

Prostorsko multipleksiranje v vlakenskih optičnih komunikacijah

Jure Sušin¹, Vesna Eržen¹, Maja Atanasovska¹, Jan Fišer², Blaž Lavrič¹, Aljaž Hrastar¹, Manca Gale², Aljaž Bešter Cerar³, Katarina Čebela⁴, Luka Perpar⁴, Leon Kocijančič¹, Ahmed Samir¹, Luka Bogataj¹, Jurij Tratnik⁵, Matej Švigelj³, Boštjan Batagelj¹

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Univerza v Ljubljani, Fakulteti za matematiko in fiziko, Jadranska ulica 19, 1000 Ljubljana, Slovenija

³ Univerza v Ljubljani, Ekonomska fakulteta, Kardeljeva ploščad 17, 1000 Ljubljana, Slovenija

⁴ Optacore, d. o. o., Trpinčeva 37A, 1000 Ljubljana, Slovenija

⁵ InLambda BDT, d. o. o., Tovarniška cesta 26, 5270 Ajdovščina, Slovenija

E-pošta: bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Povzetek. Ker promet v podatkovnih omrežjih nenehno narašča, so oziroma bodo potrebne nadgradnje optičnih povezav v jedrnem delu omrežij in medmestnih povezavah. Razvoj novih optičnih komunikacijskih načinov je tudi multipleksiranje optičnih signalov v prostorski dimenziji, ki je do zdaj še edina neuporabljena fizikalna dimenzija obdelave optičnih signalov. Prostorsko multipleksiranje ima od novih pristopov z vidika povečanja prenosnih zmogljivosti optičnega vlakna zelo velik potencial. Zahtevana je uporaba posebnih optičnih vlaken, na primer nekajrodovnih ali večjedrnih. Poleg posebnih optičnih vlaken je za praktično integracijo pomembna izvedba optičnih sklopov, z vidika ekonomske in energetske učinkovitosti sistemov pa predvsem izvedba optičnih ojačevalnikov. Rezultati različnih poskusov so obetavni, nekatere analize pa že kažejo na ekonomsko in energetsko upravičenost uporabe tehnologije.

Ključne besede: prostorsko multipleksiranje, nekajrodovno optično vlakno, večjedrno optično vlakno, optični ojačevalniki

Space division multiplexing in optical fiber communications

Due to the constantly growing data information, traffic upgrades of the fiber optic connections in the core part of the network and the intercity connections are needed. One of the newly developed methods of optical communications is also the multiplexing optical signals in the spatial dimension, which is so far the only unused physical dimension of processing the optical signals. Spatial multiplexing is one of the new approaches which has a very big potential for increasing the transmission capacity of optical fibers. The technology requires the use of special optical fibers, such as the few-mode or multi-mode fibers. For a practical integration, execution of optical components, in addition to the special optical fibers, is important, and for the economic effectiveness and energy efficiency of the systems, execution of optical amplifiers is important. Results of various experiments are promising and some researches already show the economic and energy justifications of using the technology.

Keywords: space-division multiplexing, few-mode optical fiber, multi-core optical fiber, optical amplifiers

1 UVOD

Optični telekomunikacijski sistemi, ki temeljijo na uporabi enorodovnega vlakna, so se v zadnjih desetletjih uvedli v široko uporabo [1]. Napredek prenosne

zmogljivosti tovrstnih telekomunikacijskih zvez se bo po vsej verjetnosti kmalu ustavil. V zadnjem desetletju se je namreč večanje zmogljivosti sistemov, temelječem na gostem valovnodolžinskem multipleksiranju (ang. Dense Wavelength Division – DWDM), precej upočasnilo [2]. Ob trenutnem trendu povečevanja omrežnega prometa pri enakih prenosnih razdaljah bomo že čez nekaj let potrebovali precej večjo spektralno učinkovitost sistemov, kot jo omogoča uporaba današnjih sistemov in kot jo bo omogočil predviden napredek razvoja sedanjih tehnologij. Nedavne raziskave so pokazale, da se sodobnim sistemom DWDM lahko dodatno poveča spektralna učinkovitost na račun zmanjšanja prenosne razdalje. Razlog je v relativno majhni toleranci tovrstnih sistemov na šum in presluh. [3]

Eden obetajočih pristopov povečanja zmogljivosti optičnih povezav je uporaba večvhodnih in večizhodnih (angl. Multiple-Input Multiple-Output – MIMO) sistemov [4]. Ti so že dobro uveljavljeni v radijskih komunikacijah, kjer se uporablja več oddajnih in več sprejemnih anten. MIMO v komunikacijah z optičnimi vlakni za prenos uporablja večje število vzporednih optičnih komunikacijskih kanalov v skupnem prenosnem mediju, torej optičnem vlaknu. Optični MIMO pomeni prostorsko multipleksiranje (angl.

Space-Division Multiplexing – SDM) optičnih signalov, katerega osnovna ideja je predstavljena v drugem poglavju. Prenos prostorsko multipleksiranih optičnih signalov poleg posebnih vlaken zahteva uporabo posebnih naprav in elementov za povezovanje teh posebnih vlaken z obstoječimi standardnimi enorodovnimi vlakni in z drugimi elementi, ki so opisani v tretjem poglavju. Bistveni sestavni deli SDM sistemov so tudi posebni optični ojačevalniki. Za uporabnost in donosnost morajo sistemi SDM omogočati povečanje omrežnih zmogljivosti s podobno stroškovno in energetske učinkovitostjo, kot je bila dosežena z vpeljavo tehnologije DWDM, na kar se osredinja četrto poglavje. Zaključek preglednega članka povzame tehnološke in ekonomske vzgibe in prikaže izzive, s katerimi se še mora srečati prostorsko multipleksiranje za praktično uveljavitev v optičnih komunikacijskih sistemih.

2 IDEJA SISTEMA S PROSTORSKIM MULTIPLEKSIRANJEM

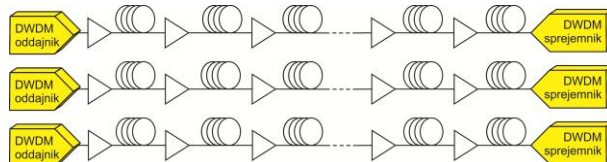
Današnja podatkovna omrežja temeljijo na uporabi standardnega enorodovnega optičnega vlakna in tehnologije DWDM. Visoka prenosna zmogljivost optičnega komunikacijskega sistema se lahko doseže z eno komunikacijsko linijo, kot je prikazano na sliki 1. Pri tem mora imeti sistem visoko spektralno učinkovitost. Zaradi slabljenj v optičnem vlaknu je treba za zagotavljanje visoke spektralne učinkovitosti na dolge razdalje ohraniti moč optičnega signala z ustreznimi optičnimi ojačevalnimi elementi. Sodobni sistemi DWDM z visoko spektralno učinkovitostjo imajo zaradi manjše tolerance na šum spontane emisije v optičnih ojačevalnikih, faznega šuma v laserjih, motenj medkanalnega presluha in ločljivosti analogno-digitalnih pretvornikov manjši doseg kot predhodni. Zato se ojačevalna linija deli na odseke z elementi za regeneracijo signalov – (angl. Optical-Electrical-Optical – OEO) regeneratorji. Z daljšanjem optične povezave število OEO regeneratorjev narašča.



Slika 1: Visoko spektralno učinkovit sistem na standardnem enorodovnem vlaknu, ki uporablja regeneratore OEO

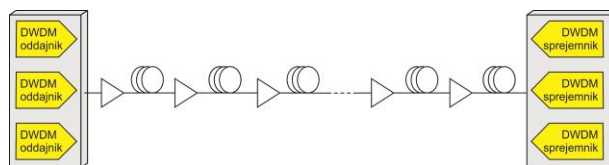
Enako prenosno zmogljivost komunikacijskega sistema je mogoče doseči z vzporednim dodajanjem standardnih enorodovnih optičnih vlaken, kot prikazuje slika 2. Posamezna prenosna linija ima nižjo, lažje dosegljivo spektralno učinkovitost, vsota vseh pa pomeni skupno zeleno spektralno učinkovitost prenosa. Ker je bitni pretok na posamezni liniji nižji, so ojačevalne stopnje lahko nameščene redkeje kot pri sistemu z visoko spektralno učinkovitostjo na sliki 1. Kljub odpravi regeneracij vzporedni kanali pomenijo dodatne stroške pri gradnji infrastrukture in potrebo po dodatni komunikacijski opremi. Ta za svoje delovanje

povzroči dodatno porabo električne energije. Tako stroški prenosa enega informacijskega bita ostajajo enaki ali pa se celo povečajo. To ni v skladu z željami telekomunikacijskih operaterjev, ki od sodobnih sistemov želijo več prenesenih informacij za nižjo ceno.



Slika 2: Sistem z več vzporednimi standardnimi enorodovnimi optičnimi vlakni

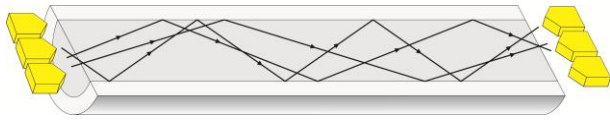
Danes se izraz prostorskega multipleksiranja nanaša na tehnike za prenos več prostorsko ločenih tokov v eni posebni strukturi optičnega vlakna [5]. Zato rešitve z več vzporednimi vlakenskimi sistemi (slika 2) ne moremo označiti kot pravo prostorsko multipleksiranje. Sistem s prostorskim multipleksiranjem je prikazan na sliki 3. Tudi pri prostorskem multipleksiranju iz slike 3 ima posamezna komunikacijska linija lažje dosegljivo spektralno učinkovitost kot spektralno visoko učinkovit sistem z enim vlaknom. Manjšo spektralno učinkovitost posamezne komunikacijske linije sistem s prostorskim multipleksiranjem kompenzira z vpeljavo več komunikacijskih linij v eni posebni strukturi optičnega vlakna. Skupna spektralna učinkovitost je tako enaka ali celo večja kot pri sistemu z enim vlaknom (slika 1). V primerjavi s standardnimi vlakni prednosti povezave SDM z daljšanjem prenosnih razdalj in večjimi bitnimi hitrostmi prihajajo čedalje bolj do izraza in so resna alternativa za zagotavljanje prenosnih potreb in zniževanje operativnih stroškov [5].



Slika 3: Sistem z več vzporednimi, prostorsko ločenimi kanali v eni vlakenski strukturi

Prvi pogoj za prenos optičnih signalov SDM po enem vlaknu je, da posebno vlakno omogoča razširjanje takšnih signalov. Po vzoru že uveljavljene tehnologije izkoriščanja prostorskega mnogostezja v radijskih komunikacijah se tudi v optičnih vlakenskih komunikacijah pripravlja ta tehnologija. Glede na vrsto optičnega vlakna poznamo več načinov realizacije mnogostezja, največ pa obetata dva tipa posebnih struktur: nekajrodovno optično vlakno (ang. Few-Mode Fiber – FMF) in večjedrno optično vlakno (ang. Multi-Core Fiber – MCF) [6]. Osnovni princip delovanja obeh vlaken je prikazan na slikah 4 in 5. Ti dve vrsti posebnih vlaken, ki vsako na svoj način omogočata mnogostezje v strukturi vlakna, veljata za najbolj realen korak izvedbe optičnih povezav z zeleno prenosno

zmogljivostjo v območju Ebit/s·km, kar bo potrebno v prihodnjih letih [7].



Slika 4: Pri nekajrodovnem optičnem vlaknu rodovna disperzija učinkuje kot mnogostezje v prostoru

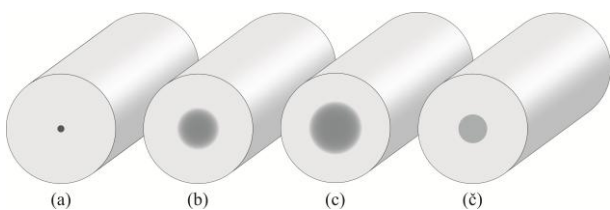


Slika 5: Pri večjedrnem optičnem vlaknu vzporedno potujoči signali po ločenih poteh povečujejo zmogljivost celotne optične komunikacijske zveze

3 ELEMENTI IN TEHNOLOGIJE PROSTORSKEGA MULTIPLEKSIRANJA

3.1 Optična vlakna

Enorodovno optično vlakno (slika 6a) je danes edini prenosni medij za visoko zmogljive Tbit/s telekomunikacijske zveze. Po njem se širi zgolj osnovni rod optičnega valovanja. Mnogorodovno optično vlakno s standardnim premerom jedra 50 μm (slika 6b) ali 62,5 μm (slika 6c) in premerom obloge 125 μm pa lahko v nasprotju z enorodovnim vlaknom prenaša več kot sto različnih rodov optičnega valovanja. Ker ima vsak od rodov svojo hitrost razširjanja, v prenosno pot skupaj vnašajo pojav razširitve prenosnega signala. Ta pojav se imenuje mnogorodovna disperzija in je poleg visoke proizvodne cene glavni vzrok, da se je praktična uporaba mnogorodovnih vlaken v zadnjih desetletjih precej zmanjšala.



Slika 6: Standardno enorodovno enojedrnno optično vlakno (a), standardno mnogorodovno optično vlakno (b in c) in nekajrodovno optično vlakno (č)

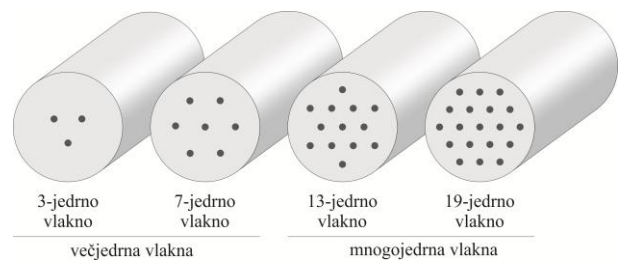
Vse kaže, da se za SDM standardna mnogorodovna optična vlakna ne bodo uporabljala. Prenašajo namreč preveč rodov, ki jih je s trenutno tehnologijo težko obvladati. Za SDM so primernejša že omenjena nekajrodovna optična vlakna (slika 6č). Ta imajo v primerjavi z mnogorodovnimi vlakni ustrezno manjšo dimenzijo jedra in s tem omogočajo razširjanje manjšega števila rodov optičnega valovanja. Za ločene podatkovne kanale se danes najpogosteje uporablja do deset rodov. Odpravljanje rodovnih zakasnitev z digitalnim signalnim procesiranjem je namreč v tem

primeru manj kompleksno, rodovna selektivnost pa je boljša in slabenje manjše [8]. Izkaže se, da je FMF uporaben v praksi, če je izpolnjen vsaj eden od dveh pogojev. Prvi pogoj je, da mora biti sklapljanje posameznih rodov (presluh) v skupnem jedru dovolj majhno. Drugi pogoj je omejitev rodovnih zakasnitev. Če je rodovna zakasnitev dovolj majhna, jo je s prilagajanjem na sprejemni strani mogoče odpraviti [9].

V nasprotju s FMF imajo MCF (za MCF z velikim številom jeder se uporablja izraz mnogojedrna optična vlakna) v oblogi vlakna vdelanih več enorodovnih jeder. Struktura takega vlakna je prikazana na sliki 7. MCF najpogosteje vsebujejo od 3 do 7 jeder, medtem ko mnogojedrna vlakna vsebujejo tudi do 19 enorodovnih jeder.

Že pred približno 30 leti so bili na Japonskem v Furakawa Electric narejeni prvi poskusi izdelave MCF za namene kabla z visoko gostoto [10], ki pa žal ni bil primeren za telekomunikacije. Takratne vlakenske strukture namreč niso bile optimizirane za SDM.

Prenos SDM po MCF je lahko istosmeren ali po sosednjih jedrih poteka v različne smeri. To zmanjšuje največji problem MCF, ki je presluh oziroma intenzivnost sklapljanja signalov med posameznimi jedri. Ker del optične moči prehaja skozi oblogo v sosednja jedra, se sedanji razvoj MCF najbolj usmerja v razporeditev in razdaljo med posameznimi jedri [11].



Slika 7: Primer dveh večjedrnih in dveh mnogojedrnih optičnih vlaken

Glede vpliva presluha MCF delimo na sklopljena in nesklopljena. Razporeditev jeder je v sklopljenih vlaknih taka, da se posamezni signali močno in/ali šibko združujejo oziroma povezujejo med sabo. Dovoljujejo večjo akumulacijo presluha, na sprejemni strani pa zahtevajo digitalno procesiranje za odpravljanje motenj in obnavljanje s koherentnimi sprejemniki. V nesklopljenih MCF se posamezno jedro uporablja kot individualni valovod (svetlovod) in ne dopušča mešanja med posameznimi signali. Za popolno odpravo presluha je potreben dovolj velik razmik med jedri. Poleg razmika je za uporabnost vlaken in čim boljše optično razmerje signal/šum pomembna tudi velika efektivna površina jeder [6].

Posebna vlakna, ki omogočajo SDM, še nimajo standardiziranih zunanjih premerov, kot je na primer 125 μm pri standardnem enojedrnem vlaknu. Izkaže se, da so praktično primerni zunanji premeri vlakna manjši od 200 μm. Pri večjih premerih se namreč poveča

možnost lomljenja stekla [9]. Pregled literature pokaže, da se številni raziskovalci nagibajo k temu, da bi bil tudi pri posebnih optičnih vlaknih za SDM standardiziran zunanji premer 125 μm , saj bi to bistveno poenostavilo izdelavo konektorjev in uvedbo tehnologije, ki bi omogočala trajno varjenje vlaken.

Prav tako MCF še nimajo standardiziranih razmikov med jedri, čeprav obstaja že nekaj resnih predlogov [12], ki predvidevajo ustrezen razmik glede na število vlaken.

Pri večjedrnih strukturah se pogosto uporabljajo 7-jedrna vlakna s heksagonalno ureditvijo, ki ima eno centralno jedro in šest zunanjih. Presluh ima največ vpliva na jedro v sredini, ker meji na vseh šest sosednjih jeder. V nekaterih primerih se iz tega razloga za prenos podatkovnih signalov uporabljajo le zunanja jedra.

Za večjo prenosno zmogljivost MCF je zaželeno čim večje število jeder v omejenem prostoru obloge vlakna, kar pomeni težje obvladovanje presluha in z njim povezanih izgub. Pri 12-jedrnem vlaknu z razporeditvijo jeder v obliki enega kroga posamezno jedro meji le na dve sosednji. S tem je presluh dokaj dobro omejen [13]. Devetnajstjedrna vlakna z majhnim, 200 μm zunanjim premerom, imajo bistveno večji vpliv presluha in zato prenosno razdaljo omejeno na približno 10 km [9]. Boljša izoliranost posameznih prenosnih kanalov se doseže z večjim razmikom in manjšim premerom jeder ter z jedri, ki so podprta z luknjami ali jarki [14].

Poleg omenjenih FMF in MCF pa so kot zadnja stopnja razvoja mišljena MCF z nekajrodovnimi jedri. SDM se pri tovrstnih vlaknih izvaja s pomočjo večpotja po različnih jedrih, poleg tega pa še v vsakem jedru s pomočjo rodovnega multipleksiranja. Tovrstna kombinacija še dodatno poveča spektralno učinkovitost sistema.

3.2 Elementi za multipleksiranje

Na oddajni in sprejemni strani prenosne SDM vlakenske strukture je potreben optični sklopnik, ki omogoča multipleksiranje signalov na FMF ali MCF. Obstajajo različne tehnologije izdelave SDM sklopnikov, ki so našteje v nadaljevanju.

Rodovno multipleksiranje se lahko izvaja z matricami iz tekočih kristalov, različnimi vlakenskimi sklopniki (ki temeljijo na vlakenski optiki) ali z lečami pri prostozačni optiki. Rodovni multipleksirji morajo imeti majhno rodovno slabljenje, saj to zmanjšuje zmogljivost prenosa. Prav tako morajo imeti majhno vstavitevno slabljenje za realizacijo daljših povezav z manj ojačevalniki.

Vlakenski sklopniki imajo v primerjavi s preostalima pristopoma majhne izgube in relativno majhno kompleksnost naprav, vendar so njihove lastnosti zelo odvisne od valovne dolžine. Primeren kandidat za izvedbo vlakenskega sklopa je prostorski in polarizacijski tridimenzionalni valovodni multiplekser rodov [15]. Sestavljen je iz več enorodovnih svetlovodov, ki so nameščeni tesno skupaj.

Z večjedrnim (de)multipleksiranjem se izvede prehod svetlobe iz enojedrnih vlaken v posamezna jedra MCF in nasprotno. Zaradi različnih dimenzij MCF, ki se v primerjavi z enojedrnimi med seboj precej razlikujejo (med 125 in 250 μm za zunanji premer in 30 do 50 μm razmika med posameznimi jedri), je povezovanje vlaken bolj zapleteno kot pri rodovnem multipleksiranju. Glede na vrsto sklopa poznamo dva načina realizacije – direktno (kompaktno) metodo in indirektno metodo.

Kompaktne metode spojev, ki poznajo dve rešitvi, vnašajo večje izgube in presluh kot indirektni sklop. Optični vmesniki s tanjšanjem in zlivanjem enojedrna vlakna združijo na dimenzijo, ki ustreza posameznemu jedru v MCF. Ločeno izdelani valovodni moduli iz majhnega bloka stekla ali polimera pa imajo z laserjem v 3D obliki vdolana posamezna jedra.

Z indirektno tehniko, ki namesto kontaktnih spojev uporablja leče v prostozačni optiki, je lahko zaradi različnih dimenzij MCF izvedba sklopa fleksibilnejša (po mnenju nekaterih študij tudi primernejša). Omogoča lažjo razširljivost za povezovanje vlaken z večjim številom jeder in lažjo izvedbo sklopa z vlakni različnih struktur [16]. Leča žarke, ki izstopajo iz MCF, usmeri v snop žarkov, katerih medsebojna razdalja se z oddaljevanjem od leče povečuje. Večja razdalja med žarki nato omogoči učinkovito sklapanje posameznega žarka v enorodovno vlakno.

3.3 Optični ojačevalniki

Optični ojačevalnik je ključni element za prenos z optičnim vlaknom na dolge razdalje brez vmesnega pretvarjanja optičnih signalov v električne in nasprotno. Poleg oddajnikov in sprejemnikov so v optičnih sistemih ti največji porabniki električne energije. Za komercialno učinkovitost sistemov SDM so potrebni cenovno ugodni in učinkoviti ojačevalniki, ki so zmožni sočasnega ojačenja vseh prenosnih kanalov SDM. Proizvodni stroški in njihova energetska poraba morajo biti manjši kot pri navadnih ojačevalnikih, potrebnih za enako število prenašanih kanalov. Učinkovitost optičnih ojačevalnikov je odvisna od ojačenja, šumnega števila, presluha, popačenja in zahtevnosti njihove izdelave. Pomembna je tudi združljivost s tehnologijo DWDM.

Erbijevi vlakenski ojačevalniki (angl. Erbium Doped Fibre Amplifier – EDFA), ki se uporabljajo v optičnih sistemih DWDM, so primerni tudi za optične sisteme SDM. Njihovo povezovanje z vlakni SDM je odvisno od uporabljene tehnologije FMF in MCF. Njihova učinkovitost je pogojena z namenom njihove uporabe. Lahko se namreč uporabljajo kot predojačevalniki ali pa kot močnostni ojačevalniki.

V predojačevalni fazi na sprejemni strani optične prenosne linije je pomembno zagotoviti čim večjo občutljivost ojačevalnika. Gre predvsem za ojačenje signalov nizkih moči. Pri močnostnem ojačenju na oddajni strani pa se povečuje moč optičnih signalov na relativno visoke nivoje, ki so potrebni na vhodu v optično vlakno. V tem primeru je torej občutljivost

sekundarnega pomena, pomembno pa je zagotoviti dovolj veliko izhodno moč optičnega ojačevalnika.

Na učinkovitost optičnega ojačevalnika vpliva tudi poraba moči črpalnih laserjev. Ta je odvisna od uporabljenega tipa optičnega vlakna, ki omogoča mnogostezje. Če se EDFA uporablja kot predojačevalnik, je njegova poraba moči z FMC nižja za okoli 30 odstotkov kot pri uporabi MCF. Izkazuje se, da je tudi pri močnostnem ojačenju z EDFA poraba moči manjša pri uporabi FMF. Pri močnostnem ojačenju je optimizacija porabe moči pomembna zaradi visokih nivojev izhodnih moči optičnih signalov [17]. V obširnem in mednarodno priznanem projektu MODEGAP so pred letom predstavili enega prvih optičnih sistemov z FMF in nekajrodovnimi EDFA za 1020 km dolg prenos [18]. Taki ojačevalniki, združljivi s 3- ali 6-rodovnimi vlakni, so od konca lanskega leta kot prvi svoje vrste tudi že v komercialni prodaji, predvsem za nadaljnje raziskave.

Velik mejnik na področju optičnih ojačevalnikov za sisteme SDM so večjedrni EDFA. Glede na izvedbo črpanja obstajata dve vrsti omenjenih ojačevalnikov. Ojačujejo se lahko signali vseh jeder hkrati, ali pa se ojačuje signal vsakega jedra posebej. Za učinkovitejše velja ojačenje vseh optičnih signalov hkrati v vseh jedrih, ki ima pri nekaterih realizacijah tudi večjo pasovno širino [19], [20].

4 UČINKOVITOST SISTEMA SDM

Sistem SDM lahko v pravi obliki realizacije zagotavlja zmanjšanje porabe električne energije v primerjavi z obstoječo tehnologijo. Energetska učinkovitost je danes pomemben dejavnik za zmanjšanje stroškov podatkovnega prenosa in vpliva na okolje. Spodnja meja porabe električne energije je določena z delovanjem optičnih ojačevalnikov, oddajnikov in sprejemnikov. Sistemska učinkovitost je določena z izgubami v optičnih vlaknih, dolžino povezav in šumom spontane emisije v optičnih ojačevalnikih. Število potrebnih ojačevalnikov pomeni neposredno porabo električne energije. Učinkovitejša je uporaba vzporednih prenosnih poti, kot pa večanje števila regeneracijskih elementov za obnavljanje optičnih signalov. Ni pa rečeno, da uporaba vzporednih prenosnih poti zmanjša prenosne stroške. Za učinkovitost sta zelo pomembni integracija vlakenske strukture in uporaba skupnih naprav za večje število prenosnih poti.

Izsledki študij delovanja 12-jedrnega ojačevalnika in 12 enojedrnih ojačevalnikov kažejo, da je lahko sistem z MCF in ojačevalniki učinkovitejši že zgolj zaradi operativnih stroškov ojačevalnikov [21]. Pri povsem izkoriščenih MCF vlaknih lahko pomeni približno 15 odstotkov boljše ekonomsko upravičenost v primerjavi z enojedrnimi vlakni enakih prenosnih zmogljivosti [22].

Podoben, do približno 15 odstotkov boljši učinek delovanja kažejo analize stroškov prenosa s FMF in Ramanovimi ojačevalniki v primerjavi z enorodovnimi

vlakni [23]. Analiza je zajemala 1000 in 3000 km dolgi optični povezavi v C- in L-območju optičnega spektra.

5 SKLEP

Prispevek prikazuje osnovno idejo uporabe prostorskega multipleksiranja v optičnih telekomunikacijah, nekatere glavne principe delovanja takih sistemov in potrebno opremo. Glavni cilj uporabe tehnologije s prostorskim multipleksiranjem je povečanje prenosnih zmogljivosti optičnih povezav v jedrnem delu podatkovnih omrežij glede na tehnologijo DWDM. Tako se je mogoče izogniti trčenju v tako imenovani vlakenski zid, saj se napredek na področju tehnologije DWDM upočasnjuje.

Prednost MCF pred FMF je v boljši izoliranosti prenosnih kanalov, slabost pa je kompleksnejša strojna oprema. FMF omogočajo lažjo izvedbo svetlobnih sklopov in boljše možnosti za izvedbo skupnega ojačenja. Za odpravljanje presluha se pri sprejemu uporablja digitalno procesiranje.

Pri obeh tehnologijah je treba za komercialno uporabnost premostiti še precej ovir. Ali bo želeni učinek dosežen, pa je zelo odvisno od tipa vlakna, ki mora navsezadnje zagotavljati praktično uporabo in nizke stroške izdelave.

Poleg tega se pričakuje čim lažja nadgradnja obstoječih sistemov na sistem SDM tako z vidika strojne opreme kot že zgrajene infrastrukture. Ključni izzivi bodo omejitve presluha pri dolgih optičnih povezavah, izbira modulacijskih postopkov in drugih tehnik obdelave signalov, vrste spojev in povezav omrežnih komponent ter usmerjanje prometa v vozliščnih podatkovnih centrih.

Čeprav za zdaj večina raziskav prostorskega multipleksiranja v optičnih telekomunikacijah vsebuje le prenos med dvema točkama, se delo usmerja tudi v strategije preklapljanja in naprave, ki bodo omogočale fleksibilno in prilagodljivo usmerjanje v vozliščnih optičnih omrežij.

Poleg večje prenosne zmogljivosti mora tehnologija za praktično uporabnost dati tudi boljše ekonomsko in energetsko učinkovitost delovanja optičnih sistemov. Ker vrsta optičnega vlakna vpliva na izbiro strojne opreme, bo treba najti kompromis med stroški izdelave vlakna in porabo moči ter zahtevnostjo izdelave strojne opreme. Napredek optične tehnologije za komunikacijo s posebnimi FMF in MCF je viden in vse kaže, da lahko doseže tudi komercialno uporabnost.

ZAHVALA

Delo je delno financirala Evropska unija iz Evropskega socialnega sklada. Projekt »Večjedrna optična vlakna« se izvaja v okviru programa »Po kreativni poti do praktičnega znanja«, Operativni program razvoja človeških virov za obdobje 2007–2013, 1. razvojna prioriteta: »Spodbujanje podjetništva in prilagodljivosti« ter prednostne usmeritve 1.3 »Študentske sheme« v okviru potrjene operacije »Po kreativni poti do praktičnega znanja«.

LITERATURA

- [1] Matjaž Vidmar, »Optical-fiber communications: components and systems«, Informacije MIDEM, ISSN 0352-9045, 2001, letn. 31, št. 4, str. 246–251.
- [2] P. J. Winzer, »Optical networking beyond WDM«, IEEE Photonics Journal, vol. 4, no. 2, pp. 647–651, April 2012.
- [3] R. Essiambre, G. Kramer, P. J. Winzer, G. J. Foschini, B. Goebel, »Capacity Limits of Optical Fiber Networks«, Journal of Lightwave Technology, vol.28, no.4, pp.662–701, Feb.15, 2010.
- [4] Boštjan Batagelj, Vijay Janyani, Sašo Tomažič, »Research challenges in optical communications towards 2020 and beyond«, Informacije MIDEM, ISSN 0352-9045, 2014, letn. 44, št. 3, str. 177–184.
- [5] P. J. Winzer, »Energy-Efficient Optical Transport Capacity Scaling Through Spatial Multiplexing«, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 23, no. 13, pp. 851–853, July 2011.
- [6] R.-J. Essiambre, R. Ryf, N. K. Fontaine, S. Randel, »Breakthroughs in Photonics 2012: Space-Division Multiplexing in Multimode and Multicore Fibers for High-Capacity Optical Communication«, IEEE Photonics Journal, vol. 5, no. 2, April 2013.
- [7] K. Igarashi, T. Tsutani, I. Morita, »1-Exabit/s×km super-Nyquist-WDM multi-core-fiber transmission«, European Conference on Optical Communication (ECOC), 21–25 Sept. 2014.
- [8] W. Shieh, A. Li, A. A. Amin in X. Chen, »Space-Division Multiplexing for Optical Communications«, IEEE Photonics Society Newsletter, vol. 26, no. 5, pp. 4–8, October 2012.
- [9] D. J. Richardson, J. M. Fini in L. E. Nelson, »Space-division multiplexing in optical fibres«, Nature Photonics 7, str. 354–362, 2013.
- [10] S. Inao, et al., »High density multicore-fiber cable«, 28th Int. Wire&Cable Symposium, pp. 370–384, 1979.
- [11] I. Ishida, S. Matsuo, »Ultra-high core-density cable with multicore fiber«, OECC/ACOFT 2014, pp.875.877, 6–10 July 2014.
- [12] M. Koshihara, K. Saitoh, Y. Kokubun, »Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle«, IEICE Electronics Express, vol.6, no.2, pp.98–103, 2009.
- [13] A. Sano, H. Takara, T. Kobayashi, Y. Miyamoto, »Crosstalk-Managed High Capacity Long Haul Multicore Fiber Transmission With Propagation-Direction Interleaving«, Journal of Lightwave Technology, vol.32, no.16, pp. 2771–2779, Aug. 2014.
- [14] T. Hayashi, T. Sasaki, E. Sasaoka, »Multi-core fibers for high capacity transmission«, OFC/NFOEC, March 2012.
- [15] N. K. Fontaine, »3D Waveguide and All-Fiber “Photonic Lantern” Spatial Multiplexers«, 12th International Conference on Optical Internet, TB2-2, August 2014.
- [16] W. Klaus, B. J. Puttnam, Y. Awaji, N. Wada, T. Kobayashi in M. Watanabe, »Free-space coupling optics for multicore fibers«, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 24, no. 21, 2012.
- [17] P. M. Krummrich, »Optical amplifiers for multi mode / multi core transmission«, OFC/NFOEC 2012.
- [18] V. A. J. M. Sleiffer, Y. Jung, M. Kuschnerov, S. U. Alam, D. J. Richardson, L. Grüner-Nielsen, Y. Sun in H. de Waardt, »Optical chopper-based re-circulating loop for few-mode fiber transmission«, Optics Letters, vol. 39, iss. 5, 2014.
- [19] K. S. Abedin, J. M. Fini, T. F. Thierry, V. R. Supradeepa, Zhu Benyuan, M. F. Yan, L. Bansal, E. M. Monberg in D. J. DiGiovanni, »Multicore Erbium Doped Fiber Amplifiers for Space Division Multiplexing Systems«, IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 32, no. 16, pp. 2800–2808, 2014.
- [20] J. Sakaguchi, W. Klaus, B. J. Puttnam, J.-M. D. Mendinueta, Y. Awaji, N. Wada, Y. Tsuchida, K. Maeda, M. Tadakuma, K. Imamura, R. Sugizaki, T. Kobayashi, Y. Tottori, M. Watanabe in R.V. Jensen, »19-core MCF transmission system using EDFA with shared core pumping coupled in free-space optics«, Optics Express, vol. 22, iss. 1, 2014.
- [21] P. J. Winzer, »Power consumption in SDM«, ECOC 2013.
- [22] S. K. Korotky, »Price-Points for Components of Multi-Core Fiber Communication Systems in Backbone Optical Networks«, Journal of Optical Communications and Networking, vol. 4, iss. 5, 2012.
- [23] M. Kuschnerov in V. Sleiffer, »Multi-Mode SDM Systems: Upgrade Scenario for Legacy Systems and Achievable System Cost«, ECOC 2013.

Jure Sušin je diplomiral leta 2014 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. V diplomu je proučil aktivnosti, napredek in možnosti na področju prostorskega multipleksiranja v komunikacijah z optičnimi vlakni.

Vesna Eržen je diplomirala leta 2012 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlena je kot raziskovalka v Laboratoriju za sevanje in optiko na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njena raziskovalna zanimanja vključujejo fizikalne pojave v optiki, pasivne optične sisteme in spremljanje razvoja na področju optičnih komunikacij.

Maja Atanasovska je študentka magistrskega študijskega programa na Fakulteti za elektrotehniko.

Jan Fišer je študent 2. letnika magistrskega študijskega programa Fizike na Fakulteti za matematiko in fiziko.

Blaž Lavrič je študent 3. letnika dodiplomskega študijskega programa Telekomunikacij na Fakulteti za elektrotehniko.

Aljaž Hrastar je študent 3. letnika dodiplomskega študijskega programa Telekomunikacij na Fakulteti za elektrotehniko.

Manca Gale je študentka 3. letnika dodiplomskega programa Fizikalna merilna tehnika na Fakulteti za matematiko in fiziko.

Aljaž Bešter Cerar je študent 2. letnika magistrskega študijskega programa Poslovne informatike na Ekonomski fakulteti v Ljubljani.

Katarina Čebela je študentka dodiplomskega programa Telekomunikacij na Fakulteti za elektrotehniko in zaposlena v podjetju Optacore, d. o. o.

Luka Perpar je vodja oddelka za proizvodnjo in razvoj posebnih optičnih vlaken v podjetju Optacore, d. o. o.

Leon Kocijančič je študent magistrskega študijskega programa na Fakulteti za elektrotehniko.

Ahmed Samir je leta 2012 dokončal magistrski študij na Ain Shams University. Leta 2013 se je pridružil Laboratoriju za sevanje in optiko na Fakulteti za elektrotehniko, kjer dela doktorat.

Luka Bogataj je leta 2011 diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Istega leta se je zaposlil v Laboratoriju za sevanje in optiko kot mladi raziskovalec. V sklopu doktorskega študija se ukvarja z raziskavami s področja nizkošumnega optoelektronskega oscilatorja. Njegovo raziskovalno delo obsega razvoj optoelektronike in visokofrekvenčne elektronike.

Jurij Tratnik je doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko in je ustanovil podjetje InLambda BDT, d. o. o., ki ponuja optoelektronske rešitve.

Matej Švigelj je docent na Ekonomski fakulteti Univerze v Ljubljani, kjer se raziskovalno ukvarja z regulacijo in liberalizacijo telekomunikacij in energetike. Rezultate raziskovanj je objavil v več mednarodnih znanstvenih revijah ter predstavil na več mednarodnih konferencah.

Boštjan Batagelj je docent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Raziskovalno delo opravlja v Laboratoriju za sevanje in optiko, kjer se med drugim ukvarja s fizičnim nivojem prenosnih in dostopovnih telekomunikacijskih omrežij, zasnovanih na radijski in optični tehnologiji. Je avtor več kot 300 člankov, osmih patentnih prijav in sodeluje pri domačih ter mednarodnih raziskovalnih projektih s področja optičnih in radijskih komunikacij.