

Željko Vukobrat,
dipl. inž.
Vojnotehnički institut,
Beograd

NAPONSKI IZLAZNI SIGNALI POZICIONOOSETLJIVOG OPTIČKOG PRIJEMNIKA

UDC: 621.383.5

Rezime:

Teorijski model za određivanje naponskih izlaznih signala pozicionoosetljivog prijemnika razvijen je i eksperimentalno verifikovan. Upotrebljen je kvadrantni detektor za konvertovanje svetlosne energije u električnu energiju. Kvadrantni detektor ima četiri nezavisne i identične fotodiode na osjetljivoj površini. Korektno fokusiran simetrični laserski ili optički snop formiraće kružni spot na aktivnoj površini detektora nakon prolaska kroz sočivo. Fotodiode su spojene preko otpornika sa izvorom za napajanje. Fotoelektrična struja generisana u fotodiodi uzrokuje pad napona na odgovarajućem otporniku i, na taj način, obezbeđuje izlazni signal. Signal detektovan pomoću svake fotodiode kvadrantnog detektora proporcionalan je površini svetlosnog spota koji je pao na fotodiodu. Izvedeni teorijski model omogućava brzu i korektnu analizu eksperimentalnih rezultata, što je u osnovi provere zadovoljenja tehničkih zahteva postavljenih u pretprojektnoj fazi dizajniranja pozicionoosetljivog optičkog prijemnika određene namene. Eksperimentalni rezultati se potpuno slažu sa teorijom.

Ključne reči: optički prijemnik, pozicionoosetljivi prijemnik, kvadrantni detektor, silicijumska PIN fotodiode.

THE VOLTAGE OUTPUT SIGNALS OF THE OPTICAL POSITION-SENSITIVE RECEIVER

Summary:

A theoretical model for determining the voltage output signals of the position-sensitive receiver is developed and verified experimentally. A quadrant detector is used for converting light energy into electrical energy. The quadrant detector has four independent and equal photodiodes on the sensing surface. A correctly focused symmetrical laser or optical beam will form a circular spot on the detector's active surface after passing through the lens. The photodiodes are connected to a voltage source via resistors. A photoelectric current generated in the photodiode causes a voltage drop across the associated resistor and thus provides an output signal. The signal detected by each photodiode of the quadrant detector is proportional to the area of the light spot image on the photodiode. The derived theoretical model enables a quick and correct analysis of experimental results, that is the base of the checking of technical requirements of preliminary project design of the position-sensitive optical receiver for defined purpose. The experimental results show the excellent agreement with theory.

Key words: optical receiver, position-sensitive receiver, quadrant detector, silicon PIN photodiode.

Uvod

Pozicionoosetljivi optički prijemnici koriste se za beskontaktno merenje pomera-ja, ugla, nivelisanosti, položaja, visine, usmerenosti, uniformnosti površine i rasto-

janja. Silicijumski fotodetektor su naročito pogodni za ova merenja, jer se mogu kombinovati sa raznovrsnim izvorima zračenja, kao što su: He-Ne laser, laserska dioda, svetlosno emitujuća dioda i IC emitujuća dioda. Oni detektuju zračenje iz širokog opsega

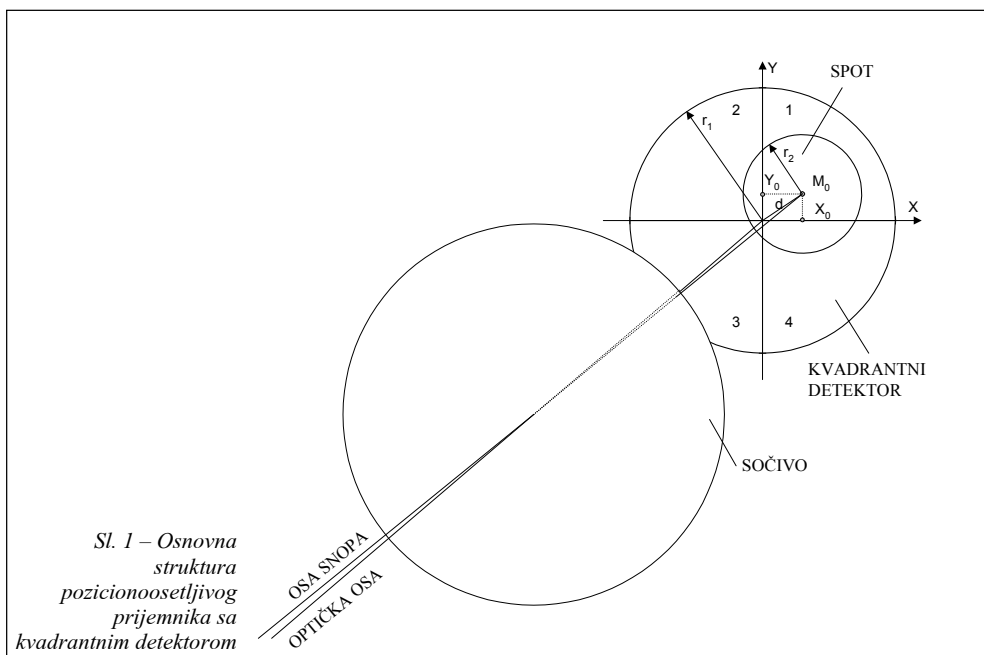
talasnih dužina, od ultravioletnog do bliskog infracrvenog dela spektra. Odlikuju se velikom brzinom odziva, niskim nivoom šuma i visokom osetljivošću. Za projektovanje poziciono-osetljivih prijemnika koriste se različiti tipovi silicijumskih fotodetektora: jednoelementne naprave, dvočelijski i kvadrantni detektori, fotodiode sa bočnim efektom i višeelementni nizovi.

U ovom radu su, kroz teorijski i eksperimentalni model, prikazani naponski izlazni signali pozicionoosetljivog prijemnika sa kvadrantnim detektorom. Kvadrantni detektor je uniformni disk, izrađen na bazi silicijuma, sa dva zazora širine od 2 do 12 μm duž fotoosetljive površine detektora, čime su obrazovane četiri nezavisne i identične PIN fotodiode. U nazivu PIN, oznake P i N se odnose na oblasti P i N tipa, a oznaka I na baznu oblast fotodiode. Položaj centra detektora precizno je određen presekom dve zatorske linije. Ispred kvadrantnog detektora, u pozicionoosetljivom optičkom prijem-

niku, nalazi se fokusirajući optički element koji deluje na snop zračenja, tako da se na aktivnoj površini detektora formira kružni spot željenog poluprečnika. Uloga kvadrantnog detektora jeste da izvrši konverziju primljenog laserskog ili optičkog zračenja u električni signal. Izlazni signal svake fotodiode, kvadrantnog detektora, proporcionalan je odgovarajućoj površini spota, koja je obuhvaćena tom aktivnom površinom. Kada se centar spota nalazi u centru kvadrantnog detektora, fotoelektrične struje, generisane u sve četiri fotodiode, izjednačene su. Malim pomerajem centra spota, u odnosu na centar kvadrantnog detektora generišu se različite struje, odnosno različiti nivoi naponskih izlaznih signala.

Teorijski model

Osnovna struktura pozicionoosetljivog optičkog prijemnika sa kvadrantnim detektorom prikazana je na slici 1.



Prijemnik se sastoji od sočiva i kvadrantnog detektora, koji se nalaze na određenom međusobnom rastojanju, tako da formirani kružni spot ima poluprečnik r_2 . Brojevima 1, 2, 3 i 4 obeležene su četiri PIN silicijumske fotodiode kvadrantnog detektora, čiji je poluprečnik r_1 . Kvadrantni detektor postavljen je u položaj u kojem se linije zazora poklapaju sa osama pravouglonog Dekartovog koordinatnog sistema. Slika 1 prikazuje slučaj kada se centar spota M_0 (sa koordinatama X_0, Y_0) ne poklapa sa centrom kvadrantnog detektora, što je posledica uglovnog odstupanja ose snopa od optičke ose.

Postoje dva osnovna režima rada PIN fotodiode: fotonaponski (bez polarizacije) i fotoprovodni (sa inverznom polarizacijom). Fotodiode PIN konfiguracije prevashodno se izrađuju za detekciju brzih signala, za šta je neophodan fotoprovodni (FP) režim rada. Najjednostavnija šema veze kvadrantnog detektora u FP režimu rada ostvarena je povezivanjem fotodiode sa izvorom za napajanje preko otpornika. Na slici 2 prikazan je kvadrantni detektor sa jednostavnim elektronskim kolom za FP režim rada.

Naponski izlazni signali, koji odgovaraju i -toj fotiodiodi ($i=1, 2, 3, 4$), jesu:

$$U_i = R_L \cdot I_i = k \cdot S_i \quad (1)$$

gde su:

R_L – otpornost u kolu fotodiode,

I_i – električna struja u i -toj grani,

k – konstanta proporcionalnosti i

S_i – površina spota na aktivnoj površini i -te fotodiode.

Izračunavanjem površina spota (S_i) dobijaju se matematičke relacije za naponske izlazne signale u funkciji koordinata centra spota (X_0, Y_0). Na slici 3 prikazan je kvadrantni detektor, kružni spot sa centrom u tački M_0 (X_0, Y_0), a označene su i površine čije izraze treba odrediti.

Polazeći od relacija za izračunavanje kružnog odsečka odgovarajućeg centralnog ugla [1] dobijaju se matematički izrazi za površine S_{23} i S_{34} :

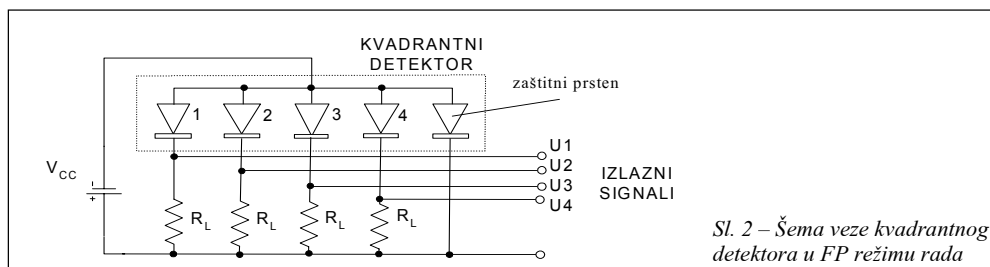
$$S_{23} = r_2^2 \cdot \frac{\pi}{2} - r_2^2 \cdot \arcsin\left(\frac{X_0}{r_2}\right) - X_0 \cdot \sqrt{r_2^2 - X_0^2} \quad (2)$$

$$S_{34} = r_2^2 \cdot \frac{\pi}{2} - r_2^2 \cdot \arcsin\left(\frac{Y_0}{r_2}\right) - Y_0 \cdot \sqrt{r_2^2 - Y_0^2} \quad (3)$$

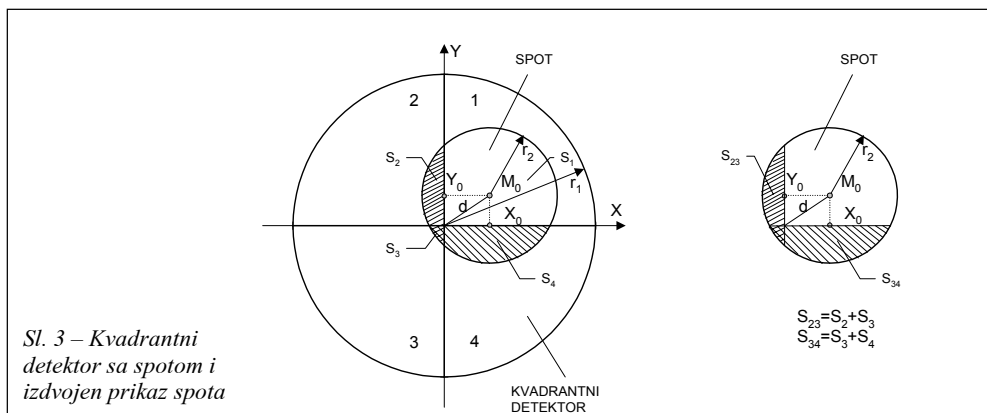
Površina dela spota koji pripada aktivnoj površini treće fotodiode S_3 dobija se rešavanjem određenog integrala funkcije:

$$y = Y_0 - \sqrt{r_2^2 - (x - X_0)^2} \quad (4)$$

na segmentu $[0, X_0 - \sqrt{r_2^2 - Y_0^2}]$.



Sl. 2 – Šema veze kvadrantnog detektora u FP režimu rada



Izraz za površinu S_3 sada se može zapisati u obliku:

$$S_3 = -\frac{r_2^2}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{X_0}{r_2}\right) - \frac{X_0}{2} \cdot \sqrt{r_2^2 - X_0^2} + \frac{r_2^2}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{\sqrt{r_2^2 - X_0^2}}{r_2}\right) \quad (5)$$

Na jednostavan način dolazi se i do izraza za površine S_2 , S_4 i S_1 :

$$S_2 = S_{23} - S_3 \quad (6)$$

$$S_4 = S_{34} - S_3 \quad (7)$$

$$S_1 = r_2^2 \cdot \pi - (S_2 + S_3 + S_4) \quad (8)$$

Kada se izrazi (5), (6), (7) i (8) uvrste u (1) dobijaju se konačne matematičke relacije za naponske izlazne signale u funkciji koordinata centra spota (X_0, Y_0) :

$$U_1 = k \cdot \left[\frac{X_0}{2} \cdot \sqrt{r_2^2 - X_0^2} + \frac{r_2^2}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{X_0}{r_2}\right) + \frac{Y_0}{2} \cdot \sqrt{r_2^2 - Y_0^2} + \frac{r_2^2}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{\sqrt{r_2^2 - X_0^2}}{2}\right) + r_2^2 \arcsin\left(\frac{Y_0}{r_2}\right) + X_0 \cdot Y_0 \right] \quad (9)$$

$$U_2 = k \cdot \left[r_2^2 \cdot \frac{\pi}{2} - \frac{X_0}{2} \cdot \sqrt{r_2^2 - X_0^2} - \frac{r_2^2}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{X_0}{r_2}\right) + \frac{Y_0}{2} \cdot \sqrt{r_2^2 - Y_0^2} - \frac{r_2^2}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{\sqrt{r_2^2 - X_0^2}}{2}\right) - X_0 \cdot Y_0 \right] \quad (10)$$

$$U_3 = k \cdot \left[-\frac{X_0}{2} \cdot \sqrt{r_2^2 - X_0^2} - \frac{r_2^2}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{X_0}{r_2}\right) - \frac{Y_0}{2} \cdot \sqrt{r_2^2 - Y_0^2} + \frac{r_2^2}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{\sqrt{r_2^2 - X_0^2}}{2}\right) + X_0 \cdot Y_0 \right] \quad (11)$$

$$U_4 = k \cdot \left[r_2^2 \cdot \frac{\pi}{2} + \frac{X_0}{2} \cdot \sqrt{r_2^2 - X_0^2} + \frac{r_2^2}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{X_0}{r_2}\right) - \frac{Y_0}{2} \cdot \sqrt{r_2^2 - Y_0^2} - \frac{r_2^2}{2} \cdot \arcsin\left(\frac{\sqrt{r_2^2 - X_0^2}}{2}\right) - r_2^2 \arcsin\left(\frac{Y_0}{r_2}\right) - X_0 \cdot Y_0 \right] \quad (12)$$

Jednačine (9), (10), (11) i (12) važe pod uslovom da su $|X_0| \leq r_2$ i $|Y_0| \leq r_2$.

Matematički izraz za zbirni signal U_z dobija se sumiranjem izlaznih signala U_1, U_2, U_3 i U_4 :

$$U_z = \sum_{i=1}^4 U_i = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 = k \cdot r_2^2 \cdot \pi \quad (13)$$

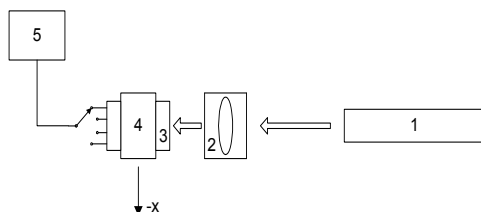
Iz prethodnog izraza dobija se koeficijent proporcionalnosti k :

$$k = \frac{U_z}{r_2^2 \cdot \pi} \quad (14)$$

Eksperimentalni model

Eksperimentalni model pozicionoo-setljivog optičkog prijemnika sa kvadrantnim detektorom prikazan je na slici 4.

Za realizaciju eksperimentalnog modela upotrebljen je: He-Ne laser (talasna dužina $\lambda=632,8$ nm, izlazna snaga $P_{izl}=2$ mW), sočivo (žižna daljina $f=38$ mm, prečnik $D=25,4$ mm), dvoosni pozicioner (preciznost 0,01 mm), kvadrantni detektor (QDY80P „IHTM MTM“, poluprečnik $r_1=5,046$ mm) sa elektronskim kolom i digitalni voltmetar.



Sl. 4 – Eksperimentalni model pozicionoo-setljivog optičkog prijemnika (1 – He-Ne laser, 2 – sočivo, 3 – kvadrantni detektor sa elektronskim kolom, 4 – pozicioner, 5 – digitalni voltmetar)

He-Ne laser kontinualno emituje snop zračenja sa Gausovom raspodelom intenziteta. Sočivo, koje je postavljeno ispred kvadrantnog detektora, fokusira snop i formira kružni spot poluprečnika $r_2=2,25$ mm na aktivnoj površini detektora. Postupak za određivanje poluprečnika formiranog kružnog spota obrađen je u internom dokumentu. Fotodiode kvadrantnog detektora konvertuju energiju fotona u električnu struju, koja se zatim konvertuje u naponski signal preko otpornika otpornosti $R_L=10$ k Ω . Izbor otpornika R_L izvršen je sa tačnošću od 2 %. Digitalni voltmetar pokazuje vrednost naponskog signala na sva četiri otpornika. Dvoosni pozicioner omogućava precizno pomeranje kvadrantnog detektora u ravni Oxy , pri čemu je osa snopa He-Ne lasera upravna na tu ravan.

Rezultati merenja

Pre početka merenja izvršeno je centriranje kvadrantnog detektora. Pod centriranjem se podrazumeva dovodenje kvadrantnog detektora u nulti položaj, odnosno položaj kada osa laserskog snopa „pogađa“ centar detektora, što se registruje digitalnim voltmetrom. Tada su sva četiri napona jednaka.

Nakon centriranja sprovedeno je merenje izlaznih naponskih signala u funkciji koordinate centra spota X_0 ($Y_0=0$). Kvadrantni detektor se, pomoću dvoosnog pozicionera, pomerao u smeru $-x$ -ose ortogonalnog Dekartovog sistema Oxy , čime se, u stvari, postiglo pomeranje centra spota u smeru x -ose. Merenje napona U_i ($i=1, 2, 3, 4$) izvršeno je u opsegu pomeraja od 0 do 2,3 mm sa korakom od po

0,1 mm. Rezultati merenja napona U_i ($i=1, 2, 3, 4$) i rezultat proračuna zbirnog napona ($U_z = U_{m1} + U_{m2} + U_{m3} + U_{m4}$) prikazani su u tabeli.

X_0 [mm]	U_{m1} [V]	U_{m2} [V]	U_{m3} [V]	U_{m4} [V]	U_z [V]
0,0	2,049	2,050	2,050	2,049	8,198
0,1	2,160	1,930	1,934	2,165	8,189
0,2	2,280	1,820	1,819	2,280	8,199
0,3	2,390	1,700	1,704	2,395	8,189
0,4	2,510	1,590	1,590	2,509	8,199
0,5	2,622	1,477	1,477	2,622	8,198
0,6	2,730	1,365	1,365	2,734	8,194
0,7	2,845	1,254	1,250	2,845	8,194
0,8	2,950	1,145	1,145	2,954	8,194
0,9	3,060	1,030	1,038	3,061	8,189
1,0	3,166	0,934	0,933	3,166	8,199
1,1	3,268	0,831	0,832	3,270	8,201
1,2	3,367	0,732	0,732	3,365	8,196
1,3	3,464	0,636	0,636	3,463	8,199
1,4	3,556	0,544	0,543	3,557	8,200
1,5	3,645	0,455	0,454	3,644	8,198
1,6	3,730	0,371	0,370	3,730	8,201
1,7	3,804	0,292	0,292	3,808	8,196
1,8	3,881	0,219	0,220	3,880	8,200
1,9	3,947	0,153	0,152	3,950	8,202
2,0	4,000	0,095	0,093	4,005	8,193
2,1	4,050	0,046	0,046	4,054	8,196
2,2	4,090	0,010	0,010	4,090	8,200
2,3	4,100	0,000	0,000	4,100	8,200

Na osnovu proračuna zbirnog napona za sve pozicije centra spota određuje se srednja vrednost zbirnog napona \bar{U}_z na sledeći način:

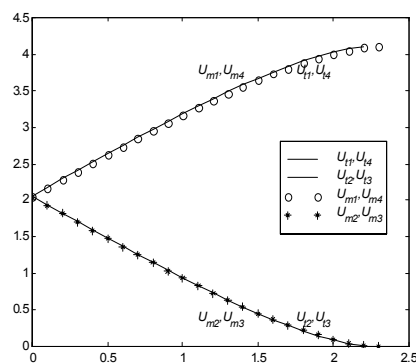
$$\bar{U}_z = \frac{\sum_{i=1}^{24} U_{zi}}{24} = 8,1968 \text{ V}$$

Vrednost koeficijenta proporcionalnosti k dobija se na osnovu relacije:

$$k = \frac{\bar{U}_z}{r_z^2 \cdot \pi} = 0,5154 \frac{\text{V}}{\text{mm}^2}$$

Ovako dobijeni koeficijent proporcionalnosti k uvodi se u teorijske relacije za izlazne naponske signale (9–12).

Na slici 5 prikazani su naponski izlazni signali pozicionoosetljivog prijemnika sa kvadrantnim detektorom u funkciji koordinate centra spota X_0 ($Y_0=0$), dobijeni teorijskim i eksperimentalnim putem.



Sl. 5 – Naponski izlazni signali pozicionoosetljivog prijemnika

Iz prikazanih rezultata merenja vidi se da nije postojala pomenost zazor kvadrantnog detektora po uglu vrljanja u odnosu na x -osu po kojoj se vršilo pomeranje detektora, te su se, prema očekivanju, dobili identični grafici za napone U_1 i U_4 , odnosno U_2 i U_3 . Grafici naponskih izlaznih signala, teorijski izraženih preko relacija (9), (10), (11) i (12), prikazani su na istoj slici. Eksperimentalni rezultati pokazuju odlično slaganje sa teorijom. Prosečno odstupanje je na trećoj decimali.

Zaključak

Naponski izlazni signali pozicionoosetljivog optičkog prijemnika predstavljeni su teorijskim modelom, koji je eksperimentalno verifikovan. Teorijski

model omogućuje da se uspešno i za kratko vreme izvrši analiza rezultata, koji se sastoje od izlaznih napona dobijenih eksperimentalnim putem i time proveri da li su ispunjeni tehnički zahtevi, koji su postavljeni pre projektovanja određenog pozicionoosetljivog optičkog prijemnika sa kvadrantnim detektorom, u skladu sa njegovom primenom.

Analizu rezultata znatno olakšava primena računarskog programa specijalno urađenog za ove potrebe.

Literatura:

- [1] Mamuzić, Z. P., Đerasimović, B. P.: Osnovi matematičke analize, (str. 277, 282 i 377) Naučna knjiga, Beograd, 1970.
- [2] Naučna ustanova IHTM Centar za MTM, Beograd: Katalog proizvoda.
- [3] <http://www.udt.com>: Non-contact optical position sensing using silicon photodetectors.
- [4] <http://www.mellesgriot.com>: Position-Sensing Detector Theory.