

Ocena učinkovitosti delovanja pasivnega optičnega omrežja z razvrstitveno valovodno strukturo

Vesna Eržen, Boštjan Batagelj, Iztok Humar

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

Evaluation of Performance Efficiency in a Passive Optical Network with Arrayed Waveguide Grating

Abstract. The paper presents the performance efficiency of a passive optical network (PON) with a passive splitter and the performance of the same network with an arrayed waveguide grating (AWG) for wavelength division multiplexing (WDM). The PON architecture is a highly effective method for delivering high-bandwidth services to end users. However, the passive splitter results in a loss of power to the optical signal, limiting the overall efficiency of the network. To address this limitation, an AWG-based network structure is proposed as an alternative, enabling more efficient optical signal distribution. In the study presented here, experiments were conducted comparing both network architectures. Factors such as the output signal power at the end user and the quality of signal reception through eye diagram openness were evaluated. The results show that the AWG-based system improves the efficiency of the network by providing higher output signal power, while the signal quality is comparable to that of the passive splitter approach.

1 Uvod

Pasivna optična omrežja (angl. Passive Optical Networks – PON) so v praksi uporabna tehnološka rešitev številnih telekomunikacijskih ponudnikov po svetu. Priljubljena so zaradi lastnosti sočasnega prenosa več signalov po enem optičnem vlaknu do oddaljenega vozlišča.

Članek opisuje osnovne značilnosti in splošno zgradbo PON ter v praksi najpogosteje uporabljeni tehnološki različici, ki temeljita na časovnem (angl. Time Division Multiplex – TDM) in valovnodolžinskem (angl. Wavelength Division Multiplex – WDM) razvrščanju. V tem kontekstu je TDM PON klasična različica PON, ki se je v praksi začela uveljavljati po letu 1990, medtem ko WDM-PON še vedno čaka na širšo uporabo. Članek podaja primerjavo obeh tehnoloških rešitev tako s teoretičnega kot iz praktičnega vidika. V ta namen je izvedena laboratorijska analiza obeh tipov omrežij, pri čem je poudarek na merjenju izhodne optične moči in karakterizacije oblike očesnega diagrama.

Uporaba WDM PON omogoča povečanje pasovne širine omrežja, zmanjšano zakasnitev in višjo stopnjo zanesljivosti v primerjavi s TDM-PON omrežji, ki temeljijo na tehnologiji dodeljevanja časovnih rezin.

Ključna prednost WDM-PON je, da omogoča večjemu številu uporabnikov sočasni dostop do vseh storitev, saj vsakemu končnemu uporabniku pripada lasten valovnodolžinski kanal.

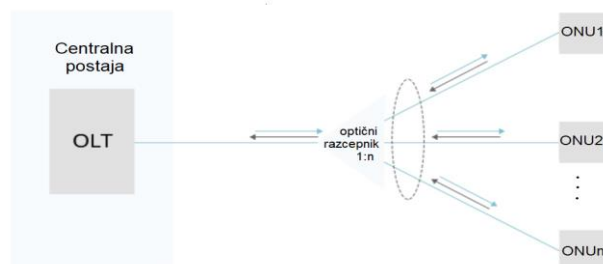
V teoretičnem delu članka je podana razlaga in primerjava TDM-PON in WDM-PON. TDM-PON v oddaljenem vozlišču vključuje optične razcepnike, WDM-PON pa v oddaljenem vozlišču tipično vsebuje razvrstitvene valovodne strukture (arrayed waveguide grating – AWG). Oba gradnika sta natančneje opisana s tehnološkega vidika, saj sta uporabljena v poskusu.

Praktični del članka, ki se začne s 5. poglavjem, opisuje laboratorijsko postavitev obeh omrežij. Podaja opis postopka meritve moči na strani končnega uporabnika tako v primeru izvedbe TDM-PON z optičnim razcepnikom kot tudi v primeru izvedbe WDM-PON s pomočjo AWG. Ocenjena je bila tudi oblika in odprtost očesnega diagrama, ki je neposredno povezana s kakovostjo prenosa signala. Rezultati meritev in njihova analiza so natančno obravnavani.

2 TDM-PON

PON ima dostopovno razdelilno omrežje drevesne arhitekture in sega od centralne postaje (angl. Central Office – CO), kjer se nahaja optični linijski terminal (angl. Optical Line Terminal – OLT), do končnega uporabnika, kjer se nahaja optična omrežna enota (angl. Optical Network Unit – ONU), kot je prikazano na sliki 1. [1]

V oddaljenem vozlišču optični razcepnik (1:n) omogoča delitev optičnega vlakna večjemu številu (n) končnih uporabnikov. 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. [2]



Slika 1. Zgradba TDM-PON topologije točka-več točk

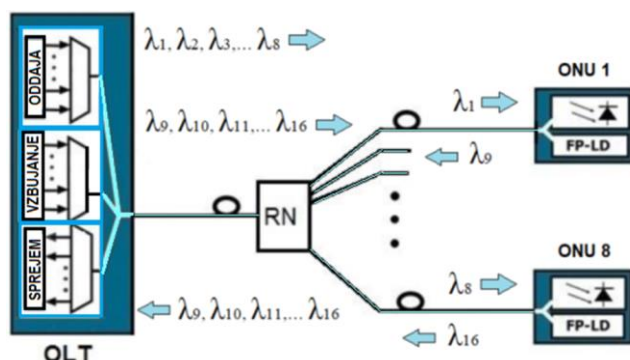
Glavna prednost PON se nanaša na pasivni gradnik, ki za delitev optičnega signala v oddaljenem vozlišču ne potrebuje električne energije.

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 [3]. Vedno večje potrebe po širokopasovnosti za prenos multimedijskih signalov v stanovanjskih in poslovnih objektih 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 podatkov do 10 Gbit/s, vendar še vedno uporabljajo komunikacijsko tehniko TDM na skupnem deljenem mediju [1].

3 WDM-PON

Številne uspešne prakse preteklega desetletja prikazujejo zrelost tehnologije WDM in govorijo v prid njenega uveljavljanja tudi v dostopovnem PON. WDM vsakemu končnemu uporabniku omogoča upravljanje celotne zmogljivosti navidezne optične zveze točka-točka [4]. Pri poskusnih izvedbah sistema WDM-PON v praksi se je izkazalo, da zahteva uporabo precej dragih optičnih gradnikov na strani uporabnikov, kar je nesprijemljivo za poslovni model operaterjev dostopovnih omrežij. Posledično je bilo veliko raziskav usmerjenih v iskanje najprimernejših tehnoloških možnosti za izvedbo omrežja, ki bi zadostilo zahtevam ekonomičnosti za masovno proizvodnjo.

Arhitektura optičnega razdelilnega omrežja (slika 2) [5] je v tem primeru takšna kot v TDM-PON točka-več točk (angl. Point-to multi-point – P2MP), le da je namesto močnostnega razcepnika v oddaljenem vozlišču (angl. Remote Node – RN) nameščen valvnodolžinski multiplekser, ki loči posamezne valovne dolžine med seboj za nadaljnje posredovanje signala (z natančno določeno valovno dolžino) k pripadajočim uporabnikom.



Slika 2. Arhitektura omrežja WDM-PON

Ker vsakemu uporabniku pripada drugačna valovna dolžina, je stopnja zasebnosti in varnosti pred neželenimi prisluhi v tem primeru enaka kot pri povezavi točka-točka [5]. To zagotavlja višjo stopnjo varnosti v primerjavi s TDM-PON. Za izvedbo

valvnodolžinskih multiplekserjev je na voljo več tehnoloških rešitev, ki temeljijo na Braggovih periodičnih strukturah, uklonskih mrežicah in svetlovodnih interferometrih. Med njimi je najpogosteje uporabljena razvrstitevna valovodna struktura (angl. Arrayed waveguide grating – AWG).

4 TDM-PON in WDM-PON V oddaljenem vozlišču

Ključno razlikovanje pasivnih optičnih omrežij (PON) se izvaja v oddaljenem vozlišču. Tehnološke razlike med oddaljenimi vozlišči v TDM-PON in WDM-PON vplivajo na način, kako se izvaja razvrščanje in preusmerjanje optičnih signalov.

V TDM-PON se uporablja pasivni optični razcepnik (angl. Passive Optical Splitter), ki deluje na principu delitve optičnega signala med več uporabnikov. V OLT sistema TDM-PON se izvaja časovno razvrščanje, pri čemer se uporabnikom dodelijo časovne rezine za prenos podatkov. To omogoča delitev prenosa med uporabniki, pri čemer se uporablja ena valovna dolžina.

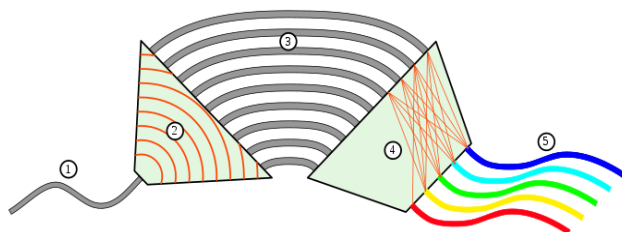
Optični razcepnik, ki se uporablja v tehnologiji TDM-PON, je pasivni optični gradnik, ki izvede delitev optičnega signala na več izhodnih poti. Razcepnik deluje na osnovi principa deljenja svetlobnega signala med več izhodnih vlaken. Običajno se uporabljajo razcepniki, kjer se moč signala razdeli enakomerno na vse izhodne poti. Izguba moči optičnega razcepnika je odvisna od števila izhodnih poti. Na primer, če imamo optični razcepnik z delitvijo 1:2 to pomeni 3 dB slabljenja, ki se za vsako nadaljnjo stopnjo delitev poveča za dodatnih 3 dB. To pomeni, da bo imela delitev optičnega vlakna na 4 uporabnike 6 dB slabljenja, na osem uporabnikov 9 dB, na 16 uporabnikov 12 dB, na 32 uporabnikov 15 dB...

V WDM-PON se za razvrščanje optičnih signalov v oddaljenem vozlišču najpogosteje uporablja optični gradnik AWG. Le-ta omogoča razdelitev in usmerjanje optičnih signalov glede na njihove valovne dolžine. Vsakemu uporabniku je dodeljen lasten kanal z določeno valovno dolžino, kar omogoča vzporeden prenos podatkov med uporabniki. [6]

AWG je prav tako kot optični razcepnik pasivni optični gradnik, ki za svoje delovanje ne potrebuje električnega napajanja. AWG je običajno izdelan iz silicijeve valovodne strukture in omogoča ločitev ter usmerjanje svetlobnih žarkov glede na njihove valovne dolžine. AWG je tako kot pasivni optični razcepnik recipročni optični gradnik.

Struktura AWG, ki je prikazana na sliki 3 [7], deluje po naslednjem principu: svetloba iz optičnega vlakna (oznaka 1) se enakomerno osvetli skozi planarno optično strukturo z oznako 2. Zaradi različne dolžine poti, ki jo svetloba prepotuje prek valovodne strukture ali svetlovoda (ki je bodisi iz silicija ali indijevega fosfida), ki je na sliki označen s številko 3, ima svetlobni signal na izhodu (oznaka 4) različno fazo, kar omogoča razvrstitev oziroma ločitev valovnih dolžin.

Svetloba tako multipleksiranih valovnih dolžin se nato usmeri na posamezno optično vlakno (označeno s številko 5). Zaradi recipročnosti velja tudi nasprotna pot svetlobe, kar pomeni, da se svetlobni signali različnih uporabniških valovnih dolžin na AWG združijo na en izhod.



Slika 3. Fizikalne lastnosti svetlobe znotraj razvrstitvene valovodne strukture

Praktična izvedba AWG je kompakten optični gradnik 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 gradniki AWG temperaturno stabilni v območju od -40°C do $+85^{\circ}\text{C}$ [8].

Slabljenje in izguba moči, ki je posledica AWG, je pomemben parameter, ki označuje, koliko moči se izgubi med razvrščanjem svetlobnih žarkov. Običajno slabljenje AWG znaša okoli 6 dB, odvisno od izvedbe in lastnosti gradnika. Visoka kakovost AWG bo imela manjšo izgubo moči, kar je pomembno za ohranjanje čim večje moči optičnega signala. V primerjavi s pasivnim razcepnikom bo izguba moči v primeru 64 končnih uporabnikov bistveno nižja. Pasivni razcepnik bo v tem primeru v optično distribucijsko omrežje dodal 18 dB dodatnega slabljenja, kar je bistveno več kot pri AWG, kjer je pričakovati okoli 3 dB slabljenja.

4.1 Izbira praktične izvedbe TDM-PON in WDM-PON

Tehnološke razlike med pasivnim optičnim razcepnikom v TDM-PON in razvrstitveno valovodno strukturo (AWG) v WDM-PON imajo več posledic.

V TDM-PON se lahko pasivni optični razcepnik preprosto vgradi v optično omrežje, kar pripomore k preprostosti in nizkim stroškom. Vendar pa ima omejitve v pasovni širini, ki je razdeljena med uporabnike, kar lahko vpliva na hitrost prenosa podatkov, ko se število uporabnikov povečuje. Prav tako je v TDM-PON težje zagotoviti različne podatkovne hitrosti in storitve za posamezne uporabnike.

WDM-PON z AWG omogoča vzporeden prenos podatkov med uporabniki na različnih valovnih dolžinah. To omogoča višjo pasovno širino in večjo prilagodljivost pri zagotavljanju različnih storitev in podatkovnih hitrosti. Vendar pa je uporaba AWG zahtevnejša in dražja v primerjavi s pasivnim optičnim razcepnikom in TDM-PON. Prav tako je potrebna

natančna kalibracija in vzdrževanje razvrstitvene valovodne strukture (AWG).

5 Metodologija

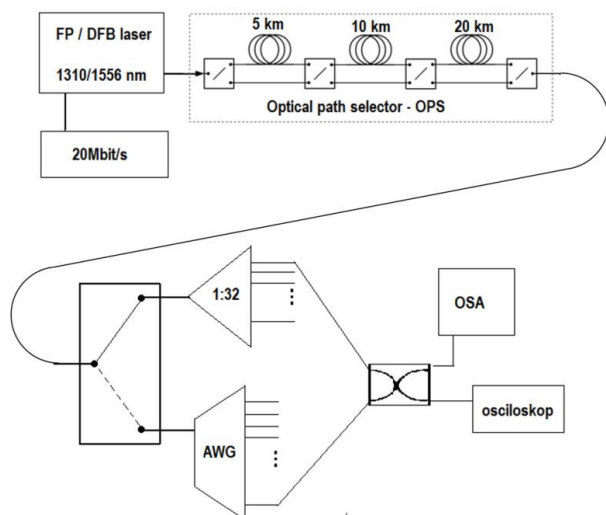
V okviru eksperimentalnega dela smo za dve različni postavitvi PON omrežja (z optičnim razcepnikom in AWG-jem) merili upadanje moči signala na sprejemu v odvisnosti od dolžine optičnega vlakna ter na osciloskopu opazovali obliko očesnega diagrama. Na ta način smo ocenili izgube v omrežju.

Opazovanje očesnega diagrama in primerjava izgub na različnih razdaljah v PON je pomembna iz več razlogov. Izgube, ki jih povzročajo optični razcepniki ali AWG-ji, predstavljajo enega od vidikov celotnih izgub v omrežju. Skupne izgube vplivajo na učinkovitost prenosa signala in dosegljivo razdaljo v omrežju. Te izgube je smiselno primerjati, da se oceni, kako dobro deluje omrežje. Optični razcepnik in AWG sta dva različna gradnika. Primerjava izgub med njima nakazuje, kateri gradnik je bolj primeren za določeno omrežno okolje, predvsem z vidika dosegljive razdalje v omrežju in morebitne potrebe po ojačevalnikih. Z opazovanjem in primerjavo izgub lahko izvedemo postopke optimizacije omrežja, tako da se sprejmejo ustrezni ukrepi za zmanjšanje izgub in povečanje učinkovitosti in zmogljivosti omrežja. Nenazadnje izgube v omrežju vplivajo na kakovost storitve končnim uporabnikom. Visoke izgube povzročajo slabšo kakovost prenosa podatkov in povečajo verjetnost motenj. Z meritvami ugotavljamo, kateri gradnik zagotavlja boljšo kakovost storitve in bolj stabilno delovanje omrežja. Zato smo v meritve vključili tudi opazovanje očesnega diagrama. Primerjava očesnih diagramov optičnega razcepnika in AWG-ja omogoča oceno, kateri gradnik bolje ohranja kakovost signala, na katero vpliva tudi dolžina optičnega vlakna. To je še en pomemben vidik, ki ga je treba upoštevati pri načrtovanju in primerjavi izgub v PON, saj se s povečevanjem razdalje povečuje tudi absorpcija in disperzija svetlobe v vlaknu, kar vpliva na obliko očesnega diagrama na sprejemu. S poskusom smo želeli opazovati in podati ugotovitve primerjave optičnega razcepnika in AWG-ja tudi s tega vidika.

Na sliki 4 je podan vezalni načrt gradnikov optičnega omrežja. Poskus je zasnovan tako, da ne zahteva nobenih fizičnih prevezovanj, ki bi vnesla neznane merilne negotovosti.

Meritve so bile izvedene z uporabo Fabry Perot (FP) laserja in laserja s porazdeljeno povratno vezavo (angl. Distributed-Feedback - DFB), odvisno od valovne dolžine svetlobe, na kateri je bila opravljena posamezna meritev. Za modulacijo signala je bil uporabljen polinomski generator z 20 Mbit/s. Da bi lahko izvedli meritve za različne dolžine optičnega dostopovnega omrežja, je bil uporabljen optični izbirnik poti (angl. Optical Path Selector – OPS), ki z optičnimi stikali omogoča izbiro različnih dolžin poti. Nanj smo priklopili 3 kolute optičnih vlaken različnih dolžin: 5 km, 10 km in 20 km. S pomočjo OPS je bilo možno opazovati moč na izhodu na razdaljah: 0 km, 5 km, 10 km, 15 km, 20 km, 25 km, 30 km in 35 km. Stikalo

nameščeno na izhodu iz OPS služi preklopu med omrežjema TDM-PON in WDM-PON. Pasivni optični razcepnik (1:32) za izvedbo TDM-PON je omogočal delitev vlakna na 32 uporabnikov, kar je v sistem vneslo dodatnih 15 dB slabljenja. Za izvedbo WDM-PON je bil uporabljen AWG, ki je v sistem vnesel 3 dB slabljenja. Izhode obeh omrežij smo opazovali na optičnem spektralnem analizatorju (OSA), kjer smo lahko razbrali izhodno optično moč, in na osciloskopu, kjer smo opazovali obliko očesnega diagrama.



Slika 4. Vezava optičnih gradnikov za izvedbo TDM-PON in WDM-PON

Z meritvijo izhodne moči smo želeli opazovati in primerjati izgube, ki jih vnašata optični razcepnik in razvrstitevna valovodna struktura v optično distribucijsko omrežje. Z očesnim diagramom pa smo želeli opazovati morebitna popačenja in barvno razpršitev svetlobe na posameznih razdaljah. Očesni diagrami se uporabljajo za ovrednotenje kakovosti signala s prikazom amplitude in faze signala skozi čas.

Dobro definiran diagram z odprtim očesom kaže, da je signal brez popačenja, medtem ko diagram z zaprtim ali popačenim očesom kaže, da na popačenje signala vplivajo pojavi v optičnem vlaknu, kot je barvna disperzija. [8] Za razliko od meritve pogostosti napak (angl. Bit Error Rate – BER), ki ne more razlikovati med amplitudnim šumom in časovnim tresenjem, ki lahko vplivata na delovanje sistema, očesni diagram ponuja boljši vpogled v obe vrsti nepravilnosti. Odprtost očesnega diagrama bi v idealnih okoliščinah kazala kvadratno obliko, kar pomeni, da je signal jasen in brez kakršnih koli popačenj. Vendar, ko pride do vpliva barvne razpršitve, se to kaže v zmanjšani odprtosti očesnega diagrama.

6 Rezultati

Med poskusom je bilo izvedenih več meritev. Ker dotok, odtok in video signali v PON omrežjih potekajo na različnih valovnih dolžinah, smo se pri meritvah

želeli čim bolj približati realnim razmeram. Izvedeni so bili trije sklopi meritev na 1310 nm in 1550 nm. Prvi sklop meritev je bil namenjen opazovanju izhodne moči optičnega signala v primeru optičnega razcepnika, v odvisnosti od dolžine optičnega vlakna. Drugi sklop meritev se nanaša na primerjavo izhodnih moči v primeru optičnega razcepnika in AWG. Na ta način smo lahko ocenili izgube, ki jih v omrežje vnašata optični razcepnik in AWG. Tretji sklop meritev pa se je nanašal na primerjavo očesnih diagramov v obeh primerih, s čimer smo pridobili informacije o morebitnih popačenjih oziroma disperziji, ki jo v sistem vnaša optični razcepnik oziroma AWG.

Za namene poskusa je bilo treba optimalno izvesti postavitev gradnikov v merilni sistem. Da bi se izognili vsakokratni menjavi optičnih gradnikov (v našem primeru bi morali menjati optični razcepnik in AWG ter različne kolote optičnih vlaken), smo v merilno postavitev dodali optična stikala ter sklopnik in razcepnik, za sočasno opazovanje izhodne moči in oblike očesnega diagrama.

Prva meritev je bila izvedena s pomočjo FP laserja na valovni dolžini 1310 nm, ki je v PON valovna dolžina za odtok podatkov. Meritev je bila namenjena ugotavljanju delovanja in opazovanju izhodne moči v TDM-PON s pasivnim optičnim razcepnikom. Vhodna moč v omrežje iz FP laserja znaša -7 dBm. Izhodno moč pa smo merili z optičnim multimetrom HP8153A. Pri vseh meritvah je bil uporabljen sprejemnik (fotodioda) APD Siemens. Rezultati so zbrani v tabeli 1. Očesnega diagrama pri tej meritvi nismo opazovali, zanimala nas je le izhodna moč in upadanje izhodne moči z dolžino optičnega omrežja v primeru optičnega razcepnika.

Tabela 1. Meritev izhodne moči za TDM-PON pri različnih dolžinah optičnega distribucijskega omrežja (angl. Optical Distribution Network – ODN)

FP laser	Pasivni razcepnik
$\lambda = 1310 \text{ nm}$	$P_{vh} = -7 \text{ dBm}$
$l \text{ [km]}$	$P_{izh} \text{ [dBm]}$
0	-28,1
5	-29,2
10	-31,3
15	-32,4
20	-33,7
25	-34,9
30	-35,7
35	-36,8

Rezultati zbrani v tabeli 1 kažejo, da izhodna moč upada sorazmerno z večanjem razdalje. Slabljenje enorodovnega optičnega vlakna znaša približno 0,22 dB/km, kar pomeni približno 1,1 dB slabljenja na dodatnih 5 km optičnega vlakna. Pasivni razcepnik na 32 končnih uporabnikov vnaša 15 dB dodatnega slabljenja. Vsaj 3 dB dodatnega slabljenja v sistem vnaša OPS. Dodatnih skoraj 3 dB slabljenja v praktično izvedenem TDM-PON pa je posledica slabega spoja na

vhodu v pasivni optični razcepnik. Nekaj slabljenja pa gre tudi na račun drugih spojev v merilnem sistemu.

Naslednja meritev, katere rezultati so zbrani v tabeli 2, vsebuje primerjavo izhodne moči med TDM-PON in WDM-PON. Meritev je bila opravljena na valovni dolžini 1535 nm, kar je blizu valovne dolžine 1550 nm, ki se v praksi v PON uporablja za prenos video podatkov. Prav tako je AWG, ki smo ga uporabili za izvedbo meritev, zasnovan za valvnodolžinska območja v okolici 1550 nm. Za oddajnik smo izbrali DFB laser, ki je oddajal svetlobo na valovni dolžini, ki se je lahko »ujela« z enim od 16 valvnodolžinskih kanalov AWG. V praksi so za namen izvedbe WDM-PON uporabljeni dragi in tehnično dovršeni nastavljivi laserji (angl. Tunable Laser Source – TLS). Vhodna moč v obeh primerih (pasivni razcepnik in AWG) pa je bila enaka in je znašala 0 dBm.

Tabela 2. Rezultati meritev izhodne moči za TDM-PON in WDM PON na različnih dolžinah ODN.

DFB laser	Pasivni razcepnik	AWG
l [km]	Pizh [dBm]	Pizh [dBm]
0	-20,9	-13,7
5	-22,7	-14,8
10	23,8	-15,6
15	-24,8	-16,9
20	-25,8	-18,1
25	-26,9	-20,3
30	-28,1	-21,2
35	-29,3	-22,1

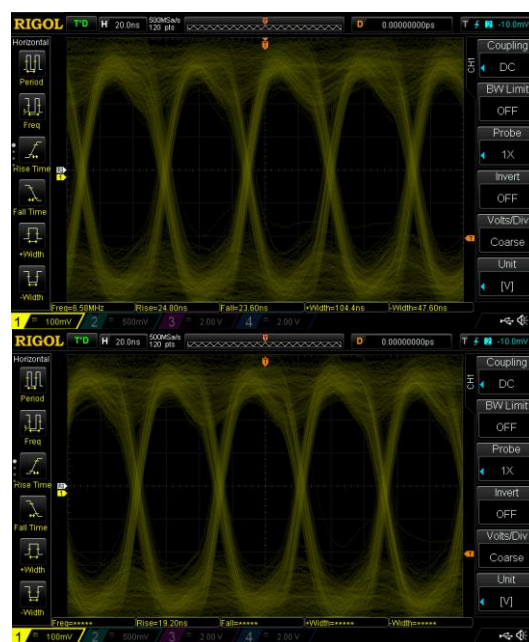
Rezultati kažejo, da AWG v sistem vnaša manj slabljenja (približno 7 dB), vseeno pa meritev brez dodanega optičnega vlakna kaže na slabih 14 dB izgub. Omenili smo že, da gre 3 dB izgub na račun stikala, ki omogoča preklope med razdaljami (OPS). Dodatno smo v tem primeru pričakovali slabljenje 3,5 dB, ki ga vnaša razcepnik na izhodu iz sistema, ki omogoča opazovanje signala na OSA in na osciloskopu. Meritve kažejo, da uporabljeni gradnik AWG v sistem vnaša 6 dB slabljenja. Ostale izgube gredo na račun dodatnih spojev v postavitvi optičnih gradnikov. Tako v primeru optičnega razcepnika za izvedbo TDM-PON, kot v primeru AWG za izvedbo WDM-PON, je izhodna moč upadala sorazmerno z dolžino optičnega vlakna.

Zadnji sklop meritev (rezultati so zbrani v tabeli 3) je bil izveden prav tako z DFB laserjem, vendar je ta oddajal na drugi valovni dolžini (1556,5 nm), ki se je lahko »ujela« na enega izmed valvnodolžinskih kanalov AWG. Pri tej meritvi smo želeli primerjati očesna diagrama v primeru uporabe optičnega razcepnika in v primeru uporabe AWG na različnih razdaljah optičnega distribucijskega omrežja in pri približno enakih močeh izhodnega signala. Da bi to dosegli smo v primeru AWG zmanjšali vhodno moč optičnega signala. Zanimala nas je predvsem oblika očesnega diagrama, da bi lahko ocenili, kateri gradnik vnaša večje popačenje v optični sistem. Pod tabelo 3 so podane tudi slike očesnih diagramov.

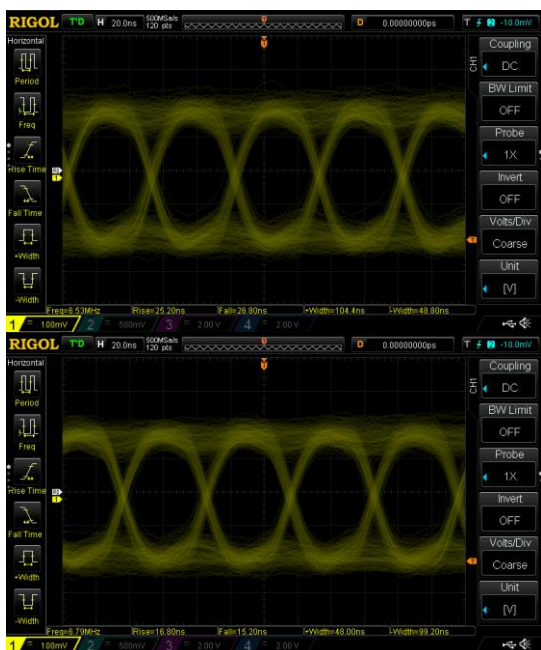
Tabela 3. Rezultati meritev izhodne moči za TDM-PON in WDM PON na različnih dolžinah ODN z različno vhodno močjo na valovni dolžini 1556,55 nm.

DFB laser	Pasivni razcepnik	AWG
l [km]	Pizh [dBm]	Pizh [dBm]
0	-23,4	-23,5
5	-25,5	-25,3
10	25,9	-26,3
15	-27,9	-27,9
20	-28,1	-28,1
25	-29,9	-29,8
30	-30,2	-30,3
35	-32,2	-31,9

Iz slik (od 5 do 7) je razvidno, da se s podaljševanjem optičnega omrežja očesni diagram pričakovano zapira. Pri primerjavi očesnih diagramov v primeru razcepnika in AWG ni bilo opaziti razlik v čistosti in odprtosti. Sklepamo lahko, da oba gradnika v sistem vnašata enako (podobno) popačenje, ki ne vpliva bistveno na sprejem signal pri končnem uporabniku. Tudi na razdalji 35 km optičnega vlakna, je še vedno mogoče ločiti nizko in visoko vrednost signala.



Slika 5. Primerjava očesnega diagrama v primeru pasivnega razcepnika (slika zgoraj) in v primeru AWG (slika spodaj) brez dodatne dolžine optičnega vlakna



Slika 6. Primerjava očesnega diagrama v primeru pasivnega razcepnika (slika zgoraj) in v primeru AWG (slika spodaj) pri 10 km dodanega optičnega vlakna



Slika 7. Primerjava očesnega diagrama v primeru pasivnega razcepnika (slika zgoraj) in v primeru AWG (slika spodaj) pri 20 km dodanega optičnega vlakna

7 Sklep

TDM-PON in WDM-PON sta dve pogosto uporabljeni tehnologiji za PON. Oba pristopa imata svoje prednosti in slabosti, ki jih je treba upoštevati pri izbiri ustrezne tehnologije za določeno omrežje. TDM-PON je preprost, zanesljiv in cenovno ugoden, medtem ko je WDM-PON zmogljivejši in bolj prilagodljiv. Končna odločitev je odvisna od svojevrstnih potreb omrežja in razpoložljivih virov. Z razvojem tehnologije se pričakujejo tudi nadaljnje izboljšave in inovacije v obeh

pristopih, kar bo omogočilo še boljše optično omrežje za izzive prihodnosti.

Pri primerjavi TDM-PON in WDM-PON je treba upoštevati več dejavnikov. TDM-PON je bolj primeren za manjša omrežja z manjšim številom uporabnikov, kjer je glavni poudarek na zanesljivosti in nizkih stroških. WDM-PON pa je zaradi manjšega vstavitvenega slabljenja optimalna izbira za velika omrežja z večjim številom uporabnikov, ki zahtevajo visoko pasovno širino in različne storitve.

Glede na pričakovane zahteve omrežja je treba izbrati ustrezno tehnologijo. Čeprav je WDM-PON zmogljivejši in ponuja večje hitrosti prenosa podatkov, je treba upoštevati tudi stroške izdelave in vzdrževanja. V nekaterih primerih je lahko TDM-PON dovolj za zadovoljitev potreb omrežja, medtem ko je WDM-PON bolj primerna izbira za naprednejše aplikacije.

Na splošno je izbira med TDM-PON in WDM-PON odvisna od posebnih potreb omrežja, števila uporabnikov, zahtevanih hitrosti prenosa podatkov in razpoložljivih virov. Obe tehnologiji imata svoje prednosti in slabosti, ki jih je treba upoštevati pri načrtovanju in izbiri ustrezne tehnologije za PON.

Literatura

- [1] V. Eržen, B. Batagelj. Sistem stabilizacije injekcijske vklenitve Fabry-Perot laserske diode za uporabo v WDM-PON. 26th Seminar on Optical Communications; Ljubljana, 25. do 27. januarja 2023.
- [2] B. Batagelj "Pasivno optično dostopno omrežje s časovnim razvrščanjem", 1. izd. Ljubljana: Založba FE in FRI, 2011.
- [3] B. Batagelj "Deployment of fiber-to-the-home in the Slovenian telecommunications market", Fiber and integrated optics, vol. 32, str. 1–11, 2013.
- [4] V. Eržen, B. Batagelj. Pasivna optična dostopna omrežja z valvnodolžinskim multipleksiranjem odtočnega in pritočnega prometa uporabnika. Elektrotehniški vestnik, 2016, letn. 83, št. 3, str. 87-92.
- [5] V. Eržen, B. Batagelj. WDM-PON: pasivno optično omrežje z valvnodolžinskim multipleksiranjem. Optične komunikacije: zbornik, Ljubljana: Založba FE. 2015, str. 133-139.
- [6] V. Eržen, J. Ratkoceri, B. Batagelj. Tehnike za zagotavljanje stabilnosti injekcijske vklenitve Fabry-Perot laserske diode. Zbornik 31. mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2022, Portorož, Slovenija, 19. - 20. september 2022. str. 127-132.
- [7] Slika razvrstivene valvodne strukture. Elektronski vir: https://en.wikipedia.org/wiki/Arrayed_waveguide_grating
- [8] 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.