

УДК 535.247.4; 628.987

**В. Андрійчук, докт. техн. наук; Я. Осадца**

*Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя*

## **ВИМІРЮВАННЯ СВІЛОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВІТНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ФОТОКАМЕР З МАТРИЧНИМИ ОПТИЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ**

*Резюме.* Побудовано математичну модель системи світна поверхня – фотокамера. Розроблено методику градування матричних оптичних перетворювачів та фотокамер на їх основі. Проведено вимірювання яскравості та розподілу освітленості по світній поверхні порівняно з нормативними параметрами.

*Ключові слова:* матричний фотоперетворювач, освітленість, яскравість, цифрова фотокамера, RGB- та XYZ - системи, Y-компонента.

**V. Andriychuk, Y. Osadtsa**

## **THE MEASURING OF LIGHT ENGINEERING CHARACTERISTICS OF LIGHT OBJECTS WITH THE HELP OF CAMERAS WITH MATRIX OPTIC TRANSFORMERS**

*The summary.* The mathematical model of the system: radiative surface – photcamera is created in the article. The method of calibrating of matrix optical transformers and photcameras which are based on these transformers is developed. Software for calculation surface brightness and luminosity from the received image is created. The measuring of brightness and luminosity distribution on a luminous surface with comparing to the normative parameters is done.

*Key words:* matrix transformer of light, luminosity, brightness, digital photcamera, RGB- and XYZ-systems, Y-component.

**Постановка проблеми.** Поява матричних оптичних перетворювачів і фотокамер на їх основі розкриває широкі можливості їх використання для світлотехнічних вимірювань. Ці вимірювання відрізняються від традиційних способів оперативністю, підвищеною точністю, можливістю комп'ютерного опрацювання й записування інформації. Тому виникає необхідність створення методики й технічних засобів для вимірювання світлотехнічних характеристик світних об'єктів за допомогою як матричних фотоперетворювачів, так і фотокамер на їх основі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [1–7] розглянуто дану проблема, але проведені дослідження обмежуються розв'язанням прикладних задач і немає аналітичних розрахунків яскравості як дослідного об'єкта, так і його зображення. Для проведення таких розрахунків необхідно мати математичну модель системи: світний об'єкт – фотокамера. Крім цього, виникає необхідність розроблення методики градування фотокамер й візуалізації результатів вимірювання. Це є **актуальним** для визначення стану зовнішнього освітлення вулиць, об'єктів архітектури, пам'ятників і т.п.

**Метою роботи** є створення математичної моделі системи фотокамера – світна поверхня, яка б дозволяла проводити розрахунки світлотехнічних параметрів світних поверхонь; розроблення методики та експериментальної установки для градування як

матричних приймачів, так і фотокамер з даними приймачами та проведення дистанційних вимірювань розподілу яскравості й освітленості поверхонь світних об'єктів і порівняння їх з нормативними параметрами.

**Побудова математичної моделі.** Розглянемо світну поверхню, яскравість якої підпорядковується закону Ламберта [8]. На цій поверхні виберемо деяку ділянку площею  $\Delta S_1$  (рис.1) з освітленістю  $E_1$ . Фотокамеру з матричним фотоперетворювачем з фокусною відстанню об'єктива  $F$  і площею вхідного отвору  $\Delta S_{e.o.}$  розмістимо на висоті  $h_1$ . Відстань від оптичної системи фотокамери до поверхні матричного фотоперетворювача  $h_2$ .

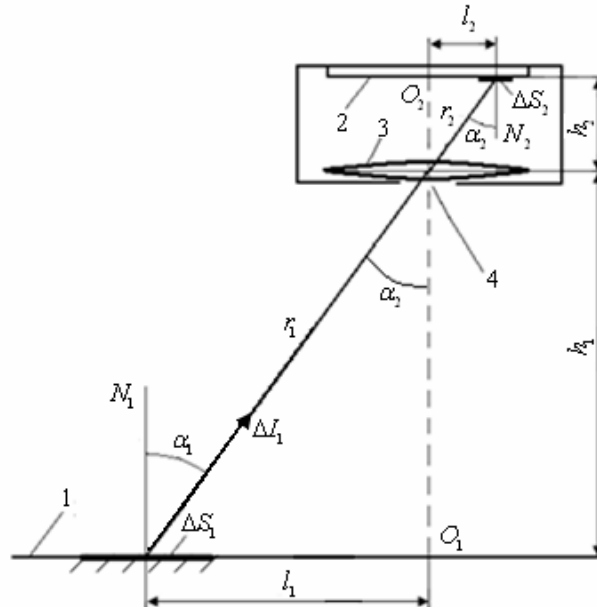


Рисунок 1. Модель системи світна поверхня – фотокамера  
(1 – світна поверхня; 2 – матричний фотоперетворювач; 3 – оптична ланка фотокамери; 4 – вхідний отвір)

Нехай елемент поверхні  $\Delta S_1$  розміщений на відстані  $l_1$  від точки перетину оптичної осі фотокамери з даною поверхнею (точка  $O_1$ ). Його зображення на поверхні матричного фотоперетворювача  $\Delta S_2$ .

Згідно із законами геометричної оптики [9]

$$\frac{\Delta S_1}{r_1^2} = \frac{\Delta S_2}{r_2^2}. \quad (1)$$

Оскільки  $r_1^2 = l_1^2 + h_1^2$ ,  $r_2^2 = l_2^2 + h_2^2$ , то формулу (1) запишемо

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

Освітленість  $E_M$  елемента поверхні  $\Delta S_2$  матричного фотоперетворювача дорівнює

$$E_M = \frac{\Delta \Phi_M}{\Delta S_2}, \quad (3)$$

де  $\Delta \Phi_M$  – світловий потік, який потрапляє на ділянку  $\Delta S_2$  перетворювача.

Світловий потік, що випромінюється від елемента  $\Delta S_1$  і потрапляє на вхідний отвір фотокамери визначається за формулою

$$\Delta\Phi_{12} = L \frac{\Delta S_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \Delta S_{e.o.} \cdot \cos \alpha_2}{r_1^2}, \quad (4)$$

де  $L$  – яскравість ділянки поверхні у напрямку вхідного отвору об’єктива;  $\alpha_1, \alpha_2$  – кути між напрямом сили світла і нормальми до елементів  $\Delta S_1$  і  $\Delta S_2$  відповідно.

Підставимо вираз для  $r_1^2$  з формули (1)

$$\Delta\Phi_{12} = \frac{L \cdot \Delta S_2 \cdot \Delta S_{e.o.} \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{r_2^2}. \quad (5)$$

Оскільки фотокамера розташована так, що світна поверхня і поверхня матричного фотоперетворювача паралельні, то  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ , формулу (5) можна записати

$$\Delta\Phi_{12} = L \frac{\Delta S_2 \cdot \Delta S_{e.o.} \cdot \cos^2 \alpha}{r_2^2}. \quad (6)$$

Враховуючи, що  $\Delta\Phi_M = \tau \cdot \Delta\Phi_{12}$ , то освітленість елемента  $\Delta S_2$  поверхні матричного перетворювача  $E_M$  запишемо у вигляді

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

де  $\tau$  – коефіцієнт пропускання оптичної системи фотокамери.

Підставляючи (6) в (7), отримаємо

$$E_M = \frac{\Delta\Phi_M}{\Delta S_2} = \tau \cdot L \cdot \frac{\Delta S_{e.o.} \cdot \cos^2 \alpha}{r_2^2}. \quad (8)$$

Враховуючи (1) та (2), рівняння (8) запишемо у вигляді

$$E_M = \tau \cdot L \cdot \frac{\Delta S_{e.o.} \cdot h_2^2}{(l_2^2 + h_2^2)^2}. \quad (9)$$

З (9) запишемо вираз для яскравості світної поверхні

$$L = \frac{E_M \cdot (l_2^2 + h_2^2)^2}{\tau \cdot \Delta S_{e.o.} \cdot h_2^2}. \quad (10)$$

Для визначення освітленості досліджуваної поверхні використаємо формулу

$$L = \beta \frac{E_1}{\pi}, \quad (11)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт яскравості поверхні, який визначається відношенням яскравості даної поверхні до яскравості ідеального розсіювача, що знаходиться в тих же умовах освітлення.

З рівнянь (10) та (11) отримаємо вираз для освітленості досліджуваної поверхні

$$E_1 = \frac{E_M \cdot (l_2^2 + h_2^2)^2 \cdot \pi}{\tau \cdot \beta \cdot \Delta S_{e.o.} \cdot h_2^2}. \quad (12)$$

Таким чином, згідно з (10) і (12) та знаючи параметри камери  $\Delta S_{e.o.}$ ,  $h_2$  та  $l_2$ , можемо визначати яскравість та освітленість досліджуваного об’єкта.

**Вимірювання яскравості світної поверхні.** Зображення світної поверхні в площині матричного оптичного перетворювача фотокамери можна представити у вигляді функції  $A = f(x, y)$ , де  $x, y$  – координати пікселя матричного оптичного перетворювача,  $f$  – функція освітленості або яскравості досліджуваного об’єкта. Для передавання кольору об’єкта його зображення в камері формується комбінацією

кількох монохроматичних зображень. У більшості випадків це відбувається в RGB-системі, базовими кольорами в якій є червоний, зелений і синій [10, 11].

Для визначення яскравості світної поверхні необхідно її зображення представити в XYZ-системі. В цій системі координата  $Y$ , за визначенням, дорівнює яскравості об'єкта. Таке перетворення є лінійним, а це означає, що його можна описати матрицею  $M(3 \times 3)$

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

Матриця перетворення має вигляд

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

Звідси яскравість представленого в RGB-системі зображення визначається як  $Y = 0,3 \cdot R + 0,59 \cdot G + 0,11 \cdot B$ . Більшість зображень у цифрових камерах відповідає стандарту sRGB [12], тому більш коректною є формула

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

де  $R, G$  і  $B$  – координати кольоровості.

**Градуювання фотокамери з матричним оптичним перетворювачем.** Перш ніж проводити світлотехнічні вимірювання за допомогою фотокамери з матричним оптичним перетворювачем, проведено її градування. Для цієї мети було змонтовано установку, схема якої зображена на рис. 2. Як джерело світла використовували лампу розжарення або світлодіод із заданою силою світла. Світловий потік світлодіода вимірювали за допомогою інтегрального фотометра з діаметром фотометричної кулі 0,35 м.

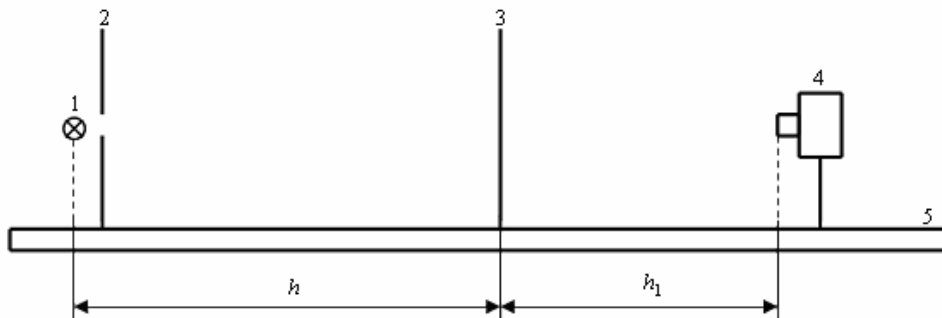


Рисунок 2. Схема установки для градування фотокамери з матричним оптичним перетворювачем (1 – світлодіод; 2 – діафрагма; 3 – екран; 4 – фотокамера; 5 – фотометрична лава)

Як екран використовували пластину з матового скла. Світловий потік, який пройшов крізь пластину, дифузно розсіювався нею, що дозволяло вважати світну поверхню рівнояскравою. Екран зображено на рис. 3. За допомогою люксметра вимірювалася освітленість його поверхні. Зміну освітленості і відповідно яскравості світної поверхні проводили шляхом зміни відстані  $h$  від джерела світла до екрана, тоді як відстань між екраном і фотокамерою залишалася без змін і  $h_1 = 1$  м. За результатами вимірювання побудовано градувальну криву, зображену на рис. 4.

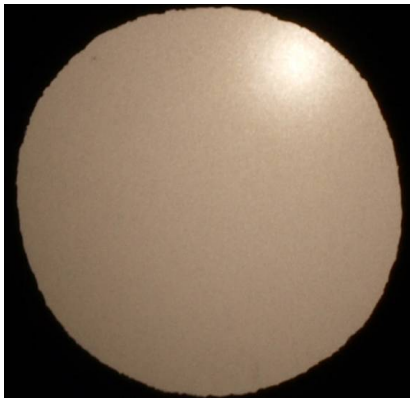


Рисунок 3

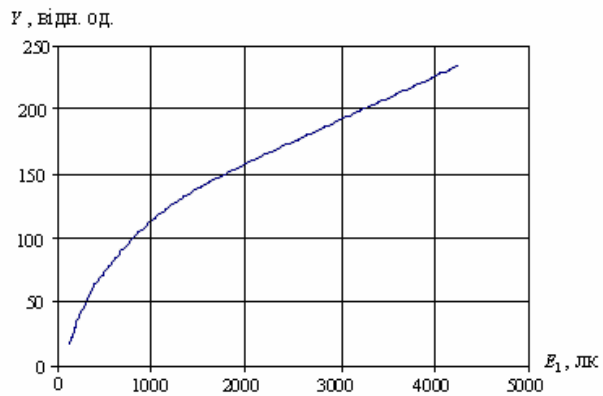


Рисунок 4

Рисунок 3. Зображення екрана

Рисунок 4. Залежність  $Y$  - координати зображення від освітленості екрана

Яскравість світної поверхні в напрямку об'єктива фотокамери визначалися за формулою

$$L = \frac{I_1}{\Delta\sigma_1 \cdot \cos \varphi}, \quad (15)$$

де  $I_1$  – сила світла в напрямку екрана вибраного джерела;  $\Delta\sigma_1$  – площа елемента поверхні екрана;  $\varphi$  – кут між напрямом сили світла  $I_1$  та нормаллю до поверхні екрана.

Нормальну освітленість ( $\varphi = 0$ )  $E_n$  поверхні екрана визначали за формулою

$$E_n = L \cdot \Delta\omega, \quad (16)$$

де  $\Delta\omega$  – тілесний кут, вершина якого лежить на поверхні джерела світла, а основа – на світній поверхні екрана.

За формулою (15) побудували градувальну криву залежності яскравості зображення від яскравості екрана при  $\Delta S_{e.o.} = const$  (рис. 5).

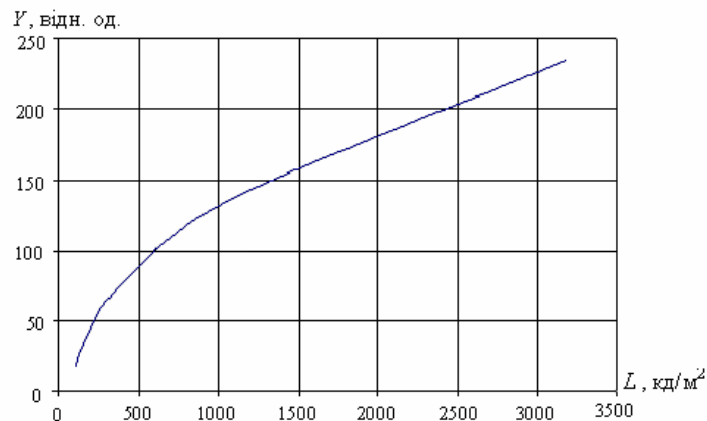


Рисунок 5. Залежність  $Y$  - координати зображення екрана від яскравості світної поверхні екрана в напрямку об'єктива камери

### Вимірювання розподілу яскравості та освітленості досліджуваної поверхні.

Для вимірювання розподілу яскравості по досліджуваній поверхні використовували установку, схема якої зображена на рис. 6. В якості джерела світла використовували світлодіод.

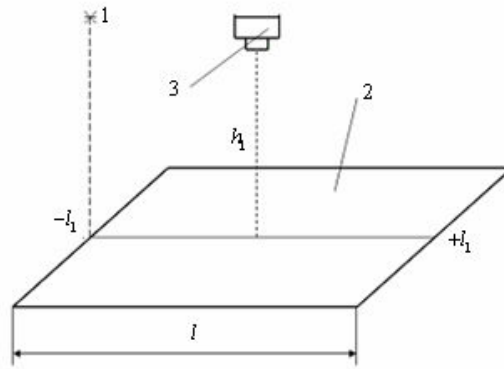


Рисунок 6. Вимірювання освітленості  
(1 – джерело світла; 2 – досліджувана поверхня; 3 – фотокамера)

В якості екрана використовували білий папір з коефіцієнтом дифузного відбивання 0,87, вимірний за допомогою кульового фотометра ФМШ – 56. Освітленість поверхні екрана вимірювали за допомогою люксметра Ю – 116 через кожні 0,05 м від  $-l_1$  до  $l_1$ . Джерело світла 1 розміщували на висоті  $h = 1,0; 1,5; 2,0$  м. Вимірювання проводили при заданому постійному входному отворі (діафрагмі) і постійній експозиції матричного перетворювача фотокамери.

Отримані зображення досліджуваної поверхні представляли у вигляді цифрових матриць у пакеті MATLAB. Ці матриці за допомогою формул (13) і (14) представляли у вигляді  $Y$ -компоненти XYZ-системи у відносних одиницях, які після цього перераховували у величину яскравості або освітленості досліджуваної поверхні згідно з градууювальними кривими.

На рис. 7 представлені результати вимірювань розподілу освітленості екрана, побудованого за зображенням, отриманим за допомогою цифрової фотокамери OLYMPUS E-420.

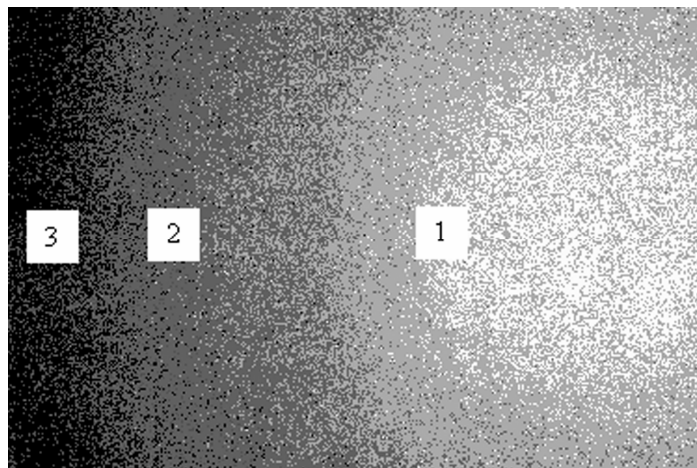


Рисунок 7. Розподіл освітленості світної поверхні екрана, отриманий з допомогою фотокамери OLYMPUS E-420  
(1 – понад 400 лк; 2 – від 400 до 300 лк; 3 – менше 300 лк)

Для опрацювання результатів вимірювань яскравості та освітленості поверхні досліджуваних об'єктів була створена програма, алгоритм якої полягає в наступному:

1. Вводимо зображення в комп'ютер.
2. За формулою (14) обчислюємо  $Y$ -компоненту зображення дослідного об'єкта.
3. Згідно з експериментальною залежністю  $Y(L)$  визначаємо яскравість  $L$  поверхні об'єкта дослідження.

4. За формулою (12) розраховуємо його освітленість  $E_1$ .
5. Проводимо порівняння  $E_1$  з раніше введеними нормативними значеннями освітленості.
6. Для візуалізації розподілу освітленості виділяємо задані межі нормативних значень відповідним кольором.
7. Виводимо зображення на екран комп'ютера.

**Висновки.** Побудовано математичну модель системи: світна поверхня – фотокамера з матричним оптичним перетворювачем для вимірювання яскравості та освітленості поверхні. Розроблено методику градування матричних оптичних перетворювачів та цифрових фотокамер на їх основі. Проведено вимірювання розподілу освітленості та яскравості світної поверхні та порівняно з нормативними параметрами. Розроблено програмне забезпечення для розрахунку освітленості та яскравості досліджуваних об'єктів і візуалізації їх розподілу.

#### **Література**

1. Вольф С. Измерение яркости с помощью камеры на приборе с зарядовой связью / С. Вольф, Е. Стефанов, М. Риман // Светотехника. – 1995. – № 8. – С. 8–14.
2. Шмидт Ф. Динамический метод измерения яркостей на дорогах и в тунелях / Франц Шмидт // Светотехника. – 2005. – № 3. – С. 13–16.
3. Вольф Ш. Применение высокого разрешения в световых и цветовых измерениях / Ш. Вольф, У. Крюгер, Ф. Шмидт // Светотехника. – 2005. – № 5. – С. 57–63.
4. Флодина Т.Л. Измерения светотехнических параметров установок наружного освещения с помощью мобильной лаборатории / Т.Л. Флодина, А.Ш. Черняк // Светотехника. – 2007. – № 1. – С. 20–23.
5. Накамура Й. Метод оценки блёскости средств освещения произвольных размеров по их яркостному изображению / Й. Накамура, В. Симазак, Т. Хасимото // Светотехника. – 2008. – № 1. – С. 49–51.
6. Интеллектуальное управление дорожным освещением при различных погодных условиях / Л. Гуо, Л. Халонен, А. Экриас, М. Элохолма // Светотехника. – 2008. – № 2. – С. 54–58.
7. Новый метод фотометрии ближнего поля / П. Буленгез, С. Каре, М. Перродо, Б. Пиранда // Светотехника. – 2008. – № 2. – С. 34–38.
8. Гуревич М.М. Фотометрия (теория, методы и приборы) / М.М. Гуревич; [2-е изд., перераб. и доп.]. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с., ил.
9. Мешков В.В. Основы светотехники: учеб. пособие [для вузов]. Ч1 / В.В. Мешков. [2-е изд., перераб.]. – М.: Энергия, 1979. – 368 с., ил.
10. Jèahne V. Practical handbook on image processing for scientific and technical applications / Berne Jèahne. – [2<sup>nd</sup> ed.] – University of Heidelberg – 2004. – 585 p.
11. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображения в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С.Еддинс.; пер. с англ. В.В. Чепижова. – Москва: Техносфера, 2006. – 616 с.
12. Откуда берется формула  $Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B$  для преобразования из цветного RGB-изображения в черно-белое (монохромное)? [Электронный ресурс] / Алексей Игнатенко // Компьютерная графика и мультимедиа. Сетевой журнал. – [Цит. 2010, 7 жовтня]. – Режим доступа к журн.: <http://cgm.computergraphics.ru/node/2203>.

*Отримано 06.12.2010*