

Математична модель дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери з застосуванням технології трасування променів NVIDIA OptiX

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Анотація.

Запропонована математична модель, яка дозволяє розрахувати розподіл яскравості у вихідній апертурі дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери з використанням сучасної технології трасування променів NVIDIA OptiX. Математична модель дозволяє описати форму та оптичні властивості внутрішньої поверхні інтегруючої сфери, розташування джерел випромінювання та вихідної апертури, а також локальні спотворення геометричної форми та оптичних властивостей внутрішньої поверхні. За допомогою технології трасування променів NVIDIA OptiX розраховується координати перетину величезної кількості променів з внутрішньою поверхнею та вихідною апертурою та обчислюється розподіл яскравості у вихідній апертурі після багатократного дифузного відбивання оптичного випромінювання. Головною перевагою такої технології є можливість застосування багатоядерних графічних процесорів NVIDIA для швидкого обчислення ходу мільйонів променів за короткий час, що дає можливість отримання точних даних про розподіл яскравості у вихідній апертурі та знаходження оптимальних параметрів таких дифузних випромінювачів.

Ключові слова: дифузний випромінювач, інтегруюча сфера, математична модель, трасування променів, технологія NVIDIA OptiX.

Дифузні випромінювачі на основі інтегруючої сфери (ДВ ІС) дозволяють створювати протяжну зону у площині його вихідної апертури з рівномірним розподілом яскравості. Тому ДВ ІС знаходять широке застосування для енергетичного калібрування оптико-електронних систем, включаючи цифрові камери, гіперспектральні камери, прилади космічного та авіаційного дистанційного зондування та інші [1]. Зрозуміло, що при проектуванні ДВ ІС, у тому числі при виборі його конструктивних параметрів треба забезпечити задані яскравість та нерівномірність її розподілу по вихідній апертурі [1]. Відомі математичні моделі ДС ІС [2 - 5] не дозволяють оцінити вплив більшості основних параметрів та характеристик ДС ІС, у тому числі форми внутрішніх елементів таких як бленди та екрани, індикатрис первинних джерел випромінювання та їх розташування на просторовий розподіл яскравості по полю вихідної апертури. Велика кількість варіантів конструкцій ДВ ІС закономірно обмежує застосування експериментальних методів та не дозволяє їх всі перевірити.

Точний розрахунок розподілу яскравості у вихідній апертурі ДВ ІС вимагає виконання великої кількості обчислень ходу променів. Аналіз відомих програм для трасування променів доводить, що тільки застосування багатоядерних графічних процесорів NVIDIA та технології NVIDIA OptiX дозволяє виконати усі необхідні розрахунки з мінімальними витратами часу та зусиль (Таблиця 1) [6]. Запропонована математична модель дозволяє розрахувати розподіл яскравості у вихідній апертурі ДВ ІС з застосуванням сучасної технології трасування променів NVIDIA OptiX. Ця математична модель дозволяє описати форму та оптичні властивості внутрішньої поверхні ІС, розташування джерел випромінювання та вихідної апертури, а також локальні спотворення геометричної форми та оптичних властивостей внутрішньої поверхні (Рис. 1). За допомогою технології трасування променів NVIDIA OptiX розраховуються координати перетину величезної кількості променів з внутрішньою поверхнею та вихідною апертурою, що дозволяє отримати дані про розподіл яскравості у вихідній апертурі. Для визначення розподілу яскравості був застосований алгоритм розрахунку проходження одиничних променів в ІС [7] (Рис. 2).

Програмне забезпечення	Фізичне трасування	Хвильова оптика	Метод Монте-Карло	Основні переваги	Обмеження
Ansys SPEOS	☑	☑	☑	Висока точність аналізу освітлення, інтеграція з механічними моделями.	Високі вимоги до ресурсів.
COMSOL Ray Optics	☑	☑	☑	Потужне моделювання складних середовищ, інтеграція з іншими фізичними процесами.	Висока вартість, складність налаштувань.
LightTools	☑	☑	☑	Підходить для аналізу освітлення, складних систем.	Не підтримує хвильову оптику.
NVIDIA OptiX	☑	☑	☑	Трасування променів із прискоренням на GPU, ідеальне для рендерингу та наукових обчислень.	Потребує GPU NVIDIA
Zemax OpticStudio	☑	☑ (Обмежено)	☑	Найкраще підходить для проектування оптичних систем з лінзами та дзеркалами, оптимізація оптичних систем.	Обмежена підтримка хвильових ефектів та часової динаміки.

Таблиця 1 – Програмне забезпечення для виконання трасування променів у тримірному просторі.

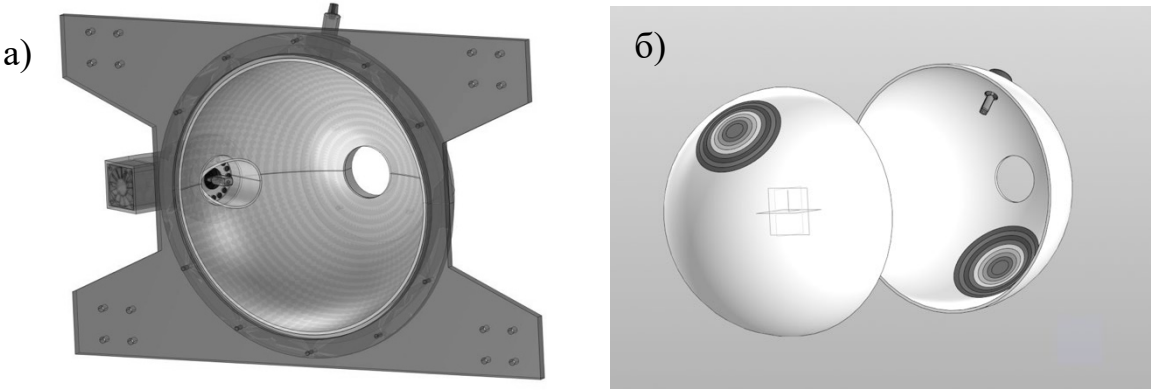


Рис. 1 – Відображення частини ДВ ІС (а) та розташування зон з різними оптичними властивостями на внутрішній поверхні ІС (б) у тримірному просторі.

E_i площині вихідної
 апертури формує вихідне поле яскравості [7]:

$$L_{x,y}=f\left(\theta,\theta_{ef},\beta,\rho\right)$$

де ρ — коефіцієнт відбивання від внутрішньої поверхні ІС, а відповідна сукупність кутів на виході — індикатриса випромінювання ДВ. Індикатриса більшості джерел випромінювання має досить складний характер, що заважає його аналітичному опису. Для розрахунку проходження одиничних променів у ІС можна скористатись табличним способом задання індикатриса сили світла, що отримується експериментально. Кількість променів n і крок між ними g визначаються необхідною точністю обчислення. В загальному випадку можна вибрати:

$$g=2\cdot\frac{\theta_{ef}}{n-1}$$

θ_{ef}

$$\theta_i=-\theta_{ef}+g\cdot\left(i-1\right)$$

Висновок. Запропонована математична модель, яка дозволяє розрахувати розподіл яскравості у вихідній апертурі дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери з застосуванням сучасної технології трасування променів NVIDIA OptiX. Математична модель дозволяє описати у тримірному просторі геометричну форму та оптичні властивості внутрішньої поверхні ІС, розташування джерел випромінювання та вихідної апертури, а також локальні спотворення геометричної форми та оптичних властивостей внутрішньої поверхні. Далі за допомогою технології трасування променів NVIDIA OptiX розраховуються координати перетину величезної кількості променів з внутрішньою поверхнею та вихідною апертурою з метою знаходження розподілу яскравості у вихідній апертурі ДВ ІС після багатократного дифузного відбивання променів від внутрішньої поверхні ІС. При цьому NVIDIA OptiX застосовує метод Монте-Карло для стохастичного трасування променів, що дозволяє враховувати багатократні розсіювання, відбивання та поглинання оптичного випромінювання і тим самим отримати точні дані про розподіл яскравості у вихідній апертурі ДВ ІС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міхесенко Л.А., Боровицький В.Н., Дифузні випромінювачі на основі інтегруючої сфери: теорія, метрологія, проектування. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 148 с.
2. Jablonski J., Scharpf D., Rabade S., Dobrowski L., Durell C., Holt J. Perfectly understood non-uniformity: methods of measurement and uncertainty of uniform sources – Proc. of SPIE. – 2019. – Vol. 10980. – Article ID 109800I. – www.doi.org/10.1117/12.2519038
3. Pfisterer R.N., Barrett N., Davies T. Optimized integrating sphere calibration modeling // Proc. of SPIE. – 2021. – Vol. 11871. – Article ID 118710V. – www.doi.org/10.1117/12.2597706
4. Prokhorov A.V., Hanssen L.M. Numerical modeling of an integrating sphere radiation source // Proc. of SPIE. – 2002. – Vol. 4775. – p. 157–168.
5. Vacula M., Horvath P., Chytka L., et. Optical ray-tracing simulation method for the investigation of radiance non-uniformity of an integrating sphere // *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*. – 2023. – Vol. 291. – Article ID 171350. – DOI: [10.1016/j.ijleo.2023.171350](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.171350)
6. NVIDIA OptiX 9.0 // NVIDIA Ray Tracing Documentation. – <https://raytracing-docs.nvidia.com/optix9/index.html> (дата звернення: 07.03.2025)
7. Міхесенко Л.А., Тимофеев О.С. Числовий метод аналізу поля яскравості дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери // *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*. – 2011. – № 5.

Віктор Артурович Шишкін, аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, delacroix1212@gmail.com.

Леонід Андрійович Міхесенко, д.т.н., м. Київ.

Володимир Миколайович Боровицький, д.т.н., професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ.

Mathematical model of a diffuse light source based on an integrating sphere using NVIDIA OptiX ray tracing technology

Abstract.

The proposed mathematical model enables calculating the luminance distribution at the output aperture of a diffuse emitter based on an integrating sphere using modern ray-tracing technology NVIDIA OptiX. The mathematical model describes the shape and optical properties of the integrating sphere's inner surface, the location of radiation sources and output aperture, as well as local distortions in geometry and optical properties of the sphere's inner surface. Utilizing NVIDIA OptiX ray-tracing technology, the coordinates of intersections for a large number of rays with the inner surface and output aperture are calculated, and the luminance distribution at the output aperture is computed after multiple diffuse reflections of optical radiation. The primary advantage of this technology is the capability of employing multi-core NVIDIA GPUs for rapid computation of millions of ray trajectories in a short period, thus enabling precise data on luminance distribution at the output aperture and optimization of parameters for such diffuse emitters.

Keywords: diffuse light source, integrating sphere, mathematical model, ray tracing, NVIDIA OptiX.

Viktor Arturovich Shyshkin, PhD Student, Computer-integrated optical and navigation systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, delacroix1212@gmail.com.