

# Pasivna optična dostopovna omrežja z valvnodolžinskim multipleksiranjem odtočnega in pritočnega prometa uporabnika

Vesna Eržen, Boštjan Batagelj

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

**Povzetek.** Pasivna optična dostopovna omrežja z valvnodolžinskim multipleksiranjem so zaradi pasivne optične infrastrukture, izvedbe navidezne poti točka-točka, občutnega povečanja bitne hitrosti podatkovnega prometa in nekaterih drugih prednosti deležna velike pozornosti telekomunikacijskih operaterjev. Prav zato so pasivna optična omrežja z valvnodolžinskim multipleksiranjem v skladu s standardiziranimi priporočili ena od možnosti za izvedbo druge faze naslednjih generacij pasivnih optičnih sistemov za prenosne hitrosti optičnih signalov do 40 Gbit/s. Članek vsebuje pregled mogočih izvedb pasivnega optičnega dostopovnega omrežja, ki za odtočni in pritočni podatkovni promet uporabnika izrabljajo tehnologijo valvnodolžinskega multipleksiranja. Predstavljene so tudi tehnološke možnosti za izvedbo brezbarvnih uporabniških modemov, ki so z ekonomskega vidika ključnega pomena za gradnjo pasivnega optičnega omrežja na podlagi valvnodolžinskega multipleksiranja.

**Ključne besede:** optične komunikacije, pasivno optično omrežje, valvnodolžinski multipleks, brezbarvna optična omrežna enota

## Passive optical access networks with wavelength-division multiplexing for the upstream and downstream user traffic

The passive optical access networks with wavelength-division multiplexing receive considerable attention from the telecom operators due to their passive optical infrastructure, implementation of a virtual point-to-point link, significant increase in the bit rate of the data traffic and some other advantages. For this reason, the passive optical networks with wavelength-division multiplexing made in accordance with standardized recommendations are one of the possibilities to implement the second phase of the next-generation passive optical systems for the optical signal transmission rate up to 40 Gbit/s. This paper provides an overview of the passive optical access network technologies for the upstream and downstream of user traffic based on wavelength-division multiplexing and presents the technological options enabling colorless user modems that are crucial from the economic point of view for implementation of the passive optical network based on wavelength-division multiplexing.

**Keywords:** optical communications, passive optical network (PON), wavelength-division multiplexing (WDM), colorless optical network unit (ONU)

## 1 UVOD

Po svetu je za širokopasovni dostop precej dobro uveljavljeno pasivno optično omrežje (angl. Passive Optical Network – PON), katerega dostopovno razdelilno omrežje drevesne arhitekture sega od centralne postaje (angl. Central Office – CO) do

končnega uporabnika in zaradi povezljivosti iz ene točke na več točk za svoje delovanje uporablja komunikacijsko tehniko časovnega multipleksiranja [1]. Pri gradnji PON se del stroškov dostopovnega omrežja razdeli na več uporabnikov, saj od centralne postaje do oddaljenega vozlišča poteka zgolj eno skupno vlakno in vsi uporabniki komunicirajo z enim samim terminalom, nameščenim v centrali. Glavna prednost PON se nanaša na pasivni element, ki za delitev optičnega signala v oddaljenem vozlišču ne potrebuje električne energije. Gigabitna tehnologija PON (angl. Gigabit PON – GPON), katere skupna zmogljivost v dotoku sega do 2,5 Gbit/s, se je na svetovnem trgu dobro uveljavila in je bila vpeljana tudi v Sloveniji v okviru projektov gradnje odprtih širokopasovnih omrežij [2].

Vedno večje potrebe po širokopasovnosti za prenos multimedijskih signalov v stanovanjskih in poslovnih objektih [3] narekujejo iskanje novih načinov nadgradnje pasivnega optičnega dostopovnega omrežja in v ta namen je bilo leta 2010 v okviru naslednje generacije sistemov PON standardizirano optično omrežje, ki v dotoku omogoča skupne prenosne hitrosti do 10 Gbit/s [4], vendar še vedno uporabljajo komunikacijsko tehniko časovnega multipleksiranja (angl. Time Division Multiplexing – TDM) na skupnem deljenem mediju [1].

Številne uspešne prakse iz preteklega desetletja, ki v hrbtnici optičnega omrežja prikazujejo zrelost tehnologije valvnodolžinskega multipleksiranja (angl. Wavelength Division Multiplexing – WDM) [5],

govorijo v prid uveljavljanja tehnologije WDM tudi v dostopovnem pasivnem optičnem omrežju [6]. Evolucijski razvoj PON standardizacije druge stopnje naslednje generacije sistemov PON (angl. Next Generation PON 2 – NG-PON2), katerega namen je zagotavljanje širokopasovnosti rezidenčnim uporabnikom (stanovanjske zgradbe), poslovnim uporabnikom ter hrbtenici mobilnih omrežij, opredeljuje prenosne hitrosti optičnih signalov do 40 Gbit/s [7]. Na fizičnem sloju v primeru NG-PON2 je v ospredju valvnodolžinski multipleks, ki vsakemu končnemu uporabniku omogoča upravljanje celotne zmogljivosti navidezne optične zveze točka-točka [8].

Pri poskusnih izvedbah sistema WDM-PON v praksi se je izkazalo, da zahteva uporabo precej dragih optičnih elementov na strani uporabnikov [9], kar je nesprijemljivo za poslovni model operaterjev dostopovnih omrežij. Posledično je bilo veliko raziskav od leta 1990 usmerjenih v iskanje najprimernejših tehnoloških možnosti za izvedbo omrežja, ki bi zadostilo zahtevam ekonomičnosti za masovno proizvodnjo.

Ker je visoka cena opreme za sistem WDM-PON v preteklih letih marsikaterega telekomunikacijskega operaterja odvrnila od uvedbe v prakso, so v tem prispevku predstavljene tehnološke možnosti za izvedbo ekonomsko upravičenega omrežja. Namen prispevka je torej izdelati podrobnejši pregled tehnologije WDM-PON. V ta namen je v drugem poglavju zajet opis splošnih značilnosti in prednosti sistemov WDM-PON. Tretje poglavje je namenjeno predstavitvi možnosti realizacije oz. konceptov nadgradnje obstoječih sistemov PON s tehnologijo WDM. Četrto poglavje pa je namenjeno pregledu tehnoloških možnosti za izvedbo cenovno sprejemljivih brezbarvnih uporabniških modemov.

## 2 ZNAČILNOST SISTEMOV WDM-PON

Idejna zasnova WDM-PON sega že v leto 1989 [10], ko sta bili predstavljeni arhitektura in tehnološka zasnova sistema na podlagi valvnodolžinskega multipleksiranja. Ta je v številnih pogledih skoraj identična sistemom WDM-PON, ki so bili pred leti v praksi prvič vpeljani v Južni Koreji [9].

Pobude za nadgradnjo sistemov PON s tehnologijo WDM so posledica težnje po združitvi prednosti obeh. Tehnologija WDM je odporna proti kolizijam signalov z razporeditvijo valvnih dolžin med končne uporabnike. V osnovi toga drevesna arhitektura sistema PON pri nadgradnji s tehnologijo WDM omogoča navidezne povezave točka-točka na skupni vlakenski infrastrukturi. Posledično WDM-PON zagotavlja izrazito izboljšano zmogljivost zveze, veliko fleksibilnost in transparentnost omrežja [11].

V primeru WDM-PON je vsakemu uporabniku pri prenosu signala prek skupnega optičnega vlakna namenjena natančno določena valovna dolžina, kar omogoča razpolaganje s celotno zmogljivostjo zveze

kanala WDM. Čeprav PON z arhitekturnega vidika pomeni drevesno topologijo iz ene točke na več točk, je rezultat vpeljave tehnologije WDM-PON tak, kot če bi imeli večje število navideznih povezav točka-točka.

Ena od prednosti sistemov WDM-PON se nanaša tudi na preprosto upravljanje in nadzor s pomočjo optičnega reflektometra v časovnem prostoru (angl. Optical Time Domain Reflectometer – OTDR), s katerim je mogoče preveriti vsak priključek za posamično valovno dolžino.

Sistemi WDM-PON zagotavljajo transparenten protokol, ki omogoča ločitev različnih storitev glede na valovno dolžino. Predvideva preprosto nadgradnjo, saj je mogoče povečati bitno hitrost optične zveze brez dodajanja novih vlaken. Kanali WDM omogočajo različne prenosne formate, kar kaže na transparentnost sistema. Rast omrežja skladno s potrebami naročnika pa kaže na skalabilnost tovrstnih sistemov. WDM-PON naj bi omogočil tudi konsolidacijo vozlišč, ki pomeni zmanjšanje števila central v dostopu in je ena tipičnih zahtev telekomunikacijskih operaterjev, saj bistveno znižuje stroške.

## 3 MOŽNOSTI ZA REALIZACIJO WDM-PON

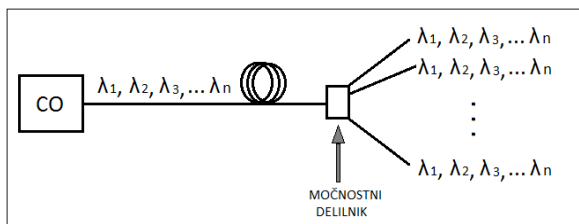
Način uvajanja sistema WDM-PON v prakso je odvisen od izvedbe obstoječega dostopovnega omrežja. Če optično dostopovno omrežje na enem območju še ni zgrajeno, je veliko lažje začeti uvajati popolnoma optično omrežje WDM-PON. V nasprotnem primeru je potrebna nadgradnja sistema TDM-PON s tehnologijo WDM. Način nadgradnje lahko vsebuje uporabo obstoječega razdelilnega omrežja s pasivnimi močnostnimi razcepniki ali zahteva zamenjavo vseh močnostnih razcepnikov z valvnodolžinskimi multiplekserji. Ta menjava je v praksi iz dveh razlogov nezaželen postopek. Menjava namreč zahteva poseg v optično infrastrukturo zunaj centralne postaje, kar v praksi pomeni delo na terenu. V času zamenjave je zaradi začasnega izklapljanja pričakovati, da bodo storitve uporabnikom motene ali prekinjene [9].

Za številne operaterje, ki že uporabljajo tehnologijo TDM-PON, je precej privlačnejša rešitev, da se močnostni razcepniki ne zamenjajo z valvnodolžinskimi multiplekserji, ampak se nadgradnja začne z zamenjavo uporabniških optičnih omrežnih enot (angl. Optical Network Unit – ONU). Tovrstnemu omrežju WDM-PON, ki ohranja močnostne razcepnike, pravimo tudi omrežje z razpršenim oddajanjem. Pri klasičnem WDM-PON, ki uporablja valvnodolžinske multiplekserje, pa gre za omrežje z multipleksiranjem valvnih dolžin.

### 3.1 Razpršeno oddajanje

Pri nadgradnji sistema PON v skladu s konceptom razpršenega oddajanja (angl. broadcasting), ki je prikazan na sliki 1, je v oddaljenem vozlišču še vedno uporabljen močnostni optični pasivni razcepnik, ki v

sistem vnaša toliko slabljenja kot pri TDM-PON [1]. Vse valovne dolžine so v dotoku podatkov usmerjene k vsakemu uporabniškemu modemu. V modemih se nahajajo filtri valovnih dolžin, ki prepustijo le določeno valovno dolžino, namenjeno pripadajočemu uporabniku. Pri uporabniku nameščeni optični filtri so ozkopasovni spektralni elementi, ki so izdelani na podlagi različnih tehnologij: Braggova periodična struktura (vlakenska, akusto-optična), Fabry-Periot tankoplastni in večslojni optični filter ter Mach-Zenderjev filter.

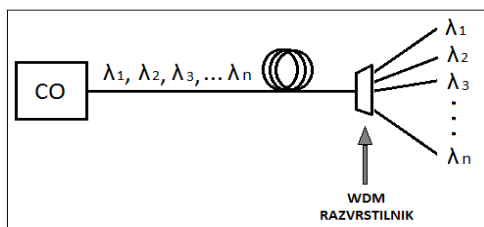


Slika 1: Omrežje z razpršenim oddajanjem

V smeri odtoka podatkov od uporabnika k centralni postaji največkrat poteka sodostop na podlagi časovnega multipleksiranja, kakršnega poznamo iz primera TDM-PON. Lahko pa bi bil izveden tudi s pomočjo laserjev WDM, ki pripadajo posameznim uporabnikom, vendar tovrstna rešitev dodatno podraži sistem.

### 3.2 Valvnodolžinsko multipleksiranje

Za izvedbo sistema WDM-PON z valvnodolžinskim multipleksiranjem (slika 2) je v oddaljenem vozlišču potrebna uporaba valvnodolžinskega multiplekserja, ki omogoča ločitev in usmeritev posameznih valovnih dolžin k pripadajočemu uporabniškemu modemu. Uporaba valvnodolžinskih multipleksrjev v sistem vnaša manjše delilno slabljenje kot pri močnostnem pasivnem razcepniku (zgolj pribl. 5 dB), kar ohranja večjo zalogo moči v omrežju in posledično večji doseg, tudi brez potrebe po optičnih ojačevalnikih.



Slika 2: Omrežje z multipleksiranjem valovnih dolžin

Arhitektura razdelilnega omrežja je v tem primeru povsem enaka omrežju z razpršenim oddajanjem, le da je namesto močnostnega razcepnika v oddaljenem vozlišču nameščen valvnodolžinski multipleksor, ki loči posamezne valovne dolžine med seboj za nadaljnje posredovanje signala (z natančno določeno valovno dolžino) k pripadajočim uporabnikom.

Glede na to, da vsakemu uporabniku pripada drugačna valovna dolžina, je stopnja zasebnosti in varnosti pred neželenimi prisluhi v tem primeru enaka kot pri povezavi točka-točka [12]. To zagotavlja višjo stopnjo zasebnosti v primerjavi s TDM-PON in prejšnjim sistemom WDM-PON, ki uporablja razpršeno oddajanje.

Za izvedbo valvnodolžinskih de/multipleksorjev je na voljo več tehnoloških rešitev, ki temeljijo na Braggovih periodičnih strukturah, uklonskih mrežicah in svetlovodnih interferometrih. Med zadnje uvrščamo Mach-Zenderjeve interferometre in razvrstitveno valovodno strukturo (angl. Arrayed waveguide grating – AWG). De/multipleksorji, ki se uporabljajo v sistemih WDM-PON, večinoma temeljijo na strukturi AWG [9].

AWG je podobno kot pasivni optični razcepnik, pasivni in recipročni optični element, ki za svoje delovanje ne potrebuje električnega napajanja. Struktura AWG deluje po naslednjem principu: svetloba iz optičnega vlakna se enakomerno osvetli skozi planarno optično strukturo. Zaradi različne dolžine poti, ki jo svetloba prepotuje prek valovodne strukture ali svetlovoda (ki je bodisi iz silicija ali indijevega fosfida), ima svetloba na izhodu različno fazo, kar omogoča razvrstitev oziroma ločitev valovnih dolžin. Svetloba tako multipleksiranih valovnih dolžin se nato usmeri na posamezno optično vlakno. Zaradi recipročnosti velja tudi nasprotna pot svetlobe, kar pomeni, da se svetlobni signali različnih uporabniških valovnih dolžin na AWG združijo na en izhod.

Praktična izvedba AWG je kompakten optični element dimenzij (10 x 0,4) mm, primeren za montažo na terenu. Žal je AWG temperaturno odvisen, kar pomeni, da sprememba temperature povzroča lezenje valovnih dolžin. Zato je v nekaterih primerih potrebna temperaturna stabilizacija strukture AWG, kar je svojevrsten tehnološki izziv. Za komercialne potrebe v WDM-PON morajo biti elementi AWG temperaturno stabilni v območju od -40°C do +85°C [13].

Alternativa temperaturno stabiliziranim elementom AWG so omrežne tehnološke rešitve, ki so neodvisne od lezenja kanalov WDM. Tovrstne rešitve ne uporabljajo vnaprej dogovorjenih vrednosti za valovno dolžino, temveč se njihova vrednost v enem sistemu WDM-PON prilagaja trenutni karakteristiki elementa AWG.

## 4 TEHNOLOGIJE ZA IZVEDBO BREZBARVNIH UPORABNIŠKIH MODEMOV

Oba opisana načina gradnje sistema WDM-PON sta postavljena pred tehnološki izziv, kako čim ceneje in učinkovito izvesti ustrezne brezbarvne uporabniške modeme. Glavna motivacija je imeti vse uporabniške modeme enake (tako kot v primeru TDM-PON), kar omogoča masovno proizvodnjo in posledično znižanje stroškov nadgradnje. Prav tako omogoča preprostejšo nadgradnjo in vzdrževanje omrežja.

Za izvedbo brezbarvnih ONU je mogočih nekaj različnih tehnoloških pristopov [14], ki bodo predstavljeni v nadaljevanju in jih lahko za lažje razumevanje razdelimo v dve skupini glede na lokacijo izvornega signala, ki omogoča delovanje brezbarvnega uporabniškega modema. V prvo skupino uvrščamo vse tiste tehnološke rešitve, ki za delovanje ne potrebujejo zunanega svetlobnega vira iz centralne postaje; v drugo pa rešitve za izvedbo brezbarvnih ONU, ki za svoje delovanje potrebujejo zunanji vzbujalni vir iz centralne postaje, saj nimajo lastnega svetlobnega vira ali ga potrebujejo iz kakšnega drugega razloga.

## **4.1 Modemi brez zunanjega vzbujalnega vira**

### **4.1.1 Nastavljivi laserji**

Nastavljivi laserji (angl. tunable laser) v ONU lahko temeljijo na različnih tehnologijah, kot so: Braggova odbojnost, porazdeljeni povratni sklop (angl. Distributed Feed Back – DFB), nastavljiva zrcala, nastavljivi filtri in uklonska mrežica [15]. Čeprav gre pri nastavljivih laserjih za najpriročajšo izvedbo brezbarvnih modemov, je njihova največja ovira visoka cena izvedbe. Zato je veliko raziskav usmerjenih v iskanje načinov za ekonomično izvedbo. Ena perspektivnih rešitev, ki bi lahko zadostila težnji po stroškovni učinkovitosti, je nastavljiv laser na podlagi dveh sklopljenih mikroresonatorjev v obliki obroča, zasnovanih na fotonični silicijevi podlagi [13].

Uporaba trenutno komercialno dostopnih nastavljivih laserjev je primerna za mestna omrežja WDM-PON in omrežja dolgih razdalj (angl. long-haul), katerih zmogljivost se giblje nad 10 Gbit/s in ki imajo dobro razmerje cene na preneseni bit informacije pri visokih prenosnih hitrostih [16].

### **4.1.2 Modem s širokospektralnim virom**

Možnost za izvedbo brezbarvnega uporabniškega modema brez zunanjega vzbujalnega vira je tudi uporaba nizkocenovnega nekoherentnega širokospektralnega vira. Uporabnikov modem v tem primeru oddaja optični signal, ki namesto enega samega kanala uporablja celoten razpoložljiv optični spekter. Odtočnemu prometu se valovnodolžinski kanal dodeli s pomočjo AWG v oddaljenem vozlišču, kjer sledita razrez celotnega spektra in izbira kanala.

Pri izvedbi brezbarvnega ONU z metodo razreza spektra se za generiranje svetlobe s širokim optičnim spektrom v vsakem od uporabniških modemov nahaja super luminiscentna dioda (SDL) ali drug optični element, kot je na primer optični ojačevalnik (angl. Optical Amplifier – OA), ki v vseh modemih oddaja enak (širok) optični spekter. Oddana svetloba se modulira z odtočnim signalom in pošlje proti enoti centralni postaji, kjer se na poti v oddaljenem vozlišču

spekter te svetlobe razreže na rezine, ki pomenijo valovnodolžinske kanale. Vsak tako dobljeni kanal z lastno/unikatno valovno dolžino pripada enemu izmed uporabniških modemov. Tako je v centralni postaji mogoče ločiti, kateri dotočni signal pripada kateremu uporabniškemu brezbarvnemu modemu.

Pri metodi razreza spektra je treba upoštevati, da so za višje prenosne hitrosti potrebni širši valovnodolžinski kanali. Ker ima spekter vira neko fiksno (omejeno) širino, to vpliva na razpoložljivo število kanalov. Višja ko je prenosna hitrost, manj valovnodolžinskih kanalov je na voljo in nasprotno. Širša ko je pasovna širina kanalov, večja je tudi nezaželena disperzija. Omenjene slabosti je mogoče zmanjšati z uporabo metode vnaprejšnjega odpravljanja napak (angl. Forward Error Correction – FEC), ki omogoča povečanje zaloge moči in izboljšanje spektralne učinkovitosti [14].

S pomočjo metode razreza spektra za izvedbo brezbarvnega ONU je bil v praksi izveden prenos osmih kanalov z bitno hitrostjo 10 Gbit/s na razdalji 20 km prek disperzijsko premaknjenega optičnega vlakna (angl. Dispersion Shifted Fiber – DSF). Uporaba polprevodniškega optičnega ojačevalnika (angl. Semiconductor Optical Amplifier – SOA) v tem primeru lahko vpliva na zmanjšanje šuma, ki nastane zaradi razreza spektra [14].

## **4.2 Modemi z zunanjim vzbujalnim virom**

Kot alternativa modemom z lastnim virom svetlobe, ki ne potrebuje zunanjega vzbujalnega vira, se je porodila ideja o modemih, ki za svoje delovanje potrebujejo zunanji vir svetlobe, ta pa se največkrat nahaja kar v centralni postaji. Pri tem je zunanji vir svetlobe nujno potreben za delovanje uporabniških modemov na drugem koncu optične povezave.

Za ta namen se v optičnem linijskem terminalu v centralni postaji nahaja nekoherentni širokopasovni svetlobni vir (angl. Broadband Light Source – BLS) ali eden oziroma več koherentnih ozkopasovnih svetlobnih virov. Ko je za vir odtočnega signala uporabljen BLS, se v de/multipleksorju razreže na valovnodolžinske kanale z lastno/unikatno centralno frekvenco. Tako dobljeni valovnodolžinski kanali so usmerjeni k pripadajočemu uporabniškemu modemu.

Omeniti je treba, da je tehnologija, ki omogoča delovanje modemov z zunanjim vzbujalnim BLS, bolj primerna v sistemih WDM-PON, ki imajo v oddaljenem vozlišču nameščen AWG, saj je potreben razrez spektra širokopasovnega vzbujalnega vira. Pri WDM-PON z razpršeno oddajo in izbiro, kjer je v oddaljenem vozlišču močnostni pasivni razcepnik, za izvedbo tovrstnih uporabniških modemov v centralni postaji potrebujemo matriko laserjev.

V modemu, ki potrebuje zunanji vir svetlobe, so mogoče različne tehnološke rešitve, med katerimi bosta opisani Fabry-Periot laserska dioda (FP-LD) in odbojni polprevodniški optični ojačevalnik (angl. Reflective

Semiconductor Optical Amplifier – RSOA), ki ga lahko nadomesti tudi kakšna druga rešitev za modulacijo odtočnega/uporabniškega signala (modulator). Metodi z FP-LD in RSOA v modemu sta si podobni, ločita se le v fizičnem mehanizmu, ki je uporabljen za generiranje odtočnega signala.

#### 4.2.1 Rodovno vklenjena laserska dioda

V ONU se lahko za vir svetlobe uporablja Fabry-Periotova laserska dioda (FP-LD), ki zaradi narave Fabry-Periotovega resonatorja oddaja lasersko svetlobo, katere spekter vsebuje večje število longitudinalnih rodov. Spektralno nečist spekter FP-LD zaradi svoje večrodovnosti ni primeren za uporabo v WDM-PON, njegova širina pa vnaša popačitve signala zaradi barvne disperzije. Za izboljšanje lastnosti spektra iz FP-LD se vanj pošlje svetloba iz koherentnega ozkopasovnega vira, kar omogoča vklenitev FP-LD [17]. Vkljenjena FP-LD omogoča oddajanje ozkega snopa svetlobe z valovno dolžino, ki jo določa zunanji svetlobni vir. Vkljenjena FP-LD je mogoče s pomočjo direktne modulacije uporabiti za generiranje odtočnega signala.

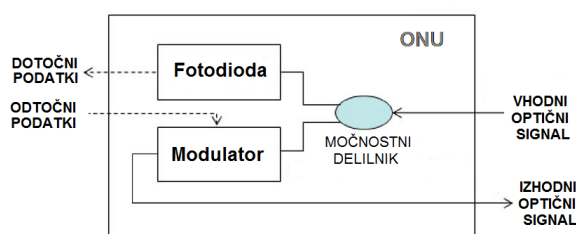
Rešitev je ekonomična izbira v primeru sistema WDM-PON, ki omogoča hitrosti do 10 Gbit/s. Žal se tovrstna rešitev sooča tudi z nekaterimi omejitvami. Za vklenitev FP-LD mora imeti vzbujalna svetloba dovolj moči. Poleg tega pa je FP-LD polarizacijsko odvisna in zahteva kontrolo polarizacije, kar je svojevrsten tehnološki izziv [13]. Tovrstna rešitev zahteva tudi temperaturno stabilizacijo FP-LD, saj premik spektra zaradi temperature zmanjšuje učinkovitost vklenitve.

#### 4.2.2 Modem brez svetlobnega vira

Pri raziskovalcih v zadnjem času zbuja pozornost modemi, ki ne potrebujejo lastnega svetlobnega vira. V tem primeru je modemu nameščen zgolj optični modulator ali polprevodniški optični ojačevalnik (angl. Semiconductor Optical Amplifier – SOA) – lahko tudi v odbojni različici. Pri uporabi elementa RSOA v ONU se posamezna valovna dolžina, ki izhaja iz OLT v RSOA, ojači in modulira ter odbije nazaj kot odtočni informacijski signal. Čeprav elegantna rešitev z RSOA in zunanjim vzbujalnim širokopasovnim svetlobnim virom je deležna nekaterih slabosti, ki se nanašajo na disperzijo in izgubo moči vzbujalnega signala na poti od OLT prek oddaljenega vozlišča do uporabniškega terminala.

Zelo atraktivna je tehnološka rešitev, ki omogoča ponovno uporabo pritočnega signala in nosi informacijo od centralne postaje proti uporabniku. Vsak uporabniški modem sprejme signal z unikatno valovno dolžino, kjer je moduliran pritočni promet. Naloga modema je, da sprejeti signal demodulira in pritočni promet posreduje uporabniku. Del sprejetega signala pa ponovno modulira, tokrat z odtočnim prometom, in pošlje nazaj proti centralni postaji [18].

Za modulacijo optičnega signala se lahko poleg RSOA uporabi zunanji Mach-Zehnderjev ali elektroabsorpcijski modulator, pri čemer se pred modulacijo ali po njej signal ojači v polprevodniškem optičnem ojačevalniku. Za ločevanje pritočnega signala zadostuje zgolj pasivni razcepnik (slika 3), medtem ko je za ločevanje odtočnega in pritočnega signala treba uporabiti optični cirkulator.



Slika 3: Izvedba brezbarvnega ONU s ponovno uporabo pritočnega signala na optičnem modulatorju

Slabost ponovne uporabe pritočnega signala je njegov presluh na odtočni strani. Za zmanjšanje presluha so predlagane različne modulacijske sheme. Najobetavnejši so načini, ko modem uporablja intenzitetno modulacijo, iz centralne postaje pa prihaja signal, ki je fazno moduliran [19]. Tudi primeri, ko je v centralni postaji uporabljeno posebno kodiranje, zbuja precej pozornosti [20].

## 5 SKLEP

Tehnologijo WDM-PON je pred kratkim standardizirala ITU-T v okviru NG-PON2. Da bi jo čim prej začeli uporabljati v komercialne namene, je veliko razvojne pozornosti usmerjene k optimizaciji investicijskih in operativnih stroškov ter zmanjšanju uporabe energije za prenos enega bita.

V praksi realizirani sistemi omogočajo prenos 40 kanalov (vsakega) s hitrostjo do 1 Gbit/s na razdalji do 20 km. Trenutne raziskave so tako poleg iskanja ekonomično učinkovitih rešitev usmerjene tudi v iskanje možnosti za povečanje prenosne hitrosti in dosega. Večja zmogljivost zveze in podaljšan doseg (ali delilno razmerje) pa nista smiselna, če nista upravičena z ekonomskega vidika.

Poleg izboljšanja lastnosti sistemov WDM-PON na enostopenjskih nivojih je raziskovalna pozornost usmerjena tudi v iskanje učinkovitih arhitekturnih večstopenjskih omrežnih rešitev, ki povezujejo večje število med seboj povezanih sistemov PON. Tovrstni sistemi zahtevajo dobro načrtovanje, saj morajo poleg učinkovitosti zagotavljati sobivanje in morebitno nadgradnjo različnih sistemov PON ne glede na to, ali le-ti temeljijo na časovnem ali valovnodolžinskem multipleksiranju.

Medtem ko je življenjska doba optičnega razdelilnega omrežja več desetletij (okoli 50 let), so posamezni pasivni optični sistemi (GPON, NG-PON1,

NG-PON2) omejeni s krajšo življenjsko dobo (enega, največ dveh desetletij). Za čim boljše izkoriščenost optične razdelilne infrastrukture je pomembna možnost nadgradnje sistemov PON na obstoječem omrežju, pri čemer je treba upoštevati načela koeksistence.

Kot smo videli, je cena WDM pon odvisna od cene uporabniškega modema, za katerega se zahteva tudi brezbarvnost. Modem je najdražji pri uporabi nastavljivih laserjev. Veliko cenejši je brezbarvni modem, ki uporablja zunanje vzbujanje iz centralne postaje.

## ZAHVALA

Delo je bilo opravljeno v okviru raziskovalnega programa Algoritmi in optimizacijski postopki v telekomunikacijah (P2-0246).

## LITERATURA

- [1] B. Batagelj "Pasivno optično dostopovno omrežje s časovnim razvrščanjem", 1. izd. Ljubljana: Založba FE in FRI, 2011. 124 str.
- [2] B. Batagelj "Deployment of fiber-to-the-home in the Slovenian telecommunications market", *Fiber and integrated optics*, vol. 32, str. 1–11, 2013.
- [3] U. Burnik, K. Podgornik, M. Meža "Prenos multimedijskih signalov visoke ločljivosti v poslovnih in stanovanjskih objektih", *Elektrotehniški vestnik*, 82 (5), str. 247–252, 2015.
- [4] V. Eržen, B. Batagelj "NG-PON1: technology presentation, implementation in practice and coexistence with the GPON system", *Elektrotehniški vestnik*, 79 (3), str. 117–122, 2012.
- [5] M. Vidmar "Optical-fiber communications: components and systems", *Informacije MIDEEM*, 31 (4), str. 246–251, 2001.
- [6] B. Batagelj, V. Janyani, S. Tomažič "Research challenges in optical communications towards 2020 and beyond", *Informacije MIDEEM*, 44 (3), str. 177–184, 2014.
- [7] ITU-T Recommendation G.989.1 "40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements", 3/2013.
- [8] ITU-T Recommendation G.989.2 "40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification", 12/2014.
- [9] M. Maier "WDM Passive Optical Networks and Beyond: the Road Ahead", *Journal of Optical Communications and Networking*, 1 (4), str. C1–C16, 2009.
- [10] S. S. Wagner, H. Kobrinski, T. J. Robe, H. L. Lemberg, L. S. Smoot "Experimental demonstration of a passive optical subscriber loop architecture", *Electronics Letters*, 24 (6), str. 344–346, 1988.
- [11] H. Y. Rhy, G. Y. Yi "Current status of WDM-PON system development and standardization", 17th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2012), str. 16–17, Korea, July 2012.
- [12] B. Batagelj "Možnosti izvedb optičnega dostopovnega omrežja z arhitekturo točka-točka", *Elektrotehniški vestnik*, 77 (5), str. 259–266, 2010.
- [13] R. Urata, C. Lam, H. Liu, C. Johnson "High Performance, Low Cost, Colorless ONU for WDM-PON", Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC) 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference, Los Angeles, March 2012.
- [14] J. Kani "Enabling Technologies for Future Scalable and Flexible WDM-PON and WDM/TDM-PON Systems", *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, 16 (5), str. 1290–1297, 2010.
- [15] P. Ritoša "Nastavljivi laserji", 15. Seminar optičnih komunikacij, Ljubljana, Januar, 2008.

- [16] E. I. D. Betou, C. A. Bunge, H. Ahlfeldt, M. Olson "WDM-PON is a key component in next generation access", *Lightwave*, April 2014.
- [17] V. Eržen, M. Mikulič, B. Batagelj "Frequency-response measurements of an injection-locked Fabry-Pérot laser diode in a colorless WDM-PON", 5th International Workshop on Fiber Optics in Access Network, October 6, Brno, Czech Republic, str. 26–30, 2015.
- [18] B. K. Kim, H. Park, S. Park, K. Kim "Optical access network scheme with downstream Manchester coding and upstream NRZ remodulation", *Electronics Letters*, 42 (8), str. 484–485, 2006.
- [19] W. Hung, C.-K. Chan, L.-K. Chen, F. Tong "An optical network unit for WDM access networks with downstream DPSK and upstream re-modulated OOK data using injection-locked FP laser", *IEEE Photon. Technol. Letters*, 15, str. 1476–1478, 2003.
- [20] S. K. Metya, V. Janyani, D. Bansal, S.G. Modani "Miller Coding-Based Wavelength Remodulation for Optical Access Network", *IEEE Photonics Technology Letters*, 24 (19), str. 1715–1717, 2012.

**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.

**Boštjan Batagelj** je docent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer predava 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 dostopovnih telekomunikacijskih omrežij, 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.