2} D_1^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D_{K1}}{D_1} \right)^2} \right),$$

где D_{K1} - диаметр калибровочной диафрагмы.

Поток излучения, поступающий из первичной сферы во вторичную Φ_{12} Φ_{12} определяется из выражения:

$$\Phi_{12} = E_1 \cdot A_{K1}. \tag{2}$$

Поток излучения, поступающий во вторичную сферу от нескольких первичных сфер пропорционален суммарной площади всех калибровочных диафрагм и находится аналогично.

Тогда освещенность внутренней поверхности вторичной интегрирующей сферы E_2 будет равна:

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{N_1 \Phi_{12}}{A_2} \cdot \frac{\rho_2}{\left(1 - \rho_2 \frac{A_2 - A_K \cdot N_1 - A_B}{A_2} \right)} = \\ &= \frac{N_1 N_{ин} \Phi_{ин} A_{K1}}{A_1 A_2} \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{\left(1 - \rho_1 \frac{A_1 - A_{K1}}{A_1} \right) \left(1 - \rho_2 \frac{A_2 - A_K N_1 - A_B}{A_2} \right)} = \\ &= \frac{N_1 N_{ин} \Phi_{ин} A_{K1}}{(\pi D_1 D_2)^2} \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{\left(1 - \rho_1 \frac{\pi D_1^2 - A_{K1}}{\pi D_1^2} \right) \left(1 - \rho_2 \frac{\pi D_2^2 - A_K N_1 \frac{\pi}{2} D_2^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D_B}{D_2} \right)^2} \right)}{\pi D_2^2} \right)}, \end{aligned} \tag{3}$$

где N_1 - количество первичных интегрирующих сфер;
 A_2, D_2 - площадь и диаметр вторичной интегрирующей сферы соответственно;
 ρ_2 - интегральный коэффициент отражения вторичной сферы;
 $N_1 \cdot A_K$ - суммарная площадь калибровочных диафрагм;
 A_B, D_B - площадь и диаметр выходной апертуры вторичной сферы соответственно.
 Площадь выходной апертуры рассчитывается как площадь сферического сегмента:

$$A_B = 2\pi \frac{D_2}{2} \left(\frac{D_2 - \sqrt{D_2^2 - D_B^2}}{2} \right) = \frac{\pi}{2} D_2^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D_B}{D_2} \right)^2} \right).$$

Тогда яркость выходной апертуры, считая вторичную интегрирующую сферу ламбертовским излучателем, определяется выражением:

$$L_B = \frac{E_2}{\pi} = \frac{N_1 N_{ин} \Phi_{ин} A_K}{\pi A_1 A_2} \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{\left(1 - \rho_1 \frac{A_1 - A_{K1}}{A_1}\right) \left(1 - \rho_2 \frac{A_2 - A_K N_1 - A_B}{A_2}\right)} =$$

$$= \frac{N_1 N_{ин} \Phi_{ин} A_K}{\pi (\pi D_1 D_2)^2} \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{\left(1 - \rho_1 \frac{\pi D_1^2 - A_{K1}}{\pi D_1^2}\right) \left[1 - \rho_2 \frac{\pi D_2^2 - A_K N_1 \frac{\pi}{2} D_2^2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D_B}{D_2}\right)^2}\right)}{\pi D_2^2}\right]} \quad (4)$$

Энергетический анализ ДИПЯ и оптимизация его конструктивных параметров

С учетом изложенных выше соображений, для энергетического анализа ДИПЯ был использован численно-аналитический метод, при котором часть зависимостей устанавливалась расчетами, часть конструктивной проработкой и схемотехническим моделированием, а часть получена аналитически. Кроме этого, анализ выполнялся в два этапа – сначала были изучены общие приближенные закономерности, а затем после конструктивной и схемотехнической коррекции, было проведено более точное исследование, включающее оптимизацию основных параметров. Кроме этого, при численном анализе энергетических характеристик ДИПЯ использовались следующие, оправданные конструктивными соображениями и применением в аналогичных системах, параметры:

1. Относительное отверстие ДИПЯ $G = \frac{D_0}{D_2}$, 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_{\otimes} , равный суммарной площади калибровочных диафрагм к площади выходной апертуры:

$$P_{\otimes} = \frac{A_{K\Sigma}}{A_B}.$$

Значения P_{\otimes} при анализе – 0.1, 0.5, 1, 3, 5, 10 среднее значение $P = 1$.

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

4. Относительное отверстие первичного излучателя G_l , равное отношению максимального диаметра калибровочной диафрагмы $D_{K \max}$ к диаметру первичной интегрирующей сферы D_1

($G_l = \frac{D_{K \max}}{D_1}$). В расчетах G_l принималось равным: $\frac{1}{2.5}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3.5}$ со средним значением $G_l = \frac{1}{3}$.

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).

7. Покрытие первичной и вторичной интегрирующих сфер – серноокислый барий, “Spectralon” и “Infragold” со значениями интегрального коэффициента отражения $\rho = 0.927, 0.990$ и 0.911 соответственно [5, 6].

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. 3 (а–г).

Проведенный анализ показал:

1. Увеличение числа первичных излучателей (N_l) эффективно для повышения выходной яркости

ДИПЯ, при малых значениях энергетического параметра P .

2. Существует оптимальное соотношение размеров калибровочной диафрагмы и выходной апертуры ДИПЯ (энергетический параметр P), при котором яркость ДИПЯ максимальна. Значение P составляет при этом 0.95 ... 1.5.

3. Оптимальное количество первичных излучателей N_1 находится в пределах 5...7, если значение энергетического параметра соответствует оптимальному (т.е. 0.95...1.)

4. Увеличение коэффициента заполнения Q увеличивает выходную яркость ДИПЯ, причем тем больше чем больше количество первичных излучателей N_1 .

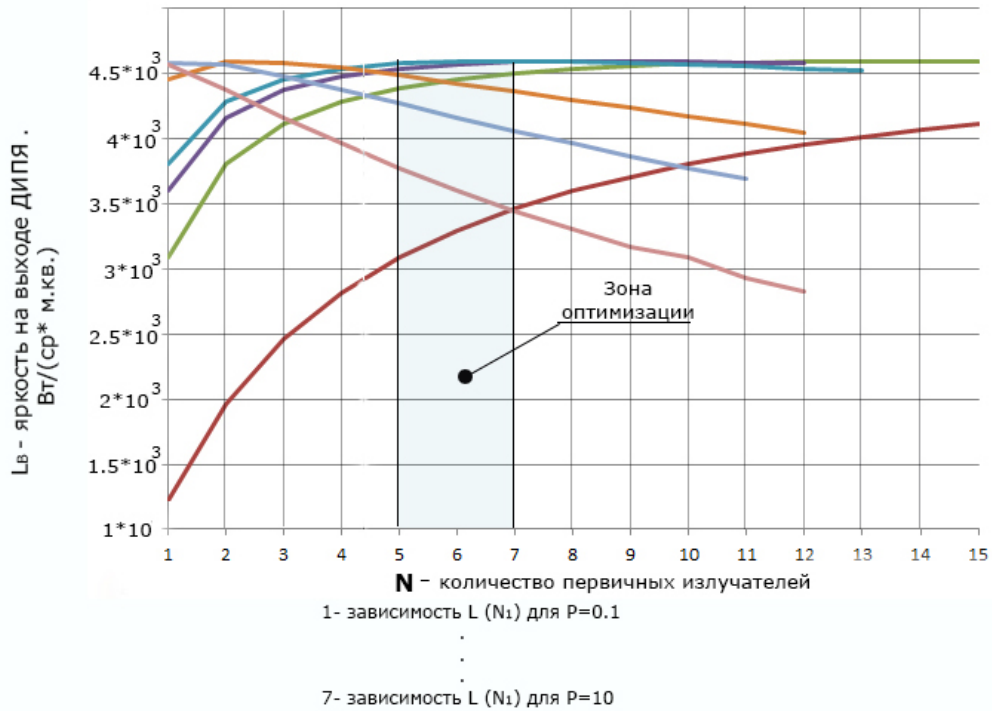


Рис. 3 а. Графики зависимости выходной яркости ДИПЯ L_B от количества первичных излучателей N_1

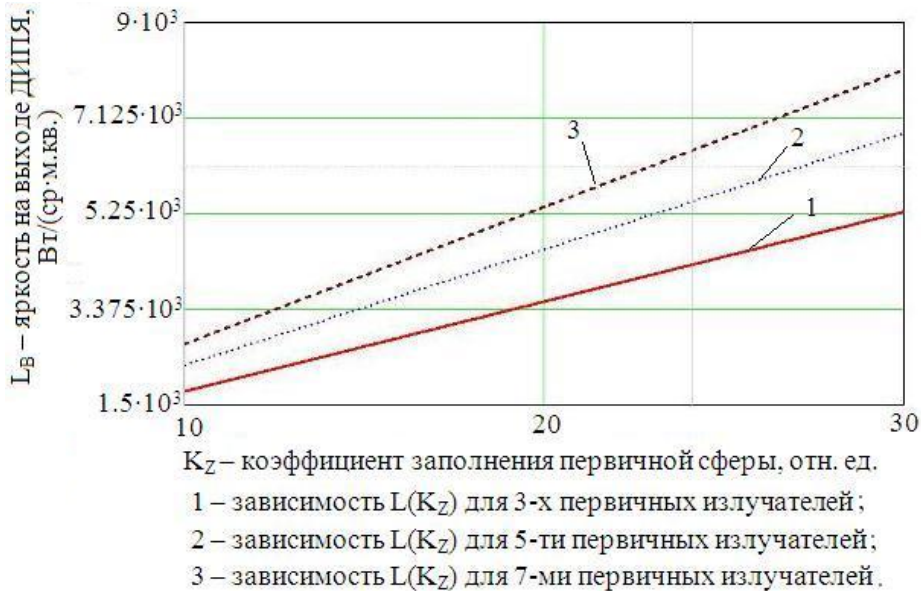


Рис. 3 б. Графики зависимости выходной яркости ДИПЯ L_B от коэффициента заполнения Q

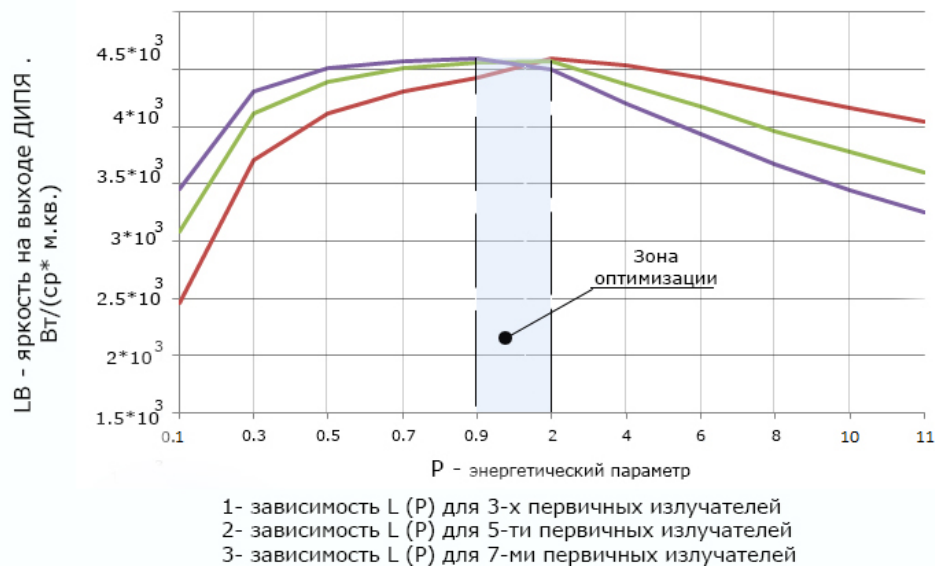


Рис. 3 в. Графики зависимости выходной яркости ДИПЯ L_v от энергетического параметра P

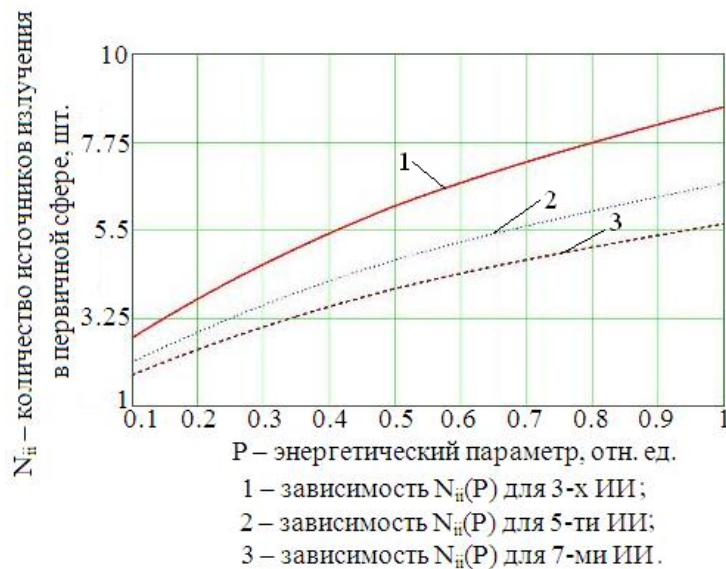


Рис. 3 г. Графики зависимости количества источников излучения в первичной сфере от энергетического параметра P

Методика проектирование ДИПЯ с оптимальными конструктивными параметрами

Выше отмечалось, что задача определений энергетических характеристик ДИПЯ является многовариантной и многопараметрической, причем значительная часть параметрических связей не имеет аналитического описания, и ограничена конструктивными соображениями. В полной мере это относится и к методам проектирования излучателя. Однако энергетический анализ ДИПЯ, проведенный выше позволил установить основные зависимости между его метрологическими характеристиками и параметрами основных конструктивных элементов. При этом также учитывались результаты, полученные при макетировании и экспериментальном исследовании излучателя, а также почерпнутые из литературных источников [7–13]. На основании этих зависимостей были разработаны следующие рекомендации по проектированию ДИПЯ с оптимальными конструктивными параметрами.

1. Исходя из размеров входной апертуры калибруемого устройства и конструктивных особенностей измерительного стенда, определяется величина выходной апертуры ДИПЯ D_B . При этом перекрытие апертуры ДИПЯ апертурой калибруемого устройства должно быть не меньше 20...25%.

2. Исходя из требуемой равномерности формируемого яркостного поля и максимальной требуемой яркости ДИПЯ, задаются величиной относительного отверстия G . Как показала практика использования диффузных излучателей в системах энергетической калибровки [1–3], величина G обычно выбирается в пределах $1/3 \dots 1/5$, причем большее значение позволяет несколько уменьшить габариты излучателя и повысить его яркость, но за счет снижения равномерности яркости поля и наоборот. Для прецизионных СРК рекомендуемое значение $G = 1/4$.

3. По определенным и заданным величинам D_B и G , а также используя зависимости выходной яркости от энергетического параметра его величина находится в пределах 0,1...10. Рекомендованное значение для большинства практических случаев $P = 0,95-1,5$.

4. По полученным значениям величин D_B , G , P и суммарной площади всех отверстий вторичной ИС

A_0 определяется суммарная площадь калибровочных диафрагм $A_{КЭ}$.

5. Задаваясь количеством первичных излучателей N_1 определяются размеры калибровочных диафрагм A_K . При этом следует учитывать, что при $N_1 < 3$ заметно снижается равномерность выходного яркостного поля и уменьшается его интегральное значение, а при $N_1 > 7$, существенно усложняется конструкция ДИПЯ. Применение четного числа первичных излучателей, как было показано выше, нецелесообразно из-за взаимного перекрытия зон освещения. Рекомендованное значение $N_1 - 5...7$.

6. Используя соображения, изложенные в п.2 с той разницей, что требования к равномерности яркостного поля в первичном излучателе ниже, а требования к максимальной яркости выше, задаются относительным отверстием первичного излучателя G_1 из диапазона $1/2.5...1/3.5$. Рекомендованное значение $G_1 - 1/3$.

7. Исходя из требуемой выходной яркости ДИПЯ, по заданным N_1 и G , определяется диаметр первичного излучения D_1 и количество источников излучения $N_{ин}$. При этом основанием для отбора источников излучения прежде всего максимальный излучаемый поток, минимальные габариты, удобство крепления в ИС, минимальные потери энергии из-за виньетирования и экранирования, максимальная продолжительность горения. При определении $N_{ин}$ целесообразно задаться коэффициентом заполнения Q_3 . Энергетически и конструктивно оправданный диапазон значений $Q_3 - 10...30$. Уменьшение Q_3 облегчает тепловой режим, но снижает выходную яркость и равномерность ее распределения в выходной апертуре. Наиболее рациональное значение $Q_3 = 20$, но для излучателей с требованием повышенной величины яркости, значение Q_3 можно увеличить до $30...40$. Однако при этом следует принять дополнительные меры по эффективному охлаждению первичного излучателя.

8. По формуле (4) определяется максимальная яркость формируемого ДИПЯ яркостного поля.

Коррекцию результатов расчетов наиболее удобно производить заменой типа используемых галогенных ламп и подбором коэффициента заполнения. Практика расчетов и проектирования ДИПЯ по предложенной методике, показала, что без изменения определенных конструктивных параметров излучателя, его выходную яркость можно изменять таким образом в пределах $40...60\%$.

С использованием рассмотренной методики была рассчитана яркость выходной апертуры ДИПЯ, используемая для измерения энергетических характеристик спутниковых зондирующих систем, которая составила $L_B = 4.593 \cdot 10^3 \text{ Вт/Ср} \cdot \text{м}^2$ при диаметре выходной апертуры 0.25 м .

$$L_B = \frac{E_2}{\pi} = \frac{N_1 N_{ин} \Phi_{ин} A_K}{\pi A_1 A_2} \cdot \frac{\rho_1 \rho_2}{\left(1 - \rho_1 \frac{A_1 - A_{K1}}{A_1}\right) \left(1 - \rho_2 \frac{A_2 - A_K N_1 - A_B}{A_2}\right)} =$$

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

Расчетные параметры ДИПЯ

Интегральный коэффициент отражения первичной и вторичной сферы $\rho_1, \rho_2 = 0.99$; поток излучения от одного источника излучения $\Phi_{ин} = 100 \text{ Вт}$; количество первичных интегрирующих сфер $N_1 = 5$; количество источников излучения в первичной сфере $N_{ин} = 5$; диаметр первичной сферы – 1 м ; площадь выходной апертуры (калибровочной диафрагмы) первичной сферы $7.68 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$; площадь и диаметр выходной апертуры вторичной сферы – 0.032 м^2 .

Выводы

Рассмотрена структурная схема диффузного излучателя переменной яркости на основе оптически-сопряженных интегрирующих сфер. Получены аналитические выражения, описывающие его энергетические и метрологические характеристики, позволяющие проектировать излучатель с данными параметрами.

Выполненный энергетический анализ излучателя позволяет оптимизировать его параметры. Доказано, что для получения максимальной выходной яркости необходимо, в первую очередь, увеличить количество первичных излучателей (оптимальное значение $N = 5...7$), выдерживая отношение площади калибруемых диафрагм и площади выходной апертуры в пределах $1/4$ и применяя высокоотражающие покрытия (например, на основе политетрафторотилена) с коэффициентом отражения более 0.99 .

Разработаны рекомендации и методика проектирования излучателя с оптимальными конструктивными параметрами. Доказано, что выполнение этих рекомендаций позволяет получить яркость $L_B = 4.593 \cdot 10^3 \text{ Вт/Ср} \cdot \text{м}^2$ в пределах выходной апертуры диаметром 0.25 м . Полученные результаты будут интересны специалистам в области оптической радиометрии и метрологии.

В дальнейшем планируется выполнить анализ точности излучателя и разработать рекомендации по ее увеличению.

Литература

1. Михеенко Л.А. Излучатель переменной яркости на основе сопряженных интегрирующих сфер / Л.А. Михеенко, В.Н. Боровицкий // *Технология и конструирование радиоэлектронной аппаратуры*. – 2006. – № 6(66). – С. 59–69.
2. Михеенко Л.А. Энергетическая калибровка многоспектральных сканерных устройств высокого расширения / Л.А. Михеенко, Ю.О. Гордиенко // *Научные вести НТУУ «КПИ»*. – 2009. – № 3. – С. 42–49.
3. Михеенко Л.А. Метрологический анализ диффузного излучателя переменной яркости на основе сопряженных интегрирующих сфер / Л.А. Михеенко, Ю.О. Гордиенко // *Научные вести НТУУ «КПИ»*. – 2009. – № 5. – С. 88–95.
4. Гуревич М. М. Фотометрия (теория, методы и приборы) / Гуревич М. М. – Л. : Энергоиздат, 1984. – 184 с.
5. Левизон А. И. Покрытие для интегрирующих сфер спектрофотометрических приборов / А. И. Левизон // *ОМП*. – 1974. – № 11. – С. 33–37.
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. Гыннисон Т.А. Поверочная установка «Спектр» для метрологической аттестации аэрокосмической радиометрической аппаратуры в диапазоне длин волн 0,3-2,5 мкм / Р.Э. Граф, Л.О. Мартин // *Дистанционное зондирование атмосферы с борта орбитального комплекса «Салют-7» - «Космос-1686» - «Союз – Т14»*. – Тарту, 1989. – С. 54–66.
8. Киселев И.А. Контроль энергетических характеристик многоспектральных сканирующих устройств ИСЗ «Ресурс- 01» / И.А. Киселев, А.И. Коростелев, М.К. Нараева, А.С. Панфилов, А.В. Романов // *Исследование Земли из космоса*. – 1991. – № 2. – С. 34–43.
9. Мухамедяров Р.В. Метрологическая аттестация многоспектрального сканирующего устройства высокого расширения / Р.Д. Мухамедяров, А.С. Глушков, А.С. Михайлов, Р.Ш. Хисамов // *Исследование Земли из космоса*. – 1991. – № 1. – С. 64–74.
10. Устаткування для оптичного тестування сканера (SOTU). Технічний опис Jena-Optronik. Doc. No.: SOTU – TN – DJ0 – 0001. Date: 20.09.01.
11. Sakuma F. Pre-launch calibration system Optical Sensors of Japanese Earth Resources Satellite / F. Sakuma, A. Ono // *SPIE. Calibration of Passive Observing Optical and Microwave Instrumentation*. – 1991. – Vol. 1493. – P. 37–47.
12. Penzoni F. J. Pre-Launch Absolute Calibration of CCD / CBERS – 2B Sensor / F. J. Penzoni, B. F. C. Albuquerque // *Sensors*. – 2008. – № 8. – P. 6557–6565.
13. Walker J. H. A technique for improving the calibration of large – area sphere sources / J. H. Walker, C. L. Cromer // *SPIE. Calibration of Passive Remote Observing Optical and Microwave Instrumentation*. – 1991. – Vol. 1493. – P. 224–230.

Рецензія/Peer review : 25.3.2017 р.

Надрукована/Printed :20.4.2017 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Чиж І.Г.