



UNIVERZITET U SARAJEVU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET
ODSJEK ZA TELEKOMUNIKACIJE

Utjecaj Nelinearnog Preslušavanja (XPM) u WDM Sistemima

PROJEKTNI ZADATAK
- OPTIČKI TELEKOMUNIKACIONI SISTEMI -

Studenti:

Ena Šabanović, 2476/18945
Amsal Škaljo, 2466/18671
Bakir Šatara, 2385/19004

Profesor:

Prof. dr. Darijo Raca

Sarajevo,
januar 2026.

Sažetak

Wavelength Division Multiplexing (WDM) tehnologija postavlja se kao jedan od temelja fiber-optičkih komunikacija, omogućavajući povećanje BL produkta prenosom više stotina optičkih kanala kroz jedno vlakno. Međutim da bi se potpuno iskoristile dobre strane WDM tehnologije potrebno je umanjiti ili eliminisati neželjene efekte. Nelinearnosti u vlaknu su jedan od osnovnih problema optičkih telekomunikacijskih sistema. Jedan od tih nelinearnih efekata je i Cross-Phase Modulation (XPM). Ovaj rad će nastojati dati osnovu razumjevanja XPM efekta u WDM optičkim sistemima te će nastojati evaluirati te efekte u OptiCommPy simulacijskom framework-u koji je baziran na Python programskom jeziku.

Ključne riječi: WDM, fiber-optičke komunikacije, XPM, nelinearni efekti, OptiCommPy, Python

Abstract

Wavelength Division Multiplexing (WDM) technology is being established as one of the foundations of optical communications, enabling an increase in the Bit-Rate Length (*BL*) product by transmitting several hundred optical channels through a single fiber. However, to fully exploit the advantages of WDM technology, unwanted effects must be reduced or eliminated. Fiber nonlinearities are one of the fundamental problems in optical telecommunication systems. Cross-Phase Modulation (XPM) is one of these nonlinear effects. This paper will aim to provide a basic understanding of the XPM effect in WDM optical systems and will seek to evaluate these effects within the OptiCommPy simulation framework, which is based on the Python programming language.

Keywords: WDM, fiber-optic communications, XPM, nonlinear effects, OptiCommPy, Python

Sadržaj

1	Teorijska analiza	1
1.1	Nelinearnosti u optičkom vlaknu i Kerr-ov efekat	1
1.2	Model propagacije: NLSE i nelinearni koeficijent	2
1.3	SPM i XPM u WDM sistemima	2
1.4	Uloga disperzije i <i>walk-off</i> efekta: zavisnost od razmaka kanala	3
1.5	Mehanizam degradacije performansi i veza sa BER	4
1.5.1	Dijagram oka kao pokazatelj degradacije signala	5
1.6	Numerička analiza: split-step Fourier metoda (SSFM)	8
2	Implementacija i rezultati simulacije	10
2.1	Korišteni alati i biblioteke	10
2.2	Pomoćne funkcije: eye-diagram i ekstrakcija kanala	11
2.3	Generisanje WDM predajnog signala (TX)	12
2.4	Model optičkog vlakna i propagacija (SSFM)	13
2.4.1	Verifikacija spektra (PSD)	13
2.5	Koherentni prijemnik i DSP obrada	14
2.6	Metrike kvaliteta i priprema signala za rezultate	16
2.7	Rezultati simulacije	17
2.7.1	Optički WDM spektar (TX vs RX)	18
2.7.2	Konstelacijski dijagrami (RX)	20
2.7.3	Fazna analiza nelinearne degradacije	21
2.7.4	Eye-diagram analiza (izolovani centralni kanal nakon ekstrakcije i DSP)	23
2.7.5	Analiza bitne greške (BER)	27
2.8	Zaključak	30
	Popis slika	32
	Literatura	32

Uvod

Wavelength Division Multiplexing (WDM) predstavlja jednu od ključnih tehnologija savremenih optičkih komunikacija, jer omogućava značajno povećanje kapaciteta prenosa slanjem više optičkih kanala različitih talasnih dužina kroz jedno vlakno. Međutim, porast ukupne optičke snage u vlaknu i sve veća spektralna efikasnost dovode do izraženijih fizičkih ograničenja, među kojima posebno mjesto zauzimaju nelinearni efekti uzrokovani Kerr-ovom nelinearnošću. U višekanalnom WDM okruženju, nelinearnosti ne utiču samo na pojedinačni kanal, nego se javljaju i kao *nelinearno preslušavanje* između kanala, što direktno ograničava performanse koherentnih sistema velikog dometa.

Jedan od dominantnih mehanizama nelinearnog preslušavanja u WDM sistemima je *cross-phase modulation (XPM)*, gdje promjene intenziteta susjednih kanala indukuju vremenski promjenjiv fazni pomak na posmatranom kanalu. Iako je XPM primarno fazni efekat, u realnom vlaknu sa hromatskom disperzijom dolazi do djelimične konverzije faznih fluktuacija u amplitudna i vremenska izobličenja (*PM-to-AM conversion*). Posljedica toga su povećanje intersimbolne interferencije (ISI), zatvaranje eye-diagrama i mjerljivo pogoršanje BER performansi.

Cilj ovog projekta je:

- teorijski objasniti mehanizam XPM-a i njegovu zavisnost od ključnih parametara (snaga po kanalu i razmak/konfiguracija WDM kanala),
- numerički evaluirati navedene utjecaje simulacijom propagacije kroz SMF vlakno metodom *split-step Fourier* (SSFM/Manakov model),
- povezati teorijska očekivanja sa simulacijskim rezultatima kroz analizu spektra (PSD), faznih fluktuacija (TX vs RX i histogram fazne razlike), eye-diagrama i BER-a.

U implementacijskom dijelu koristi se OptiCommPy (Python) za generisanje WDM signala, propagaciju kroz vlakno i osnovnu DSP obradu prijemnika. Fokus analize je na centralnom kanalu, jer je on tipično izložen utjecajima susjednih kanala s obje strane, pa predstavlja reprezentativan slučaj za procjenu XPM degradacije u višekanalnom WDM sistemu.

Poglavlje 1

Teorijska analiza

U ovom poglavlju prikazana je teorijska osnova potrebna za razumijevanje utjecaja nelinearnog preslušavanja (XPM) u WDM optičkim sistemima. Najprije se razmatra porijeklo nelinearnosti u jednomodnom vlaknu kroz Kerr-ov efekt i njegov uticaj na fazu optičkog signala. Zatim se objašnjava kako u WDM okruženju, pored samofazne modulacije (SPM), dolazi do međufazne modulacije (XPM), gdje promjene intenziteta u susjednim kanalima induciraju vremenski promjenjiv fazni pomak posmatranog kanala. Poseban naglasak stavljen je na ulogu hromatske disperzije i *walk-off* efekta, koji određuju stepen vremenskog preklapanja kanala i time zavisnost jačine XPM-a od razmaka između kanala. Na kraju poglavlja daje se kvalitativna veza između XPM mehanizma i degradacije performansi mjerene kroz BER, što predstavlja osnovu za implementacijsku analizu i numeričke simulacije metodom split-step Fourier (SSFM) u narednom poglavlju.

1.1 Nelinearnosti u optičkom vlaknu i Kerr-ov efekt

U standardnom jednomodnom vlaknu (SMF) propagacija optičkog polja nije idealno linearna, posebno pri većim gustoćama optičke snage koje se javljaju u modernim WDM sistemima. [1, 2] Dominantni izvor optičkih nelinearnosti u telekomunikacionom opsegu je Kerr-ov efekt, zbog kojeg indeks prelamanja vlakna zavisi od jačine (intenziteta) optičkog signala:

$$n = n_0 + n_2 I, \quad (1.1)$$

gdje je n_0 linearni indeks prelamanja, n_2 Kerr-ov koeficijent, a I intenzitet optičkog signala. Ova zavisnost rezultira nelinearnim faznim pomakom akumuliranim tokom propagacije kroz vlakno. Budući da je fazni pomak proporcionalan optičkoj snazi i efektivnoj dužini interakcije, nelinearni efekti postaju izraženiji pri većim ulaznim snagama po kanalu i na dužim linkovima. [1] Posljedica su nelinearni fenomeni kao što su samofazna modulacija (SPM), gdje faza kanala zavisi od njegove sopstvene snage, i međufazna modulacija (XPM), gdje faza posmatranog kanala zavisi i od snage susjednih WDM kanala, što se u praksi manifestuje kao nelinearno preslušavanje. [1, 3]

Jačina Kerr-ovih nelinearnosti u vlaknu se često kvantificira nelinearnim koeficijentom γ , koji zavisi od n_2 i efektivne površine moda A_{eff} ; manja vrijednost A_{eff} vodi većem γ i izraženijim nelinearnim efektima. U prisustvu atenuacije α , akumulacija nelinearnog uticaja se opisuje efektivnom dužinom L_{eff} , što pokazuje da nelinearna interakcija ne raste beskonačno s fizičkom dužinom vlakna, već se smanjuje usljed gubitaka. [1]

Za precizniji opis propagacije optičkog signala kroz vlakno, potrebno je istovremeno modelirati i linearne efekte (prvenstveno hromatsku disperziju i atenuaciju) i nelinearne efekte

Kerr-ovog tipa. Ovi uticaji se objedinjeno opisuju nelinearnom Schrödingerovom jednačinom (NLSE), koja predstavlja standardni matematički model za analizu nelinearnog prenosa u optičkim komunikacionim sistemima. Kako analitičko rješenje NLSE u opštem slučaju nije dostupno, u praksi se koristi numeričko rješavanje, pri čemu je metoda split-step Fourier (SSFM) jedan od najčešće primjenjivanih pristupa. [1] U nastavku se daje osnovni oblik NLSE i objašnjavaju parametri koji su relevantni za analizu XPM-a u WDM sistemima.

1.2 Model propagacije: NLSE i nelinearni koeficijent

Propagacija kompleksne omotačnice signala $A(z, t)$ kroz vlakno uz disperziju i Kerr-ovu nelinearnost se standardno modelira nelinearnom Schrödingerovom jednačinom (NLSE), koja (u pojednostavljenom obliku) uključuje gubitke, hromatsku disperziju i nelinearni član proporcionalan $|A|^2 A$.

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A - j\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + j\gamma|A|^2 A, \quad (1.2)$$

gdje je α koeficijent atenuacije, β_2 parametar grupno-brzinske disperzije (GVD), a γ nelinearni koeficijent vlakna. Koeficijent γ zavisi od Kerr parametra i efektivne površine moda A_{eff} , pa manji A_{eff} vodi većoj nelinearnosti. [1]

U prisustvu gubitaka, nelinearni uticaj se često opisuje efektivnom dužinom:

$$L_{\text{eff}} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}, \quad (1.3)$$

koja pokazuje da nelinearna akumulacija ne raste linearno sa L kada su gubici značajni. Iz izraza za γ i L_{eff} vidi se da nelinearni efekti jačaju sa porastom snage i efektivne dužine propagacije. U single-channel slučaju dominantno se ispoljava samofazna modulacija (SPM), dok u WDM sistemima dolazi i do međusobne interakcije kanala. Ta interakcija se najčešće manifestuje kao međufazna modulacija (XPM), gdje intenzitet susjednih kanala utiče na fazu posmatranog kanala. [1, 3, 4]

S obzirom na to da nelinearni član u NLSE uvodi fazni pomak zavisen od intenziteta, u WDM sistemima ovaj mehanizam dovodi do pojave nelinearnog preslušavanja između kanala. U nastavku su ukratko opisani SPM i XPM efekti, s fokusom na XPM kao ključni efekat u analiziranom WDM scenariju.

1.3 SPM i XPM u WDM sistemima

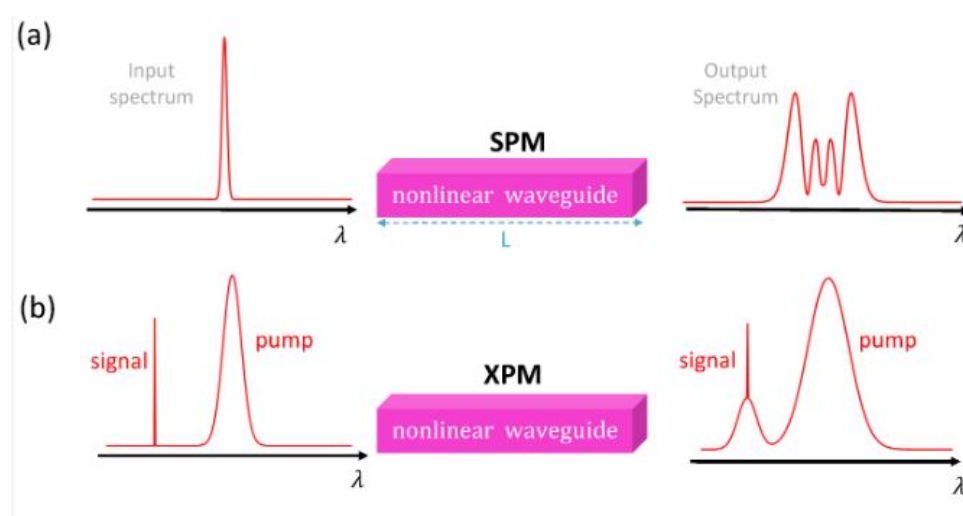
U WDM sistemu više kanala različitih talasnih dužina propagira istim optičkim vlaknom, pri čemu svi kanali dijele isti propagacioni medij i iste fizičke osobine vlakna. Zbog Kerr-ovog efekta, indeks prelamanja (a time i fazna konstanta) zavisi od intenziteta signala, pa se tokom propagacije javlja dodatni nelinearni fazni pomak. [1] U zavisnosti od toga da li fazni pomak potiče od sopstvene snage kanala ili od snage susjednih kanala, razlikuju se dva osnovna efekta:

- **SPM (Self-Phase Modulation)** nastaje kada se faza kanala mijenja usljed *njegove sopstvene* trenutne snage. Ovaj efekat uzrokuje vremenski promjenjivu fazu (i pripadni chirp), što može dovesti do širenja spektra i izobličenja impulsa, naročito u prisustvu disperzije.

- **XPM (Cross-Phase Modulation)** nastaje kada promjene intenziteta u *susjednim WDM kanalima* modulišu fazu posmatranog kanala. U tom slučaju, informacija (promjene snage) iz drugih kanala se kroz Kerr-ovu nelinearnost „preslikava” na fazu posmatranog kanala, pa se XPM može posmatrati kao oblik nelinearnog preslušavanja u WDM sistemu.

U praksi, XPM je posebno značajan u WDM sistemima jer se doprinosi više susjednih kanala mogu kumulirati, a jačina efekta raste sa ulaznom snagom po kanalu. [1, 3] Zbog toga se XPM često javlja kao jedan od ključnih limitirajućih efekata, naročito pri većim snagama i pri manjem razmaku između WDM kanala. [5]

Razlika između SPM i XPM se može intuitivno prikazati posmatranjem spektra na ulazu i izlazu nelinearnog medija. Slika 1.1 upoređuje tipične spektralne posljedice SPM, i XPM, pri čemu je u ovom radu fokus na XPM kao dominantnom izvoru nelinearnog preslušavanja u WDM sistemima.



Slika 1.1: Kvalitativno poređenje Kerr-ovih nelinearnih efekata kroz promjenu spektra: (a) SPM uzrokuje širenje spektra jednog signala, (b) XPM dovodi do spektralne promjene signala pod uticajem drugog kanala (pump) [6]

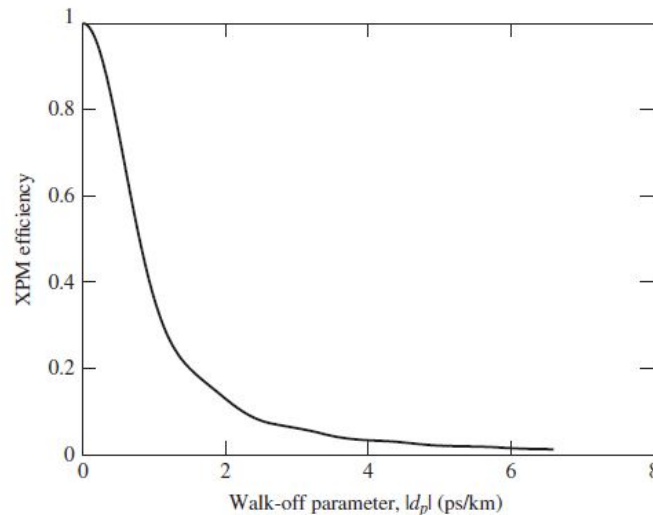
Važno je naglasiti da XPM ne zavisi samo od snage, već i od toga koliko se impulsi različitih kanala vremenski preklapaju tokom propagacije. Upravo tu ključnu ulogu imaju hromatska disperzija i *walk-off* efekat, koji određuju stepen preklapanja kanala i time zavisnost jačine XPM-a od razmaka između kanala. U nastavku se razmatra ovaj mehanizam i njegov utjecaj na performanse sistema.

1.4 Uloga disperzije i *walk-off* efekta: zavisnost od razmaka kanala

U WDM sistemima pojedini kanali se nalaze na različitim talasnim dužinama, pa zbog hromatske disperzije vlakna ne propagiraju jednakom grupnom brzinom. Kao posljedica, impulsi različitih kanala tokom propagacije postepeno „klize” jedni u odnosu na druge u vremenu, što se opisuje *walk-off* efektom. [1, 4] Ovaj efekat direktno utiče na jačinu XPM-a: što je veće vremensko preklapanje impulsa između kanala, to je jača međusobna nelinearna interakcija i veći XPM-indukovani fazni pomak na posmatranom kanalu. [1]

Razmak između WDM kanala (`wdmGridSpacing`) ima ključnu ulogu jer određuje razliku grupnih brzina, odnosno brzinu nastanka walk-offa. Za manji razmak kanala, razlika grupnih brzina je manja, walk-off je slabiji, impulsi se duže preklapaju i XPM efekat je izraženiji. Suprotno tome, povećanjem razmaka kanala walk-off postaje izraženiji, preklapanje impulsa se smanjuje i efikasnost XPM interakcije opada. [1, 4] U tom smislu, doprinos XPM-a najčešće dominiraju najbliži susjedni kanali (nearest-neighbors), jer su upravo oni frekvencijski najbliži i imaju najveće vremensko preklapanje sa posmatranim kanalom. [1, 7]

Efekat smanjenja XPM-a sa porastom vremenskog razilaženja kanala (walk-off) ilustriran je na Slici 1.2.



Slika 1.2: Efikasnost XPM-a u funkciji apsolutne vrijednosti *walk-off* parametra: sa porastom *walk-off*-a smanjuje se vremensko preklapanje kanala i opada jačina XPM interakcije [1].

Navedena zavisnost vodi direktno do kompromisa između spektralne efikasnosti i performansi sistema: smanjenjem razmaka kanala povećava se spektralna efikasnost, ali se pojačava XPM preslušavanje i degradacija signala, dok se povećanjem razmaka XPM ublažava uz cijenu manjeg broja kanala u raspoloživom spektralnom opsegu. [3, 8]

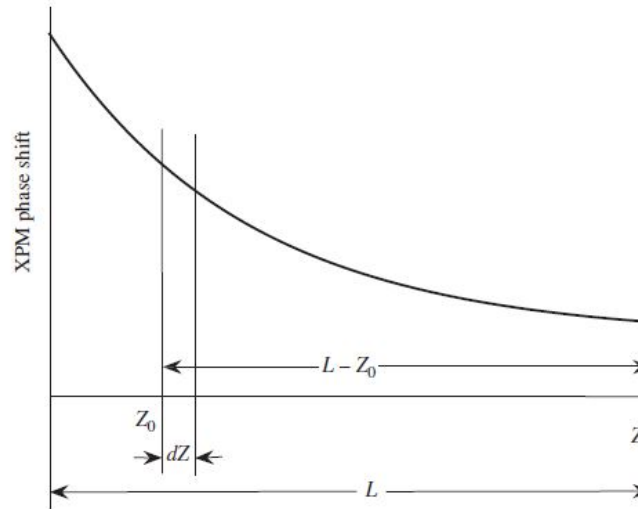
1.5 Mehanizam degradacije performansi i veza sa BER

U WDM sistemima XPM se primarno ispoljava kao vremenski promjenjiv fazni pomak na posmatranom kanalu, jer intenzitet susjednih kanala kroz Kerr-ovu nelinearnost moduliše indeks prelamanja i time fazu signala. [1, 4] Sam fazni pomak ne mora nužno dovesti do degradacije u idealno nedispersivnom slučaju, ali u realnom vlaknu sa hromatskom disperzijom dolazi do konverzije faznih fluktuacija u amplitudna izobličenja (*PM-to-AM conversion*). Intuitivno, XPM-indukovana faza uvodi trenutni chirp i dodatne frekvencijske komponente, a zbog disperzije te komponente putuju različitim grupnim brzinama, pa se na prijemu manifestuju kao promjene amplitude i deformacija impulsa. [1, 7]

Kao posljedica nastaju izobličenja oblika impulsa i povećanje intersimbolne interferencije (ISI), što dovodi do zatvaranja eye-diagrama i porasta vjerovatnoće pogrešne detekcije bita, odnosno povećanja BER-a. Eksperimentalni i simulacioni rezultati u literaturi potvrđuju da je BER usljed dinamičkog XPM-a snažno zavisao od ulazne snage po kanalu i razmaka između ka-

nala: porast snage povećava nelinearni fazni pomak, dok smanjenje *channel spacing*-a povećava vremensko preklapanje kanala (slabiji *walk-off*) i time efikasnost XPM interakcije. [3, 4, 5, 8]

Mehanizam konverzije faznih fluktuacija u amplitudna izobličenja (PM-to-AM) prikazan je na Slici 1.3.

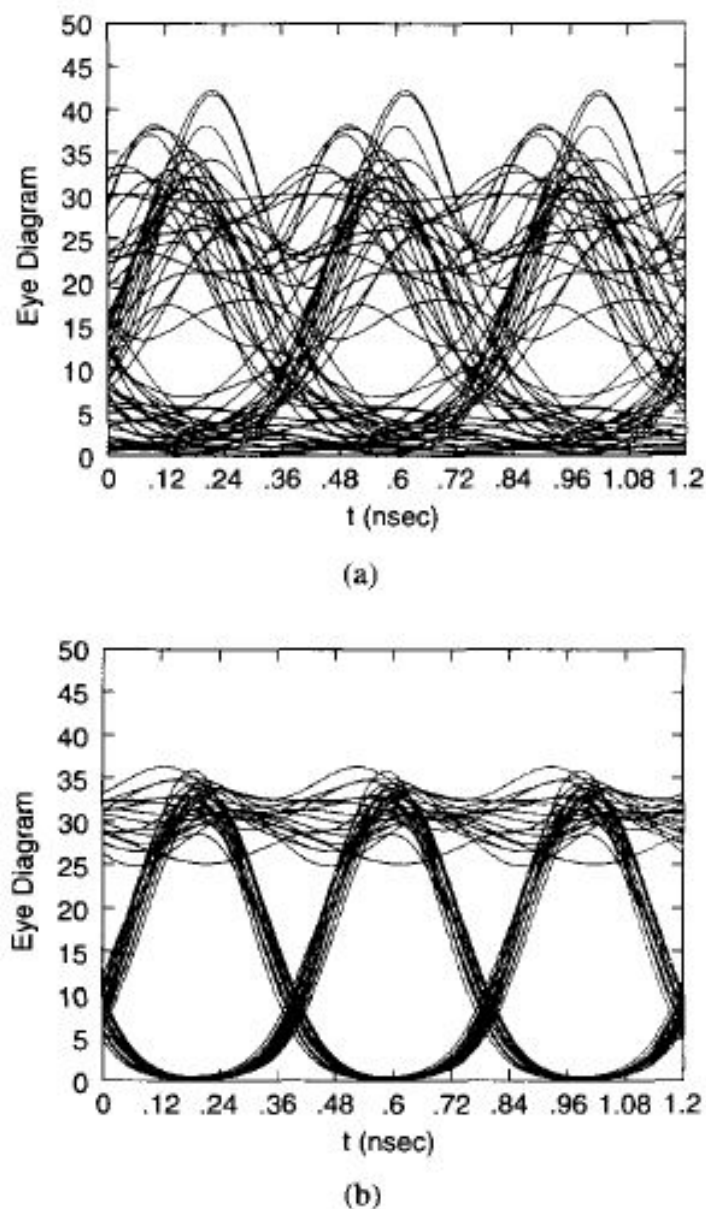


Slika 1.3: Konverzija XPM-indukovanog faznog pomaka u amplitudno izobličenje usljed hromatske disperzije (PM-to-AM conversion), što predstavlja direktan mehanizam degradacije performansi i porasta BER-a u WDM sistemima [1].

1.5.1 Dijagram oka kao pokazatelj degradacije signala

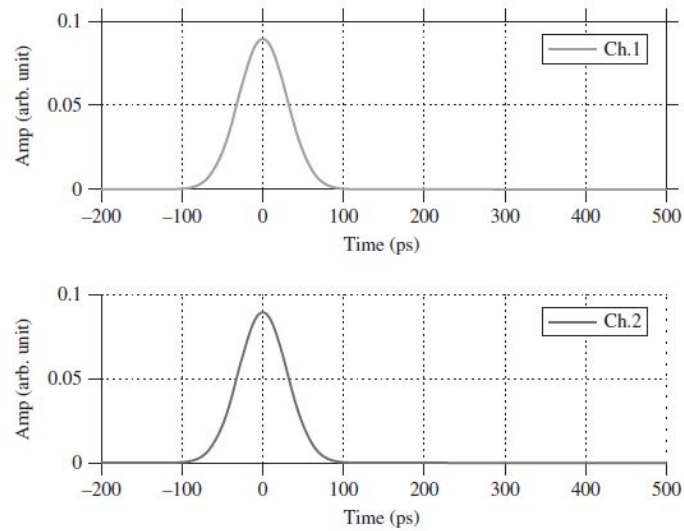
Dijagram oka (*eye-diagram*) predstavlja superpoziciju većeg broja uzastopnih simbola nakon prijemnog filtriranja i uzorkovanja, te se često koristi kao intuitivna mjera kvaliteta digitalnog prenosa. U idealnom slučaju, otvoreno „oko“ ukazuje na jasnu marginu odluke između logičkih nivoa, dok se zatvaranje oka povezuje sa degradacijom uzrokovanom šumom, jitterom i intersimbolnom interferencijom (ISI), što direktno povećava vjerovatnoću pogrešne odluke i BER [5].

U WDM sistemima sa Kerr-ovim nelinearnostima, XPM se dominantno manifestuje kao vremenski promjenjiv fazni pomak posmatranog kanala, dok u prisustvu hromatske disperzije dolazi do djelimične konverzije faznih fluktuacija u amplitudna izobličenja (*PM-to-AM conversion*). Posljedično se povećava ISI i smanjuje margina odluke, pa se degradacija performansi često vizuelno prepoznaje upravo kroz zatvaranje eye-diagrama. Zbog toga se u literaturi eye-diagram koristi kao komplementaran prikaz uz BER: pri većoj snazi po kanalu i/ili manjem razmaku kanala (slabiji *walk-off* i jača XPM interakcija) očekuje se izraženije zatvaranje oka i veći BER penalitet [1, 3, 4].

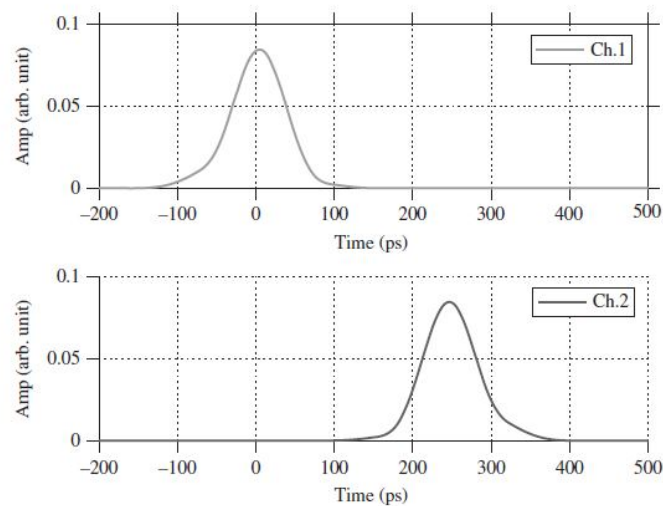


Slika 1.4: Eye-diagrami centralnog kanala u trokanalnom WDM sistemu za dvije vrijednosti razmaka kanala: (a) manji razmak kanala dovodi do izraženijeg zatvaranja oka usljed jače međukanalne nelinearne interakcije (XPM) i disperzije, dok (b) veći razmak kanala ublažava XPM utjecaj i povećava otvor oka [3].

Za intuitivnu ilustraciju dinamike XPM-a u prisustvu disperzije, najprije se mogu posmatrati ulazni impulsi dva kanala (Slika 1.5), a zatim njihovo vremensko razilaženje nakon propagacije kroz span (Slika 1.6).

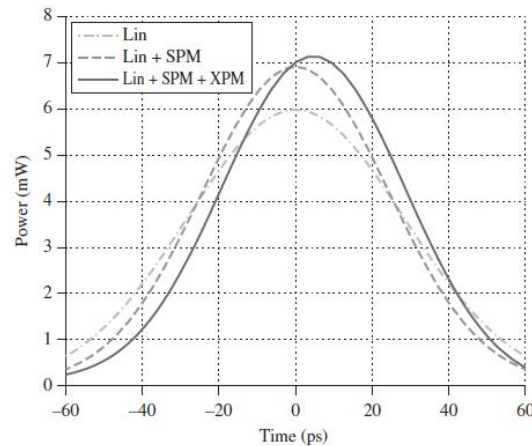


Slika 1.5: Ulazni signali dva WDM kanala korišteni za ilustraciju XPM efekta i nastanka vremenskog pomaka (*timing shift*) u prisustvu disperzije [1].



Slika 1.6: Razilaženje impulsa na kraju spana usljed disperzije (*walk-off*): impulsi različitih talasnih dužina se vremenski pomjeraju, čime se mijenja stepen njihovog preklapanja i efikasnost XPM-a [1].

Konačno, posljedice Kerr-ovih nelinearnosti na oblik impulsa (linearni slučaj naspram SPM i XPM) sumirano su prikazane na Slici 1.7.



Slika 1.7: Poređenje izlaznog impulsa za linearni slučaj i slučajeve sa SPM i XPM efektima, koje ilustrira izobličenja impulsa nastala usljed Kerr-ove nelinearnosti i interakcije kanala u WDM sistemu [1].

U skladu s tim, u implementacijskom dijelu projekta BER centralnog WDM kanala se koristi kao glavna mjera performansi, te se posmatra njegova promjena u funkciji ulazne snage po kanalu i parametra `wdmGridSpacing`. Ovakva analiza omogućava kvantitativno povezivanje teorijskih očekivanja o XPM mehanizmu sa rezultatima numeričke simulacije.

1.6 Numerička analiza: split-step Fourier metoda (SSFM)

Pošto NLSE u opštem slučaju nema jednostavno analitičko rješenje za realne signale i istovremeno prisustvo disperzije i Kerr-ove nelinearnosti, utjecaj XPM-a se najčešće procjenjuje numeričkom simulacijom. [1, 2] U ovom projektu koristi se metoda *split-step Fourier* (SSFM), koja predstavlja standardni pristup za rješavanje NLSE u optičkim komunikacionim sistemima.

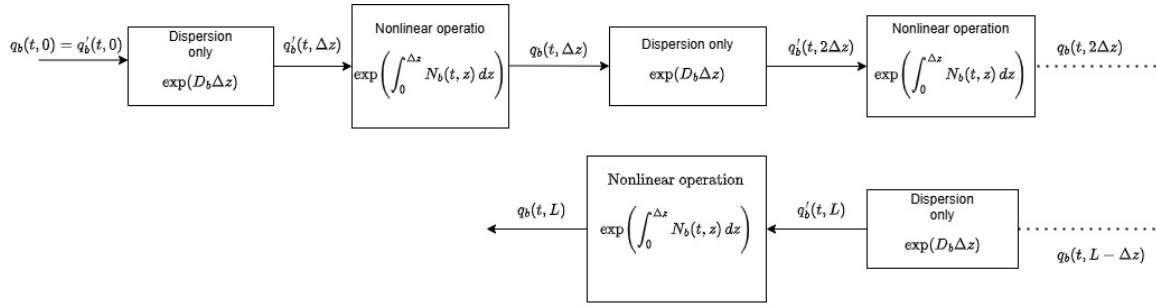
Osnovna ideja SSFM metode je da se propagacija kroz vlakno dužine L podijeli na veliki broj malih koraka Δz . U svakom koraku se odvojeno modeliraju:

- **linearni dio** propagacije (atenuacija i hromatska disperzija), koji se efikasno računa u frekvencijskom domenu,
- **nelinearni dio** propagacije (Kerr), koji se računa u vremenskom domenu kao dodatni fazni član proporcionalan trenutnoj snazi signala.

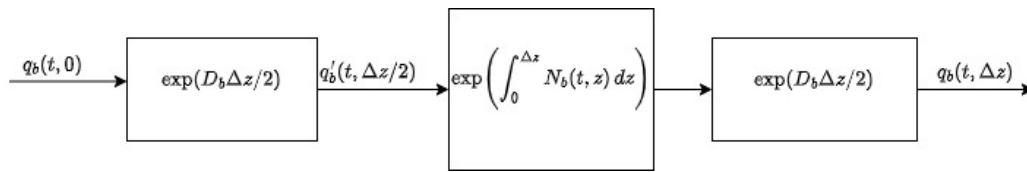
Nakon primjene ova dva operatora u svakom koraku (u odgovarajućem redoslijedu/šemi), dobija se izlazni signal na kraju vlakna. Tačnost SSFM metode raste sa smanjenjem koraka Δz , uz povećanje računске složenosti. [1]

SSFM je posebno pogodan za analizu XPM-a u WDM sistemima jer omogućava istovremenu propagaciju više kanala kroz isti nelinearni medij, pri čemu se XPM prirodno pojavljuje kao međusobna interakcija kanala kroz Kerr-ov nelinearni član. [1, 3]

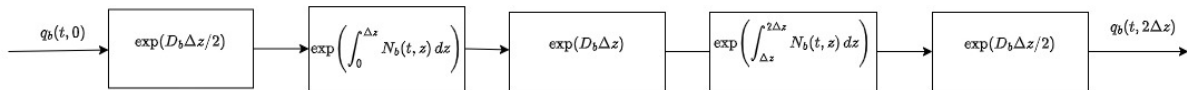
U praksi se često koriste različite SSFM šeme: nesimetrična (Slika 1.8) i simetrična (Slika 1.9), dok je algoritamski tok SSFM-a prikazan na Slici 1.10.



Slika 1.8: Nesimetrična (unsymmetric) *split-step Fourier* (SSFM) šema za numeričko rješavanje NLSE: linearni operator (disperzija/gubici) i nelinearni operator (Kerr) se primjenjuju odvojeno u svakom koraku propagacije [1].



Slika 1.9: Simetrična (symmetric) SSFM šema: linearni operator se primjenjuje u pola-koraka prije i poslije nelinearnog operatora, čime se postiže bolja numerička tačnost u odnosu na nesimetričnu šemu [1].



Slika 1.10: Algoritamski prikaz SSFM metode: propagacija kroz vlakno se dijeli na korake Δz , gdje se linearni dio računa u frekvencijskom domenu (FFT), a nelinearni dio u vremenskom domenu kao fazna rotacija proporcionalna trenutnoj snazi signala [1].

U implementacijskom dijelu projekta formiran je WDM signal sa više kanala, pri čemu se na prijemu posmatra centralni kanal. Simulacije se ponavljaju za različite vrijednosti ulazne snage po kanalu i razmaka između kanala (`wdmGridSpacing`), a za svaki slučaj se izračunava BER. Na taj način se numerički provjerava teorijski očekivani trend: porast ulazne snage povećava nelinearni fazni pomak i degradaciju, dok smanjenje razmaka kanala (slabiji *walk-off*) povećava efikasnost XPM interakcije i pogoršava performanse centralnog kanala. [4, 5, 8]

Poglavlje 2

Implementacija i rezultati simulacije

U ovom poglavlju prikazana je implementacija numeričke simulacije WDM prenosa kroz nelinearno optičko vlakno i analiza utjecaja Kerr-ove nelinearnosti (sa fokusom na XPM). Simulacija je realizovana u Python okruženju korištenjem biblioteke `OptiCommPy`, koja omogućava generisanje WDM signala, propagaciju kroz vlakno metodom split-step Fourier (SSFM) te osnovne DSP/analitičke alate za vizualizaciju i procjenu degradacije signala.

2.1 Korišteni alati i biblioteke

Implementacija simulacije realizovana je u Python okruženju (Google Colab), korištenjem biblioteke `OptiCommPy`. Biblioteka je instalirana direktno iz GitHub repozitorija (kloniranje i lokalna instalacija), čime se osigurava identična verzija paketa kao u korištenom Colab okruženju. Za numeričke proračune i vizualizaciju korištene su biblioteke `NumPy` i `Matplotlib`, dok se propagacija kroz optičko vlakno vrši funkcijom `manakovSSF` (Manakov Split-Step Fourier Method), uz pokušaj korištenja GPU implementacije kada je dostupna.

Program 2.1: Instalacija `OptiCommPy` (Colab) i inicijalizacija okruženja

```
1 if 'google.colab' in str(get_ipython()):
2     ! git clone -b main https://github.com/edsonportosilva/OptiCommPy
3     from os import chdir as cd
4     cd('/content/OptiCommPy/')
5     ! pip install .
6
7 import matplotlib.pyplot as plt
8 import numpy as np
9
10 from optic.dsp.core import pulseShape, firFilter, decimate,
    symbolSync, pnorm
11 from optic.models.devices import pdmCoherentReceiver, basicLaserModel
12
13 try:
14     from optic.models.modelsGPU import manakovSSF
15 except:
16     from optic.models.channels import manakovSSF
17
18 from optic.models.tx import simpleWDMTx
19 from optic.utils import parameters
```

```

20 from optic.dsp.equalization import edc, mimoAdaptEqualizer
21 from optic.dsp.carrierRecovery import cpr
22 from optic.comm.metrics import fastBERcalc, monteCarloGMI,
    monteCarloMI, calcEVM
23 from optic.plot import pconst, plotPSD
24
25 import scipy.constants as const
26
27 import logging as logg
28 logg.basicConfig(level=logg.INFO, format='%(message)s', force=True)
29 import time

```

2.2 Pomoćne funkcije: eye-diagram i ekstrakcija kanala

Kako bi se rezultati mogli analizirati na nivou posmatranog (centralnog) kanala, implementirane su pomoćne funkcije za: (i) crtanje eye-diagrama iz kompleksnog signala (superpozicija segmenata dužine 2 simbola), te (ii) ekstrakciju pojedinačnog WDM kanala iz kompozitnog WDM signala. Ekstrakcija se vrši frekvencijskim pomakom odabranog kanala na baznu oblast, nakon čega se primjenjuje niskopropusni Butterworth filter radi izdvajanja korisne širine opsega.

Program 2.2: Pomoćne funkcije: eye-diagram i ekstrakcija kanala

```

1 from scipy.signal import butter, filtfilt
2
3 def plot_eye(signal, SpS, span=30, nTraces=100, title="Eye diagram"):
4
5     samples_per_eye = 2 * SpS # eye width = 2 simbola
6     startInd = SpS * span # ignorisanje početnog transienta
7
8     plt.figure(figsize=(6,4))
9     for i in range(nTraces):
10         idx_start = startInd + i * SpS
11         idx_end = idx_start + samples_per_eye
12         if idx_end <= len(signal):
13             segment = signal[idx_start:idx_end]
14             plt.plot(segment.real, color='blue', alpha=0.2)
15
16     plt.title(title)
17     plt.xlim(0, samples_per_eye)
18     plt.xlabel("Sample")
19     plt.ylabel("Amplitude")
20     plt.grid(True)
21     plt.show()
22
23
24 def extract_channel(sigWDM, paramTx, paramCh, chIndex=None):
25     """
26     Ekstrahuje pojedina ni kanal iz WDM signala.
27
28     sigWDM : ndarray (N_samples, N_polarizations)
29     paramTx : sadr i wdmFreqGrid, nChannels, Rs, SpS

```

```

30 paramCh : sadr i Fc, Fs
31 chIndex : indeks kanala (ako None -> centralni)
32 """
33
34 if chIndex is None:
35     chIndex = int(np.floor(paramTx.nChannels / 2))
36
37 freqGrid = paramTx.wdmFreqGrid
38 channel_freq = freqGrid[chIndex]
39
40 Fs = paramCh.Fs
41 N = len(sigWDM)
42 nPol = sigWDM.shape[1]
43
44 t = np.arange(N) / Fs
45 shift = np.exp(-1j * 2 * np.pi * channel_freq * t)
46
47 sigShifted = np.zeros_like(sigWDM, dtype=complex)
48 for pol in range(nPol):
49     sigShifted[:, pol] = sigWDM[:, pol] * shift
50
51 bandwidth = paramTx.Rs * 1.2
52 cutoff_freq = bandwidth / 2
53 normalized_cutoff = cutoff_freq / (Fs / 2)
54
55 b, a = butter(5, normalized_cutoff, btype='low')
56
57 sigCh = np.zeros_like(sigWDM, dtype=complex)
58 for pol in range(nPol):
59     sigCh[:, pol].real = filtfilt(b, a, sigShifted[:, pol].real)
60     sigCh[:, pol].imag = filtfilt(b, a, sigShifted[:, pol].imag)
61
62 return sigCh, chIndex

```

2.3 Generisanje WDM predajnog signala (TX)

WDM predajni signal generiše se funkcijom `simpleWDMTx`. Parametri sistema definišu modulaciju (M), simbolnu brzinu (Rs), broj uzoraka po simbolu (SpS), pulsno oblikovanje (RRC), snagu po kanalu (`powerPerChannel`) te broj WDM kanala (`nChannels`). U eksperimentima su varirane vrijednosti `nChannels` i `powerPerChannel` (što odgovara rezultatima prikazanim u poglavlju rezultata), dok ostatak DSP lanca ostaje isti.

Program 2.3: Parametri predajnika i generisanje WDM signala

```

1 paramTx = parameters()
2 paramTx.M = 4 # u eksperimentima: 4 (QPSK) ili 16 (16-QAM)
3 paramTx.Rs = 32e9
4 paramTx.SpS = 16
5 paramTx.pulseType = 'rrc'
6 paramTx.nFilterTaps = 1024
7 paramTx.pulseRollOff = 0.01

```



```

8 paramTx.powerPerChannel = -2    # u eksperimentima se mijenja (npr.
   -5, -2, 2, 5 dBm)
9 paramTx.nChannels = 40          # u eksperimentima se mijenja (npr. k
   =3,5,11,21,...)
10 paramTx.Fc = 193.1e12
11 paramTx.laserLinewidth = 100e3
12 paramTx.wdmGridSpacing = 37.5e9
13 paramTx.nPolModes = 2
14 paramTx.nBits = int(np.log2(paramTx.M)*1e5)
15 paramTx.seed = 123
16
17 sigWDM_Tx, symbTx_, paramTx = simpleWDMTx(paramTx)

```

2.4 Model optičkog vlakna i propagacija (SSFM)

Propagacija kroz optičko vlakno modelirana je Manakov SSFM metodom preko funkcije `manakovSSF`. U skladu sa postavkom simulacije, dužina linka iznosi **700 km**, sa span dužinom **50 km**, atenuacijom $\alpha = 0.2$ dB/km, disperzijom $D = 16$ ps/nm/km i nelinearnim koeficijentom $\gamma = 1.3$ (W·km)⁻¹. Korak SSFM metode je $\Delta z = 0.5$ km, uz adaptivni pristup ograničenja maksimalne nelinearne fazne rotacije (`nlprMethod=True`).

Program 2.4: Parametri kanala i propagacija kroz vlakno (`manakovSSF`)

```

1 paramCh = parameters()
2 paramCh.Ltotal = 700
3 paramCh.Lspan = 50
4 paramCh.alpha = 0.2
5 paramCh.D = 16
6 paramCh.gamma = 1.3
7 paramCh.Fc = paramTx.Fc
8 paramCh.hz = 0.5
9 paramCh.maxIter = 5
10 paramCh.tol = 1e-5
11 paramCh.nlprMethod = True
12 paramCh.maxNlinPhaseRot = 2e-2
13 paramCh.prgsBar = True
14 paramCh.Fs = paramTx.Rs*paramTx.SpS
15 paramCh.seed = 456
16
17 sigWDM = manakovSSF(sigWDM_Tx, paramCh)

```

2.4.1 Verifikacija spektra (PSD)

Kao osnovna provjera formiranja WDM signala i promjena nakon propagacije, prikazuje se spektralna gustina snage (PSD) na predaji i prijemu.

Program 2.5: Prikaz PSD spektra na predaji i prijemu

```

1 Fs = paramCh.Fs
2 fig,_ = plotPSD(sigWDM_Tx, Fs, paramTx.Fc, label='Tx');
3 fig, ax = plotPSD(sigWDM, Fs, paramTx.Fc, fig=fig, label='Rx');

```

```

4 fig.set_figheight(3)
5 fig.set_figwidth(15)
6 ax.set_title('optical WDM spectrum');

```

2.5 Koherentni prijemnik i DSP obrada

Na prijemu je implementiran koherentni PDM prijemnik (`pdmCoherentReceiver`) sa lokalnim oscilatorom (LO) generisanim modelom `basicLaserModel`. Nakon opto-elektronske konverzije i dobijanja baznopojasnog kompleksnog signala, nad signalom se provodi standardni DSP lanac: matched filtering (RRC), decimacija na 2 uzorka/simbol, kompenzacija hromatske disperzije (EDC), simbolna sinhronizacija, adaptivna MIMO ekvalizacija i carrier phase recovery (CPR). Kanal koji se demoduliše je centralni kanal WDM spektra.

Program 2.6: Koherentni prijemnik: LO + front-end + PD, izbor centralnog kanala

```

1 chIndex = int(np.floor(paramTx.nChannels/2))
2 freqGrid = paramTx.wdmFreqGrid
3 symbTx = symbTx[:, :, chIndex]
4
5 print('Demodulating channel #%d , fc: %.4f THz,      : %.4f nm\n'\
6       %(chIndex, (paramCh.Fc + freqGrid[chIndex])/1e12,
7               const.c/(paramCh.Fc + freqGrid[chIndex])/1e-9))
8
9 FO = -128e6
10 paramLO = parameters()
11 paramLO.P = 10
12 paramLO.lw = 100e3
13 paramLO.RIN_var = 0
14 paramLO.Ns = len(sigWDM)
15 paramLO.Fs = Fs
16 paramLO.seed = 789
17 paramLO.freqShift = freqGrid[chIndex] + FO
18
19 sigLO = basicLaserModel(paramLO)
20
21 print('Local oscillator P: %.2f dBm, lw: %.2f kHz, FO: %.2f MHz\n'\
22       %(paramLO.P, paramLO.lw/1e3, FO/1e6))
23
24 paramFE = parameters()
25 paramFE.Fs = Fs
26 paramFE.polRotation = np.pi/3
27 paramFE.pdl = 0
28 paramFE.polDelay = 4e-12
29 paramFE.phaseImbX = 0*np.pi/180
30 paramFE.phaseImbY = 0*np.pi/180
31 paramFE.ampImbX = 0
32 paramFE.ampImbY = 0
33
34 paramPD = parameters()
35 paramPD.B = paramTx.Rs
36 paramPD.Fs = Fs

```

```
37 paramPD.ideal = True
38 paramPD.seed = 1011
39
40 sigRx = pdmCoherentReceiver(sigWDM, sigLO, paramFE, paramPD)
41
42 pconst(sigRx[0::paramTx.SpS,:], R=3);
```

Program 2.7: DSP lanac: matched filter, decimacija, EDC, sinhronizacija, ekvalizacija i CPR

```
1 # Matched filtering
2 paramPS = parameters()
3 paramPS.SpS = paramTx.SpS
4 paramPS.nFilterTaps = paramTx.nFilterTaps
5 paramPS.rolloff = paramTx.pulseRolloff
6 paramPS.pulseType = paramTx.pulseType
7 pulse = pulseShape(paramPS)
8
9 sigRx = firFilter(pulse, sigRx)
10 pconst(sigRx[0::paramTx.SpS,:], R=3)
11
12 # Decimation
13 paramDec = parameters()
14 paramDec.SpSin = paramTx.SpS
15 paramDec.SpSout = 2
16 sigRx = decimate(sigRx, paramDec)
17
18 # CD compensation
19 paramEDC = parameters()
20 paramEDC.L = paramCh.Ltotal
21 paramEDC.D = paramCh.D
22 paramEDC.Fc = paramCh.Fc
23 paramEDC.Rs = paramTx.Rs
24 paramEDC.Fs = 2*paramTx.Rs
25
26 sigRx = edc(sigRx, paramEDC)
27 pconst(sigRx[0::paramTx.SpS,:], R=3)
28
29 # Symbol synchronization and normalization
30 symbRx = symbolSync(sigRx, symbTx, 2)
31 x = pnorm(sigRx)
32 d = pnorm(symbTx)
33
34 # Adaptive equalization
35 paramEq = parameters()
36 paramEq.nTaps = 35
37 paramEq.SpS = paramDec.SpSout
38 paramEq.numIter = 2
39 paramEq.storeCoeff = False
40 paramEq.M = paramTx.M
41 paramEq.shapingFactor = paramTx.shapingFactor
42 paramEq.L = [int(0.2*d.shape[0]), int(0.8*d.shape[0])]
43 paramEq.prgsBar = False
```

```

44
45 if paramTx.M == 4:
46     paramEq.alg = ['cma', 'cma']
47     paramEq.mu = [5e-3, 1e-3]
48 else:
49     paramEq.alg = ['da-rde', 'rde']
50     paramEq.mu = [5e-3, 5e-4]
51
52 y_EQ = mimoAdaptEqualizer(x, paramEq, d)
53 discard = 5000
54 pconst(y_EQ[discard:-discard, :], R=1.5)
55
56 # Carrier phase recovery
57 paramCPR = parameters()
58 paramCPR.alg = 'bps'
59 paramCPR.M = paramTx.M
60 paramCPR.constType = paramTx.constType
61 paramCPR.shapingFactor = paramTx.shapingFactor
62 paramCPR.N = 25
63 paramCPR.B = 64
64 paramCPR.returnPhases = False
65 paramCPR.Ts = 1/paramTx.Rs
66
67 y_CPR = cpr(y_EQ, paramCPR)
68 pconst(y_CPR[discard:-discard, :])

```

2.6 Metrike kvaliteta i priprema signala za rezultate

Kvalitet prijema kvantifikovan je metrikama: SER/BER/SNR, EVM, MI/GMI/NGMI. Metrike se računaju nad centralnim kanalom nakon ekvalizacije i CPR-a, uz odbacivanje početnog i završnog dijela sekvence (`discard`) radi izbjegavanja tranzijenata.

Također, u okviru pripreme rezultata generiše se PSD (TX vs RX), te se vrši ekstrakcija centralnog kanala (`extract_channel`) radi crtanja eye-diagrama nakon izdvajanja kanala. Eye-diagram se prikazuje za: (i) predajni kanal, (ii) prijemni kanal prije DSP-a (nakon izolacije), te (iii) signal nakon kompletne DSP obrade (`y_CPR`).

Program 2.8: Račun metrika + ekstrakcija kanala i generisanje eye-diagrama

```

1 ind = np.arange(discard, d.shape[0]-discard)
2
3 if paramTx.M == 4:
4     d = symbTx
5     rot0 = [np.mean(pnorm(symbTx[ind,0])/pnorm(y_CPR[ind,0])),
6             np.mean(pnorm(symbTx[ind,1])/pnorm(y_CPR[ind,0]))]
7     rot1 = [np.mean(pnorm(symbTx[ind,1])/pnorm(y_CPR[ind,1])),
8             np.mean(pnorm(symbTx[ind,0])/pnorm(y_CPR[ind,1]))]
9
10    if np.argmax(np.abs(rot0)) == 1 and np.argmax(np.abs(rot1)) == 1:
11        y_CPR_ = y_CPR.copy()
12        y_CPR[:,0] = pnorm(rot1[np.argmax(np.abs(rot1))]*y_CPR_[:,1])

```

```

13     y_CPR[:,1] = pnorm(rot0[np.argmax(np.abs(rot0))]*y_CPR[:,0])
14 else:
15     y_CPR[:,0] = pnorm(rot0[np.argmax(np.abs(rot0))]*y_CPR[:,0])
16     y_CPR[:,1] = pnorm(rot1[np.argmax(np.abs(rot1))]*y_CPR[:,1])
17
18 BER, SER, SNR = fastBERcalc(y_CPR[ind,:], d[ind:], paramTx.M, 'qam',
    px=paramTx.pmf)
19 GMI, NGMI = monteCarloGMI(y_CPR[ind:], d[ind:], paramTx.M, 'qam',
    px=paramTx.pmf)
20 MI = monteCarloMI(y_CPR[ind:], d[ind:], paramTx.M, 'qam', px=
    paramTx.pmf)
21 EVM = calcEVM(y_CPR[ind:], paramTx.M, 'qam', d[ind:])
22
23 print('      pol.X      pol.Y      ')
24 print(' SER: %.2e,  %.2e'%(SER[0], SER[1]))
25 print(' BER: %.2e,  %.2e'%(BER[0], BER[1]))
26 print(' SNR: %.2f dB,  %.2f dB'%(SNR[0], SNR[1]))
27 print(' EVM: %.2f %,    %.2f %'%(EVM[0]*100, EVM[1]*100))
28 print('  MI: %.2f bits, %.2f bits'%(MI[0], MI[1]))
29 print('  GMI: %.2f bits, %.2f bits'%(GMI[0], GMI[1]))
30 print(' NGMI: %.2f,    %.2f'%(NGMI[0], NGMI[1]))
31
32 # PSD (opcionalno ponovo, radi spremanja figure)
33 Fs = paramCh.Fs
34 fig,_ = plotPSD(sigWDM_Tx, Fs, paramTx.Fc, label='Tx');
35 fig, ax = plotPSD(sigWDM, Fs, paramTx.Fc, fig=fig, label='Rx');
36 fig.set_figheight(3)
37 fig.set_figwidth(10)
38 ax.set_title('optical WDM spectrum');
39
40 # Ekstrakcija centralnog kanala + eye
41 sigTx_ch, chIdx = extract_channel(sigWDM_Tx, paramTx, paramCh)
42 sigRx_ch, _ = extract_channel(sigWDM, paramTx, paramCh, chIndex=chIdx
    )
43
44 eye_tx = sigTx_ch[:, 0]
45 eye_rx = sigRx_ch[:, 0]
46 eye_end = y_CPR[:, 0]
47
48 plot_eye(eye_tx, paramTx.SpS, title="TX Eye Dijagram (centralni kanal
    )")
49 plot_eye(eye_rx, paramTx.SpS, title="RX Eye Dijagram (centralni kanal
    )")
50 plot_eye(eye_end, 2, title="Eye Dijagram nakon ekstrakcije(centralni
    kanal)")

```

2.7 Rezultati simulacije

U nastavku se prikazuju rezultati simulacije za optički WDM sistem na dužini linka $L = 700$ km. Rezultati su organizovani kroz sljedeće ključne prikaze: (1) optički WDM spektar na predaji

i prijemu, (2) konstelacijski dijagram (RX), (3) fazna analiza (TX vs RX) na nivou kompozitnog WDM optičkog polja, (4) eye-diagrami na nivou izolovanog centralnog kanala nakon ekstrakcije i osnovne DSP obrade, (5) BER analiza u funkciji broja kanala i snage po kanalu, (6) histogram fazne razlike (RX–TX) kao indikator faznih fluktuacija.

2.7.1 Optički WDM spektar (TX vs RX)

Spektralna analiza je prvi korak u evaluaciji propagacije kroz nelinearno optičko vlakno. Prikaz spektralne gustine snage (PSD) omogućava provjeru pravilnog formiranja WDM spektra na predaji, kao i uočavanje promjena nakon propagacije. U višekanalnom sistemu, razlike između TX i RX spektra mogu ukazivati na prisustvo Kerr-ovih nelinearnih efekata: SPM (samofazna modulacija) i XPM (međukanalna fazna modulacija).

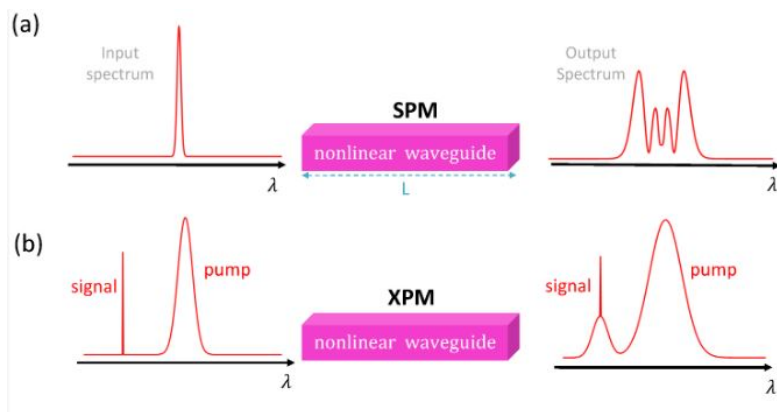
U ovoj podsekciji prikazani su PSD spektri predajnog (TX) i prijemnog (RX) signala za različite konfiguracije broja WDM kanala i snage po kanalu, pri fiksnoj dužini linka od 700 km.

Program 2.9: Prikaz spektralne gustine snage (PSD) na predaji i prijemu

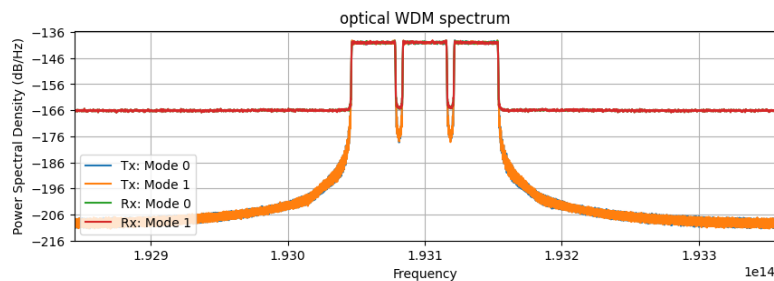
```

1 Fs = paramCh.Fs
2 fig,_ = plotPSD(sigWDM_Tx, Fs, paramTx.Fc, label='Tx')
3 fig, ax = plotPSD(sigWDM, Fs, paramTx.Fc, fig=fig, label='Rx')
4 fig.set_figheight(3)
5 fig.set_figwidth(15)
6 ax.set_title('Optical WDM spectrum (TX vs RX)')

```



(a) Teorijski prikaz spektralnih posljedica Kerr-ovih efekata (SPM i XPM).



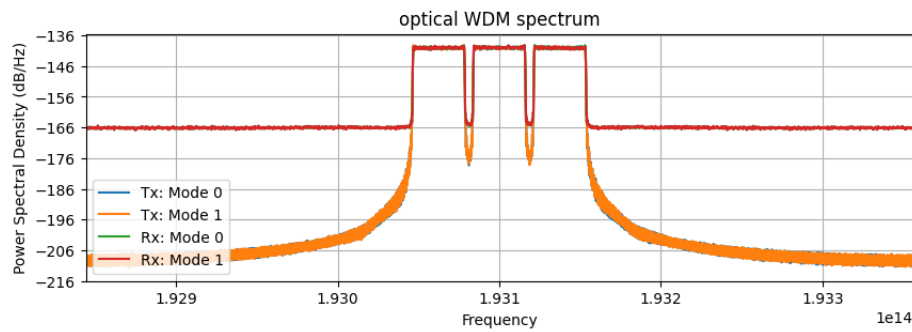
(b) Simulacija: PSD na predaji (TX) i prijemu (RX) za $k = 3$, $P_{ch} = -2$ dBm i $L = 700$ km.

Slika 2.1: Kvalitativno poređenje spektralnih promjena: teorijski koncept (gore) i rezultat simulacije (dolje).

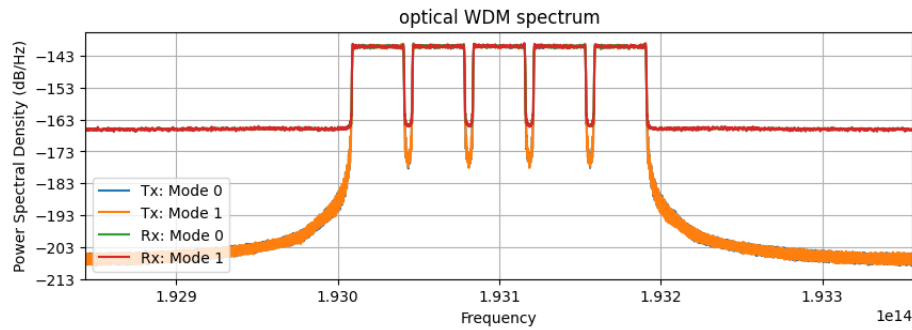
Slika 2.1 prikazuje kvalitativnu vezu između teorijskog očekivanja i simulacijskog rezultata: u teoriji SPM dovodi do spektralnog širenja kanala, dok XPM u višekanalnom slučaju dodatno utiče kroz međukanalnu interakciju. U simulacijskom rezultatu uočljiva razlika između TX i RX PSD krivih potvrđuje da propagacija kroz vlakno uvodi mjerljive promjene spektra.

Utjecaj broja WDM kanala na spektar

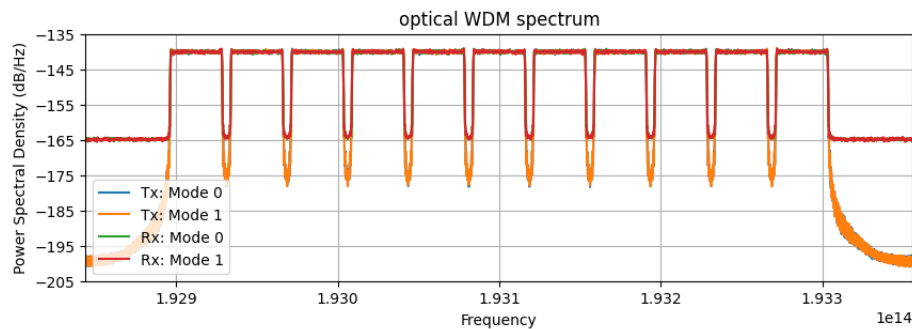
Na slici 2.2 prikazani su PSD spektri za različit broj WDM kanala pri fiksnoj snazi po kanalu ($P_{ch} = -2$ dBm). Povećanjem broja kanala jača međukanalna interakcija, te razlika između TX i RX spektra postaje izraženija nakon propagacije kroz 700 km.



(a) $k = 3$, $P_{ch} = -2$ dBm (700 km).



(b) $k = 5$, $P_{ch} = -2$ dBm (700 km).

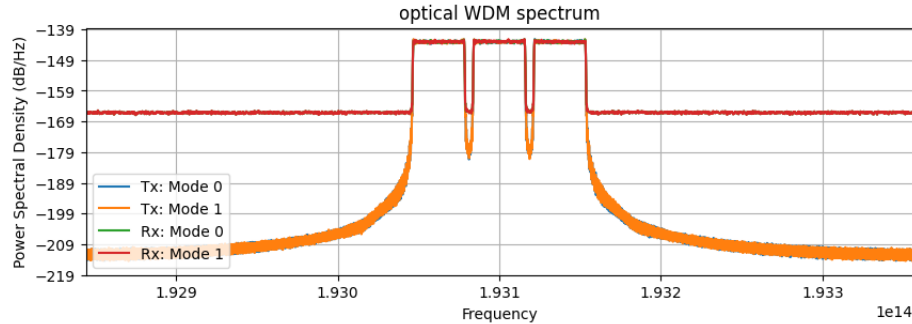


(c) $k = 11$, $P_{ch} = -2$ dBm (700 km).

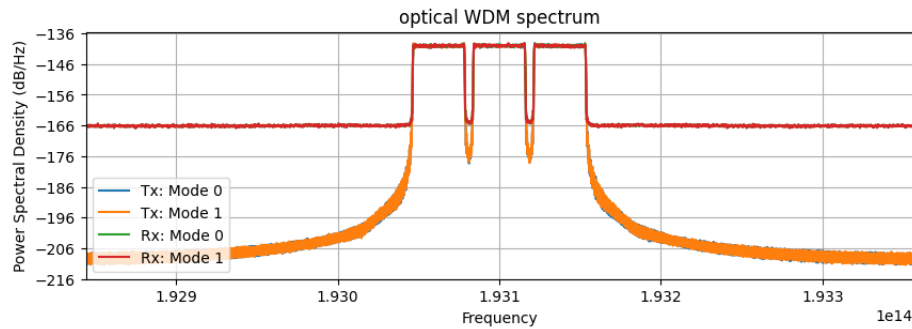
Slika 2.2: PSD spektri na predaji (TX) i prijemu (RX) za različit broj WDM kanala pri fiksnoj snazi po kanalu. Porast broja kanala pojačava međukanalnu interakciju (XPM), što se manifestuje kao izraženija razlika TX/RX nakon 700 km.

Utjecaj snage po kanalu na spektar

Snaga po kanalu direktno utiče na jačinu Kerr-ove nelinearnosti. Na slici 2.3 prikazani su PSD spektri za $k = 3$ pri različitim vrijednostima snage po kanalu. Uočava se da veća snaga dovodi do izraženijih promjena RX spektra u odnosu na TX.



(a) $k = 3$, $P_{ch} = -5$ dBm (700 km).



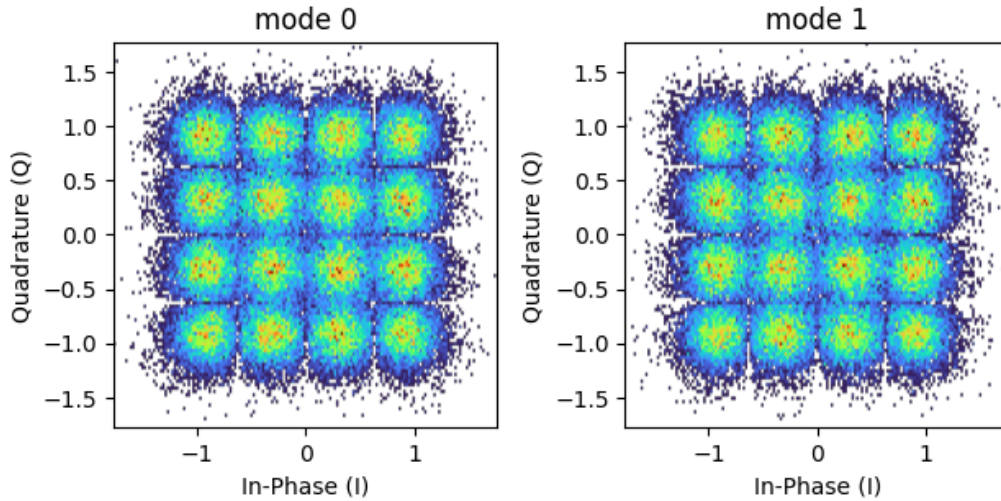
(b) $k = 3$, $P_{ch} = -2$ dBm (700 km).

Slika 2.3: PSD spektri (TX vs RX) za različite vrijednosti snage po kanalu pri fiksnom broju kanala ($k = 3$). Povećanjem snage jačaju Kerr-ovi efekti, pa razlika TX/RX postaje izraženija nakon 700 km.

Uočenim spektralnim promjenama doprinosi Kerr-ov efekt; u višekanalnom WDM sistemu pored SPM-a značajan je i XPM doprinos. Iako XPM primarno utiče na fazu posmatranog kanala, u prisustvu hromatske disperzije dio faznih fluktuacija prelazi u vremensko/amplitudno izobličenje (PM-to-AM), što se kasnije jasno reflektuje kroz eye-diagrame i BER.

2.7.2 Konstelacijski dijagrami (RX)

Konstelacijski dijagram pruža direktan vizuelni indikator degradacije signala u koherentnim optičkim sistemima. U idealnom slučaju simboli formiraju jasno odvojene klastere, dok nelinearni efekti, disperzija i šum dovode do širenja klastera i povećanja EVM/BER.



Slika 2.4: Konstelacijski dijagram na prijemu za $k = 3$ WDM kanala pri $P_{\text{ch}} = +5$ dBm i $L = 700$ km (prikaz obje polarizacije). Širenje klastera ukazuje na degradaciju usljed propagacije kroz nelinearno vlakno (dominantno XPM u višekanalnom okruženju, uz doprinos SPM).

2.7.3 Fazna analiza nelinearne degradacije

Poređenje faze (TX vs RX)

U višekanalnim WDM sistemima dominantni nelinearni mehanizam degradacije faze je međukanalna fazna modulacija (XPM). Za razliku od samofazne modulacije (SPM), koja zavisi isključivo od sopstvene snage kanala, XPM nastaje usljed intenzitetskih fluktuacija susjednih kanala i dovodi do dodatnog, vremenski promjenljivog faznog pomaka posmatranog kanala. Ove fazne fluktuacije se akumuliraju tokom propagacije kroz optičko vlakno i predstavljaju jedan od ključnih ograničavajućih faktora u koherentnim WDM sistemima velikog dometa.

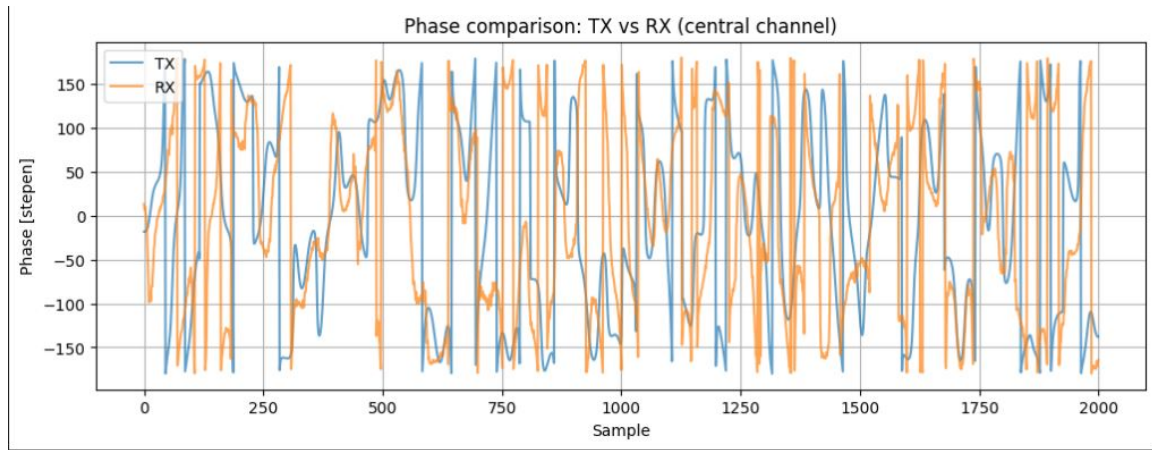
U ovoj podsekciji analizirana je faza kompleksnog **kompozitnog WDM optičkog polja** na predaji (TX) i prijemu (RX), za odabranu polarizaciju. Faza signala izračunata je kao argument kompleksne amplitude optičkog polja, te je prikazana za ograničen broj uzoraka kako bi se omogućilo direktno poređenje faznog ponašanja prije i nakon propagacije kroz vlakno dužine 700 km.

Program 2.10: Računanje faze TX i RX signala i poređenje

```

1 pol = 0
2 victim_rx = sigWDM[:, pol]
3 victim_tx = sigWDM_Tx[:, pol]
4
5 phi_tx = np.angle(victim_tx) * 180 / np.pi
6 phi_rx = np.angle(victim_rx) * 180 / np.pi

```



Slika 2.5: Poređenje faze kompozitnog WDM optičkog polja na predaji (TX) i prijemu (RX) za odabranu polarizaciju, pri $L = 700$ km. Razlika između krivih predstavlja nelinearni fazni pomak akumuliran tokom propagacije, pri čemu u višekanalnom WDM sistemu značajan doprinos potiče od XPM interakcije sa susjednim kanalima.

Na slici 2.5 uočava se da faza prijemnog signala pokazuje znatno izraženije fluktuacije u odnosu na predajni signal. Ova razlika predstavlja nelinearni fazni pomak uveden tokom propagacije kroz optičko vlakno usljed Kerr-ove nelinearnosti. Budući da je simulacija realizovana u višekanalnom WDM okruženju, fazne fluktuacije na prijemu uključuju kombinovani doprinos SPM-a i XPM-a, pri čemu XPM tipično dominira zbog interakcije sa susjednim kanalima.

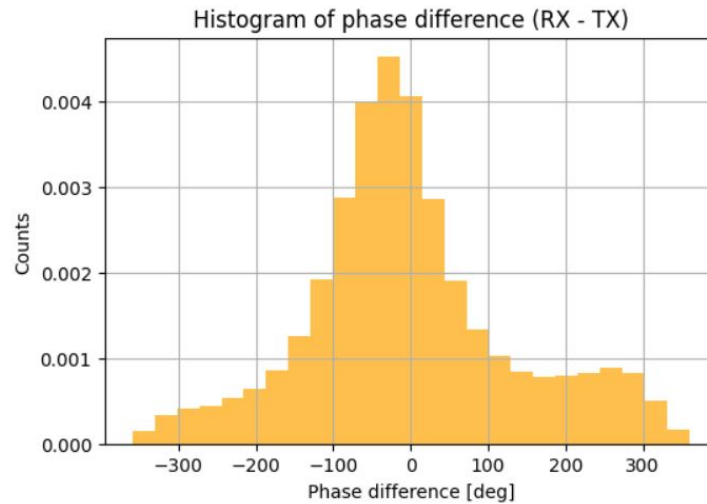
Važno je naglasiti da se ovdje posmatra faza ukupnog optičkog polja, prije selekcije pojedinačnog kanala i prije napredne DSP obrade. Ova analiza stoga ima za cilj da ilustruje *fizičko porijeklo* nelinearne degradacije faze u vlaknu. U prisustvu hromatske disperzije, ovakve fazne fluktuacije se djelimično mogu konvertovati u amplitudna i vremenska izobličenja (*PM-to-AM conversion*), što doprinosi zatvaranju eye-diagrama i pogoršanju BER performansi.

Histogram fazne razlike $\Delta\phi$ (RX–TX)

Kako bi se fazna degradacija opisala kvantitativnije, izračunata je fazna razlika $\Delta\phi = \phi_{RX} - \phi_{TX}$ i prikazan njen histogram. Širina raspodjele predstavlja indikator jačine faznih fluktuacija: veća varijansa znači izraženiji nelinearni fazni šum i jači utjecaj Kerr-ove nelinearnosti (u višekanalnom slučaju dominantno XPM doprinos).

Program 2.11: Histogram fazne razlike RX–TX

```
1 delta_phi_deg = (phi_rx - phi_tx)
2
3 plt.figure(figsize=(6,4))
4 plt.hist(delta_phi_deg, bins=25, alpha=0.7, density=True)
5 plt.title("Histogram of phase difference (RX - TX)")
6 plt.xlabel("Phase difference [deg]")
7 plt.ylabel("Density")
8 plt.grid(True)
9 plt.show()
```



Slika 2.6: Histogram fazne razlike $\Delta\phi = \phi_{RX} - \phi_{TX}$ za kompozitno WDM optičko polje (odabrana polarizacija), pri $L = 700$ km. Širina raspodjele predstavlja mjeru faznih fluktuacija uvedenih propagacijom kroz nelinearno vlakno; veća fazna varijansa je konzistentna sa jačim Kerr-ovim utjecajem i XPM preslušavanjem u višekanalnom slučaju.

U nastavku rada fokus se prebacuje na izolovani centralni WDM kanal nakon frekvencijske ekstrakcije i DSP obrade, gdje se posljedice ovih faznih fluktuacija dalje procjenjuju kroz eye-diagrame i BER metrike.

2.7.4 Eye-diagram analiza (izolovani centralni kanal nakon ekstrakcije i DSP)

Eye-diagram predstavlja superpoziciju velikog broja uzastopnih simbola i omogućava direktan uvid u kvalitet prijema kroz otvor oka, ISI i jitter. U ovom radu eye-diagrami su posmatrani na **centralnom WDM kanalu nakon ekstrakcije i osnovne DSP obrade** (signal tipa `rx_end` u rezultatima), pri fiksnoj dužini linka $L = 700$ km i fiksnom broju kanala $k = 3$, uz variranje snage po kanalu.

Kod za ekstrakciju kanala i generisanje eye-diagrama

U nastavku je dat kod korišten za generisanje eye-diagrama: definisana je funkcija `plot_eye`, te ekstrakcija centralnog kanala iz kompozitnog WDM signala (`extract_channel`). U ekstrakciji se primjenjuje frekvencijski pomak odabranog kanala na baznu oblast, te niskopropusno filtriranje (Butterworth), pri čemu se filtriranje vrši odvojeno nad realnom i imaginarnom komponentom.

Program 2.12: Ekstrakcija centralnog kanala i eye-diagram (korišteni kod)

```
1 from scipy.signal import butter, filtfilt
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 def plot_eye(signal, SpS, span=30, nTraces=100, title="Eye diagram"):
6     samples_per_eye = 2 * SpS
7     startInd = SpS * span
8
```

```

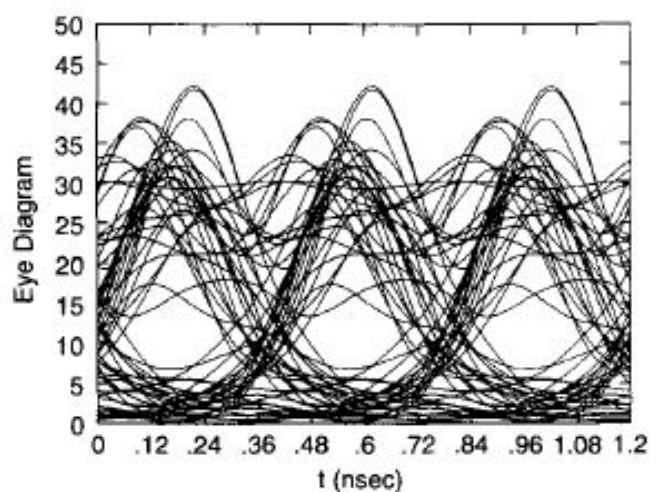
9     plt.figure(figsize=(6,4))
10    for i in range(nTraces):
11        idx_start = startInd + i * SpS
12        idx_end   = idx_start + samples_per_eye
13        if idx_end <= len(signal):
14            segment = signal[idx_start:idx_end]
15            plt.plot(segment.real, alpha=0.2)
16
17    plt.title(title)
18    plt.xlim(0, samples_per_eye)
19    plt.xlabel("Sample")
20    plt.ylabel("Amplitude")
21    plt.grid(True)
22    plt.show()
23
24    def extract_channel(sigWDM, paramTx, paramCh, chIndex=None):
25        if chIndex is None:
26            chIndex = int(np.floor(paramTx.nChannels / 2))
27
28        freqGrid = paramTx.wdmFreqGrid
29        channel_freq = freqGrid[chIndex]
30
31        Fs = paramCh.Fs
32        N = len(sigWDM)
33        nPol = sigWDM.shape[1]
34
35        t = np.arange(N) / Fs
36        shift = np.exp(-1j * 2 * np.pi * channel_freq * t)
37
38        sigShifted = np.zeros_like(sigWDM, dtype=complex)
39        for pol in range(nPol):
40            sigShifted[:, pol] = sigWDM[:, pol] * shift
41
42        bandwidth = paramTx.Rs * 1.2
43        cutoff_freq = bandwidth / 2
44        normalized_cutoff = cutoff_freq / (Fs / 2)
45
46        b, a = butter(5, normalized_cutoff, btype='low')
47
48        sigCh = np.zeros_like(sigWDM, dtype=complex)
49        for pol in range(nPol):
50            sigCh[:, pol].real = filtfilt(b, a, sigShifted[:, pol].real)
51            sigCh[:, pol].imag = filtfilt(b, a, sigShifted[:, pol].imag)
52
53        return sigCh, chIndex
54
55    # Centralni kanal (RX) nakon propagacije:
56    sigRx_ch, chIdx = extract_channel(sigWDM, paramTx, paramCh)
57
58    # Eye prikaz (prva polarizacija)      nakon ekstrakcije:
59    plot_eye(sigRx_ch[:,0], paramTx.SpS, title="Eye dijagram (centralni

```

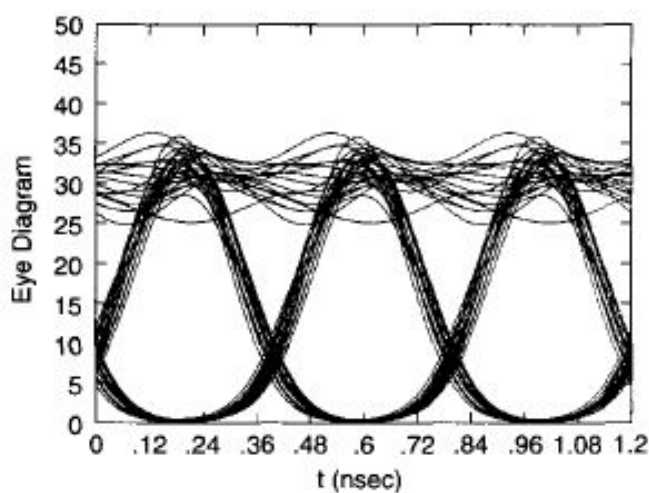
```
kanal, nakon ekstrakcije) ")
```

Teorijski prikaz degradacije eye-diagrama i poređenje sa simulacijom

U teorijskom dijelu rada prikazan je utjecaj međukanalne nelinearne interakcije (XPM) na eye-diagram u WDM sistemima. XPM uvodi dodatne fazne fluktuacije posmatranom kanalu, koje se u prisustvu hromatske disperzije djelimično konvertuju u amplitudna i vremenska izobličenja (PM-to-AM), što se manifestuje kroz zatvaranje eye-diagrama i povećanje ISI. Radi preglednosti, teorijski referentni primjer i simulacijski rezultati prikazani su u odvojenim figurama, pri čemu je poređenje isključivo kvalitativno (trend), a ne direktno po amplitudi ili vremenskoj skali.

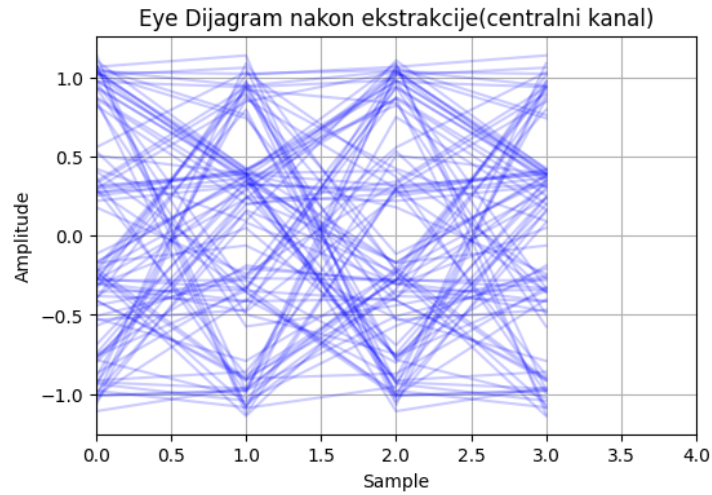


(a)

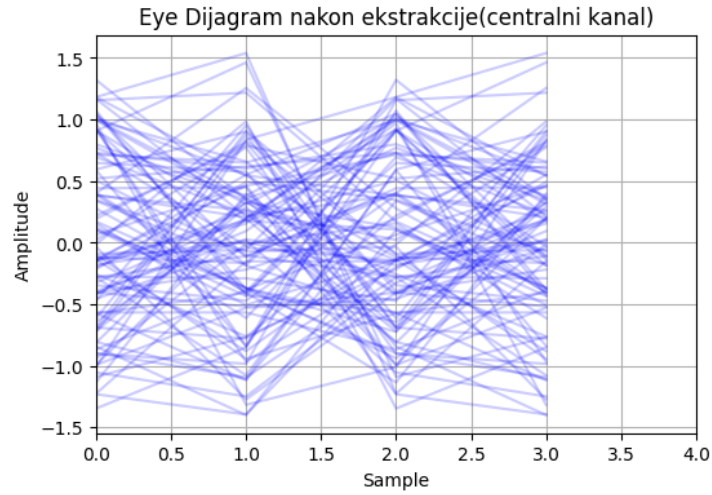


(b)

Slika 2.7: Teorija: referentni primjer degradacije eye-diagrama u WDM sistemu usljed XPM-a. Smanjenje otvora oka ilustruje trend pogoršanja pri jačoj međukanalnoj interakciji.



(a) Simulacija: otvorenije oko pri $P_{ch} = -5$ dBm ($k = 3, L = 700$ km).



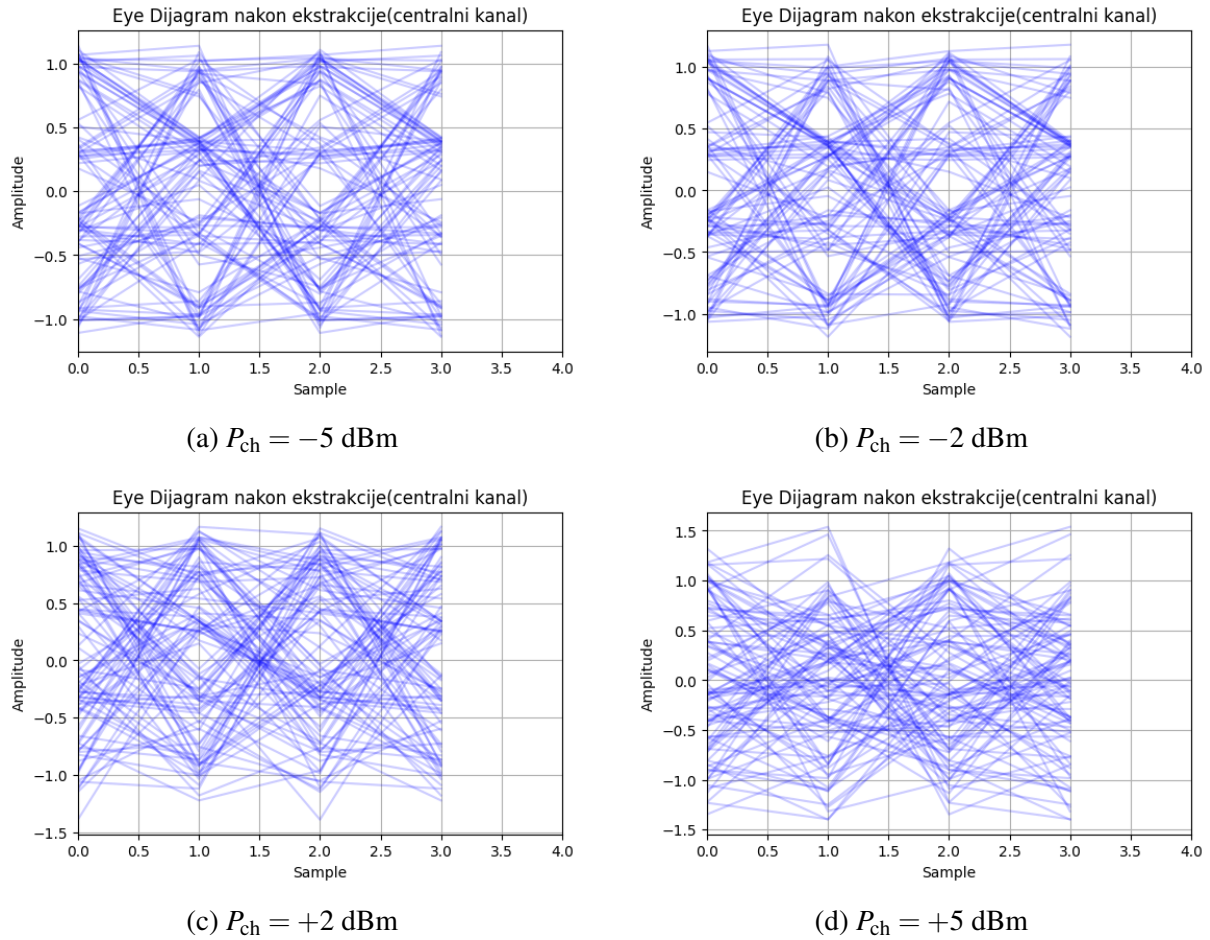
(b) Simulacija: zatvaranje oka pri $P_{ch} = +5$ dBm ($k = 3, L = 700$ km).

Slika 2.8: Simulacija: eye-diagram centralnog kanala nakon ekstrakcije i osnovne DSP obrade za dvije vrijednosti snage po kanalu ($k = 3, L = 700$ km). Poređenje ilustruje trend zatvaranja oka pri većoj launch snazi, u skladu sa teorijskim očekivanjima (Slika 2.7).

Na osnovu vizuelnog poređenja Slike 2.7 i Slike 2.8 može se zaključiti da simulacijski rezultati slijede isti kvalitativni trend kao teorijski prikaz: porast nelinearne interakcije (usljed veće snage po kanalu) dovodi do progresivnog zatvaranja eye-diagrama i povećanja rasipanja signala u vremenskoj domeni.

Utjecaj snage po kanalu na eye-diagram (simulacija)

Na slici 2.9 prikazani su eye-diagrami centralnog kanala nakon ekstrakcije i osnovne DSP obrade za 16-QAM modulaciju, pri $k = 3$ i $L = 700$ km, za različite vrijednosti snage po kanalu.



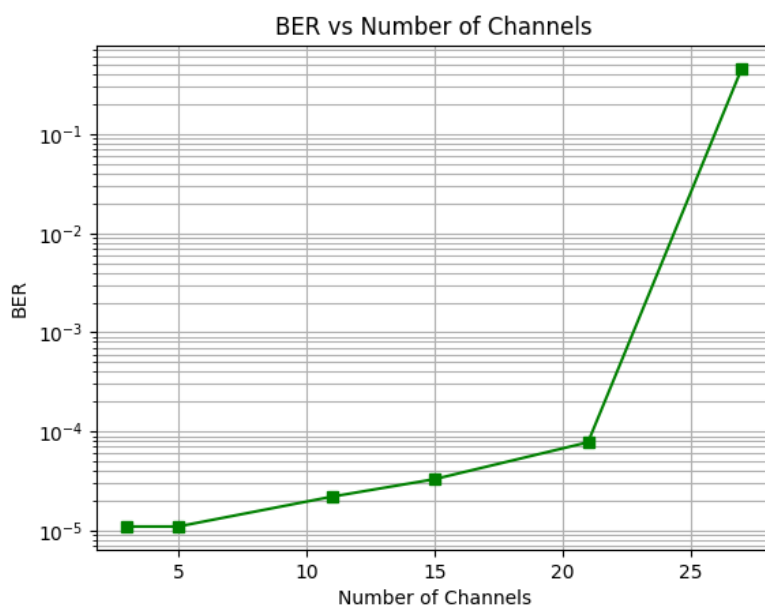
Slika 2.9: Simulacija: eye-diagrami centralnog kanala nakon ekstrakcije i osnovne DSP obrade (16-QAM), pri $k = 3$ i $L = 700 \text{ km}$, za različite snage po kanalu.

Pri nižim snagama (-5 dBm i -2 dBm) oko je otvorenije i rasipanje amplituda je manje izraženo, dok pri većim snagama ($+2 \text{ dBm}$ i posebno $+5 \text{ dBm}$) dolazi do progresivnog zatvaranja oka i porasta jittera. Trend je konzistentan sa jačanjem Kerr-ove nelinearnosti: veća snaga po kanalu pojačava SPM/XPM fazne fluktuacije, a u prisustvu disperzije dio njih se manifestuje kao vremensko/amplitudno izobličenje (PM-to-AM), što povećava ISI.

Napomena: eye-diagrami na predaji (TX) nisu posebno prikazani, jer u idealnom slučaju prije propagacije i nelinearnih efekata signal ima potpuno otvoreno oko; fokus analize je stoga na degradaciji koja nastaje tokom propagacije i nakon ekstrakcije centralnog kanala na prijemu.

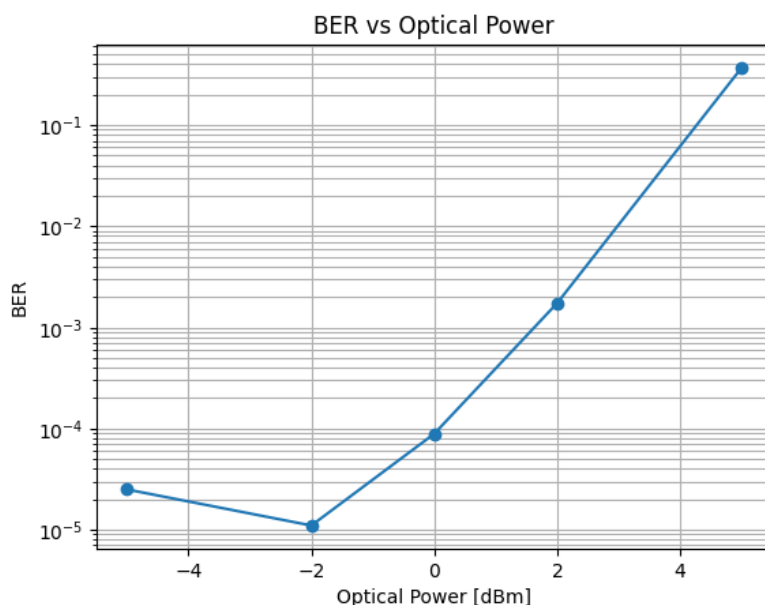
2.7.5 Analiza bitne greške (BER)

BER predstavlja ključnu kvantitativnu mjeru kvaliteta prenosa jer integrira utjecaj faznog šuma, ISI i ukupne degradacije nakon DSP obrade. U nastavku je BER analiziran za $L = 700 \text{ km}$ u funkciji: (i) broja WDM kanala pri fiksnoj snazi po kanalu i (ii) snage po kanalu pri fiksnoj konfiguraciji sistema.

Utjecaj broja WDM kanala na BER (16-QAM, $P_{ch} = -2$ dBm)

Slika 2.10: Zavisnost BER-a od broja WDM kanala za 16-QAM modulaciju pri $P_{ch} = -2$ dBm i $L = 700$ km. Povećanjem broja kanala jača XPM interakcija i BER raste.

Sa porastom broja kanala povećava se broj izvora međukanalne interakcije, pa XPM fazne fluktuacije postaju izraženije. U prisustvu disperzije dio faznog šuma prelazi u vremensko/amplitudno izobličenje, što povećava ISI i dovodi do pogoršanja BER performansi.

Utjecaj snage po kanalu na BER

Slika 2.11: Zavisnost BER-a od snage po kanalu (launch power) pri $L = 700$ km. Porast snage pojačava Kerr-ovu nelinearnost, pa BER raste.

Pri nižim snagama nelinearni efekti su slabije izraženi i BER je manji, dok se sa porastom snage po kanalu Kerr-ovi efekti pojačavaju, pa raste fazni šum i degradacija signala nakon DSP-a, što se manifestuje kroz povećanje BER-a. Ovi rezultati su konzistentni sa faznim fluktuacijama (Slika 2.5) i zatvaranjem eye-diagrama (Slika 2.9).

2.8 Zaključak

U ovom radu analiziran je utjecaj nelinearnog međukanalnog preslušavanja, prvenstveno međukanalne fazne modulacije (XPM), u višekanalnim WDM sistemima velikog dometa. Analiza je provedena kombinacijom teorijskog razmatranja Kerr-ovih nelinearnih efekata i numeričke simulacije koherentnog WDM sistema sa dužinom optičkog linka od 700 km.

Rezultati spektralne analize pokazali su da propagacija kroz nelinearno optičko vlakno dovodi do mjerljivih promjena spektralne gustine snage na prijemu u odnosu na predaju, pri čemu u višekanalnom okruženju pored samofazne modulacije (SPM) značajnu ulogu ima i XPM međukanalna interakcija. Povećanje broja WDM kanala i/ili snage po kanalu rezultuje izraženijim razlikama između TX i RX spektra, što je u skladu s teorijskim očekivanjima.

Fazna analiza je potvrdila da XPM predstavlja dominantan degradacioni mehanizam u višekanalnim WDM sistemima. Faza prijemnog optičkog polja pokazuje znatno veće fluktuacije u odnosu na predajni signal, što predstavlja direktnu posljedicu Kerr-ove nelinearnosti. U prisustvu hromatske disperzije, ove fazne fluktuacije se djelimično konvertuju u amplitudna i vremenska izobličenja, što je dalje potvrđeno kroz eye-diagram analizu.

Eye-diagrami centralnog WDM kanala nakon ekstrakcije i osnovne DSP obrade pokazali su progresivno zatvaranje oka sa porastom snage po kanalu. Pri nižim snagama eye-diagram zadržava relativno dobar otvor, dok pri većim snagama dolazi do izraženog rasipanja, povećanog jittera i rasta intersimbolne interferencije, što je karakteristično ponašanje sistema ograničenog XPM degradacijom.

Kvantitativna BER analiza dodatno je potvrdila zaključke dobijene iz fazne i vremenske domene. Povećanje broja WDM kanala i snage po kanalu dovodi do značajnog pogoršanja BER performansi. Posebno je uočeno da pri 16-QAM modulaciji i velikom broju kanala (npr. 21 WDM kanal) BER dostiže vrijednosti reda 10^{-4} , što jasno ukazuje na ograničenja sistema usljed nelinearne međukanalne interakcije.

Nasuprot tome, pri korištenju robusnije QPSK modulacije, čak i za 21 WDM kanal, ostvarena je praktično savršena ekstrakcija centralnog kanala uz BER jednak nuli. Ovaj rezultat potvrđuje dobro poznati kompromis između robusnosti i spektralne efikasnosti: QPSK modulacija nudi znatno veću otpornost na nelinearne degradacije na uštrb niže brzine prenosa, dok je 16-QAM osjetljivija na XPM efekte, ali omogućava veći protok podataka.

Zaključno, rezultati ovog rada jasno pokazuju da XPM predstavlja dominantno ograničenje performansi u dugodometnim višekanalnim WDM sistemima. Izbor modulacije, broja kanala i snage po kanalu mora biti pažljivo optimizovan kako bi se postigao balans između kapaciteta sistema i robusnosti prenosa. Ovi zaključci su u potpunosti u skladu sa teorijskim modelima Kerr-ovih nelinearnih efekata i imaju direktnu primjenu u dizajnu savremenih koherentnih optičkih komunikacionih sistema.

Popis slika

1.1	Kvalitativno poređenje Kerr-ovih nelinearnih efekata kroz promjenu spektra: (a) SPM uzrokuje širenje spektra jednog signala, (b) XPM dovodi do spektralne promjene signala pod uticajem drugog kanala (pump) [6]	3
1.2	Efikasnost XPM-a u funkciji apsolutne vrijednosti <i>walk-off</i> parametra: sa porastom <i>walk-off</i> -a smanjuje se vremensko preklapanje kanala i opada jačina XPM interakcije [1].	4
1.3	Konverzija XPM-indukovanog faznog pomaka u amplitudno izobličenje usljed hromatske disperzije (PM-to-AM conversion), što predstavlja direktan mehanizam degradacije performansi i porasta BER-a u WDM sistemima [1].	5
1.4	Eye-diagrami centralnog kanala u trokanalnom WDM sistemu za dvije vrijednosti razmaka kanala: (a) manji razmak kanala dovodi do izraženijeg zatvaranja oka usljed jače međukanalne nelinearne interakcije (XPM) i disperzije, dok (b) veći razmak kanala ublažava XPM utjecaj i povećava otvor oka [3].	6
1.5	Ulazni signali dva WDM kanala korišteni za ilustraciju XPM efekta i nastanka vremenskog pomaka (<i>timing shift</i>) u prisustvu disperzije [1].	7
1.6	Razilaženje impulsa na kraju spana usljed disperzije (<i>walk-off</i>): impulsi različitih talasnih dužina se vremenski pomjeraju, čime se mijenja stepen njihovog preklapanja i efikasnost XPM-a [1].	7
1.7	Poređenje izlaznog impulsa za linearni slučaj i slučajeve sa SPM i XPM efektima, koje ilustrira izobličenja impulsa nastala usljed Kerr-ove nelinearnosti i interakcije kanala u WDM sistemu [1].	8
1.8	Nesimetrična (unsymmetric) <i>split-step Fourier</i> (SSFM) šema za numeričko rješavanje NLSE: linearni operator (disperzija/gubici) i nelinearni operator (Kerr) se primjenjuju odvojeno u svakom koraku propagacije [1].	9
1.9	Simetrična (symmetric) SSFM šema: linearni operator se primjenjuje u polakoraka prije i poslije nelinearnog operatora, čime se postiže bolja numerička tačnost u odnosu na nesimetričnu šemu [1].	9
1.10	Algoritamski prikaz SSFM metode: propagacija kroz vlakno se dijeli na korake Δz , gdje se linearni dio računa u frekvencijskom domenu (FFT), a nelinearni dio u vremenskom domenu kao fazna rotacija proporcionalna trenutnoj snazi signala [1].	9
2.1	Kvalitativno poređenje spektralnih promjena: teorijski koncept (gore) i rezultat simulacije (dolje).	18
2.2	PSD spektri na predaji (TX) i prijemu (RX) za različit broj WDM kanala pri fiksnoj snazi po kanalu. Porast broja kanala pojačava međukanalnu interakciju (XPM), što se manifestuje kao izraženija razlika TX/RX nakon 700 km.	19

2.3	PSD spektri (TX vs RX) za različite vrijednosti snage po kanalu pri fiksnom broju kanala ($k = 3$). Povećanjem snage jačaju Kerr-ovi efekti, pa razlika TX/RX postaje izraženija nakon 700 km.	20
2.4	Konstelacijski dijagram na prijemu za $k = 3$ WDM kanala pri $P_{ch} = +5$ dBm i $L = 700$ km (prikaz obje polarizacije). Širenje klastera ukazuje na degradaciju usljed propagacije kroz nelinearno vlakno (dominantno XPM u višekanalnom okruženju, uz doprinos SPM).	21
2.5	Poređenje faze kompozitnog WDM optičkog polja na predaji (TX) i prijemu (RX) za odabranu polarizaciju, pri $L = 700$ km. Razlika između krivih predstavlja nelinearni fazni pomak akumuliran tokom propagacije, pri čemu u višekanalnom WDM sistemu značajan doprinos potiče od XPM interakcije sa susjednim kanalima.	22
2.6	Histogram fazne razlike $\Delta\phi = \phi_{RX} - \phi_{TX}$ za kompozitno WDM optičko polje (odabrana polarizacija), pri $L = 700$ km. Širina raspodjele predstavlja mjeru faznih fluktuacija uvedenih propagacijom kroz nelinearno vlakno; veća fazna varijansa je konzistentna sa jačim Kerr-ovim utjecajem i XPM preslušavanjem u višekanalnom slučaju.	23
2.7	Teorija: referentni primjer degradacije eye-diagrama u WDM sistemu usljed XPM-a. Smanjenje otvora oka ilustruje trend pogoršanja pri jačoj međukanalnoj interakciji.	25
2.8	Simulacija: eye-diagram centralnog kanala nakon ekstrakcije i osnovne DSP obrade za dvije vrijednosti snage po kanalu ($k = 3$, $L = 700$ km). Poređenje ilustruje trend zatvaranja oka pri većoj launch snazi, u skladu sa teorijskim očekivanjima (Slika 2.7).	26
2.9	Simulacija: eye-diagrami centralnog kanala nakon ekstrakcije i osnovne DSP obrade (16-QAM), pri $k = 3$ i $L = 700$ km, za različite snage po kanalu.	27
2.10	Zavisnost BER-a od broja WDM kanala za 16-QAM modulaciju pri $P_{ch} = -2$ dBm i $L = 700$ km. Povećanjem broja kanala jača XPM interakcija i BER raste.	28
2.11	Zavisnost BER-a od snage po kanalu (launch power) pri $L = 700$ km. Porast snage pojačava Kerr-ovu nelinearnost, pa BER raste.	28

Literatura

- [1] Kumar, S., Deen, M., Fiber Optic Communications: Fundamentals and Applications. Wiley, 2014, dostupno na: <https://books.google.ba/books?id=m-jRAwAAQBAJ>
- [2] He, J., Norwood, R. A., Brandt-Pearce, M., Djordjevic, I. B., Cvijetic, M., Subramaniam, S., Himmelhuber, R., Reynolds, C., Blanche, P., Lynn, B. *et al.*, “A survey on recent advances in optical communications”, Computers & Electrical Engineering, Vol. 40, No. 1, 2014, str. 216–240.
- [3] Marcuse, D., Chraplyvy, A., Tkach, R., “Dependence of cross-phase modulation on channel number in fiber wdm systems”, Journal of lightwave technology, Vol. 12, No. 5, 2002, str. 885–890.
- [4] Chiang, T.-K., Kagi, N., Fong, T. K., Marhic, M. E., Kazovsky, L. G., “Cross-phase modulation in dispersive fibers: theoretical and experimental investigation of the impact of modulation frequency”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 6, No. 6, 1994, str. 733–736.
- [5] Ogata, T., Aoki, Y., Koga, T., Matsuoka, I., “Observation of bit-error-rate impairment due to dynamic cross-phase modulation in 2.5 gbit/s wdm transmission systems with standard fiber”, in Optical Fiber Communications, OFC., 1996, str. 42-44.
- [6] Mobini, E., Espinosa, D. H., Vyas, K., Dolgaleva, K., “Algaas nonlinear integrated photonics”, Micromachines, Vol. 13, No. 7, 2022, str. 991.
- [7] Betti, S., Giaconi, M., “Analysis of the cross-phase modulation effect in wdm optical systems”, Photonics Technology Letters, IEEE, Vol. 13, 02 2001, str. 43 - 45.
- [8] Shraddha, N. B., Vikas, U., Shantanu, S. J., “Analysis of spm, xpm, and fwm in fiber optic communication using optisystem”, International Journal For Science Technology And Engineering, Vol. 2, 2016, str. 136-142, dostupno na: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56058438>