

ОДРЕЂИВАЊЕ ТЕМПЕРАТУРЕ БОЈЕ ИЗВОРА СВЕТЛОСТИ СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЈСКОМ МЕТОДОМ

Владан Шкерковић, *Савезни завод за мере и драгоцене метале*
Предраг Вукадин, *Савезни завод за мере и драгоцене метале*
Вељко Зарубица, *Савезни завод за мере и драгоцене метале*

Садржај - Температуру боје, која представља један од најзначајнијих параметара којима се карактеришу извори светлости, могуће је одредити визуелном методом, филтерским (интегралним) методама и спектрорадиометријском методом. У раду је описана спектрорадиометријска метода као фундаментална метода којом се одређује температура боје, и дати су резултати мерења за групу од три инкадесцентне сијалице.

1 УВОД

Вештачки извори светлости који производе зрачење чији је спектрални састав сличан зрачењу апсолутно црног тела, колориметријски се описују преко параметара који одговарају апсолутном црном телу.

Температура радијације је температура црног тела за коју радијација на датој таласној дужини има исту спектралну густину као радијација посматраног извора.

Температура расподеле се дефинише као температура црног тела при којој су ординате криве спектралне расподеле његове радијације у видљивој области спектра, пропорционалне ординатама криве спектралне расподеле посматраног извора.

За описивање извора у пракси је погоднија такозвана температура боје, које се дефинише као температура црног тела при којој његово зрачење има исту боју као посматрано зрачење. Овај параметар се одређује према положају тачке, која одговара хроматичности те светлости, на кривој црног тела, приказаној на слици 1.

Када су у питању извори, као што су флуоресцентне сијалице, чија се релативна спектрална расподела знатно разликује од спектралне расподеле црног тела, односно, када боја извора није представљена тачком на кривој црног тела, користи се такозвана корелациона температура боје, која представља температуру најближу одговарајућој на графику хроматичности [1]. Практично одређивање корелационе температуре боје врши се помоћу правих константе T_b нацртаних под неким углом (у униформном простору боја (Luv) у питању је прав угао) на криву црног тела, (Слика1).

Температура боје (T_b) један је од најважнијих параметара којим се описују извори светлости, односно њихова колориметријска својства. Поред свог значаја за

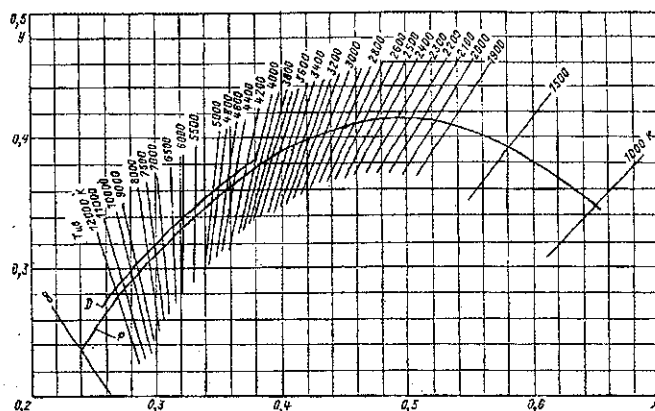
колориметрију, температура боје је веома битна у фотометрији, имајући у виду да је еталонирање по температури боје саставни део свих фотометријских калибрација. Такође, један је од најважнијих параметара о којима треба водити рачуна при избору извора светлости код пројектовања осветљења.

2 МЕТОДЕ ОДРЕЂИВАЊА ТЕМПЕРАТУРЕ БОЈЕ

Постоје два основна прилаза мерењу фотометријских и колориметријских својстава извора светлости и зрачења.

- Широко-појасна мерења, односно помоћу пријемника чија је спектрална осетљивост у складу са спектралном осетљивошћу CIE (Commission internationale de l'éclairage) Стандардног фотометријског посматрача за фотопско или скотопско виђење, или са тристимулусним колориметрима чије спектралне осетљивости одговарају онима од CIE 1931 Колориметријског посматрача или су њихове линеарне трансформације.
- Спектрорадиометријска мерења спектралне расподеле извора зрачења.

Основна потешкоћа интегралних метода је што је веома тешко ускладити релативне спектралне осетљивости пријемника да се поклапају са CIE фотометријским и колориметријским посматрачем, тако да је у сваком случају, за одређене карактеристике извора светлости потребно познавати њихове спектралне расподеле макар у релативном облику.



Слика 1. Крива црног тела са правима константне температуре боје на хроматском дијаграму

У складу са овим, и температуру боје је могуће одредити на више начина, и то: визуелном методом, филтерским (интегралним) методама, и спектрорадиометријском методом.

Филтерска метода подразумева одређивање односа B/R или G/R , где R (црвено), G (плаво) и B (зелено) представљају одзиве детектора чија је спектрална осетљивост прилагођена R , G и B кривама мешања боја [1]. Ово се углавном постиже изменом одговарајућих филтера (не морају бити R , G , B криве мешања боја, већ је битно да издвајају делове спектра виших и нижих таласних дужина) на путу светлосних зрака испред детектора. Овако добијени однос је јединствен за сваку температуру боје [2]. Филтерска метода је метода поређења за коју је потребно постојање еталона одговарајуће температуре боје са којим се пореди испитивани извор.

За разлику од филтерске методе, спектрорадиометријска метода је основна метода одређивања температуре боје и за њу није потребно постојање еталона познате температуре боје. Спектрорадиометријском методом се врши иницијално одређивање температуре боје извора светлости. Ова метода заснива се на прорачуну трихроматских вредности на основу познавања спектралне расподеле снаге зрачења извора светлости. У пракси се ово своди на:

$$R = \sum \Phi_x(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda; \quad G = \sum \Phi_x(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda; \\ B = \sum \Phi_x(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где је: $\Phi_x(\lambda)$ - спектрална расподела снаге зрачења,

$\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ - релативне криве мешања боја.

Прорачун трихроматских вредности у СИЕ (XYZ) стандардном колориметријском координатном систему, врши се помоћу формула:

$$X = \int_{380nm}^{760nm} E_\lambda \bar{x}_\lambda d\lambda; \quad Y = \int_{380nm}^{760nm} E_\lambda \bar{y}_\lambda d\lambda; \\ Z = \int_{380nm}^{760nm} E_\lambda \bar{z}_\lambda d\lambda \quad (2)$$

где је E_λ спектрална озраченост датог извора светлости.

Код практичних прорачуна интеграција се своди на сумирање одговарајућих производа за низове таласних дужина:

$$X = \Delta\lambda \sum_x E_\lambda \bar{x}_\lambda; \quad Y = \Delta\lambda \sum_x E_\lambda \bar{y}_\lambda; \\ Z = \Delta\lambda \sum_x E_\lambda \bar{z}_\lambda \quad (3)$$

Хроматске координате x и y могу се изразити као:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (4)$$

Интервал $\Delta\lambda$ бира се од (1-20) nm, у зависности од тога која се тачност захтева.

Како су криве мешања боја спецификоване у облику релативних вредности на ординати, трихроматске вредности израчунате помоћу ових кривих имаће релативни карактер [1]. Ординате кривих мешања боја x, y, z , које су потребне за посматрани метод прорачуна, обично су дате табеларно.

Одређивање корелационе температуре боје врши се учртавањем тачке са овако добијеним хроматским координатама на дијаграм са правима константне температуре боје нанетим под правим углом на криву црног тела, (Слика 1).

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТАВКА МЕТОДЕ

Суштина методе састоји се у одређивању спектралне ирадијације (озрачености) испитиваног извора светлости. Скала температуре боје директно је везана за скалу спектралне ирадијације, при чему је за одређивање температуре боје довољно познавати само релативну спектралну расподелу ирадијације.

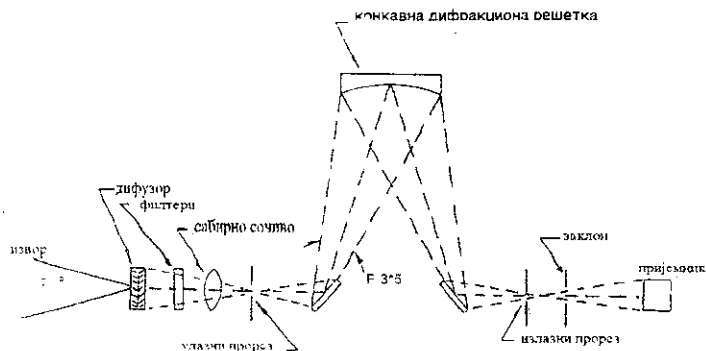
Сва спектрорадиометријска мерења су у основи релативног типа и укључују поређење испитиваног извора са еталонским извором зрачења (еталоном спектралне ирадијације) [2], односно коришћењем спектрорадиометра чија је укупна спектрална осетљивост претходно одређена еталонирањем.

Због непостојања еталонског извора зрачења са познатим спектралним вредностима, одређивање спектралне расподеле извора није вршено поређењем два извора (еталонски и испитивани), већ је то урађено коришћењем спектрорадиометра са апсолутно одређеном спектралном осетљивошћу (метролошка следивост према NIST-у (National Institute of Standards and Technology)).

Као извор светлости чија се температура боје мери, коришћена је волфрам-халогена сијалица која је претходно еталонирана B/R методом са тачношћу ± 30 K, са метролошком следивошћу према BIPM - у (Bureau International des Poids et Mesures). Сијалица се поставља на фотометријску клупу у осци са пријемником зрачења (референтна равна спектрорадиометра) у оквиру просторног угла од $\pm 5^\circ$, гледано од стране равни дифузора.

За напајање сијалица користи се стабилизисани извор једносмерне струје стабилности реда 1×10^{-5} . Струја напајања се мери дигиталним волтметром са седам и по цифара (са грешком од 5×10^{-6}) као пад напона на еталонском отпорнику од 0,01 Ω класе тачности 0,002.

Мерење спектралне ирадијације најчешће се врши спектрорадиометром (Слика 2) чије основне компоненте сачињавају монохроматор и детектор зрачења.



Слика 2. Оптичка шема спектрометра

Пропуштајући дифузор има за циљ да делопаризује зрачење пре уласка у монохроматор. Раван дифузора је референтна за све калибрације и у односу на њу се одређује растојање од извора.

Четири филтера су употребљена да елиминишу више хармонике таласних дужина које производи дифракциона решетка монохроматора.

Монохроматор (Слика 2), као дисперзиони елемент користи конкавну дифракциону решетку која покрива спектрални опсег од (200-1100) nm.

Тачкасти извор зрачења постављен унутар конуса од 10° гледано од стране дифузора, производи равномеран излаз (из дифузора) у оквиру 3%. Сабирно сочиво пројектује дифузор на дифракциону решетку, тако да је положај пројекције дифузора на дифракциону решетку независан од положаја извора зрачења у видном пољу.

Тачност постављања таласних дужина је $\pm 1,0$ nm у видљивом делу спектра (380-760) nm. Поновљивост постављања таласне дужине је у оквиру $\pm 0,5$ nm. Минимална резолуција очитавања таласне дужине је 0,2 nm.

Расуто зрачење у најгорем случају са волфрамом сијалицом као извором и коришћеним пријемником зрачења је $\leq 0,3\%$ од (280-300) nm, $\leq 0,6\%$ од (300-600) nm, $\leq 0,3\%$ од (600-1100) nm.

За појачање, обраду и исказивање излазног сигнала коришћен је I_{ph} - метар - мерило фотострује, који је преко GPIB интерфејса прикључен на рачунар, чиме је обезбеђена аутоматска аквизиција података и потпуна аутоматизација процеса мерења укључујући и програм за израчунавање T_b .

На основу формула (2), (3), (4) из података о спектралној расподели зрачења израчунавају се хроматске координате, чиме је дефинисан положај тачке на хроматском дијаграму (Слика 1). Програм за одређивање температуре боје ради на принципу одређивања најмањег растојања дате тачке од правих константне корелационе температуре боје и

директно учртвава дату тачку на хроматски дијаграм. Тачност одређивања температуре боје зависи од тачности са којом су одређене хроматске координате. Имајући у виду могућности расположиве опреме, праве константне корелационе T_b учртане су на хроматском дијаграму са резолуцијом 50 K (коришћени су таблични подаци [3]), те је и T_b одређивана у оквиру ± 50 K, што представља довољну тачност за већину примена.

4 РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА

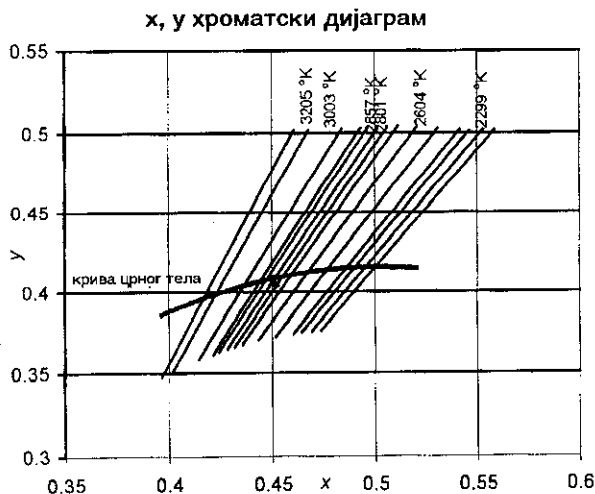
Мерење је вршено за групу од три сијалице типа ЕНГ 750 W које су уједно еталони светлосне јачине и служе као CIE стандардни колориметријски извор А. Мерења су вршена за сваку сијалицу на по две температуре боје (2800 K и 2856 K), односно, два режима напајања, на којима су еталонирани у VIPM-у. У табели 1. дати су резултати мерења хроматских координата и температуре боје датих сијалица у два режима напајања.

Табела 1. Резултати мерења хроматских координата и температуре боје сијалица ЕНГ 750 W

сијалица	$T_b(K)$ (VIPM)	$I(A)$	хроматске координате		$T_b(K)$ (измерена)
			x	y	
HEC-750-024	2800	5.771	0.4550	0.4077	2755
	2856	5.931	0.4512	0.4068	2801
HEC-750-025	2800	5.674	0.4550	0.4075	2755
	2856	5.810	0.4517	0.4070	2801
HEC-750-026	2800	5.687	0.4539	0.4065	2755
	2856	5.860	0.4501	0.4064	2801

Поред израчунавања хроматских координата и температуре боје, програм за одређивање температуре боје даје визуелни приказ положаја тачке на x, y хроматском дијаграму којом је дефинисана боја светлости датог извора. На слици 3. приказан је положај тачке на хроматском дијаграму, добијен мерењем за једну од сијалица из испитиване групе (HEC-750-024) када ради у режиму напајања за температуру боје 2856 K.

Из резултата мерења датих у Табели 1. закључује се да спектрометријски систем правилно вреднује разлику у температури боје, међутим, добијени резултати за корелациону температуру боје испитиваних сијалица се не слажу са вредностима температуре боје на којима су сијалице претходно биле калибрисане. Мерењем добијене вредности температуре боје су за 50 K ниже од раније утврђених. Иако је ово на граници дефинисане тачности од ± 50 K, може се



Слика 3. Резултати мерења за сијалицу НЕС-750-024

закључити да је испољена грешка систематска и да потиче од грешке у спектралној осетљивости спектрометријског система, односно, да систем слабије вреднује зрачење мањих таласних дужина док у исто време јаче вреднује зрачење већих таласних дужина. Оваква грешка могла се и очекивати обзиром да су вредности апсолутне спектралне осетљивости спектрометра одређене његовим еталонирањем још 1987. године.

Обзиром да су границе од ± 50 K у оквиру којих се одређује температура боје дефинисане на основу несигурности са којом су претходно биле одређене вредности температуре боје датих сијалица (еталонирање у ВРМ-у) веома широке, као и због испољене систематске грешке чија је вредност на граници дефинисане тачности, озбиљнија анализа мерне несигурности није вршена. И поред тога, могло се уочити да се расипање вредности хроматских координата добијених поновљеним мерењима за једну сијалицу у датом режиму напајања налази у оквиру $x = y \leq 0,001$. Такође, расипање вредности хроматских координата добијених мерењима за различите сијалице које раде у истом режиму напајања налази се у оквиру $x = y \leq 0,001$. Овакво расипање резултата мерења за хроматске координате одговара тачности одређивања температуре боје од ± 10 K, [3]. Тиме је потврђено да је метода правилно постављена, као и то да је учињена претпоставка о узроку грешке која је добијена добра, односно, да узрок грешке није у методи већ у калибрацији спектрометра.

5 ЗАКЉУЧАК

Основни циљ овог рада и читавог експеримента је био развој спектрометријске методе као фундаменталне и најтачније методе за

одређивање температуре боје извора светлости, као и израда програма за израчунавање температуре боје из добијених података о спектралној расподели. Постављена метода и добијени резултати, представљају важан корак ка остваривању скале температуре боје чиме би било омогућено еталонирање извора светлости по свим температурама боје које су од интереса, а који би се даље користили у методама поређења. Од посебног је значаја програм за одређивање T_c којим се за разлику од неких постојећих програма, који користе итеративне поступке, температура боје одређује практично по дефиницији. Програм се може користити и независно од спектрометријског система, у свим случајевима када су познате хроматске координате извора светлости.

Кључни фактор који утиче на мерну несигурност одређивања температуре боје је мерна несигурност са којом је остварена скала спектралне ирадијације, односно мерна несигурност са којом је утврђена релативна спектрална расподела ирадијације датог извора светлости. Остваривање скале спектралне ирадијације на примарном нивоу са мерном несигурношћу од око 1,0 %, омогућило би еталонирање извора по температури боје са мерном несигурношћу између 5 K и 10 K, [4,5], за шта се у последњих година дана, набавком дела потребне опреме, постепено стварају потребни услови.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] П. Вукадин, *Мерење боје*, XL Конференција ЕТРАН-а, Будва, 1996.
- [2] Publication CIE No. 63, *The spectroradiometric measurement of light sources*, 1984.
- [3] G. Wyszecki and W. S. Stiles, *Color science*, New York, Wiley, 1967.
- [4] NIST Special Publication 250-37, *Photometric Calibrations*, 1997.
- [5] NBS Special Publication 250-20, *Spectral Irradiance Calibrations*, 1987.

Abstract- In this paper, the spectroradiometric method as a fundamental method for measuring the color temperature of light sources, is described, and the results of measurements for the group of three incandescent lamps are given.

SPECTRORADIOMETRIC METHOD FOR DETERMINATION OF THE COLOR TEMPERATURE OF THE LIGHT SOURCES

Vladan Skerovic, Predrag Vukadin, Veljko Zarubica.