

УРЕД ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА МЕЗОПИЧНА ЯРКОСТ

Ангел Пачаманов, Димитър Павлов

Резюме: Оптична система и фотоприемник; Защо CCD-елемент, а не фотоелемент с интегрираща сфера; Филтри за корекция на спектралната чувствителност на фотоприемника според категорията улица; Апаратно и програмно обезпечаване на решението.

Ключови думи: мезопично зрение, измерване на яркост при ниски светлинни нива

MESOPIC LUMIANCEMETER

Angel Pachamanov, Dimitar Pavlov

Abstract: Optical system and photoreceiver; Why CCD-array, not a photoelectric cell with an integrating sphere? Filters for correction the spectral sensitivity of the receiver by category street; Hardware and software support of decision.

Keywords: mesopic photometry, measurement of luminance in low light levels

1. Въведение

Зрителното усещане е пропорционално на осветеността на участъка от ретината, където е проектиран обрънатият образ на наблюдаваната повърхност. Един и същи поток, излъчен от малка и голяма повърхности предизвиква по-силно усещане в полза на по-концентрирания образ от малката повърхност, тъй като в тази част на ретината биохимичните реакции са по-интензивни. Величината, изразяваща тази особеност на зрението се нарича „яркост” и се представя със светлинния поток, равномерно разпределен в пространствения ъгъл ω , под който се вижда зеницата на окото, разделен на проекцията S' на излъчващата повърхност в равнина с нормала към наблюдателя. За да може светещата повърхност да се възприема като точков излъчвател и връх на пространствения ъгъл ω , разстоянието между нея и наблюдателя трябва да бъде около 10 пъти по-голямо от размера y , при което:

$$(1) \quad L = \frac{I}{S'} = \frac{\Phi/w}{S'}$$

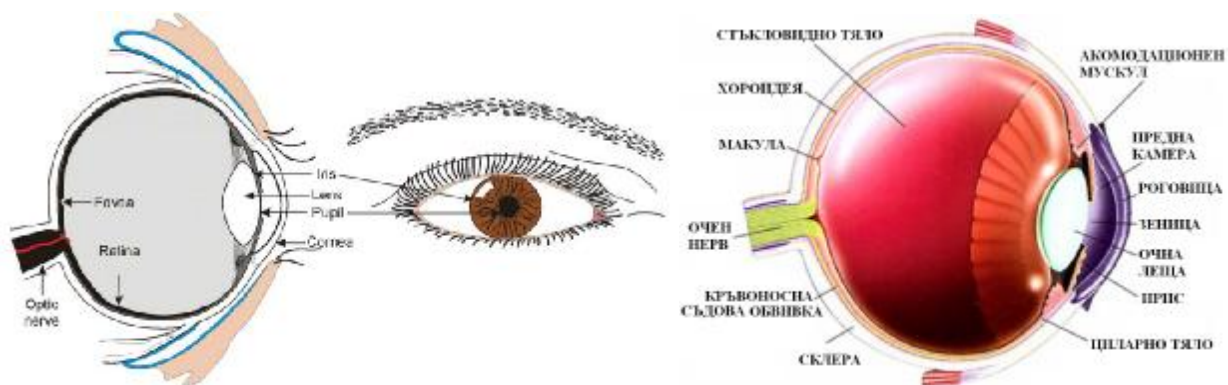


На фиг.1 и фиг.2 е показано устройството на зрителния анализатор. При адаптация на окото към нива на яркост над 5 cd/m^2 (дневно зрение, осигурявано от три типа фоторецептори с форма на колбички, разположени основно в централната част на ретината) зрителното усещане е пропорционално на т.н. фотопичен поток:

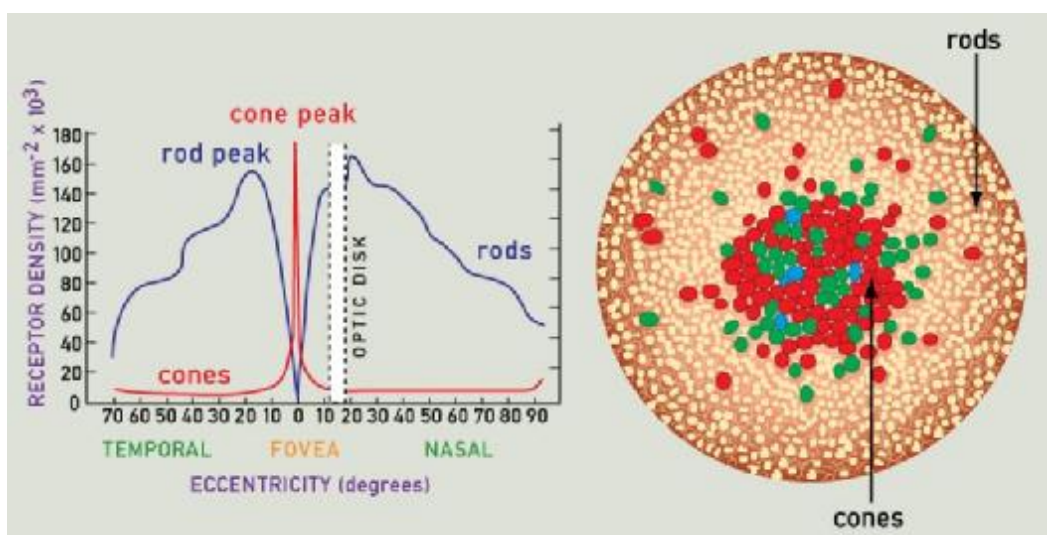
$$(2) \quad \Phi = 683 \sum_{i=1}^n j(I_i) \cdot V(I_i) \cdot \Delta I \quad [\text{lm}],$$

където 683 [lm/W] е максималната спектрална светлинна ефективност на дневното зрение (за $\lambda_m = 555 \text{ nm}$); $j(I_i) = \Delta\Phi_e(I_i) / \Delta I \text{ [W/nm]}$ са стойности на спектралната плътност на лъчистия поток $\Phi_e \text{ [W]}$ в диапазона $380\text{-}780 \text{ nm}$; $V(\lambda_i)$ са стойности на относителната спектрална чувствителност на дневното зрение; $\Delta\lambda$ е стъпка за дискретизация на спектралния диапазон $380\text{-}780 \text{ nm}$.

Величината фотопична яркост L , изчислена по формула (1), е приета за основна величина в стандарта за улично осветление [1], като нормираната ѝ стойност е за поток Φ , определен по уравнение (2). Стойността ѝ се „покрива“ с възприеманата *светлост* (brightness) само при осветяване на сиви повърхности, тъй като спектрална чувствителност на дневното зрение $V(\lambda)$ е определена за такава повърхност. В действителност при една и съща измерена яркост сините повърхности се възприемат като по-светли от червените (ефект на Пуркине).



Фиг.1. Устройство на зрителния анализатор



Фиг.2. Разположение на двата вида фоторецептори по ретината

При адаптация на окото на яркост под $0,005 \text{ cd/m}^2$ (нощно зрение, осигурявано от фоторецептори с форма на пръчици, разположени по цялата ретина, с изключение на централната ѝ част) зрителното усещане е пропорционално на т.н. скотопичен поток:

$$(3) \quad \Phi' = 1700 \sum_{i=1}^n j(I_i) \cdot V'(I_i) \cdot \Delta I,$$

където 1700 [lm/W] е максималната спектрална светлинна ефективност на нощното зрение (при $\lambda_m = 507 \text{ nm}$); $V'(\lambda_i)$ са стойности на относителната спектрална чувствителност на нощното зрение.

Величината скотопична яркост L' се дефинира като в уравнение (1) вместо Φ , изчислен по (2) се замести Φ' , изчислен по (3). При ниски яркостни нива (фотопична яркост под $0,005 \text{ cd/m}^2$) възприеманата светлост (brightness) при цветни повърхности съответства на измерената стойност L' , тъй като при нощното зрение всичко се вижда в нюанси на сивото.

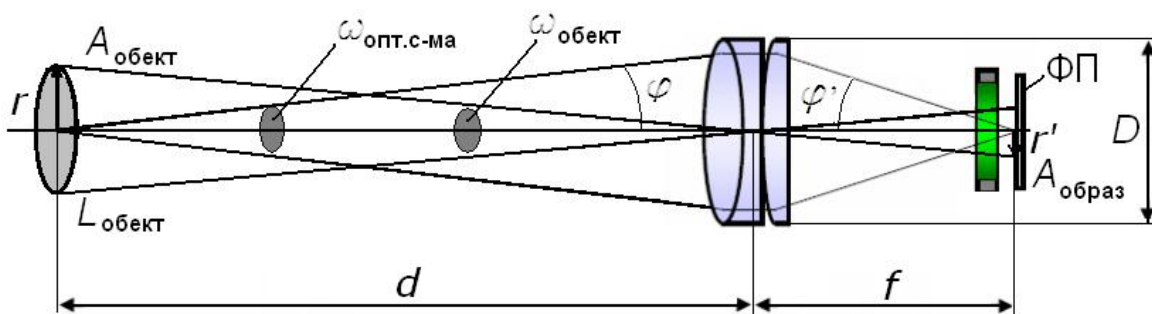
Разликата между това, което се измерва (фотопична яркост) и това което се вижда (светлост) е най-силно изразена в яркостния интервал от 5 до $0,005 \text{ cd/m}^2$, в който фоторецепторите на двете системи «работят» едновременно. За този диапазон се въвежда величината „мезопична яркост“ L_{mes} , която по подобие на фотопичната яркост L се определя по (1), но за ефективен поток Φ_{mes} [2], получен по формулата:

$$(4) \quad \Phi_{mes} = \frac{683}{V_{mes}(I_0)} \sum_{i=1}^n j(I_i) \cdot V_{mes}(I_i) \cdot \Delta I,$$

където $V_{mes}(\lambda_0)$ е стойността на функцията $V_{mes}(\lambda)$ при $\lambda = 555 \text{ nm}$, а $\varphi(\lambda)$ – спектралната плътност на лъчистия поток [$\text{W} \cdot \text{nm}^{-1}$]. Спектралната чувствителност на мезопичното зрение $V_{mes}(\lambda)$ се определя като линейна функция на кривите за дневно и нощно виждане $V(\lambda)$ и $V'(\lambda)$ [2]:

$$(5) \quad V_{mes}(I) = [m \cdot V(I) + (1 - m) \cdot V'(I)] / M(m),$$

където $0 \leq m < 1$, а $M(m)$ е нормализираща функция, избрана така, че максималната стойност на $V_{mes}(\lambda)$ да се получи 1. Когато $m = 1$, $V_{mes}(\lambda) = V(\lambda)$ – зрението е фотопично; когато $m = 0$, $V_{mes}(\lambda) = V'(\lambda)$ – зрението е скотопично.



Фиг.3. Принципна схема на уред за измерване на яркост (фотопична, мезопична или скотопична – в зависимост от филтъра за спектрална корекция на ФП)

При проектиране на уред за измерване на мезопична яркост всички изложени по-горе особености на зрението трябва да бъдат съобразени в максимална степен. На фиг. 3 е показана принципна схема на яркомер, чиито филтри за спектрална корекция са от типа, изчислени в [3].

2. Същинска част

Оптична система и фотоприемник

Част от изложените в т.1 „принципни положения”, заедно с резултата от изследване на възможността за използване на различни фотоприемници са разгледани в [4]. При фотоприемник с интегрална чувствителност S [A/lm] и относителни загуби в оптичната система ($1-\eta$), стойността на фототока I_{ph} при различна площ на обекта $A_{обект}$ се определя от израза:

$$(6) \quad I_{ph} = S \cdot h \cdot \Phi_D = S \cdot h \cdot I_{обект} \cdot \omega_{опт.с-ма} = S \cdot h \cdot L \cdot A_{обект} \cdot \omega_{опт.с-ма},$$

където $A_{обект} = \omega_{обект} \cdot d^2$ е площ (фиг.3), перпендикулярна на направлението на наблюдение, а пространственият ъгъл $\omega_{опт.с-ма} = \pi \cdot D^2 / (4 \cdot d^2)$ се определя от диаметъра D на отвора на яркомера и разстоянието до обекта d :

$$(7) \quad I_{ph} = S \cdot h \cdot L \cdot \omega_{обект} \cdot \frac{p \cdot D^2}{4},$$

т.е. при известна интегрална чувствителност на фотоприемника S и зададена минимална яркост на обекта L големината на фототока I_{ph} еднозначно се определя от диаметъра D на входящия отвор на оптичната система и пространствения ъгъл $\omega_{обект} = A_{обект} / d^2$.

В табл.1 са дадени изчислени решения [4], които гарантират проектиране на участък от пътното платно като “образ” върху цялата площ на фотоелемента при сигнал, надхвърлящ 1 път нивото на шума.

Табл.1

Избор на оптична система и фотоприемник* на яркомер за улично осветление

η	$L, \text{ cd/m}^2$	$D, \text{ mm}$	$f, \text{ mm}$	$\alpha, ^\circ$	$d, \text{ m}$	$S, \text{ nA/lx}$	$A, \text{ mm}^2$	$I_{dark}, \text{ nA}$	$E, \text{ lx}$	$I_{ph}, \text{ nA}$
0,9	20	40	100	1	80	56	100	8	0,272	11,5
0,9	10	50	100	1	80	56	100	8	0,133	9,0
0,9	5	80	100	1	80	56	100	8	0,061	11,5
0,9	1**	300	200	1	80	350	600	32	0,0023	33,8

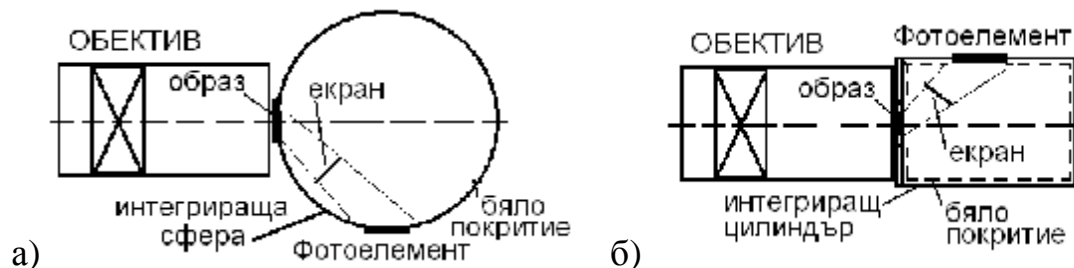
* фотоелемент OSD60-E с активна площ 100 mm^2 , диаметър $11,3 \text{ mm}$; интегрална чувствителност $S=56 \text{ nA/lx}$; ток на тъмно 8 nA ;

** четвъртият вариант е само за илюстрация, в случай че се използва фотоелемент с активна площ 600 mm^2 , с диаметър 25 mm . Заради по-високата чувствителност с него може да се измерва яркост до 1 cd/m^2 , но при диаметър на обектива 300 mm !

Защо CCD-матрица, а не фотоелемент с интегрираща сфера

Изложените по-горе постановки важат при измерване на равномерно обект, когато образът му запълва изцяло приемната повърхност на фотоелемента – по дефиниция яркостта е интензитет, разделен на проекцията на светещата площ, а интензитетът - поток от обекта, равномерно разпределен в пространствения ъгъл $\omega_{опт.с-ма}$. Това е причината при измерване на средна яркост на неравноярък

обект (например 20-градусово поле на адаптация на водач на МПС преди навлизане в тунел) да се използва една от показаните на фиг.4 конструкции за измерване на средна яркост. Интегриращите обеми, сфера (а) или цилиндър (б), осигуряват многократни отражения на постъпващия поток с образа на обекта, като с екран е осигурено до фотоелемента да не достигат директни лъчи.



Фиг.4. Яркомери за измерване на средна яркост на обекти

При наличие на многократни отражения от дифузно-отразяващо бяло покритие установеният в сферата светлинен поток е:

$$(8) \quad \Phi_{УСТАНОВЕН} = \Phi_{ОБРАЗ} \frac{r}{1-r},$$

където r е интегралният коефициент на отражение на бялото покритие.

Нека радиусът на интегриращата сфера е равен на диаметъра на отвора на оптичната система и приемем, че образът е фокусиран на площ 100 mm^2 (ред 1 от табл.1). Тогава $r_{сфера} = D_{обектив} = 40 \text{ mm}$, а вътрешната повърхност на сферата е $4 \cdot \pi \cdot r^2 = 4 \cdot 3,14 \cdot 40^2 = 20096 \text{ mm}^2$, т.е. около 200 пъти по-голяма от площта на образа на обекта. Бялото покритие, с което е покрита вътрешната повърхност на сферата, обикновено е бариев сулфат с интегрален коефициент на отражение $\rho = 0,9$. Тогава осветеността на вътрешната повърхност на сферата (и върху приемната повърхност на фотоелемента) ще бъде:

$$(9) \quad E_{СФЕРА} = \frac{\Phi_{УСТАНОВЕН}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \Phi_{ОБРАЗ} \frac{r}{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (1-r)} = \frac{9}{0,020096} = 447,85 \cdot \Phi_{ОБРАЗ}.$$

В случая, когато образът директно се проектира върху фотоелемент (фиг.3) с площ 100 mm^2 ($0,0001 \text{ m}^2$) осветеността ще бъде:

$$(10) \quad E_{ФЕ} = \Phi_{ОБРАЗ} / 0,000100 = 10000 \cdot \Phi_{ОБРАЗ},$$

т.е. при директно фокусиране и приетите размери на сферата сигналът е

$$(11) \quad E_{ФЕ} / E_{СФЕРА} = 10000 / 447,85 = 22,22$$

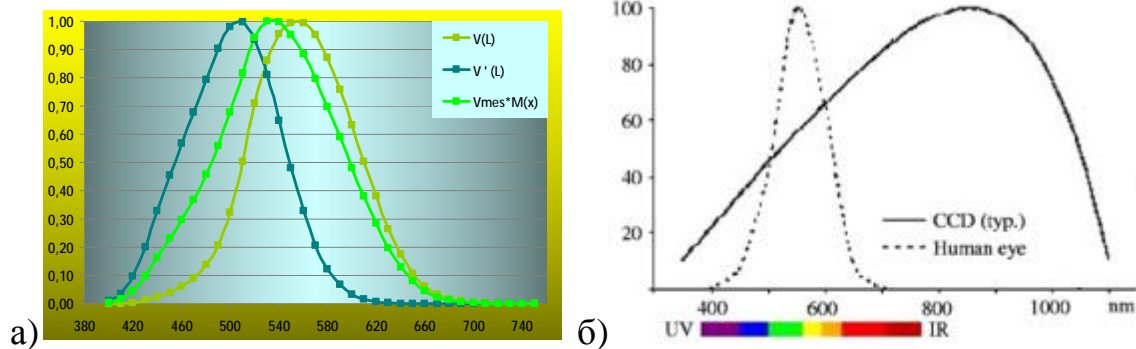
пъти по-голям, спрямо този при използване на интегрираща сфера.

Изводът е, че яркомер с интегрираща сфера може да се използва за случаи, когато прагът на минималната яркост, която се измерва, е висок (напр. за адаптационни яркости от 100 до 5000 cd/m^2 преди навлизане в пътни тунели), или когато интегралната чувствителност на фотоприемника е много висока.

Филтри за спектрална корекция на приемника според категорията улица. Апаратно и програмно обезпечаване на решенията

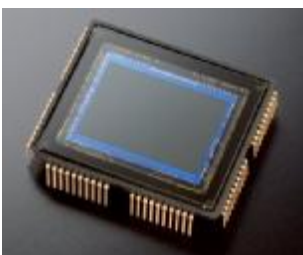
От формула (11) се вижда, че фотоприемник с интегрираща сфера дава значително по-нисък сигнал спрямо случая с директно проектиране на образа върху него (фиг. 3). Като се има предвид, че при измерване на мезопична яркост ($0,3-2 \text{ cd/m}^2$, според категорията улица) пред фотоприемника се поставят и филтри за спектрална корекция (фиг.5а), условието за чувствителност на фотоприемника се удовлетворява единствено с използване на CCD-елемент (Charge Coupled Device). Заради високата си чувствителност CCD-елементите първо са приложени в астрономията. С тях значително се намаляват размерите на оптичните устройства за наблюдаване на небесните тела. Сега те са основен елемент на всяка охранителна камера, цифров фотоапарат или WEB-камера. Принципът на действие се основава на натрупване на заряди в елементарни «фотоелементи» за продължителен период от време, при което е възможно регистриране на многократно по-ниски яркости от тези при използване на класическите фотоелементи.

При използване на CCD-елемент с интегрираща сфера филтрите за спектрална корекция се поставят на отвора на интегриращата сфера (фиг.4а) и са разработени с пълно и частично филтриране на потока [5]. Такива яркомери може да се използват при измерване на средна стойност на мезопичната яркост в диапазона $0,3 - 2 \text{ cd/m}^2$ (за нуждите на контрола и управлението на улични осветителни уредби, проектирани по мезопична яркост). Удачно е да се използва евтин CCD-елемент от «черно-бяла» охранителна камера.



Фиг.5. Спектрална чувствителност: а) на човешко зрение - скотопично $V'(\lambda)$, мезопично $V_{mes}(\lambda)$ за 0.3 cd/m^2 и фотопично $V(\lambda)$; б) на CCD матрица (силициеви фотоелементи със спектрална чувствителност $s(\lambda)$)

За измерване на ниски стойности на мезопична яркост ($0,005-0,5 \text{ cd/m}^2$) е удачно чрез специално подбран обектив да се осигури фокусиране на измерваното поле върху CCD-елемента ($1/4''$). Тогава се използва само филтър с пълно филтриране на потока, който се поставя пред обектива на използваната "черно-бяла" камера. В този случай «прицелването» в частта от улицата, подлежаща на измерване, се прави чрез изображението ѝ върху екрана на използвания дисплей. С допълнително програмно осигуряване е възможно определяне на



разпределението на яркостта по пътното платно и на средната яркост. При по-сложна система може да се осигури и автоматичен избор на филтър за спектрална корекция, така че яркомерът да отговаря на естествените процеси в зрителния анализатор, изложени в т.1.

3. Заключение

Разгледаните особености при измерване на мезопична яркост са база за по-нататъшно конкретизиране на нуждите от измервателна апаратура за контрол на осветлението по категории улици. Предвижда се разработване на няколко типа яркомери, с помощта на които ще бъде възможно провеждане на изследвания в мезопичната област при реални пътни условия.

Благодарности

Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ-София-2012 г., научен проект в помощ на докторант «Мезопична фотометрия и енергийна ефективност в уличното осветление», договор № 121ПД0037-01/26.04.2012.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] БДС EN 13201-2:2003. Улично осветление. Част 2: Технически изисквания
- [2] CIE 191:2010 “Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance”
- [3] Пачаманов А., Д. Павлов. Филтри за спектрална корекция на фотоприемници при измерване на мезопична яркост. IV Научна конференция ЕФ 2012, 28.09-01.10.2012, гр. Созопол
- [4] Пачаманов А. Измерване на скотопична и мезопична яркост. IV Научна конференция ЕФ 2012, 28.09-01.10.2012, гр. Созопол
- [5] Пачаманов А., Д. Пачаманова. Оптимизационни модели за спектрална корекция на фотоприемници чрез пълно и частично филтриране на потока. IV Научна конференция ЕФ 2012, 28.09-01.10.2012, гр. Созопол

Автори:

Ангел Саракинов Пачаманов, д-р инж. – професор в катедра “Електро-снабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” (pach@tu-sofia.bg), р-л НИИКЛ “Осветителна техника” (www.onilot.com)

Димитър Тодоров Павлов, маг. инж. – редовен докторант в катедра “Електро-снабдяване, електрообзавеждане и електротранспорт” (dpavlov@tu-sofia.bg), отговорен изпитвател в НИИКЛ “Осветителна техника” (www.onilot.com)