

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

**Bezpečnostní rizika v přístupových  
sítích nové generace WDM-PON**

**Security Risks in Next Generation  
Optical Access Networks WDM-PON**

# Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Bělota**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2612R059 Mobilní technologie

Téma: **Bezpečnostní rizika v přístupových sítích nové generace WDM-PON**  
**Security Risks in Next Generation Optical Access Networks WDM-PON**

Jazyk vypracování: čeština

## Zásady pro vypracování:

Pasivní optickou přístupovou sítí WDM-PON je možné zařadit mezi optické přístupové sítě nové generace. Výrobci WDM-PON se často odvolávají na vlastnosti, které v sobě spojují výhody pasivní optické přístupové sítě PON (P2MP) a optické přístupové sítě P2P. Cílem studenta je prověřit bezpečnost WDM-PON na úrovni fyzické vrstvy modelu RM-OSI s bližším zaměřením na přeslechy vznikajících na optickém multiplexoru AWG.

1. Popište technologii pasivní optické sítě nové generace WDM-PON.
2. Popište konstrukci a vlastnosti optického multiplexoru AWG. Tyto vlastnosti laboratorně ověřte.
3. Z naměřených vlastností optického multiplexoru AWG (WDM-PON) sestavte model technologie WDM-PON v simulačním prostředí Optiwave OptiSystem a ověřte bezpečnostní rizika kanálového přeslechu.
4. V simulačním prostředí Optiwave OptiSystem využijte kanálového přeslechu s pomocí optických zesilovačů (EDFA, SOA, případně GS-EDFA) pro sestavení komunikačního řetězce OLT - ONU.

## Seznam doporučené odborné literatury:

[1] PRAT, Josep. *Next-Generation FTTH Passive Optical Networks: Research towards unlimited bandwidth access.* Barcelona: Springer, 2008. ISBN 978-1-4020-8469-0.

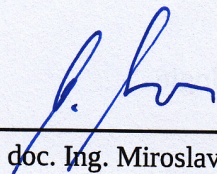
[2] LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice.* Oxford: Elsevier Inc, 2007. ISBN: 978-0-12-373853-0.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

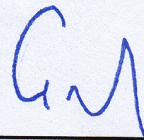
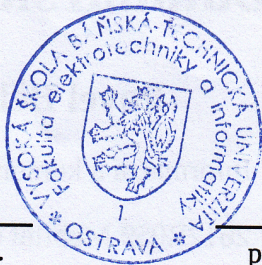
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Koudelka**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 29.04.2016



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární  
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 29. dubna 2016

*Pavel Běláček*.....

Rád bych na tomto místě v první řadě poděkoval Ing. Petru Koudelkovi za odbornou pomoc, příkladnou domluvu a vstřícný přístup. Také bych rád poděkoval svojí rodině za projevy podpory.

## **Abstrakt**

Tématem této bakalářská práce jsou bezpečnostní rizika v optických přístupových sítích nové generace DWDM-PON se zaměřením na optický multiplexor AWG. V první části je popsána síť WDM-PON, další část je věnována optickému multiplexeru AWG. V praktické části jsou ověřena bezpečnostní rizika reálného AWG pomocí simulace v systému Optiwave Optisystem.

**Klíčová slova:** PON, WDM-PON, AWG, bezpečnost

## **Abstract**

The theme of this bachelor thesis are security risks in next generation optical access networks DWDM-PON focusing on the optical multiplexer AWG. The first section describes the WDM-PON network and the second section is devoted to the optical multiplexer AWG. In the practical part of this thesis are verified security risks by simulating real AWG in the simulation of the Optiwave Optisystem.

**Key Words:** PON, WDM-PON AWG, security

# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b>	<b>9</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>10</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>11</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>12</b>
<b>2 Pasivní optické přístupové sítě</b>	<b>13</b>
2.1 Základní stavební prvky PON . . . . .	13
2.2 Referenční model sítě PON . . . . .	14
<b>3 WDM-PON</b>	<b>15</b>
3.1 Historie a vznik WDM-PON . . . . .	15
3.2 Princip sítě WDM-PON . . . . .	15
3.3 Výhody WDM-PON . . . . .	15
3.4 Nevýhody WDM-PON . . . . .	16
3.5 Dense WDM-PON . . . . .	16
3.6 Varianty WDM-PON . . . . .	17
3.7 Bezpečnostní rizika WDM-PON . . . . .	21
<b>4 Arrayed Waveguide Grating</b>	<b>23</b>
4.1 Princip AWG . . . . .	23
4.2 Parametry AWG . . . . .	24
4.3 Dvofunkční konfigurace AWG . . . . .	26
4.4 Bezpečnostní rizika AWG . . . . .	26
<b>5 Optické zesilovače</b>	<b>29</b>
5.1 Parametry optických zesilovačů . . . . .	29
5.2 Třídy zesilovačů podle místa na trase . . . . .	30
5.3 EDFA - Erbium Doped Fiber Amplifier . . . . .	31
5.4 SOA - Semiconductor Optical Amplifier . . . . .	32
<b>6 Praktická část</b>	<b>34</b>
6.1 Měřicí pracoviště a použité přístroje . . . . .	34
6.2 Měření AWG . . . . .	35
6.3 Návrh AWG v prostředí Optiwave . . . . .	36
6.4 Měření sítě WDM-PON . . . . .	38
6.5 Ověření přeslechu . . . . .	42

6.6	Komunikační řetězec OLT-ONU . . . . .	42
6.7	Komunikační řetězec v reálných podmínkách . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>48</b>
	<b>Literatura</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>Seznam Příloh</b>	<b>51</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>51</b>



## Seznam použitých zkratek a symbolů

AT	–	Adaption Function
APD	–	Avalanche PhotoDiode
AWG	–	Arrayed Waveguide Gratings
BER	–	Bit Error Rate
BW	–	Bandwidth
CPON	–	Composite Passive Optical Network
DBA	–	Dynamic Bandwidth Allocation
DFB-LD	–	Dynamic Wavelength Assignment
DWA	–	Dynamic Wavelength Assignment
DWDM	–	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	–	Erbium Doped Fiber Amplifier
EMS	–	Element Management System
FPR	–	Free Propagating Region
FSR	–	Free Spectral Range
ITU-T	–	International Telecommunication Union-Telecommunication
MAC	–	Media Access Control
NE	–	Network Element
NF	–	Noise Figure
OAN	–	Optical Access Network
ODN	–	Optical Distribution Network
OLT	–	Optical Line Termination
ONT	–	Optical Network Terminal
ONU	–	Optical Network Unit
P2MP	–	Point to Multipoint
P2P	–	Point to Point
PLC	–	Planar Lightwave Circuits
PON	–	Passive Optical Network
QoS	–	Quality of Source
RN	–	Remote Node
SNR	–	Signal to Noise Ration
SOA	–	Semiconductor Optical Amplifier
TDM	–	Time Division Multiplexing
TDMA	–	Time Division Multiple Access
UTP	–	Unshielded Twisted Pair
WDM	–	Wavelength Division Multiplexing
$\lambda$	–	Lambda, značení vlnové délky

## Seznam obrázků

1	Referenční model PON sítě . . . . .	14
2	Síťová architektura ve stromové topologii . . . . .	16
3	Varianta s pevně přidělenými vlnovými délkami a rozbočovačem . . . . .	18
4	Varianta s AWG . . . . .	19
5	Varianta kaskádního zapojení AWG a rozbočovače s laditelnými jednotkami . . . . .	19
6	Spektrální analýza jednotky OLT v sestupném směru . . . . .	20
7	Spektrální analýza výstupu AWG na kanálu 1 . . . . .	21
8	Spektrální analýza výstupu ONU . . . . .	22
9	a) Uspořádání AWG multiplexoru, b) Schéma zaměřování paprsku v FPR . . . . .	24
10	Cyklická vlastnost AWG . . . . .	26
11	Dvoufunkční AWG . . . . .	27
12	Kanály DWDM-PON s přeslechy . . . . .	28
13	Ukázka plochosti zisku . . . . .	30
14	Energetické hladiny elektronů . . . . .	32
15	Schéma optického zesilovače EDFA . . . . .	33
16	Topologie měření AWG . . . . .	35
17	Závislost výstupní úrovně kanálů 1-3 na vlnové délce . . . . .	36
18	Závislost výstupní úrovně kanálů 1-3 na vlnové délce . . . . .	37
19	Závislost kanálu 2 v obou směrech . . . . .	37
20	Porovnání reálného a modelovaného AWG . . . . .	38
21	Porovnání reálného a modelovaného AWG po úpravě . . . . .	39
22	Schéma topologie pro měření laseru z OLT . . . . .	39
23	Simulace laseru jednotky OLT pro první kanál . . . . .	41
24	Schéma topologie pro měření laseru jednotky ONU . . . . .	42
25	Blokové schéma zapojení pro zjištění přítomnosti přeslechů . . . . .	42
26	Spektrální analýza kanálu 1 . . . . .	43
27	Spektrální analýza kanálu 2 . . . . .	43
28	Schéma topologie komunikačního řetězce . . . . .	44
29	Diagram oka kanálu 1 . . . . .	44
30	Diagram oka rekonstruovaného signálu na kanálu 2 . . . . .	45
31	Závislost průměrné hodnoty BER na délce optického vlákna v L-pásmu . . . . .	47
32	Závislost průměrné hodnoty BER na délce optického vlákna v C-pásmu . . . . .	47
33	Schéma zapojení v Optiwavu podle topologie z obrázku 28 . . . . .	52

## Seznam tabulek

1	Parametry C-pásma AWG . . . . .	35
2	Parametry L-pásma AWG . . . . .	36
3	Pokusná tabulka . . . . .	40
4	Parametry laseru jednotky ONU . . . . .	41
5	L-pásmo se ziskem 20 dB . . . . .	46

# 1 Úvod

Tématem této bakalářské práce jsou bezpečnostní rizika v přístupových sítích nové generace. Za novou generaci optických přístupových sítí lze označit síť DWDM-PON. Její základní prvek je bezesporu optický multiplexor AWG, kterého se tyto bezpečnostní hrozby týkají. Cílem této práce je prověření bezpečnosti WDM-PON na úrovni fyzické vrstvy modelu RM-OSI s bližším zaměřením na přeslechy, které mohou vznikat na sousedních kanálech optického multiplexoru AWG.

Ve druhé kapitole je popsána problematika pasivních optických přístupových sítí. Třetí kapitola se věnuje síti WDM-PON, jejím variantám a dokonalejší verzi DWDM-PON. Ve čtvrté kapitole je popsána technologie AWG, její parametry a bezpečnostní rizika. Poslední kapitola teoretické části se věnuje optickým zesilovačům, které budou využity k přečtení informace sousedního kanálu AWG.

V praktické části je proměřen reálný multiplexor AWG, zjištěny jeho parametry, které se poté využijí k sestavení komunikačního řetězce a ověření bezpečnostních rizik spojených s přeslechy multiplexoru AWG v rámci simulace v systému Optiwave Optisystem.

## 2 Pasivní optické přístupové sítě

PON je síťová architektura na bázi optických vláken, které mohou poskytovat mnohem větší šířku pásma oproti tradiční metalickým sítím. Pasivní jsou, protože v distribuční síti mezi zákazníkem a poskytovatelem není třeba žádného aktivního síťového prvku, který musí být napájen. Nejčastěji jsou to P2MP sítě, ale do popředí se čím dál více dostávají také sítě typu P2P.

Pasivní optická přístupová síť obsahuje na trase mezi poskytovatelem a zákazníkem pouze čistě pasivní prvky. Z centrální jednotky OLT je vyvedeno jedno sdílené optické vlákno, a to je pomocí optických rozbočovačů rozvětveno k jednotlivým koncovým uživatelům. Vzniká tak rozvětvená stromová struktura s větším počtem připojených koncových účastníků. Optické vlákno vedoucí z jednotky OLT je sdílené a z důvodu co nejnižších nákladů vede vede co nejbliže ke koncovým účastníkům a větví se až ve svém posledním úseku do jednotlivých odboček [1].

### 2.1 Základní stavební prvky PON

Zde je výčet základních prvků v síti PON.

#### 2.1.1 Optická distribuční síť (ODN - Optical Distribution Network)

Tvoří ji soubor všech pasivních optických přenosových prostředků mezi OLT a optickými zakončujícími a síťovými jednotkami ONT a ONU. Zahrnuje například pasivní optické rozbočovače, vlnové filtry, optická vlákna a různé konektory a spojky.

#### 2.1.2 Optická přístupová síť (OAN - Optical Acces Network)

Soubor všech optických distribučních sítí připojených k jednomu OLT.

#### 2.1.3 Optické linkové zakončení (OLT - Optical Line Termination)

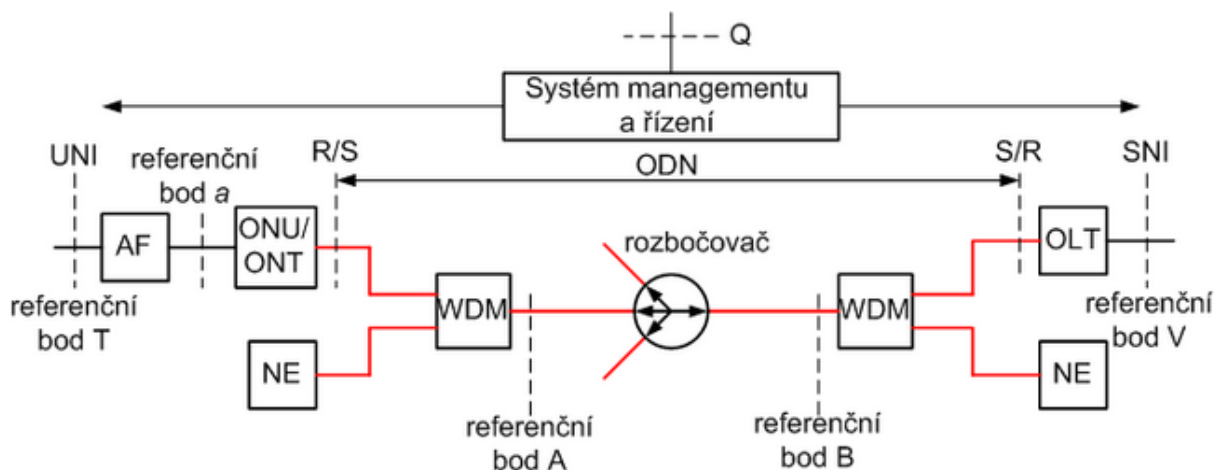
Optické zakončující zařízení na straně poskytovatele připojení. jeho úkolem je připojení optické sítě k páteřním telekomunikačním sítím, konverze použitých protokolů, distribuce taktovacích signálů, správa a dohled nad koncovými jednotkami.

#### 2.1.4 Optické síťové zakončení (ONT - Optical Network Terminal)

Je to zakončení na straně uživatele. Provádí zejména adaptaci protokolů mezi optickou přístupovou sítí a rozhraním.

#### 2.1.5 Optická síťová jednotka (ONU - Optical Network Unit)

Představuje zakončení na zákaznické straně sítě. Oproti ONT realizuje připojení koncového uživatele prostřednictvím navazující metalické nebo bezdrátové sítě.



Obrázek 1: Referenční model PON sítě

## 2.2 Referenční model sítě PON

Referenční model uspořádání sítě PON je zobrazen na obrázku č.1. Tento model se v praxi různě upravuje a zjednodušuje pro určité použití, takže některé prvky tohoto modelu nemusí být použity.

Hranici optické distribuční sítě (ODN) tvoří body R/S a S/R. Tyto body jsou umístěny těsně za jednotkou ONU/ONT, respektive před jednotkou OLT. V ODN jsou definovány přenosové protokoly pasivní optické sítě. Dvojice multiplexních modulů WDM slouží pro oddělení vlnových délek jiné sítě než je PON. Tyto vlnové délky slouží pro provoz obecných přídavných síťových zařízení označených NE (Network Element). Jedná se například o distribuci kabelové televize. Mezi referenčními body A,B se nachází vlastní optická přenosová trasa i se sestavou pasivních optických rozbočovačů. Ty mají za úkol větvit optickou síť pro připojení jednotlivých koncových zákazníků. Na straně koncového zákazníka je ještě k referenčnímu bodu *a* připojena jednotka AF (Adaption Function), která přizpůsobuje funkce rozhraní a protokoly v lokální síti konkrétního uživatele potřebám optické přístupové sítě. Funkce této jednotky také může být implementována již v jednotce ONU/ONT a v tomto případě není samostatná jednotka AF potřeba. Součástí sítě je taktéž její řízení a dohled připojený pomocí rozhraní Q. Tyto funkce jsou velmi často implementovány v samotné jednotce OLT [2].

### 3 WDM-PON

Technologie WDM-PON je nejen podle mého názoru právem nazývaná technologií budoucnosti. Zvyšuje kapacitu systému vysláním několika vlnových délek v jednom optickém vlákně. V raném stádiu vývoje se tato technologie používala například na oddělení vzestupného a sestupného signálu v jednom optickém vlákně. Velmi důležitá výhoda optického vlákna je jeho teoreticky neomezená šířka pásma. Díky WDM-PON se dá poskytovat více služeb najednou.

Funguje na principu dělení vlnových délek na jednom optickém médiu. Každému účastníkovi přiřazuje vlastní vlnovou délku. To je její hlavní výhoda oproti systému TDM-PON, kde všichni účastníci sdíleli pouze jednu.

#### 3.1 Historie a vznik WDM-PON

Tato technologie byla poprvé popsána již v roce 1970. V roce 1978 byl v laboratorních podmínkách uskutečněn první přenos, kde byli použity dvě vlnové délky současně. Později přišla standardizace ITU-T (ITU-T G.694.2) a určila jednotné vlnové délky pro realizaci vlnového dělení. Také se určily dvě alternativy hrubého Coarse WDM a hustého Dense WDM vlnového dělení. Liší se v odstupu vlnových délek jednotlivých kanálů [3].

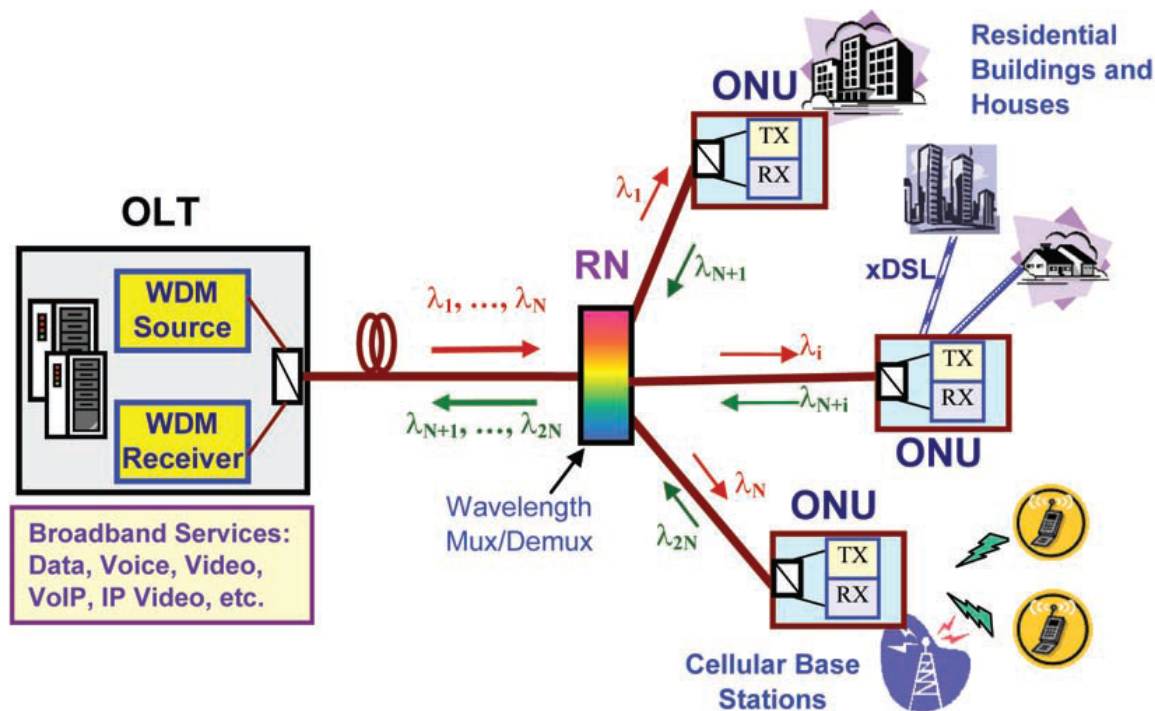
#### 3.2 Princip sítě WDM-PON

Síťovou architekturu ve stromové topologii znázorňuje obrázek č.2. V této síti každá koncová jednotka ONU obdrží soubor vlnových délek pro komunikaci s jednotkou OLT. Architektura je podobná síti PON zobrazené na obrázku č. 1 kromě toho, že optický rozbočovač je na RN nahrazen WDM multiplexorem. Jednotka OLT sbírá informace z vnějších sítí a ustanovuje širokopásmové služby pro všechny účastníky.

WDM zdroj na jednotce OLT generuje sestupné kanály na jednotlivých vlnových délkách pro všechny ONU a ty jsou přenášeny optickým vláknem do RN, kde jsou jednotlivé vlnové délky směrovány do jejich určených ONU přes WDM multiplexor a příslušné distribuční vlákna. Každá jednotka ONU, která obvykle sídlí v suterénu budov obsahuje optický vysílač a přijímač. Přijímač detekuje určenou sestupnou vlnovou délku a načítá přijatá data. Občas tyto data mohou být dále distribuovány více účastníkům ve stejném přístupovém prostoru prostřednictvím jiných médií, jako je například DSL, bezdrátové sítě atd. Optický vysílač na ONU moduluje data na určené vlnové délce ve vzestupném směru. Ta je poté přes RN přenášena zpět do jednotky OLT. Všechny vlnové délky směřující do jednotky OLT jsou v ní detekovány pomocí WDM přijímače [7].

#### 3.3 Výhody WDM-PON

Jak již bylo výše zmíněno, každý účastník má jednu vlnovou délku. Tím pádem má každý uživatel přístup k celé šířce pásma. Díky tomuto řešení, kdy má každý dům jednu vlnovou délku je WDM-



Obrázek 2: Síťová architektura ve stromové topologii

PON bezpečnější a lépe rozšiřitelná. Další výhodou WDM-PON oproti jiným technologiím je její jednodušší řídicí MAC vrstva, protože tato technologie poskytuje Point to Point (P2P) spojení mezi OLT a ONU a nevyžaduje řadiče Point-to-multipoint (P2MP) jako v případě jiných PON sítí. Další velkou výhodou je flexibilita vyplývající ze spojení P2P. Každé spojení může běžet na jiných rychlostech a rozdílných protokolech [4].

### 3.4 Nevýhody WDM-PON

Největší nevýhodou je určitě nákladnost jejích komponentů. Je dána například specifickými vlastnostmi jednotek ONU. Další nevýhodou je potřeba regulace teploty. Komponenty WDM-PON totiž mají tendenci nechat se ovlivňovat okolními teplotami. Regulace teploty spotřebovává energii a vyžaduje aktivní elektronické prvky. Pro odstranění potřeby regulace teploty byly vyvinuty atermální WDM komponenty a systémy, které nejsou na různé teploty náchylné. Tyto systémy se však také nepříznivě projeví na ceně [5].

### 3.5 Dense WDM-PON

Rozlišují se v podstatě dva typy WDM-PON. Prvním z nich je jednodušší, levnější a méně výkonná Coarse WDM. Druhá pak ekonomicky a konstrukčně náročnější ale hlavně dokonalejší a výkonnější Dense WDM.



Technologie DWDM byla vyvinuta za účelem zvýšení přepravní kapacity a přenosové vzdálenosti zajištěné s pomocí optických zesilovačů. V této technologii je kladen důraz na co nejvyšší vlnovou délku a kanálovou rozteč v příslušné oblasti vlnových délek, kde operují optické zesilovače. To vedlo k použití odstupů vlnových délek 0,4 až 1,6 nm (200 až 50 GHz) v oblasti vlnových délek 1500 až 1600 nm, což odpovídalo pásmu C a L. Do jednoho optického vlákna to umožňuje multiplexovat až sto vlnových délek. Z toho důvodu je zde kladen velký důraz na maximální přesnost kontroly vlnové délky, to znamená, že je potřeba přísná kontrola teploty, klidového proudu laserových diod a filtrů. Pro přesné nastavení vlnové délky byly zavedeny monitorovací techniky pro vysílanou vlnovou délku laserovými diodami. Laserové diody DFB a elektro-absorpční modulátory se používají jako zdroje DWDM, kde jsou tyto zařízení vybrané pro každou vlnovou délku. Dielektrické tenkovrstvé filtry, odbočnice AWG a vláknové mřížky jsou použity pro multiplexování a demultiplexování. Dále je ke stabilizovaným vlastnostem těchto optických filtrů používána regulace teploty. Tyto dodatečné obvody nutné pro nastavení přesné vlnové délky zvyšují náklady na systémy používající DWDM. Jelikož se ale DWDM zařízení jako je DFB laserová dioda nebo různé optické filtry vyrábí ve větším a větším měřítku, dá se očekávat snižování nákladů na tuto technologii [8].

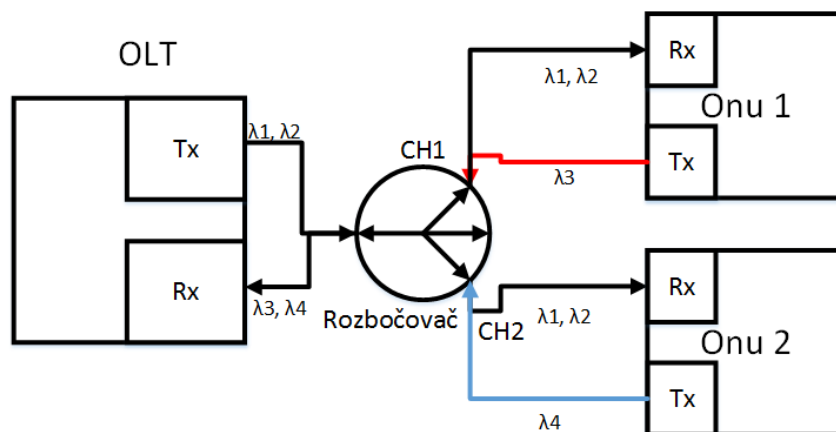
Doporučení ITU-T G.694.1 „Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid“ specifikuje jednotlivé přenosové kanály v oblasti vlnových délek v rozsahu od 1490 nm (200,95 THz) do 1620 nm (186,00 THz), (tzv. S, C a L pásmo). DWDM rastr vychází z normalizované pilotní frekvence 193,1 THz. Od této frekvence se odvíjí rastr s rozestupy jednotlivých kanálů v rozsahu 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz (ultra DWDM), ve vývoji je už i 12,5 GHz. Pro správnou funkci a kvalitu přenosu je nutné, aby se vlnová délka neodchylovala od předepsané vlnové délky o více než 0,2 odstupů nosných, což odpovídá toleranci +/- 0,16 nm pro 100 GHz rastr [6].

### 3.6 Varianty WDM-PON

#### 3.6.1 Varianta s pevně přidělenými vlnovými délkami a pasivním rozbočovačem

U této WDM-PON varianty musí být pevně přiděleny vlnové délky individuálně všem koncovým jednotkám ONU. Například při připojení podle obrázku 3, kde jsou dvě jednotky ONU, budou mít v sestupném směru vlnové délky  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$ . Pomocí pasivního rozbočovače se optický signál rozdělí do všech odchozích směrů, takže se všechny kanály na různých vlnových délkách dostanou do všech koncových jednotek ONU. Ty si potom pomocí vlnového filtru, který je pevně nastaven, vydělí svou určenou nosnou vlnovou délku. Dále je tu ještě vlnová délka označená jako  $\lambda_b$ . Ta je sdílená pro všechny ONU a je vyhrazená pro broadcastový provoz.

Ve vstředném směru má každá koncová jednotka ONU přidělenou vlastní vysílací vlnovou délku. V našem obrázku 3 je to  $\lambda_3$  a  $\lambda_4$ . Na těchto vlnových délkách budou ONU odesílat odchozí toky dat. Je to vlastně architektura typu P2P, protože komunikace jednotky OLT s koncovými jednotkami ONU probíhá na individuálně stanovených vlnových délkách.



Obrázek 3: Varianta s pevně přidělenými vlnovými délkami a rozbočovačem

Výhodou tohoto řešení je jednoduchost a cena pasivního rozbočovače. Hlavní nevýhoda této varianty je patrná z obrázku 3, kde lze vidět, že při sestupném směru jsou všechny vlnové délky šířeny všem koncovým jednotkám ONU. V této variantě se proto musí zajistit šifrování dat v sestupném směru, aby se předešlo jejich možnému odposlechu. Další nevýhodou je vysoký vložný útlum pasivního rozbočovače, který výrazně limituje počet připojených ONU. Dále u tohoto řešení není možné, aby byly připojeny dvě jednotky ONU, které budou komunikovat na stejných vlnových délkách. Striktní přiřazení vlnových délek také ukazuje nevhodné nakládání s přenosovými kapacitami, jelikož striktně přiřazená vlnová délka nemůže být nabídnuta jiné jednotce, která by v daném okamžiku potřebovala zvýšenou přenosovou kapacitu [3].

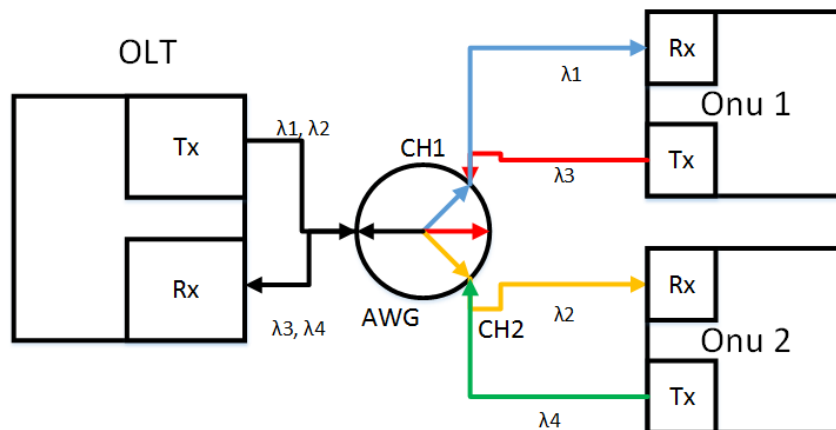
### 3.6.2 Varianta pomocí metody AWG

Druhou možností je využití směrových odbočnic na bázi vydělování vlnových délek pomocí metody AWG. Z jednotky OLT přichází v sestupném směru optický signál ve formě vlnového multiplexu. Ten se pomocí AWG vydělí na jednotlivé vlnové délky do určených kanálů a k jednotkám ONU se dále šíří v oddělených vláknech. Princip vzestupného směru je stejný jako u první varianty. Každá koncová jednotka vysílá data na jí vyhrazené vlnové délce.

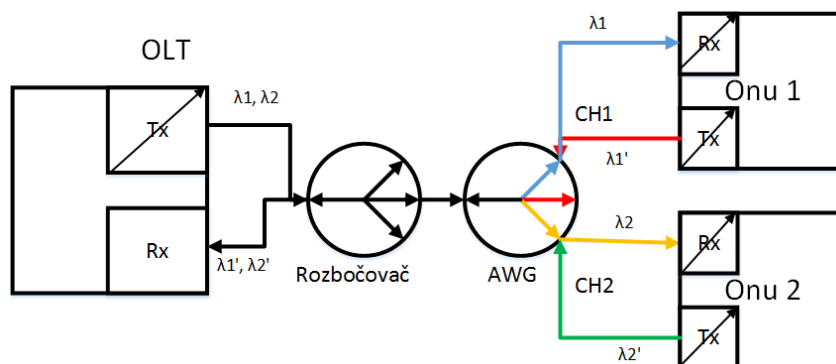
Největší výhodou této metody oproti metodě s pasivním rozbočovačem je znatelné snížení vložného útlumu díky směrové odbočnici AWG. Její hodnota vložného útlumu se pohybuje typicky kolem hodnoty 4 dB a to nezávisle na počtu použitých vlnových délek. Další výhodou této varianty spočívá v odstranění pasivního WDM filtru na vstupu koncových jednotek. Díky tomu se ještě více sníží celkový útlum. Nevýhodou této varianty je vyšší pořizovací cena oproti pasivnímu rozbočovači [3].

### 3.6.3 Kaskádní zapojení AWG a pasivních optických rozbočovačů

Třetí varianta se skládá z kaskádního zapojení pasivních optických rozbočovačů a směrových odbočnic AWG. K jednotlivým výstupům optického rozbočovače se připojí AWG odbočnice nebo



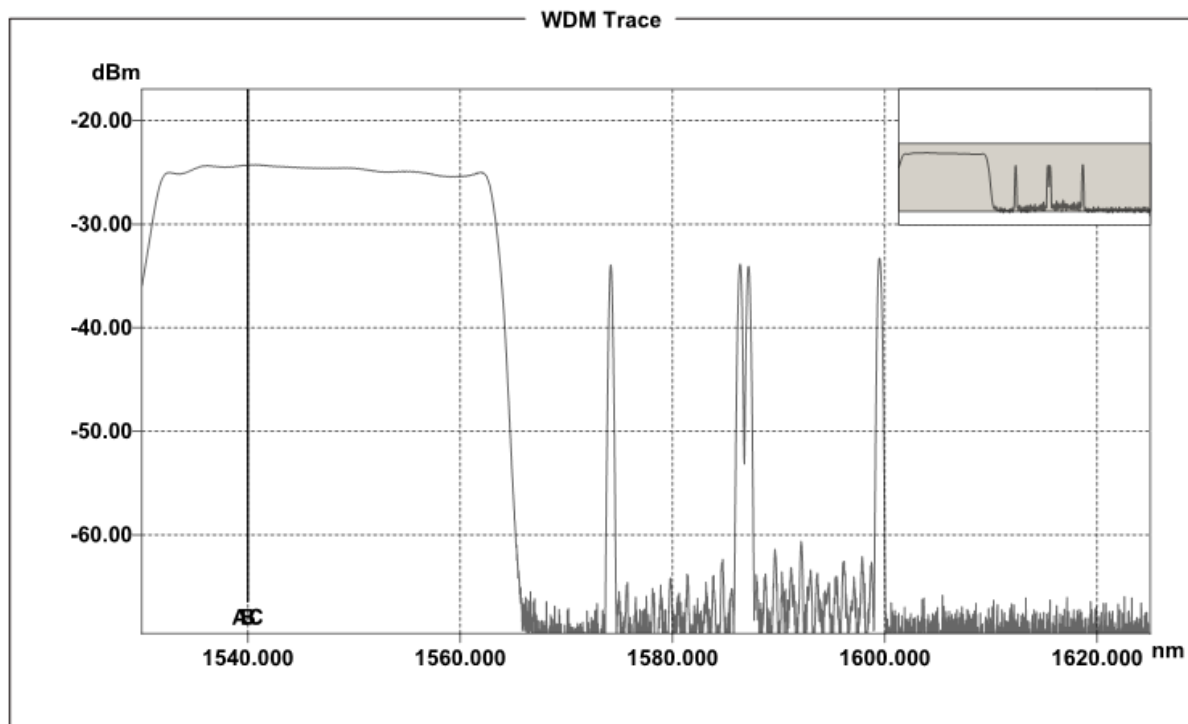
Obrázek 4: Varianta s AWG



Obrázek 5: Varianta kaskádního zapojení AWG a rozbočovače s laditelnými jednotkami

kaskádně i několik odbočnic AWG. Použitím několika AWG odbočnic dosáhneme větší přesnosti při vydělování jednotlivých délek. Právě díky větší přesnosti je tato varianta předpokladem pro použití hustého vlnového multiplexu DWDM. Když se toto zapojení zkombinuje s laditelnými filtry v optických jednotkách, může vést k návrhu univerzálního síťového plánu optických kanálů. Navíc s použitím univerzálních koncových jednotek a volitelných vlnových délek můžeme přidělovat jednotkám kanály podle aktuální potřeby a požadavků. Tento mechanismus se označuje zkratkou DWA (Dynamic Wavelength Assignment) a odpovídá dynamickému přidělování přenosových kapacit v sítích s časovým dělením - DBA (Dynamic Bandwidth Allocation).

Pro vzestupný přenos je možné vyhradit jeden kanál, který bude sdílený pro všechny koncové jednotky, případně použít širokopásmové optické zdroje a metodu tzv. spectrum-slicing. Dá se také použít varianta CPON (Composite PON), která se vyznačuje sdílenou vlnovou délkou a použitím sdíleného přístupu TDMA ve vzestupném směru. Pro vzestupný směr se dá uvažovat s implementací přeladitelného optického zdroje do koncových jednotek ONU. Nevýhodou tohoto zapojení je pochopitelně vysoká nákladovost [3].



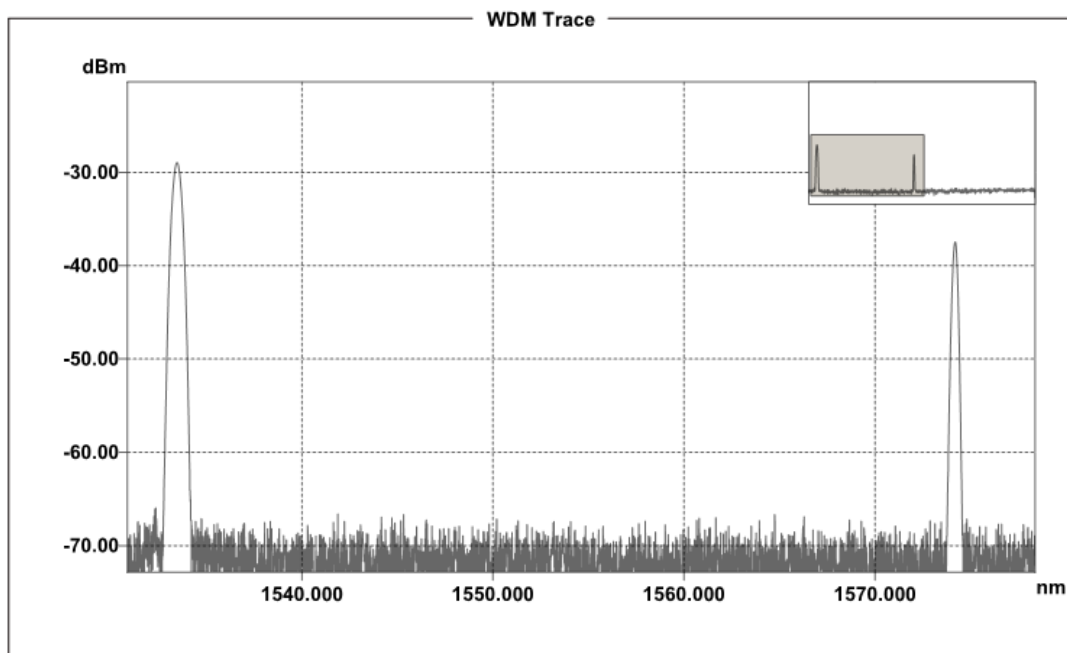
Obrázek 6: Spektrální analýza jednotky OLT v sestupném směru

### 3.6.4 Varianta se širokopásmovým zdrojem a lasery Fabry-Perot v ONU

Tato varianta je v podstatě modifikovaná varianta pomocí metody AWG uvedená výše. Byla použita pro účely této práce, protože se nachází na FEI VŠB. Je to velmi elegantně řešená síť WDM-PON. Jednotka OLT vysílá ve dvou pásmech. V L-pásmu vysílá v kanálech na různých vlnových délkách informace. Dalším je širokopásmový zdroj světla, který vysílá téměř přes celé C-pásmo na stejné úrovni. Ten se na AWG vydělí na výstupy jednotlivých kanálů a vznikne takzvaný ladící peak, na který se naladí laser Fabry-Perot, který obsahuje použitá ONU jednotka a na této vlnové délce poté tato jednotka ONU vysílá zpět informace ve vzestupném směru do AWG a OLT jednotky. Na obrázku číslo 6 je zobrazena spektrální analýza výstupu jednotky OLT. Při tomto měření byly aktivní ONU jednotky na kanále číslo jedna, šestnáct, sedmnáct a třicet dva. Je zde vidět, že širokospektrální zdroj má přibližně -24 dBm a informační kanály v L-pásmu přibližně -34 dBm.

Na obrázku číslo 7 je spektrální analýza výstupu kanálu 1 z AWG. Jsou zde vidět dvě špičky. První je na vlnové délce 1533,47 nm. Ta je vydělená z širokospektrálního zdroje světla a slouží pro naladění jednotky ONU. Druhá špička je na vlnové délce 1574,19 nm. To je ta první špička L-pásmu z obrázku číslo... na které jednotka OLT vysílá pro první kanál, ostatní špičky byly vyděleny na příslušné kanály.

Na obrázku číslo 8 je zobrazena spektrální analýza vzestupného směru na výstupu jednotky ONU. Je zde pouze špička na vlnové délce 1533,47 nm. Na tuto vlnovou délku se jednotka ONU



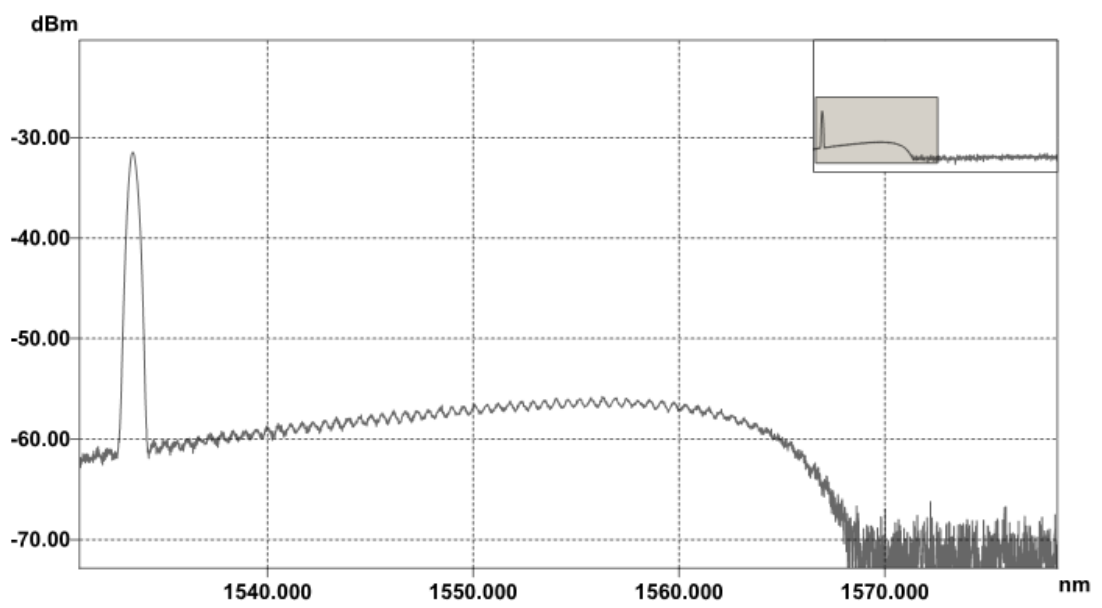
Obrázek 7: Spektrální analýza výstupu AWG na kanálu 1

naladila díky FP laseru a vysílá na ní data zpět do jednotky OLT.

Nesporná výhoda této varianty je použití univerzálních ONU jednotek, které se sami automaticky naladí na příslušnou vlnovou délku, která se na AWG vydělí ze širokospektrálního zdroje světla. Tak se dají jednoduše měnit ONU jednotky, není třeba mít na každou vlnovou délku naladěnou jednu náhradní jednotku ONU.

### 3.7 Bezpečnostní rizika WDM-PON

Bezpečnostní rizika se odvíjejí podle použité technologie v síti WDM-PON. Zcela jistě vyšší bezpečnostní riziko je u WDM-PON, která využívá optický rozbočovač, jelikož ten do každé jednotky ONU posílá všechny kanály na všech vlnových délkách. V tomto případě by stačilo přeprogramovat jednotku ONU na jinou vlnovou délku určenou pro jiný kanál nebo odstranit hardwarový filtr jednotky a získat tak přístup k celému sestupnému směru. V tomto případě je nutné zajistit šifrování každého kanálu, aby nemohlo dojít k odposlechům.



Obrázek 8: Spektrální analýza výstupu ONU

## 4 Arrayed Waveguide Grating

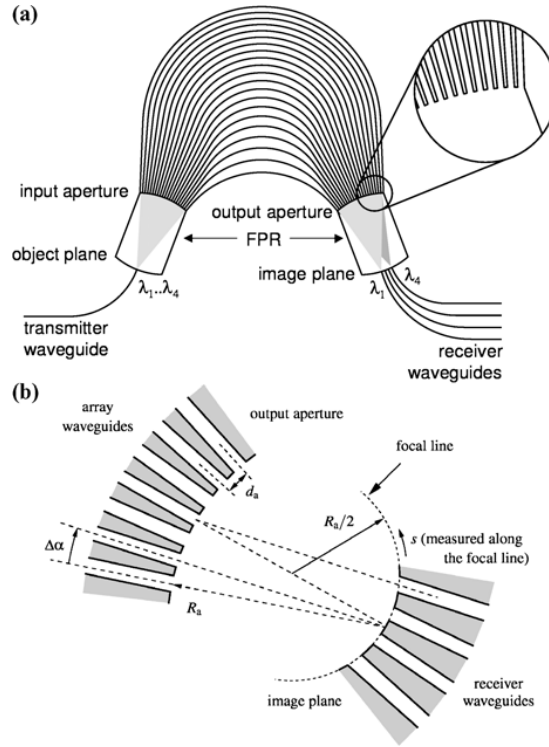
WDM technologie je považována za jeden z nejpůvabnějších způsobů podpory více uživatelů ve velké šířce pásma. Značného zlepšení parametrů přinese výměna optického rozbočovače za AWG. AWG patří do třídy interferometrických filtrů a vyrábí se planární optickou technologií. Poprvé se o nich zmínil v roce 1988 pan Smith, později v roce 1990 Takahashi a Gragon (1991). Říká se jim různými názvy. Např. fázová pole (Phased arrays), vlnový směrovač (WGR - Waveguide Grating Router), ale nejčastěji se používá název AWG (Arrayed Waveguide Gratings), který zavedl pan Takahashi [5].

AWG může sloužit jako směrovač na bázi vlnové délky nebo demultiplexer, protože rozděluje složený WDM signál na vstupním portu do jednotlivých kanálů. Ve vzestupném směru je použit jako multiplexer, když všechny kanály sdružuje do jednoho. Nejpoužívanějším multiplexerem je AWG založený na technologii oxid křemičitý-křemík díky velmi nízkému útlumu (méně než 0,05 dB/cm).

### 4.1 Princip AWG

Obrázek číslo 9 ukazuje schématické uspořádání AWG-demultiplexoru. Operaci lze chápat následovně. Když se paprsek šíří skrz transmitter waveguide do Free Propagation Region (FPR), již není bočně omezen a stává se divergentním. Po dosažení Input Aperture (vstupní otvor) je paprsek napojen na pole vlnovodů a šíří se jednotlivými vlnovody směrem k output aperture (výstupnímu otvoru). Délka vlnovodů v poli je zvolena tak, že délka optické dráhy mezi sousedními vlnovody je rozdílná násobkem celého čísla střední vlnové délky  $\lambda_c$  demultiplexoru. Pro  $\lambda_c$  pole v jednotlivých vlnovodech dorazí na output aperture se stejnou fází a tím i rozložení pole na vstupním otvoru je reprodukováno na výstupním. Divergentní paprsek na vstupním otvoru je takto transformován na konvergentní se stejnou amplitudou a fází šíření a vstupní pole v objektové rovině (object plane) vede k odpovídajícímu obrazu ve středu obrazové roviny (image plane). Prostorové oddělení různých vlnových délek se získá lineárně se zvyšující délkou jednotlivých vlnovodů v poli, které zavádějí na vlnové délce závislý sklon odchozího paprsku, spojeného s posunem ohniska podél image plane (obrazové roviny). Pokud jsou vlnovody přijímače umístěny ve vhodných místech podél image plane, různé vlnové délky jsou vedeny do různých výstupních portů [9].

Požadavky na AWG jsou velmi nízké úrovně přeslechů mezi sousedními kanály a jejich vysoká izolace. Dále musí být kompletně pasivní kvůli snižování nákladů, vykazovat velmi nízké ztráty a v neposlední řadě musí být zajištěn spolehlivý provoz se stabilními vlastnostmi v širokém rozsahu teplot [5].



Obrázek 9: a) Uspořádání AWG multiplexoru, b) Schéma zaměřování paprsku v FPR

## 4.2 Parametry AWG

Důležitým parametrem AWG je jeho vložný útlum. Ten se obvykle pohybuje v rozmezí 3-5 dB na daný kanál.

Zaostření polí šířících se v AWG, je dosaženo v případě, že rozdíl délek  $\Delta L$  mezi sousedními vlnovody se rovná celému číslu  $m$  vlnových délek uvnitř AWG.

$$\Delta L = m \cdot \frac{\lambda_c}{n_{eff}} \quad (1)$$

Číslo  $m$  je pořadí pole,  $\lambda_c$  je centrální vlnová délka AWG,  $n_{eff}$  je efektivní refrakční (fázový) index řízeného módu a  $\lambda_c/n_{eff}$  odpovídá vlnové délce uvnitř pole vlnovodů. Za těchto okolností se pole chová jako čočka s obrazem a objektovou rovinou ve vzdálenosti  $R_a$  od obou otvorů. Na druhou stranu ohnisková čára, která definuje obrazovou rovinu, opisuje kruh s poloměrem  $R_a/2$  a vstupy a výstupy vlnovodů by se na této čáře měli nacházet.

Rozdíl délek sousedních kanálů  $\Delta L$  vede ke vzniku fázového posunu podle vzorce

$$\Delta\phi = \beta\Delta L \quad (2)$$



kde

$$\beta = 2\pi v n_{eff} / c \quad (3)$$

je konstanta šíření ve vlnovodu,  $v=c/\lambda$ ,  $v$  je frekvence šířící se vlny, a  $c$  je rychlost světla ve vakuu. Fázový posun závislý na vlnové délce  $\Delta\phi$  představuje sklon odchozí vlny. Prostorová disperze AWG  $D_{sp}$  je poměr bočního posunu ohniska podél obrazové roviny  $ds$  ku změně frekvence  $dv$ . Je dána vzorcem

$$D_{sp} = \frac{ds}{dv} = \frac{1}{v_c} \frac{n_g}{n_{FPR}} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta\alpha} \quad (4)$$

$n_{FPR}$  je index módu ve Free Propagating region,  $\Delta\alpha$  je úhel odchytky mezi vlnovody v poli ve fan-in a fan-out sekcích a  $n_g$  je skupinový index módu vlnovodu:

$$n_g = n_{eff} + v \frac{dn_{eff}}{dv} \quad (5)$$

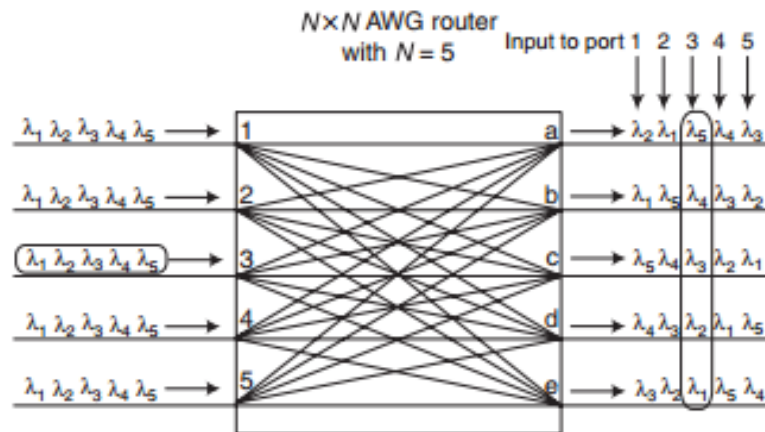
Podle vzorce číslo 1 a 4 je prostorová disperze plně určena pořadím  $m$  a úhlem odchytky  $\Delta\alpha$  a v důsledku toho nemá vyplnění prostoru mezi vlnovody poblíž otvorů vliv na disperzní vlastnosti AWG.

V případě že se vstupní vlnová délka změní tak, že fázový posun  $\Delta\phi$  se mezi sousedními vlnovody zvětší o  $2\pi$ , přenos bude stejný jako předtím, to znamená, že odezva AWG je periodická. Perioda ve frekvenční oblasti se nazývá Free Spectral Range (FSR) - volný spektrální rozsah a vzorec  $\Delta\beta\Delta L = 2\pi$  v kombinaci s vzorcem číslo 1 vede k:

$$FSR = \frac{v_c}{m} \left( \frac{n_{eff}}{n_g} \right) \quad (6)$$

Aby se zabránilo problémům s přeslechy, volný spektrální rozsah by měl být větší než celý kmitočtový rozsah, který obepíná všechny kanály. Například pokud má AWG demultiplexor 8 kanálů a odstup kanálů je 200 GHz, FSR by měla být minimálně 1600 GHz [9].

Cyklická vlastnost také hraje důležitou roli v provedení NxN, které se používá ve WDM-PON zapojení a to umožňuje použití bezbarvých jednotek ONU a opětovné použití vlnové délky. AWG typu NxN má N vstupů a N výstupů. Způsob šíření signálu v tomto AWG v každém vstupním vlnovodu je shodný s šířením popsaným pro konfiguraci 1xN. Obrázek č.10 ilustruje cyklickou vlastnost NxN AWG, kdy N=5. Na ukázce signály na pěti různých vlnových délkách dopadají na každý z pěti vstupních portů. Vlnové délky  $\lambda_1 \dots \lambda_5$  dopadající na vstupní port 1 jsou rozděleny mezi výstupními porty b, a, e, d, resp. c. Port 2 ale bude cyklicky otočený a distribuovaný mezi výstupními porty a, e, d, c, resp. b. Cyklická a symetrická vlastnost umožňuje současný přenos signálů na N vlnové délce do N rozdílných vstupních portů, přičemž každý výstupní port, který je příjemcem signálů na N různých vlnových délkách po jednom z každého vstupního portu. Tato vlastnost také umožňuje současné multiplexování/demultiplexování vlnových délek [5].



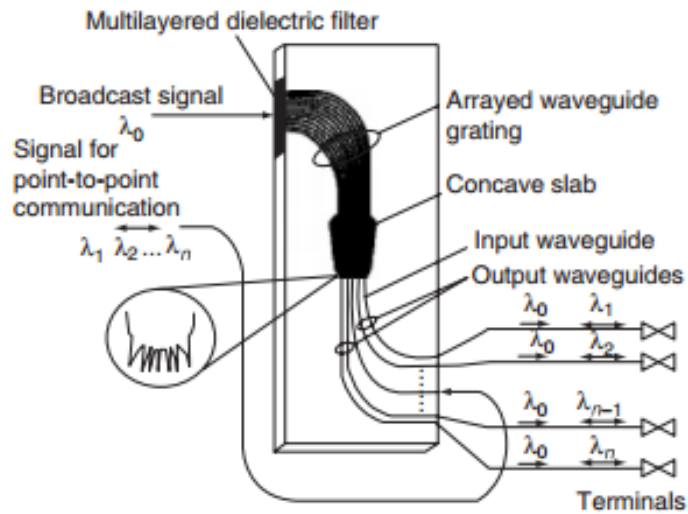
Obrázek 10: Cyklická vlastnost AWG

### 4.3 Dvoufunkční konfigurace AWG

Tyto dvě funkce jsou zastoupeny optical power splitting a směřováním podle vlnových délek. Tyto funkce mají zásadní význam pro WDM a výkonově dělené pasivní optické sítě, které jsou pokryty na stejné fyzickém optickém vlákně. Logická topologie P2P je na síti WDM usnadněna díky funkci směřování vlnovými délkami, zatímco topologie P2MP, která je optimalizována pro služby vysílání videa, je usnadněna prostřednictvím funkce rozbočení výkonu. Na obr.11 je 14-ti kanálový optický rozbočovač/router odrazového typu na bázi PLC. Pro WDM sítě s vlnovými délkami  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ , bude signál dopadající na AWG nejdříve ohnutý do části slab, poté se podle optického výkonu rovnoměrně rozdělí do každého vlnovodu. Signály v každém z vlnovodů budou mít rozdílný fázový posun díky různým délkám vlnovodu. Na čelní straně AWG se každý signál odráží od vícevrstvého dielektrického filtru zpět skrz vlnovody do slab. Jelikož je čelo vlny signálu nakloněno z důvodu rozdílných drah mezi uspořádanými vlnovody, tak se signál zaměří na jiném výstupním vlnovodu v závislosti na jeho vlnové délce. Naproti tomu pro překrývající se výkonově dělenou síť, signál na broadcast vlnové délce  $\lambda_0$  dopadá na jednom z AWG vlnovodů ze strany vícevrstvého dielektrického filtru, který je transparentní k  $\lambda_0$ . Signál putuje do desky přes vstupní vlnovod, a dělí se na každý výstup [5].

### 4.4 Bezpečnostní rizika AWG

U sítě s použitím AWG jsou bezpečnostní rizika daleko nižší, jelikož tato topologie zajišťuje spojení typu bod-bod. Je to díky vydělování vlnových délek odbočnicí AWG. Tak se na každou jednotku ONU dostane pouze její kanál na vlastní přidělené vlnové délce. Může se zdát že otázka bezpečnosti je zde již vyřešená, ale opak může být pravdou. Nic není dokonalé a odbočnice AWG jistě není výjimkou. Problém spočívá v nepřesnosti vydělování vlnových délek na jednotlivé výstupy AWG. Při vydělení vlnové délky na jeden kanál se může stát, že se na výstupní portu může

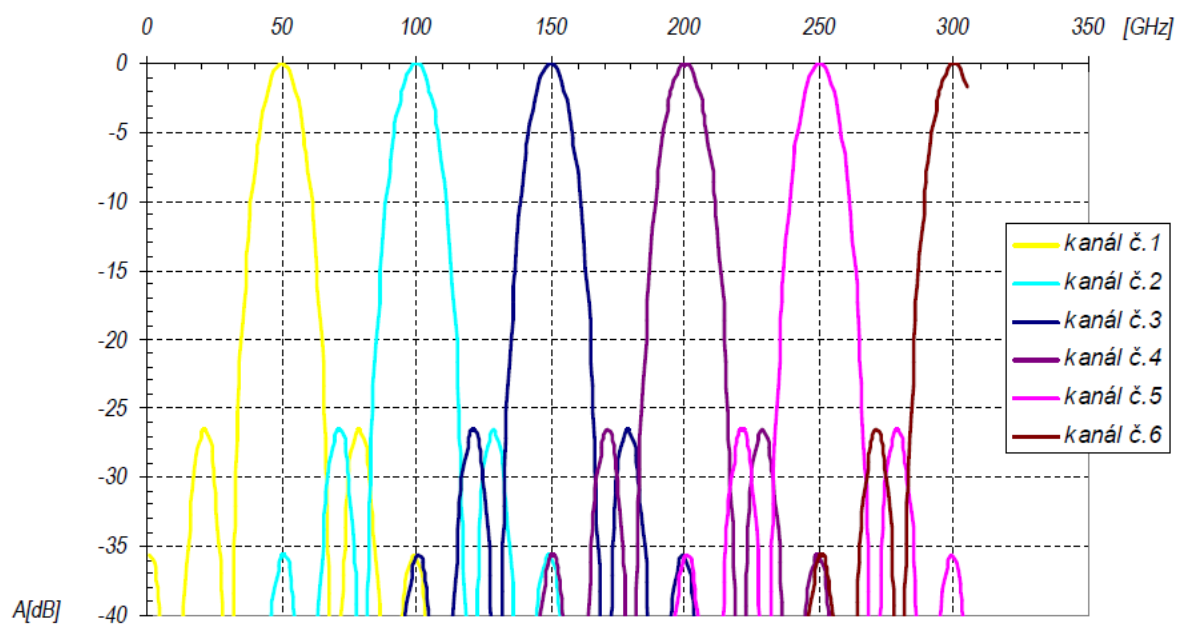


Obrázek 11: Dvofunkční AWG

objevit přeslech sousedních kanálů. Na obrázku č.12 lze vidět tzv. laloky přeslechů zasahujících do sousedních kanálů.

#### 4.4.1 Přeslech

Jedna z nejdůležitějších nežádoucích vlastností je mezikanálový přeslech. Teoretický přeslech ze sousedního kanálu vyplývá z překrývání ohniskového pole a záleží na vzdálenosti mezi sousedními přijímači vlnovodů. Obvykle mezera jeden až dvojnásobku šířky vlnovodu je dostatečná pro útlum přeslechu více než 40 dB. V praxi však jiné mechanismy tento útlum omezují. Nejdůležitějšími jsou chyby při fázovém převodu pole vlnovodů. Jsou kvůli nerovnoměrnostem v tloušťce vrstvy, šířky vlnovodu nebo indexu lomu. AWG na polovodičové bázi vykazují mírně menší přeslechová čísla ve srovnání s AWG na bázi oxidu křemíku. Ověření přítomnosti přeslechu v simulaci AWG bude naplnit praktické části této práce [9].



Obrázek 12: Kanály DWDM-PON s přeslechy

## 5 Optické zesilovače

Optické zesilovače jsou jednou z nejdůležitějších technologií pro optické komunikační sítě. V kombinaci s technologií WDM můžou přenášet obrovské velikosti dat na vzdálenosti několika kilometrů až po velké zaoceánské vzdálenosti.

Základní optická komunikace se skládá z vysílače a přijímače, které propojuje optické vlákno. A stejně jako v metalických vedeních se ani v optických útlumu nevyhneme. Sice oproti měděným vodičům měrný útlum o mnoho menší, při větších vzdálenostech se jistě projeví.

Před použitím optických zesilovačů se optický signál musel tzv. elektronicky regenerovat, aby mohl dosáhnout přenosu na velké vzdálenosti. Elektronická regenerace signálu probíhala tak, že příchozí optický signál se musel převést na elektrický, zesílit se a znovu převést na optický a odeslat dál. Tímto způsobem se to dá řešit při přenosu nízkokapacitního optického kanálu, jenomže u přenosu desítek vysokokapacitních WDM kanálů je to téměř nemožné.

Naproti tomu byl ideální optický zesilovač navržen tak, aby byl schopný zesílit optický signál na vstupu bez jakéhokoli převádění na elektrický signál. Díky tomu může zesílit všechny WDM kanály dohromady, a nezáleží mu na počtu kanálů, jejich přenosových rychlostech a nebo použitých protokolech. Další výhodou optických zesilovačů je, že optická síť může být různě upravována, aniž by bylo třeba nějak upravit optický zesilovač [10].

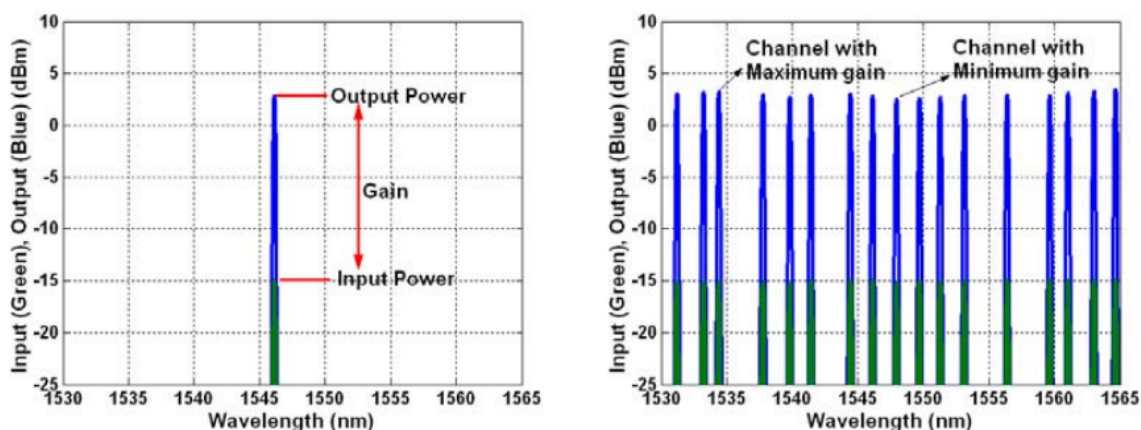
### 5.1 Parametry optických zesilovačů

Nejdůležitějším parametrem optického zesilovače je bezesporu jeho provozní zisk. Ten se měří v decibelech a udává o kolik je zesílen vstupní signál. Například zisk 10 dB vynásobí výkon vstupního signálu deseti a zisk 30 dB vynásobí vstupní výkon tisíci. Některé zesilovače jsou určeny pro provoz v jednom nastaveném zisku, zatímco jiné mohou operovat v různém rozsahu hodnot zisku.

Jsou dva druhy optických zesilovačů. Optický zesilovač může být uzpůsoben zesilování jediného kanálu nebo zesilování multikanálu (WDM). Zesilovače pro WDM jsou určeny pro provoz při libovolném počtu vstupních kanálů. Důležitý parametr WDM zesilovačů je tzv. "plochost" zisku. Ta ukazuje odchylku zisku jednotlivých kanálů. Pokud není zisk plochý, různé WDM kanály budou mít různé zisky, což povede k chybám. Levnější optické WDM zesilovače splňují plochý zisk na úkor například rozsahu zisku. Další parametr, který by měl optický zesilovač splňovat je velký rozsah příkonu na vstupu zesilovače.

Jakékoliv zesilovače, ať už elektronické nebo optické do vedení vnáší šum. Hladina šumu optického zesilovače je charakterizována jeho šumovým číslem NF(Noise Figure). NF je definován poměrem SNR (Signal to Noise Ratio) na vstupu ku SNR na výstupu, takže čím menší NF, tím líp.

$$NF = 10 \log \left( \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \right) \quad (7)$$



Obrázek 13: Ukázka plochosti zisku

Další důležitá vlastnost optických zesilovačů je jejich reakce na dynamické změny vstupního výkonu. Ideálnímu optickému zesilovači by se při změně vstupního výkonu neměl vůbec změnit jeho zisk.

Pro shrnutí by měl ideální optický zesilovač umět zesilovat více kanálů najednou v co nejširším pásmu vlnových délek s co nejvyšším ziskem. Dále vysoký výstupní výkon, s velmi nízkým šumem. Tyto vlastnosti by měli být zachovány při nízké spotřebě energie, malých rozměrech a nízké ceně [10].

## 5.2 Třídy zesilovačů podle místa na trase

### 5.2.1 Optický výkonový zesilovač - Booster

Optický výkonový zesilovač se používá pro zesílení signálu vycházejícího z optického vysílače na úroveň, která je potřebná pro navedení signálu do optického vlákna. Většinou se tato úroveň pohybuje v rozmezí od 0 do 5 dBm na kanál, ale pro náročnější aplikace může být i vyšší. Tento zesilovač nemusí být vždy nutný při vysílání jednokanálového vysílače, ale je nezbytný ve WDM sítích kvůli útlumu multiplexoru. Má zpravidla nízký zisk (v rozmezí od 5 do 15 dB), nízké šumové číslo a naopak vysoký výstupní saturační výkon (typicky kolem 20 dBm).

### 5.2.2 Průběžný zesilovač

Používají se při spojeních dlouhých nad 150 km, jelikož bez nich se na takové vzdálenosti stane signál nezjistitelný. Aby se této situaci zabránilo, jsou tyto zesilovače ve spojeních umístěny každých 80 až 100 kilometrů, aby optická úroveň signálu zůstala nad úrovní šumu. Požadavky na linkový zesilovač jsou velký zisk v rozmezí 15 až 25 dB, NF kolem 6 dB a vysoký výstupní výkon.

### 5.2.3 Optický předzesilovač

Optický předzesilovač může být vyžadován, aby zesílil optický signál na detekovatelnou úroveň. Tento zesilovač by měl poskytovat vysoký zisk a velmi nízké hodnoty NF kolem 5 dB pro zajištění bezchybné detekce signálů. Na vysoký výstupní výkon tu není kladen důraz.

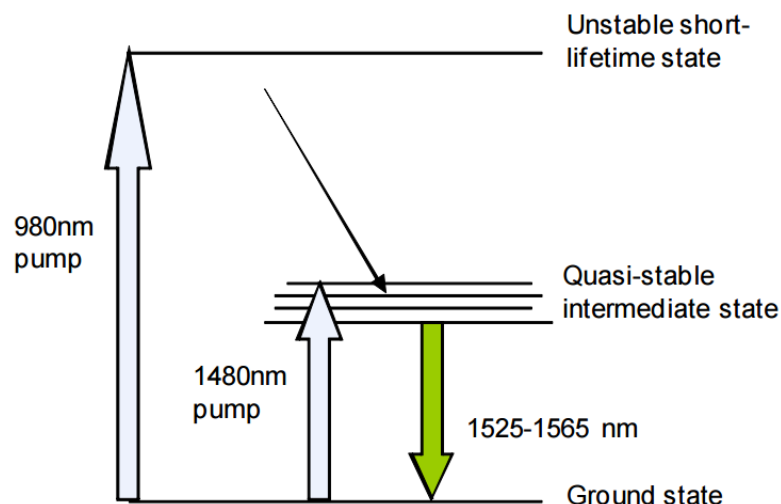
## 5.3 EDFA - Erbium Doped Fiber Amplifier

V polovině 80. let 20. století tým okolo D.N. Payna na univerzitě v Southamptonu v Anglii ukázal, že ionty prvku Erbium mohou ve vláknách vyvolat zisk na vlnové délce kolem 1500 nm, které se využívají v optických systémech. Optický zesilovač EDFA se krátce po uvedení na trh začátkem devadesátých let stal klíčovou technologií pro optické komunikační sítě. Hned se stal nejpoužívanějším optickým zesilovačem. Je totiž jednou z klíčových komponent, která dovolila výstavbu dálkových vysokokapacitních datových spojů a napomohla tedy i rozvoji internetu. Tato komponenta také otevřela nové možnosti pro transparentní optické sítě s vlnovým multiplexem WDM [11].

### 5.3.1 Princip EDFA

Jádrem této technologie je běžné optické vlákno na bázi oxidu křemičitého dopované erbiem (EDF - Erbium Doped Fiber). Ionty  $\text{Er}^{3+}$  existují nejméně ve dvou diskretních stavech - v základním stavu, a v excitovaném stavu. V tepelné rovnováze se většina těchto iontů nachází v základním stavu s minimální energií. Interakcí tohoto souboru iontů s fotony mohou nastat tři různé jevy: absorpce, spontánní emise a stimulovaná emise. Absorpcí fotonu, který má energii rovnou rozdílu energetických hladin, se iont v základním stavu převede do excitovaného. Z vybudzeného, metastabilního stavu může tento iont přejít zpět na základní hladinu buď spontánně, za současného vyzáření fotonu s náhodnou polarizací a fází, nebo je k emisi fotonu stimulován jiným fotonem. V případě stimulované emise jsou oba fotony vzájemně koherentní tzn. mají stejné fázové a polarizační vlastnosti. Pokud přivedeme do tohoto prostředí optický signál, bude u fotonů převažovat stimulovaná emise nad absorpcí a signál bude zesilován [12].

K osvětlování erbia je zapotřebí světelný zdroj vhodné vlnové délky 980 nebo 1480 nm. Vlnovou délkou 980 nm se elektrony na velmi krátkou dobu dostanou na vyšší hladinu na obr. 14 pod názvem Unstable short-lifetime state, poté rychle bez nějaké emise světla klesnou na hladinu Quasi-stable intermediate state. Na tuto hladinu se elektrony použitím vlnové délky 1480 nm dostanou přímo. Poté se dostanou do základní hladiny a emitují světlo v pásmu 1525-1565 nm. Tento proces může být stimulován přicházejícím světlem, což má za následek zesílení signálu [12].



Obrázek 14: Energetické hladiny elektronů

### 5.3.2 Základní konstrukce EDFA

Základními prvky optického zesilovače EDFA jsou Vláknem dotované erbiem, "čerpací" laser a komponenty pro multiplexování a demultiplexování signálů.

Vláknem dotované erbiem obsažené v tomto optickém zesilovači je dlouhé typicky 10 až 30 m. Tento optický zesilovač může být navržen tak, že čerpací laser šíří energii ve stejném směru jako příchozí signál (forward pumping), opačným směrem se směru signálu (backward pumping) nebo oběma směry najednou. Čerpací laser může být zastoupen buď 980 nm, 1480 nm nebo kombinací obou laserů.

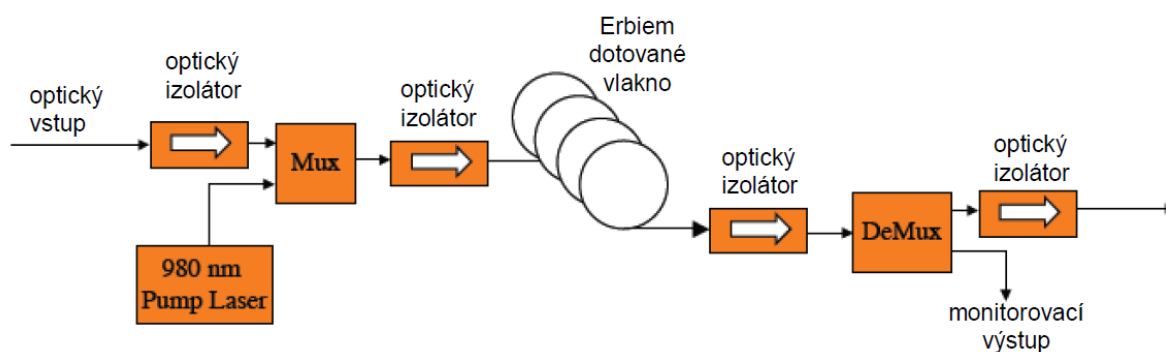
Další komponenty v optickém zesilovači EDFA můžeme vidět na obrázku 15. Signál do zesilovače vstupuje přes vstupní port a než se zkombinuje se signálem z čerpacího laseru, projde izolátorem. Oba signály pak prochází vláknem dotovaným erbiem, kde dochází k zesílení signálu. Zesílený signál prochází druhým izolátorem. Izolátor je optovláknová součástka a jeho funkce je odstraňování nežádoucích odrazů světla a propouštění záření pouze jedním směrem. Také působí jako filtr pro světlo vlnové délky 980 nm a díky němu se toto světlo na výstupní port nedostane.

Prakticky nejčastější konfigurace je zobrazena na obrázku 5.4, kde je použit 980 nm čerpací laser, který šíří energii ve stejném směru jako příchozí optický signál. Tato konfigurace umožňuje nejefektivnější využití 980 nm laseru. Jeho výhodami jsou nízká spotřeba, spolehlivost a nejlepší konfiguraci s ohledem na poměr cena/výkon [12].

### 5.4 SOA - Semiconductor Optical Amplifier

Tyto optické zesilovače používají polovodič k zesílení optického signálu. Fungují podobným způsobem jako standardní polovodičové lasery. Na rozdíl od jiných optických zesilovačů zesilovače





Obrázek 15: Schéma optického zesilovače EDFA

SOA jsou čerpány elektronicky (tj. přímo přes aplikovaný proud) a tedy u nich není nutný samostatný čerpací laser.

Výhody polovodičových optických zesilovačů jsou velmi malé rozměry a nízké náklady způsobené masovou produkcí. Polovodičové zesilovače však trpí řadou nedostatků, které je činí nevhodné pro většinu aplikací. Mezi hlavní nedostatky patří jejich relativně nízký zisk, který nepřevyšuje hranici 15 dB, nízký saturační výstupní výkon (obecně menší než 13 dBm) a relativně vysoké šumové číslo NF. Další nevýhodou tohoto zesilovače rychlá doba odezvy. Tato nevýhoda se projevuje při práci kolem saturační úrovně, kde se u jednocanálového signálu projevuje jeho zkreslením a u signálu WDM projevuje jeho šumem kvůli cross-gain modulaci. Kvůli této nevýhodě jsou optické zesilovače SOA z velké části nevhodné pro vícekanálové WDM aplikace. Tyto optické zesilovače se dají použít jako jednocanálové výkonové zesilovače, u kterých není potřeba vysoký zisk [10].

## 6 Praktická část

V této části je nejdříve proměřena odbočnice AWG a tím pádem i zjištěny její parametry.

### 6.1 Měřicí pracoviště a použité přístroje

#### 6.1.1 LG-Nortel WPF 1132c

WPF 1132c (Wavelength Passive Filter) je určeno pro multiplexaci a demultiplexaci optického signálu na trase mezi hlavní stanicí a koncovým zákazníkem. Tento filtr je schopen odfiltrovat jednotlivé vlnové délky na příslušné výstupy a vzájemně tyto linky od sebe izolovat. Toto zařízení je plně pasivní a tudíž nevyžaduje jakékoliv napájení. Tento model je atermální AWG, které je schopno filtrace až 32 vlnových délek a je v modifikaci pro zástavbu do racku [13].

#### 6.1.2 EXFO FLS-2600B – Tunable laser source

Laditelný laser EXFO IQS-2600B je ideální pro měření součástek rozsahu C a L pásma. Se svou vynikající možností ladění po 1 pm a čistotou signálu s potlačením spontánní emise o 75 dB je ideální pro testy DWDM bloků a součástek [14].

#### 6.1.3 EXFO FTB-500

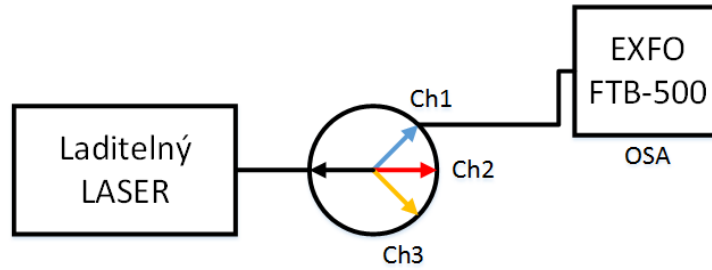
EXFO FTB-500 je univerzální měřicí platforma. V tomto přístroji je obsažen modul optického spektrálního analyzátoru, díky kterému jsme mohli měřit vlnové délky a následná změřená spektra jednoduše vyexportovat ve formátu xps [15].

#### 6.1.4 WDM-PON LG-Nortel EAST 1100

LG-Ericsson EA 1100 (Ethernet Access Services Switch)(Optical Line Terminal) je hlavní stanice určená pro instalace do hlavních rozvodů. Zařízení je provedeno jako modulární s možností zástavby do Rack stojanu. Modularita zařízení poskytuje snadnou možnost rozšíření kapacity při minimálních nákladech. EA 1100 je vhodný pro veškeré dnes provozované služby jako jsou např. IPTV, Video on Demand, High speed internet a Voice over IP. Integrované prvky zahrnují až dva L2/L3 switche, diagnostickou kartu dohledového systému a 8x porty pro karty obsluhy koncových zařízení. Datová komunikace ke každému koncovému zařízení dosahuje rychlosti až 1Gbps [16].

#### 6.1.5 LG-Ericsson EARU 1112

LG-Ericsson EARU (Ethernet Access Residential Unit) 1112 spadají do kategorie malých koncových zařízení instalovaných v domácnostech. Mezi přednosti tohoto modelu patří jednoduchost



Obrázek 16: Topologie měření AWG

$\lambda$ (nm)	P (dB)	SNR	BW
1533,47	-4,56	55,97	0,042
1534,25	-4,66	56,29	0,042
1535,04	-4,14	54,71	0,043

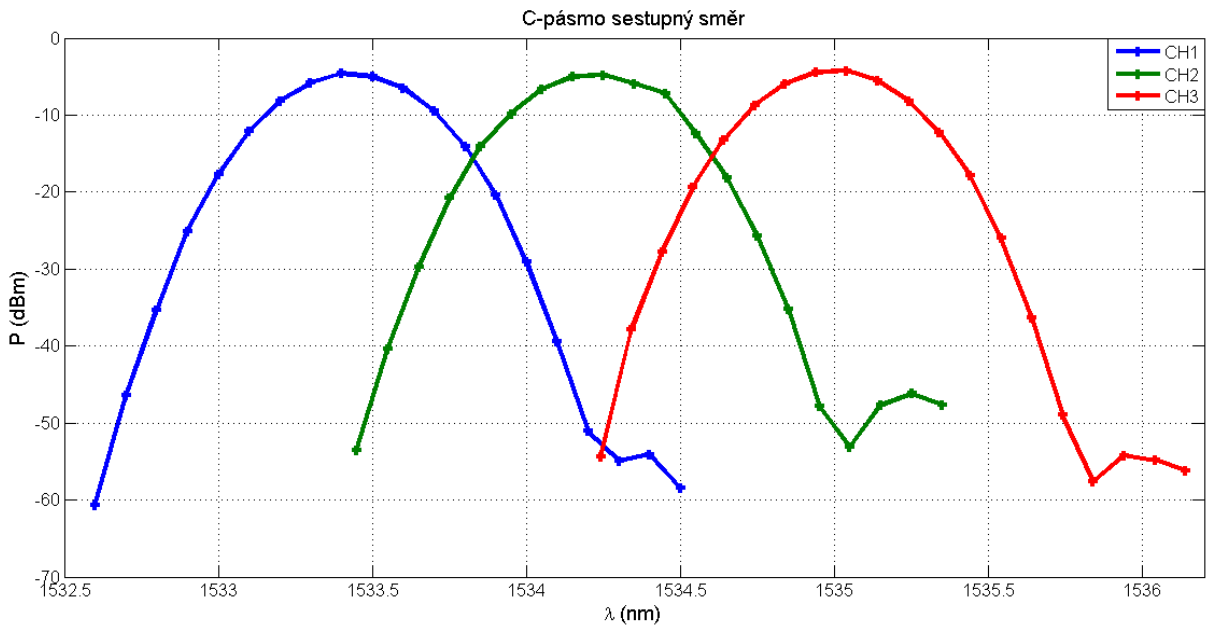
Tabulka 1: Parametry C-pásma AWG

a spolehlivost zařízení při velmi nízkém příkonu jednotky. Zařízení poskytuje podporu standardních datových služeb. Samozřejmostí je reprezentativní vzhled, možnost upevnění na zeď a podpora funkcí QoS [17].

## 6.2 Měření AWG

Pro zjištění parametrů AWG odbočnice je třeba ji proměřit. Při měření sestupného směru jsem na vstup AWG připojil laditelný laser EXFO FLS-2600B a postupně jsem na výstup AWG CH1, CH2 a CH3 připojil optický spektrální analyzátor EXFO FTB-500. Použitá topologie je zobrazena na obrázku 16. Laditelný laser svítil výkonem 0 dBm a díky tomu se jednoduše zjišťoval vložný útlum odbočnice podle úrovně na jejím výstupu. Zdroj laserového světla mi umožnil naladit široký rozsah potřebných vlnových délek. Ty jsem postupně posílal do AWG odbočnice a na jejích jednotlivých výstupech sledoval výstupní úroveň. Takto jsem proměřil první tři kanály AWG se skokem 0,1 nm. Odbočnice AWG mírně posunovala vlnovou délku, která přišla na vstup přibližně o 0,04 nm.

Nejprve jsem proměřil C pásmo WDM-PON. Výstup z tohoto měření můžeme vidět v tabulce č.1 a na obrázku číslo 17, kde je zobrazena závislost výstupní výkonové úrovně na vstupní vlnové délce. V grafu jsou barevně odlišeny jednotlivé kanály a v místě kde se překrývají, vznikají tzv. přeslechy, tedy potenciální ohrožení bezpečnosti sítě, na které se specializuje tato bakalářská práce. Tabulka 1 nám ukazuje naměřené hodnoty. Jsou v ní zaznamenány naměřené parametry u špiček všech měřených kanálů. Z tabulky jde vidět, že odstup kanálů je 0,78 nm. Dále tu můžeme vidět výkonovou úroveň ve špičce, a jelikož na vstupu svítil laser o výkonu 0 dBm, jednoduše jde zjistit vložný útlum odbočnice AWG. Ten je podle třetího kanálu 4,14 dB, ale když vezmeme ohled na útlumy na konektorech, tak se vložný útlum AWG blíží k hodnotě 4 dB.



Obrázek 17: Závislost výstupní úrovně kanálů 1-3 na vlnové délce

$\lambda$ (nm)	P (dB)	SNR	BW
1574,2	-4,24	60,18	0,040
1575,0	-3,99	58,28	0,039
1575,8	-3,69	58,97	0,039

Tabulka 2: Parametry L-pásma AWG

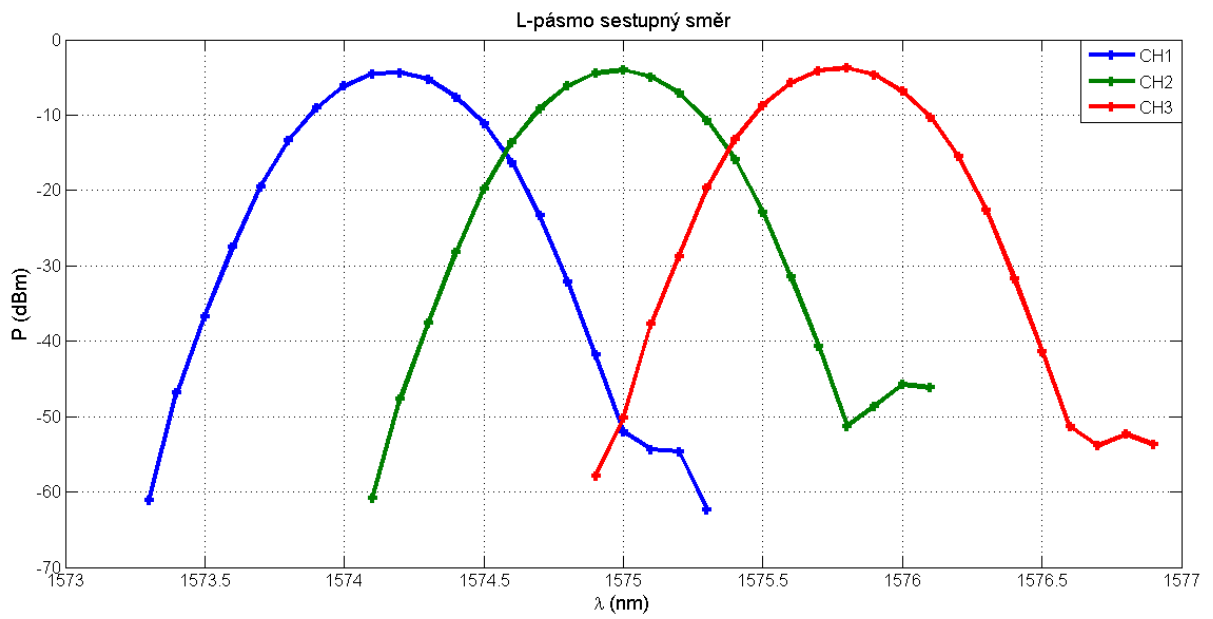
Dalším měřením bylo proměření L pásma kanálů CH1, CH2 a CH3 v sestupném směru. Výsledný graf je vidět na obrázku č.18 a nejdůležitější hodnoty v tabulce číslo 2. Pro srovnání s předchozím měřením je odstup kanálů téměř stejný, zato naměřená úroveň výkonu je tady přibližně o 0,5 dB vyšší. To ukazuje nižší vložný útlum AWG odbočnice v L-pásmu.

Nakonec jsem ještě proměřil vzestupný směr kanálu 2, který vysílá v C-pásmu. Porovnání obou směrů tohoto kanálu můžete vidět na obrázku 19. Tady je pěkně vidět překrytí grafů obou kanálů, takže můžeme předpokládat stejné parametry odbočnice AWG v obou směrech.

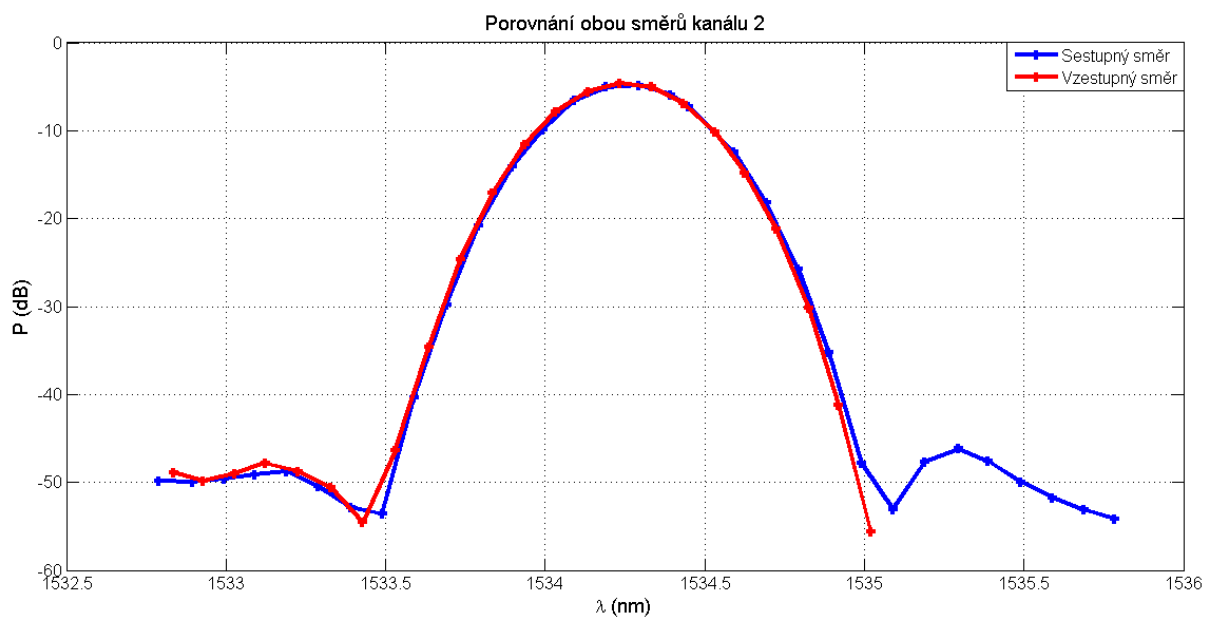
### 6.3 Návrh AWG v prostředí Optiwave

Pro návrh AWG v softwarovém prostředí Optiwave Optisystem jsem použil dvě AWG, protože se měřené AWG lišilo vlastnostmi a parametry v L a C-pásmu.

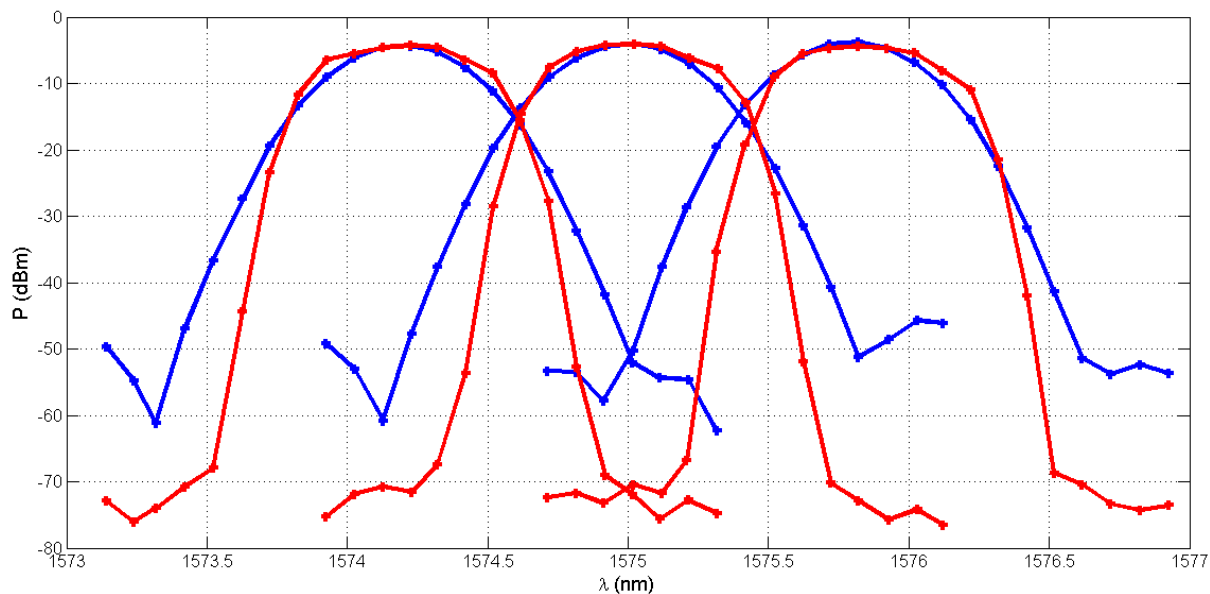
Nejprve jsem se zaměřil na AWG v L-pásmu. Přidělil jsem mu velikost 3, což nám dá tři vstupy a tři výstupy. Jeho provedení je demux a vlnovou délku počátečního kanálu jsem zadal podle naměřených výsledků v L-pásmu 1574,2 nm. Odstup kanálů už byl přednastaven na 100 GHz, který definuje norma. Dále bylo třeba zkontrolovat nastavení typu filtru a ten byl nastavený správně jako Gaussovský. Nejvíce času mi zabralo nastavit správnou šířku pásma, aby se



Obrázek 18: Závislost výstupní úrovně kanálů 1-3 na vlnové délce



Obrázek 19: Závislost kanálu 2 v obou směrech



Obrázek 20: Porovnání reálného a modelovaného AWG

charakteristika simulovaného AWG co nejvíce podobala té reálné. Šířka pásma se mi jako nejlepší jevila 0,6 nm. Výslednou charakteristiku můžeme vidět na obrázku číslo 20.

Charakteristika naměřených kanálů číslo 1 až 3 je vyznačená modře a charakteristika nasimulovaného AWG je červená. Je zde velmi dobře vidět, že nasimulované AWG má užší kanály než reálné AWG. Pro větší podobu obou charakteristik, jsem tedy změnil Gaussův filtr druhého řádu na první, který generuje širší kanály. Dále jsem zmenšil šířku pásma na 0,44 nm. Díky tomu jsou obě charakteristiky téměř totožné, jak lze vidět na obrázku 21. Takto nastavené AWG by mělo fungovat jako naše reálné, které jsem proměřoval v podkapitole výše.

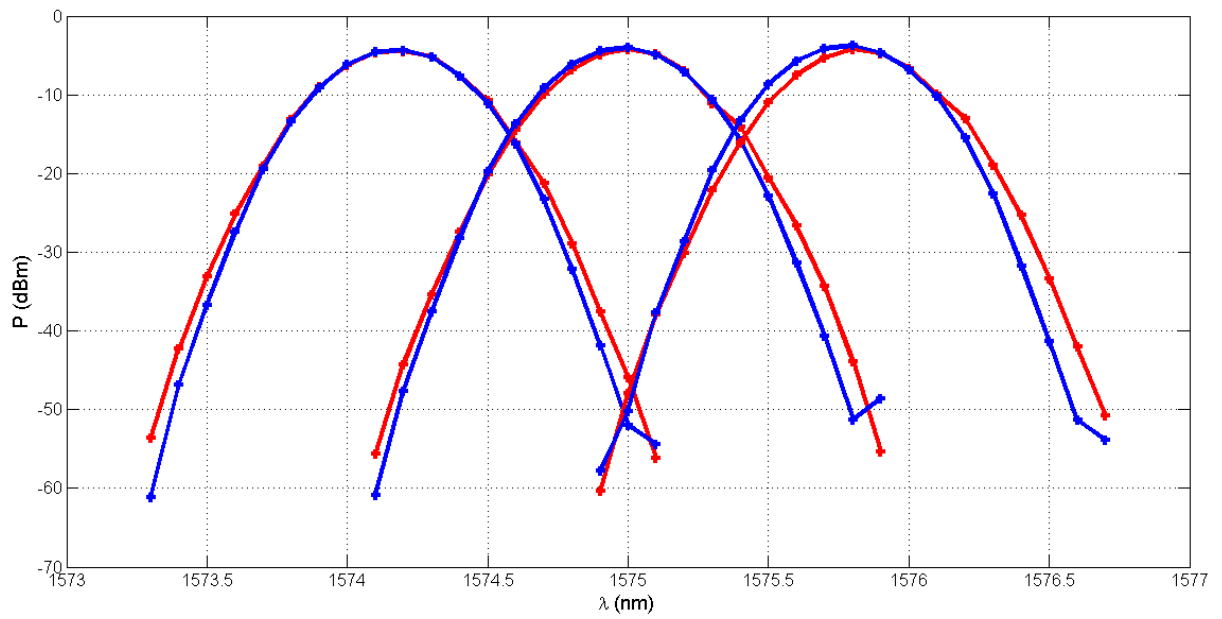
AWG pro C-pásmo je v provedení Mux, jelikož ho v této práci využívám pouze ve vzestupném směru. Oproti prvnímu AWG se liší ve vlnové délce počátečního kanálu, kterou jsem podle změřených hodnot nastavil na 1533,47 nm, a v šířce pásma, kterou jsem zmenšil na 0,41 nm, protože se takto více chovalo jako měřené.

## 6.4 Měření sítě WDM-PON

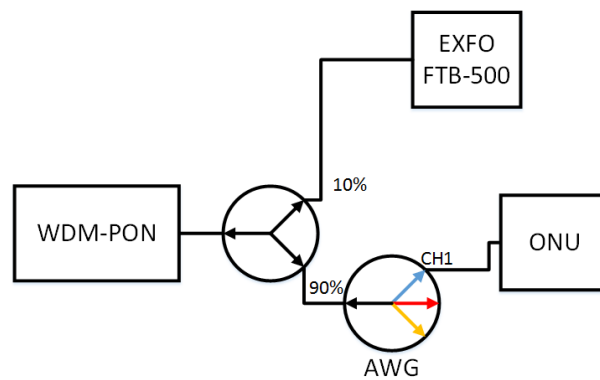
Pro ověření bezpečnostních rizik z hlediska přeslechů jsem dále potřeboval zjistit parametry laseru, který vysílá použitá jednotka OLT v L-pásmu v sestupném směru a jednotka ONU v C-pásmu ve směru vzestupném.

### 6.4.1 Konfigurace WDM-PON

Jako OLT zařízení je použito již výše zmíněné WDM-PON LG-Nortel EAST 1100. Dá se konfigurovat grafickým rozhraním nebo příkazovým řádkem. Pro konfiguraci jsem využil grafického rozhraní, které je na první pohled pohodlnější a srozumitelnější. Konfiguraci jsem prováděl na



Obrázek 21: Porovnání reálného a modelovaného AWG po úpravě



Obrázek 22: Schéma topologie pro měření laseru z OLT

Peak	$\lambda$ (nm)	P (dB)	BW (nm)
1	1574,185	-33,97	0,257
2	1586,366	-33,91	0,309
3	1587,169	-34,10	0,292
4	1599,520	-33,31	0,336

Tabulka 3: Pokusná tabulka

školním notebooku, kde byl již nainstalovaný software EA Manager 1100. Notebook jsem křížovým UTP kabelem propojil s portem EMS (Element Management System) na jednotce OLT. Po spuštění jednotky OLT jsem se nalogoval do softwaru. Nejdříve bylo nutné provést synchronizaci s jednotkou OLT kliknutím na System a Synchronization DB. Poté otevřeme záložku PON001 a můžeme začít konfigurovat. Klikneme na záložku Configuration a Facility a otevře se nám okno Facility. V něm klikneme na záložku ONT a tam už můžeme aktivovat nebo deaktivovat koncové jednotky.

#### 6.4.2 Měření jednotky OLT

Použitou topologii pro měření lze vidět na obrázku č.22. Na výstup z OLT jsem připojil optický rozbočovač. Na jeden jeho výstup jsem připojil AWG, a na druhý jsem připojil na optický spektrometr, abych zjistil spektrální vlastnosti výstupního laseru z OLT. Výstup ze spektrometru lze vidět na obrázku číslo 6, který je součástí podkapitoly 3.6.4 a v tabulce číslo 3. Parametry, které mě zajímají jsou vlnová délka, výkon a šířka pásma laseru. U výkonu je třeba zohlednit použitý rozbočovací poměr u rozbočovače. Ten byl 90:10 a spektrometr byl připojený na ten nižší výstup, takže výkon zobrazený na spektrometru byl desetkrát nižší než reálný. Jelikož je výkon udávaný v dBm, pro vynásobení deseti stačí přičíst 10 dB.

#### 6.4.3 Použitý laser

Pro účely této práce mi stačí jednotku OLT nahradit kontinuálním laserem. Jeho parametry jsem zadal podle tabulky výše. Simuloval jsem první kanál, tak jsem jeho vlnovou délku zadal 1574,185 nm. Šířka spektrální čáry se v optivavu zadává v MHz, tak jsem musel svou změřenou hodnotu 0,257 nm převést na MHz. Pomohl jsem si vzorcem uvedeným níže, kde  $\Delta v$  je šířka v Hz,  $c$  je rychlost světla,  $\lambda$  je středová vlnová délka laseru a  $\Delta\lambda$  je šířka spektrální čáry v nm. Šířka spektrální čáry laseru mi tak vyšla 31 GHz.

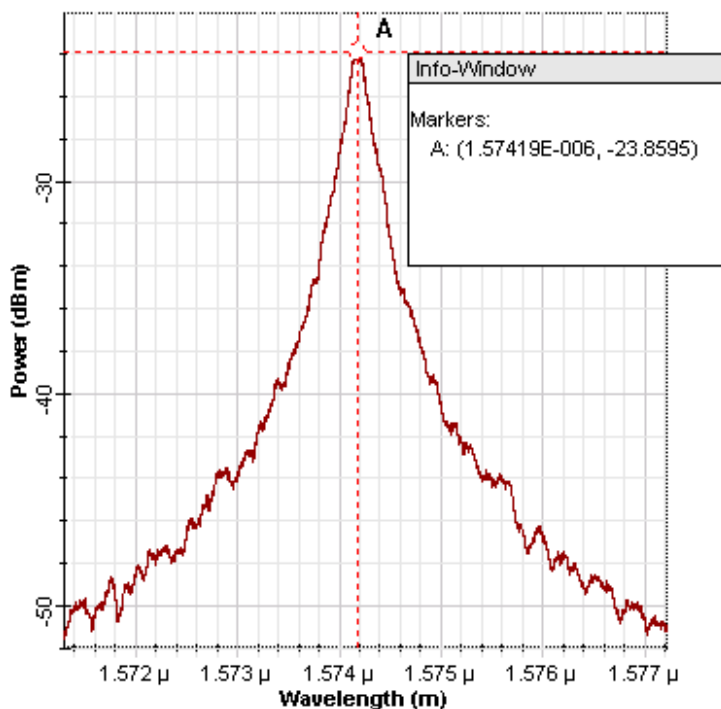
$$\Delta v = \frac{c}{\lambda^2} * \Delta\lambda \quad (8)$$

Dále jsem jako výkon laseru nastavil naměřených -24 dBm, jenomže na výstupu jsem naměřil pouze něco kolem -35 dBm. Tím pádem jsem musel výkon kontinuálního laseru zvýšit na -





## Optical Spectrum Analyzer\_1



Obrázek 23: Simulace laseru jednotky OLT pro první kanál

Peak	$\lambda$ (nm)	P (dB)	BW (nm)
1	1533,473	-21,82	0,407

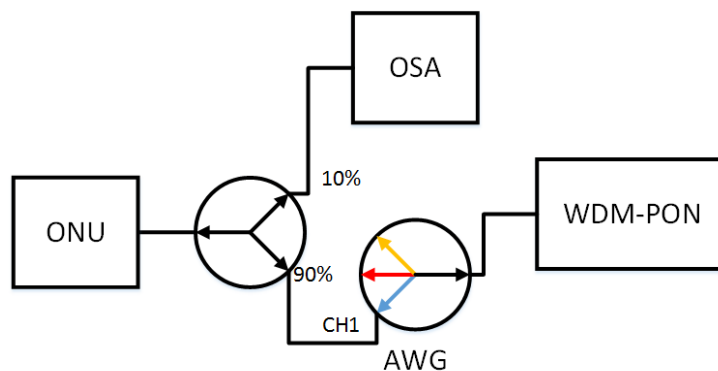
Tabulka 4: Parametry laseru jednotky ONU

13 dBm. Výslednou spektrální čáru takto nastaveného kontinuálního laseru můžeme vidět na obrázku číslo 23.

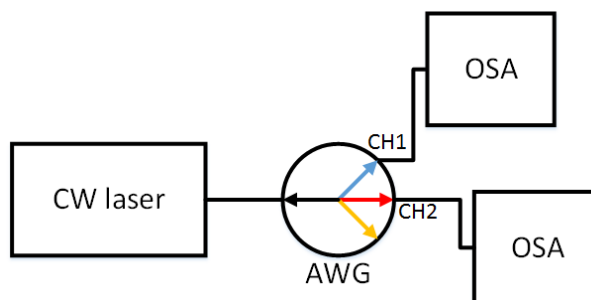
### 6.4.4 Měření jednotky ONU

Pro zjištění parametrů jednotky ONU bylo nutno jsem použil téměř stejnou topologii zapojení. Jelikož jsem chtěl provést spektrální analýzu jednotky ONU, tak jsem připojil optický rozbočovač na její výstup. Na výstup rozbočovače, kde jde 90% signálu jsem připojil první kanál AWG, a na druhý výstup, kde jde 10% jsem připojil optický spektrometr, abych mohl provést spektrální analýzu jednotky ONU. Použitou topologii tohoto měření můžete vidět na obrázku číslo 24. Výstup z této analýzy můžete vidět na obrázku číslo 8 na straně 22 a v tabulce číslo 4.

Vysílací část jednotky ONU jsem v simulaci také nahradil kontinuálním laserem a jeho parametry jsem zadal stejným způsobem jako u laseru pro jednotku OLT.



Obrázek 24: Schéma topologie pro měření laseru jednotky ONU



Obrázek 25: Blokové schéma zapojení pro zjištění přítomnosti přeslechu

## 6.5 Ověření přeslechu

Přítomnost přeslechu jsem zjišťoval pomocí simulace v prostředí Optiwave Optisystem. Blokové schéma zapojení je zobrazeno na obrázku číslo 25. V simulaci jsem Obě komponenty jak laser, tak AWG nastavil podle naměřených parametrů.

Na obrázku číslo 26 je zobrazena spektrální analýza kanálu 1. Zde je vidět vydělená špička prvního kanálu. Důležitá je její úroveň. Ta je -27 dBm. To nám ukazuje vložný útlum nasimu-  
lovaného AWG přibližně 3,5 dB, podobný tomu reálnému měřenému AWG.

Na obrázku číslo 27 je zobrazena spektrální analýza druhého kanálu. Tady je vidět špička přeslechu z kanálu jedna. Jeho úroveň je -41,6 dBm. Tuto špičku budu nadále zesilovat za účelem přečtení informace z kanálu jedna.

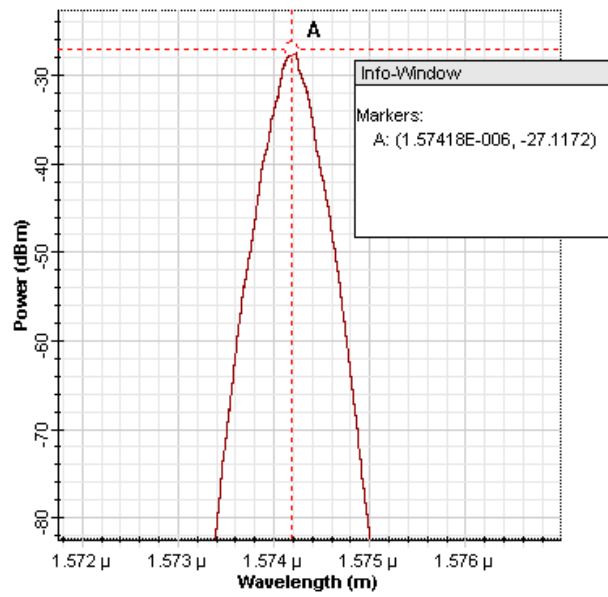
## 6.6 Komunikační řetězec OLT-ONU

Laserem, který odpovídá vlnové délce pro první kanál jsem vysílal pseudonáhodný kód, který se budu snažit přecíst z přeslechu na výstupu druhého kanálu AWG. Vše jsem zapojil podle schématu na obrázku 28.

Na výstup prvního kanálu jsem připojil pouze jednotku ONU, která se v simulaci skládá z lavinové APD fotodiody, která převede optický signál na elektrický, za ni je připojen Besselův filtr dolní propusti a měřič chybovosti BER. Menší chybovosti se mi poté podařilo dosáhnout



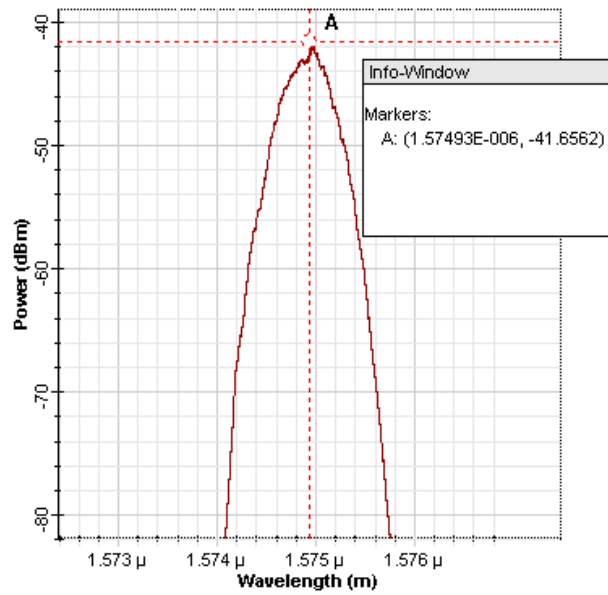
### Optical Spectrum Analyzer\_3



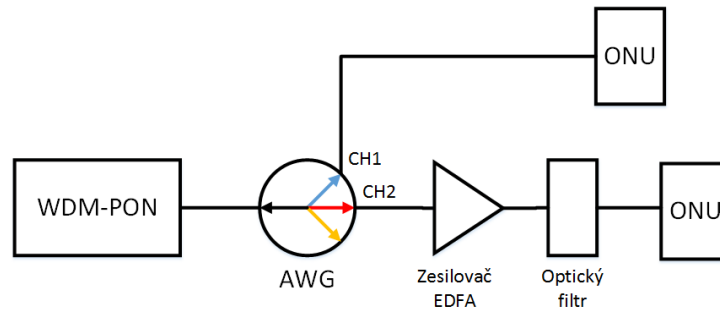
Obrázek 26: Spektrální analýza kanálu 1



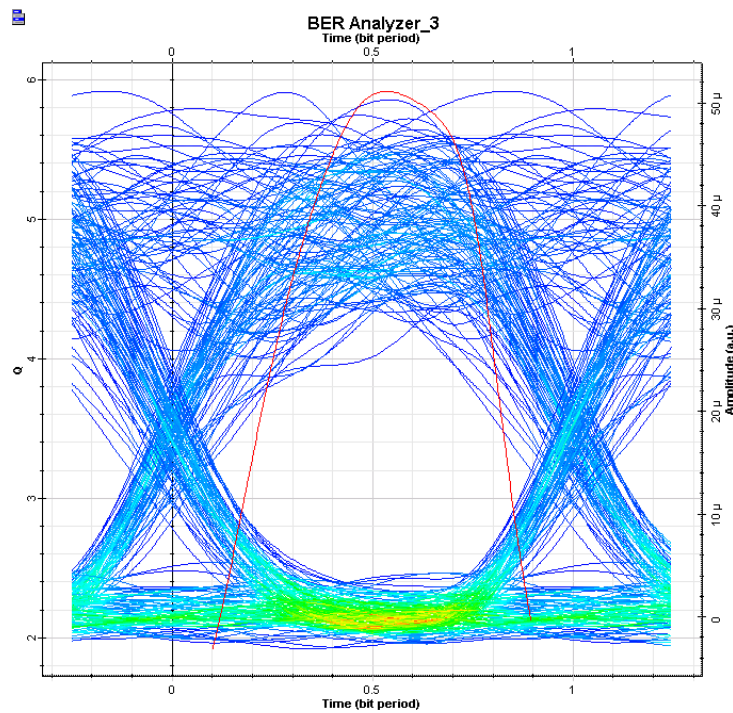
### Optical Spectrum Analyzer\_2



Obrázek 27: Spektrální analýza kanálu 2



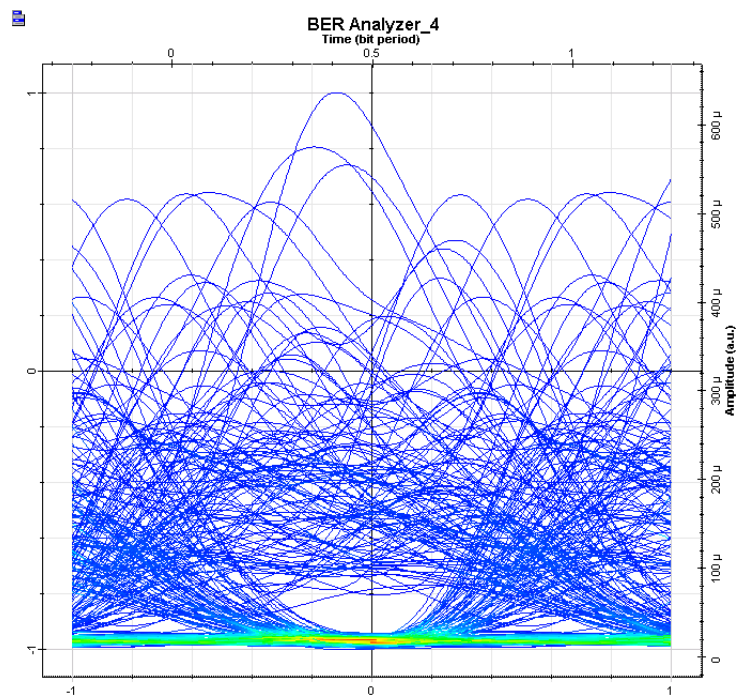
Obrázek 28: Schéma topologie komunikačního řetězce



Obrázek 29: Diagram oka kanálu 1

ještě vložím 3R regenerátoru před měřič chybovosti. Na obrázku číslo 29 je zobrazen diagram oka na prvním kanálu. Chybovost tu byla naměřena  $1,3e-9$ , což značí vysoce kvalitní příjem.

Na výstup druhého kanálu jsem nejdříve ze zvědavosti zkoušel připojit pouze výše popsanou jednotku ONU, ale naměřil jsem chybovost 1. Signál nešel tímto způsobem přečíst. Na výstup druhého kanálu jsem tedy před jednotku ONU připojil optický zesilovač EDFA a za něj optický filtr, který má za úkol odfiltrovat šumy na jiných vlnových délkách způsobené například optickým zesilovačem. Odfiltrovaný zesílený signál poté putuje do ONU jednotky, která se ho bude snažit přečíst. V tomto případě byla při zisku zesilovače EDFA 20 dB naměřena chybovost  $1,76e-5$ , což je také velmi dobrá hodnota. Hodnota chybovosti BER je tady velmi nestabilní. Jednou se tam objeví chybovost zmíněná výše, podruhé se tam může objevit chybovost 1. Diagram oka můžete vidět na obrázku číslo 30.



Obrázek 30: Diagram oka rekonstruovaného signálu na kanálu 2

## 6.7 Komunikační řetězec v reálných podmínkách

Dále mým úkolem bylo tuto práci trochu přiblížit praxi. Proto jsem v sestaveném komunikačním řetězci mezi laser jednotky OLT a AWG přidal optické vlákno reálných parametrů a postupně navyšoval jeho délku. Pokud použité vlákno přesáhlo vzdálenost přibližně 15 km, data se v něm úplně ztratila a byl tam pouze šum. A to i na výstupu kanálu jedna. Z tohoto důvodu jsem byl nucen vlákno vyměnit za útlumový člunek s ekvivalentní hodnotou útlumu. Optické vlákno mělo hodnotu měrného útlumu 0,2 dB/km, takže na útlumové člunku jsem zvyšoval útlum po 1 dB, což odpovídá zvyšování délky vlákna o pět kilometrů.

Začal jsem měřit s nulovým útlumem na člunku, který jsem poté zvyšoval až na 12 dB, které odpovídaly přibližně 60 km vlákna. Měnil jsem také zisk optického zesilovače. Začínal jsem na 5 dB a zvyšoval jsem ho postupně až na 25 dB. Kvůli velké nevyrovnanosti naměřené chybovosti, jsem se rozhodl každou konfiguraci změřit dvacetkrát a do grafu dát její aritmetický průměr. Stejným způsobem jsem to provedl v sestupného směru v L-pásmu a ve vzestupném v C-pásmu. V tabulce číslo 5 můžete vidět část naměřených výsledků sestupného L-pásmu se zesilovačem EDFA, který měl zisk 20 dB. Je tu zřetelně vidět jak je tu v tomto případě nestabilní chybovost. Aby se dal signál zpětně přecíst nesmí u WDM systémů chybovost překročit hodnotu přibližně  $3,8E-3$ . V tomto případě pokud chybovost nebyla 1, tak většinou tento požadavek splňovala.

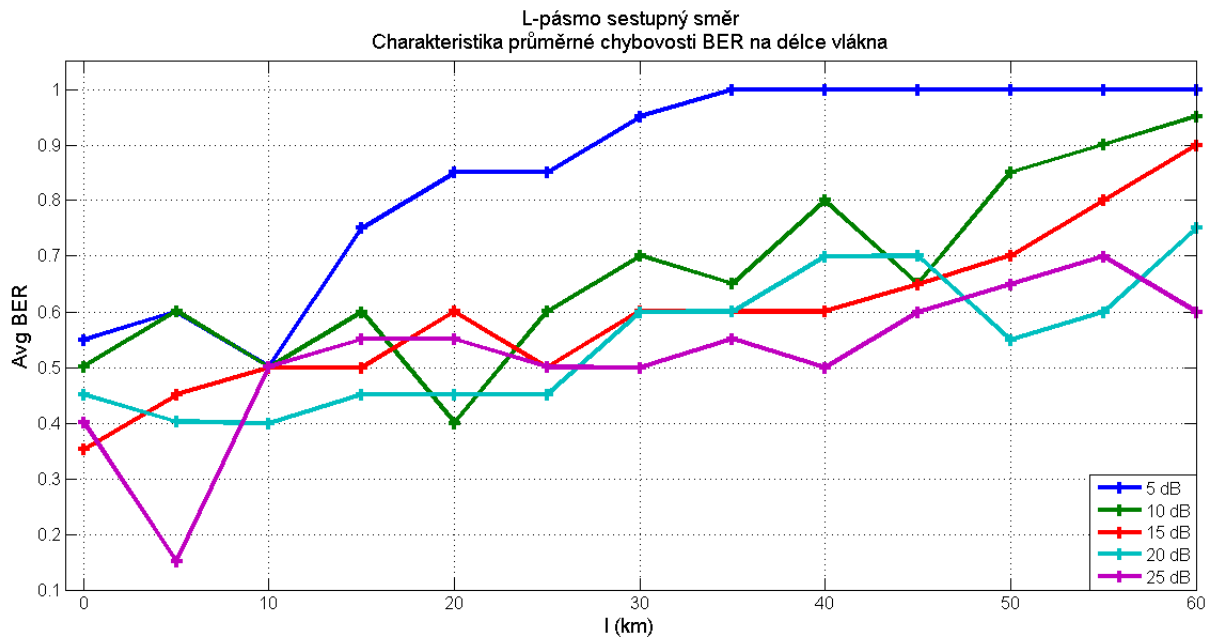
Na obrázku číslo 31 je graf charakteristiky průměrné hodnoty BER na délce optického vlákna (velikosti útlumu na člunku) v sestupném směru. Z grafu lze vyčíst že u nižších délek vlákna jde přeslech přecíst i po zesílení zesilovačem EDFA se ziskem 5 dB. U delšího vlákna nad 10 km je

Měření	0 km	5 km	10 km	15 km	20 km	25 km	30 km
1	1	5.71E-5	3.77E-5	1	1.53E-6	1	1
2	9.98E-5	7.37E-6	1	2.83E-4	6.45E-6	2.47E-6	9.15E-5
3	1	1	2.37E-4	1	6.68E-5	1	3.15E-5
4	1	1.54E-2	1	1.29E-5	1.78E-2	6.62E-5	1
5	1	5.99E-4	1.62E-5	7.68E-5	1	1	2.99E-4
6	1	1	1	4.82E-3	1	2.03E-6	1
7	4.52E-6	1	1	2.74E-5	1	1	1
8	3.21E-4	1	6.42E-8	1	4.85E-3	1.23E-2	1
9	8.13E-4	3.24E-4	5.26E-5	5.46E-12	1	1.41E-5	1
10	2.2E-4	1	1	1	1	4.98E-5	1
11	2.36E-4	4.69E-4	1.64E-3	9.96E-4	1.21E-5	1	1
12	6.38E-5	3.5E-5	1	1.54E-2	8.27E-4	2.32E-4	1
13	1	1	2.95E-4	1	1.33E-5	4.66E-4	1
14	1	1.32E-2	6.04E-3	1.19E-3	1	4.92E-5	1
15	5.24E-6	1	1.15E-4	1	1	1	6.83E-6
16	1	9.19E-4	6.72E-4	1	2.35E-15	1	4.68E-5
17	1	1	1.16E-4	1.61E-4	1	1.09E-8	2.17E-4
18	6.56E-5	1.58E-6	1	6.86E-7	3.16E-3	4.31E-4	1
19	1.34E-3	5.76E-4	1.3E-4	1	3.1E-6	1	5.21E-5
20	1.42E-3	1.01E-2	1	1	1	1	2.44E-5

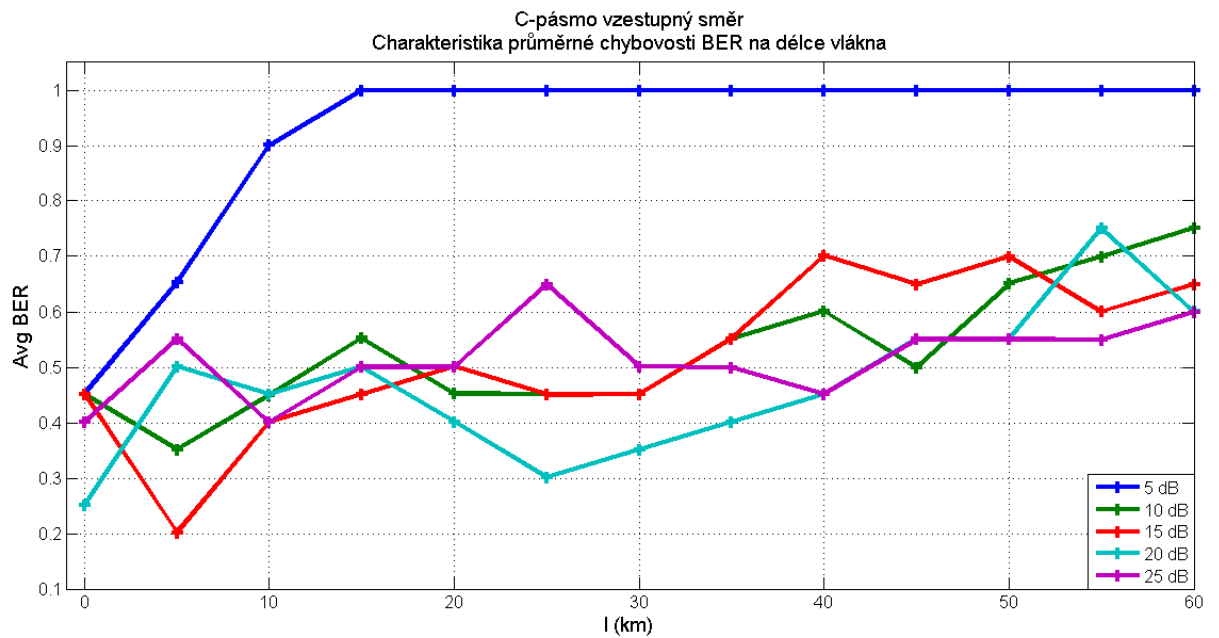
Tabulka 5: L-pásma se ziskem 20 dB

třeba použít vyšší zisk. Dále je z grafu zřejmé, že použité zesilovače se ziskem 10 dB a vyšším mají poměrně stejné výsledky.

Na obrázku číslo 32 je graf vzestupného směru v C-pásmu. Tady jsou průměrné naměřené chybovosti už na první pohled lepší. Je to dáno vyšší úrovní výkonu, kterým vysílá jednotka ONU a zároveň širší spektrální čarou laseru. Výsledky měření s optickými zesilovači se ziskem 10 až 25 dB byly podobné. Je zde vidět narůstání průměrné chybovosti s narůstající délkou optického vlákna.



Obrázek 31: Závislost průměrné hodnoty BER na délce optického vlákna v L-pásmu



Obrázek 32: Závislost průměrné hodnoty BER na délce optického vlákna v C-pásmu

## 7 Závěr

Tato bakalářská práce měla za úkol prověřit bezpečnost sítě WDM-PON na úrovni fyzické vrstvy modelu RM-OSI s bližším zaměřením na přeslechy vznikající na optickém multiplexoru AWG.

Bezpečnostní hrozby sítě WDM-PON jsou s použitím optického rozbočovače jasné, jelikož se ke každému účastníkovi dostane signál ve formě vlnového multiplexu, a z toho důvodu je nanejvýš nutné zajistit šifrování signálu. Síť WDM-PON, která používá místo rozbočovače multiplexer/demultiplexer AWG, je tohoto problému zproštěná, protože zajišťuje spojení P2P, tím, že každému účastníkovi vydělí jeho vlastní vlnovou délku. Jenomže to vydělování vlnových délek v případě použití pouze jednoho AWG není úplně dokonalé. To jsem se přesvědčil při vypracování této bakalářské práce.

Po důkladném proměření AWG multiplexeru jsem zjistil jeho parametry potřebné pro následnou simulaci. Zjistil jsem jeho vložný útlum, odstup jednotlivých kanálů, šířku pásma nebo počáteční vlnovou délku. Zjistil jsem všechny potřebné parametry pro co nejuvěrnější simulaci AWG. Dále jsem prováděl spektrální analýzy sítě WDM-PON, abych podle nich sestavil komunikační řetězec OLT-ONU. Přeslechy se ze sousedních kanálů objevili, zbývalo si jenom ověřit, zda z nich půjdou rekonstruovat data původně určená pro vedlejší kanál.

Původní signál se pomocí optického zesilovače EDFA, optického filtru a 3R-regenerátoru podařilo přecíst. Jenomže výsledky jsou sporné. Rekonstruovaný signál se s každým opakováním simulace měnil. Po provedení dvaceti iterací simulace hodnota BER splňovala podmínky pro rekonstrukci signálu nejčastěji v osmi až třinácti případech. Po zvětšování útlumu na vstupu AWG, které mělo nahradit reálné vlákno se samozřejmě průměrná hodnota BER zvyšovala.

Otázkou zůstává jak by to dopadlo s pomocí reálných přístrojů. Osobně bych se přikláněl k tomu, že přeslech bude v reálných podmínkách nečitelný, protože prostředí Optiwave se mi zdá pro rekonstrukci přeslechu ideálnější než reálné. Na druhou stranu může být AWG v reálném prostředí náchylnější pro tvorbu kanálových přeslechů než v prostředí simulačním.



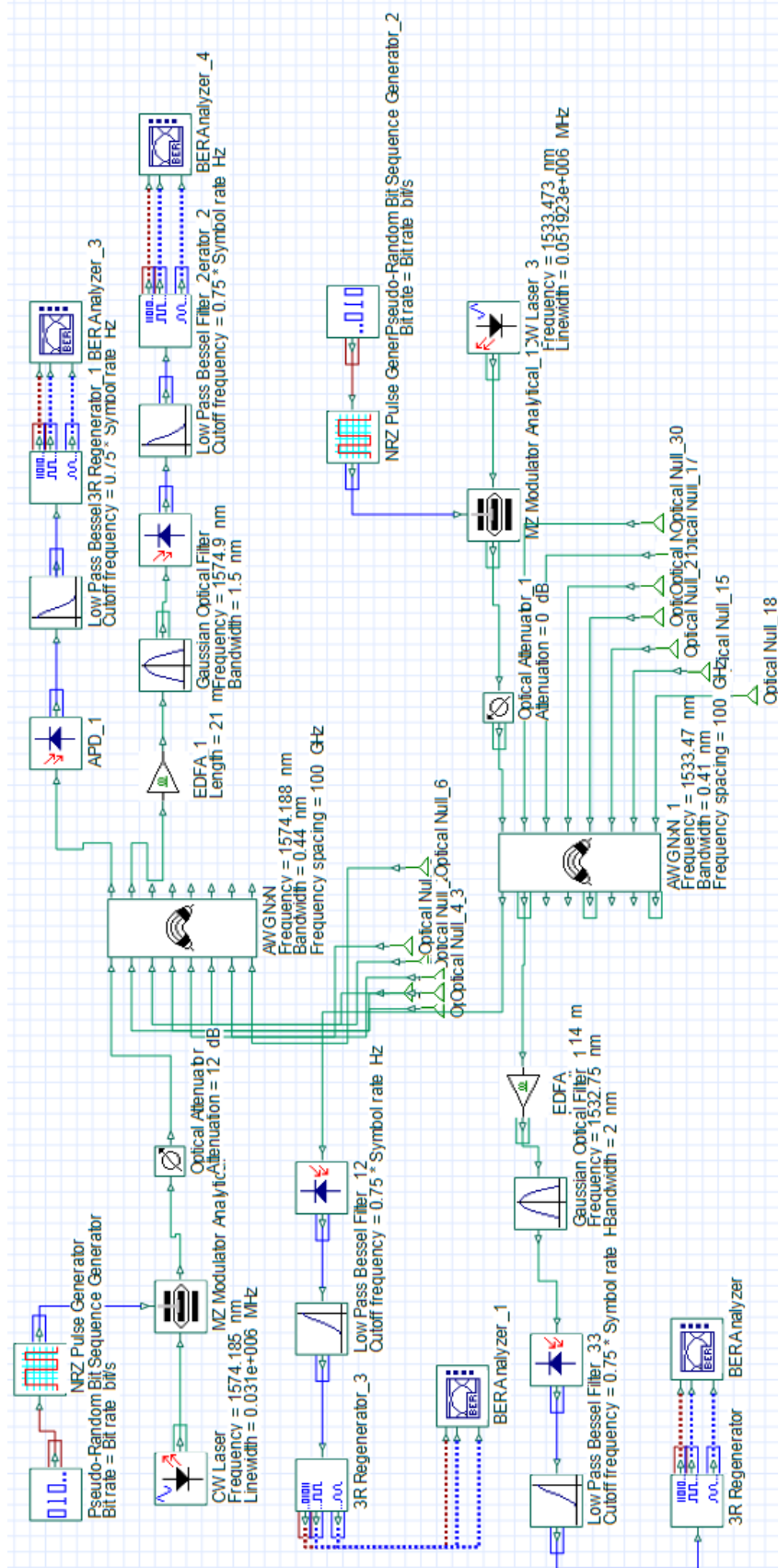
## Literatura

- [1] LAFATA, Pavel a Jiří VODRÁŽKA. Současné a budoucí varianty pasivních optických přístupových sítí. *Elektrorevue* [online]. 2009(39), 7 [cit. 2015-02-22]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/45/soucasne-a-budouci-varianty-pasivnich-optickych-pristupovych-siti/>
- [2] LAFATA, Pavel a Jiří VODRÁŽKA. Současné a budoucí varianty pasivních optických přístupových sítí. *Elektrorevue* [online]. 2009(39), 2 [cit. 2015-02-22]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/45/soucasne-a-budouci-varianty-pasivnich-optickych-pristupovych-siti/>
- [3] Pasivní optické sítě WDM-PON. Access Server [online]. 2009 [cit. 2015-03-24]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050004>
- [4] ANSARI, Nirwan a Jingjing ZHANG. Media access control and resource allocation: for next generation passive optical networks. Heidelberg: Springer, c2013. SpringerBriefs in applied sciences and technology. ISBN 14-614-3938-8.
- [5] LAM, Cedric F. Passive optical networks: principles and practice. Boston: Elsevier/Academic Press, c2007. ISBN 978-0-12-373853-0.
- [6] ŠIFTA, Radim a Miroslav FILKA. Simulace a měření vlnových multiplexů pro pasivní optické sítě. *Elektrorevue* [online]. 2011(3), 1-2 [cit. 2015-03-29]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/85/simulace-a-m-eni-vlnovych-multiplex-pro-pasivni-opticke-sit-/>
- [7] CHOCHLIOUROS, Ioannis P. a George A. HELIOTIS. Optical access networks and advanced photonics: technologies and deployment strategies. Hershey, PA: Information Science Reference, c2010. ISBN 16-056-6708-0.
- [8] DUTTA, Achyut K., Niloy K. DUTTA a Masahiko. FUJIWARA. WDM technologies: optical networks : volume III. Boston: Elsevier Academic Press, c2004. ISBN 01-222-5263-2.
- [9] VENGHAUS, Herbert. Wavelength filters in fibre optics. New York: Springer, c2006. Springer series in optical sciences, v. 123. ISBN 35-403-1769-4.
- [10] FINISAR. Introduction to Optical Amplifiers. White Paper [online]. 2010, , 1-6 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <https://www.finisar.com/sites/default/files/resources/Introduction>
- [11] PETERKA, Pavel. Vlákenné lasery – jasné světlo ze skleněných nitek. 2009.
- [12] FINISAR. Introduction to EDFA Technology. White Paper [online]. 2009, , 1-6 [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <https://www.finisar.com/sites/default/files/resources/Introduction>

- [13] LG-Ericsson WPF 1132c. In: Profiber [online]. 2010 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.profiber.eu/LG-Ericsson-WPF-1132c/>
- [14] EXFO FLS-2600B – Tunable laser source. In: Profiber [online]. 2010 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.profiber.eu/EXFO-FLS-2600B-Tunable-laser-source-Laditelny-laserovy-zdroj/>
- [15] EXFO Univerzální měřicí platforma FTB-500. In: Profiber [online]. 2009 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.profiber.eu/EXFO-Univerzalni-merici-platforma-FTB-500/>
- [16] LG-Ericsson EA 1100. In: Profiber [online]. 2010 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.profiber.eu/LG-Ericsson-EA-1100/>
- [17] LG-Ericsson EARU 1112. In: Profiber [online]. 2010 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.profiber.eu/LG-Ericsson-EARU-1112/>

## 8 Seznam Příloh

- **Příloha A:** Schéma zapojení v Optiwavu podle topologie z obrázku 28
- **Příloha B:** Příloha na CD



Obrázek 33: Schéma zapojení v Optiwave podle topologie z obrázku 28