

Радиометрия и оптика

Быковских Дмитрий Александрович

16.12.2023

Оптика — это раздел физики, изучающий свет и его взаимодействие с веществом, а также явления, связанные с распространением света, его преломлением, отражением, дифракцией и интерференцией.

Радиометрия — это наука о измерении электромагнитного излучения в различных частях спектра, включая видимую световую область, инфракрасное и ультрафиолетовое излучение, радиоволны и другие формы излучения. Радиометрия описывает количественные характеристики излучения, такие как поток энергии, интенсивность и яркость, и используется в различных областях, включая астрономию, фотометрию и измерения теплового излучения.

Геометрическая модель

В оптике энергия излучения определяется за время на много больше, чем период собственных колебаний электромагнитных волн оптического диапазона (10^{14} Гц).

Рассматривается простая геометрическая модель, являющаяся следствием уравнения Максвелла, согласно которой свет представляет собой поток лучистой энергии, распространяющийся вдоль геометрических лучей.

Электромагнитное поле в однородных изотропных средах переносит энергию E в направлении, которое указывается оптическим лучевым вектором q .

Энергия измеряется в джоулях Дж.

Поток излучения (лучистый поток) — это величина энергии, переносимой полем в единицу времени через данную площадку.

$$\Phi_e = \frac{E}{t} = \frac{Дж}{с} = Вт$$

Радиометрия

2023-12-22

Геометрическая модель

Геометрическая модель

В оптике энергия излучения определяется за время на много больше, чем период собственных колебаний электромагнитных волн оптического диапазона (10^{14} Гц).
Рассматривается простая геометрическая модель, являющаяся следствием уравнения Максвелла, согласно которой свет представляет собой поток лучистой энергии, распространяющийся вдоль геометрических лучей.
Электромагнитное поле в однородных изотропных средах переносит энергию E в направлении, которое указывается оптическим лучевым вектором q .
Энергия измеряется в джоулях Дж.
Поток излучения (лучистый поток) — это величина энергии, переносимой полем в единицу времени через данную площадку.
 $\Phi_e = \frac{E}{t} = \frac{Дж}{с} = Вт$

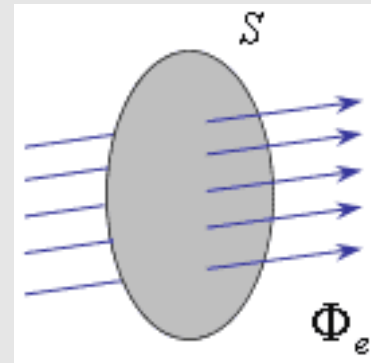


Рис. 1: Поток излучения

Геометрическая модель

Поверхностная плотность потока энергии E_e — величина потока Φ_e , приходящаяся на единицу площади S .

$$E_e = \frac{\partial \Phi_e}{\partial S}, \quad \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

Но также может быть наоборот.

M_e — энергетическая светимость.

Если поток излучается площадкой, то поверхностная плотность потока энергии будет иметь смысл энергетической светимости.

2023-12-22

Радиометрия

Геометрическая модель

Геометрическая модель

Поверхностная плотность потока энергии E_e — величина потока Φ_e , приходящаяся на единицу площади S .

$$E_e = \frac{\partial \Phi_e}{\partial S}, \quad \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

Но также может быть наоборот.

M_e — энергетическая светимость.

Если поток излучается площадкой, то поверхностная плотность потока энергии будет иметь смысл энергетической светимости.

$$\int E_e dS = \Phi_e$$

$$\int \int E_e dx dy = \Phi_e$$

Телесный угол

Solid angle

Телесный угол Ω (или твердый угол) представляет собой меру пространственного угла, измеряемого в трехмерном пространстве. Он определяется как соотношение площади проекции поверхности, заключенной между лучами, выпущенными из точки и пересекающими какой-то объект (обычно сферу), к квадрату радиуса этой сферы. Таким образом, телесный угол измеряет, насколько много пространства охватывает объект относительно точки наблюдения. Его единицей измерения являетсястерадиан (ср).

Радиометрия

2023-12-22

└ Телесный угол

Телесный угол
Solid angle

Телесный угол Ω (или твердый угол) представляет собой меру пространственного угла, измеряемого в трехмерном пространстве. Он определяется как соотношение площади проекции поверхности, заключенной между лучами, выпущенными из точки и пересекающими какой-то объект (обычно сферу), к квадрату радиуса этой сферы. Таким образом, телесный угол измеряет, насколько много пространства охватывает объект относительно точки наблюдения. Его единицей измерения являетсястерадиан (ср).

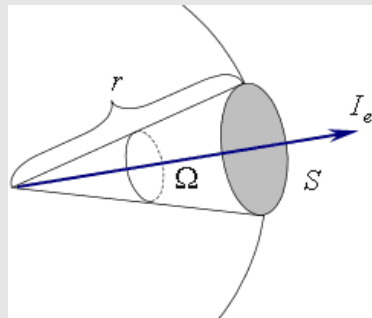


Рис. 2: Телесный угол

Угол и телесный угол

Angle and Solid Angle

Рассмотрим следующие формулы

$$d\theta = \frac{dL}{r},$$

где $d\theta$ — изменение угла θ ; dL — изменение длины дуги; r — радиус сферических координат.

Следующая формула используется при интегрировании по сферической поверхности и является результатом преобразования элемента поверхности dS в сферических координатах.

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \frac{(r d\phi)(r \sin \theta d\theta)}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi,$$

где $d\Omega$ — элемент телесного угла; dS — элемент поверхности; r — радиус сферических координат; $d\theta$ — элемент угла θ (зенитного угла); $d\phi$ — элемент угла ϕ (азимутального угла).

Радиометрия

2023-12-22

└ Угол и телесный угол

Угол и телесный угол
Angle and Solid Angle

Рассмотрим следующие формулы

$$d\theta = \frac{dL}{r},$$

где $d\theta$ — изменение угла θ ; dL — изменение длины дуги; r — радиус сферических координат. Следующая формула используется при интегрировании по сферической поверхности и является результатом преобразования элемента поверхности dS в сферических координатах.

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \frac{(r d\phi)(r \sin \theta d\theta)}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi,$$

где $d\Omega$ — элемент телесного угла; dS — элемент поверхности; r — радиус сферических координат; $d\theta$ — элемент угла θ (зенитного угла); $d\phi$ — элемент угла ϕ (азимутального угла).

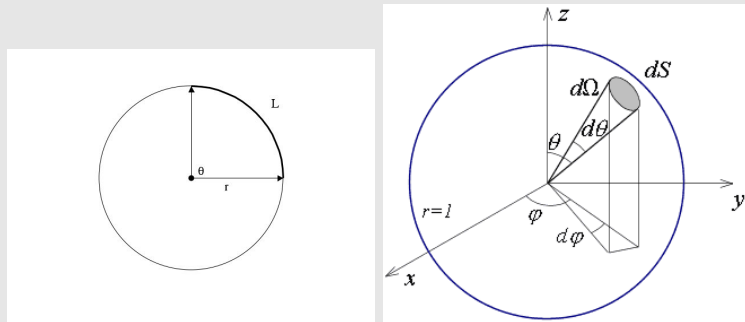


Рис. 3: Угол в полярных координатах и телесный угол в сферических координатах

Площадь сферы

Differential Solid Angles

Итак, телесный угол описывается следующей формулой

$$d\omega = \frac{dS}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi$$

Площадь единичной сферы через телесный угол и в сферической системе координат

$$\Omega = \int_S d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin \theta d\theta d\phi = \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi = 4\pi$$

Площадь сферы

Итак, телесный угол описывается следующей формулой

$$d\omega = \frac{dS}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi$$

Площадь единичной сферы через телесный угол и в сферической системе координат

$$\Omega = \int_S d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin \theta d\theta d\phi = \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\phi = 4\pi$$

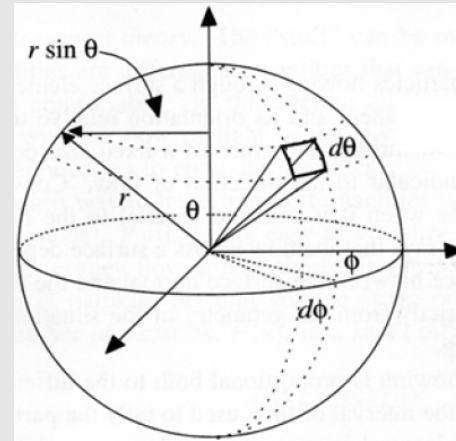


Рис. 4: Схема расчета сферы

Большой источник, рассмотренный под косым углом, должен создавать тот же эффект, что и маленький источник, расположенный перпендикулярно. Это явление известно как ракурс.

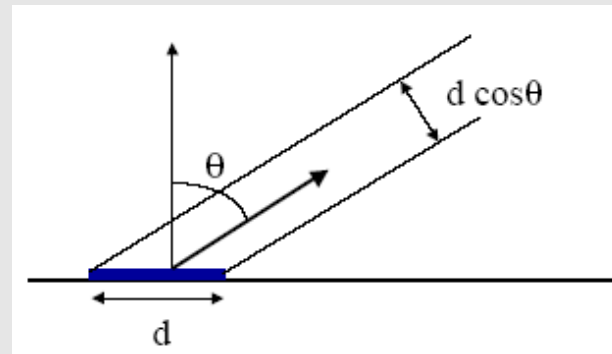


Рис. 5: Ракурс

Телесный угол

Solid Angle

Телесный угол ω определяется проектируемой площадью поверхности на единичную сферу от точки.

Телесный угол образуется точкой и участком поверхности.

$$d\omega = dA_0 = \frac{dA \cos \theta}{r^2}$$

2023-12-22

Радиометрия

└ Телесный угол

Телесный угол
Solid Angle

Телесный угол ω определяется проектируемой площадью поверхности на единичную сферу от точки.
Телесный угол образуется точкой и участком поверхности.

$$d\omega = dA_0 = \frac{dA \cos \theta}{r^2}$$

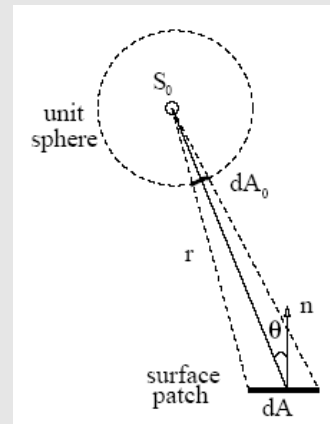


Рис. 6: Телесный угол

Распределение света в пространстве зависит от положения и направления. Подходящей единицей измерения для оценки распределения света в пространстве является радианс, который определяется как мощность (количество энергии в единицу времени), перемещающаяся в какой-то точке в определенном направлении, на единицу площади, перпендикулярной направлению движения, на единицу телесного угла. Кратко говоря, радианс представляет собой количество света, излучаемого из точки... (в единичный телесный угол, с единичной площади).

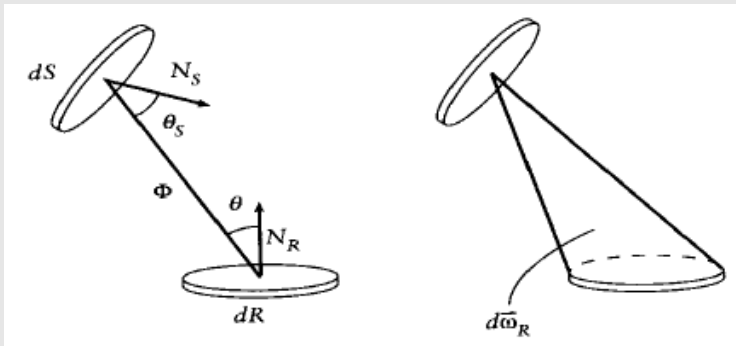


Рис. 7: Излучение из ds в dr

Бесконечно маленький источник света и участки поверхности

Radiance at x_1 leaving to x_2

$$L(x_1, x_1 \rightarrow x_2) = \frac{d\Phi}{d\omega \cos \theta_1 dA_1} = \left[d\omega = \frac{\cos \theta_2 dA_2}{r^2} \right] = \frac{r^2 d\Phi}{\cos \theta_2 dA_2 \cos \theta_1 dA_1}$$

Let the radiance arriving at x_2 from the direction of x_1 is

$$L(x_2, x_1 \rightarrow x_2) = \frac{d\Phi}{d\omega \cos \theta_2 dA_2} = \left[d\omega = \frac{\cos \theta_1 dA_1}{r^2} \right] = \frac{r^2 d\Phi}{\cos \theta_1 dA_1 \cos \theta_2 dA_2}$$

2023-12-22

Радиометрия

Бесконечно маленький источник света и участки поверхности

Бесконечно маленький источник света и участки поверхности

Radiance at x_1 leaving to x_2

$$L(x_1, x_1 \rightarrow x_2) = \frac{d\Phi}{d\omega \cos \theta_1 dA_1} = \left[d\omega = \frac{\cos \theta_2 dA_2}{r^2} \right] = \frac{r^2 d\Phi}{\cos \theta_2 dA_2 \cos \theta_1 dA_1}$$

Let the radiance arriving at x_2 from the direction of x_1 is

$$L(x_2, x_1 \rightarrow x_2) = \frac{d\Phi}{d\omega \cos \theta_2 dA_2} = \left[d\omega = \frac{\cos \theta_1 dA_1}{r^2} \right] = \frac{r^2 d\Phi}{\cos \theta_1 dA_1 \cos \theta_2 dA_2}$$

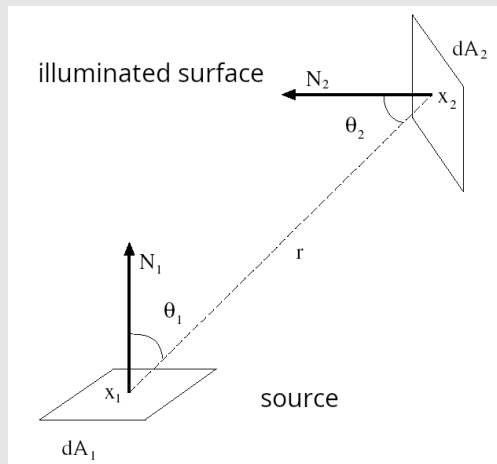


Рис. 8: Излучение из ds в dr

Расчет излученной энергии

Computing Irradiance

Интегрируйте световой поток по полусфере

$$E(x) = \int_{\Omega} L(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta d\phi$$

Таким образом, излученная энергия из определенного направления составляет

$$E(x) = L(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega$$

2023-12-22

Радиометрия

Расчет излученной энергии

Интегрируйте световой поток по полусфере

$$E(x) = \int_{\Omega} L(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta d\phi$$

Таким образом, излученная энергия из определенного направления составляет

$$E(x) = L(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega$$

$$f_r(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i) = \frac{dL(\theta_o, \phi_o)}{dE(\theta_i, \phi_i)}$$

Двулучевая функция отражательной способности

Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF

Двулучевая функция отражательной способности (ДФОС) описывает какая доля световой энергии, приходящей из одного направления, уходит в другом направлении для произвольной пары таких направлений.

Математически выражается следующим образом:

$$f_r(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i) = \frac{dL(\theta_o, \phi_o)}{dE(\theta_i, \phi_i)}$$

Здесь θ_i и ϕ_i представляют углы направления входящего света (обычно относительно нормали к поверхности), а θ_o и ϕ_o представляют углы направления исходящего света.

BRDF является фундаментальным концептом, предоставляя способ моделирования взаимодействия света с поверхностями и его отражения в различных направлениях.

└ Двулучевая функция отражательной способности

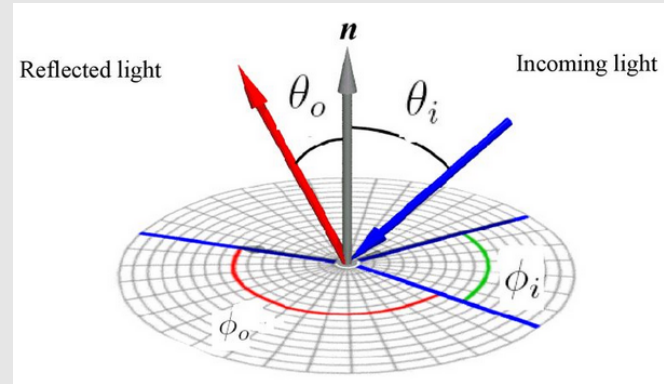


Рис. 9: Двулучевая функция отражательной способности

$$L(x, \theta_o, \phi_o) = \int_{\Omega} f_r(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i) L(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega$$

Излученность в направлении наблюдения при условии всех входящих световых потоков.

$$L(x, \theta_o, \phi_o) = \int_{\Omega} f_r(\theta_o, \phi_o, \theta_i, \phi_i) L(x, \theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\omega$$

Что пропорционально яркости пикселя для этого луча.

Функция двустороннего распределения отраженного света (BRDF) обладает несколькими важными свойствами:

1. Положительность: Значения BRDF обычно неотрицательны для всех углов входа и выхода света.
2. Нормализация: Интеграл BRDF по всем направлениям входа и выхода света равен единице. Это свойство обеспечивает сохранение энергии в системе.
3. Ротационная инвариантность: BRDF не зависит от ориентации координатной системы, т.е. она инвариантна относительно поворотов.
4. Симметрия: BRDF симметрична относительно обмена направлений входа и выхода света (θ_i, ϕ_i и θ_o, ϕ_o).
5. Локальная изотропия или анизотропия: BRDF может быть изотропной (не зависит от направления) или анизотропной (зависит от направления).
6. Монотонность: Поверхности с монотонной BRDF не могут сосредотачивать свет.
7. Микрогеометрическая зависимость: BRDF часто зависит от микрогеометрии поверхности (например, шероховатости или микронеровностей).

Световые и энергетические величины

Таблица 1: Сравнение энергетических и световых величин

Энергетические			Световые		
Поток излучения	Φ_e	Вт	Световой поток	Φ	лм
Энергетическая сила света	I_e	$\frac{\text{Вт}}{\text{ср}}$	Сила света	I	кд
Энергетическая освещенность	E_e	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	Освещенность	E	лк
Энергетическая светимость	M_e	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	Светимость	M	$\frac{\text{лм}}{\text{м}^2}$
Энергетическая яркость	L_e	$\frac{\text{Вт}}{\text{ср м}^2}$	Яркость	L	$\frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$

Примечание. Световой поток измеряется в лм (люменах) и представляет собой полную видимую энергию, излучаемую источником света за единицу времени.

2023-12-22

Радиометрия

Световые и энергетические величины

Световые и энергетические величины

Таблица 1. Сравнение энергетических и световых величин

Энергетические			Световые		
Поток излучения	Φ_e	Вт	Световой поток	Φ	лм
Энергетическая сила света	I_e	$\frac{\text{Вт}}{\text{ср}}$	Сила света	I	кд
Энергетическая освещенность	E_e	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	Освещенность	E	лк
Энергетическая светимость	M_e	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	Светимость	M	$\frac{\text{лм}}{\text{м}^2}$
Энергетическая яркость	L_e	$\frac{\text{Вт}}{\text{ср м}^2}$	Яркость	L	$\frac{\text{кд}}{\text{м}^2}$

Примечание. Световой поток измеряется в лм (люменах) и представляет собой полную видимую энергию, излучаемую источником света за единицу времени.

Люмен (лм): Люмен измеряет световой поток, представляя собой общее количество света, излучаемого источником света в одну секунду; используется для оценки яркости светильников и ламп.

Кандела (кд): Кандела измеряет световой поток в заданном направлении, представляя собой интенсивность света в конкретном угловом направлении; введена для оценки яркости источников света, особенно в направленных световых системах.

Люкс (лк): Люкс измеряет освещенность, представляя собой количество света, падающего на поверхность в один люкс, равный одному люмену на квадратный метр; введен как метрика для оценки комфортного освещения.

Историческая справка. Люкс и лм стали стандартами измерения света в 20 веке, с развитием технологий освещения. В 1948 году была введена спецификация лм для измерения светового потока. Кандела была предложена в 1946 году в ходе разработки стандартов единиц измерения света, утвержденных в 1979 году.

2023-12-22

Пример: Если у вас есть лампа мощностью 1000 люмен и она освещает поверхность в 10 квадратных метрах, то освещенность будет 100 люкс.

Освещенность и светимость

Таким образом, освещенность измеряет количество света на единицу площади, в то время как светимость представляет собой общее количество излучаемого света и измеряется в люменах.

Литература

- 1 Bahadir K. Gunturk Radiometry, photometric stereo
- 2 Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций
- 3 Jinxiang C. Computer Graphics: Radiometry and Illumination
- 4 Взаимосвязь силы света, светового потока и освещенности

Литература

- 1 Bahadir K. Gunturk Radiometry, photometric stereo
- 2 Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций
- 3 Jinxiang C. Computer Graphics: Radiometry and Illumination
- 4 Взаимосвязь силы света, светового потока и освещенности