

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.247.4; 628.987

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОКАМЕР С МАТРИЧНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ В ФОТОМЕТРИИ

© 2012 г. В. А. Андрийчук, доктор техн. наук; Я. М. Осадца

Тернопольский национальный технический университет им. И. Пулюя, г. Тернополь, Украина

E-mail: kaf_es@tu.edu.te.ua

Приведено описание математической модели системы излучающая поверхность – фотокамера. Разработана методика градуировки матричных оптических преобразователей и фотокамер на их основе. Создано программное обеспечение расчета освещенности и яркости поверхности по полученному изображению. Проведены измерения распределения яркости и освещенности по светящейся поверхности, выполнено сравнение с нормативными параметрами.

Ключевые слова: матричный фотопреобразователь, яркость, освещенность, цифровая фотокамера, RGB-система.

Коды OCIS: 040.1490, 120.5240

Поступила в редакцию 16.05.2011

Появление матричных оптических преобразователей и фотокамер на их основе расширяет широкие возможности их использования для светотехнических измерений. Такие измерения отличаются от традиционных способов оперативностью, повышенной точностью, возможностью компьютерной обработки и записи информации.

В работах [1–7] рассмотрена эта проблема, но представленные результаты ограничиваются решением лишь прикладных задач. В них не уделено достаточно внимания аналитическим расчетам яркости исследуемого объекта и его изображения. Для проведения таких расчетов необходимо иметь математическую модель системы фотокамера – объект исследования. Кроме этого, возникает необходимость в разработке методики градуировки фотокамер и визуализации результатов измерений. Это важно для определения состояния внешнего освещения улиц, объектов архитектуры, памятников и т. п.

Целью данной работы являлось:

построение математической модели системы фотокамера – излучающая поверхность, на ос-

нове которой можно было бы проводить расчеты светотехнических параметров,

разработка измерительной установки и методики градуировки как матричных приемников, так и фотокамер в целом,

проведение дистанционных измерений распределения яркости и освещенности светящихся поверхностей и сравнение полученных результатов с нормативными параметрами.

Построение математической модели.

Рассмотрим излучающую поверхность, яркость которой подчиняется закону Ламберта [8]. На этой поверхности выберем участок площадью ΔS_1 (рис. 1) с освещенностью E_1 . Фотокамеру с матричным фотопреобразователем с фокусным расстоянием объектива F и площадью входного отверстия $\Delta S_{\text{ВО}}$ установим на высоте h_1 . Расстояние от объектива фотокамеры до поверхности матричного фотопреобразователя равно h_2 и близко к фокусному расстоянию объектива F .

Пусть элемент поверхности ΔS_1 размещен на расстоянии l_1 от точки пересечения оптической оси фотокамеры с поверхностью (точка O_1). Его изображение на поверхности матричного

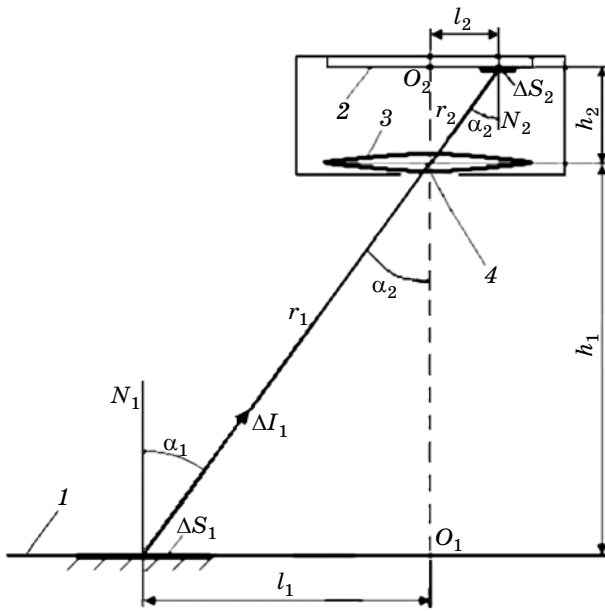


Рис. 1. Модель системы излучающая поверхность – фотокамера. 1 – излучающая поверхность, 2 – матричный фотопреобразователь, 3 – объектив фотокамеры, 4 – входное отверстие объектива.

оптического преобразователя ΔS_2 . Согласно законам геометрической оптики [9]

$$\Delta S_1 / r_1^2 = \Delta S_2 / r_2^2. \quad (1)$$

Поскольку

$$r_1^2 = l_1^2 + h_1^2, \quad r_2^2 = l_2^2 + h_2^2,$$

то формулу (1) преобразуем к виду

$$\Delta S_1 / \Delta S_2 = r_1^2 / r_2^2 = (l_1^2 + h_1^2) / (l_2^2 + h_2^2). \quad (2)$$

Освещенность E_M поверхности элемента ΔS_2 матричного фотопреобразователя равна

$$E_M = \Delta \Phi_M / \Delta S_2, \quad (3)$$

где $\Delta \Phi_M$ – световой поток, который попадает на участок ΔS_2 преобразователя. Световой поток $\Delta \Phi_{12}$, который излучается от элемента ΔS_1 и попадает на входное отверстие фотокамеры, определяется формулой

$$\Delta \Phi_{12} = L \Delta S_1 \cos \alpha_1 \Delta S_{BO} \cos \alpha_2 / r_1^2, \quad (4)$$

где L – яркость участка поверхности ΔS_1 в направлении к входному отверстию объектива, α_1, α_2 – углы между направлением силы света и нормальными к элементам ΔS_1 и ΔS_2 , соответственно. Подставив в (4) выражение для r_1^2 из формулы (1), получим

$$\Delta \Phi_{12} = L \Delta S_2 \Delta S_{BO} \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 / r_2^2. \quad (5)$$

Поскольку фотокамера расположена таким образом, что излучающая поверхность и поверхность матричного фотопреобразователя параллельны, то $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$, и формулу (5) можно записать

$$\Delta \Phi_{12} = L \Delta S_2 \Delta S_{BO} \cos^2 \alpha / r_2^2. \quad (6)$$

Учитывая, что

$$\Delta \Phi_M = \tau \Delta \Phi_{12},$$

освещенность элемента ΔS_2 поверхности матричного преобразователя запишется уравнением

$$E_M = \tau \Delta \Phi_{12} / \Delta S_2, \quad (7)$$

где τ – коэффициент пропускания оптической системы фотокамеры.

Подставляя (6) в (7), получим

$$E_M = \tau L \Delta S_{BO} \cos^2 \alpha / r_2^2. \quad (8)$$

Учитывая (1), (2), уравнение (8) запишем в виде:

$$E_M = \tau L \Delta S_{BO} h_2^2 / (l_2^2 + h_2^2)^2. \quad (9)$$

Из (9) получаем выражение для яркости излучающей поверхности

$$L = E_M (l_2^2 + h_2^2)^2 / (\tau \Delta S_{BO} h_2^2). \quad (10)$$

Для определения освещенности исследуемой поверхности по известной ее яркости используем формулу [8]

$$L = \beta E_1 / \pi, \quad (11)$$

где β – коэффициент яркости рассеивающей поверхности, который определяется отношением яркости данной поверхности к яркости идеального рассеивателя, находившегося в тех же условиях освещения.

Из уравнений (10) и (11) получаем выражение для освещенности исследуемой поверхности

$$E_1 = E_M (l_2^2 + h_2^2)^2 \pi / (\tau \beta \Delta S_{BO} h_2^2). \quad (12)$$

Таким образом, согласно (10) и (12), и зная параметры камеры ΔS_{BO} , h_2 и l_2 мы можем определять яркость и освещенность исследуемого объекта.

Измерение яркости излучающей поверхности. Изображение излучающей поверхности в плоскости матричного оптического преобразователя фотокамеры можно представить в виде функции

$$A = f(x, y),$$

где x, y – координаты пиксела, а f – функция освещенности или яркости исследуемого объекта. Для передачи цвета объекта его изображение в камере формируется комбинацией нескольких монохроматических изображений. В большинстве случаев это происходит в RGB-системе, базовыми цветами в которой есть красный, зеленый и синий [10, 11].

Согласно закону инвариантности, энергетическая яркость изображения светящегося объекта равна его энергетической яркости, умноженной на коэффициент пропускания оптической системы [9, 10]. Для определения яркости излучающей поверхности необходимо ее изображение представить в XYZ-системе. В этой системе координата Y , по определению, соответствует яркости объекта. Такое преобразование является линейным и его можно описать матрицей $M(3 \times 3)$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}.$$

Матрица преобразования имеет вид:

$$M = \begin{pmatrix} 0,6068909 & 0,1735011 & 0,2003480 \\ 0,2989164 & 0,5865990 & 0,1144845 \\ 0,0000000 & 0,0660957 & 1,1162243 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Отсюда яркость представленного в RGB-системе изображения определяется как

$$Y = 0,3R + 0,59G + 0,11B.$$

Большинство изображений в цифровых фотокамерах соответствует стандарту sRGB [12], поэтому более корректной будет формула

$$Y = 0,21R + 0,72G + 0,07B, \quad (14)$$

где R, G и B – координаты цветности.

Градуировка фотокамеры с матричным оптическим преобразователем. Перед тем как проводить светотехнические измерения с помощью фотокамеры с матричным оптическим преобразователем, была проведена ее градуировка. Для этой цели была смонтирована установка, схема которой приведена на рис. 2. В качестве источника света использовали лампу накаливания или светодиод с заданным световым потоком и силой света. Световой поток светодиода дополнительно измеряли

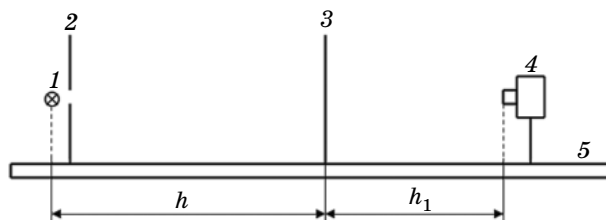


Рис. 2. Схема установки для градуировки фотокамеры с матричным оптическим преобразователем. 1 – источник света, 2 – диафрагма, 3 – экран, 4 – фотокамера, 5 – фотометрическая скамья.

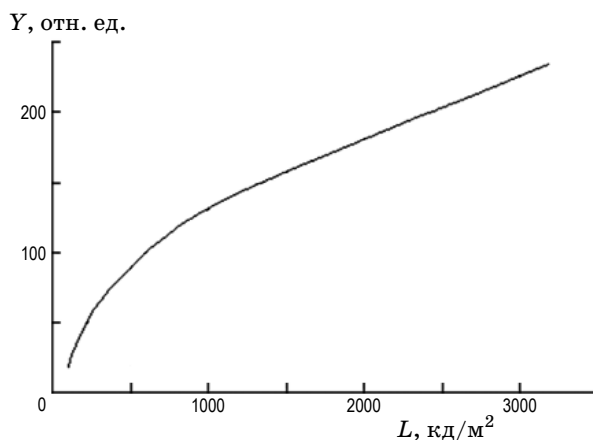


Рис. 3. Зависимость Y -координаты изображения экрана от яркости его излучающей поверхности в направлении объектива камеры.

с помощью интегрального фотометра с диаметром фотометрического шара 0,35 м.

В качестве экрана использовали пластину из матового стекла. Световой поток, прошедший сквозь пластину, диффузно рассеивался, что позволяло считать излучающую поверхность равнояркостной. С помощью люксметра измерялась освещенность его поверхности. Изменение освещенности и соответственно яркости излучающей поверхности производили путем изменения расстояния h от источника света до экрана, тогда как расстояние между экраном и фотокамерой оставалось без изменений и равнялось $h_1 = 1$ м. Яркость излучающей поверхности в направлении объектива фотокамеры определялась по формуле (11). По результатам измерений и расчетов строили градуировочную кривую зависимости яркости изображения или Y -координаты от яркости экрана в сторону объектива фотокамеры при $\Delta S_{\text{В0}} = \text{const}$ (рис. 3).

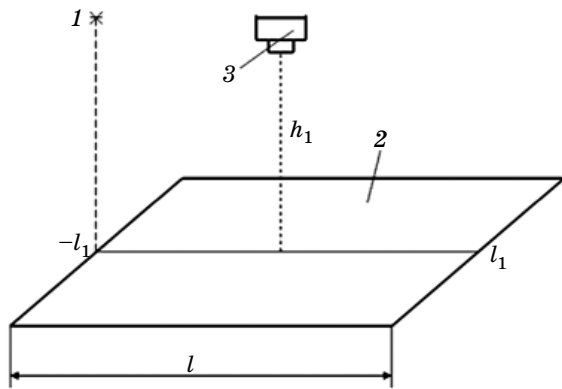


Рис. 4. Схема установки для измерения распределения освещенности (или яркости) диффузно отражающей поверхности. 1 – источник света, 2 – исследуемая поверхность, 3 – фотокамера.

Измерение распределения яркости и освещенности исследуемой поверхности. Для измерения распределения яркости по исследуемой поверхности использовали установку, схема которой приведена на рис. 4. Источником света служил светодиод. Экраном служила белая бумага с коэффициентом диффузного отражения 0,87, который измеряли шаровым фотометром ФМШ-56. Освещенность поверхности экрана измерялась люксметром Ю-116, через каждые 5 см от $-l_1$ до $+l_1$. Источник света 1 размещали на высоте $h = 1,0, 1,5, 2,0$ м. Измерения проводили при постоянном входном отверстии (диафрагме) и постоянном времени засветки матричного преобразователя фотокамеры.

Полученные изображения исследуемой поверхности представлялись в виде цифровых матриц в пакете MATLAB. Эти матрицы с помощью формул (13) и (14) представлялись в виде Y -компоненты XYZ-системы в относительных единицах, которые после этого пересчитывались в яркость или освещенность исследуемой поверхности согласно градуировочных кривых.

На рис. 5 приведены результаты измерения распределения освещенности по поверхности экрана, построенные по изображению, полученному цифровой фотокамерой OLYMPUS E-420. Для обработки результатов измерений яркости и освещенности поверхности исследуемых объектов была создана программа, алгоритм которой заключается в следующем:

* * * * *

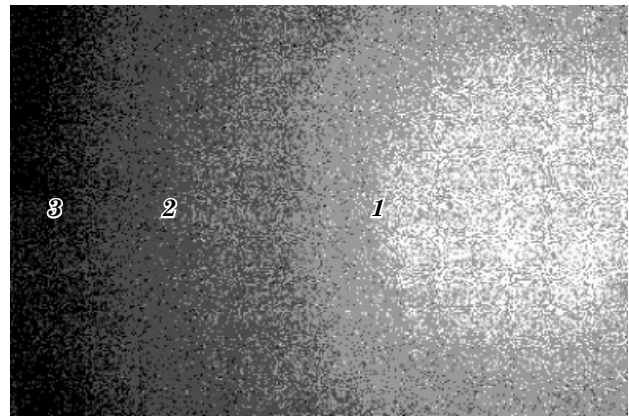


Рис. 5. Распределение освещенности поверхности экрана, полученное с помощью цифровой фотокамеры OLYMPUS E-420. 1 – более 400 лк, 2 – от 400 до 300 лк, 3 – менее 300 лк.

1. Вводим изображение в компьютер.
2. По формуле (14) вычисляем яркость изображения исследуемого объекта.
3. Согласно экспериментальной зависимости $Y(L)$ определяем яркость L поверхности объекта исследования.
4. По формуле (12) рассчитываем его освещенность E_1 .
5. Проводим сравнение E_1 с ранее введенными нормативными значениями освещенности.
6. Для визуализации распределения освещенности выделяем заданные границы нормативных значений соответствующим цветом.
7. Выводим изображение на экран компьютера.

Выводы

1. Построена математическая модель системы излучающая поверхность – фотокамера с матричным оптическим преобразователем для измерения яркости и освещенности поверхности.
2. Разработана методика градуировки матричных оптических преобразователей и фотокамер.
3. Выполнено измерение распределения освещенности и яркости излучающей поверхности и проведено сравнение полученных результатов с нормативными параметрами.
4. Разработано программное обеспечение для расчета освещенности и яркости исследуемых объектов и визуализации их распределения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольф С., Стефанов Е., Римап М. Измерение яркости с помощью камеры на приборе с зарядовой связью // Светотехника. 1995. № 8. С. 8–14.
2. Шмидт Ф. Динамический метод измерения яркостей на дорогах и в туннелях // Светотехника. 2005. № 3. С. 13–16.
3. Вольф Ш., Крюгер У., Шмидт Ф. Применение высокого разрешения в световых и цветовых измерениях // Светотехника. 2005. № 5. С. 57–63.
4. Флодина Т. Л., Черняк А.Ш. Измерения светотехнических параметров установок наружного освещения с помощью мобильной лаборатории // Светотехника. 2007. № 1. С. 20–23.
5. Накамура Й., Симасаки В., Хасимото Т. Метод оценки блескости средств освещения произвольных размеров по их яркостному изображению // Светотехника. 2008. № 1. С. 49–51.
6. Гуо Л., Халонен Л., Экриас А., Элохолма М. Интеллектуальное управление дорожным освещением при различных погодных условиях // Светотехника. 2008. № 2. С. 54–58.
7. Буленгез П., Каре С., Перрото М., Пиранда Б. Новый метод фотометрии ближнего поля // Светотехника. 2008. № 2. С. 34–38.
8. Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы). 2-е изд. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.
9. Мешков В.В. Основы светотехники: Пособие для вузов. М.: Энергия, 1979. 368 с.
10. Jèahne В. Practical handbook on image processing for scientific and technical applications. University of Heidelberg, 2004. 585 p.
11. Гонсалес Р., Вудс Р., Еддинс С. Цифровая обработка изображения в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006. 616 с.
12. Игнатенко А. Откуда берется формула $Y = 0,3R + 0,59G + 0,11B$ для преобразования из цветного RGB-изображения в черно-белое (монохромное)? // Компьютерная графика и мультимедиа. Сетевой журнал. 07.10.2010. Режим доступа <http://cgm.computergraphics.ru/node/2203>.