

# OBRAZLOŽENJE PRIJEDLOGA TEME DOKTORSKE DISERTACIJE

## 1. PRIJEDLOG NAZIVA

Bosanski:

**"NOVI ALGORITAM ZA RJEŠAVANJE PROBLEMA RUTIRANJA I DODJELE TALASNIH DUŽINA U TRANSPARENTNIM OPTIČKIM MREŽAMA SA RAZMATRANJEM UTICAJA SLABLJENJA FIZIČKOG SLOJA"**

Engleski:

**"A NOVEL PHYSICAL LAYER IMPAIRMENT AWARE ROUTING AND WAVELENGTH ASSIGNMENT ALGORITHM IN TRANSPARENT WAVELENGTH ROUTED OPTICAL NETWORKS"**

## 2. PREDMET ISTRAŽIVANJA

Problem rutiranja i dodjele talasnih dužina (RWA - Routing and Wavelength Assignment) predstavlja jedan od veoma kompleksnih problema koji je neophodno rješavati prilikom projektovanja optičkih mreža sa rutiranjem po talasnim dužinama.

Veliki broj studija i naučnih radova je posvećen RWA problemu [1], a koji je poznat kao NP-kompletna (*Nondeterministic Polynomial time*). U većini radova se polazi od pretpostavke da se radi o potpunim optičkim mrežama u kojima se ne koriste OEO (Optičko-Električno-Optička) konverzije tj. prelazne regeneracije signala. Ova činjenica kao posljedicu ima potencijalno manju cijenu izgradnje mreže. Ova transparentna WDM mreža predstavlja osnov za izgradnju kičmene mreže sljedeće generacije.

U potpunoj optičkoj mreži, slabljenja zbog neidealnih optičkih komponenti na fizičkom sloju mogu značajno uticati na performanse mreže. Zbog toga se mora posvetiti posebna pažnja uticaju slabljenja fizičkog sloja na mrežne performanse i shodno tome razviti napredne RWA algoritme za potrebe prevazilaženja ovih uticaja. Tehnološki napredak u proizvodnji optičkih pojačavača, optičkih multipleksera i demultipleksera, optičkih svičeva i ostalih potrebnih uređaja omogućava izgradnju sve-optičke WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) mreže.

U većini RWA pristupa se optički nivo razmatra kao savršeni sistem prenosa i stoga se svi rezultati RWA procesa razmatraju kao izvodljiva rješenja u odnosu na QoT (Quality of Transmission) zahtjeve. Međutim, stvarni QoT svjetlosnih putanja može biti neprihvatljiv. Stoga, uvažavanje slabljenja fizičkog sloja u planiranju i funkcionisanju potpunih optičkih/translucentnih mreža je od nedavno privuklo značajnu pažnju naučne zajednice.

Slabljenja fizičkog sloja (PLI - *Physical Layer Impairments*) se smatraju kao ograničenja za RWA odluke (*PLI constrained*) ili je njihov uticaj integrisan u RWA odluke (*PLI aware*). U prvom slučaju su odluke o rutiranju ograničene od strane PLI, dok je u drugom slučaju moguće pronaći alternativne rute i/ili talasne dužine razmatrajući PLI. Radi pojednostavljenja se koristi generički termin IA-RWA, koji se odnosi na oba pristupa. U kičmenim mrežama koje rade na velikim udaljenostima se zahtijeva na određenim mjestima regeneracija signala. Zbog toga se IA-RWA problem vrlo često povezuje sa problemom postavljanja regeneratora [2] gdje projektanti planiraju i projektuju translucentne mreže sa optimalnim brojem regeneratorskih stanica i regeneratora po stanici za datu mrežnu topologiju i saobraćajnu matricu. Problem postavljanja regeneratora je također poznat kao NP-kompletna [1, 2].

Ukoliko je kvalitet primljenog signala ispod definisanog praga osjetljivosti optičkog prijemnika, prijemnik neće moći ispravno detektovati signal, uzrokujući da su svjetlosna putanja i pripadajući rezervisani resursi beskorisni.

Od esencijalne važnosti za operatere i projektante mreže je poznavanje:

1. različitih vrsta PLI;
2. njihovih efekata na izvodljivost svjetlosnih putanja;
3. analitičkog modeliranja PLI, kao i monitoringa i tehnika umanjenja njihovih uticaja;
4. različitih tehnika za slanje PLI informacija prema mrežnom sloju i protokolima kontrolne ravni;
5. upotrebe svih ovih tehnika u vezi sa protokolima kontrolne i upravljačke ravni za dinamičko uspostavljanje i upravljanje optički izvodljivih svjetlosnih putanja.

Predmet razmatranja je uticaj slabljenja (*impairments*) fizičkog sloja na planiranje i funkcionisanje optičkih mreža i izgradnja novog algoritma za rješavanje problema rutiranja i dodjele talasnih dužina u transparentnim optičkim mrežama sa razmatranjem uticaja slabljenja fizičkog sloja.

### **3. MOTIVACIJA ZA ISTRAŽIVAČKI RAD I OPRAVDANOST ISTRAŽIVANJA**

Optičko umrežavanje je posljednjih godina pretrpjelo ogromne promjene. Sadašnji trendovi jasno pokazuju evolutivni put ka mrežama velikih kapaciteta i male cijene. Od velike važnosti je i uzimanje u obzir ostalih faktora kao što su potrošnja energije, disipacija toplote i zahtjevi za fizičkim prostorom. Evolucija optičkih mreža je uslovljena razvitkom određenih potencijala umrežavanja (npr. više talasnih dužina, većih linijskih brzina, naprednih modulacionih formata) i nastankom novih aplikacija (npr. tele-prisutnost). Ova evolucija za optičke prenosne sisteme predstavlja uvođenje DWDM transmisijskih sistema (80-160 talasnih dužina po optičkom vlaknu) koji rade na velikim linijskim brzinama (npr. 40, 100 ili 400 Gbit/s) [3].

Obezbjedenje statičkih kanala velikog kapaciteta nije dovoljno da se riješe zahtjevi novih dinamičkih aplikacija. Za podršku navedenim trendovima se zahtijevaju dinamičke i konfigurabilne optičke i kontrolne ravni koje su u stanju da udovolje dinamičkim zahtjevima na ekonomski isplativ način.

U optičkoj mreži svjetlosna putanja (*lightpath*) je optička putanja (ruta i talasna dužina) uspostavljena između para izvorno-odredišnih čvorova. Skup zahtjeva (ili saobraćajna matrica) u mreži je set zahtjeva za svjetlosnim putanjama koje moraju biti uspostavljene u mreži. Svaki zahtjev (*demand*) predstavlja zahtjev za uspostavljanje pojedinačne svjetlosne putanje. U okviru mrežnog planiranja, neki zahtjevi su stalni i definišu se kao stalni zahtjevi za svjetlosnim putanjama (PLD - *Permanent Lightpath Demands*) ili statički zahtjevi. Ostali zahtjevi se označavaju kao dinamički zahtjevi za svjetlosnim putanjama (DLD - *Dynamic Lightpath Demands*) ili dinamički zahtjevi, u kojem zahtjevi imaju konačan životni vijek (tj. početak i kraj veze). U ovom kontekstu postoje dvije varijante DLD-a:

- planirani zahtjevi za svjetlosnim putanjama (SLD – *Scheduled Lightpath Demands*): Vrijeme aktivacije i trajanje ovih zahtjeva su unaprijed poznati. Pošto je trajanje ovih zahtjeva poznato unaprijed, proces mrežnog planiranja ih razmatra kao cjelinu;
- zahtjevi za svjetlosnim putanjama za datu priliku (ALD – *Ad Hoc Lightpath Demands*): Ova kategorija zahtjeva se karakteriše činjenicom da njihovo vrijeme dolaska i trajanje nisu unaprijed poznati. Ova dva parametra (vrijeme dolaska i trajanje) se mogu modelirati pomoću dva slučajna procesa.

Ukoliko dodijeljena talasna dužina za datu svjetlosnu putanju ostaje ista duž svih optičkih linkova kojim prolazi, tada se za rutiranje i dodijeljivanje talasnih dužina (RWA) [5-6] kaže da zadovoljava ograničenje kontinuiteta talasne dužine (*wavelength continuity constraint*). Uzimajući u obzir ovo ograničenje, svaka svjetlosna putanja se kreira dodijeljivanjem jedne talasne dužine do kraja njene rute. Ukoliko komutirajući čvor posjeduje konvertor talasnih dužina, tada se ne primijenjuje ograničenje kontinuiteta talasne dužine i problem rutiranja se svodi na uobičajeno rutiranje u mrežama sa komutacijom kanala, gdje je jedini ograničavajući faktor broj raspoloživih talasnih dužina (kanala) na svakom linku.

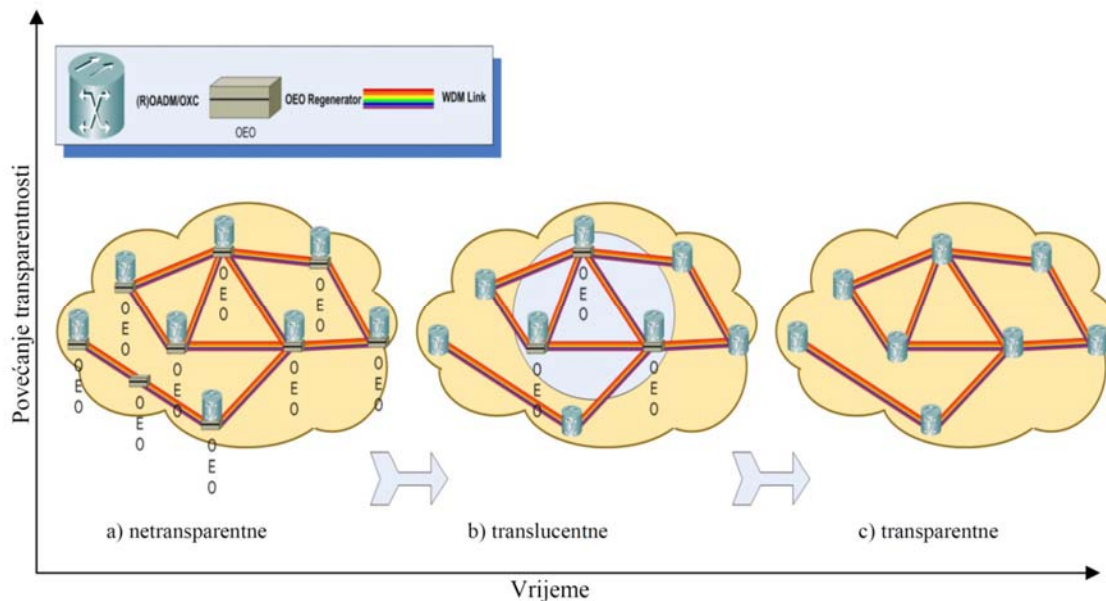
Optičke mrežne arhitekture se mogu podijeliti na (*Slika 1.*):

1. netransparentne (*opaque*);
2. translucentne (optički bajpas);
3. sve-optičke (*transparentne*)

U netransparentnim arhitekturama optičkih mreža optički signal kojim se prenosi saobraćaj biva podvrgnut optičko-elektronskoj-optičkoj (OEO) konverziji u svakom čvoru za komutiranje ili rutiranje na trasi. OEO konverzija omogućava veće domete optičkog signala, što dovodi do povećanja troškova zbog velikog broja regeneratora koji su potrebni u mreži i zavisnosti procesa konverzije od bitske brzine i modulacionih formata.

Zbog toga su predložene transparentne mrežne arhitekture kao način da se eliminišu OEO troškovi koji se sreću kod netransparentnih arhitektura. U transparentnim mrežama, signal se od kraja-do-kraja prenosi u optičkom obliku, bez ijedne OEO konverzije na trasi [4, 13].

U mrežama koje se proširuju, slabljenja fizičkog signala ograničavaju transparentni domet i zahtijevaju se sve-optički regeneratori s ciljem regenerisanja signala na optičkom nivou. Translucentne arhitekture optičkih mreža su predložene kao kompromis između netransparentnih i transparentnih mreža [7]. Ovdje se na određenim mrežnim lokacijama upotrebljava selektivna regeneracija, a sve u cilju održavanja kvaliteta signala na putu od predajnika do prijemnika.



**Slika 1.** Evolucija optičkih mreža od (a) netransparentnih ka (b) translucentnim i (c) transparentnim

Transparentnost utiče na mrežni dizajn postavljanjem ograničenja na veličinu WDM transparentnih domena ili unošenjem razmatranja slabljenja fizičkog sloja prilikom mrežnog planiranja. U transparentnim optičkim mrežama, signal koji ima transparentnu propagaciju biva izložen različitim fenomenima koji degradiraju kvalitet signala, a koji se unose različitim tipovima distorzije signala. Fizička veličina transparentne mreže je ograničena slabljenjima kao što su atenuacija, šumovi, preslušavanje, CD/PMD (*Chromatic Dispersion/Polarization Mode Dispersion*), optičke nelinearnosti, konkatencija filtera itd. Ova slabljenja se akumuliraju duž trase optičkog signala i ograničavaju domet i kvalitet prenosa (QoT - *Quality of Transmission*). Uticaj mrežnih ispada (*failures*) također propagira duž mreže i ne može se jednostavno izolovati i lokalizovati.

Efekti slabljenja fizičkog sloja se ne mogu zanemariti u sve-optičkom rutiranju. U narednom tekstu će se objasniti kako uzeti u obzir ove efekte za potrebe rutiranja i dodjele talasnih dužina za sve-optičke transparentne WDM mreže.

U većini RWA algoritama, optički sloj se razmatra kao idealna crna kutija i izvršena je pretpostavka da su svjetlosne putanje izvodljive dokle god su raspoložive talasne dužine. Navedena pretpostavka je neopravdana i ne može biti važeća za duge veze u velikim jezgrenim transparentnim mrežama. Stoga je neophodno da RWA algoritmi uvažavaju ograničenja fizičkog sloja, a zbog garancije da će optički signal biti detektovan na strani prijemnika sa željenim kvalitetom signala. Radi prevazilaženja problema, predloženo je nekoliko novih RWA algoritama poznatih kao IA-RWA ili PLIAR (*Physical Layer Impairment Aware Routing*)

Slabljenja fizičkog sloja tj. PLI se općenito klasificiraju u dvije kategorije: linearna i nelinearna slabljenja [8-11]. Pojmovi linearna i nelinearna u optici znače nezavisna od intenziteta i zavisna od intenziteta, respektivno. Linearna slabljenja su po prirodi statička, dok su nelinearna po svojoj

prirodi dinamička. Nelinearna slabljenja jako zavise od trenutne raspodjele rute i talasne dužine, tj. od trenutnog statusa alociranih svjetlosnih putanja. Osim toga, alokacija rute i talasne dužine za novi zahtjev za svjetlosnom putanjom (*lightpath request*) utiče na postojeće svjetlosne puteve u mreži.

U linearna slabljenja spadaju: gubici snage, hromatska disperzija (*CD - Chromatic Dispersion*), polarizacijska disperzija (*PMD - Polarization Mode Dispersion*), polarizacijski gubici (*PDL - Polarization Dependent Loss*), šum spontane emisije pojačavača (*ASE - Amplifier Spontaneous Emission Noise*), preslušavanje (*CT - Crosstalk*), ulančavanje filtera (*FC - Filter Concatenation*).

Optičke nelinearnosti predstavljaju veliku prepreku za optičke komunikacione sisteme, a koja se mora prevazići. Efekti nelinearnih izobličenja postaju od presudnog značaja sa povećavanjem podatkovnih brzina prenosa, transmisionih dužina, broja talasnih dužina, nivoa optičkih snaga i sa smanjenjem razmaka između kanala.

Nelinearni efekti u optičkom vlaknu se pojavljuju ili zbog zavisnosti indeksa prelamanja medija od intenziteta svjetlosti koja se prostire kroz vlakno ili zbog fenomena neelastičnog raspršenja. Uopštena klasifikacija nelinearnih efekata u optičkom mediju je data u tabeli 1.

**Tabela 1.** Podjela nelinearnih efekata u optičkom mediju

Nelinearni efekti u optičkim vlaknima				
Efekti indeksa prelamanja ( <i>kerrov efekat</i> )			Efekti neelastičnog raspršenja	
Sopstvena fazna modulacija - SPM	Međusobna fazna modulacija - XPM	Četverotalasno miješanje - FWM	Stimulisano Ramanovo rasijanje - SRS	Stimulisano Brilluеноvo rasijanje - SBS

Uticaj nelinearnih efekata se povećava sa povećanjem nivoa snage optičkog signala radi ostvarivanja većeg dometa, povećanjem kanalne bitske brzine radi povećanja kapaciteta prenosa, smanjivanjem razmaka između kanala radi povećavanja broja talasnih dužina i kapaciteta kompletne mreže.

Linearni efekti ne zavise od snage signala. Njihovi efekti na svjetlosnu putanju od kraja do kraja (*end-to-end*) se mogu procijeniti na osnovu parametara linka, i njihov uticaj riješiti pomoću postavljanja ograničenja na rutiranje. Nelinearni efekti su mnogo kompleksniji. Jednostavni fizički model nelinearnih efekata je predstavljen prilikom procjene performansi optičkih mreža s ciljem kreiranja RWA algoritama sa transmisionim slabljenjima na svakoj svjetlosnoj putanji [12], a koji uzimaju u obzir statički šum optičkih komponenti i nelinearne efekte zbog trenutne dodjele i korištenja talasne dužine. Nelinearnosti rapidno degradiraju kvalitet transmisionog sloja kad je broj uspostavljenih svjetlosnih putanja velik tj. kada je ponuđeno opterećenje mreže veliko. Transmisiona slabljenja mogu postati ozbiljnija pri većim bitskim brzinama (40 Gbit/s i više). Uticaj stimulisano Ramanovog rasijanja na rutiranje i dodjelu talasnih dužina u WDM mrežama je analiziran u [79].

Većina današnjih RWA algoritama ne uzimaju u obzir kvalitet signala. Za efikasno upravljanje optičkih mreža su neophodni novi RWA algoritmi koji uzimaju u obzir slabljenja fizičkog sloja (*physically aware RWA*).

U potrazi za rješavanjem nekih od navedenih problema vodeće vladine agencije širom svijeta su investirale u nekoliko velikih naučno istraživačkih projekata od kojih navodimo samo neke: DICONET, DRAGON, CANARIE CANet4, NOBEL2, GEANT2, FIND, GENI, EIFFEL, FIRE itd.

Upravo iz ovoga što je prethodno navedeno, kandidat želi pojedinačno i u istraživačkom timu doprinijeti rješavanju problema rutiranja i dodjele talasnih dužina u transparentnim optičkim mrežama sa razmatranjem uticaja slabljenja fizičkog sloja i to kroz izgradnju novog i originalnog RWA algoritma koji će razmotriti linearna i nelinearna slabljenja i istovremeno smanjiti kompleksnost proračuna zbog evaluacije PLI. Primjenom novog algoritma se mogu postići značajna poboljšanja u poređenju sa nekim drugim ranije predloženim RWA algoritmima.

Ova i slična problematika je trenutno u fokusu interesovanja kako industrije tako i akademske zajednice i dio je istraživanja koja će dovesti do potpune standardizacije transparentnih optičkih mreža tj. nadolazećih dinamički rekonfigurabilnih optičkih mrežnih tehnologija sljedeće generacije.

#### **4. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVAČKA DOSTIGNUĆA U OBLASTI RUTIRANJA I DODJELE TALASNIH DUŽINA U OPTIČKIM MREŽAMA**

U cilju prikazivanja trenutnog stanja IA-RWA optičkog umrežavanja, prikupljeno je preko stotinu naučnih radova. U nastavku su obrađeni IA-RWA algoritmi i njihovi algoritamski pristupi, klasifikacija IA-RWA prijedloga, kao i metrike performansi IA-RWA algoritama.

U ovom odjeljku su prikazani, iz dosadašnjih istraživačkih dostignuća, algoritamski pristupi za rješavanje IA-RWA problema i izvršena je klasifikacija različitih IA-RWA prijedloga iz prikupljenih radova. Ovaj odjeljak obuhvata i opis metrika performansi i metoda prihvaćenih za evaluaciju različitih prijedloga.

Algoritamski pristup za IA-RWA problem se može kategorisati ili kao kombinatorni pristup, koji traži optimalno rješenje, ili kao sekvencijalni pristup zasnovan na određenim heurističkim ili meta-heurističkim algoritmima, koji obično daju suboptimalno rješenje.

Klasični RWA problem (tj. bez razmatranja PLI) je NP-kompletna [1] i stoga njegovo optimalno rješenje ne može biti pronađeno u polinomijalnom vremenu koristeći bilo koji poznati algoritam. IA-RWA problem unosi dodatnu kompleksnost u RWA problem pošto obuhvata brojna ograničenja fizičkog nivoa. Pojednostavljenje IA-RWA problema se može ostvariti upotrebom heurističkog (ili meta-heurističkog) algoritma koji se može iskoristiti za rješavanje bilo podproblema rutiranja ili dodjeljivanja talasne dužine.

Većina IA-RWA algoritama koja je opisana u literaturi je bazirana na jednostavnim heuristikama, pošto IA-RWA problem obuhvata dodatna ograničenja fizičkog sloja, a koje su u većini slučajeva verifikovane upotrebom kompleksnih analitičkih modela fizičkih slabljenja. U literaturi se mogu pronaći raznovrsni heuristički algoritmi u vezi sa podproblemom rutiranja i općenito su bazirani na Dijkstrinom algoritmu za određivanje najkraćeg puta (SP - *shortest path*). Određeni broj IA-RWA algoritama koriste SP pristup sa minimalnim brojem skokova uzimajući u obzir rutiranje po jednoj putanji [14, 15-22]. Fizička dužina linka predstavlja najjednostavniju metriku koja uzima u obzir slabljenje fizičkog sloja. Neki IA-RWA algoritmi koriste cijenu linka koja je funkcija parametra preostale disperzije [18], preslušavanje zbog četverofotonskog miješanja (FWM – *Four-Wave Mixing*) [23], Q-faktor [20] ili varijansu šuma [24]. U navedenim radovima su linearna i nelinearna izobličenja [25] predstavljena varijansom izobličenja (tj. varijansom šuma).

Određeni broj IA-RWA algoritama modificiraju SP algoritam rutiranja. Kao primjer se može uzeti MINCOD (*Minimum Coincidence and Distance*) algoritam [26] u kojem se proračunavaju putevi na način da se minimizira dužina puta i broj dijeljenih linkova, dok se u algoritmu "najmanjeg zagušenja" [19] primarno vodi računa o balansiranju mrežnog opterećenja. SP algoritam koji uzima u obzir fizička slabljenja usljed FWM preslušavanja je predložen u radu [23]. Poboljšani Bellman-Ford SP algoritam koji uzima u obzir slabljenja fizičkog sloja i administriranje svjetlosnih putanja je predložen u radu [27].

Kod višeputanjskog rutiranja, slično kao i kod jednoputanjskih algoritama rutiranja, kao metrika se može koristiti računanje hopova [28, 29–32] ili PLI. Metrika rastojanja (tk. dužina linka) predstavlja najjednostavniju cijenu linka koja uzima u obzir PLI. Ostala fizička izobličenja, kao što su PMD (*Polarization Mode Dispersion*), ASE (*Amplifier Spontaneous Emission*) šum, preslušavanje (XT - *Crosstalk*), hromatska disperzija (CD – *Chromatic Dispersion*) i ulančavanje filtera (FC - *Filter Concatenation*), se mogu koristiti za predstavljanje cijene linka [33]. Kao cijena linka se može uzeti i Q-faktor. Navedene cijene se mogu mjeriti uz pomoć uređaja za nadgledanje performansi [34] ili se mogu analitički izračunati kao slabljenja Q faktora u najgorem slučaju ili uzeti u obzir kao linearna [35] i nelinearna izobličenja [36]. U kompleksnijim slučajevima se mogu kombinovati informacije o broju regeneratorskih modula, broju raspoloživih i svih talasnih dužina i dužini linka [37].

Nakon što se pronađu kandidovane rute, odabir odgovarajuće rute se vrši sekvencijalno ili paralelno. U prvom pristupu se izvršava sekvenca ponovnih pokušaja dok se na nađe prva raspoloživa ruta koja zadovoljava određeni zahtjev za performansama [30, 32, 38]. U drugom pristupu se bira ruta koja je najprikladnija u skladu sa datim kriterijem odabira (tj. funkcijom odabira) [29, 30].

Postupak dodjeljivanja talasnih dužina funkcioniše na skupu kandidovanih talasnih dužina koje su dostupne na prethodno odabranim rutama. Skup kandidovanih talasnih dužina može se urediti prema određenoj politici ili biti neuređen. Uređivanje skupa talasnih dužina je predloženo je [39] kao tehnika za odabir talasne dužine sa minimalnim brojem susjednih kanala. S obzirom na skup kandidovanih ruta, faza odabira talasne dužine se može izvoditi sekvencijalno ili paralelno, a što je slično pod problemu rutiranja. U sekvencijalnom pristupu se odabire prva raspoloživa talasna dužina koja zadovoljava ograničenja mrežnog i fizičkog sloja. U velikom broju IA-RWA prijedloga [14, 16, 18, 19, 24, 27, 28, 30, 37, 40–44] je razmatran ovakav FF (*First-Fit*) pristup odabira. Ostali IA-RWA algoritmi pokušavaju pronaći, među kandidovanim talasnim dužinama, najprikladniju talasnu dužinu, a što predstavlja tzv. BF (*Best-Fit*) pristup odabira [17, 27]. Moguće je primijeniti i nasumični odabir talasne dužine [15, 24]. U šemi slučajnog dodjeljivanja talasnih dužina nasumično se odabire talasna dužina iz skupa raspoloživih talasnih dužina. U određenom broju WA algoritama donošenje odluke se zasniva isključivo na slabljenju fizičkog sloja. Kao primjer je moguće navesti PLI algoritam koji je namijenjen za minimiziranje efekta FWM preslušavanja [23]. U ovom algoritmu se koriste i BF i FF šeme odabira talasnih dužina.

Postoje određene heuristike koje su namijenjene za zajedničko rješavanje IA-RWA problema. Autori rada [46] su prikazali algoritam koji pronalazi prikladnu svjetlosnu putanju u jednom algoritamskom koraku zahvaljujući slojevitom prikazu linkova i talasnih dužina u jednom grafu. MC (*Minimum Crosstalk*) algoritam [47] je još jedan primjer algoritma koji riješava IA-RWA problem skupno.

Osim heuristički baziranih algoritama, postoji klasa IA-RWA algoritama koji koriste metaheurističke metode. Metaheuristike omogućavaju konvergiranje optimalnom rješenju kroz uzastopne iteracije. Vrlo su atraktivne dokle god ne uključuju kompleksne matematičke formulacije. Jedna od vrlo često primijenjivanih metoda za rješavanje različitih složenih kombinatornih problema je metaheuristika zasnovana na optimizaciji kolonijom mrava tj. ACO (Ant Colony Optimization), a koja je korištena i za rješavanje IA-RWA problema [40, 45, 48]. Od tradicionalno primijenjivanih metaheurističkih metoda za rješavanje IA-RWA problema, treba navesti genetske algoritme (GA, Genetic Algorithms) i tabu pretraživanje (TS, Tabu Search). Metaheuristički IA-RWA algoritam koji koristi genetski algoritam je objavljen u [49]. Predloženi IA-RWA algoritam pokušava izračunati svjetlosnu putanju na takav način da je prosječna brzina blokiranja i upotreba optičkih uređaja minimizirana uzimajući u obzir PMD i ASE šum.

Za rješavanje problema rutiranja i dodjeljivanja talasnih dužina tj. održive opskrbe svjetlosnih putanja upotrebljavaju se i TS metaheuristike [37]. Predloženi algoritam tabu pretraživanja, a koji uzima u obzir PMD i ASE šum, funkcionira na skupu  $k$ -SP ruta, gdje se  $k$  dinamički modifikuje u skladu sa poboljšanjem. Ovakav adaptivni pristup poboljšava efikasnost predloženog TS algoritma.

Za rješavanje IA-RWA problema autori rada [26] su predložili prediktivni algoritam PA (Predictive Algorithm) uz razmatranje slabljenja fizičkog sloja korištenjem koncepta MTD (Maximum Transmission Distance) tj. maksimalne udaljenosti na koju signal može biti rutiran bez regeneracije. Algoritam bira svjetlosnu putanju na osnovu prethodnih zahtjeva za konekcijama i može se koristiti kod distribuiranog rutiranja.

Veliki broj autora je u svojim radovima koristio i ILP (*Integer Linear Programming*) i heuristički pristup ili samo jednu od navedene dvije tehnike (ILP baziranu ili heuristički bazirani pristup), a radi rutiranja zahtijeva za svjetlosnim putanjama uz razmatranje slabljenja fizičkog sloja. Zhang i saradnici [50] su predložili jedinstveni pristup za rješavanje problema minimalnog broja regeneratora uvažavajući slabljenja fizičkog sloja, a koji su slijedili drugi autori razvijajući nove ili proširujući i mijenjajući postojeću tehniku radi poboljšanja efikasnosti i ekonomičnosti razmatranog problema. Manousakis i saradnici [51] su predložili metodu za minimiziranje blokiranja svjetlosnih puteva sa učinkovitim rasporedom regeneratora. Autori navode da je novi IA (Impairment Aware) algoritam dizajniran i implementiran za rutiranje i dodjeljivanje talasnih dužina zajedno sa rješavanjem problema rasporeda regeneratora u translucentnim mrežama, a koji postavlja regeneratore na odabrana mjesta i definiše njihov broj. Za rješavanje RWA problema korišteni su ILP i Greedy heuristički algoritmi. Za evaluaciju performansi predloženog IA RWA algoritma izvršeni su mnogobrojni simulacijski eksperimenti. Algoritmi virtualne topologije su implementirani u Matlabu. Za procjenu ostvarivosti svjetlosne putanje LINDO API je korišten za rješavanje ILP problema. U eksperimentu je korišten estimator Q faktora. Vrijeme izvršavanja IA-RWA algoritma za translucentnu mrežu iznosi oko tri sata.

Pavon-Marino i sar. [52] su predložili binarni ILP i sekvencijalni heuristički pristup za minimiziranje blokiranja svjetlosnih putanja i povećanje efikasnosti uz zadovoljenje velikog broja zahtjeva za svjetlosnim putanjama. Za razmatrani scenarij, IA-RWA algoritam ima blokiranje jednako nuli i vrijeme izvođenja oko 20 minuta. S ciljem omogućavanja adekvatne upotrebe dodjeljenog pojasa propuštanja uz sprečavanje bitskih grešaka za vrijeme prenosa zahtjeva za svjetlosnim putanjama autori rada [53] su predložili ILP i heuristički pristup u polinomijalnom vremenu. Formulirani heuristički algoritam pruža optimalna rješenja za različite setove zahtjeva i za različite veličine mreža. Aparicio-Pardo i saradnici [54] su predložili ILP model koji razmatra



linearna izobličenja fizičkog sloja i kroz novi pristup koji ranije nije razmatran za male i mreže srednje veličine. Predložili različite heurističke pristupe za velike mreže, tj. segmentaciju svjetlosne putanje i 3-koračnu heuristiku, razmatrajući linearna i nelinearna fizička izobličenja pojedinačno. Katrinis i saradnici [55] su predložili ILP i heuristički pristup da bi izbjegli prilagođavanje između cijene regeneracije signala i efektivnosti signala i povećali domet optičkog signala. Kombinovani ILP i heuristički pristup sa tabu i pohlepnom pretraživanjem su predložili autori rada pod [56] kao metodu koja omogućava da informacije prolaze sa jednih na druge nivoe u mreži.

U nastavku je dat pregled radova koji su za rješavanje problema rutiranja i dodjeljivanja talasnih dužina koristili ILP ili heuristički bazirane pristupe. Christodouloupoulos i saradnici [57] su predložili IA-RWA (*Worst Case IA-RWA*) algoritam proširujući originalni RWA algoritam i uzimajući u obzir slabljenja fizičkog sloja za najgori slučaj u kojem su sve svjetlosne putanje aktivne. Razvijen je i Sigma Bound IA-RWA algoritam koji pokazuje bolje performanse i od originalnog RWA algoritma koji ne uzima u obzir slabljenja i od *Worst Case IA-RWA* algoritma. Varvarigos i saradnici [58] su definisali inicijalni pristup za rješavanje RWA problema bez razmatranja slabljenja, a koji je zasnovan na ILP formulaciji radi dobijanja cjelobrojnih rješenja. Algoritam je naknadno proširen na dva algoritma (IA algoritam rutiranja i algoritam dodjeljivanja talasnih dužina). Prvi algoritam indirektno uzima u obzir fizički sloj limitirajući izvore koje generišu slabljenja. Drugi algoritam koristi parametre koji se odnose na varijansu šuma za direktno računanje većine značajnih slabljenja fizičkog sloja. Indirektni IA-RWA algoritam je označen kao parametarski tj. P-IA-RWA, dok je direktni IA-RWA algoritam označen kao sigma bound ili SB-IA-RWA. Predloženi P-IA-RWA i SB-IA-RWA algoritmi pokazuju bolje performanse od "čistog" RWA algoritma. U radu [59] se tvrdi da promjena trenutnog kapaciteta korištenih vlakana sa 10 Gbit/s na 100 Gbit/s i više predstavlja specifičan tehnički problem koji se treba istražiti. Još veći izazov predstavljaju optički sistemi sa mješovitim linijskim brzinama u kojim istovremeno postoje različite bitske brzine i modulacioni formati. U proteklih nekoliko godina načinjeni su značajni istraživački napor u projektovanju strategija ukrštenih slojeva koje uzimaju u obzir slabljenja fizičkog sloja. Trenutno je stav većine operatora, proizvođača opreme, standardizacijskih tijela i naučnika da se mjerenja performansi optičkog sloja inkorporiraju u IA-RWA algoritme, a što je ključno za automatiziranu i brzu rekonfiguraciju optičke mreže. Autori [59] su razvili strategiju ukrštenih slojeva (*cross layer strategy*) koja uzima u obzir stanje fizičkog sloja i koja obuhvata dinamičku interakciju između fizičkog i mrežnog sloja radi kompenzacije neusklađenosti zahtjeva i postojećih resursa.

Očigledno je da su kroz dosadašnja istraživačka dostignuća u oblasti rutiranja i dodjele talasnih dužina u optičkim mrežama u slučaju statičkih (unaprijed poznatih) saobraćajnih zahtjeva razvijeni su algoritmi koji razmatraju 1) samo linearna slabljenja 2) linearna i nelinearna slabljenja 3) postojanje regeneratora/konvertera talasnih dužina i 4) nivoe snage optičkih pojačavača. Youe i saradnici [60] su razvili heuristički algoritam za uspostavljanje svjetlosnih putanja na tzv. *multi-hop* način. Algoritam, osim rutiranja svjetlosnih putanja, pronalazi najbolje lokacije za OEO konverziju. Uticaj PMD-a na dizajn optičke mreže sa rutiranjem po talasnim dužinama (*WRON, Wavelength Routed Optical Networks*) je razmatran u [61]. Razvijena je ILP formulacija za optimizaciju cijene mreže koja obuhvata brojne regeneratore i dodatno instalirana vlakna. Prezentovana je heuristička tehnika pretraživanja pod nazivom *hill-climbing* sa slučajnim ponovnim pokretanjem radi smanjenja kompleksnosti optimalnog rješenja i procjene mreža sa vlaknima neujednačene kvalitete. Sabella i saradnici [62] su za projektovanje optičkih mreža predložili tri vrste strategija: WP (*Wavelength Path*) – putanja talasne dužine, VWP (*Virtual Wavelength Path*) – virtuelna putanja talasne dužine i PVWP (*Partial Virtual Wavelength Path*) – djelimično virtuelna putanja talasne dužine. U ovoj studiji autori su u razmatranje uzeli jedino

ASE i unutarpojasno (*in-band*) preslušavanje sa pretpostavkom da ne postoje nelinearni efekti. Dobijeni rezultati pokazuju da je prosječni broj neprihvatljivih putanja prilično veliki u slučaju VWP zbog velikog broja konvertera talasnih dužina. Pokazano je da PVWP šema ostvaruje iste performanse rutiranja kao VWP šema, ali sa jednostavnijim OXC-ovima i sa mnogo boljim prenosnim performansama. Bogliolo i saradnici [63] su razvili jednostavan model slabljenja za procjenu valjanosti svjetlosnih putanja. Razmatrana su linearna i nelinearna slabljenja fizičkog sloja uz zanemarivanje SPM-a i FWM-a. S obzirom da je optimizacijski problem NP-potpun, korištena su dva *greedy* algoritma (FF-MH, *First-Fit Minimum Hop* i B-OSNR, *Best-Optical Signal to Noise Ratio*). Korištena su i dva metaheuristička algoritma: simulirano kaljenje i tabu pretraživanje koji pokazuju bolje rezultate od *greedy* algoritama.

RWA algoritmi koji uzimaju u obzir slabljenja fizičkog sloja (*PLI-aware*), a koji su opisani u literaturi, se mogu klasificirati na osnovu:

- 1) ograničenja korištenih za verifikaciju izvodljivosti svjetlosne putanje, kao što su OSNR, BER, Q-faktor;
- 2) slabljenja (*impairments*) koja su razmatrana u procjeni izvodljivosti;
- 3) tipa RWA algoritma, kao što je integrisani (u kojem se ruta i talasna dužina izračunavaju zajedno u jednom koraku) ili dvo-koračni (u kojem se ruta i talasna dužina izračunavaju u dva različita koraka jedan iza drugog);
- 4) mrežnog okvira kao što je centralizovani ili distribuirani RWA;
- 5) obima PLI – da li su PLI procijenjeni upotrebom analitičkih modela bilo na centraliziranom serveru ili na distribuirani način, ili su izmjereni u realnom vremenu.

Postoji nekoliko studija koje su razmatrale prvo izračun rute, a potom verifikaciju optičke izvodljivosti putanje [15, 17, 27]. vRamamurthy i saradnici [15] su predložili izravni (*online*) mehanizam proračuna BER-a i integrisali ga u postojeće RWA algoritme. Izvršene su simulacije na primjeru prstenastih i mješovitih mreža i ustanovljeno je upotreba BER baziranih algoritama za primanje poziva (zahtjeva) ima značajan uticaj na performanse stvarnih mreža. Huang i saradnici [17] su predložili dva algoritma: IABP (*Impairment-Aware Best-Path*) i IAFF (*Impairment-Aware First-Fit*). Mrežni sloj pronalazi najkraću putanju i potom koristi BP (*Best-Path*) ili FF (*First-Fit*) tehnike dodjeljivanja talasnih dužina za pronalazak slobodne talasne dužine. Nakon što se pronađu ruta i talasna dužina, vrši se procijenjivanje PMD-a i OSNR-a. Ukoliko PMD i OSNR ispunjavaju definisane zahtjeve, svjetlosna putanja je uspostavljena i zahtjev je prihvaćen. Cardillo i saradnici [27] su razmatrali i nelinearna i linearna slabljenja i predložili dva RWA algoritma bazirana na dvo-koračnoj proceduri, nazvana FF-MH (*First-Fit Minimum Hop*) i FF-LC (*First-Fit Least-Congested*) i jedan integrisani algoritam pod nazivom B-OSNR (*Best Optical Signal to Noise Ratio*). Kod FF-MH algoritma bira se najkraći put i za pronalazak svjetlosne putanje se koristi FF tehnika dodjeljivanja talasnih dužina. Kod FF-LC algoritma, prethodno uređena lista raspoloživih putanja je dinamički razvrstana na osnovu informacija o načinu korištenja talasnih dužina i bira se najmanje zagušena putanja. B-OSNR istovremeno pronalazi rutu i talasnu dužinu ali se kompleksnost linearno povećava sa povećanjem broj ruta i talasnih dužina. Autori rada [35] su razmatrali procijenjena slabljenja u toku izračuna putanje i potom verifikaciju optičke izvodljivosti. Cijene linka su dodijeljene na osnovu analitički izračunatih Q-faktora (na osnovu informacija o slabljenjima dobijenim u okviru faze mrežnog dizajna) i potom je izvršen proračun *k*-najkraćih putanja za rješavanje linearnog problema optimizacije za pronalazanje minimalne cijene svjetlosne putanje. Svjetlosna putanja se uspostavlja ukoliko je Q-faktor svjetlosne putanje iznad definisanog praga.

Tomkos i saradnici [64] su, kao i autori radova pod [33, 60-63], razmatrali slabljenja za vrijeme faze mrežnog dizajna. Uzeli su u obzir efekte CD-a i ulančavanja filtera osim PMD, ASE i CT i razvili ILP formulaciju baziranu na tro-koračnoj proceduri iz [35] za projektovanje metro mreža. Većina dosadašnjih istraživanja i studija razmatra podskup slabljenja zasebno, bez razmatranja njihovih udruženih efekata. Martnezi saradnici [65] su razvili arhitekturu koja uzima u obzir PLI i zasnovana je na GMPLS kontrolnoj ravni. U radu su se fokusirali na korištenje inteligentnih algoritama rutiranja koji uzimaju u obzir nadzirane atribute fizičkog sloja kao ulazne parametere (tj, ograničenja) za proračun putanje. Pandya i saradnici [80] su dizajnirali i implementirali IA-RWA heurističke algoritme bez upotrebe regeneratora.

Većina navedenih istraživanja se odnosila na RWA u jednodomenskim optičkim mrežama sa implicitnom pretpostavkom homogenosti i pojedinačne granularnosti optičkih mreža, tj. svi linkovi prenose isti broj talasnih dužina i sve talasne dužine podržavaju istu bitsku brzinu. U narednom tekstu će se razmotriti problematika PLI-aware dinamičkog rutiranja u višedomenskim i multi-granularnim mrežama (MDMG - *Multi-Domain and Multi-Granularity*). U zavisnosti od dizajna optičke mreže i tipa graničnih svičeva, postoji nekoliko vrsta MDMG mreža. Moguće je projektovati sve-optičke podmreže (optička ostrva) tako da je bilo koja ruta fizički izvodljiva i granični svič opremljen transponderskim interfejsima, gdje se signal podvrgava konverziji u električni oblik [66-73]. Važno je napomenuti da je slanje velike količine informacija preko granica domena ili veoma komplikovano ili se unose dodatni podaci za sinhronizaciju tj. *overhead*. *Overhead* se može smanjiti upotrebom TE (*Traffic Engineering*) agregacije ili agregacije optičkog sloja. Agregacija zahtijeva veliku obradu podataka ili može doći do gubitka informacija što može rezultirati beskorisnom proračunu putanje baziranom na agregaciji. IETF (*Internet Engineering Task Force*) standardizacijsko tijelo je za rješavanje problematike proračuna višedomenske putanje predložilo pristup zasnovan na korištenju elementa za proračun putanje tj. PCE (*Path Computation Element*) [52, 53]. Martinelli i saradnici [78] su predložili heuristički pristup za odabir graničnih čvorova i poboljšane šeme rutiranja u višedomenskim optičkim mrežama.

U optičkim mrežama se uspostavljanje svjetlosne putanje obavlja ili upotrebom integrisanog RWA uz razmatranje PLI ili u dva koraka: izračunavanje CSPF-a (*Constrained Shortest Path First*) i dodjeljivanje talasne dužine. Osim činjenice da proračun rute mora uvažiti uticaj PLI, isti se može smanjiti pažljivim odabirom talasnih dužina u toku RWA procesa. Urađeno je nekoliko studija [39, 75 - 77] o tehnikama dodjeljivanja talasnih dužina koje uzimaju u obzir PLI. Fonseca i saradnici [75] su predložili dvije šeme za dodjeljivanje talasnih dužina koje uzimaju u obzir uticaj FWM: *gramzivo (greedy) dodjeljivanje* i *globalno dodjeljivanje*. Kod prve šeme dodjeljivanja, preslušavanje generisano tekućim pozivima se razmatra samo za kandidovanu talasnu dužinu. Kod globalnog dodjeljivanja, osim preslušavanja generisanog na kandidovanoj talasnoj dužini, razmatrano je preslušavanje generisano na aktivnim konekcijama u mreži. Deng i saradnici [76] su na bazi klasičnih šema dodjeljivanja talasnih dužina razvili nekoliko novih tehnika dodjeljivanja: CTA (*crosstalk aware*) – slučajni izbor, CTA-first-fit, CTA-most-used i CTA-least-used. Na osnovu rezultata simulacija, predlaže se upotreba navedenih algoritama u mrežama srednje veličine i velikim mrežama, kao što su MAN i WAN mreže, gdje je ključna performansa BER. Brandt-Pearce i saradnici [39] su razvili tehniku redanja talasnih dužina FFWO (*First-Fit with Wavelength Ordering*) radi prevazilaženja preslušavanja koje unose susjedni kanali. Algoritam za redanje talasnih dužina bira talasne dužine koje nisu susjedne bilo kojim prethodno korištenim talasnim dužinama. Ako ne postoji takva talasna dužina, bira se talasna dužina koja ima jednu susjednu iskorištenu talasnu dužinu. Proračun rute se vrši pomoću algoritma minimalnog najkraćeg puta. Vjerovatnoća blokiranja korištenjem FFWO tehnike je približna vrijednostima koje se postižu tehnikama dodjeljivanja talasnih dužina koje uzimaju u obzir PLI

[76]. Tehnika dodjeljivanja talasnih dužina zasnovana na FFWSS (*First-Fit Wavelength Spectrum Separation*) je predstavljena u [77]. Kod ove tehnike su zanemarena nelinearna optička preslušavanja i rezultati su zadovoljavajući u slučaju umjerenih i jakih PLI. Kod malih PLI, brzina blokiranja FFWSS je lošija nego kod FFWO zbog lošijih performansi mrežnog sloja. He i saradnici[24] su razvili adaptivnu tehniku dodjeljivanja talasnih dužina, baziranu na razdvajanju spektra talasnih dužina, integrišući nelinearno preslušavanje u model [77]. Adaptivna funkcija komutiranja je integrisana u FFWSS, a radi mogućnosti odabira između FFWO i FFWSS na osnovu jačine PLI.

Kako bi se smanjila potrošnja energije podatkovnih centara, tzv. zeleno rutiranje je privuklo pažnju i postalo predmet istraživanja naučne zajednice. Ebrahimzadeh i saradnici [81] su za potrebe rješavanja RWA problema razvili ILP formulaciju i pet novih pristupa rutiranja koje uzimaju u obzir smanjenje utroška energije u WDM optičkoj mreži.

## 5. OSNOVNA HIPOTEZA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Na bazi relevantnih teorijskih postavki i doprinosa dosadašnjih istraživanja u ovoj oblasti, citiranih u ovoj prijavi, znanja stečenih iz naučnih i naučno-istraživačkih radova, a koji tretiraju problem i predmet disertacionog rada, indirektno su dala dovoljno materijala i podataka kojim je posvećen ovaj rad.

Osnovna hipoteza rada se sastoji u tvrdnji da će poboljšanje performansi transparentnih optičkih mreža biti postignuto uzimanjem u obzir svih linearnih i nelinearnih slabljenja fizičkog sloja u RWA procesu.

Osnovni cilj ovog naučno-istraživačkog projekta je da se, u skladu sa postavljenom hipotezom, predloži novi algoritam za rješavanje problema rutiranja i dodjele talasnih dužina u transparentnim optičkim mrežama kao rješenje za poboljšanje performansi istih rješavajući ovaj problem kao optimizacijski problem integrirajući rješenja i rezultate istraživanja iz oblasti koji tretiraju razmatranu problematiku.

Glavne polazne intencije poduzetih istraživanja u svrhu postizanja postavljenog cilja su:

1. Identifikacija svih linearnih i nelinearnih slabljenja koja se pojavljuju na fizičkom sloju, te procijena njihovog uticaja na mrežne performanse;
2. Proširivanje trenutnog razumijevanja RWA performansi u transparentnim optičkim mrežama upotrebom prikladnog simulatora optičke mreže;
3. Opsežna analiza postojećih RWA algoritama koji uzimaju u obzir slabljenje fizičkog sloja;
4. Kreiranje novog algoritma za rješavanje problema rutiranja i dodjele talasnih dužina u transparentnim optičkim mrežama sa razmatranjem uticaja slabljenja fizičkog sloja;
5. Komparacija predloženog algoritma sa odgovarajućim drugim algoritmima radi utvrđivanja postignutih poboljšanja cjelokupnih performansi za različite scenarije mrežnih topologija i parametre, veliki broj talasnih dužina i alternativne uzorke saobraćaja.

## **6. PRIMIJENJENE NAUČNE METODE**

U skladu sa najboljom praksom naučnoistraživačkog rada za postizanje ciljeva istraživanja, u ovom radu, će biti primijenjena kombinacija više naučnih metoda kojima se može obuhvatiti ukupna složenost problema vezanog za rutiranje i dodjelu talasnih dužina u transparentnim optičkim mrežama sa razmatranjem uticaja slabljenja fizičkog sloja.

Prilikom izrade ove disertacije koristiće se sljedeće metode:

- deskriptivna metoda za opis karakteristika IA-RWA algoritama koji uzimaju u obzir slabljenja fizičkog sloja u transparentnim optičkim mrežama i primijenjenih softverskih alata baziranih na istim namijenjenih je za rješavanje statičkog problema rutiranja i dodjele talasnih dužina pri dizajniranju optičkih mreža sa rutiranjem po talasnim dužinama;
- komparativna metoda za poređenje poznatih IA-RWA algoritama i novog algoritma za rješavanje problema rutiranja i dodjeljivanja talasnih dužina;
- analitičke metode za procjenu uticaja slabljenja fizičkog sloja tj, procjenu kvaliteta signala svjetlosne putanje;
- metode matematičke sinteze za definisanje matematičkog optimizacijskog modela;
- metode modeliranja i simulacije za potrebe verifikacije predloženih rješenja;
- statističke metode za određivanje statistički značajne razlike između predloženog algoritma i drugih relevantnih algoritama;

## **7. PLAN ISTRAŽIVANJA**

Predviđeni plan istraživanja slijedi gore navedene definisane zadatke koje treba izvršiti radi postizanja postavljenog cilja.

Plan istraživanja se sastoji u realizaciji sljedećih zadataka:

- razmatranje i analiza dosadašnjih rezultata iz predmetne oblasti;
- matematička formulacija RWA problema uz procjenu uticaja slabljenja fizičkog sloja;
- kreiranje analitičkog modela za procjenu kvaliteta signala svjetlosne putanje;
- podjela RWA problema na podproblem rutiranja i podproblem dodjele talasnih dužina;
- prijedlog novog RWA algoritma koji uzima u obzir slabljenja fizičkog sloja;
- proračun performansi predloženog algoritma kroz simulacije, za nekoliko predloženih scenarija, čiji rezultati pokazuju uspješno savladavanje fizičkih slabljenja i izvode se bolje od do sada predloženih IA-RWA algoritama;

## **8. OČEKIVANI IZVORNI NAUČNI DOPRINOS DISERTACIJE**

- Analiza i razmatranje uticaja linearnih i nelinearnih slabljenje u mrežama sa rutiranjem po talasnim dužinama.
- Razvijen analitički model za proračun degradacije signala zbog linearnih i nelinearnih izobličenja.
- Definisanje tehnika za smanjenje degradacija performansi uzrokovanih slabljenjima fizičkog sloja.
- Razvoj novog i originalnog algoritma za rješavanje RWA problema u transparentnim optičkim mrežama primjenom heurističkih (metaheurističkih) metoda.
- Primjena u praksi sa trenutnim i budućim tehnološkim ograničenjima.
- Neposredni doprinos disertacije je omogućavanje detaljnog razumijevanja ograničenja i optimizacije transparentnih optičkih mreža uz pokazivanje značaja korištenja IA-RWA algoritama.
- Predloženi matematički okvir i analitički model za razmatrani scenarij saobraćaja će pomoći istraživačko-naučnoj zajednici da dizajniraju i procjene vlastite algoritme.
- Za očekivati je da korišteni algoritam može poslužiti za razvoj komercijalnih varijanti softvera, ali i za simulaciju mrežnih okruženja za različite scenarije tj. matrice saobraćajnih zahtjeva, različite fizičke topologije mreže i broj raspoloživih talasnih dužina uz razmatranje različitih ograničenja fizičkog sloja pri različitim brzinama prenosa.
- Primjenom predloženog algoritma mogu se postići značajna poboljšanja, u poređenju sa do sada predloženim IA-RWA algoritmima, cjelokupnih performansi u većini razmatranih scenarija.

Rezultati doktorske disertacije nedvojbeno predstavljaju originalan i značajan doprinos poznavanju problema rutiranja i dodjele talasnih dužina uzimajući u obzir slabljenja fizičkog sloja u transparentnim optičkim mrežama. Pri tome treba imati u vidu podatak da su ovi rezultati dobijeni primjenom razvijenih analitičkih i heurističkih metoda za rješavanje RWA problema.

Svi navedeni kvaliteti (i kvantiteti) dobijenih podataka, omogućili su vjerodostojna poređenja sa referentnim podacima o komparabilnim dijelovima ranije predloženih algoritama.

U elaboraciji validnosti ostvarenog naučnog doprinosa posebno treba naglasiti konstrukciju i realizaciju poduzetih istraživanja, koje karakterizira:

- precizno postavljena polazna hipoteza i ciljevi koje formulira,
- dosljedno traganje za odgovorima na glavna pitanja koja ona nameću,
- primjena adekvatnih naučnih metoda,
- kritičko razmatranje sopstvenih rezultata u svjetlu referentnih podataka iz adekvatne literature.

## 9. POLAZNA LITERATURA

- [1] H. Zang, J.P. Jue, B. Mukherjee, A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks, *SPIE Opt Netw Mag* 1(1), pp. 47–59, 2000.
- [2] S. Pachnicke, T. Paschenda, P.M. Krummrich, Physical impairment based regenerator placement and routing in translucent optical networks. In: *Proceedings of IEEE/OSA optical fiber communication conference (OFC)*, San Diego, CA, 2008.
- [3] J. Berthold, A.A.M. Saleh, L. Blair, J.M. Simmons, Optical networking: past, present, and future, *J. Lightw. Technol.* 26(9), pp. 1104–1118, 2008;
- [4] M.R.I. Mat Jusoh et al., A review and survey of routing techniques in transparent core optical networks: Evolution, perspectives and frontiers, *2nd International Conference on Electronic Design (ICED)*, pp. 368–373, 2014.
- [5] R. Ramaswami, K.N. Sivarajan, Routing and wavelength assignment in all-optical networks. *IEEE/ACM Trans Netw* 5(3): 489–500, 1995.
- [6] G.N. Rouskas, Routing and wavelength assignment in optical WDM networks. In: Proakis J (ed) *Wiley encyclopedia of telecommunications*. Wiley, New York, 2001.
- [7] S. Azodolmolky, M. Klinkowski, A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks, *Elsevier Comput. Netw.* 53(7), 926–944, 2009;
- [8] G. P. Agrawal, *Fiber Optic Communication Systems*. Wiley Interscience, 1992.
- [9] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*. New York: Academic, 1989.
- [10] B. Mukherjee, *Optical WDM Networks*. Springer, 2006.
- [11] R. Ramaswami and K. Sivarajan, *Optical Networks: A Practical Perspective*. Morgan Kaufman, 2001.
- [12] R. Cardillo, V. Curri, and M. Mellia, Considering transmission impairments in wavelength routed networks, *Proceedings, 9th Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, '05, Milan, Italy, pp. 421–429, Feb. 2005.
- [13] H. Zang, J.P. Jue, B. Mukherjee, Capacity Allocation and Contention Resolution in a Photonic Slot Routing All-Optical WDM Mesh Network. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, no. 12, pp. 1728–1741, 2000.
- [14] S. Pachnicke, T. Paschenda, and P. M. Krummrich, Physical impairment based regenerator placement and routing in translucent optical networks. In: *Proceedings of IEEE/OSA optical fiber communication conference (OFC)*, San Diego, CA, 2008
- [15] B. Ramamurthy, D. Datta, H. Feng, J.P. Heritage, B. Mukherjee, Impact of transmission impairments on the teletraffic performance of wavelength-routed optical networks. *IEEE/OSA J Lightwave Tech* 17(10):1713–1723, 1999.

- [16] H.A. Pereira, D.A.R. Chaves, C.J.A. Bastos-Filho, J.F. Martins-Filho, Impact of physical layer impairments in all-optical networks. In: Proceedings of IEEE international microwave and optoelectronics conference (IMOC), Salvador, Brazil, pp. 536–541, 2007.
- [17] Y. Huang, J.P. Heritage, B. Mukherjee, Connection provisioning with transmission impairment consideration in optical WDM networks with high-speed channels. *IEEE/OSA J Lightwave Tech* 23(3):982–993, 2005.
- [18] T.J. Carpenter, R.C. Menendez, D.F. Shallcross, J.W. Gannett, J. Jackel, A.C. Von Lehmen, Cost-conscious impairment-aware routing. In: Proceedings of IEEE/OSA optical fiber communication conference (OFC) 1, San Diego, CA, 2004.
- [19] R. Cardillo, V. Curri, M. Mellia, Considering transmission impairments in configuring wavelength routed optical networks. In: Proceedings of IEEE/OSA optical fiber communication conference (OFC), Anaheim, CA, 2005.
- [20] S. Zsigmond, G. Németh G, T. Cinkler, Mutual impact of physical impairments and grooming in multilayer networks. In: Proceedings of international conference on optical networking design and modeling (ONDM), Athens, Greece, pp. 38–47, 2007.
- [21] J. He, M. Brandt-Pearce, Y. Pointurier, S. Subramaniam, QoT-Aware routing in impairment-constrained optical networks. In: Proceedings of IEEE global communications conference (GLOBECOM), Washington, DC, pp. 2269–2274, 2007.
- [21] J. He, M. Brandt-Pearce, S. Subramaniam, QoS-aware wavelength assignment with ber and latency guarantees for crosstalk limited networks. In: Proceedings of IEEE international communication conference (ICC), Glasgow, Scotland, pp. 2336 – 2341, 2007.
- [23] A. Marsden, A. Maruta, K. Kitayama, Routing and wavelength assignment encompassing FWM in WDM lightpath networks. In: Proceedings of international conference on optical networking design and modeling (ONDM), Vilanova i la Geltrú, Spain, pp. 1-6, 2008.
- [24] J. He, M. Brandt-Pearce, Y. Pointurier, C.L. Brown, S. Subramaniam, Adaptive wavelength assignment using wavelength spectrum separation for distributed optical networks. In: Proceedings of IEEE international communication conference (ICC), Glasgow, Scotland, pp. 2406 - 2411, 2007.
- [25] M. Farahmand, D. Awduche, S. Tibuleac, D. Atlas, Characterization and representation of impairments for routing and path control in all-optical networks. In: Proceedings IEEE/OSA national fiber optics engineers conference (NFOEC), Dallas, TX, 2002.
- [26] E. Marin, S. Sánchez, X. Masip, J. Solé, G. Maier, W. Erangoli, S. Santoni, M. Quagliotti, Applying prediction concepts to routing on semi transparent optical transport networks. In: Proceedings of IEEE international conference on transparent optical networks (ICTON), Rome, Italy, pp. 32–36, 2007.
- [27] R. Cardillo, V. Curri, M. Mellia, Considering transmission impairments in wavelength routed networks. In: Proceedings of international conference on optical networking design and modeling (ONDM), Milan, Italy, pp 421–429, 2005.



- [28] M.A. Ezzahdi, S. Al Zahr, M. Koubaa, N. Puech, M. Gagnaire, LERP: A quality of transmission dependent heuristic for routing and wavelength assignment in hybrid WDM networks. In: Proceedings on international conference computer communication and networks (ICCCN), Arlington, VA, pp. 125–136, 2006.
- [29] E. Salvadori, Ye Yabin, A. Zanardi, H. Woesner, M. Carcagni, G. Galimberti, G. Martinelli, A. Tanzi, D. La Fauci, Signaling-based architectures for impairment-aware lightpath set-up in GMPLS networks. In: Proceedings of IEEE global communications conference (GLOBECOM), Washington, DC, pp. 2263–2268, 2007.
- [30] X. Yang, B. Ramamurthy, Dynamic routing in translucent WDM optical networks: the intradomain case. *IEEE/OSA J Lightwave Tech* 23(3), pp. 955–971, 2005.
- [31] G. Markidis, S. Sygletos, A. Tzanakaki, I. Tomkos, Impairment aware based routing and wavelength assignment in transparent long haul networks. In: Proceedings of international conference on optical networking design and modeling (ONDM), Athens, Greece, pp 48–57, 2007.
- [32] F. Cugini, N. Andriolli, L. Valcarengi, P. Castoldi, A novel signaling approach to encompass physical impairments in GMPLS networks. In: Proceedings of IEEE global communications conference (GLOBECOM), Dallas, TX, pp. 369–373, 2004.
- [33] I. Tomkos, D. Vogiatzis, C. Mas, I. Zacharopoulos, A. Tzanakaki, E. Varvarigos, Performance engineering of metropolitan area optical networks through impairment constraint routing. *IEEE Commun Mag* 42(8), S40–S47, 2004.
- [34] T. Deng T, S.S. Subramaniam, Adaptive QoS routing in dynamic wavelength-routed optical networks. In: Proceedings of international conference on broadband communication networks and systems (Broadnets), vol 1, Boston, MA, pp. 184–193, 2005.
- [35] P. Kulkarni, A. Tzanakaki, Mas C, I. Tomkos, C.M. Machuka, Benefits of Q-factor based routing in WDM Metro Networks. In: Proceedings of European conference on optical communications (ECOC), vol 4. Glasgow, Scotland, pp. 981–982, 2005.
- [36] G. Markidis, S. Sygletos, A. Tzanakaki, I. Tomkos, Impairment-constraint-based routing in ultralong-haul optical networks with 2R regeneration. *IEEE Photonics Tech Lett* 19(6), pp. 420–422, 2007.
- [37] X. Yang, L. Shen, B. Ramamurthy, Survivable lightpath provisioning in WDM mesh networks under shared path protection and signal quality constraints. *IEEE/OSA J Lightwave Tech* 23(4), pp. 1556–1567, 2005.
- [38] F. Cugini, F. Paolucci, L. Valcarengi, P. Castoldi, Implementing a path computation element (PCE) to encompass physical impairments in transparent networks. In: Proceedings of IEEE/OSA optical fiber communication conference (OFC/NFOEC), Anaheim, CA, pp. 1–3, 2007.
- [39] J. He, M. Brandt-Pearce, RWA using wavelength ordering for crosstalk limited networks. In: Proceedings of IEEE/OSA optical fiber communication conference (OFC/NFOEC), Anaheim, CA, 2006.

- [40] G.S. Pavani, L.G. Zuliani, H. Waldman, M. Magalhães, Distributed approaches for impairment-aware routing and wavelength assignment algorithms in GMPLS networks. *Comput Netw* 52(10), pp. 1905–1915, 2008.
- [41] J.F. Martins-Filho, C.J.A. Bastos-Filho, E.A.J. Arantes, S.C. Oliveira, L.D. Coelho, J.P.G. de Oliveira, R.G. Dante, E. Fontana, F.D. Nunes, Novel routing algorithm for transparent optical networks based on noise figure and amplifier saturation. In: *Proceedings of IEEE international microwave and optoelectronics conference (IMOC)*, vol 2. Iguaza Falls, Brazil, pp. 919–923, 2003.
- [42] A.M. Hamad, A.E. Kamal, Routing and wavelength assignment with power aware multicasting in WDM networks. In: *Proceedings of international conference on broadband communication networks and systems (Broadnets)*, vol 1. Boston, MA, pp. 31–40, 2005.
- [43] E. Salvadori, Ye Yabin, A. Zanardi, H. Woesner, M. Carcagni, G. Galimberti, G. Martinelli, A. Tanzi, D. La Fauci, A study of connection management approaches for an impairment-aware optical control plane. In: *Proceedings of international conference on optical networking design and modeling (ONDM)*, Athens, Greece, pp. 229–238, 2007.
- [45] G.S. Pavani, H. Waldman, Adaptive routing and wavelength assignment with power constraints using ant colony optimization. In: *Proceedings of international telecommunication symposium*, Fortaleza, Brazil, pp. 637–642, 2006.
- [46] A. Morea, N. Brogard, F. Leplingard, J.C. Antona, T. Zami, B. Lavigne, D. Bayart, QoT function and A\* Routing an optimized combination for connection search in translucent networks. *OSA J Opt Netw* 7(1), pp. 42–61, 2008.
- [47] Y. Zhai, Y. Pointurier, S.S. Subramaniam, M. Brandt-Pearce, QoS-aware RWA algorithms for path-protected DWDM Networks. In: *Proceedings of IEEE/OSA optical fiber communication conference (OFC/NFOEC)*, Anaheim, CA, pp. 1-3, 2007.
- [48] K. Lee, M. Shayman, Optical network design with optical constraints in IP/WDM networks. *IEICE Trans Commun* E88(B5), pp. 1898–1905, 2005.
- [49] M.A.C. Lima, AC. Cesar, A.F.R. Araujo, Optical network optimization with transmission impairments based on genetic algorithm. In: *Proceedings of IEEE international microwave and optoelectronics conference (IMOC)*, vol 1. Foz do Iguaçu, Brazil, pp. 361–365, 2003.
- [50] W. Zhang, J. Tang, K. Nygard, C. Wang, REPARE: Regenerator Placement and Routing Establishment in Translucent Networks. *GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1-7, 2009.
- [51] K. Manousakis, K. Christodouloupoulos, E. Kamitsas, I. Tomkos, E. Varvarigos, Offline Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment Algorithms in Translucent WDM Optical Networks. *Journal of Lightwave Technology* 27, 12, pp. 1866-1877, 2009.
- [52] P. Pavon-Marino, S. Azodolmolky, R. Aparicio-Pardo, B. Garcia-Manrubia, Y. Pointurier, M. Angelou, J. Sole-Pareta, J. Garcia-Haro, I. Tomkos, Offline Impairment Aware RWA Algorithms

for Cross-Layer Planning of Optical Networks. *Journal of Lightwave Technology* 27,12, pp. 1763-1775, 2009

[53] N. Sengezer, and E. Karasan, Static Lightpath Establishment in Multilayer Traffic Engineering Under Physical Layer Impairments. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking* 2, 9, pp. 662-677, 2010.

[54] R. Aparicio-Pardo, B. Garcia-Manrubia, M. Klinkowski, P. Pavon-Marino, D. Careglio, Offline Impairment-Aware RWA and Regenerator Placement in Translucent Optical Networks. *Journal of Lightwave Technology* 29,3, pp. 265-277, 2011.

[55] K.M. Katrinis, and A. Tzanakaki, On the Dimensioning of WDM Optical Networks with Impairment-Aware Regeneration, *IEEE/ACM Transactions* 19, 3, pp. 735-746, 2011.

[56] N. Sengezer, E. Karasan, Multi-layer Virtual Topology Design in Optical Networks Under Physical Layer Impairments and Multi-hour Traffic Demand, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking* 4, 2, pp. 78-91, 2012.

[57] K. Christodoulopoulos, K. Manousakis, E. Varvarigos, M. Angelou, Considering Physical Layer Impairments in Offline RWA, *IEEE Network*, 23, 3, pp. 26-33, 2009.

[58] E. Varvarigos, K. Manousakis, K. Christodoulopoulos, Offline Routing and Wavelength Assignment in Transparent WDM Networks, *IEEE/ACM Trans. on Networks* 18, 5, pp. 1557-1570, 2010.

[59] J. Sole, S.S. Subramaniam, D. Careglio, S. Spadaro, Cross-Layer Approaches for Planning and Operating Impairment-Aware Optical Networks, *Proceedings of the IEEE* 100, 5, pp. 1118-1129, 2007.

[60] J. Y. Youe, S. W. Seo, An Algorithm for Virtual Topology Design in WDM Optical Networks under Physical Constraints, *Proc. IEEE ICC* 1999, vol. 3, pp. 1719-1723, 1999.

[61] M. Ali, L. Tancevski, Impact of Polarization Mode Dispersion on the Design of Wavelength-Routed Networks, *IEEE Photonics Technol.Lett.*, vol. 14, No. 5, pp. 720-722, 2002.

[62] R. Sabella et al., Impact of Transmission Performance on Path Routing in All-Optical Transport Networks, *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 11, pp. 1965-1972, 1998.

[63] G. Bogliolo et al., "Considering Transmission Impairments in RWA Problem: Greedy and Metaheuristic solutions," *Proc. OFC* 2007.

[64] M. Ali et al., Routing and wavelength assignment with power considerations in optical networks, *Computer Communications*, no. 32, pp. 539-555, 2000.

[65] R. Martinez et al., On-line ICBP in a Transparent GMPLS Network: A Reality Check, *WGN5: V Workshop in G/MPLS networks*, 2006.

[66] J. Strand et al., Impairments and Other Constraints on Optical Layer Routing," *RFC* 4054, 2005.

- [67] X. Yang and B. Ramamurthy, Inter-Domain Wavelength Routing in the Next-Generation Translucent Optical Internet Backbones, OSA J. Optical Networking, vol. 3, no. 3, pp. 169-187, 2004.
- [68] A. Farrel et al., A Framework for Inter-Domain Multiprotocol Label Switching Traffic Engineering, RFC 4726, 2006.
- [69] A. Farrel et al., Inter domain Multiprotocol Label Switching (MPLS) and Generalized MPLS (GMPLS) Traffic Engineering - RSVP-TE Extensions, RFC 5151, 2008.
- [70] J. P. Vasseur et al., A Per-domain path computation method for establishing Inter-domain Traffic Engineering (TE) Label Switched Paths (LSPs), RFC 5152, 2008.
- [71] P. Pavarangkoon, E. Oki, Survivable lightpath provisioning in multi-domain optical networks, HPSR, 2014 IEEE 15th International Conference on, pp. 20-205, 2014.
- [72] R. Lu et al., Domain-level-based routing algorithm in multidomain WDM optical network, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking vol. 5, no. 5, pp 532-543, 2013.
- [73] J. Zao et al., Inter-domain QoT-aware RWA for translucent optical networks, International Conference on Computing, Networking and Communications, San Diego, CA, pp. 1102-1106, 2013.
- [74] JL. Le Roux, Path Computation Element Communication Protocol (PCECP) Specific Requirements for Inter-Area MPLS and GMPLS Traffic Engineering, RFC 4927, 2007.
- [75] I. E. Fonseca et al., Algorithms for FWM-aware Routing and Wavelength Assignment, Proc. IEEE IMOC 2003, vol. 2, no. 2, pp. 707-712, 2003.
- [76] T. Deng et al., Crosstalk-Aware Wavelength Assignment in Dynamic Wavelength-Routed Optical Networks, Proc. Broadnets 2004, pp. 140-149, 2004.
- [77] J. He and M. Brandt-Pearce, Dynamic Wavelength Assignment using Wavelength Spectrum Separation for Crosstalk Limited Networks, Proc. IEEE Broadnets 2006, pp. 1-9, 2006.
- [78] E. Martinelli et al., A heuristic approach for border node selection and traffic routing in multi-domain optical networks, Optical Switching and Networking, vol. 15, pp. 87-96, 2015.
- [79] S.C. Tan, F.M. Abbou, The effect of Stimulated Raman Scattering (SRS) in Routing and Wavelength Assignment (RWA) in WDM mesh and ring topologies, Optik - International Journal for Light and Electron Optics, vol. 123, Issue 21, pp. 1934-1937, 2012.
- [80] R.J. Pandya, V. Chandra, D. Chadha, Impairment aware routing and wavelength assignment algorithms for optical WDM networks and experimental validation of impairment aware automatic light-path switching, Optical Switching and Networking, vol. 11, Part A, pp. 16-28, 2014.

[81] A. Ebrahimzadeh, A.G. Rahbar, B. Alizadeh, QoS aware green routing and wavelength assignment in core WDM networks, Journal of Network and Computer Applications, vol. 53, pp. 1-13, 2015.