



## RAZVOJ OPTIČKOG KOMUNIKACIONOG UREĐAJA ZA RAD U SLOBODNOM PROSTORU

### DEVELOPMENT OF FREE SPACE OPTICAL COMMUNICATION DEVICE

Vojislav Milivojević, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

#### Oblast: ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

**Kratak sadržaj** – U ovom radu opisan je proces razvoja *free space optics* uređaja. Uz pomoć kolimiranog snopa svetlosti dva projektno uređaja prenose podatke bežično na razdaljini do 150 m i protokom od 10 Gbps. Detaljno je opisan razvoj hardvera i softvera, kao i sva istraživanja koja su omogućila realizaciju ovakvog uređaja.

**Ključne reči:** *Free space optics, telekomunikacije, PCB projektovanje, embeded softver*

**Abstract** – *This paper describes the process of developing a free space optics device. With the help of a collimated light beam, two devices transmit data wirelessly at a distance of up to 150 m and speed of 10 Gbps. Detailed development of hardware and software, as well as all the research that enabled the realization of such a device is described in the paper.*

**Keywords:** *Free space optics, telecommunications, PCB development, embedded software*

#### 1. UVOD

Brzi i jeftin pristup internetu je jedan od primarnih ciljeva ovog vremena. Instalacija informacionih mreža u bilo kom okruženju ključna je za premošćavanje digitalne podele, kao i za jačanje ekonomskog razvoja. "Digitalna agenda za Evropu 2020" ima za cilj da omogući ultra brzi širokopojasni pristup internetu (100 Mbps) za najmanje polovinu domaćinstava u Evropi, koji je u ovom trenutku dostupan samo za neke korisnike, zbog vrlo visokih troškova infrastrukture.

Internet infrastruktura pristupne mreže zaostaje u nado-gradnjama usled visokih troškova i sporog postavljanja novih žičnih instalacija. U većini urbanih područja je korišćenje bežičnog pristupa internet otežano pre svega zbog zagušenja RF spektra.

Zbog svega navedenog, *Free space* optička komunikacija je izuzetno održivo rešenje.

Sistemi *Free-space* optičke komunikacije (FSO) imaju veliki potencijal za ublažavanje ovih problema i ograničenja. Svetlosni spektar nije regulisan, njegova upotreba ograničena je samo propisima o maksimalnoj snazi lasera tako da on ne ugrožava ljudski vid.

#### NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Ivan Mezei, vanr. prof.

Svetlost može biti vrlo dobro kontrolisana i fokusirana, pa je mnogo manja verovatnoća da će izazvati zagušenje spektra. Trenutno, na tržištu postoji nekoliko FSO sistema, međutim svi oni su namenjeni za industriju ili telekomunikacione operatore i veoma su skupi za potrošačko tržište. U ovom projektu razvijena je jeftinija FSO tehnologija koja može da se poredi sa Wi-Fi-om u kapacitetu, jednostavnosti korišćenja i troškova, sa osnovnim ciljem da omogući bežičnu mrežu velikog kapaciteta između objekata koji imaju međusobnu optičku vidljivost, sa brzinom od 1 Gbps i 10 Gbps, i to bez postavljanja podzemnih i nadzemnih vodova u dometu od 200m na otvorenom, gde je zagušenje RF najveće.

Ovaj projekat se zasniva na istraživačkom projektu Koruza 1.0 (5. generacija), koji je integrisao naučne pronalasku u nisko budžetni optički sistem kroz slobodan prostor za premošćavanje 100m razdaljina sa protokom od 1Gbps. Cilj projekta Koruza bio je razvoj jeftinih otvorenih sistema za primarnu upotrebu u bežičnim mrežama manjih zajednica i istraživačko okruženje za razvoj FSO-a, podržavajući eksperimentisanje i istraživanje na tu temu. Taj cilj je postignut sa sistemom Koruza 1.0.

#### 2. FSO SISTEMI I TEHNOLOGIJA

Sisteme *free-space* optičke komunikacije karakteriše laka propagacija kroz slobodan prostor za prenošenje informacija i ovi sistemi se smatraju bežičnom verzijom tehnologije optičkih vlakana. Smatra se da osobine komunikacionog medija slobodnog prostora utvrđuju uslove rada i pružaju dovoljno informacija za dizajniranje FSO sistema. Pregled komercijalno dostupnih FSO mrežnih sistema, poređenje njihovih karakteristika i ukupna procena postojećih rešenja, postavlja reper kvaliteta sistem razvijenog u ovom projektu. Snop svetlosti prolazi kroz atmosferu, tako da su atmosferski uslovi ključni faktor koji utiče na kvalitet prenosa. Ovi uticaji se mogu prikazati odnosom signal/šum (SNR) i BER (Bit Error Ratio). Neke od prednosti FSO-a su [1].

- Komunikacioni čvorovi nisu fizički povezani (bežični komunikacioni sistem)
- Pristupačnije od sistema sa optičkim vlaknima
- FSO sistem je otporan na RF smetnje
- Sigurnost signala
- Prenos podataka velike brzine
- Jeftiniji od RF sistema (ne zahteva licenciranje za RF spektar)

### 3. KORUZA 2.0 SPECIFIKACIJA

Svrha ovog rada je prikaz projekta koji je uređen prilikom redizajniranja svih aspekata projekta Koruza1.0. Polazeći od koncepta i ideje projekta, sve do hardvera i softvera koji su realizovani I implementirani u krajnji proizvod. Ono što će ostati isto je funkcija uređaja, tako da će početna tačka tehničke specifikacije biti funkcionalna specifikacija bazirana na prethodnoj verziji sistema. Ovaj rad se bavi samo implementacijom hardvera i softvera unutar projekta. S obzirom na to da je Koruza uređaj koji se može okarakterisati kao telekomunikaciona opremu, potrebno je bude profesionalno izrađen i da budu ispunjeni svi standardi koji su vezani za telekomunikacionu industriju. Planira se da na kraju redizajna uređaj bude ekonomičan za proizvodnju i jednostavan za održavanje.

#### 3.1. Zahtevi projekta

Povratne informacije koje su dobijene od korisnika prethodne verzije uređaja koja je instalirana I operativna širom sveta, su bile od izuzetnog značaja za razvoj nove verzije uređaja. Promene u novoj verziji uređaja su izvršene kako na softveru tako i na hardveru

Jedan od nedostataka primećenih od strane korisnika je vezan za instalaciju sistema. Glavni problem je bio u tome što je inicijalno podešavanje zasnovano na vidljivom zelenom laseru koji se koristi za određivanje pravca snopa svetlosti koju emitije uređaj. Prilikom postavljanja uređaja na većim rastojanjima, laser nije bio vidljiv tokom dana kada je intenzitet sunčeve svetlosti visok. To je značilo da se instalacija morala odvijati tokom večeri ili noćni, što utiče na bezbednost onoga koji postavlja uređaj.

#### 3.2. Specifikacija hardvera

Na osnovu projektnih zahteva i funkcionalne specifikacije, napravljena je detaljna specifikacija hardvera. Jedan od pomenutih zahteva bio je da uređaj ima samo jedan kabl za upravljenj i korisničke podatke. Zbog toga je postojala potreba za nekom vrstom platforme za rutiranje unutar uređaja.

Ponovnom revizijom funkcionalne specifikacije utvrđeno je da je samo jedna stvar prepreka na putu ka implementaciji jeftine i jednostavne platforme. To je bio zahtev za spajanje upravljačkih podataka i korisničkih podataka u jedan Ethernet kabl.

Nova specifikacija je bazirana na prethodnoj, bez jedne karakteristike koja je unosila dodatnu kompleksnost uređaju Koruza. Nova glavna ploča imaće sledeće karakteristike:

- Glavni CPU koji podržava više Linux distribucija
- Ethernet 10/100 + PoE
- Ethernet Bandwidth: 10Base-T/100Base-TX
- 24VDC pasivno PoE napajanje
- SFP konektor
- 2x USB 2.0 konektor
- GPIO konektor
- Kamera
- Izlaz velike snage
- Drajver za stepper motore

#### 3.3. Specifikacija softvera

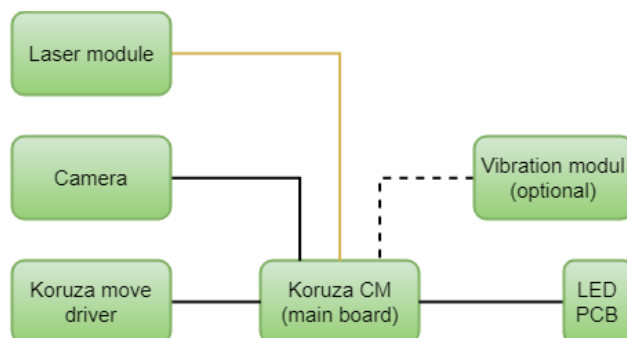
Ovakav proizvod zahteva više različitih softvera koji međusobno komuniciraju. Na osnovu povratnih informacija korisnika iz prethodne verzije, bile su potrebne su neke izmene. Svaki Koruza uređaj je uređaj za sebe i treba ga posebno konfigurisati. Korisnici moraju imati pristup svakom uređaju. Najbolji način pristupa uređaju je putem web pretraživača. Nakon što se uloguje u uređaj, korisnik će imati pristup konfiguraciji i statistici uređaja. Svi uređaji će slati svoj status na jedno centralizovano mesto, cloud server. Tu korisnik može jednostavno da prati celu flout uređaja. Dodatni zahtev je update-ovanje OTA (na daljinu), tako da se softver uređaja može nadograditi u bilo kom trenutku bez dodatnih troškova osoblja na terenu.

Pored korisničkog interfejsa i softvera za praćenje parametara, Koruza ima svoje interne funkcije tako da može ispravno da funkcioniše u svim uslovima. Softver za kontrolu motora, softver za automatsko poravnanje, indikator intenziteta signala itd. [2].

### 4. IMPLEMENTACIJA HARDVERA

Unutar Koruza uređaja postoji nekoliko elektronskih blokova. Prva i glavna je Koruza CM ploča. Ova ploča sadrži glavnu procesnu jedinicu i dodatne komponente za različite funkcije uređaja. Druga je Koruza drajver motora, mala ploča zadužena za pomeranje dva mala stepper motora. Osim ove dve glavne ploče, jedinica ima nekoliko manjih PCB-ova za obavljanje jednostavnih zadataka.

Kao što je prikazano u blok dijagramu na slici 1, sve ploče su povezane sa glavnom pločom Koruza CM. Ploče koje su povezane sa crnom linijom na dijagramu imaju žičnu vezu, a jedna povezana sa žutom linijom je spojena fleksibilnim PCB-om, dok isprekidana linija predstavlja vezu koja je nije obavezna.



Slika 1. Koruza 2.0 blok dijagram

Koruza CM je glavna ploča koja je zadužena za većinu zadataka unutar uređaja. Kao što je opisano u specifikaciji ova ploča ima nekoliko modula, ali najvažniji je glavni procesor. Izbor ovog CPU-a nije bio lak zadatak.

Uslovi koje je trebalo zadovoljiti su mogućnost lakog modifikovanja, korišćenje poznatih modula kako bi se smanjilo vreme razvoja, i dostupnost u prodaji svih velikih distributera u narednih pet godina. Cilj je bio da se ispune makar dva od tri uslova.

Modul koje je ispunjavao ove uslove i koji je odabran je zasnovan na *Raspberry Pi* platformi. Ovaj modul je bilo lako implementirati u dizajn, a proizvođač je garantovao da će ga proizvoditi do 2025. godine. Pored ovog navedenog, prednost je bila i to što modul bio je dovoljno malih dimenzija i posedovao je sve potrebne funkcije. Naziv ovog modula je *Raspberry Pi Compute Module*, ili skraćeno *Raspberry Pi CM*.

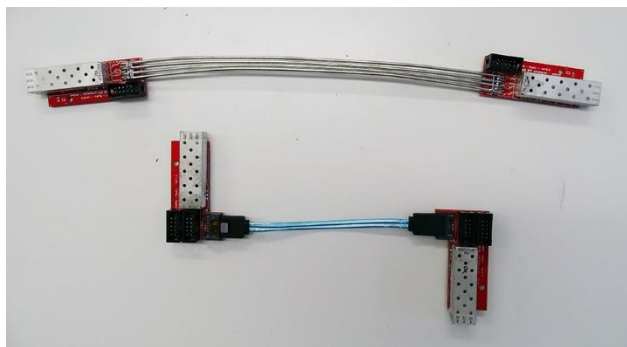
Nakon istraživanja, došli smo do zaključka da je najbolji interfejs za korisničke podatke *small form-factor pluggable* (SFP). To je kompaktan primopredajni optički modul koji se koristi za telekomunikacione aplikacije. Oblik modula i električni interfejs određeni su MSA sporazumom koji je odredio *Small Form Factor Committee*. To je popularan format industrije razvijen i podržan od strane mnogih proizvođača mrežnih komponenti [3].

SFP interfejs na mrežnom hardveru je modularni (*plug-and-play*) slot za varijabilni primopredajnik specifičan za mediji koji prenosi, kako bi se povezao optički kabel ili ponekad bakarni kabel. Ovo je posebno zanimljivo jer na ovaj način možemo obezbediti ili optičku ili *Ethernet* kablovsku vezu sa korisnicima.

#### 4.1. Koruza fleksibilni PCB

Koruza fleksibilni PCB je bio jedan od najizazovnijih delova ovog projekta. Prva verzija sistema, Koruza 1.0, je koristila SATA kabl za povezivanje SFP linija podataka između dva SFP porta, a to je bilo dovoljno za stariju verziju jer je maksimalni protok podataka bio 1 Gbps. Sa novom verzijom, želeli smo da postignemo maksimalni protok od 10 Gbps koji nije bio izvodljiv sa SATA kablom.

Prvi eksperiment urađen je uz pomoć stare verzije sistema. Pokušano je da se postigne brzina od 10 Gbps. Ključno poboljšanje hardvera koje je potrebno za operaciju od 10 G je bilo uklanjanje medija pretvarača i stvaranje direktne konekcije između dva SFP-a. Verzija 1 G koristi SATA kabl koji je dovoljan za tu brzinu, međutim, za 10 Gbps potrebno je bolje rešenje. Tako je ploča od 10 G SFP dizajnirana pomoću koaksijalnih kablova za povezivanje velike brzine. Svaka linija koja se koristi za prenos podataka, RX +, RX-, TX + i TX- bila je povezana sa odvojenim koaksijalnim kablom između laserskog modula uređaja Koruza i SFP porta za korisnika. U ovoj konfiguraciji, operacije je do 40 Gbps trebalo bi da budu podržane. Eksperiment je sproveden sa dva modifikovana Koruza 1.0 uređaja.

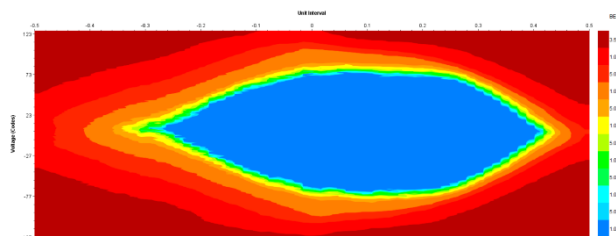


Slika 2. Koaksijalna konekcija (gore) i SATA konekcija (dole)

Nakon ovog eksperimenta, zaključeno je da je Koruza sa brzinom od 10 Gbps izvodljiva. Trebalo je da se napravi uređaj koji je robusan i da se dizajnira za proizvodnju. Koaksijalni kablovi, koji su korišćeni u eksperimentu, su bili skupi i nisu bili dovoljno fleksibilni. Uređaj ima unutrašnji deo koji se pomera zbog laserskog modula, i stoga je neophodno da veza između SFP porta i laserskog modula bude fleksibilna, tako da ne primjenjuje dodatno opterećenje na sistem motora.

Posle nekoliko različitih pristupa pri eksperimentu, pronađeno je rešenje problema. Umesto uspostavljanja veze između krutog i fleksibilnog PCB-a za povezivanje *high-speed* vodova, postavljeni su SMD konektor na fleksibilni PCB i montirano je metalno kućište za SFP konektor preko njega. Ovaj pristup je bio dovoljno jeftin i zadržao istu diferencijalnu impedancu između vodova.

Međutim, problem verifikacije *high-speed* primopredajnika je rešen od strane FPGA proizvođača pre nekoliko godina i ovde je iskorišćena funkcionalnost koju su dodali na čipove da bi se utvrdila ukupna margina dizajna u JESD204B rešenju bez kupovine skupe opreme za testiranje [4].



Slika 3. Eye diagram fleksibilnog PCB-a 10Gbps

Otvoreni UI je bio 66,15%, ali uprkos tome, nije bilo grešaka u prenosu podataka. Ovo je sve urađeno sa pseudorandom binarnom sekvencom (PRBS) od 7 bita. U cilju dodatnog opterećenja ploče koja je bila pod testom, PRBS je povećan na 8, a zatim na 9 i tako dalje do 31 bita, što je bio maksimum. Dok se povećavao PRBS, primećeno je i povećanje stope greške. Analizirajući podatke sa dijagrama očiju i rezultate pod testom, došlo se do zaključka da fleksibilni PCB treba promeniti, tako da parazitne kapacitivnosti budu još niže. Ovo se može uraditi sa "rupičastim" (*hatched*) referentnim slojem umesto sa jednodelnom površinom.

#### 4.2. Koruza drajver motora

Koruza drajver za motore je mali upravljački kontroler. Glavni zadatak ove ploče je kontrola steper motora. Ovi motori su zaduženi za pomeranje i usmeravanje laserskog dela unutar Koruza uređaja.

Polazna tačka dizajna su bili motori koja su već izabrani. Ovo su dva unipolarna steper motora 28BYJ-48. Unipolarni steper motor radi sa jednim navojem pomoću centralne slavine po fazi. Svaki se deo namotaja uključuje za svaki pravac magnetskog polja. Svako namotavanje je relativno jednostavno sa komutacijom. Ovo se radi zato što aranžman ima magnetni pol, koji se može preokrenuti bez promene smera struje [5].

## 5. IMPLEMENTACIJA SOFTVERA

Projekat Koruza ima nekoliko softverskih celina. Glavna komponenta je softver koji se izvršava na ploči *Raspberry Pi Compute Module*-a. Osim toga, postoje i druge manje celine poput *firmware*-a za drajver motora i *firmware*-a za akcelerometar modul. U ovom poglavlju će biti opisane sve softverske komponente pojedinačno. *Firmware* za drajver motora i akcelerometar će biti detaljno opisani, dok će za *Compute Module*-a biti opisana samo inicijalna podešavanja, zbog toga što ovim radom nije obuhvaćen aplikativni softver.

Koruza drajver za motore je mala *Atmel ATmega328p* ploča sa magnetnim enkoderima, tasterima za detekciju krajnjih pozicija i unipolarnim stepper drajverom.

Razmena podataka između Koruza CM ploče i Koruza drajvera za motore se obavlja preko UART komunikacije. Prenosa podataka i nadogradnja *firmware*-a moraju raditi na istom UART protokolu. *ATmega328P* mikrokontroler ne dozvoljava direktno sistemsko programiranje preko UART komunikacije, tako da stvari moraju biti unapred programirane kako bi sve funkcionalno.

Da bi bi omogućen ovakav rad potreban je poseban ISP programator.

*Koruza-akcelerometer-module* je dodatna ploča/modul koji je ugrađen unutar Koruza uređaja. Ovaj modul se povezuje sa USB portom Koruza CM ploče, a njegova glavna namena je sakupljanje i obrada podataka o vibracijama Koruza uređaja. Postoji nekoliko načina za merenje mehaničkih vibracija. Merenja koja se rade zasnovana su na akcelerometru koji je napravljen pomoću MEMS tehnologije - MPU-6050 akcelerometar. MPU-6050 akcelerometar je uređaj tipa MEMS sa tri ose, koji se može programirati da meri od 2 g do 16 g. Senzor MPU-6050 je montiran na ploču *Flip32 All In One (Pro) Flight Controller V1.03*.

## 6. ZAKLJUČAK

Koruza bežični optički sistem postavio je pred nas niz interesantnih problem koje smo analizirali u ovom projektu i razvili tehnička rešenja kako bi ih rešili.

Najznačajniji doprinos ovog projekta jeste implementacija fleksibilnog PCB-a koja je obezbedila jeftiniji sistem za međusobno povezivanje dva SFP modula od kojih je jedan montiran na glavnu PCB ploču, a drugi nije.

Sledeći koraci na unapređenju ovog projekta će biti poboljšanje fleksibilnog PCB-a, u cilju poboljšanja stabilnost i kvalitet signala. Još jedan ključni deo je redizajniranje Koruza drajvera za motore, tako da je ploča nadograđena novim mikrokontrolerom koji može da upravlja sa stepper motorima koristeći povratnu spregu magnetnog senzora.

## 7. LITERATURA

- [1] Z. Ghassemlooy and W. Popoola, "Terrestrial free-space optical communications," in *Mobile and Wireless Communications Network Layer*, 2010, pp. 355–392.
- [2] Koruza Compute Module board Manual, Online: [https://github.com/IRNAS/koruza-compute-module/blob/board\\_1.x/koruza\\_CM\\_Manual.md](https://github.com/IRNAS/koruza-compute-module/blob/board_1.x/koruza_CM_Manual.md)
- [3] Small form-factor pluggable transceiver, Online: [https://en.wikipedia.org/wiki/Small\\_form-factor\\_pluggable\\_transceiver](https://en.wikipedia.org/wiki/Small_form-factor_pluggable_transceiver)
- [4] JESD204B Eye Scan, Online: [https://wiki.analog.com/resources/tools-software/linux-software/jesd\\_eye\\_scan](https://wiki.analog.com/resources/tools-software/linux-software/jesd_eye_scan)
- [5] Unipolar Stepper Motor, Online: <https://www.circuitspecialists.com/blog/unipolar-stepper-motor-vs-bipolar-stepper-motors/>

### Kratka biografija:



**Vojislav Milivojević** rođen je u Lazarevcu 1991. god. Diplomirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2015. godine sa temom "Implementacija kompjuterske vizije na Xilinx Zync platformi". Iste godine upisuje Master akademske studije na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Embedded sistemi i algoritmi.

kontakt: milivojevicvoja@gmail.com