



Univerzitet u Sarajevu  
Elektrotehnički fakultet  
Odsjek za Telekomunikacije

---

## Simulacija i analiza MIMO sistema zasnovanih na vlaknima sa više modova

---

*Optički telekomunikacioni sistemi*

Radili:

Vedad Crnčalo, Amna Bumbul, Harun Dedović, Muhamed Crnčalo

23. januar 2025.

# Abstract

This research focuses on the simulation and analysis of MIMO systems using few-mode fibers (FMF), aiming to address the growing demand for high-capacity and efficient data transmission in optical telecommunications. By integrating MIMO technology with FMF, the study explores enhancements in data throughput and transmission stability while minimizing losses and modal dispersion. Python simulations analyze key performance metrics, including channel capacity, noise resistance, and data transfer efficiency. Additionally, factors such as the number of modes, signal strength, fiber type, and noise impact are evaluated. The findings aim to provide optimization strategies for MIMO-FMF systems, contributing to the development of high-performance optical communication networks.

**Keywords :** MIMO, FMF, optical communication, modal dispersion, data transmission.

## Sažetak

Ovo istraživanje se fokusira na simulaciju i analizu MIMO sistema koristeći vlakna sa nekoliko modova (FMF), s ciljem rješavanja rastuće potražnje za velikim kapacitetom i efikasnim prijenosom podataka u optičkim telekomunikacijama. Kombinovanjem MIMO tehnologije sa FMF-om, istražuju se poboljšanja u propusnosti podataka i stabilnosti prijenosa uz minimiziranje gubitaka i disperzije modova. Python simulacije analiziraju ključne performanse sistema, uključujući kapacitet kanala, otpornost na šum i efikasnost prijenosa. Također, evaluiraju se faktori poput broja modova, jačine signala, vrste vlakna i uticaja šuma. Rezultati istraživanja pružaju smjernice za optimizaciju MIMO-FMF sistema, doprinoseći razvoju visokoefikasnih optičkih mreža.

**Ključne riječi :** MIMO, FMF, optička komunikacija, međumodna disperzija, prijenos podataka.

# Sadržaj

Uvod	4
<b>1 Few Mode Fibers (FMF)</b>	<b>5</b>
1.1 Općenito o FMF	5
1.1.1 Karakteristike FMF vlakana	6
1.2 Ključni principi FMF-a	7
1.3 Ograničenja Few Mode Fiber-a	8
1.3.1 Međumodna disperzija	8
1.3.2 Slabljenje u vlaknima	9
<b>2 Općenito o MIMO sistemima</b>	<b>11</b>
2.1 Eksperimentalni sistem sa nekoliko vlakana	11
2.2 $\lambda$ -MIMO	12
2.2.1 Osnovni principi $\lambda$ -MIMO sistema	12
2.2.2 Tehnički izazovi u $\lambda$ MIMO sistemima	12
<b>3 Obrada digitalnog signala</b>	<b>14</b>
3.1 Optički prijemnici	14
<b>4 Istraživački trendovi</b>	<b>15</b>
<b>5 Praktična realizacija (Python)</b>	<b>16</b>
Popis slika	20

# Uvod

U savremenim telekomunikacijama, sa stalnim porastom zahtjeva za prijenosom velike količine podataka, ključno je razviti tehnologije koje omogućavaju efikasniji i brži prijenos. Jedna od najvažnijih tehnologija koja omogućava povećanje kapaciteta mreže je MIMO ( Multiple Input, Multiple Output).

MIMO tehnologija koristi više antena za prijem i slanje podataka, što omogućava simulativni prijenos podataka kroz više kanala, čime se značajno povećava kapacitet mreže.

U oblasti optičkim komunikacijama, vlakna sa više modova (Multimode Fibre, MMF) omogućavaju prijenos svjetlosnih signala u različitim modovima, čime se povećava efikasnost prijenosa podataka. Sa razvojem FMF (Fibre Mode Fibre) tehnologije, koja predstavlja napredniju verziju MMF vlakana, optimizira korištenje modova, što dovodi do boljih performansi, posebno u aplikacijama sa visokim zahtjevima za propusnost.

FMF vlakna nude prednosti u pogledu smanjenja disperzije modova i bolje performanse na većim udaljenostima u odnosu na MMF vlakna. Ovo značajno povećava kapacitet i stabilnost prijenosa.

Kombinovanjem MIMO tehnologije i MMF/FMF vlakana, moguće je postići značajan napredak u optičkim komunikacijama. MIMO omogućava višemodalno pojačanje prijenosa, dok FMF optimiziju ove kapacitete smanjenjem gubitaka i poboljšanjem stabilnosti. Ova kombinacija je posebno korisna u mrežama sa visokim zahtjevima za prijenosa podataka, kao što su telekomunikacijski sistemi i kritički komunikacijski sistemi.

U ovom radu koristit ćemo simulacije u Python-u kako bismo analizirali ključne karakteristike ovih sistema, uključujući kapacitet kanala, otpornost na šum i efikasnost prijenosa podataka. Također, istražiti ćemo kako faktori poput broja modova, jačine signala, vrste šuma i vrste vlakna koje utiču na performanse sistema. Očekivani rezultati će pružiti uputstva za optimizaciju MIMO sistema i doprinijeti razvoju efikasnijih optičkih komunikacijskih mreža.

# 1 Few Mode Fibers (FMF)

## 1.1 Općenito o FMF

Interesovanje za multimodne vlakne, a posebno za vlakna s nekoliko modova (eng. Few mode fibers - FMF), u telekomunikacijama uglavnom je rezultat prepoznavanja činjenice da se samo primjenom paralelnih kanala može odgovoriti na brzo rastuće zahtjeve za kapacitetom komunikacionih sistema. [10]

Tu je evidentan osnovni problem koji se treba prevazići da bi ti zahtjevi bili zadovoljeni. Taj problem je sami kapacitet kanala ili Shannon-ov limit. Shannon je pokazao da se svaki komunikacijski kanal, bilo da je riječ o telefonskoj liniji, radio opsegu ili optičkom vlaknu, može opisati pomoću dva faktora: širine opsega i šuma. Širina opsega predstavlja raspon elektroničkih, optičkih ili elektromagnetnih frekvencija koji se mogu koristiti za prijenos signala, dok šum označava sve što može ometati taj signal. Za kanal sa određenim karakteristikama širine opsega i šuma, Shannon je pokazao kako se može izračunati maksimalna brzina prijenosa podataka bez grešaka, tu brzinu je nazvao kapacitetom kanala. [11]

Kako je potreba za prijenosom velike količine informacija na veće udaljenosti rasla, tako su intezivirana istraživanja u oblasti prostrono dijeljenog multipleksiranja (eng. Space division multiplexing - SDM). Kao perspektivna podkategorija prostorno dijeljenog multipleksiranja, pokazalo se multipleksiranje po modovima (eng. Mode division multiplexing - MDM) koje koristi vlakna s nekoliko modova, za prijenos paralelnih tokova informacija različitim modovima. [9] U sistemu multipleksacije po modovima, vlakna s nekoliko modova se ne koriste samo kao medijum za prijenos, već i kao komponentama transmisijskog sistema, poput vlakna sa nekoliko modova koje je obogaćeno erbiumom (FM-EDFA). [21]

Dok u SDM sistemima prijenosa mogu se koristiti vlakna s paralelnim putanjama propagacije za prijenos nezavisnih tokova podataka unutar istih spektralnih opsega. Pogodna vlakna za SDM mogu biti neuparena vlakna sa više jezgri (MCF), gdje je više jednomodnih vlakana raspoređeno unutar jedne zaštitne ovojnice, ili vlakna s nekoliko modova i multimodna (MMF), gdje jedno jezgro vlakna može podržati prijenos nekoliko ortogonalnih modova vlakna. [13]

Razlika između MMF i FMF nije samo u broju modova, već i u broju dostupnih kanala za prijenos podataka. FMF prijenosi nekoliko vođenih modova, pri čemu se svaki mod tretira kao zaseban kanal podataka. Nasuprot tome, broj modova tipičnog MMF-a je nekoliko stotina, te svi modovi zajedno čine jedan kanal podataka u sistemima prijenosa zasnovanim na MMF-u. [7]

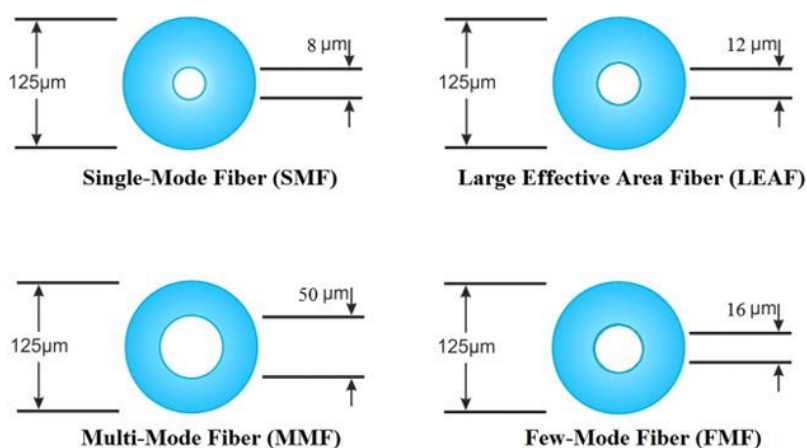
Implementacija prostornog multipleksiranja u modernim koherentnim komunikacijskim sistemima koji koriste i amplitudu i fazu optičkog signala zasniva se na sofisticiranim i relativno skupim MIMO procesnim shemama, koje se oslanjaju na masivne optičke sisteme. Tehnički izazov u korištenju FMF vlakana za povećanje kapaciteta sistema odnosi se na potrebu primjene adaptivnih MIMO tehnika za prostorno demultipleksiranje i dinamičko kompenzovanje međumodalnog kašnjenja. Složnost obrade signala raste sa brojem modova koji prijenose signale. [10]

### 1.1.1 Karakteristike FMF vlakana

Karakteristike FMF modova su sljedeće:

**Broj modova** - Uobičajena je razlika između jedinomodnih vlakana, koja podržavaju samo jedan vođeni mod po pravcu polarizacije, i multimodnih vlakana, koja podržavaju više vođenih modova. Dok FMF vlakna podržavaju relativno mali broj vođenih modova, oko 10 do 20, ili ponekad samo 2 ili 6. [4]

**Prečnik jezgre** - FMF predstavlja kompromis između potrebe za povećanjem kapaciteta prijenosa kod jedinomodnih vlakna i rastućom kompleksnošću obrade signala multimodnog prijenosa. [10] Vlakna s nekoliko modova imaju prečnik jezgra nešto veći od vlakana s jednim modom, ali znatno manji od vlakana s više modova. Veći prečnik jezgra omogućava im da ostvare veću optičku snagu u odnosu na vlakna s jednim modom, čime mogu podržati veći broj kanala za prijenos podataka. Razlike između jezgri vlakana mogu se vidjeti na slici ispod:



Slika 1: Prikaz razlike jezgri vlakana. [20]

**Nelinearni efekti** - Za razliku od jedinomodnih vlakana, u vlaknima s nekoliko modova mogu se pojaviti nelinearni međumodalni efekti poput međufazne modulacije i parametarske amplifikacije, kao i efekti povezani s nelinearnim odzivom medija s kašnjenjem, poput stimulirane Brillouin-ove raspršivosti. Sklonost takvim fenomenima može biti povećana u vlaknima s malim diferencijalnim kašnjenjem između modova. Brillouin-ova raspršivost nastaje kao posljedica nelinearnosti medija, posebno one komponente nelinearnosti koja je povezana s odgođenim nelinearnim odzivom uzrokovanim akustičnim fononima. Pri ovom procesu, incidentni foton se može pretvoriti u raspršeni foton s nešto nižom energijom, koji obično propagira u suprotnom smjeru. [4]

Glavni nelinearni efekti:

- Pobuđeno Ramanovo rasipanje (SRS),
- pobuđeno Brillouinovo rasipanje (SBS),
- samo-fazna modulacija (SPM),

- unakrsna fazna modulacija (XPM),
- miješanje četiri talasa (FWM).

## 1.2 Ključni principi FMF-a

Ključni principi na kojima se zasnivaju vlakna sa nekoliko modova su:

**Vođeni modovi** - Odnosi se na modove koji se propagiraju kroz optičko vlakno i ostaju ograničeni unutar jezgra zbog totalne unutrašnje refleksije. Primjer tih modova su linearno polarisani (LP) modovi u vlaknima. FMF vlakna obično podržavaju osnovni mod LP01 i nekoliko modova viših redova, kao što su LP11a i LP11b, dok modovi viših redova poput LP21 zavise od dizajna vlakna, to jest parametra  $V$ , koji određuje broj modova koji se mogu propagirati u vlaknu. Ovi modovi omogućavaju multimodni prenos podataka, što povećava kapacitet optičkog vlakna. [7]

**Optimizacija dimenzija jezgra** - je od ključne važnosti za određivanje broja vođenih modova i njihovih karakteristika propagacije. Pravilno odabrana veličina jezgra omogućava efikasan prijenos tako što podržava ograničen broj modova, dok istovremeno minimizira disperziju grupa brzina (GVD), koja može negativno uticati na performanse sistema. [1]

**Multipleksiranje modova (MDM)** - Pored prostornog multipleksiranja (SDM) koje koristi vlakna s više jezgara, modno multipleksiranje (MDM) predstavlja još jedno moguće rješenje za problem ograničenog kapaciteta i sprežanja modova. U okviru MDM-a, FMF ponovo su postala relevantna kao prijenosni medij za SDM tehnologiju. [7] MDM je novija tehnika prijenosa informacija koja omogućava istovremeni prijenos više podatkovnih signala preko različitih modova laserskog snopa jedne talasne dužine kroz slobodan prostor. MDM se smatra perspektivnom metodom za ostvarivanje brzih i spektralno efikasnih komunikacijskih veza budućih generacija bežičnih mreža. [18]

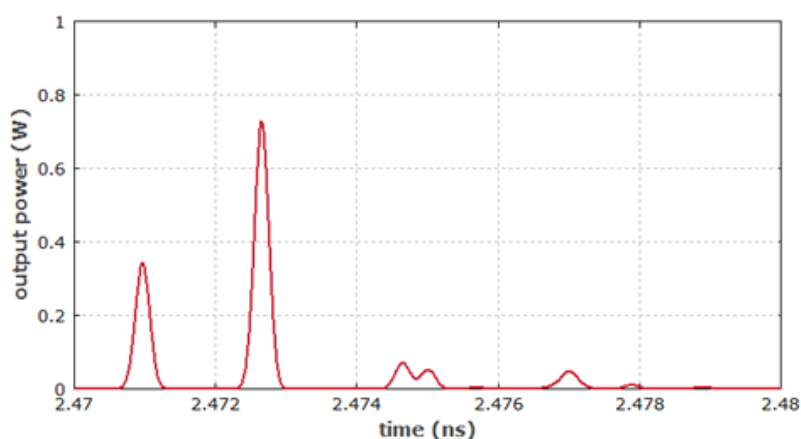
**Disperzija modova i sprežanje modova** - Karakterizacija vlakna je ključna za optimizaciju, poput disperzije modova i vrijednosti sprežanja modova. Disperzija modova u vlaknima s nekoliko modova utiče na veličinu koraka ekvalizacije frekvencijskog domena prijemnika, dok vrijednost sprežanja modova određuje složenost sistema za obradu sa više ulaza i izlaza (MIMO) prijemnika. [21] Kod multimodnih transmisijskih vlakana, neželjeno sprežanje modova može nastati zbog različitih faktora, poput nepravilnosti u proizvodnji koje uzrokuju necirkularnost jezgra, hrapavost na granici između jezgra i plašta, promjene u prečniku jezgra ili odstupanja u profilu indeksa prelamanja kod gradijentnih vlakana. Dodatno, mikro-savijanja, makro-savijanja i uvijanja vlakna predstavljaju česte uzroke ovog fenomena. [6]



## 1.3 Ograničenja Few Mode Fiber-a

### 1.3.1 Međumodna disperzija

Međumodna disperzija je fenomen koji objašnjava to da propagacija ukupne brzine svjetlosti u višemodnom vlaknu ovisi ne samo o optičkoj frekvenciji (hromatska disperzija), nego i o propagacijskom modu. [5]



Slika 2: Odnos izlazne snage i vremena za ulazni impuls trajanja od 200 fs koji je "ubačen" u višemodno vlakno dužine 50 cm [5]

Prethodna slika prikazuje numeričku simulaciju, gdje je impuls veoma kratkog trajanja "ubačen" u višemodno vlakno dužine 50 cm, na način da su oba moda pobuđena. RP Fiber Power softver je omogućio ovu simulaciju.

Jačina međumodne disperzije se može kvantificirati kao kašnjenje diferencijalnog moda (Differential mode delay – DMD). Ovisi o profilu indeksa refrakcije vlakna  $u$ , i oko jezgre vlakna. Na primjer, za profil indeksa stepena, modovi najvišeg reda imaju niže ukupne brzine, i ovo može dovesti do diferencijalnih ukupnih kašnjenja opsega 10 ps/m + 10 ns/km: U tom slučaju, veoma je teško postići brzine prijenosa podataka reda Gbit/s u linku optičkog vlakna kilometarske dužine. [5]

U sistemima komunikacije optičkih vlakana baziranih na višemodnim vlaknima, međumodna disperzija može uveliko ograničiti ostvarivu brzinu prijenosa podataka. Kako bi se izbjeglo veliko izobličenje signala, obično je potrebno držati impulse dovoljno dugima kako bi se održalo razložno vremensko preklapanje komponenata drugih modova, a ovo može neizbježno ograničiti brzinu prijenosa podataka.

Jedan od načina izbjegavanja međumodne disperzije je korištenje linkova vlakana baziranih na jednomodnim vlaknima. Ako postoji jedan propagacijski mod (zanemarujući moguće disperzije polarizacijskog moda i mod omotača), ne može postojati razlika između propagacijskih vremena. Međutim, međumodna disperzija može se minimizirati korištenjem višemodnih vlakana sa paraboličnim profilom indeksa refrakcije, gdje je međumodna disperzija minimizirana. [5]

### 1.3.2 Slabljenje u vlaknima

Slabljenje u optičkim vlaknima se obično predstavlja kao logaritamska jedinica decibela. Decibel se koristi za poređenje dva nivoa snage i može se definisati za određenu optičku talasnu dužinu kao odnos izlazne optičke snage  $P_0$  vlakna i ulazne optičke snage  $P_i$ . [15]

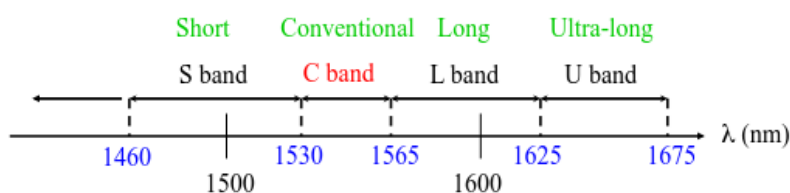
$$\alpha \text{ (dB/km)} = -\frac{10}{L} \log_{10} \left( \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) \approx 4.343\alpha$$

Mogući oblici slabljenja:

- Apsorpcija materijala,
- gubici uslijed raspršivanja,
- nelinearni gubici,
- gubici uslijed savijanja,
- gubici uslijed spajanja modova.

Tri glavna spektralna opsega za prijenos padataka putem optičkih vlakana koji se koriste su:

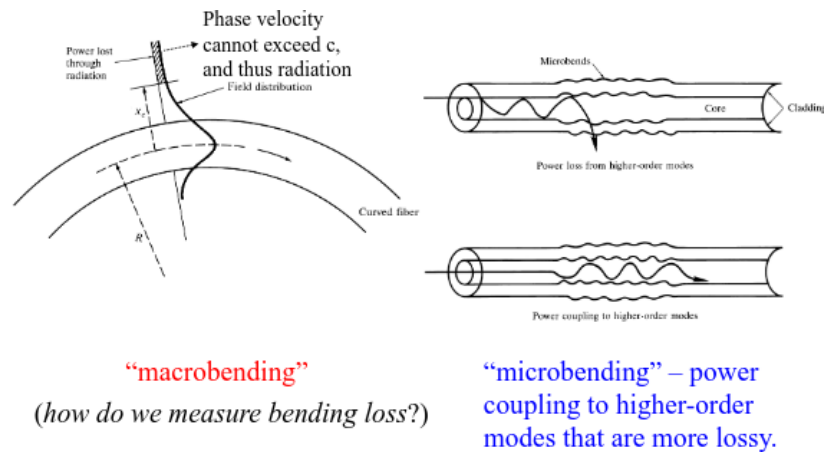
- 850 nm, slabljenje 4 dB/km,
- 1300 nm, slabljenje 0,5 dB/km,
- 1550 nm, slabljenje 0,2 dB/km.



Slika 3: Opseg od 1550 nm se danas koristi kao standardni opseg za komunikaciju putem optičkih vlakana [15]

Apsorpcija materijala nastaje kada svjetlost koja putuje kroz optičko vlakno bude apsorbovana od strane materijala vlakna, umjesto da bude prenijeta dalje. To je mehanizam gubitka koji je povezan kako sa sastavom materijala, tako i sa procesom izrade vlakana. Optička energije se gubi u obliku toplote unutar vlakna. Gubici uslijed raspršivanja rezultuju slabljenjem (u obliku radijacije) uslijed raspršene svjetlosti koja možda neće moći zadovoljiti ukupnu unutrašnju refleksiju u jezgri vlakna. [15]

Pošto je svjetlost ograničena na duge udaljenosti u optičkom vlaknu, nelinearni optički efekti mogu postati bitni čak i na relativno srednjoj optičkoj snazi. Nelinearni efekti ovise o intenzitetu, pa postaju veoma bitni na visokim nivoima optičke snage. Nelinearni optički procesi poput stimulisanog Ramanovog raspršavanja mogu prouzrokovati značajno slabljenje snage optičkog signala. Drugi nelinearni procesi mogu izazvati miješanje modova ili pomjeranje frekvencije, što sve doprinosi gubitku određenog vođenog moda na određenoj frekvenciji. [15]



Slika 4: Makro i mikro savijanje [15]

Optička vlakna su pogodna kao komunikacijski kanal zbog dielektričnog talasnog vođenja (karakteristike optičke žice). Gubici vlakna ograničavaju udaljenost transmisije (minilani gubitak blizu  $1.55\text{microm}$ ). Hromatska disperzija ograničava brzinu prijenosa podataka širenjem pulsa. Nelinearni efekti će izobličiti signal i ograničiti performanse sistema. [15]

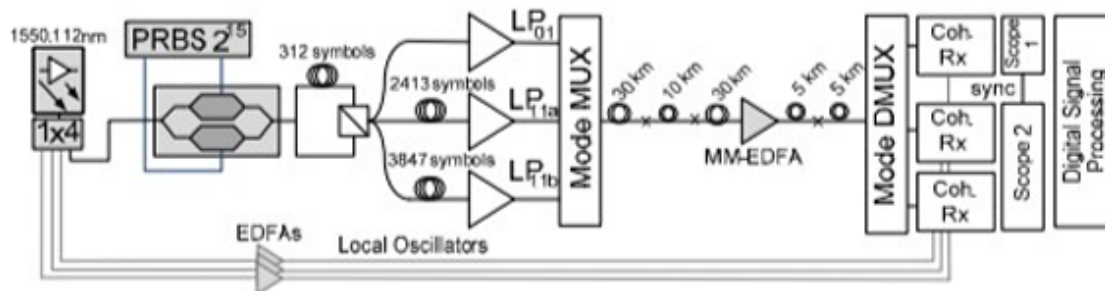
## 2 Općenito o MIMO sistemima

**MIMO** (eng: multiple-input multiple-output) sistemi mogu poboljšati kapaciteti pouzdanost radio komunikacija. Međutim, to iziskuje veće troškove zbog hardvera i veličine sistema. Odabir antena je alternativa niskih troškova i niskog nivoa složenosti koja pokušava obuhvatiti mnoge prednosti MIMO sistema. Impresivna poboljšanja kapaciteta i stope grešaka u bitovima (BER – eng: bit error rate) su motivisala skorašnje interesovanje za MIMO radio sisteme. [14]

Pored dobitaka dolazi i do povećanja troškova zbog složenosti hardvera. MIMO signaliziranje može poboljšati bežične komunikacije na dva različita načina: metode različitosti i prostorno multipleksiranje. Metode različitosti poboljšavaju komunikacije sistema u pogledu BER-a tako što se koristi više puteva između predajnih i prijemnih antena. Prostorno multipleksiranje proizilazi iz činjenice da u okruženju visokog nivoa raspršivanja može doći do toga da prijemnik dekodira signale koji su poslani istovremeno od strane više antena, što omogućava slanje paralelnih tokova podataka i postizanje sposobnosti skaliranja sistema. [14]

Kada su u pitanju optički MIMO transmisijski sistemi, oni obično koriste izjednačivače u vremenskoj ili frekvencijskoj domeni sa minimalnom srednjom kvadratnom greškom (MMSE). Odnedavno, prostorno multipleksiranje (SDM) koje je omogućeno od strane MIMO procesuiranja digitalnih signala, je ustanovljeno kao metoda koja može povećati dostupni kapacitet u jednom vlaknu. SDM se postiže kroz transmisiju preko vlakana sa više jezgri, multimodnih vlakana ili kombinacije te dvije metode.

### 2.1 Eksperimentalni sistem sa nekoliko vlakana



Slika 5:  $3 \times 112 \text{ Gbit/s}$  DP-QPSK eksperimentalni sistem sa nekoliko vlakana. [19]

Eksperimentalni sistem prikazan na slici se koristi kako bi se odredilo smanjenje vremena konvergencije. Dva slučaja, s kraja na kraj (BTB – eng: back-to-back) i transmisija na 80 kilometara su istražena. ECL laser na talasnoj dužini od 1550,112 nm sa širinom spektra manjom od 100 kHz se koristi, a izlaz se ravnomjerno dijeli na 4 izlaza. Tri izlaza su iskorištena kao lokalni oscilatori (Los) za koherentni prijemnik. [19]

Preostali izlaz ECL-a se koristi kao signal za prijenos koji ulazi u IQ-modulator, a taj modulator je omogućen od strane dvije  $2^{15}$  pseudo nasumične sekvence bitova (PRBS),

gdje jedna kasni za  $2^{14}$  simbola u odnosu na drugu, kako bi se generisao 28 GBaud QPSK izlaz. Izlaz se dijeli na dva jednaka izlaza. Oba izlaza su podvrgnuta fazom polarizacijskog multipleksiranja, gdje jedna kasni za 312 simbola za dekorelacione svrhe prije njihovog ponovnog spajanja. Dvojni polarizacijski signal se potom dijeli na tri izlaza. Za dodatne dekorelacione svrhe, dva izlaza kasne za 2413 i 3847 simbola, respektivno. Svaki izlaz se zasebno pojačava prije nego što završi u multiplekseru čvorova (MUX-u). Dva MUX ulaza se konvertuju u prostorno, lienearno polarizirane LP(11a) i LP(11b) modove, i preostali ulaz se koristi kao fundamentalni LP(01) mod, pa se potom kombinirani izlaz prenosi preko FMF-a. [19]

## 2.2 $\lambda$ -MIMO

$\lambda$ -MIMO sistem predstavlja naprednu varijantu tradicionalnih MIMO tehnologija, specifično dizajniranih za korištenje u optičkim komunikacijama. Ova tehnologija omogućava istovremeni prijenos više signala kroz jedno optičko vlakno, koristeći različite talasne dužine ( $\lambda$ ) kao prijenosne modove. Na ovaj način,  $\lambda$ -MIMO znatno povećava kapacitet prijenosa podataka, efikasnost spektra i otpornost na šum, što je ključno za moderne komunikacijske mreže. [16]

### 2.2.1 Osnovni principi $\lambda$ -MIMO sistema

- **Višestruki ulazni i izlazni kanali** - Lambda MIMO koristi višestruke ulazne i izlazne optičke kanale, pri čemu svaki kanal radi na jedinstvenoj valnoj dužini. Ovo omogućava simultani prijenos više podataka putem jednog optičkog vlakna, čime se kapacitet sistema značajno povećava bez potrebe za dodatnim fizičkim resursima.
- **Spektralna efikasnost** - Korištenjem različitih valnih dužina ( $\lambda$ ) unutar istog optičkog vlakna,  $\lambda$  MIMO maksimizira iskorištenost raspoloživog spektra. Ovo omogućava veću propusnost i smanjuje potrebu za proširenjem mreže na fizičkom nivou.
- **Otpornost na smetnje** - Jedna od ključnih prednosti  $\lambda$  MIMO sistema je poboljšana otpornost na međusobne smetnje signala (crosstalk) i vanjske šumove. Signali koji koriste različite valne dužine su fizički i spektralno razdvojeni, što minimizira interferenciju i osigurava kvalitetniji prenos podataka.
- **Višestruki prenosni modovi** - Primjena multimodalnih vlakana u  $\lambda$  MIMO sistemima omogućava korištenje višestrukih prijenosnih modova unutar jednog vlakna. Ovo dodatno povećava kapacitet prijenosa i omogućava veću fleksibilnost u dizajnu mreže, posebno u scenarijima gdje su zahtjevi za kapacitetom izuzetno visoki. [16]

### 2.2.2 Tehnički izazovi u $\lambda$ MIMO sistemima

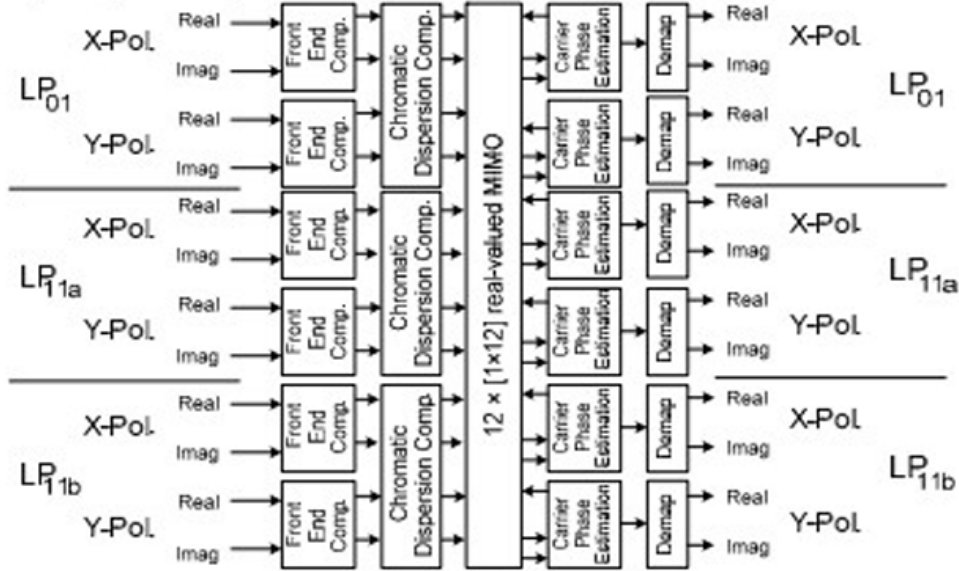
Tehnički izazovi u lambda MIMO sistemima su višestruki i zahtijevaju pažljiv pristup u dizajnu. Prv izazov je kompleksnost dizajna, jer  $\lambda$  MIMO tehnologija zahtijeva napredne optičke komponente uključujući lasere i filtere, koji moraju precizno kontrolirati različite valne dužine. Razvoj ovih omponenti ključan je za stabilnost sistema i tačnost prenosa podataka. Osim toga, integracij moduliranih ADC-ova ( $M\lambda$ -ADC) može dodatno poboljšati performanse sistema omogućavanjem preciznog uzorkovanja u okolnostima kada je dinamički opseg vrlo širok, što je česta situacija u optičkim komunikacijama.

Drugi izazov je kalibracija i sinkronizacija optičkih odašiljača i prijemnika, koja mora bit izuzetno precizna za efikasan rad  $\lambda$  MIMO sistema. Ovaj izazov postaje još složeniji u situacijama kada se koristi veliki broj valnih dužina, jer je potrebno osigurati da svi kanali budu usklađeni. To zahtijeva primjenu naprednih tehnika sinhronizacije, uključujući algoritme za predikciju i prilagođavanje šuma, koji omogućavaju održavanje stabilnog i kvalitetnog prenosa podataka.

Za postizanje maksimalne efikasnosti,  $\lambda$  MIMO sistemi moraju biti pažljivo optimizirani. To uključuje strateško upravljanje raspodjelom valnih dužina unutar sistema, implementaciju naprednih metoda za smanjenje šuma, kao i prilagodbu arhitekture prijemnika kako bi se minimizirale intermodulacijske smetnje. Efikasno upravljanje svim ovim aspektima ključ je za postizanje optimalnih performansi  $\lambda$  MIMO sistema i osiguranje njihovog pouzdanog rada u realnim uvjetima. [8]

### 3 Obrada digitalnog signala

Nakon konverzije iz analognog u digitalni signal prikazane na slici 1, prelazi se na obradu digitalnog signala. Najprije se vrši kompenzacija optičkog prednjeg dijela. Zatim se sprovodi procjena i kompenzacija hromatske disperzije (CD), a sljedeći korak je srž prijemnika, MIMO izjednačivač. On otkriva dolazne podatke i dodjeljuje ih zasebnim izlazima. [19]



Slika 6: Ključne faze obrade digitalnog signala. [19]

Implementacija prostornog multipleksiranja u modernim koherentnim komunikacijskim sistemima koji koriste amplitudu i fazu optičkog signala je bazirana na relativno skupim MIMO procesorskim šemama, koje se oslanjaju na volumensku optiku. [12]

#### 3.1 Optički prijemnici

Fotodioda konvertuje optički signal u električnu domenu, pojačivači i filtri oblikuju električni signal, a odlučujuće kolo ponovo konstruiše tok nula i jedinica. Električni i optički šumovi mogu dovesti to promjene svojstava signala, performanse se mjere kroz stopu grešaka u bitovima (BER – eng: bit error rate), a  $BER < 10^{-9}$  za sve svjetlosne sisteme. Osjetljivost prijemnika predstavlja minimalnu količinu optičke snage koja je neophodna da bi se realizovala željena stopa grešaka u bitovima. [1]

$BER = p(1)P(0|1) + p(0)P(1|0) = \frac{1}{2} [P(0|1) + P(1|0)]$  BER predstavlja vjerovatnoću greške po bitu, a  $P(0|1)$  je uslovna vjerovatnoća donošenja odluke “0” kada je poslata jedinica. [1]

## 4 Istraživački trendovi

FMF-ovi (vlakna sa više modova) nude obećavajuće osobine za sisteme sa multipleksingom podjele modova, ali da bi ostvarili svoj puni potencijal, broj njihovih LP modova mora biti povećan. Sa stajališta dizajna, složeni zadatak optimizacije velikog broja (=6) LP modova se može pojednostaviti izborom odgovarajućeg tipa indeksa profila i primjenom odgovarajuće strategije dizajna. [17]

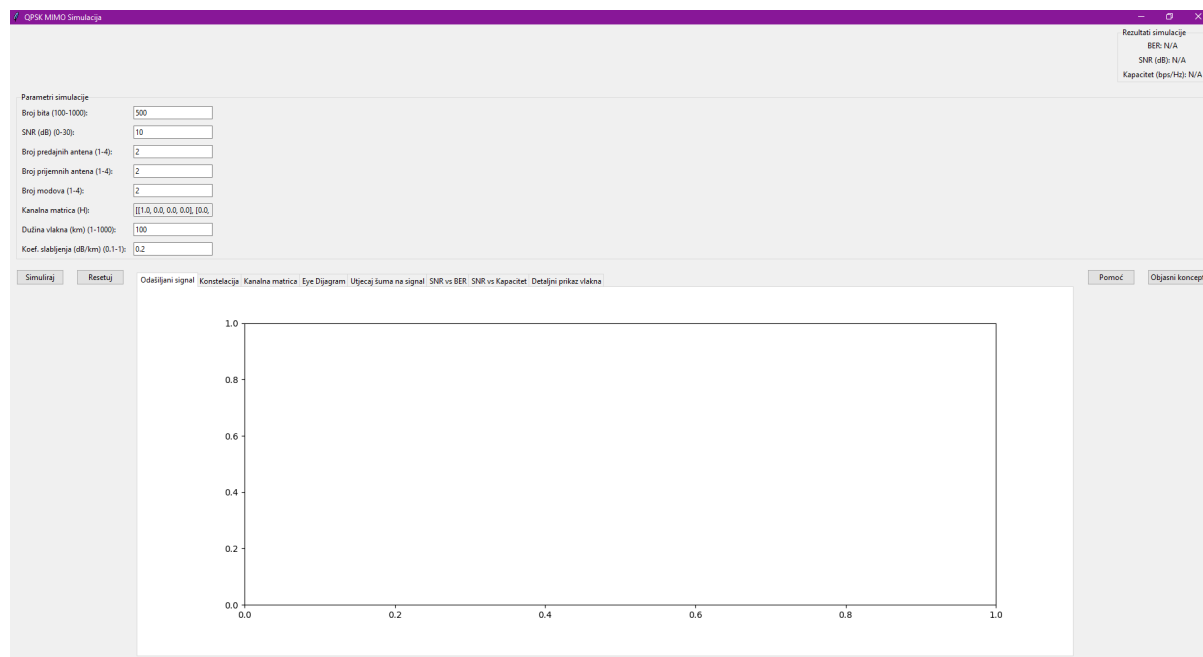
Nekoliko konvencionalnih tehnika smanjuje međumodno spajanje u FMF-ovima, uključujući MIMO procesuiranje i prilagodljivu optiku, međutim, takve metode zahtijevaju korištenje složenih eksperimentalnih sistema i ogromne računarske resurse, pogotovo kod velikog broja prostornih modova. [2]

Istraživački pravci koji će biti važni za buduće FiWi MIMO pristupne mreže:

- Pošto je Massive MIMO (visoki redovi MIMO struja) ključan za budućnost širokopojasnog bežičnog prijenosa i 5G mreža, trebalo bi da se uključi u buduća istraživanja MIMO-RoF sistema.
- Slanje MIMO signala sa različitim frekvencijama (MIMO diversifikacija tehnika) preko vlakna kao RoF je jednostavno, jer nema preklapanja u frekvencijskom domenu. Međutim, slanje MIMO signala sa istom frekvencijom (MIMO prostorna tehnika) preko vlakna kao RoF nije jednostavno. Problem sa slanjem MIMO signala koji imaju slične frekvencije preko jedne optičke talasne dužine direktno je taj što se preklapaju u frekvencijskom domenu.
- Iako je OFDM-PON obećavajuća tehnologija za NG-PON, do sada nije predložena integracija za MIMO-RoF bežični prijenos preko OFDM-PON.
- Niskobudžetna rješenja za integrisani transport različitih MIMO bežičnih tehnologija, kao što su multiband OFDM-UWB i WiFi IEEE 802.11ax, ključna su za konsolidaciju infrastrukture kroz dalekosežne PON mreže. [3]

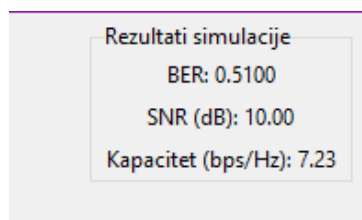


## 5 Praktična realizacija (Python)



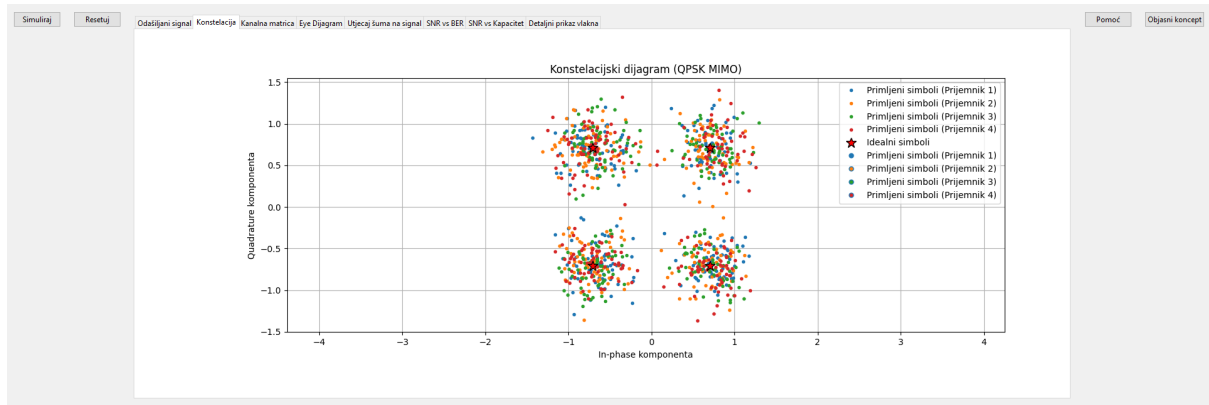
Slika 7: Izgled GUI-a

Slika prikazuje tipično sučelje za simulaciju optičkih komunikacijskih sistema. Ovakvi alati omogućavaju inženjerima da modeliraju i analiziraju različite scenarije prijenosa podataka, što je ključno za razvoj efikasnih i pouzdanih komunikacijskih mreža. Podešavanjem parametara kao što su odnos signal-šum (SNR), kapacitet i dužina vlakna, moguće je simulirati različite uslove i analizirati njihov utjecaj na performanse sistema. Rezultati simulacije se obično prikazuju u obliku grafova, što olakšava vizualizaciju i interpretaciju podataka.



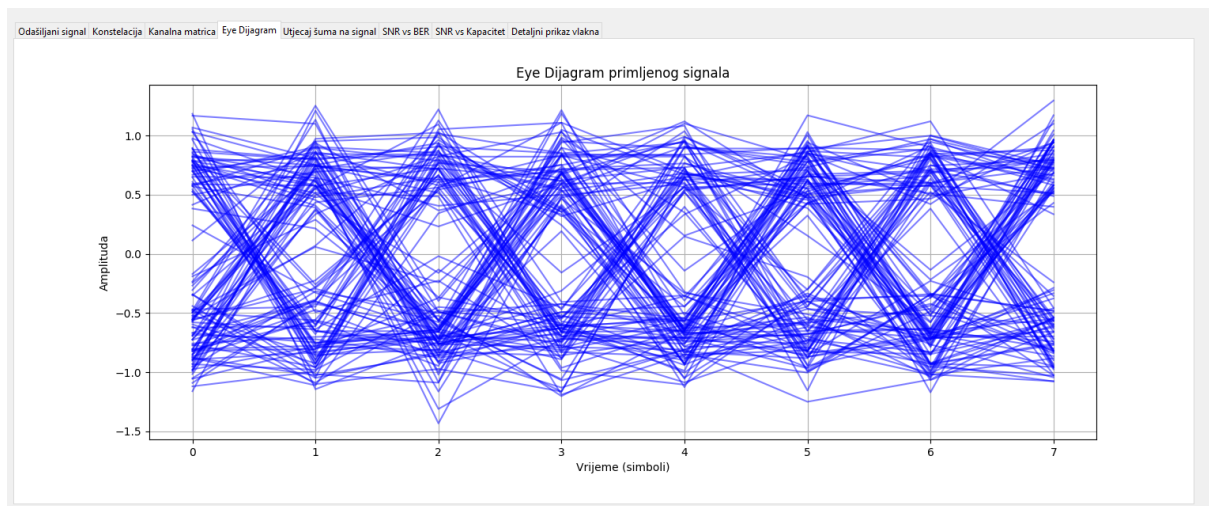
Slika 8: Rezultati simulacije

Ovaj program omogućava korisniku da postavi različite parametre koji opisuju karakteristike komunikacijskog kanala i sistema. Neki od bitnih parametara su broj bita koji se prenose, odnos signal-šum (SNR), broj antena, dužina optičkog vlakna i koeficijent slabljenja. Podešavanjem parametara mogu se simulirati različiti scenariji i analizirati kako različiti faktori utječu na kvalitet prijenosa podataka. Kanalna matrica je posebno važna jer opisuje kako se signal širi kroz komunikacijski kanal i podložan je različitim smetnjama.



Slika 9: *Prikaz konstelacije*

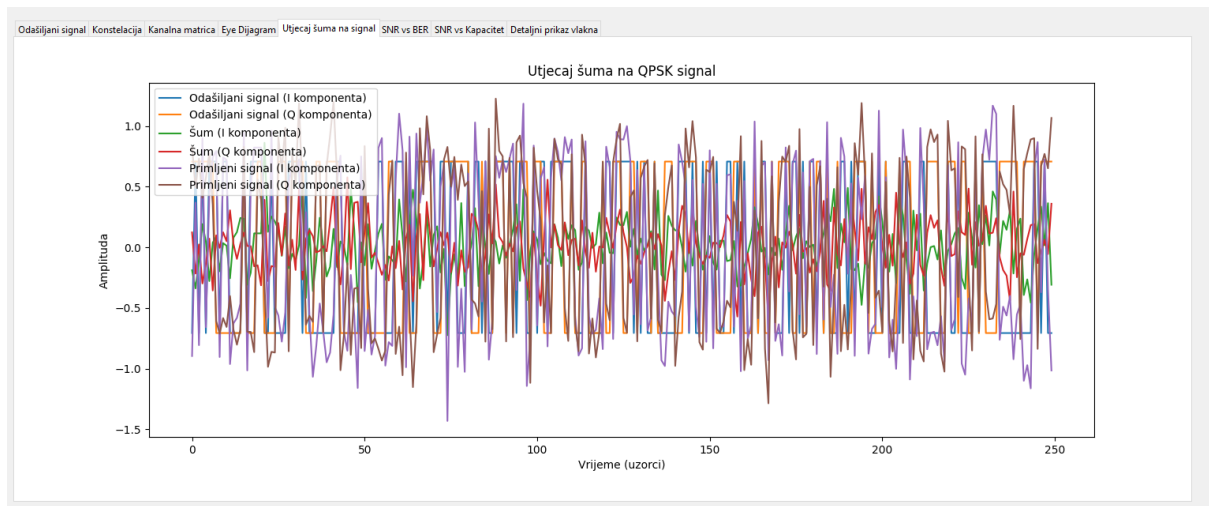
Slika 9. prikazuje konstelacijski dijagram dobiven simulacijom QPSK MIMO sistema. Raspršenost tačaka oko idealnih pozicija ukazuje na prisutnost šuma i smetnji u komunikacijskom kanalu. Međutim, općenito, dijagram pokazuje dobru kvalitetu prijema i sinkronizacije, što potvrđuje ispravnost korištenog modela i parametara simulacije.



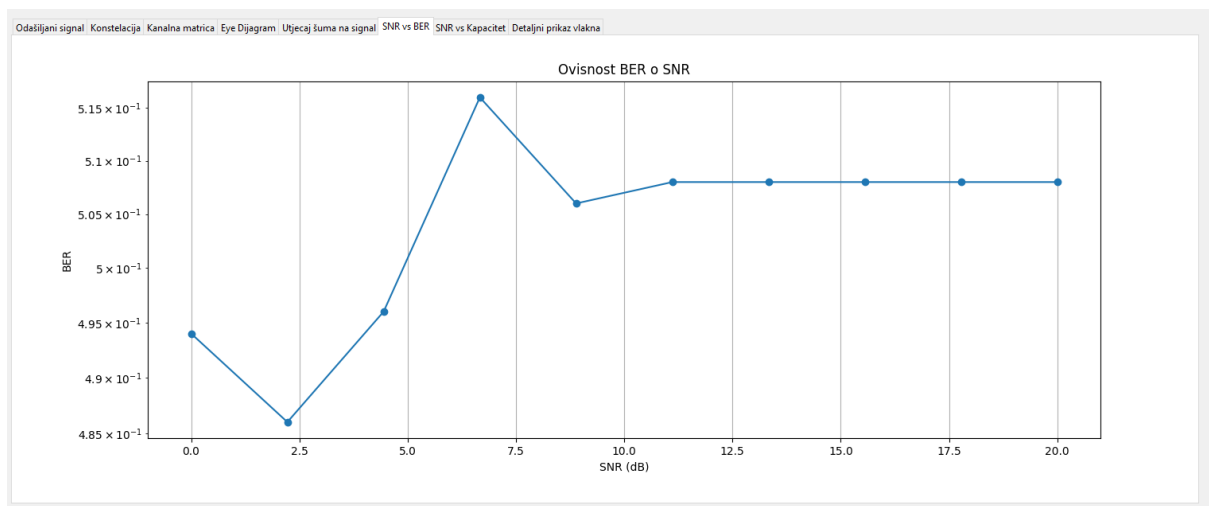
Slika 10: *Eye dijagram*

Slika 10. prikazuje eye dijagram primljenog signala. Ovaj dijagram se koristi za vizualnu procjenu kvalitete digitalnog signala nakon prolaska kroz komunikacijski kanal. Širina i otvorenost "oka" ukazuju na razinu šuma i smetnji te na pouzdanost detekcije pojedinačnih bitova. U ovom slučaju, relativno velika otvorenost oka sugerira dobru kvalitetu primljenog signala.

Slika 11. prikazuje grafik QPSK signala, koji je vrsta digitalne modulacije koja se koristi u komunikacijskim sistemima. Grafik prikazuje nekoliko komponenti signala tokom vremena, uključujući komponente u fazi (I) i kvadrature faze (Q) signala, kao i njihove sume. X-osa predstavlja vrijeme u jedinicama mikrosekundi, dok y-osa prikazuje amplitudu signala. Grafik pruža detaljan vizualni prikaz karakteristika QPSK signala, što može biti korisno za analizu ili otklanjanje problema u komunikacijskim sistemima.



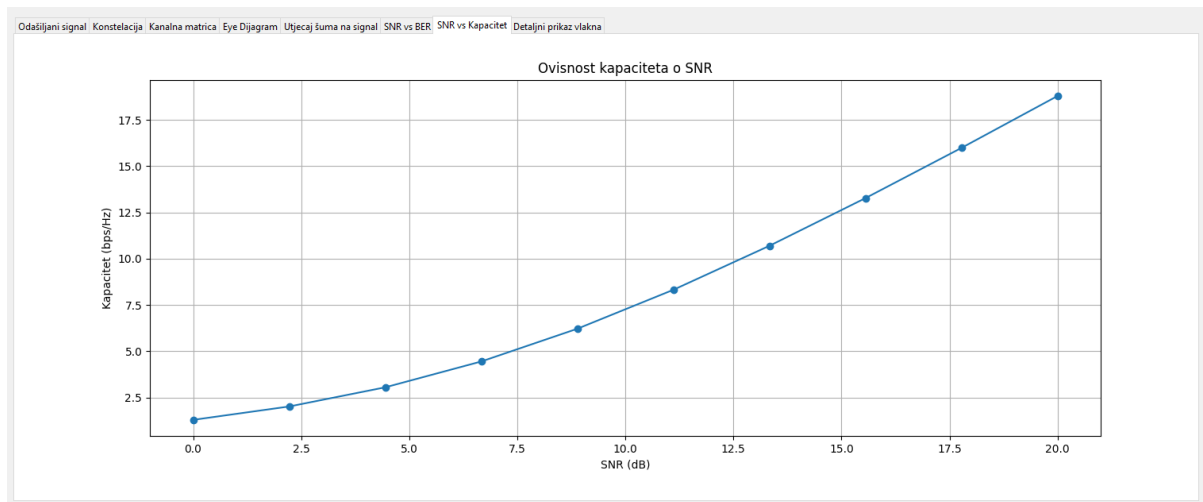
Slika 11: *Utjecaj šuma na kanal*



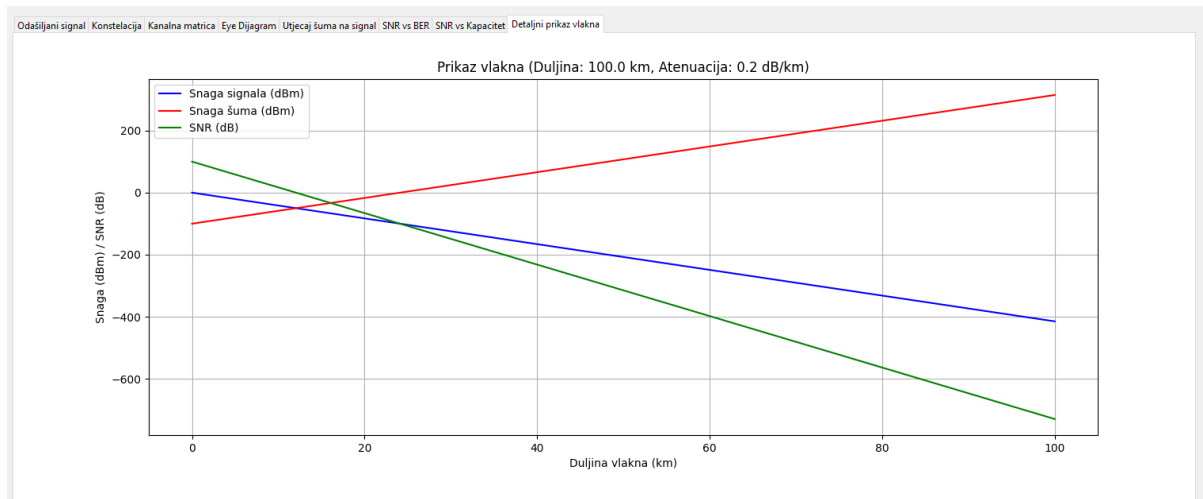
Slika 12: *SNR vs BER*

Grafik prikazuje odnos između stope bitnih grešaka (BER) i odnosa signala i šuma (SNR) za komunikacijski sistem. BER je prikazan na y-osi, a SNR u dB na x-osi. Grafik pokazuje da se, kako se SNR povećava, BER smanjuje, što se i očekuje. Prikazane su specifične vrijednosti BER-a za različite nivoe SNR-a, što omogućava procjenu performansi sistema.

Slika 13. prikazuje odnos između kapaciteta kanala (u bitima u sekundi po hercu) i odnosa signala i šuma (SNR) u decibelima (dB). Kako se SNR povećava, kapacitet kanala se također povećava približno linearno. To demonstrira temeljni odnos između kvaliteta signala i maksimalne teoretske brzine prijenosa podataka koja se može postići u komunikacijskom kanalu. Prikazane su specifične vrijednosti kapaciteta za svaki nivo SNR-a, što omogućava procjenu teoretskih granica performansi sistema.



Slika 13: *SNR vs Kapacitet*



Slika 14: *Detaljan prikaz vlakana*

Plava linija predstavlja pojedinačnu jačinu signala, koja se smanjuje kako se udaljenost povećava zbog gubitka signala na putu. Crvena linija prikazuje zbir jačina signala, koji se također smanjuje s udaljenošću. Zelena linija prikazuje SNR, koji počinje visoko i opada kako signal slabi u odnosu na šum. Ova vrsta grafika se često koristi za analizu performansi bežične veze i određivanje faktora kao što je maksimalni upotrebljivi domet.

## Spisak slika

1	<i>Prikaz razlike jezgri vlakana. [20]</i>	6
2	<i>Odnos izlazne snage i vremena za ulazni impuls trajanja od 200 fs koji je "ubačen" u višemodno vlakno dužine 50 cm [5]</i>	8
3	<i>Opseg od 1550 nm se danas koristi kao standardni opseg za komunikaciju putem optičkih vlakana [15]</i>	9
4	<i>Makro i mikro savijanje [15]</i>	10
5	<i><math>3 \times 112\text{Gbit/s}</math> DP-QPSK eksperimentalni sistem sa nekoliko vlakana. [19]</i>	11
6	<i>Ključne faze obrade digitalnog signala. [19]</i>	14
7	<i>Izgled GUI-a</i>	16
8	<i>Rezultati simulacije</i>	16
9	<i>Prikaz konstelacije</i>	17
10	<i>Eye dijagram</i>	17
11	<i>Utjecaj šuma na kanal</i>	18
12	<i>SNR vs BER</i>	18
13	<i>SNR vs Kapacitet</i>	19
14	<i>Detaljan prikaz vlakana</i>	19

# Literatura

- [1] Govind P Agrawal. *Fiber-optic communication systems*. John Wiley & Sons, 2012.
- [2] Islam Ashry, Yuan Mao, Abderrahmen Trichili, Biwei Wang, Tien Khee Ng, Mohamed-Slim Alouini, and Boon S Ooi. A review of using few-mode fibers for optical sensing. *IEEE access*, 8:179592–179605, 2020.
- [3] MA Elmagzoub, Asadullah Shaikh, Abdullah Alghamdi, and Khairan Rajab. A review on mimo wireless signals over fibre for next generation fibre wireless (fiwi) broadband networks. *Electronics*, 9(12):2014, 2020.
- [4] RP Photonics Encyclopedia. Few-mode fibers, n.d. Accessed: 2025-01-04.
- [5] RP Photonics Encyclopedia. Intermodal dispersion, n.d. Accessed: 2025-01-04.
- [6] Keang-Po Ho, Joseph M Kahn, IP Kaminow, T Li, and AE Willner. Mode coupling and its impact on spatially multiplexed systems. *Optical Fiber Telecommunications VI*, 17:1386–1392, 2013.
- [7] Ken-ichi Kitayama and Nikolaos-Panteleimon Diamantopoulos. Few-mode optical fibers: Original motivation and recent progress. *IEEE Communications Magazine*, 55(8):163–169, 2017.
- [8] Zi-Hui Liu, Ayush Bhandari, and Bruno Clerckx.  $\lambda$ -mimo: Massive mimo via modulo sampling. *IEEE Transactions on Communications*, 71:6301–6315, 2022.
- [9] Adriana Patricia Lobato Polo. *Enhancing the Performance of Few-Mode Fiber Systems Impaired by Mode-Dependent Loss*. PhD thesis, Dissertation, Neubiberg, Universität der Bundeswehr München, 2019.
- [10] Egor S Manuylovich, Vladislav V Dvoyrin, and Sergei K Turitsyn. Fast mode decomposition in few-mode fibers. *Nature communications*, 11(1):5507, 2020.
- [11] MIT News Office. Explained: Shannon’s entropy, January 2010. Accessed: 2025-01-04.
- [12] W. Qian, Y. Li, Z. Zhang, et al. Spectral and spatial shaping of few-mode fibers for mode-division multiplexing. *Nature Communications*, 11:1–9, 2020. Accessed: 2025-01-04.
- [13] Georg Rademacher, Ruben S Luis, Benjamin J Puttnam, Tobias A Eriksson, Roland Ryf, Erik Agrell, Ryo Maruyama, Kazuhiko Aikawa, Yoshinari Awaji, Hideaki Furukawa, et al. High capacity transmission with few-mode fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 37(2):425–432, 2019.
- [14] Shahab Sanayei and Aria Nosratinia. Antenna selection in mimo systems. *IEEE Communications magazine*, 42(10):68–73, 2004.
- [15] Derek Shuman. Lecture 5: Optical fibers, n.d. Accessed: 2025-01-04.

- [16] Pierre Sillard, Kaoutar Benyahya, Daiki Soma, Guillaume Labroille, Pu Jian, Koji Igarashi, Roland Ryf, Nicolas K. Fontaine, Georg Rademacher, and Kohki Shibahara. Few-mode fiber technology, deployments, and systems. *Proceedings of the IEEE*, 110(11):1804–1820, 2022.
- [17] Pierre Sillard, Marianne Bigot-Astruc, and Denis Molin. Few-mode fibers for mode-division-multiplexed systems. *Journal of Lightwave Technology*, 32(16):2824–2829, 2014.
- [18] Mehtab Singh, Sahil Nazir Potttoo, Moustafa H Aly, Štěpán Hubálovský, Amit Grover, Debashis Adhikari, and Preecha Yupapin. Mode division multiplexing free space optics system with 3d hybrid modulation under dust and fog. *Alexandria Engineering Journal*, 62:113–127, 2023.
- [19] Roy GH Van Uden, Chigo M Okonkwo, Vincent AJM Sleiffer, Hugo De Waardt, and Antonius MJ Koonen. Mimo equalization with adaptive step size for few-mode fiber transmission systems. *Optics express*, 22(1):119–126, 2013.
- [20] Yi Weng, Xuan He, and Zhongqi Pan. Space division multiplexing optical communication using few-mode fibers. *Optical Fiber Technology*, 36:155–180, 2017.
- [21] Jianxun Yu, Fengze Tan, and Changyuan Yu. Few-mode fiber characterization system based on the spatially and spectrally imaging technique. *Sensors*, 22(5):1809, 2022.