

CCD kamera kao beskontaktni senzor temperature

Određena je temperatura zračenja sijalica od 60W i 100W uz pomoć CCD kamere. Difrakcionom rešetkom zračenje je razloženo na spektar koji je sniman kamerom. Obradom dobijenih snimaka i fitovanjem podataka na Plankovu krivu zračenja, dobijena temperatura je iznosila za sijalicu od 60 W $(2.65 \pm 0.07) \cdot 10^3$, a za sijalicu od 100 W $(2.82 \pm 0.09) \cdot 10^3$. Pri tome nije uzet u obzir nejednak spektralni odziv CCD-a. Da bi se poboljšala tačnost bilo je poželjno kalibrisati odziv kamere po talasnim dužinama. Pokušaj da se to uradi snimanjem spektra živine lampe i poređenjem dobijenih rezultata sa tabličnim vrednostima nije uspeo zbog velikih fluktuacija u njenom zračenju. Metod koji je korišćen može da se primeni na bilo koje telo koje se može smatrati u dobroj aproksimaciji crnim ili sivim i čije zračenje CCD može uspešno da registruje.

Uvod

Zbog svojih karakteristika, CCD kamera se može koristiti između ostalog i kao beskontaktni senzor temperature u intervalu temperatura gde se kontaktni senzori ne mogu primeniti. Snimanjem spektra zračenja tela koje se u dobroj aproksimaciji može smatrati crnim ili sivim, na osnovu Plankovog zakona zračenja koji daje raspodelu emitovane energije po talasnim dužinama i daljom obradom dobijenih slika, može se odrediti temperatura tela koja zrače u opsegu temperatura iznad 2000 K. U ovom radu je na taj način određena temperatura zračenja sijalice. Šema eksperimenta data je na slici 1.

Teorijske osnove i geometrija eksperimenta

Prema Plankovom zakonu zračenja crnog tela snaga svetlosti koje izrači crno telo u intervalu talasnih dužina jednak je:

$$P_{\lambda, \lambda + \Delta\lambda} = \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{C_1 S}{\exp [C_2 / (\lambda T)] - 1} \Delta \lambda$$

*Tamara Tošić (1981),
Subotica, Jovana
Mikića 140, učenica
3. razreda Gimnazije
"Svetozar Marković"
u Subotici*

*Nenad Vukmirović
(1980), Beograd, B.
Stepanovića 33,
učenik 4. razreda
Matematičke
gimnazije u Beogradu*

gde je S površina crnog tela, $C_1 = 2\pi hc^2 = 7.7418 \cdot 10^{-16} \text{ W/m}^2$ prva radijaciona konstanta, a $C_2 = hc/k = 1.43879 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$ druga radijaciona konstanta.

Iz teorije difrakcione rešetke je poznato da se prvi difrakcioni maksimum javlja kada je ispunjen uslov da je $\lambda = d \sin \varphi$, odnosno, diferenciranjem ove jednačine dobijamo da je

$$\Delta \lambda = d \cos \varphi \Delta \varphi. \quad (1)$$

Iz geometrije problema (slika 1) je $x = a \tan \varphi$, odnosno

$$\Delta x = a \frac{\Delta \varphi}{\cos^2 \varphi}. \quad (2)$$

Iz jednačina (1) i (2) imamo da je

$$\Delta \lambda = \frac{d \Delta x}{a} \cos^3 \varphi.$$

Zamenom ovog izraza u jednačinu koja opisuje Plankov zakon imamo:

$$P_{\lambda, \lambda + \Delta \lambda} = \varepsilon \frac{C_1 S d \Delta x}{a} \cdot \frac{\cos^3 \varphi}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right), \quad (3)$$

s obzirom da je broj jedan u imeniocu Plankove formule zanemarljiv u opsegu temperatura i talasnih dužina koji je nama od interesa. U izrazu (3), ε predstavlja emisivnost tela koju ćemo u ovom slučaju smatrati konstantnom, svesno rizikujući da uvećamo grešku merenja.

Intenzitet svetlosti u intervalu talasnih dužina na rastojanju r od izvora je jednak

$$I_{0, (\lambda, \lambda + \Delta \lambda)} = \frac{P_{\lambda, \lambda + \Delta \lambda}}{4 r^2 \pi}.$$

Posle prolaska kroz difrakcionu rešetku, raspodela intenziteta svetlosti je definisana pomoću poznate relacije za ugaonu raspodelu intenziteta difraktovane svetlosti

$$I_{\varphi, (\lambda, \lambda + \Delta \lambda)} = I_{0, (\lambda, \lambda + \Delta \lambda)} \cdot \frac{\sin^2 \frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}}{\left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}\right)^2} \cdot \frac{\sin^2 \frac{N \pi d \sin \varphi}{\lambda}}{\sin^2 \frac{\pi d \sin \varphi}{\lambda}},$$

gde je b širina jednog zareza na rešetki, a N broj zareza na rešetki.

Na mestu gde je prvi difrakcioni maksimum za datu talasnu dužinu, tj. gde je $\lambda = d \sin \varphi$ važi

$$I_{\varphi, (\lambda, \lambda + \Delta\lambda)} = I_{0, (\lambda, \lambda + \Delta\lambda)} \cdot \frac{\sin^2 \frac{\pi b}{d}}{\left(\frac{\pi b}{d}\right)^2} \cdot \frac{\sin^2 (N\pi)}{\sin^2 \pi}.$$

S obzirom da $\frac{\sin Nx}{\sin x} \rightarrow N$ kad $x \rightarrow \pi$, sledi da je

$$I = I_{0, (\lambda, \lambda + \Delta\lambda)} \cdot \frac{\sin^2 \frac{\pi b}{d}}{\left(\frac{\pi b}{d}\right)^2} \cdot N^2,$$

pa je konačno

$$I = \varepsilon \frac{C_1 S d \Delta x}{4 r^2 \pi a} \cdot \frac{\sin^2 \frac{\pi b}{d}}{\left(\frac{\pi b}{d}\right)^2} \cdot N^2 \cdot \frac{\cos^3 \varphi}{\lambda^5} \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right).$$

Logaritmovanjem poslednje jednačine se dobija

$$\ln I = \ln \left(\frac{\varepsilon C_1 S d \Delta x}{4 r^2 \pi a} \cdot \frac{\sin^2 \frac{\pi b}{d}}{\left(\frac{\pi b}{d}\right)^2} \cdot N^2 \right) + 3 \ln \cos \varphi - 5 \ln \lambda - \frac{C_2}{\lambda T},$$

pa zamenom $\lambda = d \sin \varphi$, imamo:

$$\frac{C_2}{\lambda} = T \ln \left(\frac{\varepsilon C_1 S d \Delta x}{4 r^2 \pi a} \cdot \frac{\sin^2 \frac{\pi b}{d}}{\left(\frac{\pi b}{d}\right)^2} \cdot N^2 \right) - 5 T \ln d + T (3 \ln \cos \varphi - 5 \ln \sin \varphi - \ln I)$$

U našoj aproksimaciji smatraćemo da je vrednost koju pokazuje CCD (suma po pikselima) srazmerna intenzitetu svetlosti, odnosno $V = k I$, pa zamenom u prethodnu jednačinu konačno dobijamo

$$\frac{C_2}{\lambda} = \text{const.} + T (3 \ln \cos \varphi - 5 \ln \sin \varphi - \ln I). \quad (4)$$

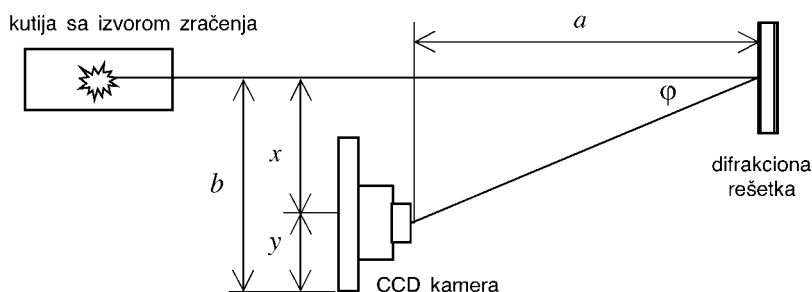
Dakle, dobili smo linearnu relaciju u kojoj koeficijent pravca predstavlja upravo traženu veličinu, odnosno temperaturu zračenja tela.

Metod

Šema aparature data je na slici 1. U eksperimentu smo koristili:

- izvor zračenja (sijalice snage 60W i 100W, živina lampa koja se koristi za uličnu rasvetu)
- zaklon sa malim otvorom (kartonska kutija na kojoj je bila izbušena rupica)
- reflektivnu difrakcionu rešetku
- mikropozicioner
- CCD kameru
- računar

U kutiju sa malim otvorom postavljena je sijalica. Prostorija u kojoj se izvodio eksperiment (optička laboratorija ISP) je bila zamračena. Svetlosni snop iz kutije je uperen normalno na difrakcionu rešetku, a CCD kamera je postavljena na mikropozicioner, tako da je na nju pao deo spektra razložen pomoću difrakcione rešetke. Pošto čip nije mogao da uhvati ceo spektar, CCD je pomeran pomoću mikropozicionera da bi mogao da registruje maksimume za različite talasne dužine spektra sijalice. CCD kamera je povezana na računar koji je pomoću programskog paketa 'Video Kit' snimao digitalne slike u bmp formatu.



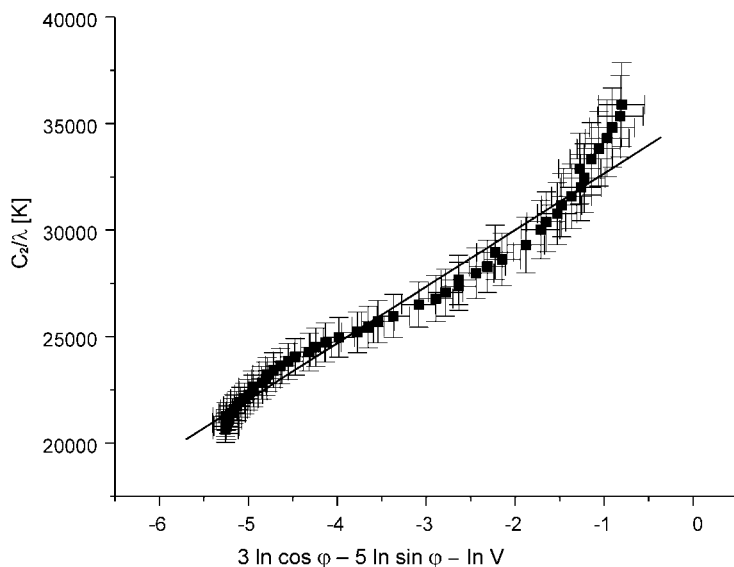
Slika 1.
Šema postavljene
aparature.

Figure 1.
Instrumental setup.

Za čitanje dobijenih slika i određivanje intenziteta piksela korišćen je programski paket Matlab. Slika snimljena u bmp formatu učitava se u Matlab kao indeksirana matrica. Zatim se indeksirana matrica konvertuje u matricu intenziteta. Za vrednost jedne slike uzet je zbir vrednosti po pikselima na toj slici (odnosno zbir elemenata indeksirane matrice). Pri tome se, kao što je napomenuto, čini greška, jer je jasno da odziv CCD-a nije isti na svim talasnim dužinama. Međutim, ova aproksimacija je sasvim zadovoljavajuća, jer se iz relacije (4) metodom najmanjih kvadrata nalazi optimalna vrednost temperature.

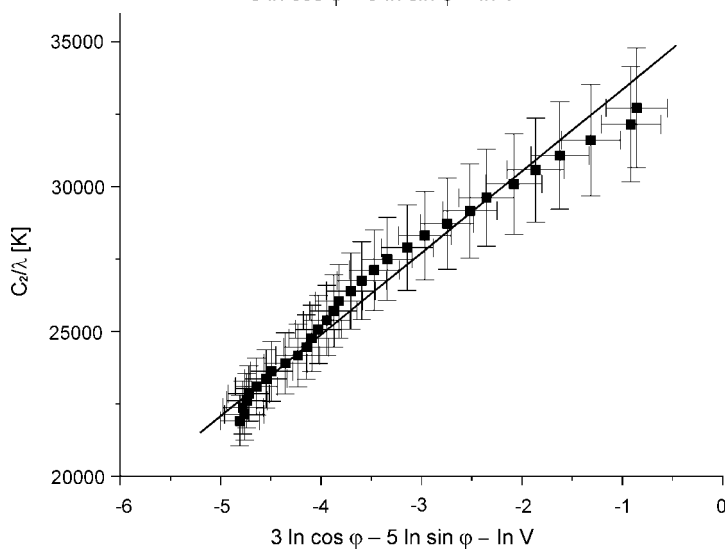
Rezultati

Na osnovu relacije (4) dobijeni su grafici prikazani na slikama 2 i 3. Linearnim fitovanjem metodom najmanjih kvadrata dobijeno je da koeficijent pravca koji je po našem modelu jednak temperaturi sijalice, iznosi 2650 ± 60 K za sijalicu od 60 W, a 2820 ± 90 K za sijalicu od 100 W. Koeficijent korelacije između eksperimentalnih tačaka i linearnog fita u prvom slučaju iznosi 0.985, au drugom 0.986. Za vrednost intenziteta svetlosti uzeta je razlika između izmerene vrednosti i najmanje od svih izmerenih vrednosti koju smo smatrali uticajem spoljašnje sredine koji postoji i u zamračenoj optičkoj laboratoriji zbog velike osetljivosti CCD-a.



Slika 2.
Rezultati merenja za sijalicu od 60 W.

Figure 2.
The graph for obtaining the temperature of 60 W lamp.

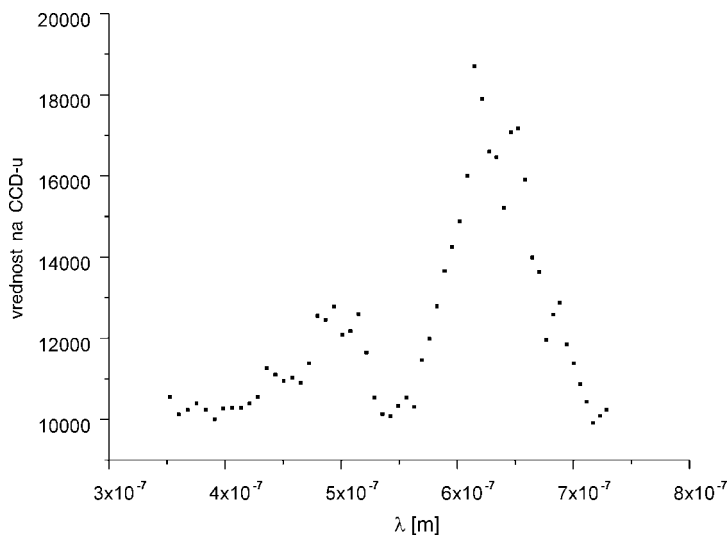


Slika 2.
Rezultati merenja za sijalicu od 100 W.

Figure 2.
The graph for obtaining the temperature of 100 W lamp.

Kalibracija CCD-a

U cilju pokušaja kalibrisanja CCD-a, odnosno utvrđivanja stepena osjetljivosti za različite talasne dužine, sniman je spektar živine lampe. Cilj ovog merenja nije bio određivanje temperature, jer se živina lampa ne može smatrati crnim ili sivim telom, već dobijanje korekcionih faktora pomoću kojih bi smo mogli da reskaliramo dobijene rezultate u cilju smanjenja greške. Dobijeni rezultati su prikazani na grafiku (slika 4).



Slika 4.
Rezultati merenja za živinu lampu.

Figure 4.
Dependence of the value on CCD from the wavelength in spectrum of the halogen lamp.

Za vrednost na CCD-u pri datoj talasnoj dužini uzimana je srednja vrednost četiri uzastopno snimane slike zbog fluktuacija intenziteta svetlosti živine lampe, kao i fluktuacija odziva na CCD-u. Te fluktuacije su bile prisutne i pri merenju spektra sijalica, ali nisu bile toliko izražene pa je za datu talasnu dužinu vršeno samo jedno snimanje slike. Snimanjem spektra živine lampe pomoću CCD-a želeli smo da na osnovu tabličnih vrednosti kalibrišemo CCD što nam nije uspelo. Naime, zaključili smo da je potreban mnogo veći broj merenja za datu talasnu dužinu da bi se eliminisale fluktuacije, kao i mnogo manji korak između dva merenja da bi se u potpunosti snimio taj spektar.

Mogućnosti poboljšanja eksperimenta

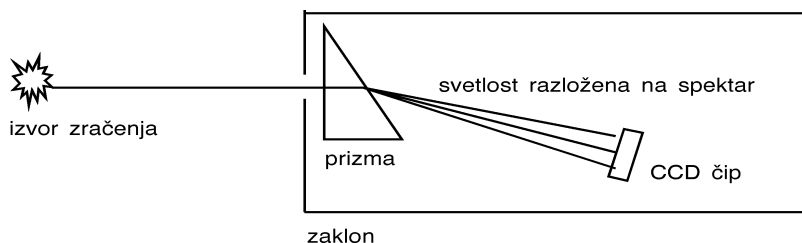
Ovaj metod za određivanje temperature se pokazao jako dobrim. Rezultati su dobijeni sa greškom merenja manjom od 10 posto, što je prilično dobro uzimajući u obzir sve aproksimacije koje smo koristili, kao i nesavršenost aparature. Na kraju dajemo predlog eksperimenta koji bi mogao da poboljša rezultate.

Ideja je da se napravi beskontaktni senzor temperature koji će na osnovu jednog snimka odrediti temperaturu tela. Potrebna aparatura je:

- CCD kamera
- prizma sa poznatom zavisnošću indeksa prelamanja od talasne dužine
- zaklon (kutija sa otvorom pravougaonog oblika čija je jedna stranica mnogo veća od druge i opciono dodatni predmeti za poboljšanje funkcije zaklona)
- dodatna aparatura za fiksiranje međusobnog položaja CCD-a, prizme i zaklona
- nešto od sledećeg: monohromatski izvori različitih poznatih talasnih dužina, monohromatski filtri različitih poznatih talasnih dužina, izvori sa diskretnim spektrom i poznatim talasnim dužinama
- polarizator i analizator
- crna tela različitih temperatura ili, što je još bolje, jedno crno telo čiju temperaturu možemo menjati
- računar sa softverom za snimanje slike

Umesto difrakcione rešetke za razlaganje zračenja crnog tela na spektar može se iskoristiti i prizma jer indeks prelamanja zavisi od talasne dužine, pa se za različite talasne dužine zraci prelamaју pod različitim uglovima. Prednost prizme je što paralelan svetlosni snop pretvara u slabo divergentan tako da CCD može jednim snimkom da obuhvati ceo razložen spektar. Time se pedesetak snimaka koliko je potrebno da se snimi ceo spektar razložen difrakcionom rešetkom zamenjuje samo jednim snimkom.

Šematski prikaz aparature dat je na slici 5. Funkcija zaklona je da obezbedi da celokupna svetlost koja se dalje prelama pada na jedno mesto na prizmi (da se nakon razlaganja ne bi “mešale” različite talasne dužine). Poprečni presek otvora zaklona treba zato da bude oblika pravougaonika čija je jedna stranica mnogo veća od druge, a možda i da se pre zaklona postavi cev čiji je poprečni presek isti kao kod zaklona.



Slika 5.
Načelna šema
poboljšane varijante
eksperimenta.

Figure 5.
Experimental setup of
improved version.

Plan eksperimenta bi bio sledeći:

1. Postavljanje i fiksiranje međusobnog položaja zaklona, prizme i CCD-a. Zaklon, prizmu i CCD treba postaviti tako da razloženi spektar obuhvata veći deo površine čipa. Tada deo slike sa krajeva

spektra predstavlja uticaj spoljašnje sredine čiji intenzitet treba oduzeti od cele slike.

2. Kalibracija položaja postavljene aparature. Na različita mesta na CCD-u pada svetlost različite talasne dužine, pa treba naći zavisnost talasne dužine svetlosti od oblasti na CCD-u na koju pada svetlost te talasne dužine. Za to je potrebno imati nešto od sledećeg: monohromatski izvori različitih poznatih talasnih dužina, monohromatski filtri različitih poznatih talasnih dužina, izvori sa diskretnim spektrom i poznatim talasnim dužinama.
3. Kalibracija odziva CCD-a. Koristi se crno telo poznate temperature kao izvor zračenja sa poznatom spektralnom raspodelom. Ispred zaklona postave se polarizator i analizator čime se menja snaga svetlosti koja pada na CCD i snima se slika na CCD-u za različite uglove između polarizatora i analizatora. Poželjno je ovo uraditi za više tela poznate spektralne raspodele da bismo imali više merenja i da bi tako kalibracija bila potpunija.
4. Nakon što se uradi 1, 2. i 3. može se pristupiti preciznom merenju temperature tela nepoznate temperature. Međusobno dobro fiksirani zaklon, prizma i CCD tada predstavljaju instrument za merenje temperature, jer je nakon izvršene kalibracije jednostavno napisati program koji na osnovu snimljene slike određuje temperaturu.

Dakle, tada se na osnovu jednog snimka određuje temperatura. Naravno, poželjno je imati više snimaka, pa ih usrednjiti što se takođe bez problema može uraditi.

Literatura

Bogdanović N. 1998. Beskontaktni senzor temperature. Nepublikovani diplomski rad. Elektrotehnički fakultet u Beogradu

Gaussorgues G. 1988. *La Thermographie Infrarouge*. Moskva: Mir

McCluney R. 1994. *Introduction to Radiometry and Photometry*. Boston: Artech House

Tamara Tošić and Nenad Vukmirović

CCD as Contactless Temperature Sensor

In this project 60 W and 100 W power standard lamps were used as sources of radiation and their temperature was measured. The diffraction grating was used to accomplish the dispersion of radiation and the spec-

trum was recorded with CCD camera. Fitting the results to the Planck's law the measured temperature was $(2.65 \pm 0.07) \cdot 10^3$ K for 60 W lamp and $(2.82 \pm 0.09) \cdot 10^3$ for 100 W lamp. CCD's different spectral response was neglected which led to lower correlation between experimental and fitted data. In order to improve the correlation it is necessary to calibrate the spectral response of the CCD. The attempt to do this by recording the spectrum of halogen lamp and comparing the results with standard table values wasn't successful due to intensive fluctuations in its radiation. The method that was used can be applied to any other body which can be well approximated with black or gray body and whose radiation CCD can successfully detect.

