

Univerzitet union - Računarski fakultet



Laserska komunikacija
-diplomski rad-

Kandidat:

Dragan Mičić, RM06/17

Mentor:

prof. dr Đorđe Babić

Beograd, septembar 2022. godine

1. Sadržaj

1. Sadržaj	1
2. Uvod	2
3. Metod	4
2.1 Namenski računarski sistemi	4
2.1.1 Mikrokontroleri	6
2.1.2 Arduino razvojno okruženje	8
2.1.3 atmega238p mikrokontroler	9
2.2 UART serijska komunikacija	10
2.3 Laser	12
2.4 Optoelektronski elementi	13
2.4.1 Fotootpornik	13
2.4.2 Fotodioda	14
2.5 Vremenska modulacija	15
2.5.1 Predajnik	15
2.5.1 Prijemnik	17
2.6 Direktna modulacija	18
2.6.1 Predajnik	18
2.6.2 Prijemnik	19
4. Tehnička dokumentacija	20
3.1 Elektronska šema sistema	20
3.1.1 Predajnik	20
3.1.2 Prijemnik sa fotootpornikom	20
3.1.3 Prijemnik sa fotodiodom	21
3.2 Algoritamske blok šeme sistema	22
3.2.1 Vremenska modulacija - predajnik	22
3.2.2 Vremenska modulacija - prijemnik	23
3.2.3 Direktna modulacija - predajnik	24
3.2.4 Direktna modulacija - prijemnik	25
5. Rezultati i diskusija	26
5.1 Karakteristike fotosenzora	26
5.1.1 Fotootpornik	26
5.1.2 Fotodioda	27
5.2 Vremenska modulacija	28
5.2.1 Fotootpornik kao prijemnik	28
5.2.2 Fotodioda kao prijemnik	29
5.3 Direktna modulacija	30
5.3.1 Fotootpornik kao prijemnik	30

5.3.2 Fotodioda kao prijemnik	31
5.4 Pregled i poređenje dobijenih rezultata	32
6. Zaključak	33
7. Literatura	34

2. Uvod

Potreba za komuniciranjem među ljudima postoji oduvek i potreba za prenos informacija na daljinu je iz dana u dan sve veća. Kroz istoriju su se koristili razni načini kako bi se komunikacija na daljinu ostvarila i prenele potrebne poruke. [1]

Telekomunikacije predstavljaju svako emitovanje, prenos ili prijem poruka, na daljinu, u vidu signala koji se prenose od izvora informacija do korisnika. Današnji pojam telekomunikacija obuhvata prenos informacija putem različitih tipova elektronskih sistema i tehnologija koji se najčešće dele na žičane i bežične. Na primer: mobilni sistemi, satelitski sistemi, radio sistemi, kablovski sistemi i optički sistemi). [3]

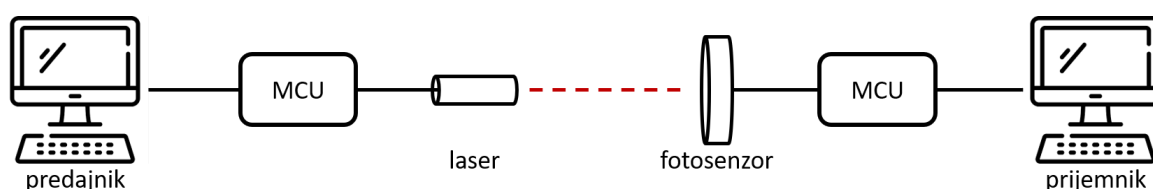
Primenu optike u telekomunikacijama pokrenulo je par otkrića i izuma tokom dvadesetog veka. To je bio izum lasera 1958. godine, zatim otkriće poluprovodničkog lasera 1963. godine i otkriće optičkog vlakna nekoliko godina kasnije. [2] Ova tehnologija danas je široko rasprostranjena u vidu interkontinentalnih podvodnih klastera optičkih vlakana koja prenose preko 85% ukupnog komunikacijskog saobraćaja.

Predajnik na jednom kraju generiše svetlosni signal koji je prilagođen prenosu kroz optičko vlakno. Prijemnik na drugoj strani detektuje oslabljenu i zašumljenu poruku i konvertuje je u format koji je potreban i prepoznatljiv krajnjem korisniku. Prenosni medijum koji se koristi u ovoj tehnologiji čini optičko vlakno na čijim se kavezima se nalaze odgovarajući priključci (konektori) koji obezbeđuju povezivanje predajnika i prijemnika.

U ovom radu ispitivane su mogućnosti i metode komunikacije dva računara korišćenjem lasera kao predajnika i različitih fotosenzora kao prijemnika odgovarajućih svetlosnih signala. Cilj rada jeste realizacija ovakvog sistema kao i merenje njegovih performansi pri korišćenju različitih modulacija i fotosenzora.

3. Metod

Na predajnoj strani sistema nalazi se računar koji komunicira sa mikrokontrolerom (MCU) (slika 1). Sa računara se putem serijske komunikacije tekst šalje na mikrokontroler, koji primljeni tekst moduliše na odgovarajući način i shodno definisanoj modulaciji kontroliše laser usmeren u fotosenzor na prijemnoj strani sistema. Ovaj senzor je na odgovarajući način povezan na drugi mikrokontroler, koji na osnovu podataka koje očitava na senzoru demoduliše primljene svetlosne signale nazad u tekst. Dobijeni tekst se putem serijske komunikacije šalje na prijemni računar.



slika 1. Idejni prikaz komunikacije

Upoređivane su mogućnosti dve različite modulacije za slanje podataka putem svetlosnih impulsa. Prva je vremenska, a druga direktna binarna modulacija koje će detaljnije biti opisane u nastavku rada. Takođe, upoređivane su performanse ovakve komunikacije pri korišćenju različitih fotosenzora, odnosno fotootpornika i fotodiode.

2.1 Namenski računarski sistemi

Namenski računarski sistemi (eng. embedded sistemi) još poznati i kao ugrađeni sistemi, predstavljaju specijalne kompjuterske sisteme dizajnirane da obave odgovarajuću posebnu funkciju. Predstavljaju kombinaciju hardvera i softvera, a vrlo često i dodatnih mehaničkih, elektromehaničkih ili drugih komponenata,

dizajniranih da obavljaju odgovarajuću funkciju. Vrlo često namenski sistemi su delovi većeg složenijeg sistema ili proizvoda. Sa obzirom na kompaktnu veličinu, nisku cenu proizvodnje i relativno jednostavan dizajn, namenski računarski sistemi su postali veoma popularni i široko zastupljeni. Obuhvataju sve aspekte savremenog života ljudi i postoji mnogo primera njihove upotrebe [8]:

- biomedicinski instrumenti (bajpas, holter, digitalni merač pritiska...)
- komunikacioni sistemi (pejdžer, mobilni telefon, TV prijemnik...)
- kontrola računarskih periferija (kontroler u tastaturi, DRAM kontroler, printer kontroler...)
- industrijski sistemi (kontroleri DC, step i servo motora, kontroleri CNC mašina...)
- automobilska industrija (kontroler ABS sistema, sistema kočenja, servo upravljanja...)
- svakodnevni kućni uređaji

Jasno je da u savremenom dobu, u kome živimo, skoro svaki sistem i električni uređaj u svojoj osnovi, ili među svojim komponentama ima bar jedan, ili više pojedinačnih namenskih računarskih sistema. [8]

Svaki namenski sistem sastoji se od prilagođenog hardvera izgrađenog oko centralne procesorske jedinice (CPU). Ovaj hardver takođe sadrži memorijske module na kojima se nalazi i izvršava softver samog sistema. Softver koji se nalazi na memorijskom čipu se takođe naziva "firmver" (eng. firmware). Kod klasičnih računarskih sistema sve operacije i programi se izvršavaju nad operativnim sistemom, koji se indirektno putem nivoa apstrakcije izvršavaju nad samim hardverom. Slična arhitektura primenljiva je i na namenske računarske sisteme, međutim, operativni sistem u standardnom obliku nije neophodan deo u svakom namenskom sistemu. Kod malih sistema, kao što su kućni uređaji, nema potrebe za operativnim sistemom. Za ovakve sisteme se projektuje specifičan softver samo za tu konkretnu namenu, i može se izvršavati skoro direktno nad hardverskim slojem.

Međutim, za sisteme koji uključuju složenu obradu i kontrolu, ipak je poželjno imati operativni sistem kao međusloj između hardvera i softvera.

2.1.1 Mikrokontroleri

Mikrokontroleri (eng. Microprocessor unit)(MPU) predstavljaju programabilna integrisana kola. Najjednostavnije rečeno, mikrokontroler predstavlja računar u malom. Namenjeni su da budu programabilni, te se jedan kontroler može koristiti za veliki broj različitih namena. [8]

Mikrokontroleri rade u kontrolnoj petlji, odnosno očitavaju određeni skup ulaznih parametara, obrađuju ih i na osnovu toga podešavaju odgovarajuće izlazne parametre. Ulazni parametri mogu biti direktna očitavanja sa senzora, ili podaci dobijeni od drugih eksternih sistema, putem nekog od komunikacijskih protokola. Isto tako izlazni parametri mogu predstavljati direktnu kontrolu nad aktuatorima, ali mogu biti i prosleđeni ostalim komponentama sistema. Kontrolna petlja se ponavlja sve dok traje kontrolni proces, odnosno dok je mikrokontroler priključen na napajanje.

Neki od glavnih delova mikrokontrolera jesu:

1. **mikroprocesor** (eng. central microprocesor unit) (CPU) koji svojom arhitekturom veoma sličan procesorima koje susrećemo u klasičnim računarskim sistemima. Glavna razlika jeste dosta manja procesorska snaga, manja učestanost takta, registarska memorija manjeg obima, kraća dužina procesorske reči, ali i značajno jeftinija cena proizvodnje.
2. **stalna memorija** u kojoj se čuva izvršni program
3. **RAM memorija** u kojoj se privremeno skladište podaci koji su produkt izvršavanja kontrolne petlje
4. **Analogni i digitalni ulazi i izlazi** putem kojih kontroler može direktno očitavati i na određene načine ispisivati analogne i digitalne signale. Mikrokontroleri najčešće imaju veliki broj I/O pinova, odnosno jednobitnih ulazno-izlaznih magistrala putem kojih se mogu ispisivati i očitavati samo digitalne vrednosti, odnosno vrednosti Bulove algebre, gde jedinica

predstavlja visok logički nivo (eng. HIGH), a nula odsustvo napona, tj. niski logički nivo (eng. LOW). Pored I/O pinova, mogu postojati i analogni pinovi, koji putem analogno/digitalnih konvertora (ADC) mogu očitavati promenljivi napon na ulazu. Složeniji mikrokontroleri mogu imati i digitalno/analogne konvertere (DAC), pomoću kojih mogu ispisivati promenljiv napon na svojim izlazima. ADC i DAC konvertori predstavljaju još jednu od standardnih hardverskih komponenti ugrađenih u mikrokontroler.

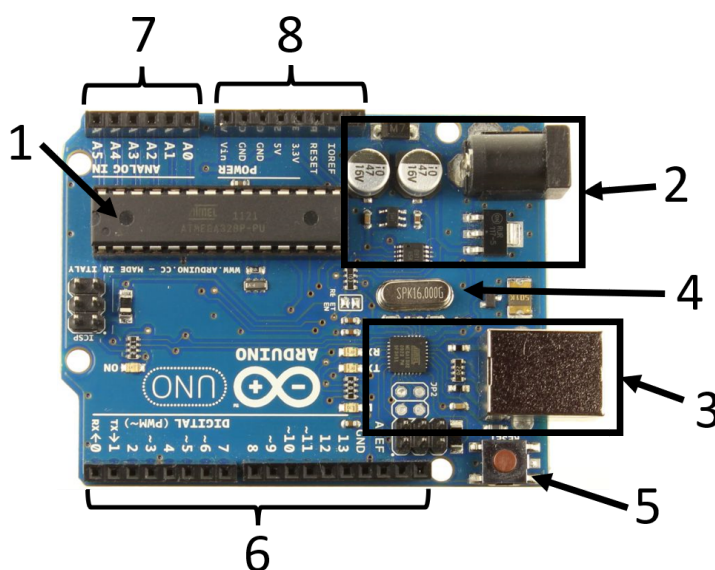
5. **Komunikacijski interfejsi** pomoću kojih kontroler putem određenih definisanih protokola kao što su I2C, UART, SPI, može komunicirati sa drugim eksternim komponentama.
6. **Tajmeri i brojači** koji služe za merenje vremena. Frekvencija rada, odnosno procesorski takt mikrokontrolera, najčešće je reda veličine kiloherca, što je 1000 puta sporije od standardnih računarskih sistema. Ovaj takt se najčešće dobija pomoću kristalnih oscilatora, koji mogu biti eksterni ili ugrađeni u sam kontroler. Na osnovu ovog takta, brojanjem njegovih perioda, mikrokontroler može meriti vreme od početka rada, ili između pojedinačnih događaja.
7. **Prekidne linije** odnosno interapti (eng. interrupt). Kako su procesori na mikrokontrolerima najčešće jednojezgarni, operacije, odnosno kontrolna petlja, izvršavaju se u jednoj niti, što može predstavljati problem u slučajevima kada je potrebno brzo reagovati na određene događaje. Zbog ovog problema uvode se prekidi (interapti). Kada se pozovu, interapti prekidaju tok glavne niti i izvršavaju svoj skup predefinisanih operacija. Okidači za pozivanje prekida proveravaju se u pozadini programa, nezavisno od toka glavne niti. To mogu biti postizanje određene vrednosti u nekom od brojačkih tajmerskih registara, promena na nekom od ulazno-izlaznih pinova ili flegovi koje šalju neke od ostalih ugrađenih ili eksternih komponentata.

Jasno je da je zbog svojih osobina, mikrokontroler glavni i centralni činiac svih namenskih računarskih sistema.

2.1.2 Arduino razvojno okruženje

Za programiranje mikrokontrolera u masovnoj proizvodnji koriste se specijalizovani programatori. Naime, softver napisan u nekom od viših programskih jezika se najpre na računaru kompajlira u mašinski kod, koji se zatim putem programatora upisuje na sam kontroler. U procesu razvoja i projektovanja samog namenskog sistema kao i u edukativne svrhe najčešće se koriste razvojna okruženja. Ovakva okruženja realizovana su u obliku štampanih ploča koje na sebi pored podnožja za sam kontroler poseduju programator, jedinicu za napajanje, kao i konektore, koji omogućavaju lako priključivanje ulaznih i izlaznih komponenti. Na razvojim pločama često se nalaze i proste komponente poput tastera, LED dioda, malih LCD ekrana, prostih senzora i dodatnih komunikacijskih interfejsa, kako bi se dodatno olakšao proces projektovanja i testiranja budućeg namenskog sistema.

U ovom radu za potrebe modulacije i demodulacije podataka u svetlosne impulse na predajnoj, odnosno prijemnoj strani korišćeno je Arduino razvojno okruženje (slika 2).



Slika 2. Arduino mikrokontroler

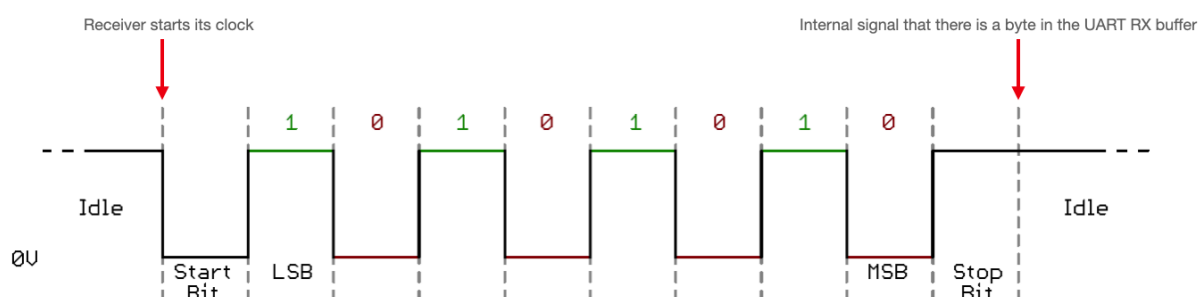
U osnovi Arduino okruženja nalazi se atmega328p mikrokontroler (poglavlje 2.1.3) čiji su digitalni i ADC pinovi izvedeni u obliku ženskih konektora (slika 2-7 i 2-8), koji omogućavaju lako konektovanje periferija. Pored samog mikrokontrolera na štampanoj ploči nalazi se naponska sekcija (slika 2-2), koja obezbeđuje stabilno napajanje za sam kontroler i ostale komponente. Naponske linije takođe su izvedene na skup konektora (slika 2-8) kako bi se olakšalo napajanje eksternih komponentata. Na štampanoj ploči nalazi se i dugme kojim se restartuje rad kontrolera (slika 2-5), odnosno njegova kontrolna petlja, kao i kristalni oscilator (slika 2-4) koji kontroleru daje takt frekvencije 8MHz. Arduino platforma se na računar povezuje putem USB porta kojim se programatoru (slika 2-3) dostavlja mašinski kod softvera, prilikom programiranja. Ovaj port može se koristiti i za serijsku UART komunikaciju (poglavlje 2.2) između kontrolera i računara ili kontrolera sa drugim kontrolerima.

2.1.3 atmega238p mikrokontroler

Atmega238P mikrokontroler radi sa procesorskim rečima dužine 8 bita. Radi na naponu od 5V i ima 14 I/O pinova od kojih njih 6 podržavaju mogućnost simuliranog ispisivanja analognih vrednosti putem impulsno širinske modulacije (eng. power width modulation) (PWM) modulacije. Atmega238P poseduje i desetobitni ADC konvertor sa 6 ulaza. Ulazni napon na ovim pinovima može biti od 0 do 5V, a kako je ugrađeni ADC konvertor desetobitni, promenljivi napon, u ovom opsegu biva konvertovan u desetobitnu broječanu vrednost, odnosno vrednost između 0 i 1023, gde naponu od 0 volti odgovara izlaz nula a naponu od 5V vrednost 1023. To znači da minimalna razlika u naponu koju ADC konverter ovog kontrolera može detektovati iznosi $5/1024$ što je približno 5 mV. Atmega238P kontroler poseduje 2kb SRAM memorije, kao i 1kb EEPROM, odnosno stalne programske memorije. [8] Za merenje vremena postoje 3 tajmera, od kojih je jedan šesnaestobitni, a druga dva osmобitna. Takođe postoje i po jedna magistrala za I2C i UART komunikaciju.

2.2 UART serijska komunikacija

Višenamenski neusklašeni primo-predajnik (eng. universal asynchronous receiver - transmitter) jedan je od najčešće korišćenih serijskih protokola za komunikaciju. On podrazumeva da predajnik prijemniku šalje binarne reči (eng. word), jedan po jedan bit kroz jedan kanal, odnosno provodnik (slika 3). [7] Osim tog kanala prijemnik i predajnik nemaju zajednički takt, niti bilo kakvu dodatnu komunikaciju, tako da se oslanjaju na unapred dogovorenu zajedničku frekvenciju odabiranja (eng. baud rate) i format komunikacije.



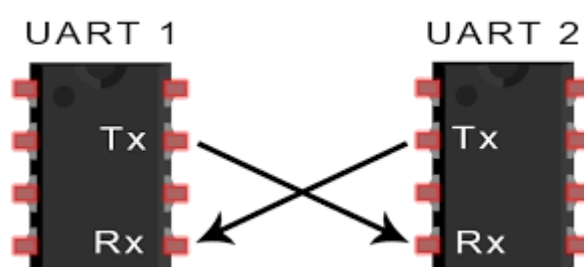
Slika 3.

Na slici iznad je prikazan tipičan UART okvir (eng. frame). Kada je UART neaktivan, njegov kanal je na visokom logičkom nivou (HIGH) koji označava Bulovu vrednost 1 i najčešće je 3.3V ili 5V. Početak okvira se signalizira spuštanjem signala na logički nizak nivo (LOW). Signal se zadržava na niskom nivou u trajanju jednog bita (eng. bit time). Ovaj start bit pomaže prijemniku da se sinhronizuje sa predajnikom. Nakon toga, prenose se biti reči (eng. data bits), jedan po jedan. U ovom slučaju, ta reč je 10101010. Nakon poslednjeg bita reči, signal se vraća na visok nivo i zadržava se za vreme jednog bita (stop bit), kako bi omogućio prepoznavanje narednog start bit-a. [7]

Veličina reči varira, ali u većini slučajeva se koriste reči od 8 bita. Takođe je promenljiv i redosled kojim se biti šalju. Najčešći redosled je od bita najmanje vrednosti (eng. Least Significant Bit) (LSB) do bita najveće vrednosti (eng. Most Significant Bit, MSB), ali moguć je i suprotan redosled. Promenljivo je i trajanje stop

bit-a, koji nekad može trajati i 1.5 ili 2 bitska vremena. Naravno, svi ovi parametri moraju biti zajednički i za prijemnik i za predajnik i usklađeni pre početka komunikacije.

Jedan UART modul tipično sadrži i prijemnik i predajnik, koji koriste dve odvojene žice. Zbog toga, UART podržava istovremenu nezavisnu komunikaciju u oba smera (eng. full duplex). Prijemnik se obično naziva Rx, a predajnik Tx. Oni se povezuju unakrsno (Tx jednog UART-a na Rx drugog, i obrnuto). (slika 4)



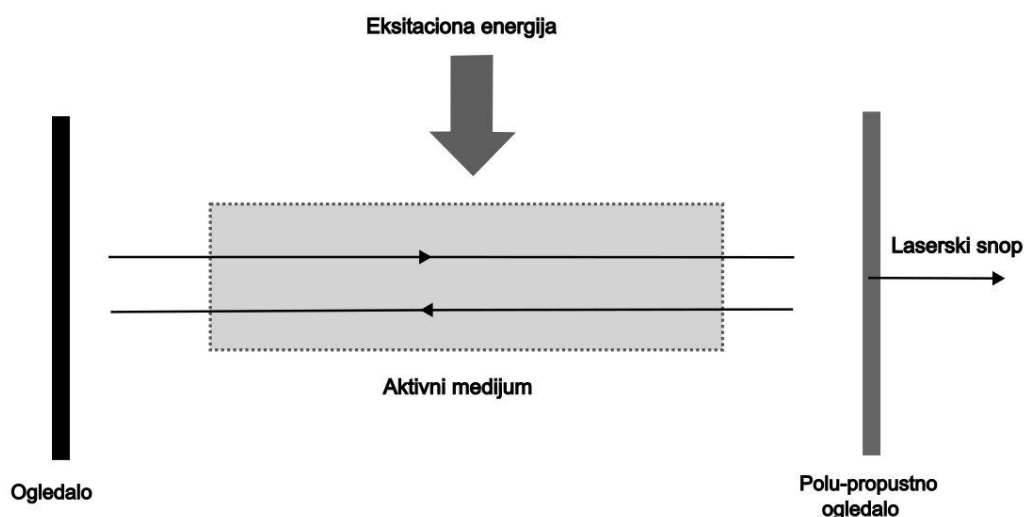
Slika 4.

Prekidom (eng. line break) se naziva držanje kanala na niskom logičkom nivou u toku celog trajanja okvira, uključujući i stop bit. Kako stop bit po pravilu mora da bude na visokom nivou, prekid označava grešku u komunikaciji. On može da znači da je došlo do kvara u predajniku, do gubitka kontakta, ili da frekvencije odabiranja nisu usklađene. Ponekad, prekid može da ima unapred dogovoreno posebno značenje, a predajnik ga namerno izaziva. Ako traje dovoljno dugo, prekid je lako prepoznati, čak i kad frekvencije odabiranja i formati okvira nisu usklađeni. Zbog toga se nekad koristi kao komanda za resetovanje frekvencije odabiranja i vraćanja na podrazumevane vrednosti.

Arduino platforma na sebi poseduje UART modul pomoću koga se softver napisan i kompajliran na računaru upisuje na mikrokontroler i pomoću koga oni mogu komunicirati tokom izvršavanja kontrolne petlje. U ovom radu UART serijska komunikacija korišćena je za slanje teksta koji se prenosi od predajnog računara do predajnog kontrolera i od prijemnog kontrolera do prijemnog računara.

2.3 Laser

Laser je uređaj koji emituje koherentnu monohromatsku svetlost koristeći princip stimulisane emisije elektromagnetnog zračenja. Sama reč “LASER” je akronim na engleskom jeziku za sintagmu “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”. [11] Laserima se smatraju uređaji koji koriste princip stimulisane emisije i stvaraju koherentnu svetlost u rasponu talasnih dužina od 180 nm do 1 mm, što znači da postoje laseri koji mogu da zrače u UV domenu spektra, vidljivom domenu i infracrvenom domenu, za razliku od Lasera postoje i uređaji koji mogu da zrače u domenu mikrotalasa koji se nazivaju Maseri (eng .microwave amplification by stimulated emission of radiation”).



slika 5. Skica aktivnog dela lasera

Na slici 5, je prikazana skica aktivnog dela lasera. Prvo se energijom (koja se može ostvariti termalno ili nekim drugim koherentnim izvorom svetlosti) pobuđuju atomi u aktivnom medijumu koji onda počinje da zrači. Prvi zraci neće imati veliki intenzitet, nakon što se odbiju ili od ogledala ili polu-propusnog ogledala i prođu kroz aktivni medijum, zbog rezonantnih kvantnih efekata će stimulisati dodatno deeksitovanje pobuđenih elektrona medijuma, što se naziva stimulisana emisija, koji će za efekat imati povećanje intenziteta snopa. Koherencija je obezbeđena time što je stimulisana emisija zrači iste i jako bliske talasne dužine originalno izračene

svetlosti iz medijuma. [11] Nakon što intenzitet dovoljno naraste snop se probija kroz polu-propusno ogledalo i time dobija laserski snop.

Aktivni medijum može biti sačinjen od gasa, tečnosti ili čvrstih tela. U ovom radu korišćen je laser čiji je aktivni medijum čvrsto telo, odnosno poluprovodnik. Poluprovodnici nam omogućavaju da imamo lasere malih dimenzija. Laser u ovom radu proizvodi svetlost talasne dužine oko 640 nm, odnosno crvenu svetlost, a povezuje se i kontroliše putem nekog od I/O pinova kontrolera.

2.4 Optoelektronski elementi

Pod optoelektronikom podrazumevamo granu elektronike koja se bavi akvizicijom i generisanjem svetlosti iz vidljivog i bliskog infracrvenog elektromagnetnog zračenja. Generalno, optoelemente možemo grubo podeliti u optoelektronske senzore i optoelektronske izvore.

Glavni predstavnici optoelektronskih izvora jesu svetlosno emitujuća dioda (eng. light-emitting diode) (LED), koja radi u vidljivom delu spektra i infracrvena dioda, koja emituje u infracrvenom nevidljivom delu spektra.

Najpoznatiji predstavnici optoelektronskih senzora su fotootpornik, fotodioda, infracrvena dioda, fototranzistor i infracrveni tranzistor. U ovom radu su za prijemnik korišćena 2 različita optoelektronska elementa, koja rade u vidljivom delu spektra, fotootpornik i fotodioda.

2.4.1 Fotootpornik

Fotootpornik je pasivna optoelektronska komponenta koja ima promenljivu otpornost u zavisnosti od količine svetlosti koja pada na tu komponentu. Kako količina svetlosti raste tako će otpornost fotootpornika eksponencijalno opadati, a isto važi i u drugom smeru. U mraku, otpornik ima

veliku otpornost (do nekoliko $M\Omega$), dok pri potpunoj svetlosti, ima otpor od nekoliko stotina Ω . [4]

Ako postoji izvor svetlosti koji pada na telo fotootpornika i frekvencija upadne svetlosti premašuje određenu frekvenciju, fotoni koje apsorbuje poluprovodnik daju vezanim elektronima dovoljno energije da skoče u sledeći provodni elektronski nivo. Na ovaj način dobijamo slobodne elektrone i njihove odgovarajuće šupljine koje provide električnu energiju, čime smanjuju električni otpor tela fotootpornika.

Glavni nedostatak fotootpornika jeste brzina njegovog rada. [4] Naime, pri brzim promenama maksimalnog i minimalnog osvetljenja, elektroni teže mirovanju ili ravnomernom kretanju (prvi Njutnov zakon), te proces nastanka slobodnih elektrona i njihovog vraćanja u elektronski nivo teče sporo. Iz ovog razloga se često koriste brži fotoelementi (fotodioda i fototranzistor), kada je potrebno da brzina reakcije na promenu osvetljenja bude veća.

2.4.2 Fotodioda

Fotodioda je svetlosno osetljiv poluprovodnički element. Ona za razliku od fotootpornika generiše struju nastalu apsorbcijom fotona. U elektronskom smislu, fotodioda je PN struktura. Kada foton dovoljne energije udari u fotodiodu on stvara par elektron-šupljina. Ovaj efekat se u fizici naziva unutrašnji fotoelektrični efekat. Ako se apsorpcija svetlosti dogodi u osiromašenoj oblasti spoja ili jednu dužinu difuzije od osiromašene oblasti, ovi nosioci se uklanjaju sa spoja ugrađenim električnim poljem, koje dovodimo u kolu [5]. Na ovaj način se šupljine kreću ka anodi, a elektroni ka katodi, čime nastaje takozvana „fotostruja”. Samim tim, ukupna struja kroz diodu će biti zbir spoljne električne struje i fotostruje. Takođe, za razliku od fotootpornika, fotodioda je linearni element u oblasti vidljivog dela spektra, što olakšava brojne primene ovog optoelementa [6]. Trenutno fotodiode su najzastupljeniji

elementi u solarnim panelima, tj. solarni paneli nisu ništa drugo, do veliki broj fotodioda [5].

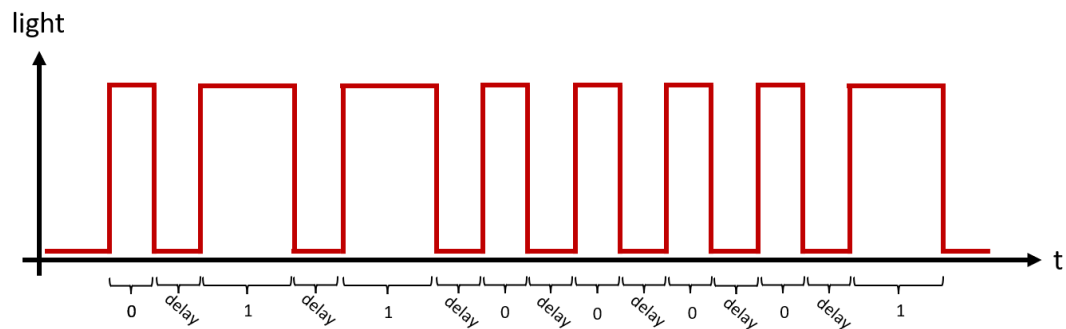
2.5 Vremenska modulacija

2.5.1 Predajnik

Ulazni tekst, na predajniku, se pomoću nekih od softverskih alata za serijsku komunikaciju putem ranije opisanog UART protokola šalje na mikrokontroler. Kontroler očitava jedan po jedan karakter, odnosno njegov dekadni zapis konvertuje u osmobiitni binarni zapis, a zatim na odgovarajući način moduliše pojedinačne bitove u svetlosne impulse lasera [9].

Kod vremenske modulacije, Bulove vrednosti nule i jedinice modulišu se kao svetlosni impulsi lasera različite dužine sa pauzama, odnosno sekvencama odsustva svetlosti lasera (slika 6).

Na slici 6 dat je primer vremenske modulacije karaktera "a". Kontroler karakter očitava iz bafera UART komponente kao njegovu dekadnu ASCII vrednost odnosno 97 [9]. Ovaj broj se zatim konvertuje u binarnu sekvencu 0111100001. Pojedinačni bitovi se predstavljaju kao sekvence u kojima laser svetli trajanja t_1 (za bit 1) i t_2 (za bit 0) gde je $t_2 > t_1$. Između svaka dva bita postoji sekvenca u kojoj laser ne svetli trajnja t_p .



Slika 6. Prikaz signala koji se šalje predajniku

Shodno ovome ukupno vreme potrebno za slanje jednog karaktera iznosi:

$$T = br.nula * t_1 + br.jedinica * t_2 + 8 * t_p$$

Vreme trajanja pojedinačnih sekvenci određuje se korišćenjem CTC (eng. compare timer counter) prekida tajmera 1 atmega328p kontrolera. Preskaler tajmera definiše koliko taktova oscilatora je potrebno da prođe pre nego što se vrednost u brojačkom registru tajmera poveća za 1 i u realizovanom sistemu bio je podešen na 1/64. CTC interapt nadgleda brojački registar i upoređuje ga sa poredbenim registrom u koji je upisan vrednost 24. Kada se vrednosti ova dva registra izjednače poziva se prekidna rutina [9]. Kako je učestanost takta 16MHz, frekvencija pozivanja prekidne rutine iznosi:

$$\frac{16 * 10^3 * \frac{1}{preskaler}}{24} = 0.0001 Hz$$

Ovo znači da će se prekidna rutina pozivati na svakih 0.1ms. Definisana je tako da svaki put kada se pozove, povećava vrednost određene promenljive za 1. Na ovaj način u svakom trenutku izvršavanje softvera može se imati precizna informacija o ukupnom vremenu proteklom od početka rada

predajnika. Poređenjem vrednosti ove promenljive u različitim trenucima lako se može precizno meriti vremenski intervali, u kojima će laser svetleti, ili ne svetleti, zavisno od modulacije i binarne sekvence koja se moduliše.

2.5.1 Predajnik

Na prijemnoj strani sistema nalazi se fotosenzor povezan na neki od analognih ulaza mikrokontrolera. ADC konverter podešen je tako da očitava promenljivi napon na fotosenzoru i svaki put kada završi jedan ciklus čitanja aktivira ADC interapt, čija prekidna rutina osvežava promenljivu u kojoj se čuva trenutni napon na fotosenzoru. Ovaj napon varira u određenom opsegu, zavisno da li laser svetli ili ne. Na ovaj opseg vrednosti značajno utiče i količina svetla u prostoru u kom se ceo sistem nalazi [9]. Prvi korak pri demodulaciji signala jeste binarizacija ovog signala, gde se za sve napone preko odeređenog praga (eng. treshold), uzima vrednost 1, a ispod tog praga vrednost nula. Kod vremenske modulacije ne postoji problem signaliziranja početka prenosa, odnosno sistem zna da prenos karaktera (8 bita) počinje prvom pojavom vrednosti 1 na ulazu. Sistem meri trajanja pojedinačnih sekvenci visokog logičkog nivoa i zavisno od njihove dužine određuje da li je pristigli bit 1 ili 0. Merenje vremena u sistemu realizovano je pomoću CTC interapta tajmera 1, kao što je to i na predajnoj strani. Zbog nesavršenosti sistema potrebno je dobijene dužine uzimati sa određenom tolerancijom. Sistem čeka da se sakupi 8 pročitanih bitova koje onda konvertuje nazad u dekadnu ASCII vrednost koju putem UART-a šalje prijemnom računaru.

Pored same tromosti sitema, odnosno brzine obrade, dodatno ograničenje u brzine ovakve komunikacije unose i tromosti korišćenih senzora odnosno njihova neapsolutna responzivnost.

2.6 Direktna modulacija

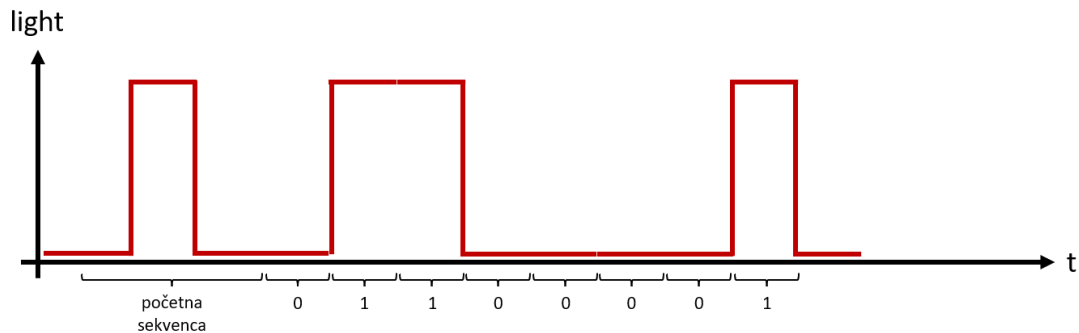
2.6.1 Predajnik

Ulazni tekst, na predajniku, se pomoću nekih od softverskih alata za serijsku komunikaciju putem ranije opisanog UART protokola šalje na mikrokontroler, koji očitava jedan po jedan karakter odnosno konvertuje ga u osmobični binarni zapis kao što je to slučaj i pri korišćenju direktne modulacije. [10]

Kod direktne modulacije Bulove vrednosti nule i jedinice modulišu se direktno kao svetlosni impulsi lasera jednakih dužina. (slika 7)

Na slici 4 dat je primer direktne modulacije karaktera "a". Kontroler očitava karakter iz bafera UART komponente kao njegovu dekadnu ASCII vrednost odnosno 97. Ovaj broj se zatim konvertuje u binarnu sekvencu 011100001 kao što je slučaj i kod vremenske modulacije. Nule se predstavljaju kao sekvence trajanja t , u kojima laser ne svetli dok se jedinice predstavljaju kao sekvence trajanja t gde laser ne svetli. [10]

Ono što predstavlja izazov pri ovakvoj komunikaciji jeste potreba za signaliziranjem početka komunikacije i usklađivanjem predajnika i prijemnika. Kod prethodne, vremenske modulacije početak komunikacije se jednostavno određuje jer on predstavlja prvu pojavu logički visoke vrednosti na ulazu a vrednosti pojedinačnih bitova tumače na osnovu očekivanih trajanja. Kod direktne modulacije ovo nije slučaj jer prvi bit može biti i 0 i 1, odnosno nakon binarizacije vrednosti očitanih na fotosenzoru možemo dobiti obe Bulove vrednosti te ne možemo utvrditi od kog trenutka je započeta transmisija podataka. Ovaj problem rešen je dodavanjem početne sekvence bitova vrednosti 010 pre postojećih 8 bitova koji opisuju poslani karakter. (slika 7)



Slika 7.

2.6.2 Prijemnik

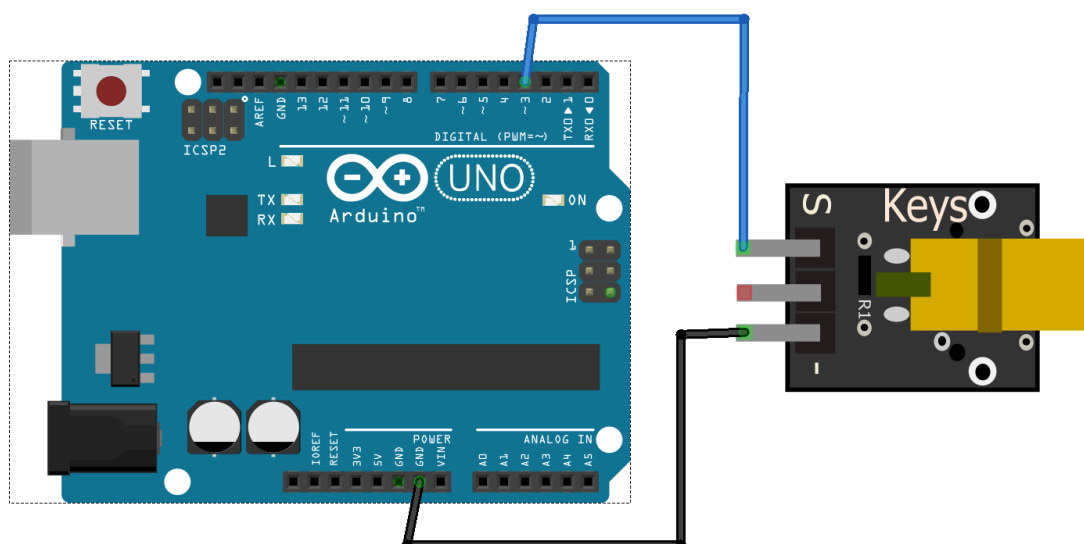
Na sličan način kao kod direktne modulacije sistem očitava vrednost napona na fotosenzoru, binarizuje ih i nalazi se u stanju mirovanja sve dok se na ulaza ne pojavi vrednost 1 odnosno započne transmisija dugog bita početne sekvence. Sistem meri njegovo trajanje odnosno vreme pre nego ulaz ponovo postane LOW čime počinje transmisija trećeg bita početne sekvence. Sistem zatim čeka da prođe izmereni vremenski period odnosno transmisija ovog bita. Nakon toga počinje transmisija 8 bitova karaktera koji se prenosi. Na osnovu vrednosti na fotosenzoru izmerene na polovini sad poznatih intervala svakog od narednih bitova određuje se njihova vrednost. Kada pristigne i bude dekodovano svih 8 bita oni se konvertuju nazat u dekadnu ASCII vrednost karaktera i putem UART komunikacije šalju na prijemni računar. Kako se karakteri mogu slati jedan po jedan ili više odjednom kao i zbog kašnjenja koje unosi sam sistem potrebno je da uz svaki karakter odnosno njegov binarni zapis postoji i početna sekvenca. [9][10] Sva pomenuta vremena mere se pomoću CTC intrerapta tajmera 1 kao što je već ranije opisano.

4. Tehnička dokumentacija

3.1 Elektronska šema sistema

3.1.1 Predajnik

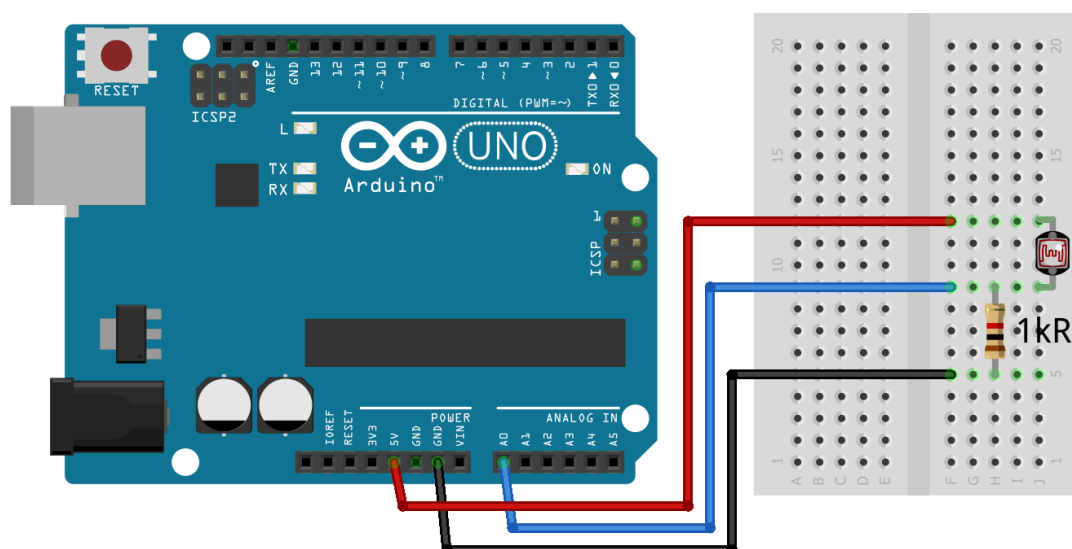
Kao predajnik korišćena je crvena laser dioda svetlosne talasne dužine $60nm$ povezana preko otpornika od $100R$ na neki od digitalnih pinova atmega328P mikrokontrolera nad Arduino platformi. (slika8)



Slika 8.

3.1.2 Prijemnik sa fotootpornikom

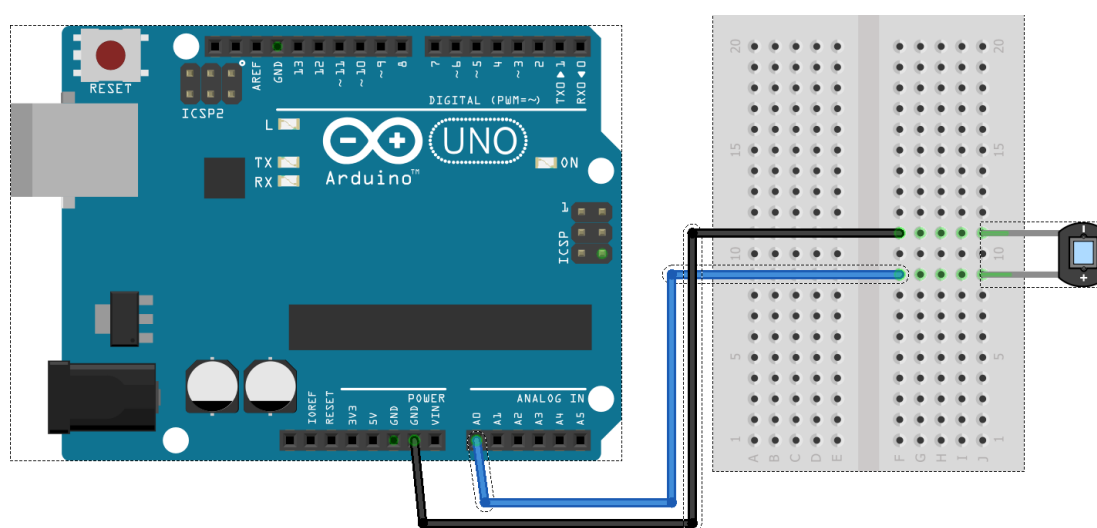
Pri korišćenju fotootpornika kao fotosenzora, na prijemnoj strani sistema, isti se povezuje u naponski razdelnik kao na slici 9 kako bi se promenljivi otpor na fotootporniku konvertovao u promenljivi napon koji se očitava putem nekog od analognih ulaza mikrokontrolera. Naponski razdelnik podešen je tako da se opseg otpornosti pri svetljenju i ne svetljenju lasera što bolje skalira na opseg od 0 do $5V$ koji kontroler čita. (slika 9)



Slika 9.

3.1.3 Prijemnik sa fotodiodom

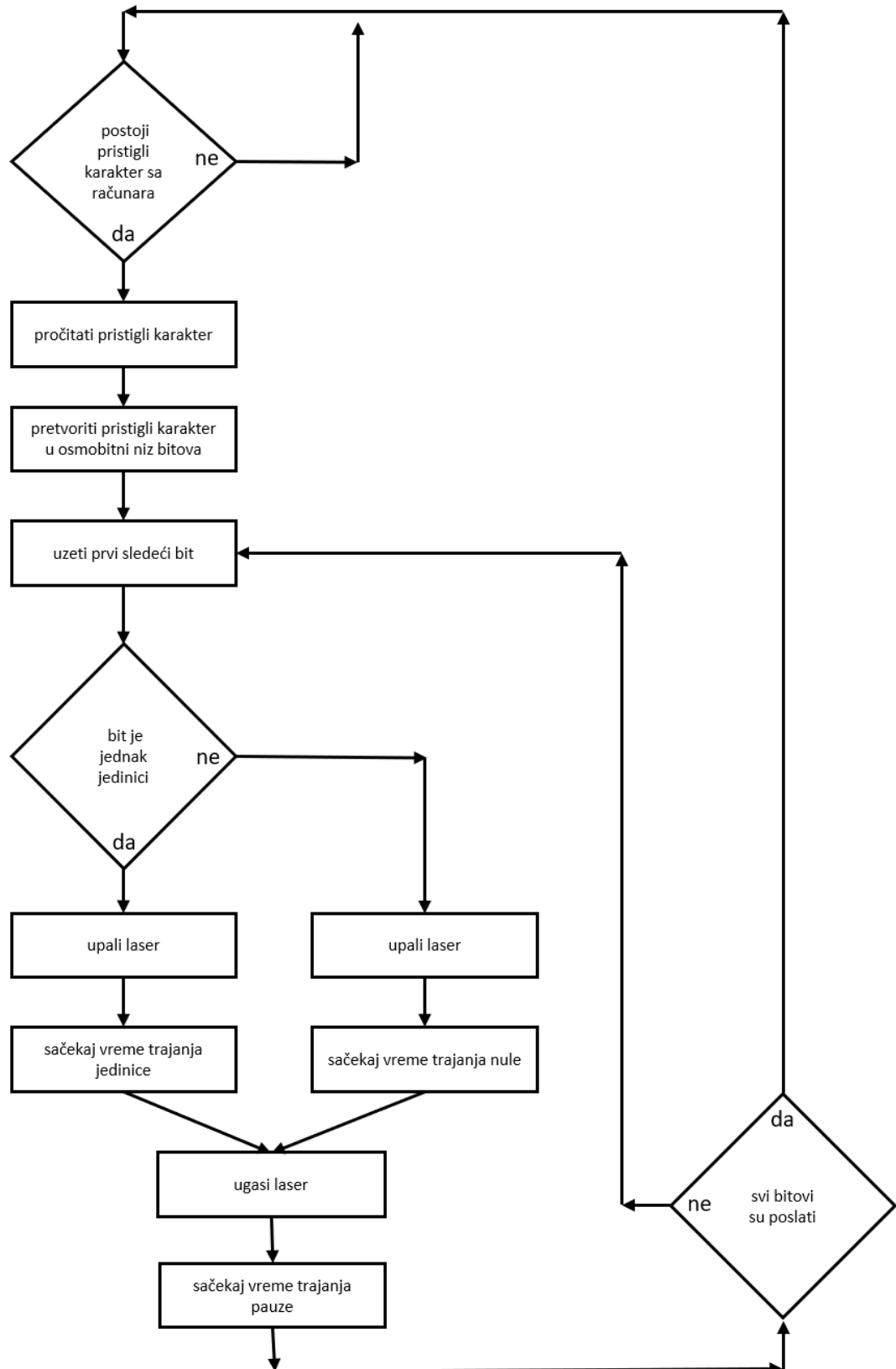
Pri korišćenju fotodiode kao fotosenzora, na prijemnoj strani sistema minus pin iste se povezuje na *GND* pin kontrolera dok se plus pin povezuje na neki od analognih ulaza. Vrednost napona u slučaj da laser ne svetli jednak je 0 dok pri svetljenju lasera dostiže vrednost od oko 1V. (slika 10)



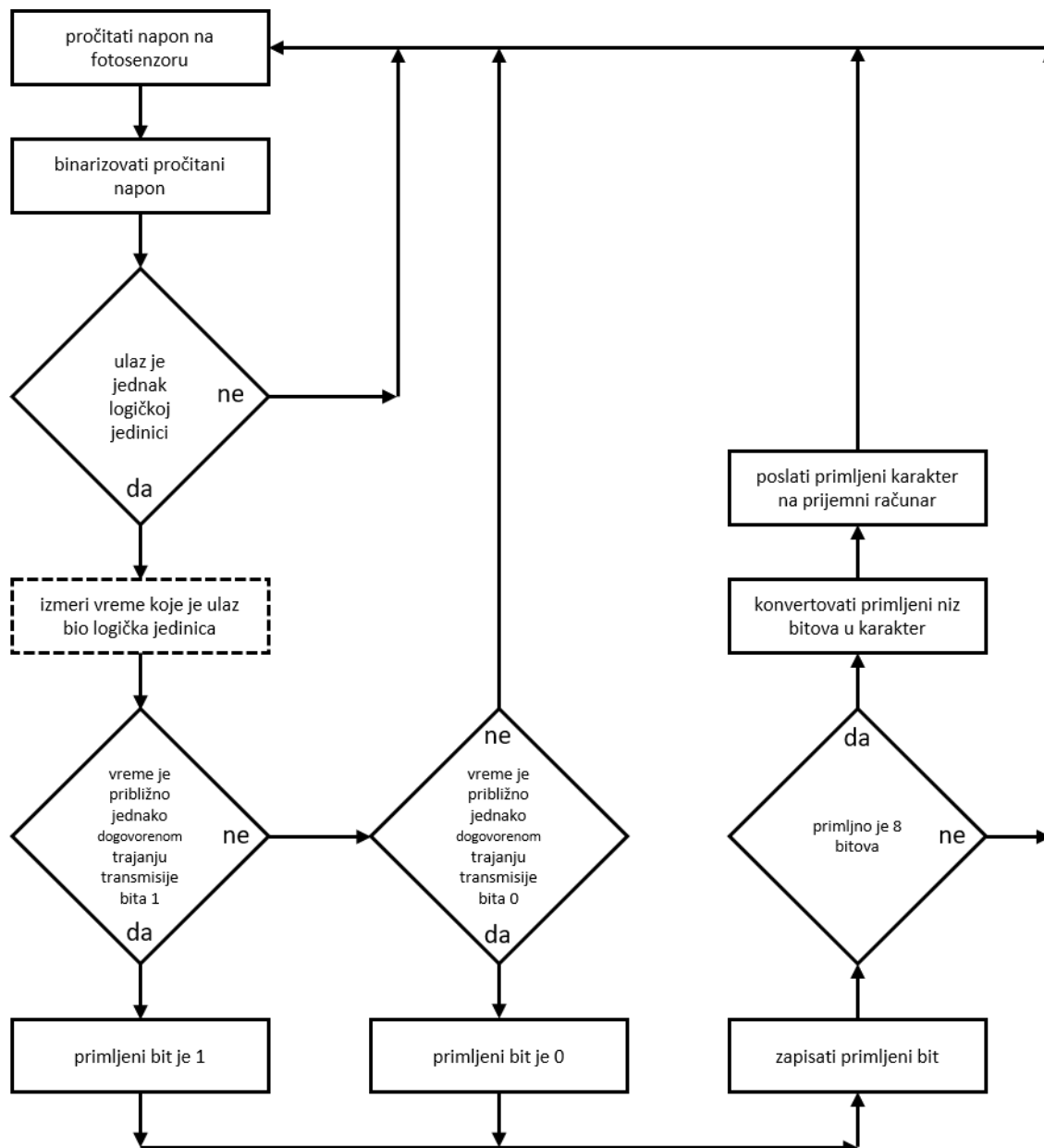
Slika 10.

3.2 Algoritamske blok šeme sistema

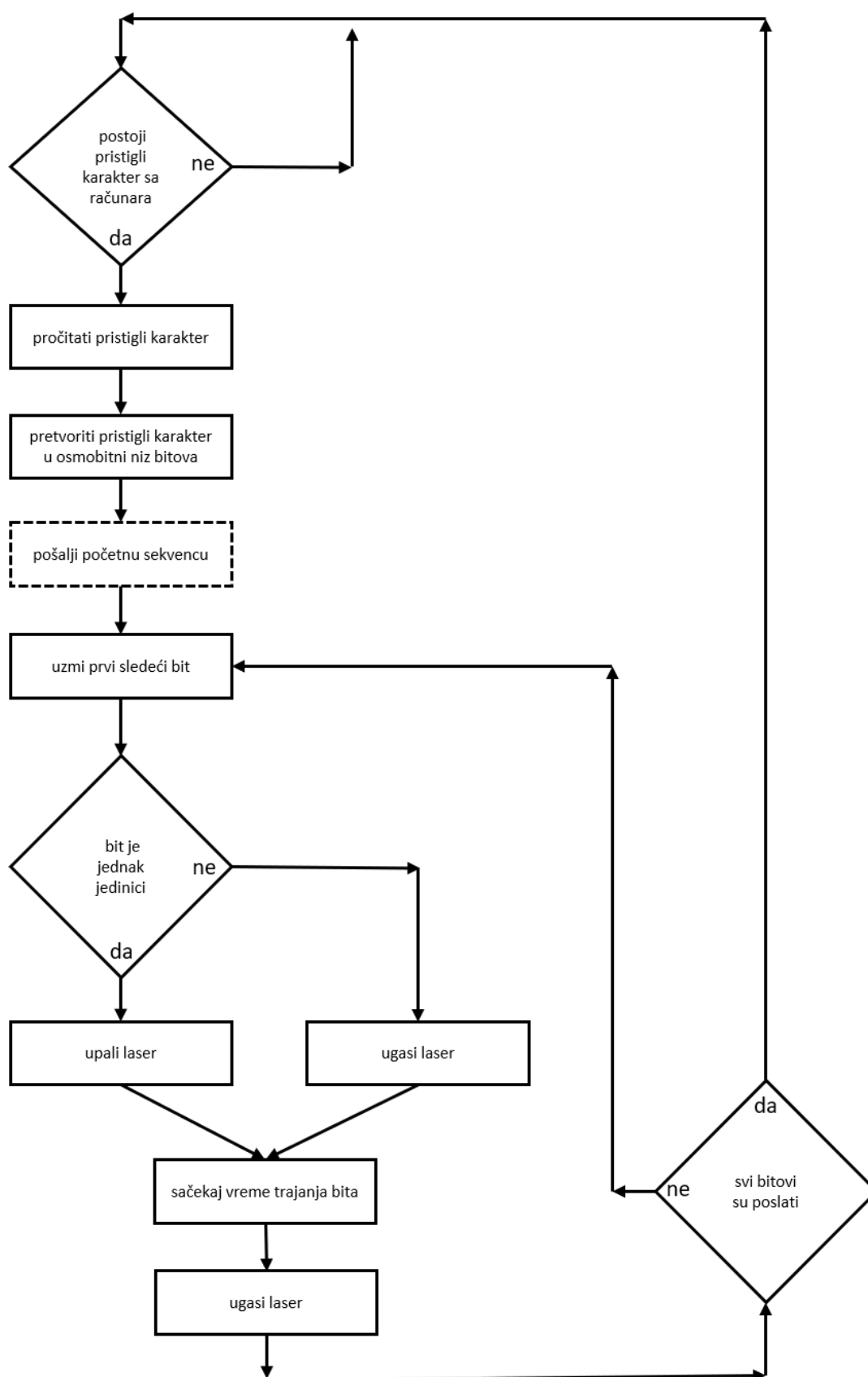
3.2.1 Vremenska modulacija - predajnik



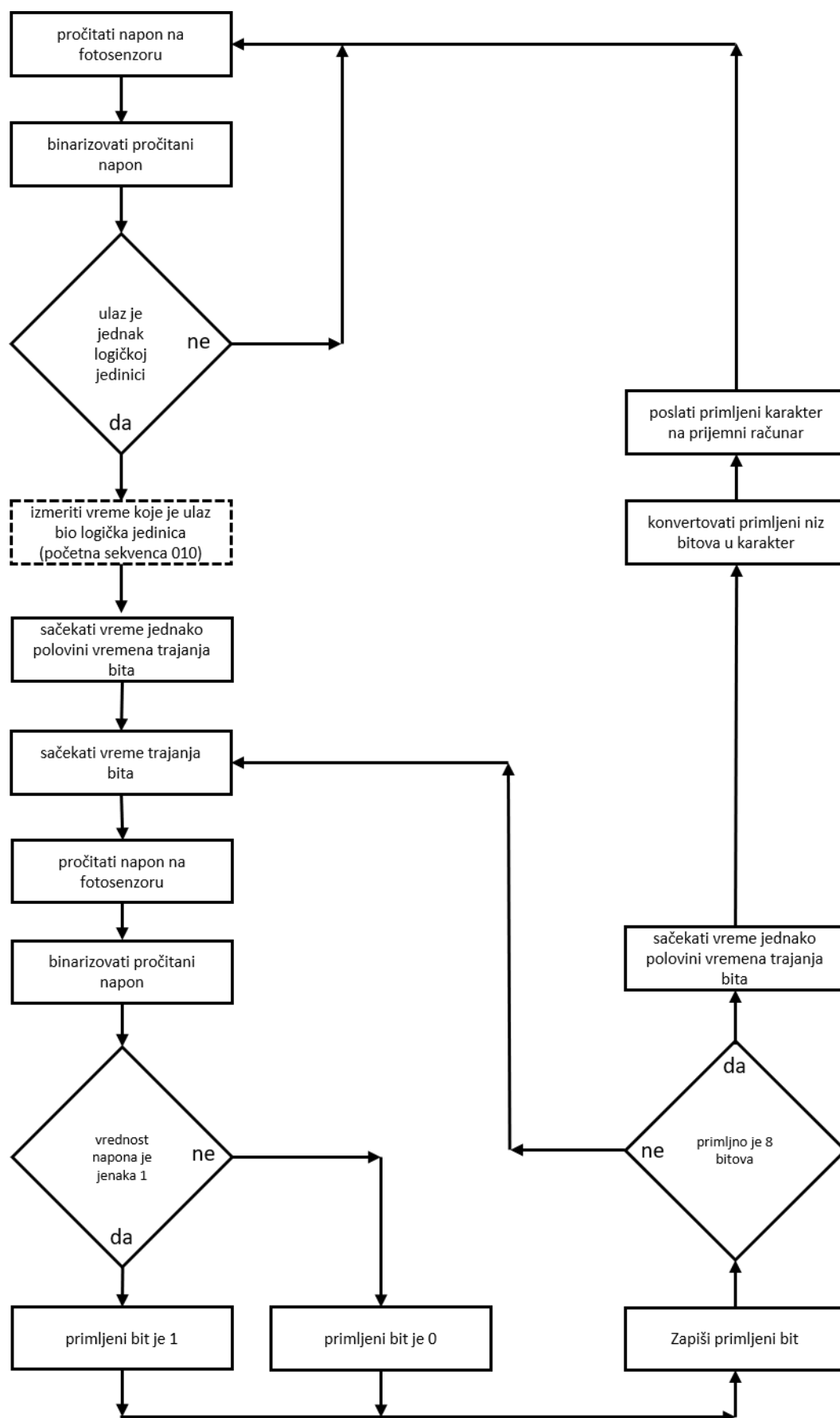
3.2.2 Vremenska modulacija - prijemnik



3.2.3 Direktna modulacija - predajnik



3.2.4 Direktna modulacija - prijemnik

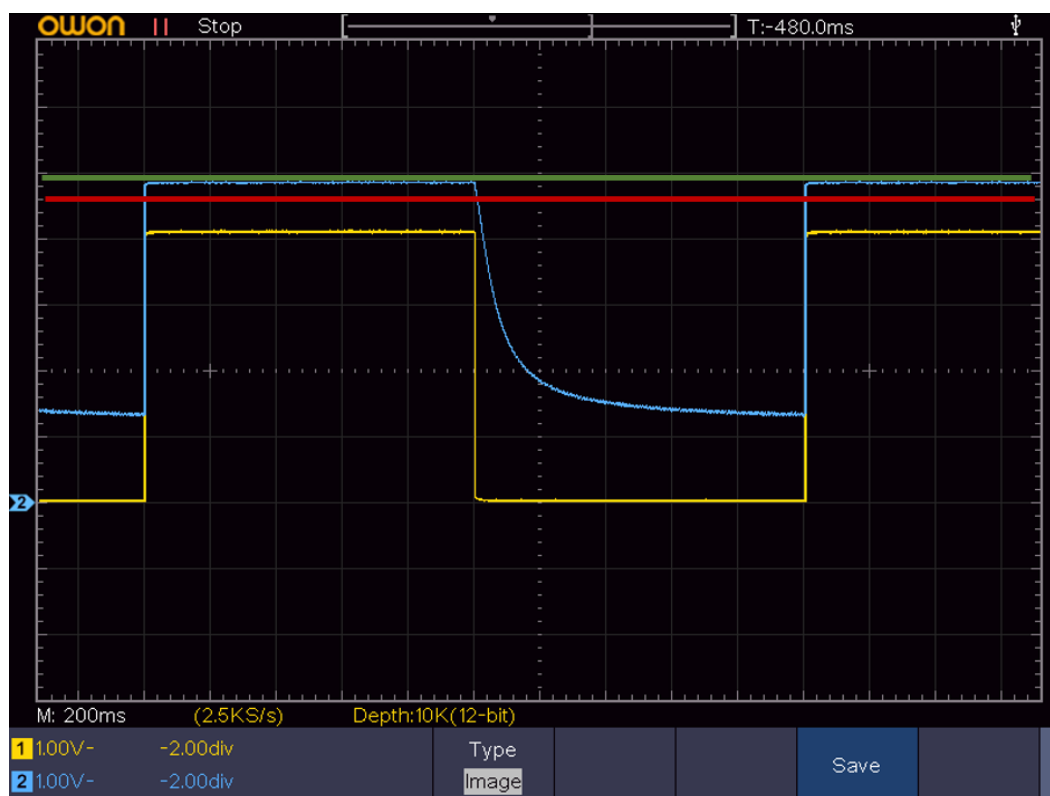


5. Rezultati i diskusija

5.1 Karakteristike fotosenzora

5.1.1 Fotootpornik

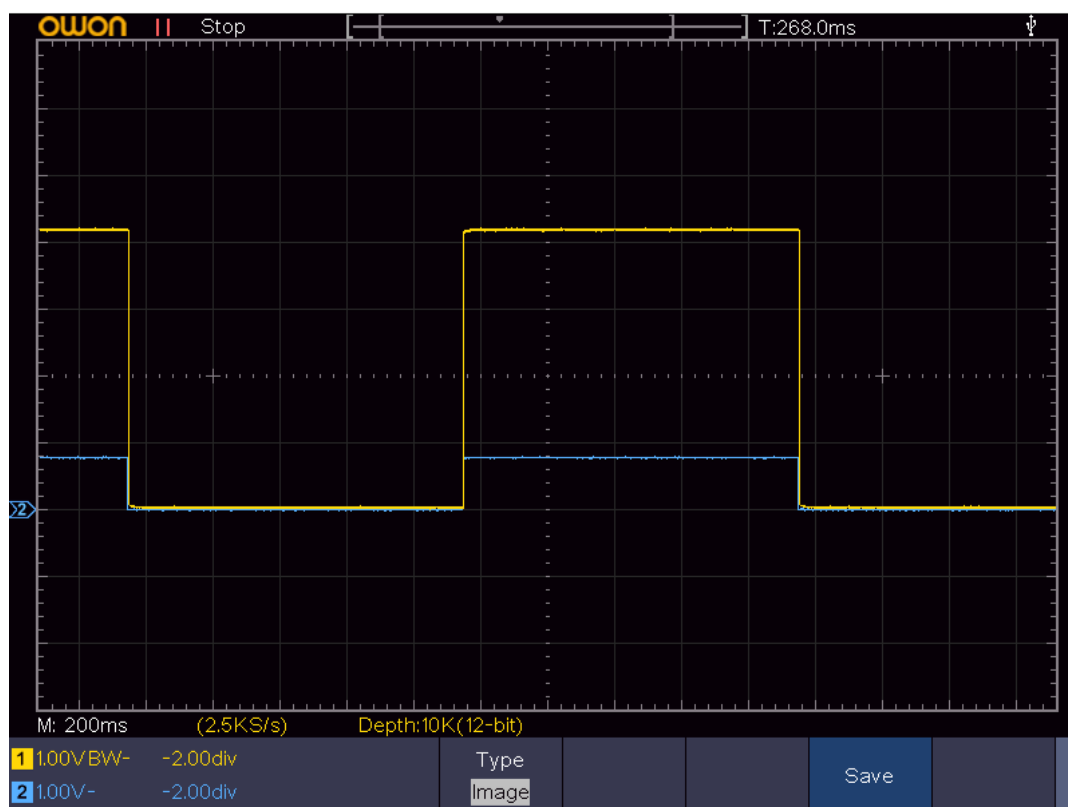
Na slici 11, dobijenoj pomoću osciloskopa, prikazani su realni izgled pobude trajanja 1s na leseru plavom bojom (binarna sekvenca 01) i odziv fotootpornika (napon na njemu) žutom bojom. Primećuje se da je fotootporniku potrebno oko 600ms da se potpuno stabilizuje odnosno postigne početnu vrednost napona nakon gašenja svetla lasera. Ova pojava predstavlja jedno od glavnih ograničenja pri korišćenju fotootpornika kao senzora na prijemniku a delimično se rešava postavljanjem praga (crvena linija) za binarizaciju očitano napona što bliže maksimumu napona na fotootporniku postignutog pri svetljenju lasera (zelena linija). (slika 11)



Slika 11.

5.1.2 Fotodioda

Na slici 12 dobijenoj pomoću osciloskopa, prikazani su realni izgled pobude trajanja 1s na leseru plavom bojom (binarna sekvenca 01) i odziv fotodiode (napon na istoj) žutom bojom. Primećuje se da je reakcija fotodiode gotovo trenutna tj. ne postoji period pražnjenja kao kod fotootpornika. (slika 12)



Slika 12.

5.2 Vremenska modulacija

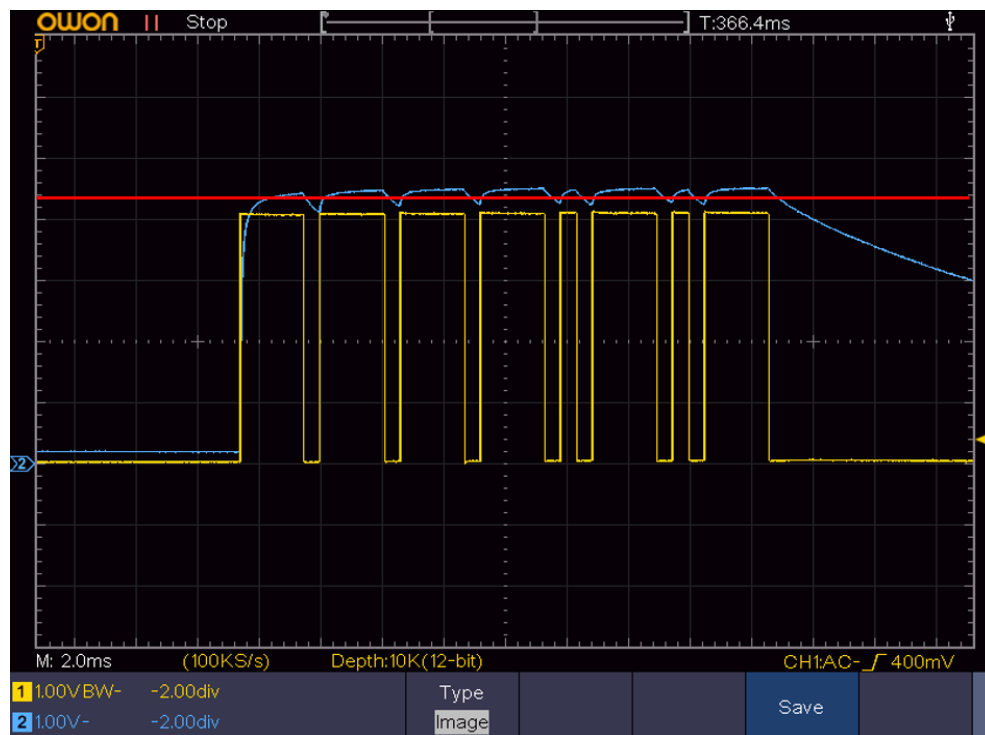
Kao glavni parametar za poređenje performansi različitih modulacija i senzora na prijemniku uzeta je maksimalna postignuta brzina protoka pri kojoj ne dolazi do grešaka u prenosu. Ova brzina se u slučaju vremenske modulacije računa po formuli:

$$V = \frac{1000ms}{\frac{t_1 + t_0}{2} + t_p}$$

Gde T_1 predstavlja vreme potrebno za slanje bita 1, T_0 vreme potrebno za slanje bita 0 a T_p pauzu između slanja pojedinačnih bitova. Dobija se V koje predstavlja maksimalnu brzinu protoka izraženu u bitima po sekundi.

5.2.1 Fotootpornik kao prijemnik

Na slici 13 su prikazna realna očitavanja napona na laseru (žutom bojom) i napona na fotootporniku (plavom bojom) pri slanju karaktera koji označava novi red (00001010) pri korišćenju vremenske modulacije. (slika 13)

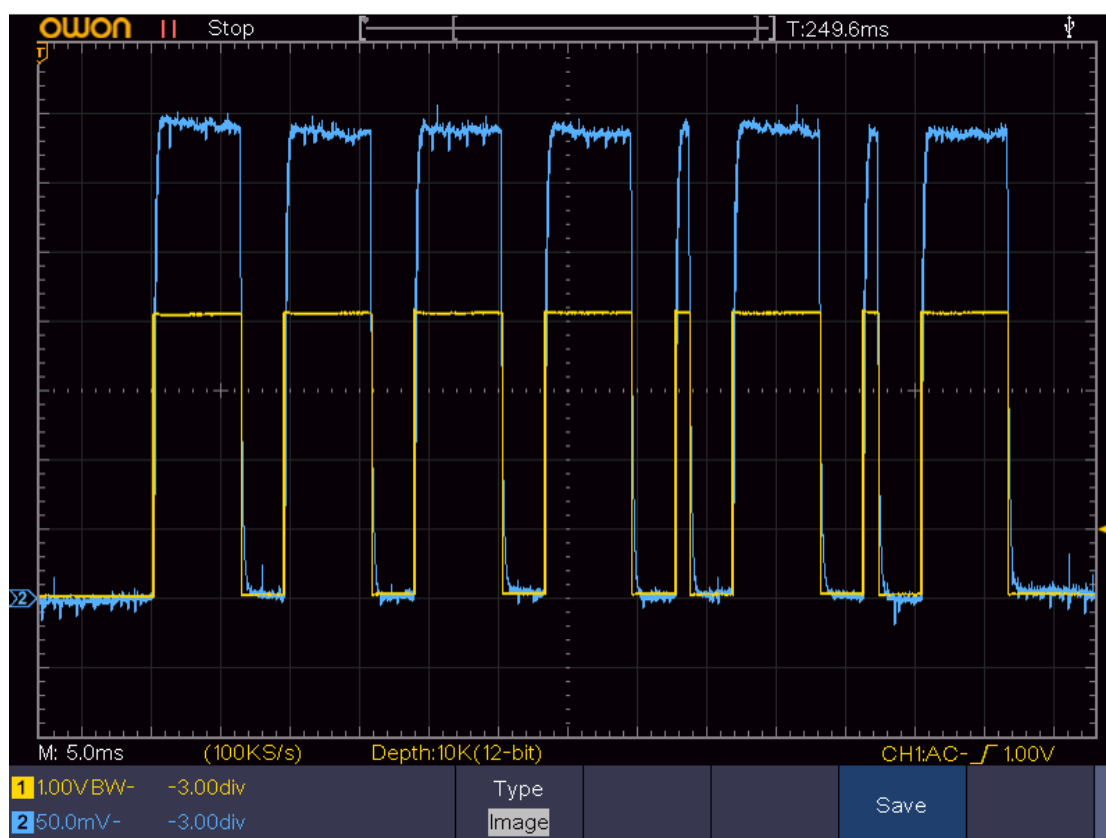


Slika 13.

Crvenom linijom prikazan je prag binarizacije analognog napona na fotootporniku. Maksimalan postignuta brzina pri korišćenju vremenske modulacije i fotootpornika kao senzora dobijena je pri parametrima $T_1 = 0.5ms$, $T_2 = 2ms$ i $T_p = 0.5ms$ i iznosi približno $570bit/s$.

5.2.2 Fotodioda kao prijemnik

Na slici 14 su prikazna realna očitavanja napona na laseru (žutom bojom) i napona na fotodiodi (plavom bojom) pri slanju karaktera koji označava novi red (00001010) pri korišćenju vremenske modulacije. (slika 14)



Slika 14.

Maksimalna postignuta brzina pri korišćenju vremenske modulacije i fotodiode kao senzora dobijena je pri parametrima $T_1 = 0.1ms$, $T_2 = 0.6ms$ i $T_p = 0.3ms$ i iznosi približno $1538bit/s$.

5.3 Direktna modulacija

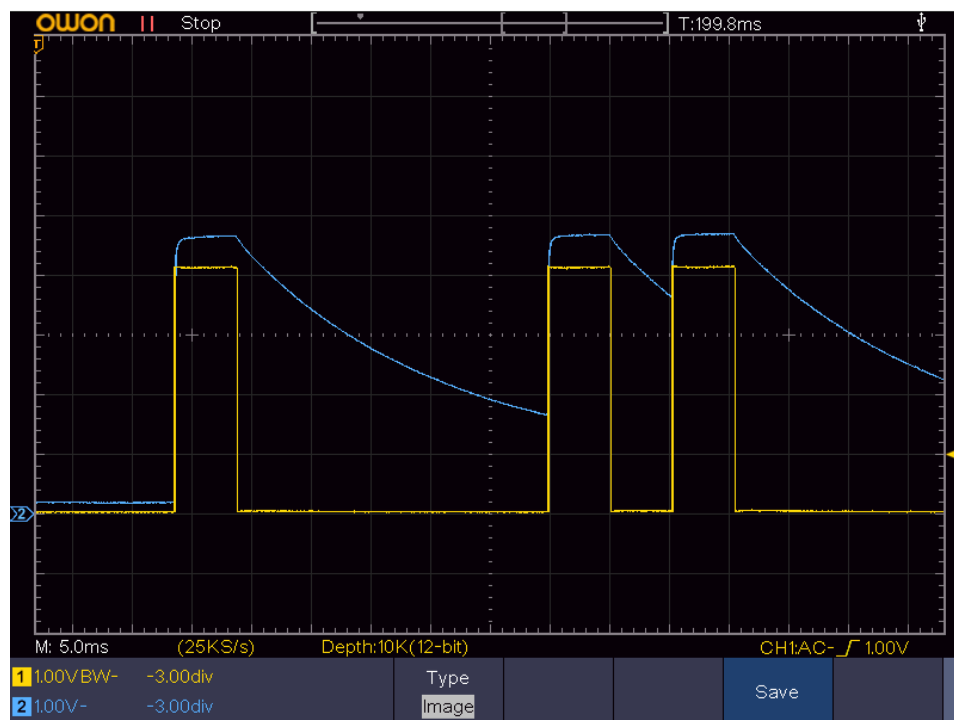
Brzina protoka se u slučaju direktne modulacije računa po formuli:

$$V = \frac{1000ms}{T_b + \frac{3*t_b}{8}}$$

Gde T_b predstavlja vreme potrebno za slanje jednog bita. Kako se kod ove modulacije bitovi šalju za redom gde se početna sekvenca nalazi pre svakih osam pojedinačnih bitova na trajanje jednog bita dodajemo i osminu trajanja početne sekvence.

5.3.1 Fotootpornik kao prijemnik

Na slici 15 su prikazna realna očitavanja napona na laseru (žutom bojom) i napona na fotootporniku (plavom bojom) pri slanju karaktera koji označava novi red (00001010) pri korišćenju direktne modulacije . (slika 15)

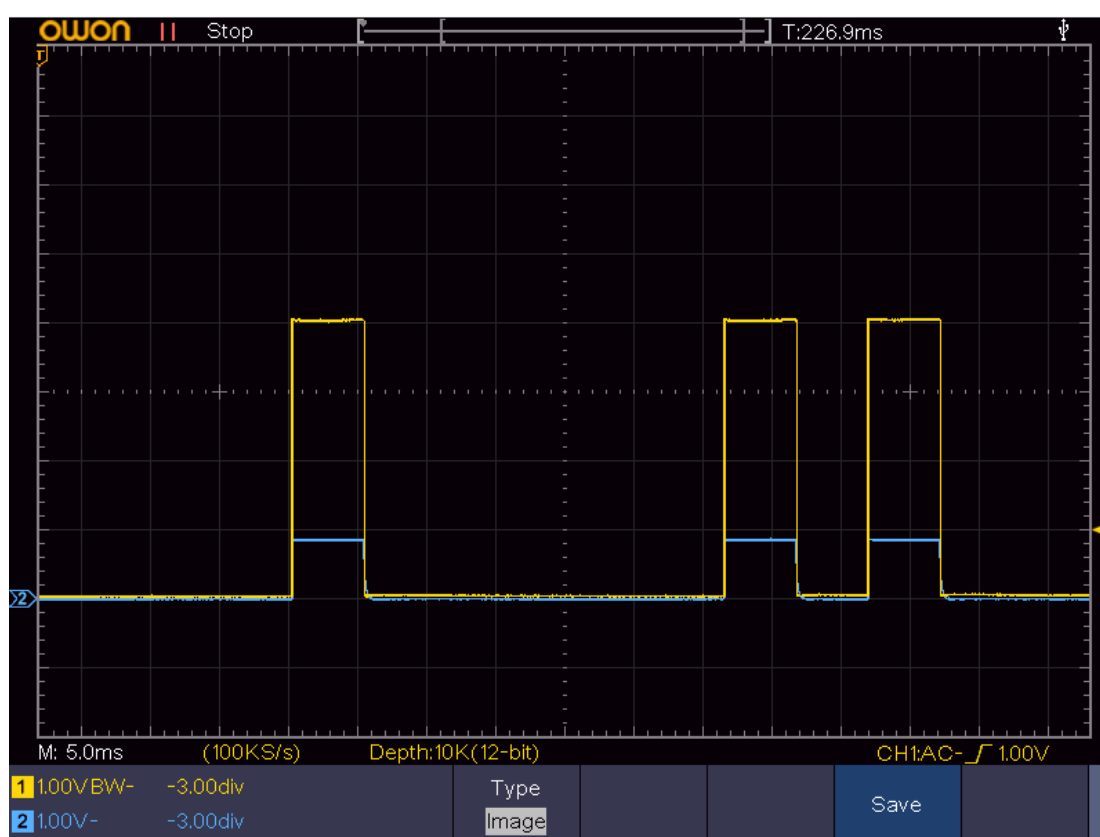


Slika 15.

Maksimalan postignuta brzina pri korišćenju direktne modulacije i fotootpornika kao senzora na prijemniku dobijena je pri bitskom trajanju (T_b) od $10ms$ i iznosi približno $73bit/s$.

5.3.2 Fotodioda kao prijemnik

Na slici 16 su prikazna realna očitavanja napona na laseru (žutom bojom) i napona na fotodiodi (plavom bojom) pri slanju karaktera koji označava novi red (00001010) pri korišćenju direktne modulacije . (slika 16)



Slika 16.

Maksimalan postignuta brzina pri korišćenju direktne modulacije i fotootpornika kao senzora na prijemniku dobijena je pri bitskom trajanju (T_b) od $8ms$ i iznosi približno $91bit/s$.

5.4 Pregled i poređenje dobijenih rezultata

U tabeli 1 dat je pregled maksimalnih postignutih brzina prenosa za svaku od korišćenih modulacija i senzora na prijemniku. Vidimo da se u slučaju obe modulacije veće brzine postižu pri korišćenju fotodiode kao senzora na prijemniku zbog njene gotovo trenutne responzivnosti. Ova razlika naročito je izražena pri većim protocima gde su periodi između bitova ili sami bitovi veoma kratki pa je zbog tromosti fotootpornika veom teško proceniti binarnu vrednost ulaznog signala na malom intervalu. (tabela 1)

Takođe, značajno veće brzine postignute su korišćenjem vremenske modulacije. Glavni razlog za to jesu problemi u sinhronizaciji. Naime, kod direktne modulacije, greška u računanju vremena ili kašnjenje koje se napravi pri slanju prvog bita se akomulira i značajno utiče na celu osmobitnu sekvencu. Dok se kod vremense modulacije greške računanja vremena i kašnjenja otklanjaju na nivou pojedinačnih bitova.

	fotootpornik kao prijemnik	fotodioda kao prijemnik
vremenska modulacija	570bit/s	1528bit/s
direktna modulacija	73bit/s	91bit/s

Tabela 1.

6. Zaključak

Laserska komunikacija kakva je opisana na početku rada je uspešno realizovana. Ostvarene su brzine prenosa podataka veće od očekivanih. Takođe pokazalo se da su glavna ograničenja sistema tromosti korišćenih fotosenzora, sinhronizacija predajne i prijemne strane kao i nepreciznost merenja vremena i izvršavanja operacija na korišćenim kontrolerima. Shodno navedenim problemima najveće brzine prenosa ostvarene su pri korišćenju vremenske modulacije i fotodiode kao senzora na prijemniku.

Potencijalna unapređenja sistema bila bi korišćenje bržih kontrolera kao i dodatnih mehanizama za sinhronizaciju predajnika i prijemnika. Pored toga brzine i tačnost prenosa podataka mogle bi se unaprediti korišćenjem algoritama za kompresiju podataka i detekciju greške.

7. Literatura

1. Goodwin, F.E. 1970. "A Review of Operational Laser Communication Systems." Proceedings of the IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
2. Brian R. Strickland, Michael J. Lavan, Eric Woodbridge, and Victor Chan, "Effects of fog on the bit-error rate of a free-space laser communication system," Appl. Opt. 38, 424-431 (1999)
3. Kim, Isaac I. 1998. "Wireless Optical Transmission of Fast Ethernet, FDDI, ATM, and ESCON Protocol Data Using the TerraLink Laser Communication System." Optical Engineering. SPIE-Intl Soc Optical Eng.
4. Denisov, B. N. 2008. "Functional Properties of an AC-Biased Photoresistor." Technical Physics Letters. Pleiades Publishing Ltd
5. Kondo, Ryuji, Hiroshi Okimura, and Yoshio Sakai. 1971. "Electrical Properties of Semiconductor Photodiodes with Semitransparent Films." Japanese Journal of Applied Physics. IOP Publishing.
6. Hu, Yan, Guifang Dong, Liduo Wang, and Yong Qiu. 2006. "Phototransistor Properties of Pentacene Organic Transistors with Poly(Methyl Methacrylate) Dielectric Layer." Japanese Journal of Applied Physics. IOP Publishing.
7. Sabri, Wan Muhd Arif Bin Wan, Irfan Rahim Zabidi, Mohd Aliff Mohd Abd Musthalib, Zimam Amer Muhamad, Muhammad Irfan Mohd Hazman, Muhammad Syafiq Mohd Yusof, Lwinthein Naing, and Zulkifli Zainal Abidin. 2017. "Low-Cost Remotely Operated Underwater Vehicle for Underwater Observation Purposes." 2017 IEEE 7th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS). IEEE.
8. Dr. T.V.S.P.Gupta, Y. Kumari, M. Ashok Kumar / International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)
9. Dae-Woong Chung, Joohn-Sheok Kim, and Seung-Ki Sul. 1998. "Unified Voltage Modulation Technique for Real-Time Three-Phase Power Conversion." IEEE Transactions on Industry Applications. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

10. Dokhane, N., and G.L. Lipi. 2002. "Improved Direct Modulation Technique for Faster Switching of Diode Lasers." IEE Proceedings - Optoelectronics. Institution of Engineering and Technology (IET).
11. Corner, Laura. (2020). Introduction to Laser Physics.