



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VLNOVĚ SELEKTIVNÍ PŘEPÍNÁNÍ

WAVELENGTH SELECTIVE SWITCHING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Sikora

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Münster, Ph.D.

BRNO 2016



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**
Ústav telekomunikací

Student: Vojtěch Sikora

ID: 164779

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Vlnově selektivní přepínání

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Popište možnosti realizace vlnově selektivního přepínání pro aplikaci ve WDM sítích. Navrhněte systém ROADM WSS. Správnost návrhu ověřte simulací.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] CHOUDHURY AL SAYEED, Duwayne R. Larry Johnson a William B SPILLMAN. ROADM Subsystems for Optical Networks CHARACTERIZATION AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF RECONFIGURABLE OPTICAL ADD/DROP MULTIPLEXERS FOR NEXT GENERATION NETWORK: an introduction for engineers and scientists. 2nd ed. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2009, xiii, 498 p. ISBN 978-363-9198-737.

[2] FILKA, Miloslav. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno: M. Filka, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

Termín zadání: 1.2.2016

Termín odevzdání: 1.6.2016

Vedoucí práce: Ing. Petr Münster, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Přepínání optických okruhů je neustále se rozrůstajícím oborem optických sítí. Se vzrůstající potřebou optického přenosu jsou jedinou možností jak vytvořit flexibilní a efektivní síť softwarově definované sítě. Tato bakalářská práce představuje technologie pro přepínání optických okruhů, kterými jsou rekonfigurovatelné add drop multiplexory využívající vlnově selektivního přepínání, využitelné v sítích s vlnovými multiplexy. Pomocí programu VPIphotonics byly tyto přístroje simulovány a s jejich použitím byla vytvořena fiktivní síť mezi městy Praha, Brno, Ostrava a Vídeň.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optická síť, optický add drop multiplexer, přepínání optických okruhů, rekonfigurovatelný optický add drop multiplexer, softwarově definované sítě, vlnově selektivní přepínač, vlnový multiplex.

ABSTRACT

Optical circuits switching is a rapidly growing area of photonic networks. With increasing requirements of photonic services only software defined networking allows flexible and effective networks creation. This bachelor thesis introduces technologies of optical circuits switching, especially wavelength selective switching node as reconfigurable optical add drop multiplexer used in wavelength division multiplexing networks. Using specialized software VPIphotonics the WSS 1x4 and ROADM for an interconnection between Prague, Brno, Ostrava and Vienna was designed.

KEYWORDS

Optical network, optical add drop multiplexer, optical circuit switching, reconfigurable add drop multiplexer, software defined networks, wavelength selective switch, wavelength division multiplexing

SIKORA, Vojtěch *Vlnově selektivní přepínání*: bakalářská práce. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 60 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Münster, PhD.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Vlnově selektivní přepínání“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

BRNO

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Münsterovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

BRNO

.....

podpis autora



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

BRNO

.....

podpis autora



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OP Výzkum a vývoj
pro inovace

OBSAH

Úvod	12
1 Teoretická část práce	13
1.1 Optické přenosy	13
1.1.1 Jednovidové optické vlákno	13
1.1.2 Vícevidové optické vlákno	13
1.2 Přepojování okruhů a paketů	14
1.2.1 Přepojování okruhů	14
1.2.2 Přepojování paketů	15
1.3 Přepínání a směrování optických signálů	16
1.3.1 Přepojování optických okruhů	16
1.3.2 Přepojování optických paketů	16
1.3.3 Přepojování optických dávek	18
1.3.4 Směrování optických signálů	19
1.4 Vlnové multiplexy	20
1.4.1 Dense Wavelength Division Multiplexing	20
1.4.2 Coarse Wavelength Division Multiplexing	21
1.4.3 Arrayed waveguide grating	21
1.5 OADM & ROADM	23
1.5.1 Optical add-drop multiplexer	23
1.5.2 Reconfigurable optical add-drop multiplexer	24
1.6 Softwarově definované sítě	31
1.6.1 Přesný význam SDN	31
1.6.2 Klíčové trendy pro změnu sítí	32
1.6.3 Možné problémy SDN	33
1.6.4 Hybridní architektura	34
1.6.5 Nutná pravidla SDN	34
1.6.6 Nejvýraznější výhody SDN	35
1.6.7 Opensource projekty SDN	35
2 Výsledky práce	38
2.1 Návrh vlnově selektivního přepínače	38
2.1.1 VPIphotonics	38
2.1.2 Design přepínače	39
2.1.3 Použité komponenty	39
2.1.4 Funkce vlnově selektivního přepínače	42
2.2 Návrh modulu ROADM	43

2.2.1	Funkce modulu	44
2.3	Návrh sítě s ROADM	45
2.3.1	Návrh použití 1 - obecný provoz	46
2.3.2	Návrh použití 2 - přepnutí nestandardního množství dat do směru Ostrava	47
2.3.3	Návrh použití 3 - Přepnutí nestandardního množství dat do místní sítě	48
3	Závěr	55
	Literatura	56
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Jednovidové optické vlákno	13
1.2	Vícevidové optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu	14
1.3	Vícevidové optické vlákno s gradientní změnou indexu lomu	14
1.4	Princip funkce ryze optického přepínače	17
1.5	Optické dávky dat a řídicí pakety	18
1.6	Princip směrování signálu v sítích WDM	19
1.7	Různé druhy DWDM	20
1.8	Princip demultiplexování pomocí AWG	21
1.9	OADM první generace	24
1.10	Činnost uzlu ROADM v síti	24
1.11	Funkce OXC přepínače	26
1.12	Funkce PLC	27
1.13	WSS s použitím MEMS	27
1.14	Optický snímač MEMS	29
1.15	Projekt Open Daylight v architektuře SDN	36
1.16	Architektura SDN podle Cisco One	36
2.1	Návrh WSS s 1 vstupem a 4 výstupy	38
2.2	Detail jedné větve WSS	39
2.3	Modul TxPulse	40
2.4	Modul SignalAnalyzer	40
2.5	Modul Fork	40
2.6	Modul FilterOpt	41
2.7	Aktivovaný modul Attenuator	41
2.8	Deaktivovaný modul Attenuator	41
2.9	Modul Multiplexor	42
2.10	Vstup WSS	42
2.11	Graf: Spektrum signálu na vstupu	43
2.12	Graf: Spektrum signálu na výstupu 1	43
2.13	Graf: Spektrum signálu na výstupu 2	44
2.14	Graf: Spektrum signálu na výstupu 3	44
2.15	Graf: Spektrum signálu na výstupu 4	45
2.16	Návrh ROADM	46
2.17	Detail výstupu pro místní síť	47
2.18	Mapa ČR s navrhovanou sítí	48
2.19	Návrh sítě ve VPIphotonics	49
2.20	Nastavení parametrů optického vlákna	49
2.21	Graf: Vstupní signál ROADM	50

2.22 Graf: Výstupní signál do místního provozu sítě města Brna	50
2.23 Graf: Výstupní signál do města Ostrava	50
2.24 Graf: Výstupní signál do města Vídeň	51
2.25 Konfigurace ROADM pro přenos nestandardního množství dat ve směru Ostrava	52
2.26 Výstup ve směru Ostrava s plným spektrem vlnových délek	53
2.27 Konfigurace ROADM pro přenos nestandardního množství dat do místní sítě	53
2.28 Výstup do místní sítě s plným spektrem vlnových délek	54

SEZNAM TABULEK

1.1	Přehled kanálů DWDM s mezerami 100 GHz	22
2.1	Vzdálenosti mezi propojenými městy	45
2.2	Parametry optického kabelu firmy Solarix	47

ÚVOD

V posledních letech se v telekomunikačních sítích setkáváme s trendem exponenciálního nárůstu přenosu dat. V páteřních sítích jsou již jistou dobou standardem optické přenosy a v dnešní době se pracuje na technologiích, které dokáží zajistit větší pružnost těchto optických sítí. Dalším zkvalitňováním elektronických komponent by výzkum v brzké době začal stagnovat a nebylo by reálné, aby v budoucnu zpracovávaly předpokládané množství dat. Jednou z cest tohoto výzkumu je tedy nahrazování opticko-elektrických komponent, jako jsou směrovače a přepínače za čistě optické zařízení, které díky svému potenciálu a teoretickým možnostem rozšiřují tuto cestu výzkumu do velmi širokého spektra. Vlnově selektivní přepínače, které jsou základním kamenem optických add drop multiplexorů jsou zařízení schopná bezprostředně přepínat vlnové délky vysílaného WDM signálu v závislosti na stavu sítě. Tato technologie se v dnešní době bere jako základ ve tvorbě sítí dalších generací, kterými jsou zejména softwarově definované sítě. Jejich flexibilita výrazně ulehčuje vývoj dalšího hardware.

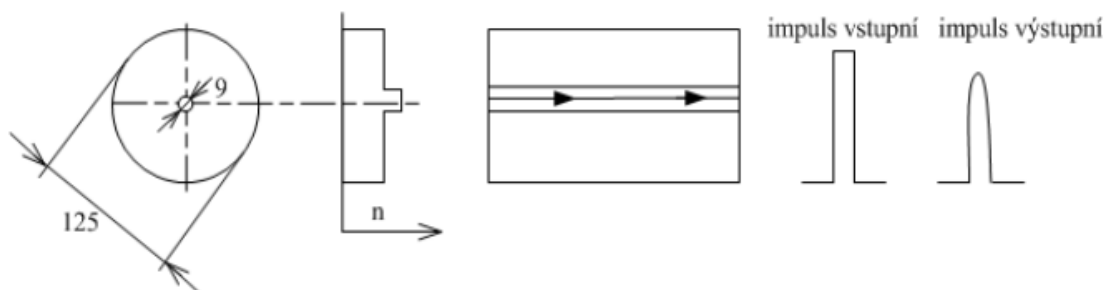
Práce je rozdělena do dvou částí. V první teoretické části jsou popsány od základu technologie optických přenosů od samotných vláken přes multiplexování vlnových délek po přepínače a systémy s možností přepínat vlnové délky na své výstupy. Jedná se zejména o OADM a ROADM systémy, využívající technologii vlnově selektivního přepínání. V části praktické, která je vypracovaná ve specializovaném programu VPIphotonics, je vytvořen design WSS 1×4, ze kterého je dále vytvořen ROADM. Z těchto komponent je nakonec simulována fiktivní síť se simulací provozu.

1 TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

1.1 Optické přenosy

K optickým přenosům se využívají optické kabely. Optický kabel obsahuje jedno, nebo svazek optických vláken, které jsou potáhnuté plastovou vrstvou, nebo jiným ochranným materiálem, který se dá vhodně použít do prostředí, kde bude vlákno uloženo. Vlákná se liší podle toho, zda provádí přenos na veliké vzdálenosti (např. kontinenty), nebo vysokorychlostní přenos na vzdálenosti malé (např. budovy).

1.1.1 Jednovidové optické vlákno

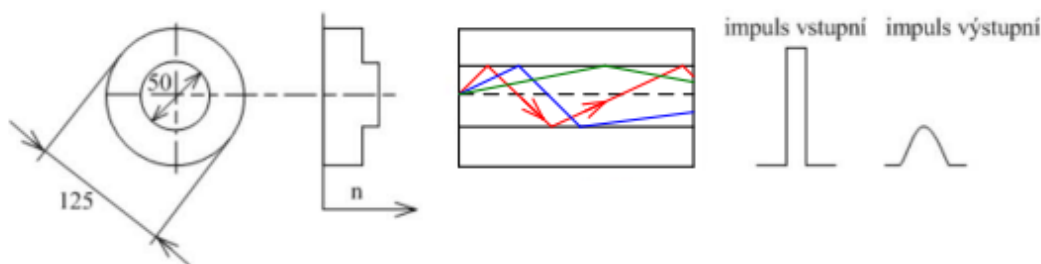


Obr. 1.1: Jednovidové optické vlákno

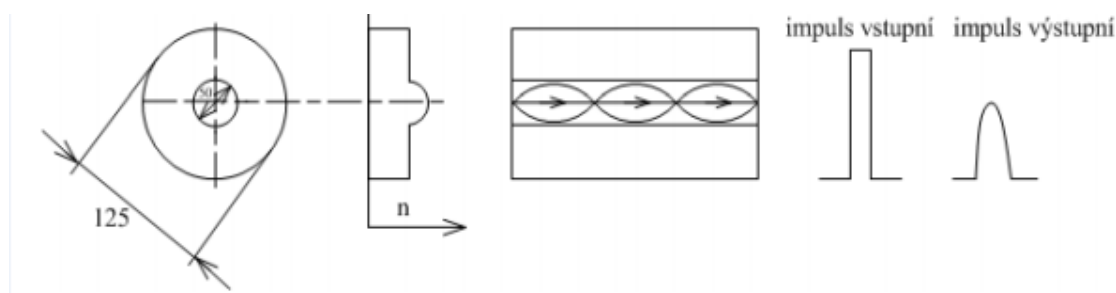
Jednovidové optické vlákno, neboli single mode je typ vlákna přenášející informace na velké vzdálenosti. Tato vlákna vykazují nejlepší parametry a mají nejmenší průměr jádra, do 10 mikrometrů. Díky tomuto jádru se dá docílit velmi velkého úhlu odrazu a tím minimalizovat cestu světla vláknem.

1.1.2 Vícevidové optické vlákno

Multimode vlákno se využívá hlavně pro komunikaci na krátké vzdálenosti (do 600 m). Existují dva druhy vláken, se skokovým indexem lomu a vlákna gradientní. Ve vlákně se skokovým indexem vstupují do vlákna paprsky pod mnoha různými úhly a dále se šíří úplným odrazem. U těchto vláken je velmi vysoká vidová disperze. U gradientních vláken se index lomu snižuje, čím dále je od jádra vlákna. Tímto se výrazně zmenšuje vidová disperze. [2]



Obr. 1.2: Vícevidové optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu



Obr. 1.3: Vícevidové optické vlákno s gradientní změnou indexu lomu

1.2 Přepojování okruhů a paketů

Ačkoli se zdá, že přepínání okruhů je již druhořadá záležitost a je vytlačeno přepínáním paketů, není tomu zdaleka tak. Mezi mnoha novinkami v síťových technologiích, službách a aplikacích je neustále veden spor o tom, která z technologií je využitelnější, vznikají tak i sítě hybridní.

1.2.1 Přepojování okruhů

Neboli circuit switching. Samotná komunikace probíhá po dopředu sestaveném okruhu mezi dvěma stanicemi. Data v okruhu sledují jednu předem danou cestu v síti a doručují se v takovém pořadí, v jakém byla odeslána. Jedná se tedy o komunikaci spolehlivou a se spojením. Přidělování samotných kanálů lze provádět multiplexováním, z důvodů sdílení kapacity systému.

Pevné a komutované okruhy Okruhy mohou být pevné, kdy mezi stanicemi není žádné spojovací, nebo přepojovací zařízení. Dále mohou být okruhy s přepojováním (komutované). Komutované okruhy se vytvářejí v komutačních sítích na žádost stanice a pouze na dobu nezbytnou pro provedení komunikace. Pevné okruhy

jsou buď vytvořeny trvale, nebo se pronajímají na předem dohodnutou dobu. V paketových sítích se fyzické okruhy nevytváří, pouze okruhy virtuální (SVC,PVC).

Prostorové a časové dělení Prostorové přepojování okruhů ve své podstatě vzniklo v klasických ústřednách s mechanickými, elektromechanickými, nebo elektronickými prvky. To znamená klasická telekomunikační ústředna, kde v prvopočátku přepojovaly spojovatelky. Časové přepojování vychází z vydělování časových úseků ze společného časového rámce vydělující tyto časové úseky do různých směrů, tato technologie je známá jako Time division multiplexing (TDM).

Ve své klasické podobě je přepojování okruhu velmi starou technologií, používanou v již zmíněných počátcích telegrafie a telefonie a v pozdějších letech s nástupem digitalizace v sítích ISDN.

1.2.2 Přepojování paketů

Známý také jako packet switching. Mezi stanicemi neexistuje žádný sestavený okruh, místo toho se každý směrovač na cestě k cíli rozhoduje, kudy daný paket odešle. Paket je samostatná jednotka, která má ve svém záhlaví všechny potřebné informace k doručení paketu i k následnému sestavení zprávy v cílové stanici. Každý paket totiž může být odeslán naprosto jinou cestou než pakety ostatní, z tohoto důvodu pakety nemusí dorazit v daném pořadí v jakém byly odeslány. Problémy spojené s pořadím, duplicitou a skutečným doručením je potom problémem cílové stanice, ne sítě. Přepojování paketů lze ale realizovat se spojením, kdy cesta je pro všechny pakety v rámci jedné komunikace stejná.

Paketová komunikace vznikla v době, kdy začalo být využíváno přepojování zpráv v telegrafním provozu. V praxi bylo předvedeno v roce 1972. Základem těchto sítí jsou směrovače a přepínače na druhé a třetí vrstvě. V každém takovém uzlu se poté hledá další cesta (skok, hop), toto hledání je nezávislé na ostatních paketech. Z principu není cesta paketu sítí na počátku známá, jelikož není navázán žádný okruh, žádná cesta není pro paket dopředu rezervována. Každý paket je tedy nezávislý na ostatních, teoretický každý putuje rozdílnou cestou. Cesta se vybírá podle stavu topologie sítě, každý směrovač musí dynamicky sledovat síť a přístroje kolem sebe, díky tomu vypočítávat metriku každé cesty. Paket poté pokračuje cestou s nejmenší metrikou. Směrovač si takto udržuje aktualizovanou směrovací tabulku. Paket je odeslán „naslepo“, bez informací zda je jeho cílová stanice v dosahu, nebo zda vůbec existuje. Všechny informace o paketu jsou uchovány v jeho hlavičce, ve směrovači se díky této hlavičce zařadí do fronty a je následně odeslán směrem k adresátovi. [9]

1.3 Přepínání a směrování optických signálů

Neustálý exponenciální nárůst provozu v telekomunikacích existuje zejména díky čím dále tím větší oblibě videokonferencí, rostoucímu počtu přípojek k internetu a rozvojem různých cloudů. Dle odhadu roste internetový provoz meziročně kolem 30 – 40 %. Pokud by se tento trend zachoval, tak za 20 let od letošního roku by se internetový provoz zvýšil zhruba tisíckrát. Aby mohly optické páteřní sítě držet krok s tímto trendem, je potřeba zdokonalovat technologie v oblasti optického sdělování.

Mezi uzly sítí, nebo mezi koncovými uzly sítě zatím není konkurence, která by dokázala vytlačit optické komunikace. Díky tomu, že jsme dokázali zvýšit přenosové rychlosti až na stovky Gb/s s pomocí výkonných elektronických procesorů a díky technologii DWDM, která tuto rychlost zvyšuje až na Tb/s, nejslabším článkem optických sítí se staly uzly, vybaveny optoelektronickými převodníky a elektronickými směrovacími ústřednami. Řešením tohoto problému by mohla být technologie umožňující ryze optické směrování nebo přepojování signálů.

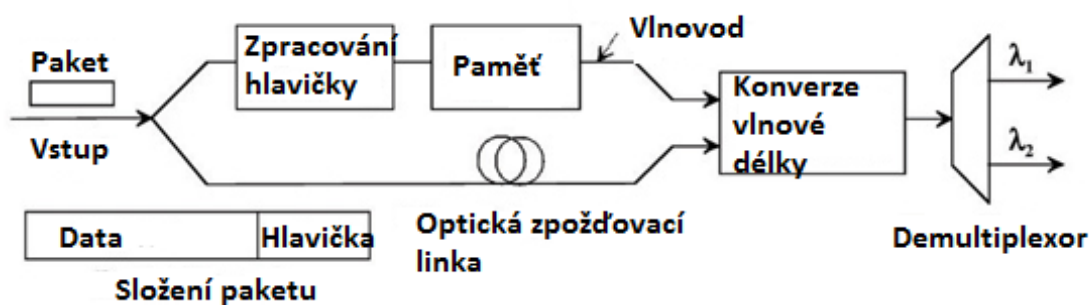
1.3.1 Přepojování optických okruhů

Přepojování optických okruhů na úrovni vlnových délek se v uzlech provádí pomocí optických multiplexorů, které umožňují z přenášeného signálu vyčlenit vlnovou délku, nebo ji do signálu přidat. Respektive s pomocí přepínačů, které dokáží přepínat vlnové délky na kterýkoli výstup. V prvních generacích OADM (kapitola 1.5.1) se signálové toky na odbočkách do místního provozu přepojovaly ručně. Obdobně ručně se signály začleňovaly do výstupního multiplexoru. Pro výběr (filtraci) vlnových délek se využívají tenkovrstvé filtry vytvořené na optických vláknech s optickými cirkulátory, nebo s pomocí fázovaných planárních optických vlnodů (AWG), které jsou vysvětleny v kapitole 1.4.3.

Druhá generace OADM umožňuje naprogramovat výběr vlnových délek pro místní provoz, respektive jde rekonfigurovat, odtud vychází název reconfigurable OADM (ROADM kapitola 1.5.2). Jádrem ROADM jsou vlnově selektivní přepínače (WSS kapitola 1.5.2), které mají funkci přepojovací matice. Selektce vlnových délek se provádí pomocí vhodných laditelných filtrů. Pro rekonfiguraci a spínání se využívají mikroelektromechanická zrcadla (MEMS kapitola 1.5.2), nebo tekuté krystaly (LCoS kapitola 1.5.2).

1.3.2 Přepojování optických paketů

Využívání sítí s přepojováním okruhů je neefektivní, zejména v síti, kde je drtivá většina telekomunikačních služeb poskytována přes Internet na bázi IP protokolu a intenzita provozu je proměnlivá. Proto se již řadu let snaží mnoho výzkumných ústavů



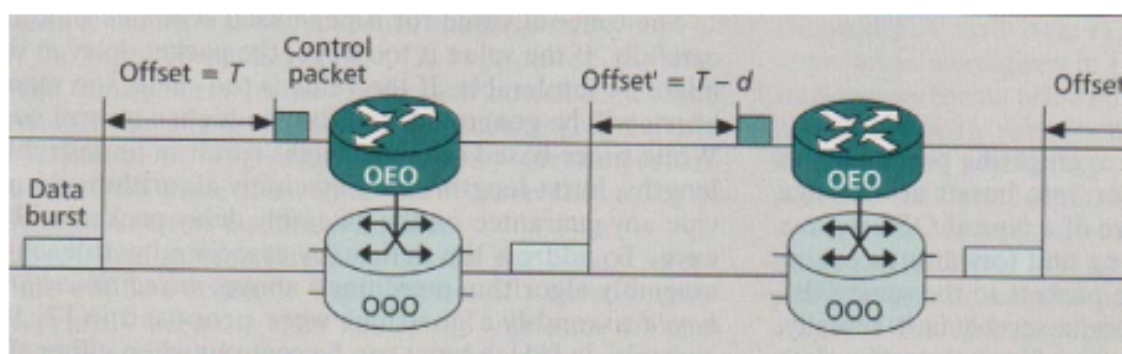
Obr. 1.4: Princip funkce ryze optického přepínače

navrhnout a realizovat techniku schopnou přepojovat pakety v optickém tvaru. Díky paketovým sítím dokážeme dosáhnout vyšších přenosových kapacit pomocí statického multiplexování a s pomocí rychlého sestavení spojů na požádání koncových stanic. Další výhodou spojovanou s paketovými sítěmi je multicasting, což je odesílání stejným paketů do mnoha destinací ve své podstatě v reálném čase. Nyní jsou elektronické IP směrovače propojeny pomocí optických okruhů. Na vstupech těchto směrovačů jsou pakety pomocí optickoelektrických převaděčů převedeny do elektrického formátu, roztrženy na místní a průchozí pakety, které se znovu převedou do optického tvaru a odešlou zpět do sítě. Hlavní nevýhoda přepojování paketů způsobem jaký byl popsán výše je navýšení nákladů z důvodu potřeby zařízení a provoz převodníků, nemluvě o jejich elektrické spotřebě. Samozřejmostí je, že kvůli pokroku optických technologií neustále stoupají požadavky na elektronické prvky. Zejména na propustnost IP směrovačů, které i přes výrazné pokroky nedokáží udržet s optikou krok. Navíc počítáme-li u IP směrovačů např. 4×4 spotřebu energie 10 W na 1 Gb/s a dnešní přenosové systémy zvládají přenos až 100 Gb/s na jedné vlnové délce, kterých zvládneme do jednoho vlákna namultiplexovat až 100 i více, vyjde nám že $100 \times 100 \times 4 = 40$ Tb/s a tudíž příkon 400 kW. Z toho jasně vyplývá, že dalším logickým krokem ve výzkumu je přepojovat ideálně co nejvíc paketů jako optické a do elektronického tvaru by se převáděly pouze pakety pro místní provoz. Výhodami by byla zjednodušená konstrukce a výrazně nižší energetická spotřeba. Ryze optický směrovač paketů je na obrázku 1.4.

Pokud by do ryze optického přepínače dorazilo více paketů určených do stejného místa, nastává největší problém v konstrukci těchto přístrojů. Zatím se totiž nepodařilo vytvořit použitelnou optickou RAM, která je právě kvůli těmto důvodům naprosto nezbytná. Na výstupu OXC by jinak došlo ke kolizím. Musí být tedy vytvořena pomocí paměti fronta těchto paketů, čekajících na své odeslání. Prvním nápadem experimentátorů bylo využití vláknové zpožďovací linky, ale pro toto vy-

užití jsou příliš rozměrné a pro praktické použití nepoužitelné. Chybí také velmi rychlé optické obvody pro kontinuální zpracovávání hlaviček paketů, proto se v prototypch hlavičky oddělují a zpracovávají jako elektrický signál. Další z mnoha technologických problémů jsou optické spínače pro řízení matic například u MEMS, bez řízení těchto matic nelze pakety vůbec směřovat. Různá optická hradla, která by tuto rychlost zvládla jsou pospolu s napájením těchto obvodů příliš velká a náročná na spotřebu energie. Z všech těchto výše uvedených důvodů ještě nebylo optické přepojování paketů uplatněno v praxi. [11]

1.3.3 Přepojování optických dávek



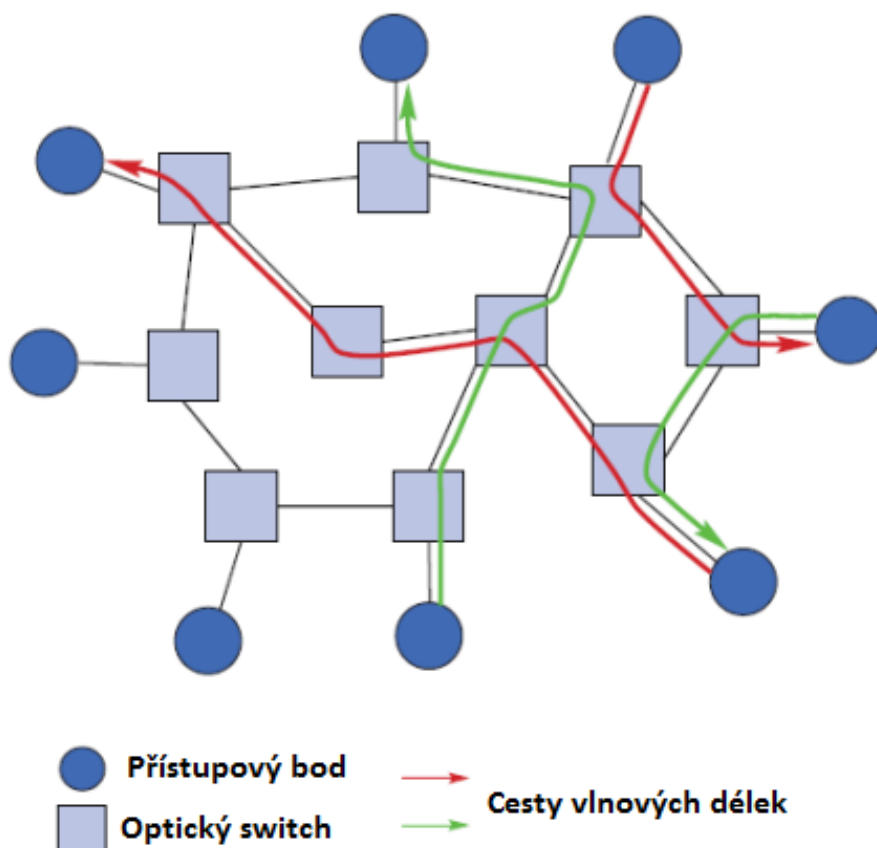
Obr. 1.5: Optické dávky dat a řídicí pakety

Kompromisem mezi přepojováním optických okruhů a optických paketů je přepojování dávek. Principem přepojování dávek je sdružování paketů se stejnou destinací do řady za sebou a tak je i odeslat do sítě. Doručovací cesta by byla předem vytyčena speciálním řídicím paketem, vyslaným po separovaném kanálu dostatečně dlouho před odesláním dávky paketů. Řídicí paket by obsahoval informace o vlnové délce, na které budou data odeslány, velikost a adresu cíle. V průchozích směrovačích by byly řídicí pakety zpracovány elektricky a nastavily by spínače tak, aby dávky které nejsou určeny pro místní provoz prošly bez převodu na výstup rezervovaný předem řídicím paketem.

Spínače pro přepojování dávek jsou mnohem jednodušší než pro přepojování paketů a využívají mnohem menší kapacitu vyrovnávací paměti pro kolize. Bohužel je zde i mnoho nevýhod, které toto řešení přináší. Hlavním problémem je větší složitost uzlů sítě, ve kterých jsou pakety seřazovány do dávek dat. Dále se musí vypočítávat jak potřebný předstih potřebuje řídicí paket. Do zkušebního provozu byla zatím zavedena pouze jedna síť, kde byly problémy popsány výše prakticky ověřeny. Na obrázku 1.5 vidíme dva druhy směrovačů, jedny čistě optické odesílající

dávky dat a směrovače s převodníky, zpracovávající řídicí pakety, přicházející o čas T dříve. [11]

1.3.4 Směrování optických signálů



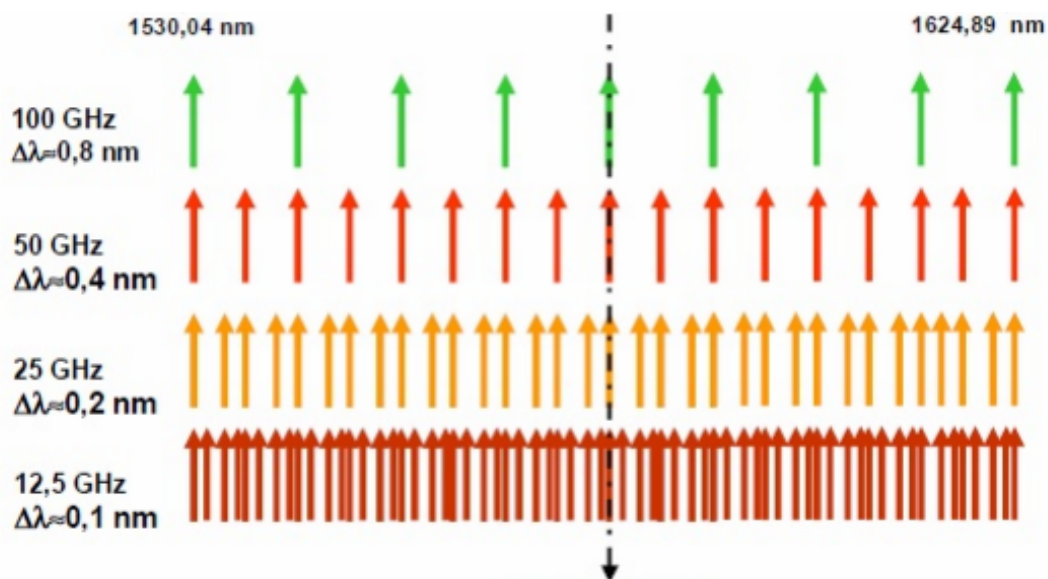
Obr. 1.6: Princip směrování signálu v sítích WDM

Samostatným a velmi důležitým problémem při vytváření ryze optického přenosu, či přepojování optického signálu vůbec, je výpočet optimální trasy přes WDM síť a určení vlnové délky na které se tento přenos uskuteční. Mnoho řešení se zajímalo o tvorbu algoritmů pro výpočet trasy tak, aby se nemusela po celé cestě měnit vlnová délka, jelikož měniče vlnových délek jsou zatím stále velmi drahé. Hlavním problémem, který se tedy řešil, byl momentální stav sítě a zjišťování, které vlnové délky jsou na kterých úsecích volné. Tento algoritmus by musel pracovat v řídicím centru sítě, kde by se mohl aplikovat v reálném čase, a kde dokáže rychle detekovat změny v síti. [4] [9]

1.4 Vlnové multiplexy

V optických sítích obecně WDM představuje technologii, na jejímž základě můžeme přenášet na jednom optickém vlákne více různých vlnových délek a tím navýšit jeho kapacitu, nebo využít vlákno k obousměrné komunikaci. První WDM systémy byly dvoukanálové a používaly vlnové délky o hodnotách 1310 nm a 1550 nm. Brzy na to se začaly vyvíjet multikanálové systémy, které využívaly okolí vlnové délky 1550 nm, kde je útlum na optickém vlákne nejmenší. Tyto DWDM systémy využívají teplotně stabilní lasery, díky kterým dosahují potřebného počtu kanálů. Kvůli vysoké ceně se ale DWDM dá využít pouze pro aplikace na vysoké vzdálenosti. Potřeba využití WDM řešení v metropolitních sítích se ale zvyšovala, musely tedy být vyvinuty nové, alternativní technologie. Takovou technologií se stala CWDM. Tento systém je levnější, jelikož nepotřebuje tepelně stabilní zdroje vlnění a odstup mezi jednotlivými vlnovými délkami je vyšší, což znamená že nedokáže multiplexovat do optického vlákna tolik vlnových délek jako DWDM. [17] [22]

1.4.1 Dense Wavelength Division Multiplexing



Obr. 1.7: Různé druhy DWDM

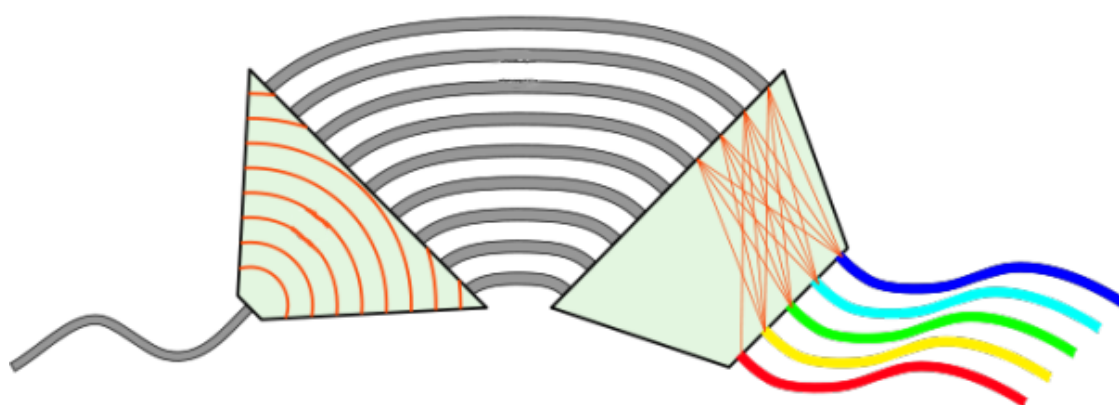
Takzvaný „hustý“ vlnový multiplex DWDM je jeden z nejdokonalejších systémů využívaných v telekomunikačních sítích. Technologie využívá vlnové délky okolo 1550 nm a odstupy mezi kanály jsou od 0,1 nm do 0,8 nm. To znamená, že může přes jedno optické vlákno přenášet až desítky kanálů. To několikanásobně zvyšuje přenosovou kapacitu vlákna až na 10 Gbit/s a provozovat na něm běžně až 96 různých kanálů.

U ultra DWDM teoreticky až 160. DWDM je technologie na fyzické vrstvě modelu ISO/OSI nebo modelu IP, proto není nijak omezeno multiplexovat protokoly různých rychlostí a velikostí paralelně v jednom vlákně. Začít používat tuto technologii bylo možné zejména díky DFB laserům, které mají velice úzkou spektrální čáru a s pomocí selektivních spektrálních filtrů. Bohužel tato zařízení jsou velmi citlivá na teplotní stabilitu, musejí se tedy chladit. V tomto spočívá jejich vysoká cena. Doporučení ITU.T G.694.1 specifikuje přenosové kanály v oblasti vlnových délek od 1490 nm do 1620 nm. DWDM vychází z normalizované vlnové délky 1550 nm a od ní se dále odvíjí další kanály s rozstupem 0,1 nm až 0,8 nm. [7] [12] [15]

1.4.2 Coarse Wavelength Division Multiplexing

Takzvaný „hrubý“ multiplex CWDM vznikl jako levnější varianta DWDM. Prvky této technologie nejsou tak nákladné jako prvky u DWDM, jelikož vzdálenosti mezi kanály nejsou tak malé a používané laserové diody a spektrální filtry nemají vysoké nároky na teplotu. Tyto náležitosti definuje standard ITU-T G-694.2. Vlnové délky používané v CWDM jsou v okolí 1310 nm a 1550 nm a umožňuje využití 18 kanálů, ale pouze u standardem definovaného vlákna, u běžného vlákna je možnost využití 12 kanálů. Využití CWDM je zatím nejvíce v metropolitních sítích, jelikož jde kombinovat s technologií DWDM a vytvářet tak pružnější topologie s velkou šířkou pásma. [14]

1.4.3 Arrayed waveguide grating



Obr. 1.8: Princip demultiplexování pomocí AWG

Kanál	Frekvence [GHz]	Vlnová délka [nm]
1	190100	1577,03
2	190200	1576,20
3	190300	1575,37
4	190400	1574,54
5	190500	1573,71
6	190600	1572,89
7	190700	1572,06
8	190800	1571,24
9	190900	1570,42
...
41	194100	1544,53
42	194200	1543,73
43	194300	1542,94
44	194400	1542,14
45	194500	1541,35
46	194600	1540,56
47	194700	1539,77
48	194800	1538,98
49	194900	1538,19
...
63	196300	1527,22
64	196400	1526,44
65	196500	1525,66
66	196600	1524,89
67	196700	1524,11
68	196800	1523,34
69	196900	1522,56
70	197000	1521,79
71	197100	1521,02
72	197200	1520,25

Tab. 1.1: Přehled kanálů DWDM s mezerami 100 GHz

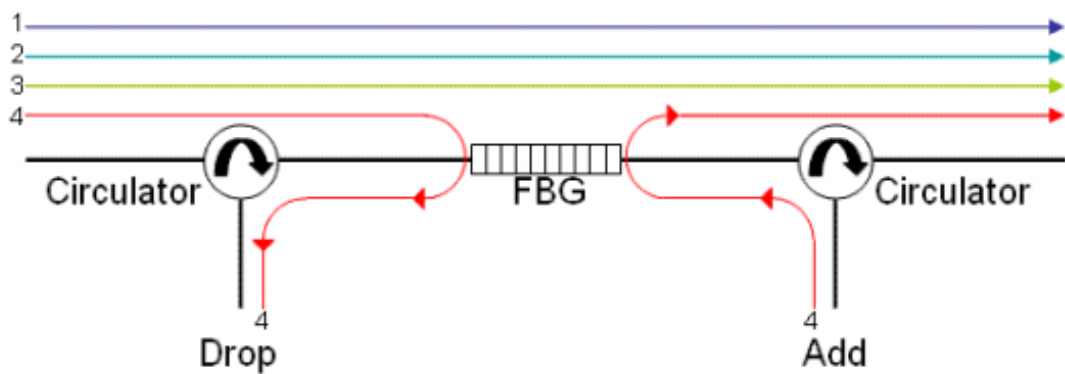
AWG také známy jako PHASARS jsou klasicky využívány ve WDM technologiích k multiplexování, nebo demultiplexování vlnových délek světla. Využívají se hlavně díky jejich malému vložnému útlumu, vysoké stabilitě, nízké ceně a jednoduchosti integrace do optického systému. AWG sestává z fázované řady planárních optických vlnodů mezi vlnovody vstupními a výstupními, jak lze vidět na obrázku 1.8. Dále sestává z dvou FPR. Vstupní a výstupní vlnovody jsou uspořádány dle Rowlanda, což znamená že konce jsou jednotně uspořádány do kruhu.

Vlnové demultiplexery se od devadesátých let věnují na mřížkově založené technologie a na PHASAR zařízení, což jsou v základě přístroje, které rozptylují vstupní paprsek na výstupní vlnovody. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma technologiemi je že v mřížkově založených přístrojích se využívá pro disperzi vertikální mřížka, zatímco PHASAR využívá pole vlnodů s různě danými délkami, čímž docílí požadované disperze. Můžeme se tedy vyhnout využívání mřížek, což dělá přípravek více žádoucí v použití s integrovanými optickými aplikacemi. Od roku 1988 se poprvé podařilo vyrábět malé 1×5 demultiplexery se vzdáleností kanálů 0,5 % pracující v He-Ne laserových vlnových délkách. Nynější AWG de/multiplexery jsou založeny na difrakci a zobrazovacích vlastnostech. Výstup je brán jako obraz vstupu na každém z vlnodů. Poté co projdou FPR, které musí být analyzováno na základě základních elektromagnetických rovnic a difrakce. Tyto kroky se zaměřují na vývoj aproximačního, ale efektivního geometrického přístupu k AWG designům, založených na trigonometrii. Tento model můžeme nazvat jako geometrická aproximace AWG, díky které dokážeme analyzovat klasické paprsky a vlnové teorie. Úroveň signálu je zde jediný parametr a analýza je založena na jeho výkon a princip superpozice. [5] [18]

1.5 OADM & ROADM

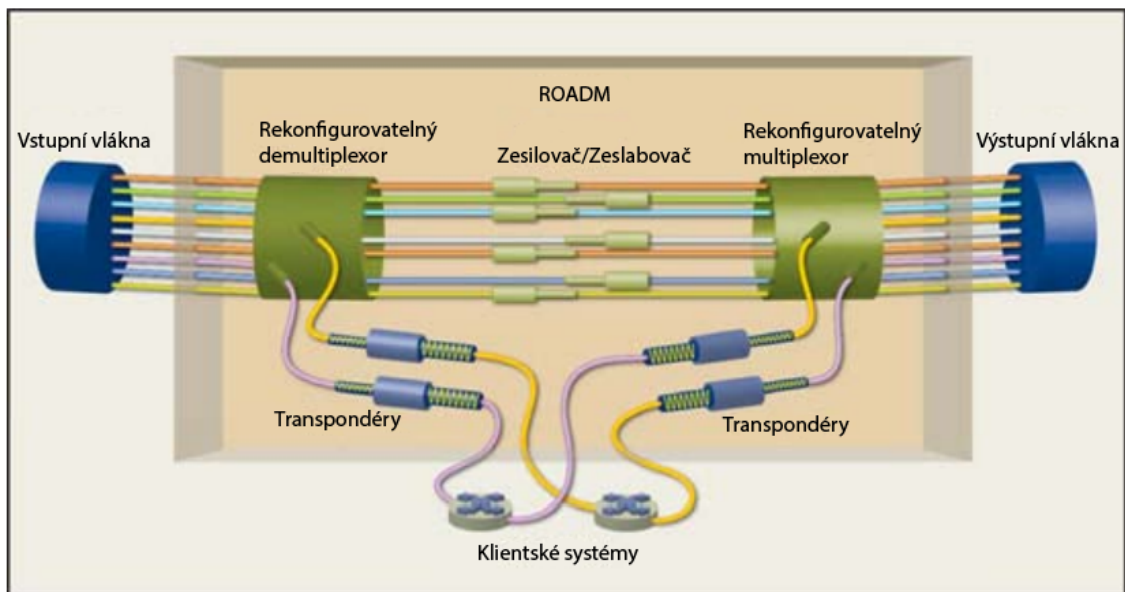
1.5.1 Optical add-drop multiplexer

OADM je zařízení používané ve WDM systémech pro multiplexování a směrování různých vlnových délek do nebo z optických vláken. „Add“ a „drop“ v názvu znamenají možnost přístroje přidávat jednu nebo více vlnových délek signálu do již existujícího multi-WDM signálu a nebo vlnové délky odebrat. Klasický OADM systém sestává ze tří částí, které jsou: optický multiplexor, optický demultiplexor a mezi nimi systém na rekonfiguraci cest s add/drop porty. Demultiplexor separuje různé vlnové délky ze vstupního vlákna a odešle je na porty. Rekonfigurace může být dosažena optickým patch panelem, nebo optickými switchi, které nasměrují vlnové délky na multiplexor, nebo drop porty. Multiplexor poté namultiplexuje vlnové délky z demultiplexoru ke kterým přidá další z add portů. [20] [10]



Obr. 1.9: OADM první generace

1.5.2 Reconfigurable optical add-drop multiplexer



Obr. 1.10: Činnost uzlu ROADM v síti

ROADM můžou být definovány jako optické moduly schopny přidávat, ubírat, nebo expresně posílat dál jakoukoli, nebo všechny vlnové délky v DWDM signálu. Tyto funkce navíc mohou být ovládány na dálku. ROADM nabízí flexibilitu na poskytovaných vlnových délkách nezávislou na tom, jak se síť mění. Efektivně vyhovuje potřebě různých služeb, přidáváním těchto nových služeb do sítě. Pro dosažení přizpůsobivosti na vlnových délkách, by měly být ROADM systémy použity v dálkových, metropolitních, nebo přístupových sítích. Poskytovatelé připojení jsou pak

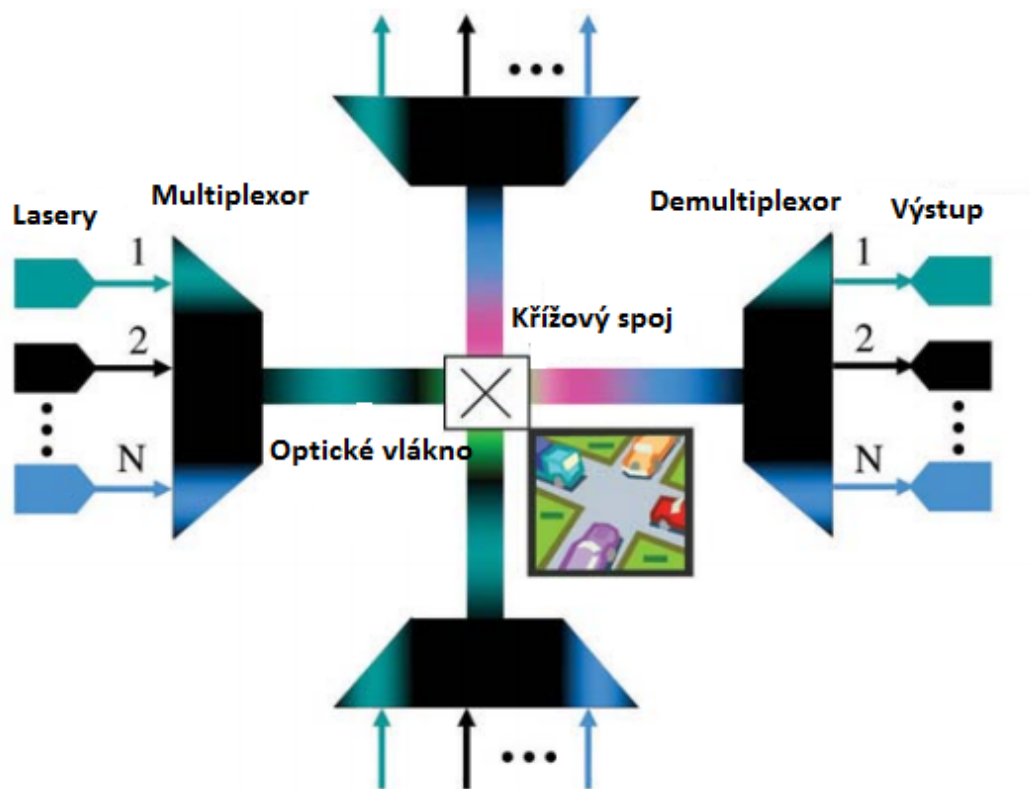
schopni ovládat, které vlnové délky se mají přidat, odebrat, nebo expresně odeslat dál do jakékoli části těchto sítí. Další z vlastností ROADM je konfigurovatelné transparentní ring-to-ring propojení, které zmírní využívání drahých OEO a OXC (kapitola 1.5.2) regenerátorů signálu na síti. Od počátku vývoje ROADM vývojáři vydali množství úsilí do vylepšování flexibility sítě. První generace ROADM pracovala s pomocí OXC a OEO regenerátorů signálu a jejich integrace byla přínosná pro budoucí optické sítě. Později byly ROADM konstruovány s optickými cirkulátory, nebo s DSM architekturou. Přesto první generace trpěla velmi vysokým útlumem, vysokými investičními a provozními náklady. Aby se tyto náklady snížily, vývojáři pracovali na integrovaném ROADM subsystému. Místo DSM systému se vytvořila kompaktní WB architektura. ROADM systémům s WB architekturou říkáme druhá generace. Tyto systémy poskytly více flexibility poskytovatelům služeb, zvláště pak při přidávání a ubírání vlnových délek a vysílání nových kanálů. Přesto druhá generace stále měla vysoký vložný útlum a nový design byl nekompatibilní s dalšími ROADM systémy. To pro ostatní poskytovatele znamenalo instalaci ROADM s WB, což opět navýšilo investiční a provozní náklady celé sítě. Aby se vývojáři zbavili těchto problémů, začali někteří pracovat na laditelných filtrech, kdežto ostatní se dali cestou bez WB a vytvořili jednodušší ROADM s PLC technologií. Tyto zjednodušené systémy přivedly ROADM do jeho třetí generace. Zatímco ale v PLC systému má každý port specifikovaný svůj kanál, v systému WSS se využívají „bezbarvé“ porty, čímž drasticky snižuje počet portů v síti. Na obrázku 1.10 vidíme činnost ROADM. Zleva vstupní vlákno přivádí do WDM demultiplexoru soubor vlnových délek, který dokáže vybrat pouze vlnové délky nesoucí signál pro místní provoz. Ostatní vlnové délky jsou utlumovány, respektive zesilovány (kvůli vyrovnaní výkonové úrovně) jsou v multiplexoru nakombinovány na signály, které generují klienti v místním provozu. Transpondéry jsou optickoelektrické, respektive elektrickooptické převodníky, systémy klientů jsou elektronické směrovače. [16] [21] [1] [10]

Optické křížové spínače

Optical cross connects jsou využívány v polygonálních páteřních sítích. Kromě začleňování a vyčleňování signálů místního provozu umožňují nasměrovat kterýkoli vstupní signál, včetně místních provozů, na kterýkoli libovolný výstup. Na obrázku 1.11 je znázorněna funkce OXC. [4]

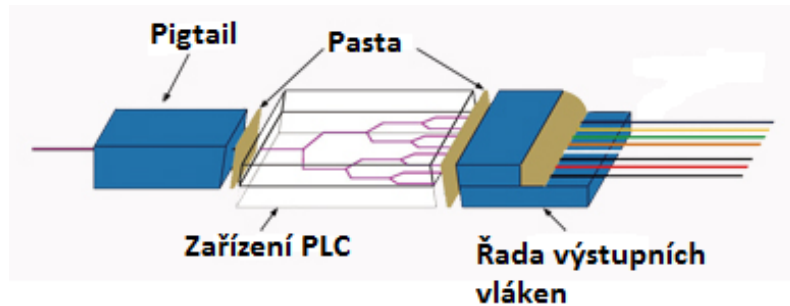
Planar lightwave circuit

PLC jsou zařízení, se kterými pracuje mnoho optických (i elektrických) komponent. Říká se jim také že jsou „Integrovaná optika“. PLC jsou většinou vyráběny ve formě



Obr. 1.11: Funkce OXC přepínače

čipů na bázi křemíku, nebo LiNbO_3 . Samotný materiál čipu zajišťuje různé limitace a vlastnosti. Křemíkové čipy mohou být využity pro velmi výkonou mikroelektroniku, jako jsou například realizace filtrů (pro multiplexory a demultiplexory ve WDM), splittersy a pro aktivní prvky s optickým zesílením. Mohou být samozřejmě připojeny k optickým vláknům. Vlnovody mohou být vyrobeny z křemičitého skla například litografickou technikou. Těmito technikami lze dosáhnout výroby vlnovodů pod povrchem materiálu (vestavěné vlnovody), tím docílíme třídímenzionálních obvodů. LiNbO_3 je nelineární krystalický materiál, proto se využívá pro nelineární funkce přístrojů jako jsou elektro-optické modulátory nebo akustiko-optické převodníky. Vlnovody se vyrábí pomocí techniky zvané proton exchange („výměna protonů“), nebo difuzí titanu, v každém případě kontrolovanou litografickými metodami. Dvoj- lom tohoto materiálu vytváří příležitosti pro kontrolu polarizace, která může být využita například pro filtrační účely. Na druhou stranu kvůli dvojlomu je o mnoho složitější vytvořit polarizačně nezávislé zařízení, které jsou často potřebná pro komunikaci přes optická vlákna. Vnitřní konfiguraci PLC lze vidět na obrázku 1.12. [8] [10]

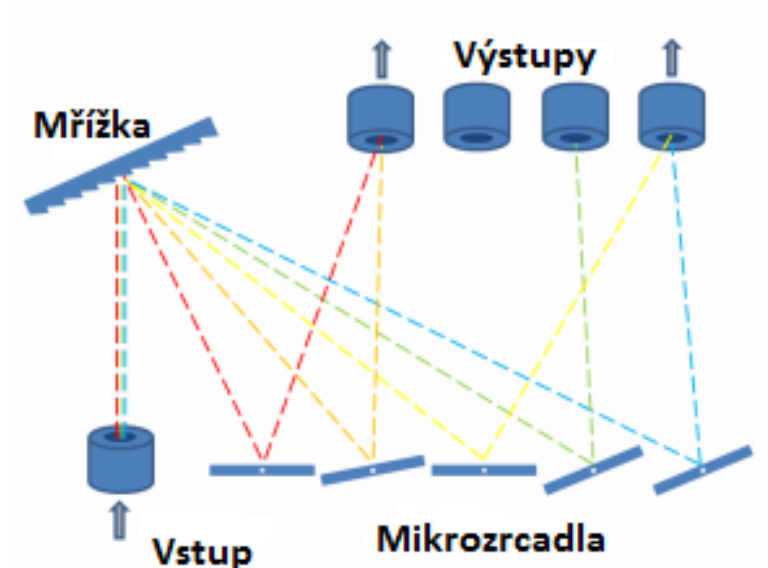


Obr. 1.12: Funkce PLC

Wavelength blocker

WB jsou designovány pro dynamickou rekonfiguraci přepínání a směrování aplikací v optických sítích. Při využívání plného spektra WB může zesílit nebo blokovat jakékoli množství vlnových délek v L i C rozsahu. Zařízení může být vzdáleně konfigurováno k výběru různých vlnových délek. Také redukuje množství optoelektronických opakovačů potřebných v síti. Tímto WB redukuje náklady a cenu optických sítí. Každá vlnová délka je samostatně zesílena nebo blokována pomocí elektronického signálu. Širokopásmová charakteristika a nízká disperze umožňuje WB kaskádovat, tím se umožňuje použití v plně optických sítích. [20]

Wavelength selective switch

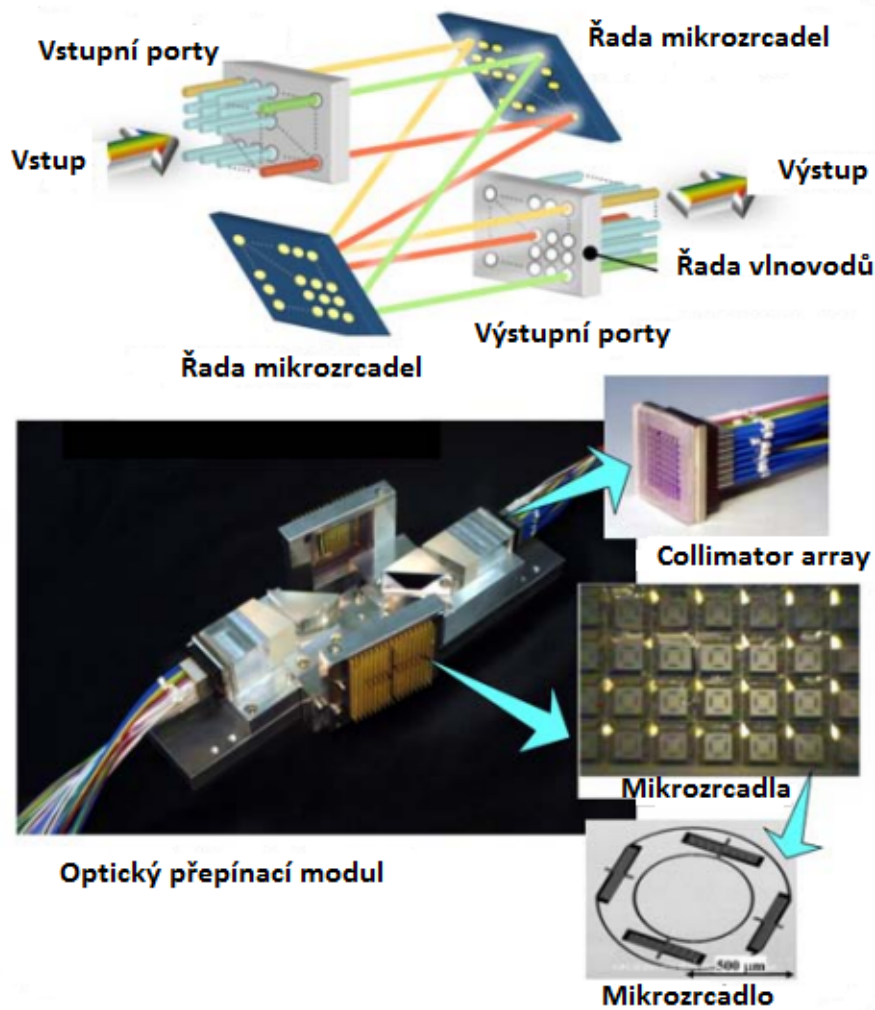


Obr. 1.13: WSS s použitím MEMS

WSS pracuje s vlnovými délkami rozptýlenými z paprsku, bez potřeby fyzického demultiplexování do různých portů. Tato konfigurace se nazývá „disperse and switch“. Například čtyřiceti kanálový WDM systém může být přepínán z původního vlákna do jakéhokoli z N vláken, pokud využijeme čtyřicet $1 \times N$ přepínačů. Toto zajišťuje značné zjednodušení oproti „demux and switch and multiplex“ architektuře. Tato architektura by totiž vyžadovala navíc $N + 1$ Mux/Demux elementů a switch pro $40 N \times N$ kanálů, což by přesáhlo výrobní limity pro velkoplošné optické spoje i pokud by nebylo použito mnoho vláken. Mnohem praktičtější a výrobci používanější architektura je následující. Různé kanály rozptýlené na přepínací prvek jsou nasměrovány a zesíleny na vstupy N portových přepínačů. Mechanismus pro rozptyl paprsku je většinou založen na holografických filtrech nebo pomocí řízené difrakce. Na obrázku 1.13 lze vidět jednoduché schéma WSS s použitím mikrozrcadel. [6] [23] [1] [10]

Microelectromechanical mirrors Existuje několik možností realizace WSS, jednou z nich je využití MEMS. Vlnové délky DWDM jsou přivedeny na vstup WSS pomocí jednovidového vlákna připojeného k vláknovému koncentrátoru. Tato optická komponenta slouží jako přechod mezi vláknem a volným prostorem, tedy mezi světlem uvnitř vlákna a paprsky projektovanými do prostoru. Vnitřek WSS může být vyplněn inertními plyny nebo vakuem. Cestou z koncentrátoru každý paprsek projde optickým systémem, který jej zesílí, zacílí, zlomí, nebo jinak upraví aby byl paprsek na požadované úrovni a v požadovaném úhlu. Disperzním prvkem může být například disperzní mřížka, demultiplexující každý paprsek do jeho vlnových složek. Individuální vlnové délky poté opouští mřížku a vstupují do druhé sady optiky, která stejně jako první manipuluje s paprskem tak, aby jej bylo možné poslat na MEMS mikrozrcadlo. Přepínací mechanismus WSS obsahuje mřížku mikrozrcadel. Obecně jsou zrcadla zapuštěna litografickou metodou do křemíku s pomocí technik vyvinutých v polovodičovém průmyslu. Každé jedno zrcadlo může být natočeno nezávisle na ostatních. Podle natočení poté odráží paprsek světla zpět do druhé sady optiky, která zpětně přes mřížku namultiplexuje vlnové délky ze zrcadel do jednoho paprsku a přes primární optiku odešle na výstup WSS. V reálném WSS je v každé řadě MEMS mřížky tolik zrcadel, kolik odpovídá počtu vlnových délek v DWDM signálu přiváděném na vstup. Poté jednoduše každé zrcadlo odešle jednu vlnovou délku ze vstupu na jakýkoli z výstupních portů. Aby se vlnová délka zablokovala, tak se tento paprsek odešle mimo výstupní port. Mikrozrcadlo také může utlumit paprsek tak, že rozdělí paprsek a jeden odešle do blokovacího portu. Toto je velmi výhodné při vyrovnávání energií různých vlnových délek, tak aby vlnová délka s vysokou energií zbytečně neovlivňovala ostatní.

Všechny optické komponenty musí být také optimalizované v průběhu výroby.



Obr. 1.14: Optický snímač MEMS

Musí mít nízký vložný útlum, řádné geometrické tolerance a vlastnosti, nesmí mít žádné povrchové vady, nízkou polarizační závislost atd. Jako aktivní prvek mikrozrcadlo musí splňovat kritéria jako jsou reflektivita, citlivost, řídicí napětí, různé úhly natočení, jednotnost atd. Celá komponenta by měla zajišťovat životnost 10–12 let, při používání ve všech telekomunikačních prostředích, což je v rozsahu teplot $-5-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, při vysokých vibracích a mechanických nárazech. Celý přepínač také musí být relativně malý. Specifikování WSS komponent je komplikované z důvodu potřeby nízké ceny společně s vysokou spolehlivostí. Designéři musí využívat standardní komponenty kdykoli je to možné a celkový počet komponent by měl být co nejmenší možný. Jakmile dosáhneme dobrého poměru mezi cenou a spolehlivostí, přichází na řadu otázka montáže. Montáž vyžaduje vysokou přesnost při osazování komponent pro řízení paprsků světla, v řádu desetin mikronů. Jelikož WSS nejsou

vyráběny v mnoha kusech, je lepší poloautomatická výroba. Testování WSS je další časově náročnou etapou ve výrobě. Počet celkových cest se rovná násobku vstupních vláken, výstupních vláken a počtu vlnových délek v DWDM. Máme-li tedy 10×10 přepínač s DWDM obsahující 80 vlnových délek, musíme na něm otestovat celkově 8000 cest. Z toho vychází, že testování, narozdíl od sestavování by mělo být plně automatické a to i pro menší typy WSS.

Díky zvyšující se popularitě WSS v optických sítích se rozvíjí i výzkum v různých směrech. Již existující $N \times 1$ WSS se čtyřiceti kanály a nejvýše devíti vstupními porty se stále vyvíjí s nižšími ztrátami a přeslech, širšími pásmy a sníženou polarizační závislostí. Tyto výkonové zlepšení zpřístupní vlnovým délkám modulační rychlosti až 40 Gb/s s minimálními ztrátami, při průchodu více WSS. [6] [23]

Liquid crystal in silicon LCoS je celkem známá metoda přepínání v systémech WSS. LCoS mohou být využity ke kontrole paprsku světla na každém pixelu aby se docílilo řízení paprsku, kde velké množství pixelů umožní skoro nepřetržité adresovací schopnosti. Typicky je využito velké množství kroků aby byl vytvořen vysoce výkonný switch s malým vložitelným útlumem.

V praxi světlo prochází z vlákna přes polarizační optiku, která polarizuje vysoce efektivní s-polarizací na difrakční mřížku. Světlo z vybraného vstupního vlákna je odraženo od zobrazovacího zrcadla a poté rozloženo pomocí mřížky. Dále je světlo odraženo zpět přes optiku, která každou vlnovou délku namíří na různé LCoS. Když jsou vlnové délky na LCoS rozděleny přepínání každé z těchto vlnových délek je nezávislé na ostatních a mohou být přepínány bez interference s ostatními kanály. WSS založené na LC technologii alokují jeden přepínací element (pixel) pro každý jeden kanál, což znamená, že šířka pásma a střední frekvence každého kanálu musí být předem daná už při výrobě a nejde ji později měnit. Navíc mnoho designů prvních generací WSS vykazovaly výrazné poklesy v transportním spektru mezi kanály. Zato WSS na základě LCoS nabízejí dynamickou kontrolu kanálové střední frekvence a šířky pásma pomocí modifikace pixelů, ovládané vestavěným softwarem. Stupeň ovládnutí kontroly parametru kanálu může být velmi jemný, díky nezávislé kontrole střední frekvence a obou vrchní, nebo spodní hranice pásma s přesností větší než 1 GHz. Toto je výhodné z výrobní perspektivy, jelikož je možnost vytvořit různé druhy kanálů i dokonce různá pásma (C a L pásma), použitím jedné a té samé přepínací matice. Navíc je LCoS schopen rekonfigurovat kanály v běhu zařízení. Produkty jsou schopny přepínat mezi 50 GHz a 100 GHz kanály, nebo mixem těchto kanálů, bez zasahů do existujícího provozu. [19]

1.6 Softwarově definované sítě

V dnešním počítačovém světě se do popředí dostává stále víc virtualizace a různé cloudové služby. Virtualizací myslíme techniky přístupu k různým zdrojům jinak než jak fyzicky existují. Toto zjednodušuje využívání těchto zdrojů, jelikož koncový uživatel nemusí svůj počítač, notebook atd. přizpůsobovat. Cloudové služby zahrnují model, který poskytuje služby různých programů, které jsou uloženy na cloudovém serveru a uživatelé se k těmto službám připojují prakticky odkudkoli, kde mají připojení k internetu a bez nutnosti vlastnit využívané aplikace. Přístupy těchto druhů v poslední době vyvolaly potřebu změnit přístup k počítačovým sítím a začít dostávat do podvědomí sítě SDN. Tyto změny si nutně vyžádají nové přístupy k síťové architektuře, jelikož síťové prostředí tak jak ho známe dnes se změní na více dynamický model. To znamená, že nad klasickou sítí přepínačů bude čím dál častěji provozována virtuální síť, s neomezenou pružností jak po stránce síťové, tak po stránce úložní. V cloudových datových centrech vznikají při virtualizaci různých úrovní sítě vrstvy prostředí „multi-tenancy“. Díky cloudu se v datových centrech mohou dynamicky měnit nároky na velikost a škálovatelnost. Základ je tedy virtualizace v LAN a WAN sítích. SDN tedy poskytují výhody virtualizace na každou doménu datového centra – výpočetní, úložnou a síťovou. Současně ale i na všechny služby, které jakkoli souvisí s provozem sítě, což jsou otázky bezpečnosti, dostupnosti a přístupu. Softwarové řešení nám pomůže docílit toho, že všechny hardwarové zdroje sloučíme a pomocí virtuálních automatických funkcí budou zdroje přerозdělovány v závislosti na potřebách různých aplikací. Toto řešení je efektivní, rychlé a bezpečné. [10]

1.6.1 Přesný význam SDN

Snaha softwarově definovaných sítí je co nejvíce oddělit roviny kontrolní a roviny vlastních dat v rámci sítě. To jim umožňuje inteligence a stav sítě, která bude řízena centrálně. Navíc bude možné oddělit složitost reálné fyzické sítě.

Cílem SDN je vylepšit centralizovanou správu a možnosti jednoduchých definic služeb. Dále hlavně vylepšení pružnosti a vysoký stupeň automatizace díky integraci s různými aplikacemi přes API. To vše v rámci definic nových služeb v síti – integrace virtualizovaných serverů v datacentru atd. Infrastruktura sítě je z pohledu správce sítě rozdělena jednoduše a logicky, což při standardizaci ve výsledku přinese značné úspory nákladů, jelikož síťová infrastruktura se bude moct jednoduše jakkoli upravovat. O standardizaci protokolu umožňujícího SDN se pokusila komunita OpenFlow prostřednictvím Open Network Foundation, nutno dodat že v této oblasti je toho ještě mnoho nedokončeného, jelikož SDN je mnohem více než jen OpenFlow.

Se zkušenostmi s řešením OpenFlow je dostatečně zřejmé, že celý systém je ještě stále příliš daleko od použitelného výsledku. Výsledek by měl být škálovatelný a dostatečně robustní. Je to totiž úplně nový způsob nasazení síťové infrastruktury, který by se měl dokázat přizpůsobit požadavkům aplikací nasazených v síti. Nynější generace sítí je konfigurována staticky a vertikálně. Aplikace nové generace jako jsou video a další, u kterých je potřeba zpracovat velké množství nestrukturovaných a distribuovaných dat, vyžadují aby byly sítě pružné a přizpůsobitelné jejich požadavkům. Architektura SDN je jako softwarová síť popisována ve vrstvách.

Síťové aplikace a služby

Vrchní vrstva se skládá z aplikací, které využívají síť pro běžnou síťovou komunikaci. V této vrstvě jsou také zahrnuty obchodní a logické aplikace, které řídí a sledují chování sítě.

Kontrolní a řídicí vrstva

Střední vrstva je framework, v němž se projevuje abstrakce, poskytující řadu společných API pro aplikační vrstvu, implementující jeden nebo více protokolů pro řízení a kontrolu fyzického hardware v síti.

Fyzická a virtuální síťová zařízení

Spodní vrstva se skládá z fyzických a virtuálních zařízení, přepínačů, směrovačů apod., které tvoří konektivitu mezi všemi koncovými body v síti.

1.6.2 Klíčové trendy pro změnu sítí

Jak již bylo zmíněno, SDN řeší problém, který nastává při využití statické architektury běžné sítě. Tato architektura je nevhodná pro dynamický computing a pro potřeby dnešních datových center, kampusů apod. Mezi hlavní trendy vyvolávající nutnost nové síťové architektury jsou:

Změna stylu provozu

Aplikace, které běžně přistupují ke globálně distribuovaným databázím a serverům pomocí veřejných a soukromých cloudů vyžadují vysoce flexibilní řízení datového provozu a přístup k šířce pásma na žádost.

Trend BYOD

BYOD, neboli Bring your own device, je termín vyjadřující využívání vysokého počtu zařízení s přístupem na internet, které lze sebou kamkoli donést (notebooky, chytré telefony atd.). Tento trend vyžaduje sítě, které jsou jak flexibilní, tak i bezpečné.

Cloudové služby

Cloudové služby a aplikace jsou neustále ve větší oblibě a jejich význam v dnešním internetu hraje velkou roli. Jelikož jsou stále dostupnější, jak soukromé, tak zdarma, integrují se tyto služby čím dál tím častěji do různých zařízení (mobilů, tabletů, notebooků). Využívání cloudů není jen ve smyslu ukládání a sdílení dat, ale čím dál tím více i ve smyslu vzdáleného přístupu k výpočetnímu výkonu.

Sdílení objemných dat

Manipulace s dnešními velice objemnými datovými soubory vyžaduje masivní paralelní zpracování, což podněcuje poptávku po dodatečných kapacitách připojení k internetu.

Největší omezení, která se objevují ve snaze splnit požadavky na síť jsou:

- Složitost, nutně vedoucí k nehybnosti. Přidání nebo přesunutí zařízení a implementace síťové politiky do tohoto zařízení jsou jak složité, tak časově náročné a navíc sebou nesou riziko narušení provozu sítě.
- Nemožnost rozšiřování. Zastaralý způsob přístupu k poptávce škálovatelnosti je neúčinný v dynamických modelech virtualizovaných sítí. Tento problém je jen větší v sítích poskytovatelů s rozsáhlými výpočetními algoritmy a se soubory s nimi souvisejícími.
- Závislost na dostupných technologiích. Nedostatek standardizovaných, otevřených rozhraní omezuje schopnost provozovatelů sítí je přizpůsobit pro svá individuální řešení.

1.6.3 Možné problémy SDN

Největším problémem SDN je standardizace celkového řešení. Dalším, úzce souvisejícím, je dostupnost již vytvořených funkcí, které známe z dnešních sítí. Volně dostupné kontroléry jsou navrženy pouze jako demonstrace schopností různých protokolů. Většina z nich nabízí pouze základní přepínání a zbytek je ponechán na vlastním uživateli. Například často chybějící je podpora STP. V takto otevřených architekturách poté mohou začít vznikat smyčky. Bez standardizace tedy nemůžeme nic považovat za samozřejmé, například OSPF, politiky provozu, ověřování identit.

Některé funkce, které bychom v přepínačích podnikových tříd očekávali, si musí uživatel sám naprogramovat, nebo využít již hotový modul, který je možno nalézt na internetu.

Běžné provozní úkony jako jsou například správa a udržování sítě během upgradu jsou ponechány na uživateli. Ne všechny dostupné produkty toto ale bohužel podporují. Jistou výjimkou jsou kontroléry SNAC, dostupné v rámci otevřené komunity. Kontrolér původně vyvíjený společností Nicira nabízí použitelné webové rozhraní, nasazení politik, řízení přístupu do sítě a další. I přesto je stále velmi daleko za jakýmkoli komerčním řešením.

Nejvíce zásadní problém je ale škálovatelnost celkového řešení. Teoretické výhody centralizace jsou zjevné. K nevyřešeným problémům se stále řadí dostupnost a problém škálování IP toků. To je typické u testování již zmíněného OpenFlow v náročných podmínkách. V dnešních implementacích je ve výsledku vše statické, což znamená, že musíme předem vědět, kdo s kým bude komunikovat.

1.6.4 Hybridní architektura

Hybridní architektury jsou pro SDN velmi užitečné. Řízení toků, management topologie a rozhodnutí o směrování je prováděno lokálně a tak, jak je dnes běžné, vlastní definice je centralizovaná a je distribuována do celé sítě. Integrace s dalšími aplikacemi pomocí API sebou přináší značné výhody architektury SDN. Tyto způsoby lépe odráží požadavky kladené IT odděleními různých podniků a organizací. Jsou nahrazovány otevřenými standardy v závislosti na vývoji jednotlivých protokolů. Otevřenost API je hlavním parametrem užitečnosti SDN. Z hlediska flexibility a automatizace samotné činnosti. Na dnešním trhu jsou již dostupné produkty jak pro pevné tak i bezdrátové sítě, které třetím stranám umožní nastavit síť tak, jak je zrovna potřeba. Jedná se o nastavení koncových zařízení, virtuálních serverů, VOIP aplikací atd.

1.6.5 Nutná pravidla SDN

Se sítěmi SDN se vážou jistá rizika. Zejména rizika vyplývající z toho jak složitá síť SDN může být.

V klasických sítích byly „rozhodnutí“ ponechány na samotných zařízeních, na kterých síť funguje. Pokud bychom těmto zařízením vzali jejich kontrolu a vestavěný software, byla by to jistá předehra katastrofy v síti, i kdyby bylo vše ostatní nakonfigurováno správně. Šlo by to přirovnat k fungování dopravy ve městě, pokud by měl každý řidič vlastní ovládání semaforů, v síti by vznikl neorganizovaný chaos. Toto vytváří mezeru mezi teoretizováním SDN a reálnou implementací.

Nyní jsou ve vývoji dva opensource projekty. První z nich je OpenFlow od Open Networking Foundation, druhým je OpenDaylight od Linux Foundation. Oba dva projekty pracují na vytvoření souborů pravidel sítě SDN, které by zamezily výše popsanému chaosu. Také by se měly postarat o výrazně jednodušší práci vývojářů aplikací, kteří by se nemuseli zajímat o rozdíly řízení sítí, ale mohli by se zaměřit pouze na jeden z nástrojů, který by zvládl pro svou aplikaci naplánovat správnou cestu sítí.

1.6.6 Nejvýraznější výhody SDN

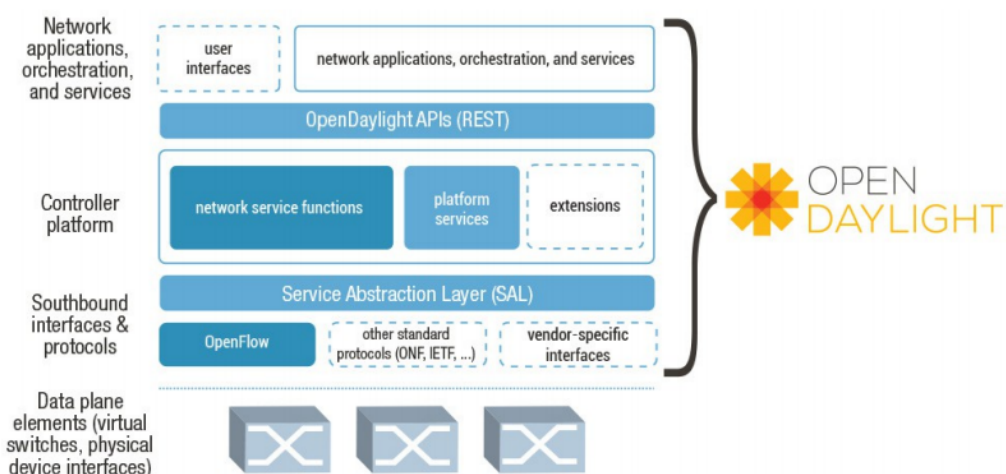
Nelze očekávat, že SDN budou dostupné ihned, zejména kvůli jejich komplexnosti. Přínosy ale budou patrné okamžitě, až budou realizovány. V prostředích cloud computingu, které budou využívat SDN zaznameneáme výrazné zvýšení rychlostí a účinnosti. Zejména kvůli tomu, že jejich aplikace a sítě budou v tomto cloudu navzájem přizpůsobeny. Z implementace SDN budou těžit i jiná odvětví telekomunikací. Pravděpodobně mezi nimi budou hlavně korporátní a mobilní sítě, jelikož datové služby jsou dnes v popředí před službami hlasovými. Například mobilní operátoři budou schopni nadefinovat nové datové tarify v závislosti na službách, které budou zákazníci vyžadovat. Mezi těmito službami si můžeme představit tarif zaměřený pouze na sociální sítě nebo video. Na určitý druh služby by šlo jednoduše nadefinovat jisté množství dat, jiné než na služby ostatní, toto vše v rámci standardního tarifu. Z toho jistě vyplývá že vývoj SDN sítí je přínosem nejen pro poskytovatele internetu, ale i pro různé jiné firmy.

1.6.7 Opensource projekty SDN

V dalších dvou sekcích si představíme dva nejznámější SDN opensourcové projekty, na kterých se ale podílí velké korporace.

Projekt Open Daylight

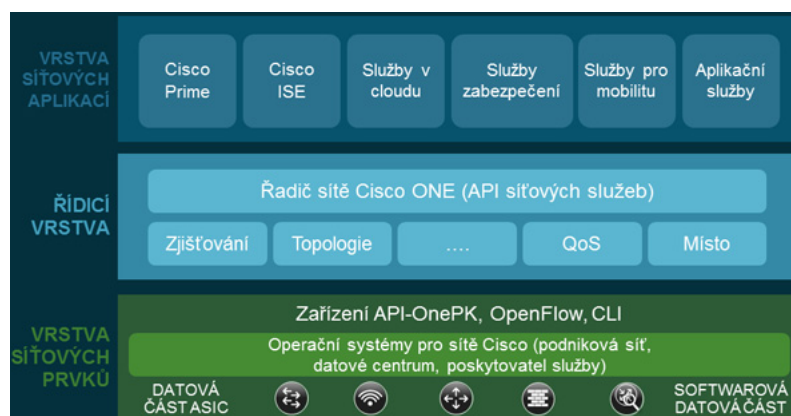
Opensource projekt, na kterém se podílí mnoho významných firem z oblasti IT. Mezi nimi jsou například Cisco, IBM, Microsoft, Redhat, Vmware, Intel a mnoho dalších. Pracuje s modulární, výměnnou a flexibilní platformou řadiče. Tento prvek je realizován výhradně softwarově a pracuje ve vlastním JVM. Může tedy být nasažen na jakémkoli hardware a OS, který využívá a podporuje jazyk Java. Interpretuje otevřené API, které je využito u aplikací. Podporuje OSGi framework a REST architekturu pro API. OSGi se využívá pro aplikace, které běží ve stejném prostoru jako samotný řadič, zatímco REST, což je webová architektura, se využívá pro aplikace v jiném adresním prostoru než řadič. Logika a algoritmy jsou řešeny aplikacemi,



Obr. 1.15: Projekt Open Daylight v architektuře SDN

keré využívají ovladač ke shromažďování možností sítě, spuštění algoritmů pro průběh analýz a poté je řadič využit k organizaci pravidel pro průchod sítí. Platforma řadiče obsahuje sbírku zásuvných modulů, které dokáží provádět potřebné činnosti v rámci sítě, mezi těmito moduly jsou například nástroje na shromažďování statistik atd.

Cisco ONE



Obr. 1.16: Architektura SDN podle Cisco One

Cisco Open Network Environment vnesl do Open Daylight jádro svého produktu a tento kód nabídl pod licencí Public Eclipse. Komunita Open Daylight začala na tomto kódu pracovat aby vytvořila architekturu pro framework Open SDN. Cisco změnilo svou strategii na opensource, jelikož se stává standardem pro zákazníky i vývojáře, kteří nejsou nuceni pracovat na uzavřeném softwaru výrobce. Nabídl

tedy tímto volné používání svého řešení a očekávají, že tím vytvoří jistý systém vývojářů, který dokáže SDN realizovat mnohem rychleji.

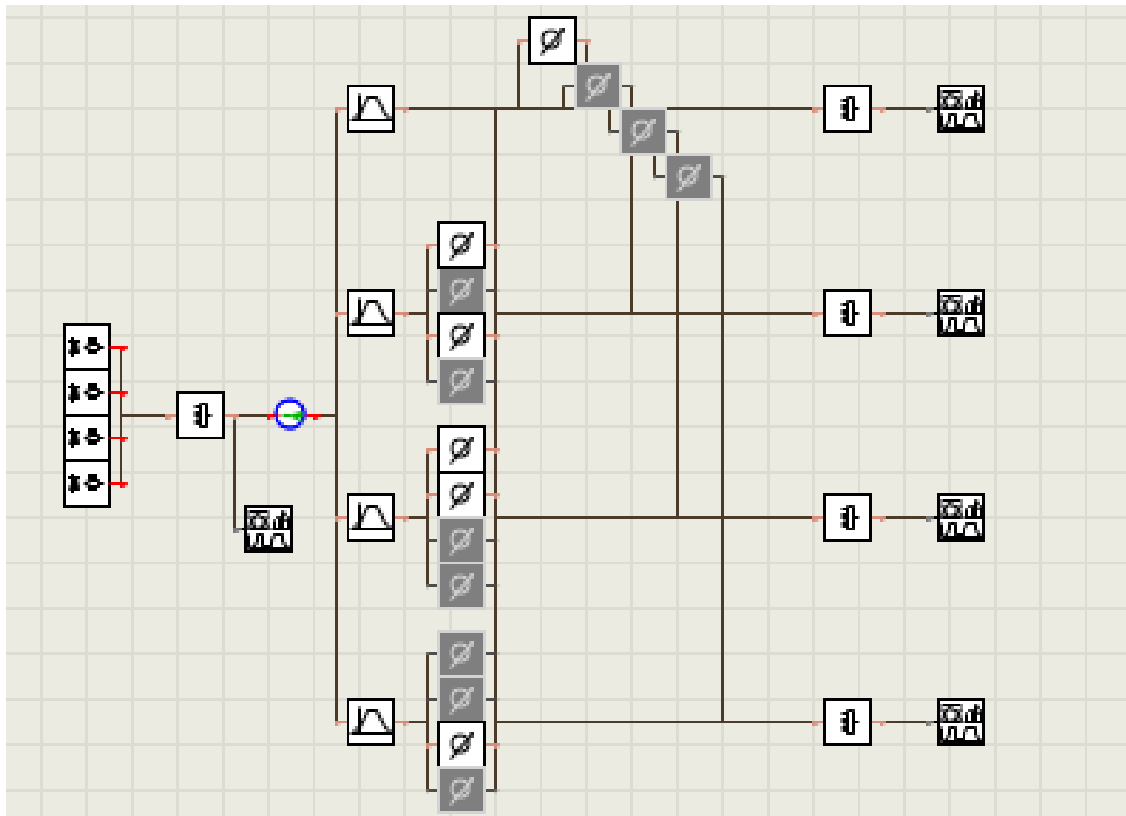
ONE je tedy přizpůsobovatelný framework, který dokáže využít hodnotu inteligentní sítě, která nabízí zejména otevřenost, programovatelnost a abstrakci v různých vrstvách. Je dodáván různě, samozřejmě nechybí API rozhraní a řadiče. Mezi jeho výhody patří vysoká agilita infrastruktury, jednoduché operace atd. Tímto nabízí mnohem flexibilnější možnosti nasazení napříč fyzickým a virtuálním prostředím. Doplňuje tradiční přístupy k SDN a zároveň zahrnuje řešení od transportu k automatizaci a řízení sítě.

Jak virtualizace serverů, tak virtualizace síťové vrstvy přináší zřejmé výhody jako jsou zvyšování kapacity sítě, různá pokročilá nastavení a plnou automatizaci. Můžeme tedy očekávat, že se SDN dostane brzy do popředí a virtuální sítě budou běžnou realitou jak v cloudových sítích, tak i v lokálním, nebo firemním prostředí. Virtualizace může být zrealizována bez jakékoli změny existující sítě, hardwaru, nebo může být sestavena od naprostého počátku. Každá síť, nezávisle na ostatních, má vlastní prostor, statistiky, QoS, bezpečnostní nastavení a jiné různé síťové služby. Umožňují také mobilitu vytížení malých sítí mezi sebou, zatímco udrží jejich izolaci a i přesto může měnit fyzickou infrastrukturu na vyžádání. Tímto se mnoho manuálních procesů změní na procesy automatické. Všechny fyzické komponenty se tedy stanou sdíleným prostorem síťové kapacity, která může být jakkoli a kdykoli změněna dle aktuální potřeby. [3] [13]

2 VÝSLEDKY PRÁCE

2.1 Návrh vlnově selektivního přepínače

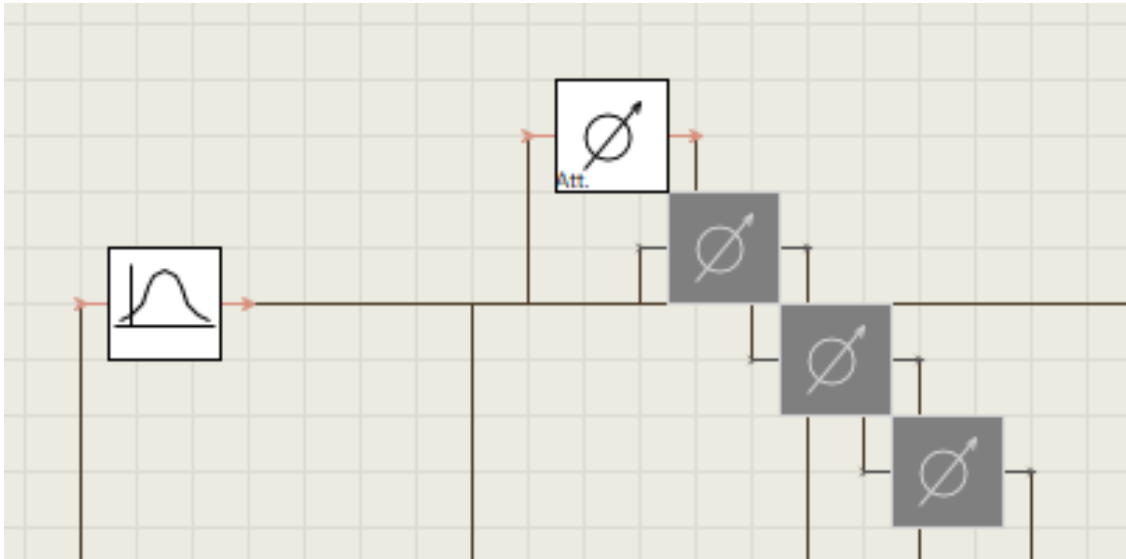
Tato část práce je věnována simulačnímu programu VPIphotonics a simulacím prováděným v jeho prostředí.



Obr. 2.1: Návrh WSS s 1 vstupem a 4 výstupy

2.1.1 VPIphotonics

VPIphotonics je program pro simulování designů optických systémů, jejich analýz a optimalizaci komponent, systémů a sítí. Poskytuje profesionální simulační software podporující potřeby aktivních, či pasivních integrovaných optických systémů, aplikací s optickými vlákny, optických přenosových systémů a síťových aplikací. VPIphotonics je hojně využíván ve výzkumu a vývoji.



Obr. 2.2: Detail jedné větve WSS

2.1.2 Design přepínače

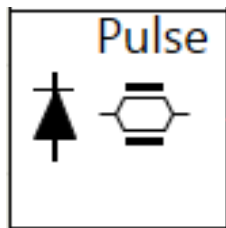
Model je typu 1×4 , tedy 1 vstup s multiplexovaným signálem s odstupem kanálů 100 GHz, na výstupu jsou 4 porty, schopné namultiplexovat na vlákno kteroukoli ze vstupních vlnových délek. Využíván je signál WDM se čtyřmi vlnovými délkami a to 193 THz, 193,1 THz, 193,2 THz a 193,3 THz. Na obrázku 2.1 je zapojení tohoto přepínače. Z důvodu, že tento simulační program nezobrazuje uzly viditelně, je první větev rozložena tak, aby bylo patrné, kam jsou jednotlivé vlnovody připojeny. Detail na obrázku 2.2. Ostatní vlnovody z dalších větví jsou logicky připojené podobně jako první. Všechny komponenty v tomto zapojení jsou ideální, což znamená, že pokud není definováno jinak, je jejich útlum 0 dB.

2.1.3 Použité komponenty

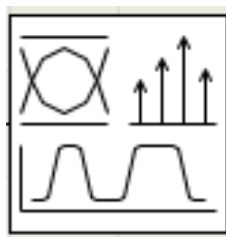
Seznam a detailní popis využitých komponent v návrhu.

Generátor signálu

Modul reprezentuje řadu laserů, obsahující uživatelem definovaný počet generátorů signálu. Tento modul je dobře využitelný pro generování WDM signálu. Jeho modul lze vidět na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: Modul TxPulse

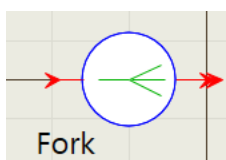


Obr. 2.4: Modul SignalAnalyzer

Analyzátor signálu

Tento modul pracuje jako rozhraní pro nástroj VPIphotonicsAnalyzer. Využívá se k zobrazení a anlyze elektrických a optických signálů. Na obrázku 2.4 lze vidět jeho modul.

Fork



Obr. 2.5: Modul Fork

Komponenta s jedním vstupem a až N výstupy. Slouží k rozdělení signálu na výstupy tak, že na každém výstupu je signál naprosto stejný jako na vstupu. Tohoto lze samozřejmě docílit pouze tím, že je tato komponenta ideální. Její modul v programu lze vidět na obrázku 2.5

Optický filtr

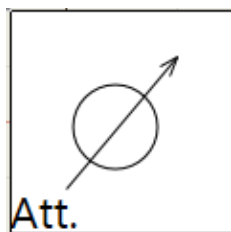
FilterOpt (obrázek 2.6) modul je univerzální model optického filtru pro propouštění pásma, blokování pásma a kombinačního filtru. Využívá standardní přenosové funkce, které jsou: Butterworth, Bessel, Chebyshev, Elliptic, Gaussian, Rectangular,



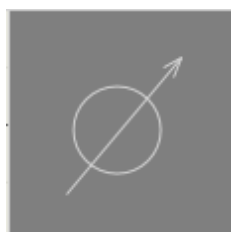
Obr. 2.6: Modul FilterOpt

Trapeziod a Integrator. Model může také být využit jako měřící filtr, jehož přenosová funkce je v externím souboru.

Útlumový člen



Obr. 2.7: Aktivovaný modul Attenuator

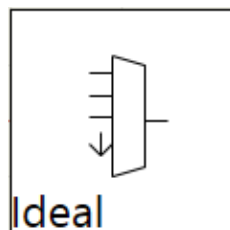


Obr. 2.8: Deaktivovaný modul Attenuator

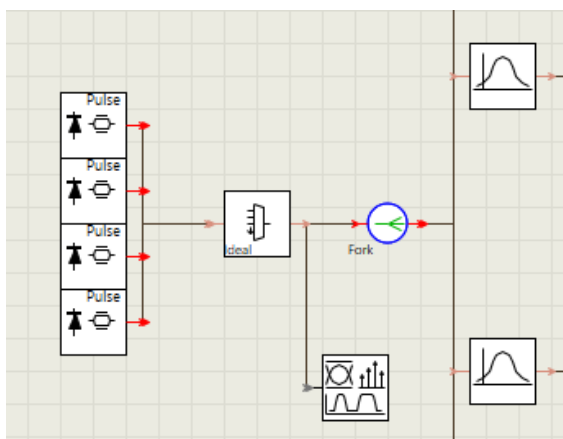
Attenuator. Jednoduchá součást s jediným parametrem a tím je nastavení zeslabení průchozího signálu v dB. Attenuator ve stavu enabled lze vidět na obrázku 2.7, disabled na obrázku 2.8.

Multiplexor

Ideální multiplexor (obrázek 2.9) s N vstupy a jedním výstupem, schopen namultiplexovat N kanálů do jednoho vlákna.



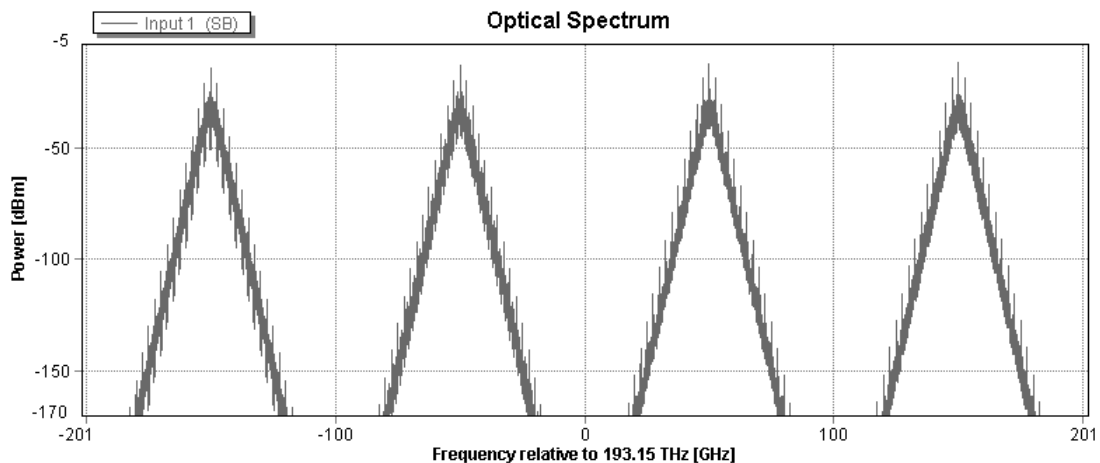
Obr. 2.9: Modul Multiplexor



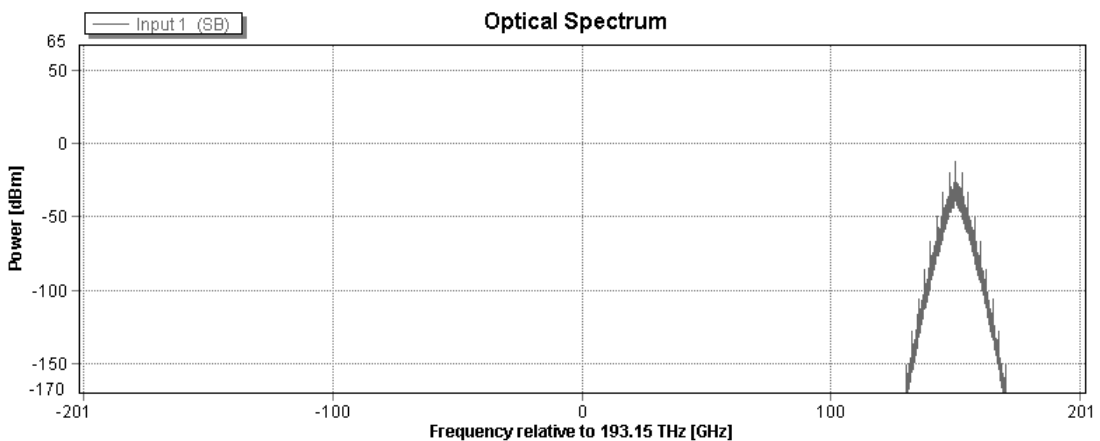
Obr. 2.10: Vstup WSS

2.1.4 Funkce vlnově selektivního přepínače

Na vstupu jsou čtyři generátory různých vlnových délek, v tomto případě v rozsahu 193 – 193,3 THz. Tyto vlnové délky jsou namultiplexovány pomocí vstupního multiplexoru na jedno vlákno. Výsledný signál je měřen a jeho průběh lze vidět v grafu 2.11, tento signál je rozdělen na 4 stejné části pomocí modulu Fork. Tyto kroky lze detailněji vidět na obrázku 2.10 Každý z těchto signálů je připojen na jeden optický filtr, propouštějící pouze jednu vlnovou délku ze spektra 193 – 193,3 THz. Filtrované signály jsou opět děleny na čtyři části, které prochází každá jedním útlumovým členem. Útlumový člen zde hraje roli propouštějícího, nebo blokuujícího portu. Pokud je attenuator aktivní s nastaveným útlumem 10000 dB, neprojde přes něj nic a tím pádem je to blokuující port. Neaktivní attenuatory nemají na průchozí signál žádný vliv a propouští spektrum ze vstupu. Ze všech čtyř větví jsou poté přivedeny na 4 výstupní multiplexory. V tomto případě je na výstup jedna namultiplexován kanál 4 s frekvencí 193,3 THz 2.12, na výstup 2 kanály 1, 2, 4 (193; 193,1; 193,3 THz) 2.13, na výstup 3 kanály 1 a 3 (193; 193,2 THz) 2.14 a na výstupu 4 jsou kanály všechny tedy 1, 2, 3, 4 (193; 193,1; 193,2; 193,3 THz) 2.15.



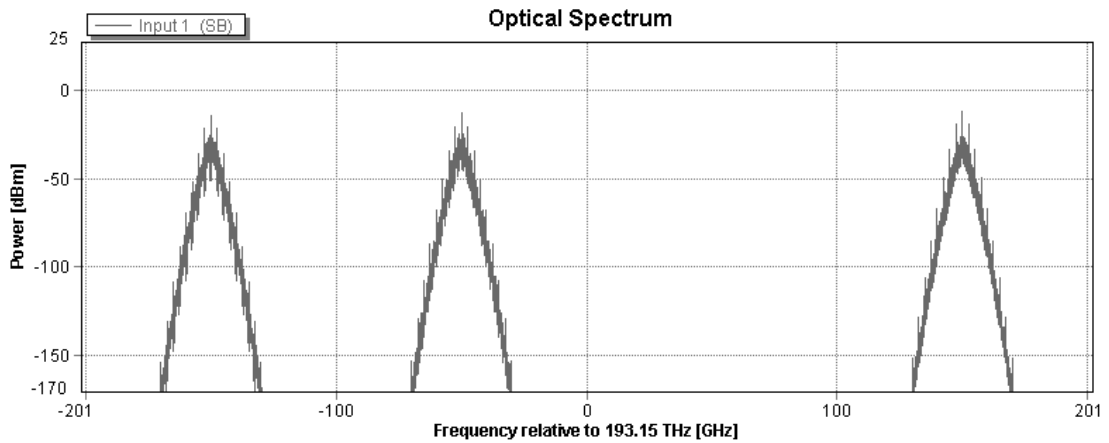
Obr. 2.11: Graf: Spektrum signálu na vstupu



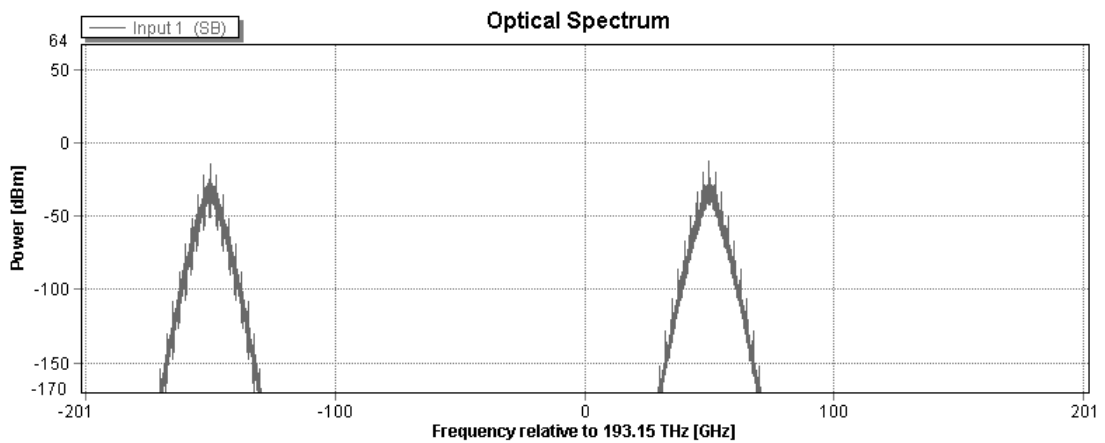
Obr. 2.12: Graf: Spektrum signálu na výstupu 1

2.2 Návrh modulu ROADM

Modul ROADM vychází z předešlého návrhu WSS, který lze vidět na obrázku 2.1. Modul vznikl přidáním dalšího vstupu a výstupu, pro místní část sítě. Může tedy do vláken přidávat a odebírat libovolné vlnové délky. Návrh lze vidět na obrázku 2.16. Hlavním a jediným požadavkem tohoto modelu je, aby červeně označený pár zeslabovačů a podobně se stejnou logikou i ostatní páry, nepropouštěly ve stejný moment signál, jelikož by došlo ke kolizi signálů na stejných vlnových délkách. Toto softwarové ošetření je již ale nad rámec této práce.



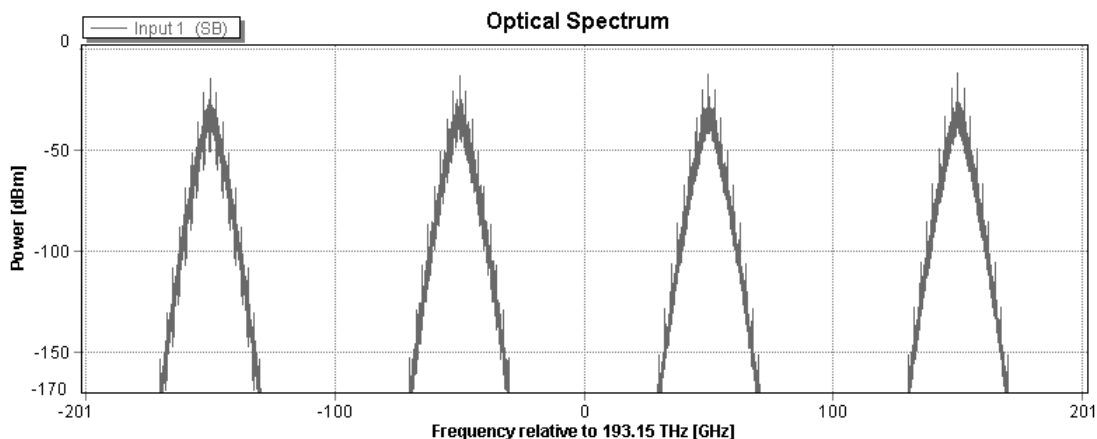
Obr. 2.13: Graf: Spektrum signálu na výstupu 2



Obr. 2.14: Graf: Spektrum signálu na výstupu 3

2.2.1 Funkce modulu

Příchozí signál je demultiplexován stejně jako ve WSS, ale předem určené vlnové délky pro místní síť jsou vyjmuty ještě před následným přepínáním na výstupní porty. Detail výstupního portu pro místní síť lze vidět na obrázku 2.17. Zbylé vlnové délky jsou přepnuty a pokračují na výstupní porty. K těmto vlnovým délkám se následně namultiplexují nyní volné vlnové délky, obsahující provoz z místní sítě. Takto lze ROADM nakonfigurovat mnoha způsoby. Například odklonit veškerý provoz ze vstupu do místního provozu, libovolně přepínat všechny vlnové délky na výstupní porty, či všechny vlnové délky expresně odeslat na jeden výstup.



Obr. 2.15: Graf: Spektrum signálu na výstupu 4

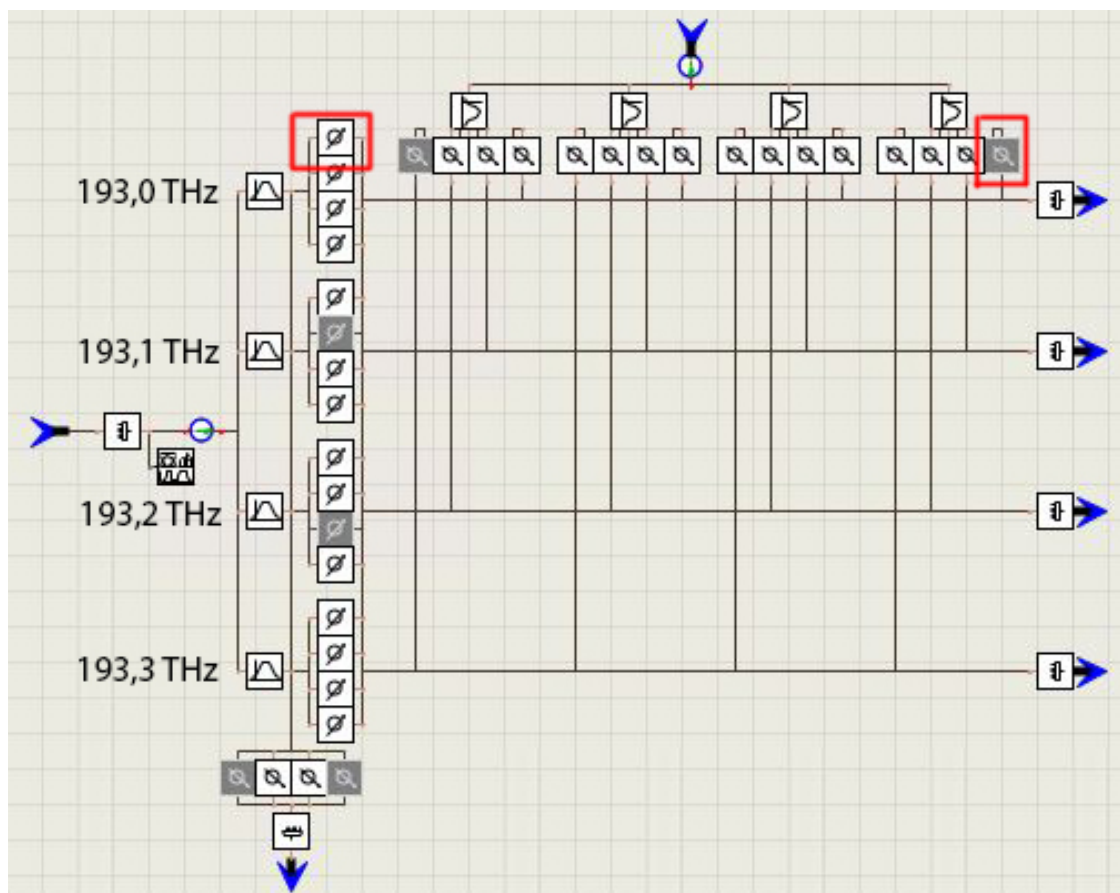
Města	Vzdálenost [km]	Útlum trasy [dB]
Brno - Praha	186	39,06
Brno - Ostrava	140	29,4
Brno - Vídeň	111	23,31

Tab. 2.1: Vzdálenosti mezi propojenými městy

2.3 Návrh sítě s ROADM

Pro demonstraci funkce modelu je vytvořena fiktivní síť mezi městy Praha, Brno, Ostrava a Vídeň. ROADM je umístěn v Brně. Do vstupu je připojen vlnovod z Prahy, na výstupy jsou připojeny města Ostrava a Vídeň. Trasy jsou zobrazeny na obrázku 2.18. Mimo to je připojen vstup a výstup pro místní provoz města Brna. Vzdálenosti mezi městy jsou vypočítány vzdušnou čarou. Jednotlivé vzdálenosti jsou k vidění v tabulce 2.1. K propojení je využit optický kabel firmy Solarix specifikace G.652.D. Parametry tohoto kabelu lze vidět v tabulce 2.2. Průměrný vložný útlum ROADM je 7 dB, tento útlum byl přidán na vstupní demultiplexor, aby ovlivňoval celý WDM signál, ještě před manipulací s ním.

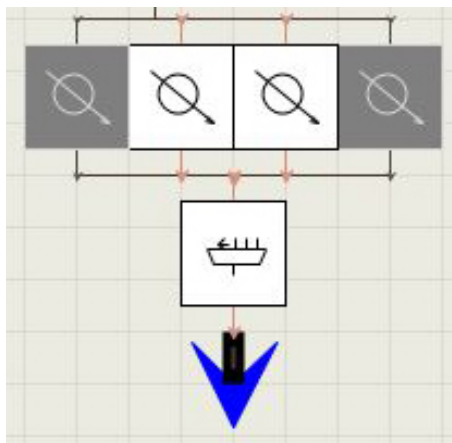
Návrh v programu VPIphotons umožňuje použití reálných optických komponent, jako jsou například optické kabely. Ukázka správného nastavení parametrů kabelu je na obrázku 2.20. Použité komponenty, např. zdroj WDM signálu, ROADM a analyzátoři v cílových městech, jsou uzavřeny pro větší přehled v tzv. galaxiích. Tyto galaxie jsou obrovským ulehčením v návrhu těchto sítí, jelikož místo celkového zapojení používáme pouze jednu komponentu s určitými vstupy a výstupy. Celá síť složená z těchto „galaxií“ je k vidění na obrázku 2.19.



Obr. 2.16: Návrh ROADM

2.3.1 Návrh použití 1 - obecný provoz

V tomto zapojení ROADM pracuje v nejobecnější rovině, bez zvláštního přepnutí velkého množství dat na jeden výstup. Z Prahy jsou data odeslána na všech čtyřech vlnových délkách. V Brně jsou zpracovány v ROADM modulu následujícím způsobem. Vlnové délky 193,0 THz a 193,3 THz jsou předem ze signálu odebrány a odkloněny do místního provozu pro město Brno. Z vlnové délky 193,1 THz je sestaven okruh mezi městy Praha - Ostrava, z vlnové délky 193,2 THz je sestaven okruh Praha - Vídeň. V místě přepínání do cílových měst máme již volné vlnové délky 193,0 THz a 193,3 THz, které byly odkloněny pro místní provoz v Brně. Vlnovou délku 193,0 THz využíváme pro data z místního provozu do města Ostrava, podobně vlnovou délku 193,3 THz využijeme pro spojení mezi místním provozem v Brně a městem Vídeň. Pro lepší představu vydělování vlnových délek je na obrázku 2.21 zobrazen vstupní signál ROADM. Na obrázku 2.22 lze vidět dvě vlnové délky pro místní provoz sítě v Brně. Na obrázcích 2.23 a 2.24 lze vidět sestavené okruhy pro města Ostrava a Vídeň, ve kterých již jsou namultiplexovány i signály z místního



Obr. 2.17: Detail výstupu pro místní síť

Výrobce	Solarix
Typ kabelu	zafukovací
Typ vlákna	9/125 μm
Plášť	HDPE
Výplň	gelová
Specifikace vlákna	G.652.D
Útlum při 1310 nm	0,35 dB/km
Útlum při 1550 nm	0,21 dB/km
Průměr kabelu	5,3 mm
Hmotnost kabelu	48 kg/km

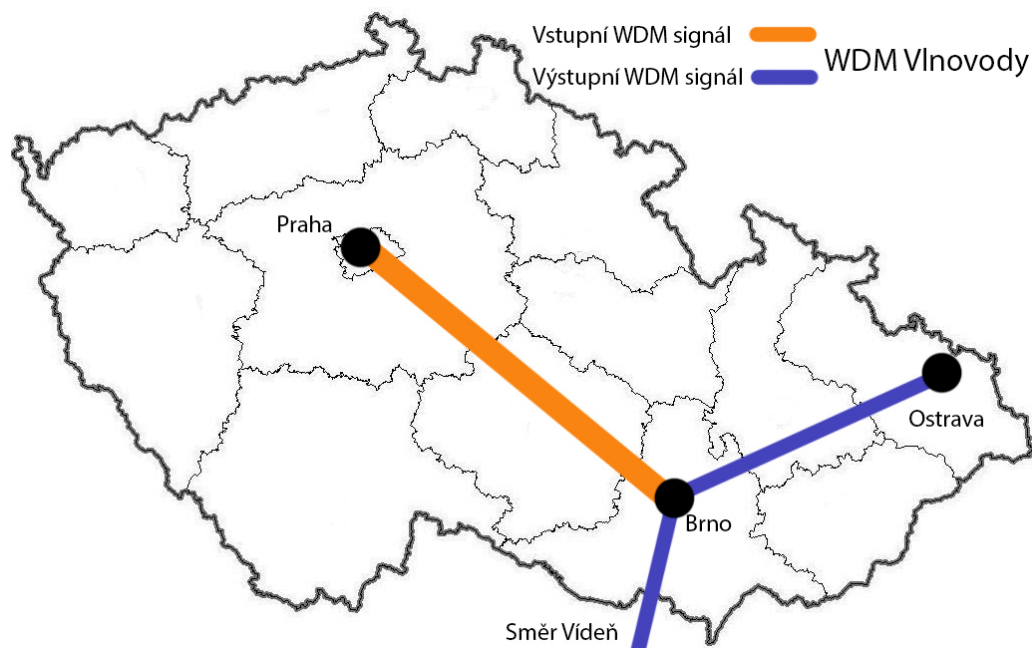
Tab. 2.2: Parametry optického kabelu firmy Solarix

provozu.

2.3.2 Návrh použití 2 - přepnutí nestandardního množství dat do směru Ostrava

V tomto příkladu lze vidět univerzálnost navrhnutého modelu. Jeho rekonfigurace k přepnutí do jiných směrů zabere zanedbatelnou časovou dobu. V praxi by toto přepnutí bylo zhotoveno softwarově automaticky, nebo manuálně, ale v obou případech přes konzoli, tedy bez potřeby bezprostředního zásahu do přístroje. Tím je zejména myšleno manuální přepojení kabelů.

Na vstup ROADM je přiveden stejný vstupní signál jako v prvním případě ze směru Praha, toto znázorňuje graf na obrázku 2.21. Přivedeny jsou tedy vlnové délky v rozmezí 193,0 THz až 193,3 THz s odstupem 100 MHz. Všechny tyto vlnové



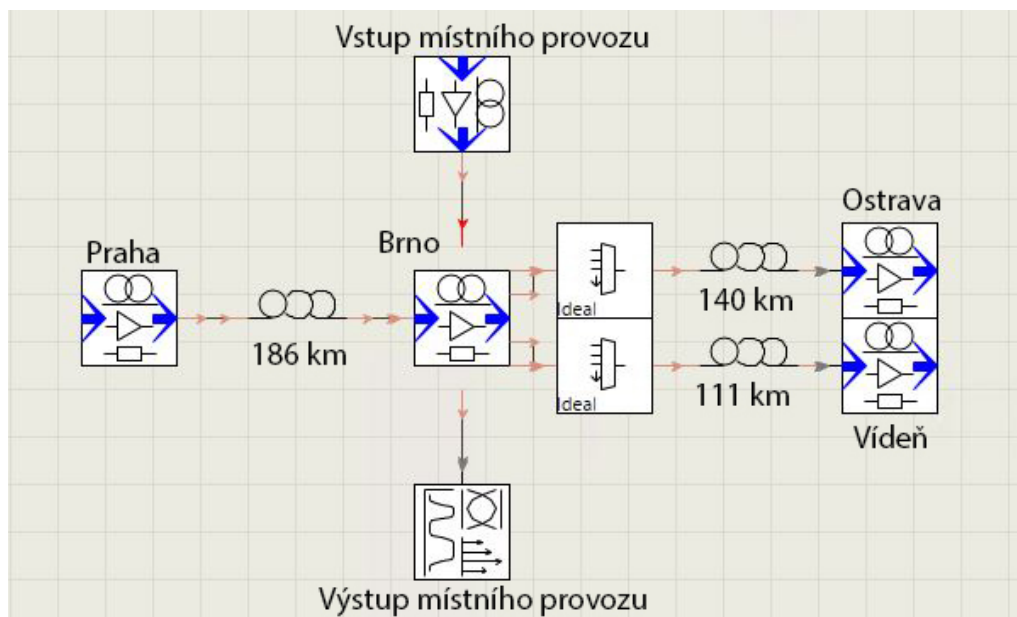
Obr. 2.18: Mapa ČR s navrhovanou sítí

délky jsou přepnuty do směru Ostrava. Tento postup je velice nestandardní, pokud by ROADM byl páteřním prvkem mezi zmíněnými městy, přerušil by jakoukoli komunikaci s městem Vídeň. Příklad je uveden pro demonstraci přepnutí vstupních vlnových délek pomocí správné konfigurace, kterou lze vidět na obrázku 2.25. Očekávaně tedy výstupní signál obsahuje všechny vlnové délky přivedené na vstup. To lze vidět na obrázku 2.26.

2.3.3 Návrh použití 3 - Přepnutí nestandardního množství dat do místní sítě

Tato konfigurace umožňuje přepnutí velkého objemu dat do místní sítě, v našem případě do města Brna. Ve výsledku vypadá výstup podobně jako v předešlé kapitole, ale postup přepnutí v ROADM je prováděn jiným způsobem. Signál není přiváděn k přepínání, ale je hned na vstupu odkloněn do místního provozu, jak lze vidět v konfiguraci na obrázku 2.27.

Dalších možných kombinací vstupů a výstupů je vysoké množství, pro ukázkou byly zpracovány tři možnosti, které jsou svou funkcí specifické. S pomocí tohoto modelu a simulačním programem VPIphotonics, lze navrhnout jakoukoli optickou síť, nastavit ji parametry a pomocí simulace zjistit, v kterých místech bude potřeba signál zesílit, či jinak upravit. Díky jednoduchosti modelu můžeme upravovat i vnitřní strukturu ROADM, přidat další vlnové cesty, či vlnové délky. Pokud má simulace proběhnout s použitím reálného přístroje, do modelu je kdekoli možné zasáhnout,

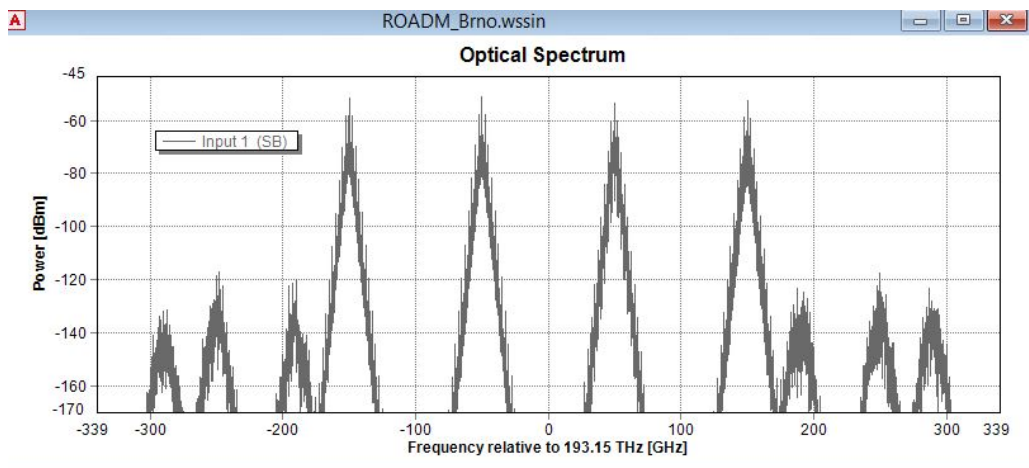


Obr. 2.19: Návrh sítě ve VPIphotonics

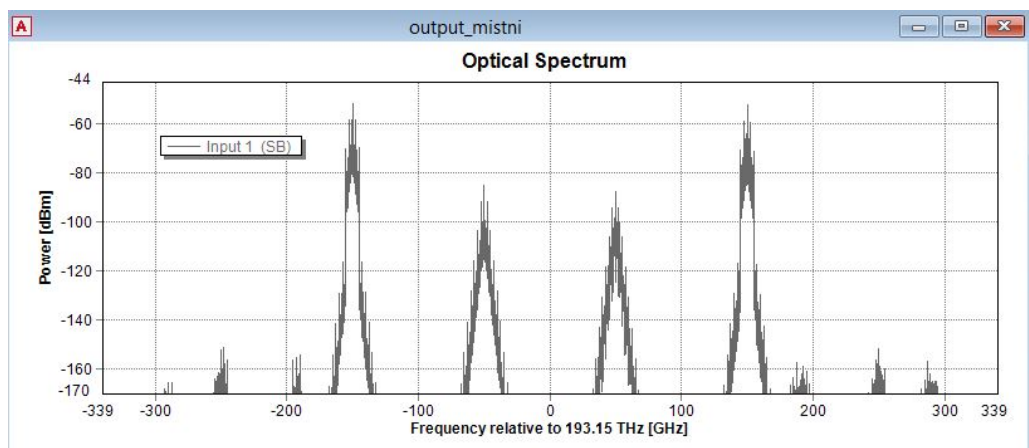
Physical			
f	ReferenceFrequency	193.1e12	Hz
f	Length	186e3	m
f	GroupRefractiveIndex	1.47	
f	Attenuation	0.21e-3	dB/m

Obr. 2.20: Nastavení parametrů optického vlákna

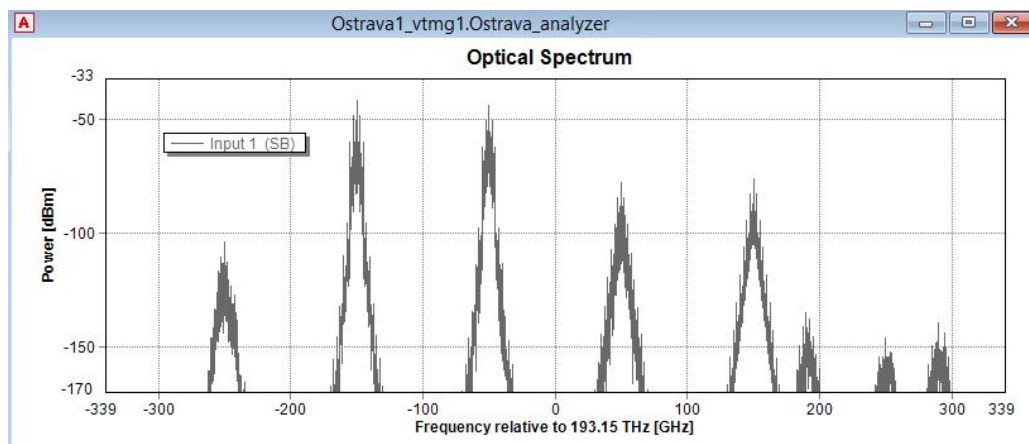
upravit vnitřní parametry, přidat vložný útlum a tím model co nejvíce přiblížit reálnému prvku. V dnešní době je použití simulací kritická záležitost, bez které se žádný návrh optické sítě neobejde.



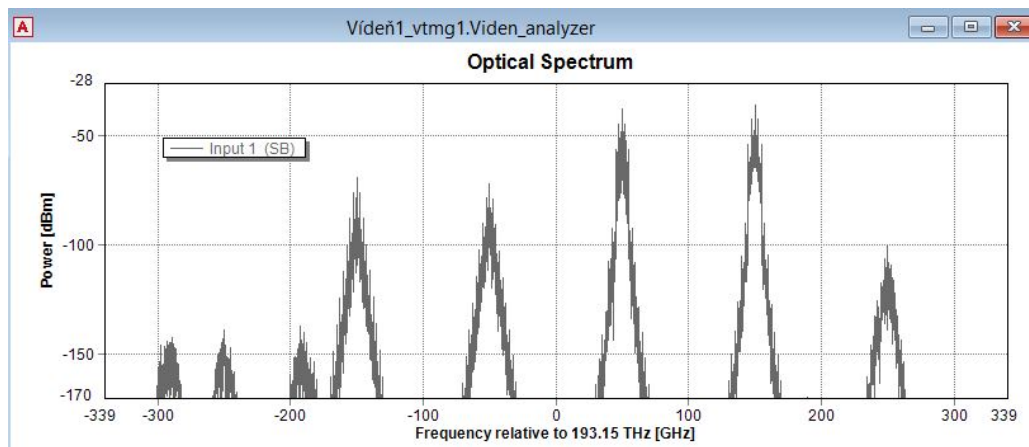
Obr. 2.21: Graf: Vstupní signál ROADM



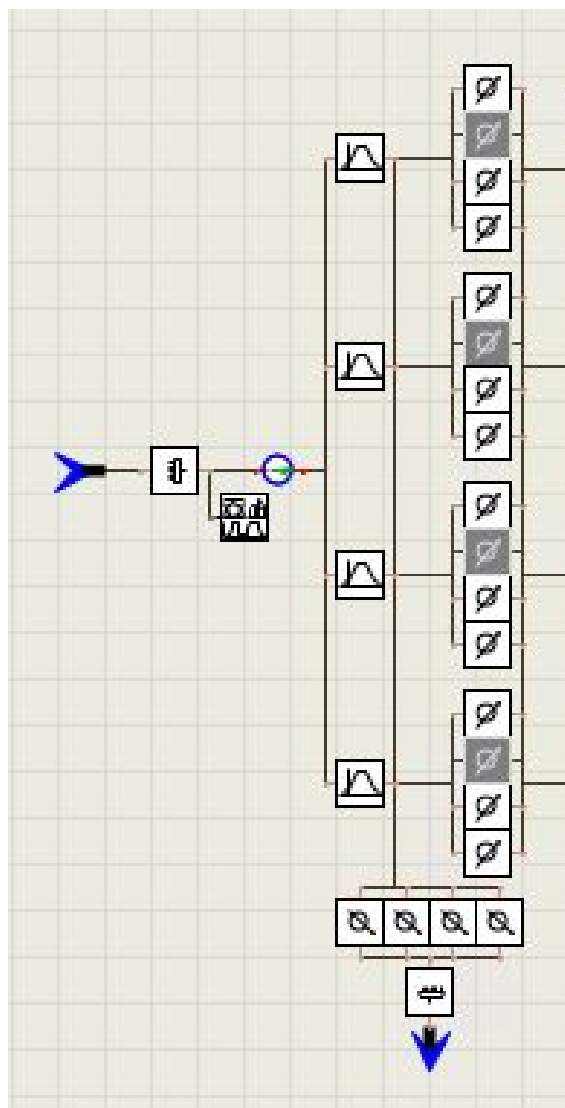
Obr. 2.22: Graf: Výstupní signál do místního provozu sítě města Brna



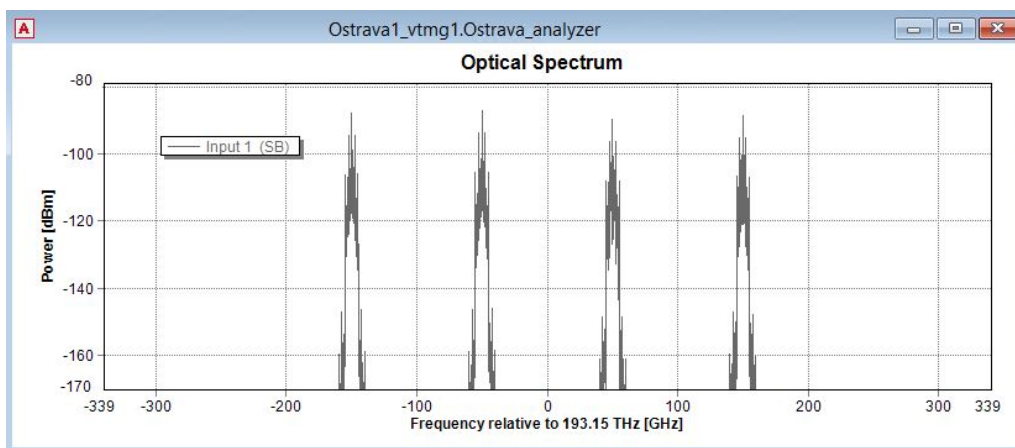
Obr. 2.23: Graf: Výstupní signál do města Ostrava



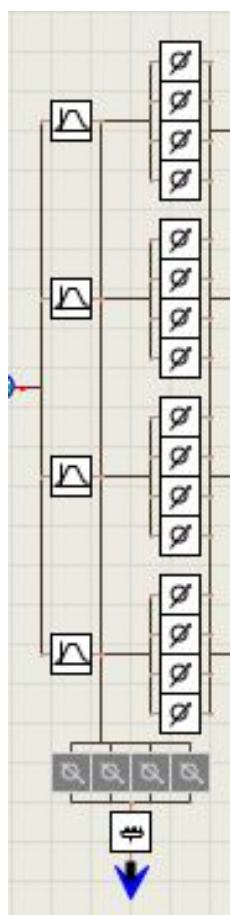
Obr. 2.24: Graf: Výstupní signál do města Vídeň



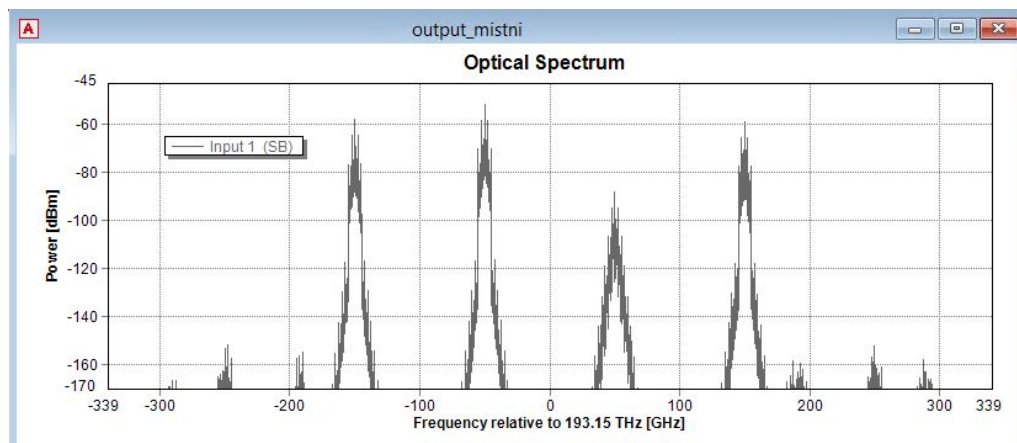
Obr. 2.25: Konfigurace ROADM pro přenos nestandardního množství dat ve směru Ostrava



Obr. 2.26: Výstup ve směru Ostrava s plným spektrem vlnových délek



Obr. 2.27: Konfigurace ROADN pro přenos nestandardního množství dat do místní sítě



Obr. 2.28: Výstup do místní sítě s plným spektrem vlnových délek

3 ZÁVĚR

Práce ve své teoretické části osvětluje čtenáři celkové základy optických přenosů společně s jejich přepínáním, základní poznatky vlnových multiplexů, technologie, která započala výzkum vlnově selektivních přepínačů a optických add drop multiplexorů. Po popisu těchto technologií přichází závěrem kapitola o softwarově definovaných sítích, které jako jediné v dnešní době dokáží svým potenciálem udržovat krok s exponenciálním nárůstem přenesených dat. Praktická část seznamuje se specializovaným programem VPIphotonics, ve kterém je vytvořen a detailně popsán jednoduchý model vlnově selektivního přepínače. Tento přepínač se dále stává jádrem optického add drop multiplexoru. Pomocí této komponenty je poté sestavena fiktivní síť mezi městy Praha, Brno, Ostrava a Vídeň. S pomocí simulací v programu VPIphotonics jsou nastaveny parametry sítě jako je vzdálenost mezi městy, propojení pomocí reálných optických vláken, vložný útlum multiplexoru a další.

Do budoucna je výzkum vlnově selektivních přepínačů kritickou záležitostí. Se vzrůstajícím přenosem dat je velmi neekonomické optické signály v přepínačích měnit na elektrické a opět odesílat v optické podobě, navíc se mohou při vyšších zátěžích vytvářet z těchto míst úzká hrdla zvyšující zpoždění celé sítě. V dnešní době jsme schopni velmi efektivně přepínat optické okruhy a měnit vlnovou délku signálu, aby v síti nedocházelo ke kolizím. Dalším krokem v tomto výzkumu je vytvoření použitelné optické RAM paměti. Do této doby nejsme schopni s výhodou odesílat optické pakety. Poučíme-li se totiž z výzkumu metalických přenosů, víme s jistotou, že odesílání paketů je nejflexibilnější a nejstabilnější alternativa v přenosech. Hardware s těmito možnostmi, nad kterým je postavena softwarově definovaná síť je do budoucna nejreálnější aplikací, která dokáže držet krok s obrovským nárůstem dat, který je zejména v poslední době způsoben rozmachem cloudových úložišť a využíváním mobilního připojení k internetu.

Pokud si všechny tyto poznatky shrneme, s jistotou můžeme prohlásit, že implementace těchto zařízení je velkým krokem vpřed v oblasti jak rychlostní, tak ekonomické. S pomocí simulačních modelů se zjednoduší jakýkoli návrh optické sítě, dokážeme dopředu odhadnout, kde na trase může nastat problém a tím snížit ekonomické dopady budoucího odstranění těchto nedostatků. Cena a rychlost totiž vždy byly, jsou a budou hlavními dvěma parametry ve výstavbě jakékoli nové sítě.

LITERATURA

- [1] BORDONALLI, A. *Experimental-based Subsystem Models for Simulation of Heterogeneous Optical Networks* [online]. 2014,[cit. 25. 10. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.scielo.br/pdf/jmoea/v13n2/v13n2a08.pdf>>.
- [2] FILKA, M. *Přenosová média* 2012,[cit. 15. 10. 2015].
- [3] HALUZA, M. *Software defined network* [online]. 2013,[cit. 18. 11. 2015]. Dostupné z URL: <<http://wh.cs.vsb.cz/sps/images/3/37/Sdnref.pdf>>.
- [4] KUCHAR, A. *Přepínání a směrování optických signálů* [online]. 2013,[cit. 22. 11. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.action-m.com/ok2012/files/prednasky/kuchar-clanek.pdf>>.
- [5] MEENA, D. *A geometrical model for arrayed waveguide grating based optical multiplexer/demultiplexer* [online]. 2014,[cit. 10. 11. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.jpier.org/PIERM/pierm35/10.14011906.pdf>>.
- [6] NAGY, M. *Wavelength selective switches for fiber optic telecommunications* [online]. 2015,[cit. 15. 10. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=27188>>.
- [7] NĚMEČEK, I. *Architektury a technologie v moderních optických DWDM sítích* [online]. 2010,[cit. 10. 11. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.netguru.cz/odborne-clanky/architektury-a-technologie-v-modernich-optickych-dwdm-sitich-12.html>>.
- [8] PASCHOTA, R. *Photonic integrated circuits* [online]. 2008,[cit. 20. 10. 2015]. Dostupné z URL: <https://www.rp-photonics.com/photonic_integrated_circuits.html>.
- [9] PUŽMANOVÁ, R. *Věčné téma: přepojování okruhů či paketů?* [online]. 2006,[cit. 15. 11. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.svetsiti.cz/clanek.asp?cid=Vecne-tema-prepojovani-okruhu-ci-paketu-1-1842006>>.
- [10] SAYEED, C. *Characterization and Experimental Validation of Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers for Next Generation Network* [online]. 2006,[cit. 16. 10. 2015]. Dostupné z URL: <<https://www.ruor.uottawa.ca/bitstream/10393/27218/1/MR18391.PDF>>.

- [11] SCHIANO, M. *Next generation Optical networks for Broadband European Leadership* [online]. 2006, [cit. 21. 10. 2015]. Dostupné z URL: <<http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/115240721EN6.pdf>>.
- [12] ŠIFTA, R. *DWDM v přístupových sítích* [online]. 2011, poslední aktualizace 26. 5. 2011 [cit. 10. 11. 2015]. Dostupné z URL: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=37801>.
- [13] VESELÝ, M. *Virtualizace sítí - softwarově definované sítě* [online]. 2013, poslední aktualizace 5. 6. 2013 [cit. 17. 11. 2015]. Dostupné z URL: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68988>.
- [14] *CWDM cost efficient transport in optical networks* [online]. 2015 [cit. 16. 11. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.transmode.com/en/technologies/wdm/cwmdm>>.
- [15] *DWDM efficient transport in long-haul optical networks* [online]. 2015 [cit. 10. 11. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.transmode.com/en/technologies/wdm/dwdm>>.
- [16] *ROADM* [online]. 2015 [cit. 20. 11. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.transmode.com/en/technologies/flexible-optical-networks/roadm>>.
- [17] *WDM - Wavelength Division Multiplexing* [online]. 2015 [cit. 15. 11. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.transmode.com/en/technologies/wdm>>.
- [18] RP Photonics *Arrayed waveguide grating* [online]. 2001, poslední aktualizace 7. 6. 2015 [cit. 10. 11. 2015]. Dostupné z URL: <https://www.rp-photonics.com/arrayed_waveguide_gratings.html>.
- [19] Compound Photonics *Liquid crystal on silicon* [online]. 2001, poslední aktualizace 13. 10. 2014 [cit. 30. 10. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.compoundphotonics.com/products/light-engines>>.
- [20] Optical Network *Optical add-drop multiplexer* [online]. 2001, poslední aktualizace 8. 7. 2006 [cit. 20. 10. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.optical-network.com/terminology.php?letter=all&id=8>>.
- [21] Heavy Reading *ROADMs and the Future of Metro Optical Networks* [online]. 2001, poslední aktualizace 8. 5. 2005 [cit. 25. 10. 2015]. Dostupné z URL: <http://img.lightreading.com/heavyreading/pdf/hr20050517_esum.pdf>.

- [22] International Telecommunication Union *G.694.2 : Spectral grids for WDM applications* [online]. 2001, poslední aktualizace 15. 5. 2014 [cit. 18. 10. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2/en>>.
- [23] INTECH *Optical MEMS for Telecommunications* [online]. 2001, poslední aktualizace 29. 5. 2013 [cit. 30. 10. 2015]. Dostupné z URL: <<http://www.intechopen.com/books/advances-in-micro-nano-electromechanical-systems-and-fabrication-technologies/optical-mems-for-telecommunications-some-reliability-issues>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

API	Application programming interface
AWG	Arrayed waveguide grating – Fázovaná řada planárních optických vlnovodů
CWDM	Coarse wavelength division multiplexing – „Hrubý“ vlnový multiplex
DFB laser	Distributed feedback laser
DSM	Demultiplexer - switch - multiplexer
DWDM	Dense wavelength division multiplexing – „Hustý“ vlnový multiplex
FPR	Free propagation region
He	Hélium
IP	Internet protocol
ISDN	Integrated services digital network
ISO/OSI	International standards organization / Open system interconnection
JVM	Java Virtual Machine
LAN	Local area network – Lokální síť
LC	Liquid crystal – Tekutý krystal
LCoS	Liquid crystal on silicon
LiNbO ₃	Niobičnan Lithný
MEMS	Microelectromechanical mirrors – Mikroelektromechanická zrcadla
Multi-tenancy	Více nájmu
Ne	Neon
OADM	Optical add-drop multiplexer
OEO	Optical - electrical - optical
OSGi	Open services gateway
OXC	Optical cross connects

PHASAR	Phased array grating
PLC	Planar lightwave circuit
QoS	Quality of service
REST	Representational state transfer
ROADM	Reconfigurable optical add-drop multiplexer
SDN	Software defined network – Softwarově definované síť
STP	Spanning tree protocol
WAN	Wide area network – Rozsáhlá síť
WB	Wavelength blocker
WDM	Wavelength division multiplexing – Vlnový multiplex
WSS	Wavelength selective switch – Vlnově selektivní přepínač