

Zakasnitev signala na fizični ravni optičnega omrežja

Vesna Eržen, Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: vesna.erzen@fe.uni-lj.si, bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Povzetek. Namen prispevka je opredeliti vzroke za zakasnitev signala na fizični ravni optičnega omrežja. Pojasnjen je pomen doseganja čim manjših zakasnitev za učinkovitost in uspeh na različnih področjih. Podana je splošna definicija zakasnitve signala v telekomunikacijskih omrežjih v povezavi z zakasnitvijo signala zaradi razširjanja po mediju. Na fizični ravni optične zveze je glavni vzrok za zakasnitev signala razširjanje svetlobe po optičnem vlaknu, ki se zaradi snovnih lastnosti širi počasneje kot v praznem prostoru. K dodatnim zakasnitvam signala v optičnem omrežju pripomorejo tudi elementi za kompenzacijo disperzije in optični ojačevalniki. Podani in ovrednoteni so konkretni predlogi in tehnološke rešitve, ki pripomorejo k optimizaciji optične zveze z vidika zakasnitve. Nekatere izmed teh rešitev so se v praksi že uveljavile in so komercialno dostopne, nekatere pa so še v fazi razvoja.

Ključne besede: zakasnitev signala, optično vlakno, kompenzacija disperzije, votlo vlakno, optični ojačevalniki.

Signal latency at the physical layer of optical network

Based on the general definition of latency in telecommunication networks, the paper identifies and describes the most important reasons causing latency of the optical signal at the physical layer of the optical network. The optical-network latency and propagation delay affecting the amount of time to be taken for the signal head to travel a certain distance are also described. In some cases, when latency is of a considerable concern, for example in financial trading, every microsecond, sometimes even a nanosecond, counts. Components causing latency at the physical layer of the optical network are identified. The fiber over which a system runs is the most important contributor to latency. Thus caused latency is about five microseconds per kilometer. Other components, like optical amplifiers and modules for dispersion compensation, cause less latency. Some technologies eliminating latency, such as, fiber bragg grating for dispersion compensation, Raman amplifier and hollow-core fiber, are presented.

1 UVOD

Hitrost prenosa podatkov v telekomunikacijskih omrežjih je pomembno merilo za zagotavljanje kakovosti storitev. Razvoj na področju telekomunikacij že vrsto let poteka v smeri povečanja bitnega pretoka v omrežju z namenom uporabnikom ponuditi čim večje hitrosti prenosa [1]. Tako danes zmogljive optične povezave omogočajo hitrost prenosa podatkov do 100 Gbit/s.

Poleg hitrosti bitnega pretoka je pomembno tudi zagotavljanje čim manjših zakasnitev, saj je vse več področij, kjer je majhna zakasnitev v telekomunikacijskem omrežju odločilnega pomena. To velja za finančne ustanove, kjer je bistvenega pomena

hitrost izvršitve finančnih transakcij, področje telemedicine in drugih storitev, kot so videokonference in storitve v oblaku ter vse ostale telekomunikacijske storitve, ki so časovno občutljive in zahtevajo skoraj nično zakasnitev.

Za lažje razumevanje tega prispevka je potrebno že na začetku poudariti razliko med pojmom hitrosti prenosa podatkov in zakasnitvijo. Pojma sta v osnovi neodvisna drug od drugega. Ko govorimo o hitrosti prenosa oziroma o zmogljivosti telekomunikacijske zveze imamo v mislih količino podatkov, preneseno v določeni časovni enoti; navadno v eni sekundi. Zakasnitev pa pove, koliko časa potrebuje signal (en sam bit oz. svetlobni impulz), da prepotuje določeno pot. Zato se s povečanjem hitrosti prenosa podatkov, zakasnitev praviloma ne zmanjša.

Ponudniki telekomunikacijskih storitev, ki strmiijo k snovanju omrežja s čim manjšo zakasnitvijo, morajo dobro preučiti in upoštevati tako obstoječe tehnološke možnosti, kakor tudi smernice bodočega razvoja. Zahteve, ki se nanašajo na zakasnitve, so za posamezne storitve opredeljene v priporočilih mednarodne zveze za telekomunikacije (angl. International Telecommunication Union - Telecommunications - ITU-T).

Majhne zakasnitve so pomembne v različnih panogah, še posebno v primeru elektronskega algoritemskega trgovanja v okviru finančnih ustanov, ki delujejo izključno na elektronski podlagi brez človekovega posredovanja. Zmanjšanje zakasnitev za 1 ms na letni ravni se je v obdobju pred nastopom gospodarske krize pri večjih borznoposredniških družbah odražala v občutno večjem dobičku (do sto milijonov dolarjev) [2], saj so zahteve v zvezi z

zakasnitvami pri finančnih transakcijah in algoritemskem trgovanju najstrožje in se lahko gibljejo tudi pod 1 μ s [3].

Z namenom doseganja najmanjših možnih zakasnitev, ki temeljijo na radijski tehnologiji, finančne borzno-posredniške ustanove za zmanjšanje zakasnitev signalov velik del dobička vlagajo v opremo telekomunikacijskih sistemov. Ko je dolžina zveze večje od dometa radijskih povezav, postane področje tehnološko zanimivo tudi za razvojne inženirje in strokovnjake s področja optičnih komunikacij.

Pri nadzornih in krmilnih signalih v velikih fizikalnih infrastrukturah (pospeševalniki delcev, radioteleskopi ipd.) je poleg konstantne zakasnitve pomembna tudi čim manjša zakasnitev, ki je lahko izvedena zgolj preko optične infrastrukture. [4]

Pričakovati je, da bo zakasnitev v optičnih omrežjih imela vse večji pomen tudi v bodočih sistemih zasnovanih na optičnih zvezah, ki služijo prenosu velike količine multimedijskih podatkov [5].

Da bi osvetlili nekatere tehnološke možnosti za znižanje zakasnitev na fizični ravni optičnega omrežja, je v prispevku sprva opredeljen pojem zakasnitve z vidika posameznih nivojev odprtega sistema povezovanja (angl. Open System Interconnection – OSI).

Nadalje so opredeljeni izvori zakasnitev optičnega signala na fizični ravni, h katerim največ prispeva zakasnitev zaradi razširjanja signala po steklenem vlaknu, ki zaradi svojih fizikalno-snovnih lastnosti upočasni hitrost potovanja svetlobe po vlaknu. V tem primeru je razdalja, ki jo mora signal prepotovati, tista ki največ prispeva h končni zakasnitvi signala. K zmanjšanju zakasnitev pripomore premišljena izbira vlakna in najkrajše možne poti.

K zakasnitvam na fizični ravni optičnega omrežja prispevajo tudi drugi elementi, kot so optični ojačevalniki in kompenzatorji disperzije, predvsem zato, ker so sestavljeni iz dodatne dolžine optičnega vlakna. Vsi vzroki za dodatno zakasnitev v optičnem omrežju so posebej opredeljeni in opisani.

V četrtem poglavju so v posameznih podpoglavjih podrobneje opisane in obrazložene tehnološke rešitve, ki pripomorejo k optimizaciji optičnega omrežja z vidika čim manjših zakasnitev.

Nazadnje so navedeni in ovrednoteni predlogi, ki zajemajo različne kombinacije tehnoloških izboljšav in dodatne strategije za zmanjšanje zakasnitev signala na fizični ravni optičnega omrežja.

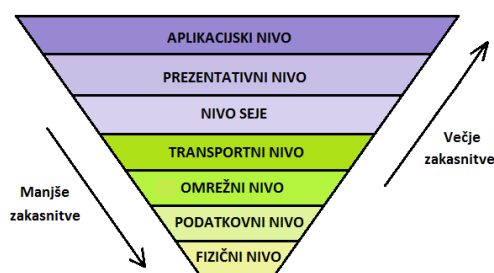
2 OPREDELITEV ZAKASNITVE

Na področju telekomunikacij je zakasnitev definirana kot čas, ki je pretekel od oddaje do sprejema sporočila. To je čas, ki ga porabimo za procesiranje signala na oddajni in sprejemni strani, ter čas, ki se porabi za potovanje signala prek prenosnega medija od oddajnika do sprejemnika. Gre za vsoto zakasnitev na vseh ravneh

OSI modela, ki je posledica kombinacije različnih virov.

Za zmanjšanje skupne zakasnitve, ne le na fizični ravni, ampak na vseh OSI ravneh, velja slediti priporočilom, ki narekujejo minimalno uporabo funkcionalnosti na višjih ravneh OSI modela (slika 1). Velja namreč, da največ zakasnitev v sistem doprinese elektronsko procesiranje signala na višjih ravneh. [6]

Prispevek obravnava zakasnitve, ki nastanejo na osnovni oziroma fizični ravni in zajemajo zakasnitve zaradi razširjanja signala na prenosni liniji vključno z zakasnitvami zaradi različnih optičnih elementov.



Slika 1: odvisnost zakasnitve glede na ravni OSI modela

2.1 Zakasnitev zaradi razširjanja

Zakasnitev zaradi razširjanja je čas, ki je potreben, da telekomunikacijski signal prepotuje določeno razdaljo po izbranem prenosnem mediju. Odvisen je od dolžine poti in je določen s fizikalnimi zakoni. Tako v primeru optičnega vlakna širjenje svetlobe po steklenem jedru znaša nekaj manj kot 5 μ s na kilometer (to je 70% hitrosti svetlobe v vakuumu), odvisno od snovnih lastnosti optičnega vlakna.

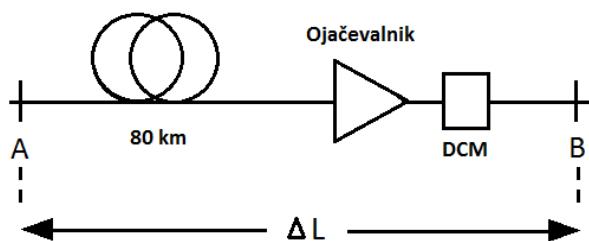
Zakasnitev zaradi razširjanja izhaja iz dejstva, da informacijski signal po poljubnem mediju ne more potovati tako hitro, kot potuje elektromagnetno valovanje po vakuumu. V vseh prenosnih medijih je hitrost svetlobe manjša, kot je njena hitrost v praznem prostoru. Ta pojav v teoriji opisujemo s pomočjo faktorja hitrosti razširjanja (angl. velocity factor – VF). Presenetljivo je dejstvo, da imata optično vlakno in bakren vodnik podoben VF, ki znaša okoli 70% hitrosti svetlobe [7]. Faktor hitrosti razširjanja je še največji v radijskih komunikacijah (99%), ko elektromagnetno valovanje potuje po ozračju in sta oddajnik in sprejemnik direktno vidna.

3 VZROKI ZAKASNITEV NA FIZIČNI RAVNI OPTIČNE ZVEZE

Glavni vzrok za zakasnitev signala na fizični ravni optične zveze je v optičnem vlaknu; kljub dejstvu, da gre za širokopasovni medij.

Elementi, ki na fizični ravni poleg optičnega vlakna sestavljajo optično omrežje, so optični ojačevalniki in elementi oz. moduli za kompenzacijo disperzije (angl. Dispersion Compensation Module – DCM), kot je

prikazano na sliki 2. Vsi ti elementi vplivajo na zakasnitev signala (to je čas, ki je potreben, da signal prispe od točke A do točke B).



Slika 2: zakasnitev na fizični ravni optične zveze

3.1 Zakasnitev v optičnem vlaknu

Svetloba potuje po vakuumu s hitrostjo 299.792.458 m/s. Ko svetloba potuje po svetlobnem vlaknu, se hitrost razširjanja upočasni zaradi interakcije elektronov vezanih na atome v materialu. Razmerje med hitrostjo svetlobe v vakuumu in materialu podaja lomni količnik materiala, ki za kremenovo steklo znaša okoli 1,5. Svetloba, ki potuje po vakuumu, na enem kilometru zakasni za 3,33 μs , medtem ko v optičnem kablju zakasni za slabih 5 μs , kar je odvisno od lomnega količnika steklenega jedra vlakna in valovne dolžine. Pri valovni dolžini 1310 nm znaša zakasnitev standardnega enorodovnega optičnega vlakna (G.652) 4,895 $\mu\text{s}/\text{km}$, pri valovni dolžini 1490 nm pa 4,897 $\mu\text{s}/\text{km}$ [6].

Z vidika zakasnitve je zato pomembna premišljena izbira optičnega vlakna s čim boljšimi snovnimi lastnostmi oziroma čim manjšim lomnim količnikom. Tega dejstva se dobro zavedajo tudi proizvajalci optičnih vlaken [3].

Za zmanjšanje zakasnitve pa je potrebno usmeriti pozornost tudi na konstrukcijo optičnih kablov. Pogosto je dejanska dolžina vlakna znotraj optičnega kabla daljša v primerjavi z dolžino kabla. Kadar je znotraj optičnega kabla večje število med seboj zasukanih optičnih vlaken (z namenom redundantnih poti, učvrstitve vodnika in/ali povečanja odpornosti na zunanje vplive) to pripomore tudi k večjim zakasnitvam. Zasuk notranjih vodnikov lahko zakasnitev poveča od 1 do 8 %, kar je še posebno izrazito v primeru daljših optičnih povezav. [3]

Alternativa, ki omogoča zmanjšanje zakasnitve, je optični vodnik, ki ima vlakna razporejena v pravokotnem tulcu znotraj optičnega vodnika in kjer znaša dodatna zakasnitev zaradi konstrukcije vodnika največ 0,5%. [3]

Rezultat raziskav usmerjenih v razvoj in optimizacijo različnih vrst optičnih vlaken je tudi vlakno z votlim jedrom (angl. Hollow Core Fiber – HCF), ki je opisano v poglavju 4.1.

3.2 Zakasnitve zaradi kompenzacije disperzije

Pri prenosih optičnih signalov po optičnem vlaknu pride do barvne disperzije, ki povzroči širjenje impulzov med potovanjem po optičnem vlaknu. Ker so v primerih prenosov signalov z velikimi bitnimi hitrostmi na velikih razdaljah presledki med posameznimi impulzi majhni, lahko pride po razširitvi impulza do prekrivanja med sosednjimi impulzi. Prekrivanje povzroči težave pri sprejemu, saj povečuje verjetnost napačno zaznanega bita.

Za odpravljanje tovrstnih težav se običajno uporablja vlakno za kompenzacijo disperzije (angl. Dispersion Compensating Fiber – DCF), ki ima nasprotno karakteristiko disperzije v primerjavi s prenosnim vlaknom. Poleg večjih zakasnitvev zaradi dodanega vlakna je slabost tovrstnega načina kompenzacije disperzije potreba po večjem ojačenju v omrežju. Uporaba ojačevalnikov pa, kot bomo videli v nadaljevanju, prav tako pripomore k povečanju zakasnitve.

Po navadi optična zveza za kompenzacijo barvne disperzije potrebuje vlakno DCF, ki znaša približno 20 % dolžine celotne optične poti, kar povzroči približno 20 % večjo zakasnitev. Na podlagi znane vrednosti zakasnitve optičnega signala na kilometer dolžine vlakna (5 μs), lahko preprosto izračunamo zakasnitev zaradi kompenzacije disperzije.

Inovacije na področju tehnologije vlakenskih periodičnih struktur (angl. Fiber Bragg Grating – FBG) so omogočile razvoj novih modulov za kompenzacijo disperzije (angl. Dispersion compensation module – DCM), ki lahko kompenzirajo disperzijo na celotni optični povezavi brez uporabe dodatnega kompenzacijskega vlakna, kot je opisano v poglavju 4.2.

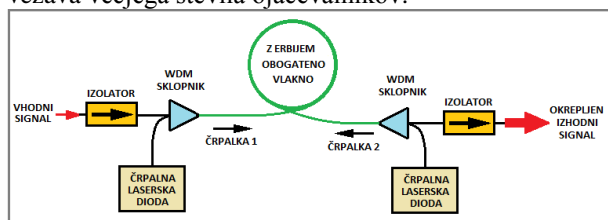
3.3 Zakasnitve v ojačevalnikih

Optični ojačevalnik je naprava, ki svetlobni signal ojači neposredno, brez pretvorbe v električni signal. Z vidika zakasnitve je to zelo pomembno. Za ojačenje optičnih signalov se v praksi uporabljajo polprevodniški, vlakenski ali Ramanovi ojačevalniki. Zaradi nekaterih slabosti (močan šum, polarizacijska odvisnost, nelinearni pojavi in temperaturna nestabilnost) polprevodniški ojačevalniki niso najbolj primerni pri dolgih optičnih povezavah.

Najpogosteje uporabljen ojačevalnik v optičnih zvezah je z erbijem obogateni vlakenski ojačevalnik (angl. Erbium Doped Fiber Amplifier – EDFA). Tak ojačevalnik (slika 3) sestavljajo s primesjo erbijja obogateno vlakno dolgo od 15 do 30 m, črpalni laser in optični sklopnik, ki črpalno in vhodni signal priključuje na z erbijem obogateno optično vlakno. Proces ojačenja je porazdeljen vzdolž celotne dolžine aktivnega vlakna.

En sam ojačevalnik EDFA v optično povezavo zaradi dodatne dolžine vlakna doprinese relativno majhno zakasnitev, ki je odvisna od dolžine ojačevalnega vlakna. Pri zaporedni vezavi dveh ojačevalnikov EDFA

in vmesnika za priključitev modula za kompenzacijo disperzije zanaša zakasnitev okoli 0,35 ms. [8] Zakasnitev je še nekoliko večja v optičnih transportnih omrežjih dolgih razdalj, kjer je potrebna zaporedna vezava večjega števila ojačevalnikov.



Slika 3: sestavni deli z erbijem obogatenega vlakenskega ojačevalnika

Da bi nekoliko zmanjšali zakasnitve, ki jih v optične zveze vnašajo ojačevalniki EDFA, lahko uporabimo Ramanov optični ojačevalnik, ki je kot ojačevalnik z najnižjo zakasnitvijo opisan v poglavju 4.3.

4 TEHNOLOŠKE MOŽNOSTI ZA ZMANJŠANJE ZAKASNITEV

4.1 Votlo vlakno

Idejna zasnova za votlo vlakno, ki ima v svoji sredini prazen prostor, temelji na fotončno-kristalni strukturi s fotončno vrzeljo (angl. Photonic cristal structure with a photonic bandgap), ki je bila predstavljena in realizirana leta 1999. [9]

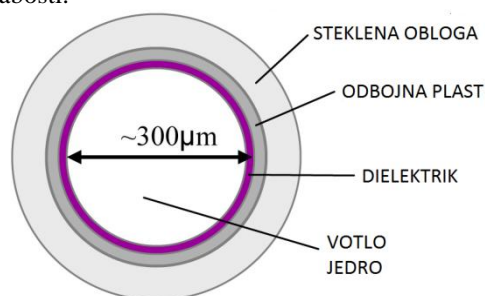
Bistvena razlika v primerjavi z navadnim optičnim vlaknom je v votlem jedru. V HCF svetloba namesto po steklu potuje po votlini. Takšno vlakno bi lahko teoretično zmanjšalo zakasnitev signala za 31%, saj znaša hitrosti razširjanja svetlobe v HCF vlaknu 99,7 % hitrosti razširjanja svetlobe po vakuumu. Prek takšnega vlakna je bila z laboratorijskimi testi dosežena največja hitrost širjenja signala po mediju [10].

HCF ima v primerjavi z obstoječim vlaknom izboljšano obliko votlega jedra, ki ga obdaja zelo tanek obroč s fotonskim prepovedanim pasom. Osnovno zgradbo HCF prikazuje slika 4. Votlo jedro je precej širše od jedra enorodovnega steklenega optičnega vlakna (9 μm), široko približno 300 μm , jedro pa obdajajo še tri plasti različnih materialov (dielektrična obloga, odbojna in zunanja plast). Obloga jedra je dielektrik (srebrov jodid) s plastjo fotonskih kristalov. Ko svetloba zadene ob rob, fotonski kristali odbijejo fotone. Odbojna plast je iz srebra, zunanja pa je steklena. [11]

Votlo optično vlakno lahko precej pripomore k zmanjšanju zakasnitev. Tehnologijo votlega vlakna dodatno odlikujeta nizka nelinearnost, majhno sipanje in odsotnost disperzije. Vse to pa drži le tedaj, ko sta zasnova vlakna in povezava na površini votlega jedra (meja steklo-zrak) brezhibno izdelani.

Omejitve, s katerimi se srečujejo številni raziskovalci na tem področju, so kompleksna izdelava, občutljivost

na konstrukcijske nepopolnosti, velike izgube (10-krat, celo večkrat, večje kot pri navadnem optičnem vlaknu) in neželeni višji rodovi. Trenutne raziskave so usmerjene prav v iskanje rešitev za odpravo omenjenih slabosti.

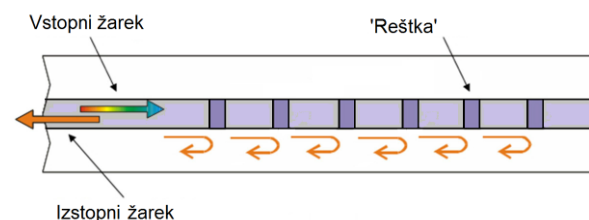


Slika 4: prikaz zgradbe votlega vlakna [11]

4.2 Kompenzacija disperzije

Poznamo več načinov za kompenzacijo disperzije v optičnih zvezah, vendar z vidika zakasnitve pridejo v poštev le redke. Eden izmed načinov za kompenzacijo disperzije je digitalna kompenzacija na osnovi koherentne detekcije z uporabo kvadrature modulacije s faznim pomikom (angl. Quadrature Phase Shift Keying – QPSK). Vendar z vidika zakasnitve ne gre za dobro rešitev, saj procesiranje prispeva k dodatni zakasnitvi (1 μs). [6]

Z uporabo inovacije na področju tehnologije vlakenskih periodičnih struktur (angl. Fiber Bragg Grating – FBG) je mogoče precej zmanjšati zakasnitev signala, ki je posledica kompenzacije disperzije s pomočjo vlakna DCF. FBG je po navadi nekaj centimetrov dolg odsek vlakna s periodično strukturo, ki ima periodično izmenjujoča območja višjega in nižjega lomnega količnika, kot je prikazano na sliki 5. Gre za posebno obdelan kratek odsek optičnega vlakna, ki kompenzira disperzijo na razdalji od 20 do 100 km, pri čemer znaša zakasnitev tovrstnih elementov okoli 25 ns. [12].

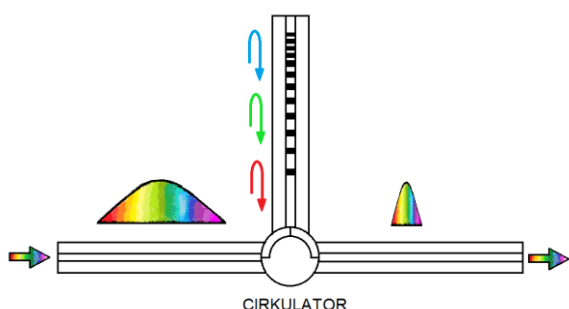


Slika 5: odsek vlakenske periodične strukture [12]

Spremembo lomnega količnika vzdolž vlakna je mogoče doseči s kratkotrajnim izpostavljanjem vlakna močnemu snopu ultravijolične svetlobe. Ob potovanju signala skozi območja z različnimi lomnimi liki se v skladu z Bragg-ovim zakonom pojavijo odboji, pri čemer se izločijo (obstanejo) le tiste spektralne

komponente, katerih valovna dolžina je enaka dvakratni periodi nezveznosti. Z drugimi besedami: razdalja med sosednjim nezveznostim določa, katera valovna dolžina bo prepuščena oziroma odbita. Na enak način so realizirana optična sita različnih valovnih dolžin. [13]

Če perioda nezveznosti vzdolž vlakna ni konstantna (angl. Chirped FBG – CFBG), ampak se bodisi povečuje bodisi zmanjšuje, pride pri vstopu svetlobe v modul CFBG do porazdeljenih odbojev posameznih valovnih dolžin z različnimi zakasnitvami [13], kar se uporablja za kompenzacijo kromatske disperzije (slika 6).



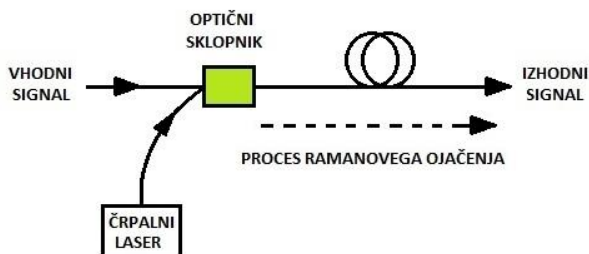
Slika 6: kompenzacija disperzije na osnovi CFBG [12]

CFBG povzroči nasproten disperzijski koeficient, kot ga ima prenosno vlakno, ki ga želimo kompenzirati.

Poleg manjših zakasnitev sta prednosti modulov CFBG tudi nizko vstavitevno slabljenje in zanemarljiva nelinearnost [12]. Slabosti pa se kažejo v odstopanju skupinskih zakasnitev (do 5 ps) [13].

4.3 Ramanov optični ojačevalnik

Ojačanje po Ramanovem principu je doseženo z nelinearno interakcijo med signalom in črpalnim laserjem znotraj prenosnega optičnega vlakna na celotni dolžini vlakna. Slika 7 prikazuje princip Raman-ovega ojačenja. Za zmanjšanje polarizacijske odvisnosti se uporablja ojačevalnik z dvema črpalnima laserjema.



Slika 7: Raman-ov optični ojačevalnik

Ramanov ojačevalnik ima nekoliko manjše ojačanje kot EDFA. Ker je bila izvedba tovrstnih ojačevalnikov zaradi potrebe po zmogljivih črpalnih laserjih v preteklosti občutno dražja od EDFA, se v praksi niso pogosto uporabljali. Danes se Ramanovi ojačevalniki

pogosto uporabljajo v kombinaciji z ojačevalniki EDFA. Za svoje delovanje ne potrebuje dodatnega vlakna, temveč uporablja obstoječe prenosno optično vlakno, zato praktično ni nobene dodatne zakasnitve signala. Primeren je tam, kjer ni vmesnih ojačevalnih lokacij, vozlišč in pogostih odceпов ali spojev (npr. pod morsko gladino).

5 PREDLOGI ZA OPTIMIZACIJO ZAKASNITEV V OPTIČNEM OMREŽJU

Največji vpliv na zakasnitev hitrost razširjanja svetlobe v optičnih povezavah ima optično vlakno, zato lahko zakasnitev zmanjšamo tako, da pri načrtovanju optičnega omrežja izberemo najkrajšo možno pot, primerno konstrukcijo optičnega vodnika in vlakno s čim boljšimi snovnimi lastnostmi (najmanjšim možnim lomnim količnikom).

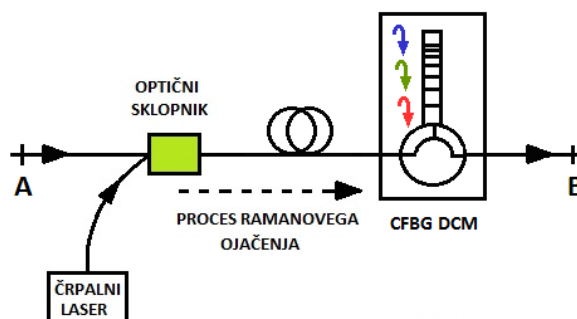
K zmanjšanju zakasnitve pripomore tudi ustrezen način kompenzacije disperzije in primerna izbira optičnega ojačevalnika. Uporaba modula CFBG namesto dodatnega kompenzacijskega vlakna precej zmanjša zakasnitev, saj zaradi svoje majhne dolžine (tipično 10 cm) k dodatni zakasnitvi prispeva le od 5 do 50 nanosekund [6]. Na optimizacijo zakasnitve vpliva tudi uporaba Ramanovega ojačevalnika, ki ne pripomore k dodatni zakasnitvi.

Možnosti zmanjšanja zakasnitev lahko ponazorimo s primerom, ki je prikazan na sliki 2. 80 km dolga optična povezava z ojačevalnikom EDFA (20 m dodanega vlakna) in DFC vlaknom za kompenzacijo disperzije (20 % dodanega vlakna) prispeva k skupni zakasnitvi:

$$80 * 5 \mu s + 0,02 * 5 \mu s + 0,20 * 80 * 5 \mu s = 480,1 \mu s.$$

Če bi namesto vlakna DCF uporabili modul CFBG in Ramanov ojačevalnik namesto ojačevalnika EDFA, kot je prikazano na sliki 8, bi skupna zakasnitev znašala:

$$80 * 5 \mu s + 0,05 \mu s = 400,05 \mu s.$$



Slika 8: optični elementi za zmanjšanje zakasnitev na fizični ravni optične zveze

Skupno zakasnitev bi tako lahko zmanjšali za približno 80 μs , kar znaša skoraj 17%; predvsem s

pomočjo kompenzacije disperzije na podlagi tehnologije FBG. V primeru daljše optične zveze bi potrebovali večje število Raman-ovih ojačevalnih enot in FBG modulov za kompenzacijo disperzije, pri čemer bi manjša zakasnitev prišla še bolj do izraza.

6 ZAKLJUČEK

Za zmanjšanje zakasnitev na fizični ravni optičnega omrežja so na voljo različne strategije in tehnološke rešitve. V prvi vrsti je potrebno dobro premisliti o razpoložljivih možnostih izbire čim krajše poti pri polaganju optične povezave in o primerni izbiri optičnih kablov, ki s svojo zasnovo ne vplivajo na povečanje celotne razdalje.

Poleg premišljene izbire optičnega vlakna z optimalnimi snovnimi lastnostmi lahko k optimizaciji zakasnitve v optičnem omrežju prispeva tudi čim manj procesiranja signalov na višjih nivojih modela OSI, kar pomeni izvršitev čim večjega števila funkcij na fizični ravni optične povezave.

Medtem ko je se večina naštetih tehnoloških rešitev (uporaba modulov za kompenzacijo disperzije na osnovi CFBG in Raman ojačevalnikov) in strategij za zmanjšanje zakasnitev na fizični ravni optičnega omrežja v praksi že precej dobro uveljavila, pa to ne velja za vlakno z votlim jedrom, ki je še v fazi laboratorijskih testiranj.

Votlo vlakno, ki ima v svoji sredini izpraznjen prostor ne povzroča Ramanovega sipanja optičnega signala, zato tudi ne more ojačevati svetlobe s pomočjo obogatenih primesi ali Ramanovega pojava. Vse kaže na to, da se bo pri ojačevanju optične zveze izdelane iz votlega vlakna potrebno zateči k polprevodniškim optičnim ojačevalnikom, kar je nedvomno predmet bodočih tehnoloških raziskav.

Ker je zmanjšanje zakasnitev v optičnem omrežju povezano tudi z dodatnimi stroški, lahko tudi precej visokimi, je potrebna dobra analiza za ugotavljanje ekonomske upravičenosti tovrstnih investicij.

LITERATURA

- [1] Matjaž Vidmar, »Optical-fiber communications: components and systems«, Informacije MIDEEM, ISSN 0352-9045, 2001, letn. 31, št. 4, str. 246-251.
- [2] Richard Martin, »Wall Street's Quest To Process Data At The Speed Of Light«, Information Week, April 23, 2007.
- [3] John A. Jay, »Low Signal Latency in Optical Fiber Networks«, Proceedings of the 60th International Wire & Cable Symposium (IWCS), 12-1 pp. 429-437. 2011.
- [4] Jurij Tratnik, Leon Pavlovič, Boštjan Batagelj, Primož Lemut, Patrik Ritoša, Mario Ferianis, Matjaž Vidmar, »Fiber length compensated transmission of 2998.01 MHz RF signal with femtosecond precision«, Microwave and optical technology letters, ISSN 0895-2477, Jul. 2011, vol. 53, no. 7, str. 1553-1555.
- [5] Boštjan Batagelj, Vijay Janyani, Sašo Tomažič, »Research challenges in optical communications towards 2020 and beyond«, Informacije MIDEEM, ISSN 0352-9045, 2014, letn. 44, št. 3, str. 177-184.

- [6] V. Bobrovs, S. Spolitis, G. Ivanovs, »Latency causes and reduction in optical metro networks«, Proc. SPIE 9008, Optical Metro Networks and Short-Haul Systems VI, December 20, 2013.
- [7] Rony Kay, »Pragmatic Network Latency Engineering Fundamental Facts and Analysis«, Wall Street & Technology, April, 2013.
- [8] Klaus Samardžić, »Praktični pristop pri zmanjševanju zakasnitve signalov v sodobnih komunikacijskih omrežjih«. 18. Seminar optičnih komunikacij, Ljubljana, Februar, 2011.
- [9] Peter Mosley, »Speciality Fibers: Hollow-core fiber delivers ultrafast visible pulses«, Laser Focus World, 5. January 2011.
- [10] J. M. Fini, J. W. Nicholson, R. S. Windeler, E. M. Monberg, L. Meng, B. Mangan, A. DeSantolo in F. V. DiMarcello »Low-loss hollow-core fibers with improved single-modedness«, Optics Express, vol. 21, iss. 5, 2013.
- [11] Torrance, »Hollow-core dielectric-coated fibers deliver mi-IR laser light«, Laser Focus World, 9. January 2011.
- [12] Sjostrom, F., »Fiber Bragg Grating Dispersion Compensation Enables Cost-Efficient Submarine Optical Transport«. Photonic Online, May, 2009.
- [13] Radenković, N., Marinčić, A., »Metode kompenzacije disperzije u optičkim sistemima«, Telekomunikacijski forum TELFOR 2005, Beograd, 22.-24.11.2005.

Vesna Eržen je diplomirala leta 2012 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlena je kot raziskovalka pri projektu 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.

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