



Zadání bakalářské práce

Název:	Studie problémů elastických optických sítí
Student:	David Zeman
Vedoucí:	Ing. Michal Štepanovský, Ph.D.
Studijní program:	Informatika
Obor / specializace:	Bezpečnost a informační technologie
Katedra:	Katedra počítačových systémů
Platnost zadání:	do konce letního semestru 2022/2023

Pokyny pro vypracování

Elastická optická síť (EON) je síťová technologie zajišťující přenos dat s přidělováním spektra v závislosti na provozních požadavcích. Směrování a přidělování spektra (RSA) je jedním z nejdůležitějších určujících faktorů návrhu, výkonu a provozu EON. S tím jsou spojené i mnohé problémy, které je nutné řešit, zejména problém fragmentace spektra, modulace signálu, seskupování provozu, odolnosti vůči chybám, kvality služeb (QoS), férovosti mezi propojeními se stejnou prioritou a další.

Cílem BP je sepsat studii na úrovni stavu současného poznání (tzv. state-of-the-art), která seznámí čtenáře s touto problematikou na teoretické úrovni. V rámci BP se nepředpokládá praktická část.

1. Porovnejte EON s technologií DWDM.
2. Vypracujte rešerši pojednávající o problémech, které se v EON vyskytují (viz výše uváděný výčet problémů).
3. Po konzultaci s vedoucím práce vyberte konkrétní problémy a detailně popište jejich možná řešení.

Jednotlivé body a obsah BP konzultujte s vedoucím práce.

Bakalářská práce

STUDIE PROBLÉMŮ ELASTICKÝCH OPTICKÝCH SÍTÍ

David Zeman

Fakulta informačních technologií
Katedra informační bezpečnosti
Vedoucí: Ing. Michal Štěpanovský, Ph.D.
12. května 2022

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta informačních technologií

© 2022 David Zeman. Všechna práva vyhrazena..

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci: Zeman David. *Studie problémů elastických optických sítí*. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2022.

Obsah

Poděkování	vi
Prohlášení	vii
Abstrakt	viii
Seznam zkratek	ix
Úvod	1
1 EON, DWDM	3
1.1 WDM	3
1.1.1 C-WDM (Coarse WDM)	4
1.1.2 D-WDM (Dense WDM)	4
1.2 OFDM	5
1.3 EON	6
1.4 Vlastnosti EON	7
1.4.1 Podpora vysokých bitových rychlostí	7
1.4.2 Užší vzdálenost mezi kanály	7
1.4.3 Rozdílná šířka pásma	7
1.4.4 Efektivita dosahu a spektrální účinnosti	7
1.4.5 Dynamika a adaptace	8
1.5 Číselné porovnání	9
2 Problémy EON	11
2.1 Problém fragmentace spektra	11
2.1.1 Férovost	12
2.1.2 Číselné porovnání	12
2.2 Problém modulace signálu	13
2.2.1 Intermodulace	13
2.2.2 Modulační formáty	14
2.2.3 QPSK	14
2.2.4 QAM	14
2.2.5 Číselné porovnání	14
2.3 Problém odolnosti vůči chybám	15
2.3.1 Obnovení	15
2.3.2 Protekce	15
2.4 QoS	15
2.4.1 Důležité parametry QoS	16
2.4.2 Řídící rovina	16
2.5 Přeslech	17

3	RSA	19
3.1	Frekvenční sloty	19
3.2	Omezení spojitosti a souvislosti	19
3.3	Off-line RSA	20
3.3.1	Definice Off-line RSA	20
3.4	On-line RSA	20
3.4.1	Algoritmy dynamického provozu	20
3.5	Směrování	21
3.5.1	Jednocestné směrování	21
3.5.2	Elastické směrování	22
3.6	Alokace spektra	22
3.6.1	FSA (Fixed Spectrum Allocation)	23
3.6.2	SESA (Semi-elastic Spectrum Allocation)	23
3.6.3	ESA (Elastic Spectrum Allocation)	24
3.7	SETA-RSA	25
3.7.1	Ukázka algoritmu	25
4	Problém odolnosti vůči chybám	27
4.1	Protektce	27
4.1.1	Protekční schéma	27
4.1.2	DPP	27
4.1.3	DPP 1+1	28
4.1.4	DPP 1:1	28
4.1.5	DPP 1:N	29
4.2	SBPP	29
4.3	Porovnání DPP a SBPP	30
4.4	Obnovení	31
4.4.1	BSR	31
4.4.2	PL-LR	31
4.5	Quazi Path Restoration	32
4.5.1	Ukázka algoritmu	33
	Závěr	35

Seznam obrázků

1.1	Fixní mřížka, vzdálenost uzlů od sebe bude nastavena na 50 GHz pro libovolné přenosové rychlosti. I tam, kde by nemuselo zůstat tolik frekvence nevyužito [1]	3
1.2	Struktura WDM, demultiplexování [3]	4
1.3	[4]	5
1.4	Technologie OFDM [1]	6
1.5	Ukázka nevyužití spektra celého slotu při nízkorychlostním požadavku v technologii DWDM [1]	6
1.6	Struktura EON a její adaptace [1]	7
1.7	Hlavní rozdíl mezi flexibilní a fixní spektrální mřížkou je v množství ušetření spektra, díky možnosti ho alokovat daleko flexibilněji. [4]	8
2.1	Grafické znázornění horizontální a vertikální fragmentace [9]	12
2.2	Přeslech [23]	17
3.1	Vícecestné směrování [1]	22
3.2	Fixní alokace spektra [1]	23
3.3	SESA alokace spektra [1]	23
3.4	ESA alokace spektra [1]	24
4.1	Proteční přístup záložní trasy [30]	28
4.2	a)1:1 DPP; b)1:3 SBPP [32]	29
4.3	Porovnání DPP a SBPP s nárůstem požadavků [33]	30
4.4	Porovnání s využitím regenerátorů [33]	30
4.5	Zmáčknutí pásma v BSR, částečné zotavení [30]	31

Seznam tabulek

1.1	Technologie DWDM	9
1.2	Technologie EON	9
1.3	Ušetřené spektrum v EON	9
2.1	Spotřeba energie[10]	12
2.2	Jednoduchý kanál	13
2.3	Superkanál	13

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Michalovi Štepanovskému, Ph.D. za velkou míru trpělivosti, ochotné a odborné vedení bakalářské práce, důležité rady a rychlost jednání. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za mentální podporu při vytváření práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů, zejména skutečnost, že České vysoké učení technické v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 citovaného zákona.

V Praze dne 12. května 2022

.....

Abstrakt

Hlavním obsahem této bakalářské práce je studie problémů elastických optických sítí a jejich teoretická řešení. Jsou zde představena optická vlákna jako celek, jejich rozdělení a jejich vlastnosti. V práci se zaměřuji i na porovnání elastických optických sítí s technologií hustého vlnového multiplexu „DWDM“. Výsledkem porovnávací části je zjištění, jakého objemu spektra a za jakých podmínek dokáže novější technologie ušetřit. Přínosem práce je také detailní představení RSA problému, v němž se probírá hlavní funkce optických vláken, a to sice směrování a alokace spektra. S tím jsou však spojené mnohé problémy, jako například fragmentace spektra, modulace signálu a další, které jsou v práci taktéž představeny. Na závěr práce se detailněji zabývám problémem odolnosti vůči chybám, který jsem rozebral do detailu.

Klíčová slova optické sítě, elastická vlákna, vlnový multiplex, elektromagnetické spektrum, problém RSA, elektromagnetický signál, přeslech, modulace signálu

Abstract

The main content of this bachelor thesis is the study of problems of elastic optical networks and their theoretical solutions. The optical fibers as a whole, their distribution and their properties are presented here. In my work I also focus on the comparison of elastic optical networks with dense wave multiplexing “DWDM”. This comparison part is to find out what volume of spectrum and under what conditions newer technology can save. The contribution of the work is also a detailed presentation of the RSA problem, which discusses the main functions of optical fibers, namely routing and spectrum allocation. However, there are many problems associated with this, such as spectrum fragmentation, signal modulation and others, which are also presented in this work. At the end of the work I deal in more detail with the problem of error resistance, which I analyzed in detail.

Keywords optical networks, elastic fibers, wave multiplexing, electromagnetic spectrum, crosstalk, signal modulation RSA problem, electromagnetic signal

Seznam zkratek

CWDM	Hrubý vlnový multiplex
DWDM	Hustý vlnový multiplex
EON	Elastické optické sítě
FS	Frekvenční sloty
OFDM	Ortogonální multiplexování s frekvenčním dělením
QAM	Kvadrurní amplitudová modulace
QoS	Kvalita služeb
QPSK	Kvadrurní klíčování fázovým posuvem
RSA	Směrování a alokace spektra
WDM	Vlnový multiplex

Úvod

Dnešní objem přenosu dat po komunikačních sítích roste závratnou rychlostí a exponenciálním tempem. V poslední době se internet zodpovídá za rychlé a neporušené zprostředkování zážitku uživatelům s pomocí různých moderních aplikací, jako jsou videa s vysokým rozlišením (Netflix, Prime, YouTube), nástroje pro sdílení souborů (Google Drive, Dropbox) nebo například plně pohlcující video technologie, jako je rychle se vyvíjející virtuální realita. Optické sítě jsou dnešním jádrem internetové komunikační technologie kvůli jejich přirozené povaze poskytování nízké chybovosti a hlavně rychlosti. Pro splnění obrovských klientských požadavků musí být optické přenosové systémy škálovatelnější, spolehlivější a efektivnější. Je potřeba efektivní a flexibilní optické přenosové sítě, mající schopnost adaptace na stále narůstající objem přenosu dat.

V současné době byla technologie EON považována za jednoho z příznivých kandidátů na uspokojení těchto požadavků. EON mají schopnost flexibilně přiřazovat světelné cesty a šířku pásma podle obdržených požadavků klienta. V důsledku toho je efektivita a účinnost spektra v EON ve srovnání s technologií vlnového multiplexu znatelně vylepšena. V EON jsou systémové parametry jako technika modulace signálu, kanálové rozestupy a bitová rychlost nastavitelné, oproti předchozímu standardu, kde jsou parametry určené napevno. EON jsou tak považovány za možné řešení k vyřešení nedostatků konvenčních optických sítí.

Cílem této práce je studie problému EON na teoretické úrovni, která se konkrétně skládá z porovnání technologie EON s předchozí technologií využívající fixní mřížky a vlnového multiplexu, dále rozebrání a popsání problémů, s kterými se technologie EON potýká. Nakonec se očekává detailní studie a příklady řešení vybraných problémů.

První kapitola je porovnávací část práce, porovnání je provedeno na teoretické úrovni i v císelných tabulkách s využitím dat jiných odborných prací. V dalších kapitolách jsou popsány a rozebrány problémy EON, nejprve obecné rozdělení a základní popsání nejčastějších problémů, následuje detailní rozbor problému směřování a alokace spektra a problému odolnosti proti chybám.

Kapitola 1

EON, DWDM

Tato kapitola obsahuje porovnání dvou hlavních technologií optických sítí. Na úvod kapitoly jsou popsány obě technologie, jejich funkčnost, výhody i nevýhody. Jsou zde představeny i podkategorie těchto technologií, avšak hlavním obsahem kapitoly je porovnání, které je znázorněno graficky na příkladných obrázcích a i konkrétně číselně v tabulkách za různých podmínek použití.

Konvenční optické sítě rozdělují spektrum mezi vlnové kanály. Vzdálenost kanálů mezi dvěma sousedními vlnovými délkami je tradičně buď 50 GHz nebo 100 GHz, definovaná mezinárodní telekomunikační unií ITU-T, kterou technologie DWDM využívá. Pokud je šířka pásma malá, velká část zůstává nevyužita, což snižuje spektrální efektivitu a účinnost.



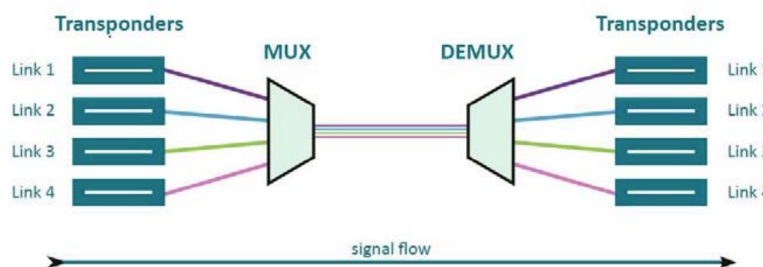
■ **Obrázek 1.1** Fixní mřížka, vzdálenost uzlů od sebe bude nastavena na 50 GHz pro libovolné přenosové rychlosti. I tam, kde by nemuselo zůstat tolik frekvence nevyužito [1]

1.1 WDM

Technologie založena na vysílání více optických signálů po jednom optickém vlákne na několika různých vlnových délkách. Pojem vlnový se používá nejčastěji právě při přenosu komunikace optickým způsobem, na rozdíl od frekvenčního multiplexu, který se uplatňuje například v rádiovém vysílání.

Systém WDM používá multiplexor ve vysílači ke spojení několika signálů a demultiplexer v přijímači k jejich rozdělení. Viz obrázek 1.2. Se správným typem vlákna je možné mít zařízení, které dělá obojí současně a může fungovat jako optický add-drop multiplexer.

WDM sítě jsou založeny na mřížce doporučených vlnových délek ITU-T G.694.1, která rozděluje užitečné spektrum ve vláknu do slotů s pevným spektrem. Dokonce i sítě, které používají plně flexibilní ROADM, nemají řídicí rovinu, která rozumí dostupnosti zdrojů v síti a jejím omezením, což vyžaduje off-line plánovací nástroje k určení, která připojení lze nastavit. Tyto nástroje však zakládají svá rozhodnutí na informacích o síti, které jsou často nepřesné. To znamená, že síť nebude mít flexibilitu přizpůsobit se případným změnám provozu. Klíčový problém, který je vlastní síti 50 GHz, spočívá v tom, že v mnoha případech nebude podporovat přenosové rychlosti nad 100–200 Gb/s. V technologiích WDM existuje obvykle pouze 1 způsob, jak vyřešit danou poptávku. Parametry jako vlnová délka, dosah nebo přidělené spektrum jsou fixní a nemění se za provozu technologie. [2, 3] Takže požadavek může vyžadovat méně vlnové délky nebo i více vlnové délky než je fixně nastavená mřížka a dochází k plýtvání jako na obrázku 1.3. Na a) je zobrazena fixní technologie, pro požadavek 300 Gb/s lze vidět striktní dodržení ochranných pásem a rozdělení požadavku. Dochází k plýtvání zdroji oproti přístupu v b), který využije superkanál bez ochranných pásem a odešle požadavek najednou v jednom pásmu. V c) a d) vidíme stejné požadavky, rozdíl je, že v d) je použita adaptivní modulace optimalizovaná pro požadovaný dosah a přenosovou rychlost. Dochází tím k úspoře spektra. V e) Je navíc oproti d) použita flexibilní spektrální mřížka (EON) a tím dochází k značnému ušetření množství spektra.



■ **Obrázek 1.2** Struktura WDM, demultiplexování [3]

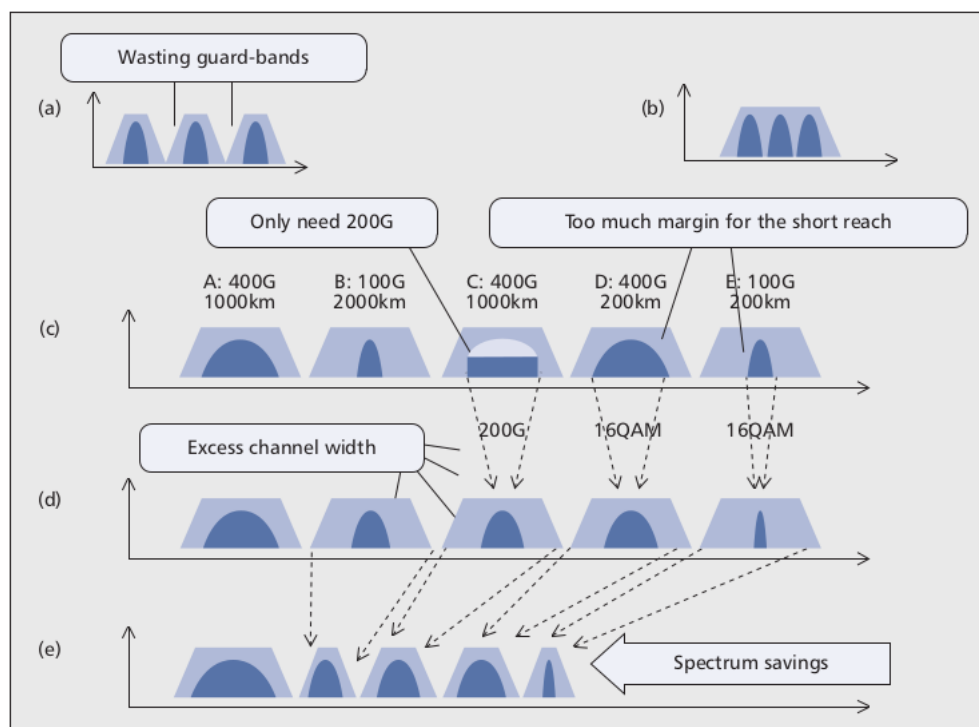
1.1.1 C-WDM (Coarse WDM)

C-WDM technika se používá především na přenos dat na menší vzdálenosti. Plně podporuje nejvýše 18 vlnových kanálů přenášených jedním vláknem současně. Aby se dosáhlo tohoto cíle, jsou různé vlnové délky každého kanálu od sebe vzdáleny 20nm. Technologie CWDM nabízí pohodlnější a cenově výhodnější řešení pro kratší vzdálenosti přenosu zhruba do 70 kilometrů. Pro vzdálenosti mezi 40 a 70 kilometry se podpora CWDM omezuje na podporu pouze osmi kanálů, jelikož se přenos pro CWDM stává komplikovanějším a signál může vlivem rušení slábnout. C-WDM přenos nemůže být zesílen a 70 km je maximální dosah přenosu. [3, 5]

1.1.2 D-WDM (Dense WDM)

DWDM podporuje až 80 simultánních kanálů vlnových délek, přičemž každý z kanálů je od sebe vzdálen pouze 0,8 nm. DWDM využívá zesilovače, které slouží pro podporu a zesílení signálu, kvůli jeho postupnému slábnutí. Rozlišujeme základní 3 typy zesilovačů. [3, 5]

- 1R - Signál je pouze zesílen, žádné další úpravy se neprovádějí
- 2R - Převod na elektrické napětí, dále proběhne zesílení signálu a pomocí tvarovacího obvodu úprava tvaru signálu



■ Obrázek 1.3 [4]

- 3R - Převod na elektrické napětí, zesílení signálu, úprava tvaru signálu pomocí tvarovacího obvodu a také korekce časových poloh za účelem vyhlazení proměnného zpoždění signálu

Obě technologie D-WDM a C-WDM jsou velmi příbuzné a využívají WDM, laserové paprsky pak přenášejí informace přes kabely optických vláken. CWDM používá méně propracovanou elektroniku a fotoniku, díky čemu jsou kanály CWDM mnohem širší než kanály DWDM.

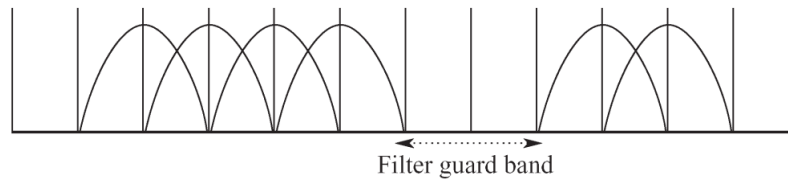
V CWDM je rozstup kanálů až stokrát širší, a tak pojme maximálně 18 simultánních kanálů vlnových délek. Komponenty využívající CWDM nemusí být tak přesné jako komponenty DWDM, ale jsou obvykle mnohem levnější. [5]

1.2 OFDM

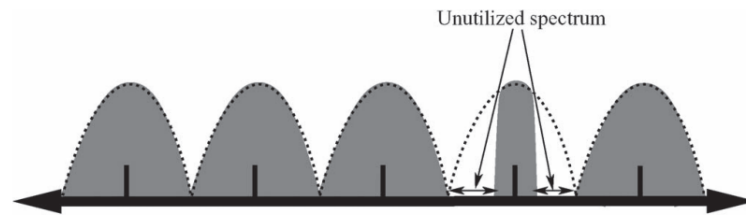
Ortogonalní multiplexování s frekvenčním dělením (OFDM) je typem digitálního přenosu a metodou kódování digitálních dat na více nosných frekvencích. OFDM se vyvinul do populárního schématu pro širokopásmovou digitální komunikaci. Ve srovnání se systémy WDM, kde je obvykle potřeba definovat pevný rozstup kanálů mezi vlnovými délkami kvůli eliminaci přeslechu, OFDM umožňuje díky své ortogonalitě překrývat spektrum jednotlivých sub-nosných, jak je znázorněno na obrázku 1.4. V důsledku toho zvyšuje OFDM přenosovou spektrální účinnost.

Hlavní výhodou OFDM proti přístupu s jednou nosnou, je jeho schopnost vyrovnat se s náročnými podmínkami kanálu bez nutnosti složitějšího vyrovnávání. Vyrovnání kanálů je zjednodušeno, protože OFDM lze považovat za použití mnoha pomalu modulovaných úzkopásmových signálů spíše než jednoho rychle modulovaného širokopásmového signálu. Transpondéry¹ OFDM s proměnnou šířkou pásma vytváří optický signál s využitím právě dostatečného množství zdrojů spektra k uspokojení požadavků klienta. [6]

¹Transpondér je prvek, který vysílá a přijímá optický signál z vlákna



■ **Obrázek 1.4** Technologie OFDM [1]



■ **Obrázek 1.5** Ukázka nevyužití spektra celého slotu při nízkorychlostním požadavku v technologii DWDM [1]

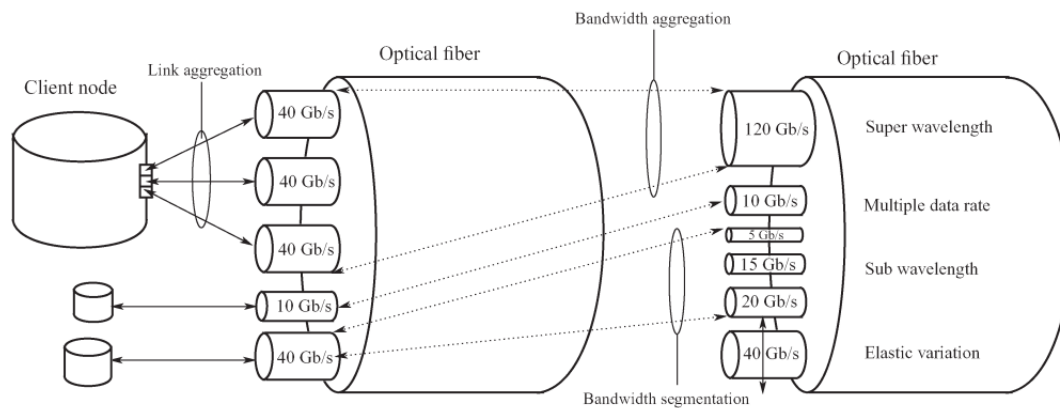
1.3 EON

Technologie EON má vlastnost flexibilně přiřazovat světelné cesty podle daných požadavků klienta. Zdroje spektra jsou poté rozděleny do tenkých spektrálních slotů, a v důsledku toho je pak účinnost spektra v EON daleko vyšší než v technologii DWDM. Mezi hlavní vlastnosti EON patří agregace a segmentace šířky pásma, efektivní přizpůsobení k různým přenosovým rychlostem a flexibilní variace přidělených zdrojů. Tak jako EON podporuje flexibilní přidělování spektra, má i schopnost poskytovat spektrálně efektivní přizpůsobení na různorodé požadavky datových rychlostí a poskytuje optimální rychlost přizpůsobenou vzdálenosti linky, stejně jako dynamické zmenšení a zvětšení šířky pásma.

I když je na kanál k dispozici dostatečně široké spektrum, je stále obtížnější přenášet signály vysokou přenosovou rychlostí na dlouhé vzdálenosti se zachováním vysoké spektrální účinnosti. Navíc pokud jsou zdroje omezené, nemusí mít smysl omezovat síť na přenos pevných množství šířky pásma. Přenos 100 Gb/s pro požadavky, který vyžaduje pouze 60 Gb/s, se jeví jako příliš drahý, obzvláště pokud přenos 100 Gb/s vyžaduje regeneraci, zatímco 60 Gb/s by se bez regenerace obešel. Proto je důležité přizpůsobit přenosovou rychlost dat požadavkům klientské vrstvy.

Ke správnému řešení této výzvy potřebujeme flexibilní a adaptivní síť vybavené vysílači a síťovými prvky, které se mohou přizpůsobit skutečným potřebám provozu. Naštěstí stejné technologie, které jsou zaváděny pro dosažení velmi vysokých přenosových rychlostí, mohou také poskytnout tuto přidanou flexibilitu. Kombinace adaptivních vysílačů, flexibilní sítě a inteligentních klientských uzlů zavádí nové „elastické“ síťové paradigma, které poskytovatelům služeb umožňuje kvalitně řešit rostoucí potřeby sítě.

V minulých dvou letech byly nasazovány přenosové systémy založené na 100 Gb/s. Vzhledem k tomu, že jsou kompatibilní s již nasazenou sítí ITU 50 GHz, nevznikla potřeba síť vyměnit. Při pokroku telekomunikačního i datového průmyslu pro rychlost přenosu dat nad 100 Gb/s a 400 Gb/s, byla bohužel spektrální šířka obsazena v 400 Gb/s příliš široká na to, aby se vešla do 50 GHz ITU mřížky. Vynutit si ji přijetím modulačního formátu s vyšší spektrální účinností by umožnilo pouze krátké přenosové vzdálenosti. Fixní mřížka v DWDM nevyužívá celou šířku kanálů, a tak i když přenáší pouze 10 Gb/s, musí tato rychlost okupovat celý kanál. Flexibilní mřížka u EON zabráňuje plýtvání šířkou optického kanálu a velikost mřížky upravuje tak, jak každý spoj potřebuje. [7, 6]



■ **Obrázek 1.6** Struktura EON a její adaptace [1]

1.4 Vlastnosti EON

V této sekci jsou popsány hlavní vlastnosti EON, které řeší zmíněné nedostatky. [1]

1.4.1 Podpora vysokých bitových rychlostí

Vysoké bitové rychlosti lze řešit pomocí pevných sítí demultiplexováním požadavků na menší části například 100 Gb/s. Tato technika se nazývá inverzní multiplexování a ačkoliv bude výsledek korektní, využije technika více spektrálních zdrojů, než při odeslání jednoho škálovatelného požadavku. EON nám tím umožňuje využívat větší přenosové rychlosti bez využití demultiplexování a s lepším spektrálním využitím než u technik s pevnou mřížkou.

1.4.2 Užší vzdálenost mezi kanály

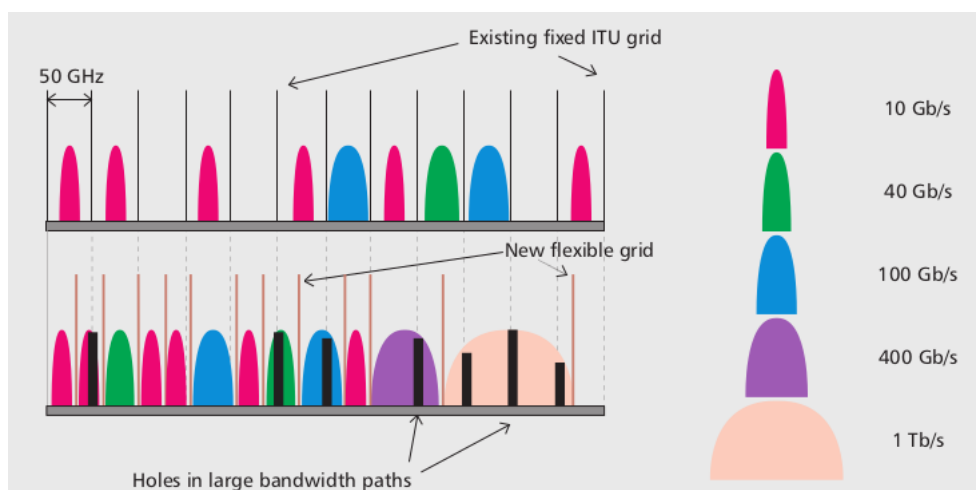
Při požadavcích o vyšších bitových rychlostech, než je maximální přenosová rychlost pásma u technologií s fixní mřížkou, dochází i k využití prostoru, který by musel být ve fixních technologiích využit jako ochranné pásmo mezi několika kanály. Dochází tím k mírnému plýtvání místem, které může být v technologii EON lépe využito.

1.4.3 Rozdílná šířka pásma

Hlavní výhoda a vlastnost EON spočívá v rozdílné šířce pásma, šířka pásma není tedy fixně stanovená například na 100 Gb/s, jak je standardem u DWDM. EON řeší tento problém mnohem efektivněji, flexibilním přiřazováním spektra každému požadavku podle jeho bitové rychlosti a přenosové vzdálenosti. Ukázka na obrázku 1.7

1.4.4 Efektivita dosahu a spektrální účinnosti

Pokud je nalezená optická cesta krátké vzdálenosti, EON se dokáže přizpůsobit a zvolit modulační formát, který provede požadavek, a přitom nevyčerpá takové množství spektra jako fixní řešení. Fixní řešení dynamicky nespokuluje nad požadovaným dosahem, dochází tak ke zvolení modulačních formátů, které vypotřebují více spektra, než je zapotřebí k provedení požadavku.



■ **Obrázek 1.7** Hlavní rozdíl mezi flexibilní a fixní spektrální mřížkou je v množství ušetření spektra, díky možnosti ho alokovat daleko flexibilněji. [4]

1.4.5 Dynamika a adaptace

Optická síť může v technologii EON reagovat dynamicky přímo na klientské požadavky s rozdílnými nároky na šířku pásma. Další výhodou jsou zavedené techniky adaptace na ztrátu spojení.

Na obrázku 1.7 vidíme znázornění černých hranic na místech, kde by za použití fixní mřížky končil spektrální slot. V EON jsou požadavky elasticky přiřazeny a zdroje jsou ušetřeny.

■ **Tabulka 1.1** Technologie DWDM [13]

Dosah	Řešení	Regenerátory	Spektrum (Ghz)
300	4 x DP-QPSK	0	200
2000	4 x DP-QPSK	0	200
5000	4 x DP-QPSK	4	200

■ **Tabulka 1.2** Technologie EON [13]

Dosah	Řešení	Regenerátory	Spektrum (Ghz)
300	2 x 200 G DP-16QAM	0	85
2000	4 x 100 G DP-QPSK	0	142
5000	8 x 50 G DP-BPSK	0	274
5000	4 x 100 G DP-QPSK	4	142

1.5 Číselné porovnání

V tabulkách výše předpokládáme super-kanály² obsahující jednotlivé kanály o frekvenci 33 GHz, dále se mezi super-kanály počítá s ochrannými pásmy o frekvenci 10 GHz. DWDM síť používá pouze transpondéry DP-QPSK. Dle přiložených dat v tabulkách 1.1 a 1.2 EON šetří velké množství spektra pro krátké vzdálenosti až (57%) a střední vzdálenosti až (30%), zatímco pro dlouhé vzdálenosti existuje v našem případě několik variant. Jednou z možností je použít o 37% více spektra, ale eliminovat regenerátory, další možností je použít stejný přístup jako v pevném případě DWDM, který bude vyžadovat regenerátory, ale přesto ušetří 30 % spektra.

V tabulce 1.3 je porovnáno využití spektra EON a WDM s využitím různých přenosových rychlostí, dvou rozdílných modulačních formátů a rozdílné šířky pásma požadavků. Je znázorněno více možností řešení. Z tabulky lze vypočítat, že ušetřené spektrum v technologii EON je obrovské a v konkrétních případech dosahuje ušetření až 150% spektra.

²Super-kanál je definován jako jediná směrovací entita složená z několika dílčích kanálů, z nichž každý je generován jedním transpondérem

■ **Tabulka 1.3** Ušetřené spektrum v EON [1]

Gb/s	Modulace formát	Šířka pásma	Fixní řešení	EON	Přínos
40	DP-QPSK	25+10	1 x 50 GHz	35 GHz	43%
100	DP-QPSK	37.5+10	1 x 50 Ghz	47.5 GHz	5%
100	DP-16QAM	25+10	1 x 50 GHz	35 GHz	43%
400	DP-QPSK	75+10	4 x 100 Gb/s v 4 x 50 GHz	85 GHz	135%
400	DP-16QAM	75+10	2 x 200Gb/s v 2 x 50 GHz	85 GHz	17%
1000	DP-QPSK	190+10	10 x 100Gb/s v 10 x 50 GHz	200 GHz	150%
1000	DP-16QAM	190+10	5 x 200Gb/s v 5 x 50 GHz	200 GHz	25%

Problémy EON

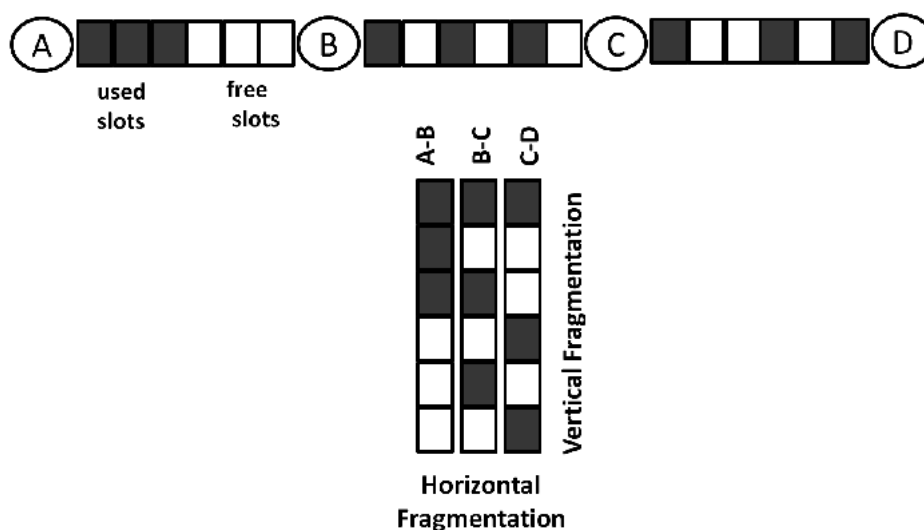
Se zavedením nové technologie jsou spojené mnohé problémy. V následující kapitole budou popsány nejčastější problémy spojené právě s EON. Rozebrány budou postupně problémy fragmentace spektra, modulace signálu, odolnosti vůči chybám, kvality přenosu a potíže přeslechu.

2.1 Problém fragmentace spektra

Problém v souvislosti s fragmentací spektra vzniká jako alokace a dealokace bloků sousedících slotů v rámci vyřízení požadavku. Nevhodná fragmentace může učinit část spektra nepoužitelným. Existují dvě možnosti fragmentace spektra v EON, a sice horizontální a vertikální. Na obrázku 2.1 je fragmentace graficky znázorněna.

- **Problém horizontální fragmentace**
Omezení spojitosti spektra způsobuje problém horizontální fragmentace v takové podobě, že stejný blok spektra nemusí být dostupný podél po sobě jdoucích spojů výsledné cesty navzdory skutečnosti, že každý spoj může mít dostatečnou šířku pásma pro požadavek. [1, 8]
- **Problém vertikální fragmentace**
Variabilní datové rychlosti spolu s omezením spojitosti spektra, jsou příčina problému vertikální fragmentace, situace, kdy spektrální zdroje na jednom spoji jsou fragmentovány do malých nesouvislých bloků, které nelze alokovat na jedinou velkou poptávku. [1, 8]

Nejllepší RSA algoritmy musí brát v potaz fragmentaci spektra a snažit se co nejvíce minimalizovat blokaci požadavků, co nejspravedlivěji rozdělovat požadavky a minimalizovat dopad fragmentace na použití a efektivitu spektra. Jako první věc k uspokojení těchto požadavků je třeba vyvinout metriku kvantifikující stupně fragmentace v síti. Použitím této metriky můžeme spočítat hodnoty sousedních párů slotů, zjistit entropii, kolik existuje lišících se hodnot a normalizovat hodnoty tak, že čím vyšší bude výsledné číslo, tím je stupeň vertikální fragmentace vyšší. Podobný koncept byl definován i pro zachycení horizontální fragmentace. Lze to vyřešit vypočítáním stavu daného slotu na párech po sobě jdoucích spojů. Každému souvislému bloku nevyužitých slotů je přiřazena hodnota rovna maximální datové rychlosti, kterou může podporovat, a fragmentační index dané cesty je vypočítán pomocí poměru součtu hodnoty dostupných bloků a hodnoty součtu slotů ve všech blocích. Fragmentační index je rozšířen o zachycení fragmentace spektra v celé síti vypočítáním průměru indexů fragmentace nejkratší cesty mezi každou cestou ze startu do cíle. Algoritmy RSA s ohledem na fragmentaci lze klasifikovat jako proaktivní nebo reaktivní. [6, 8]. Jak pro-aktivní, tak reaktivní defragmentační přístupy jsou opět klasifikovány do dvou typů, a to s a bez přeměrování stávajících světelných cest. O těchto přístupech více v kapitole 3.



■ **Obrázek 2.1** Grafické znázornění horizontální a vertikální fragmentace [9]

Přesměrovávací přístup přerozděluje stávající světelné cesty do stejných, nebo různých slotů spektra změnou jejich tras, aby se zabránilo fragmentačnímu efektu.

Přístupy bez přesměrování neumožňují existujícím světelným cestám změnit své trasy, ale mohou přerozdělit spektrum. [8]

2.1.1 Férovost

Při fragmentaci zdrojů má roli také férovost požadavků, opakující se fragmentace může mít za následek zpoždění náročných požadavků. Pokud se spektrální zdroje fragmentují napříč různými síťovými spojení, různé požadavky mohou mít blokovací dopady na ostatní požadavky a připojení, které silně závisí na své datové rychlosti nebo délce trasy. Kvůli vertikální fragmentaci mohou být velké souvislé bloky slotů spíše vzácné, a proto budou vysokorychlostní požadavky odmítnuty s větší pravděpodobností než nízkorychlostní. Dalším faktorem je horizontální fragmentace, která ztěžuje nalezení sousedících bloků vzdálených cest v porovnání s kratšími cestami. Fragmentace může způsobit prodlevy a blokaci požadavků mající trasu na velkou vzdálenost či velmi vysokou rychlostí. [6]

2.1.2 Číselné porovnání

V tabulce níže lze vypočítat spotřebu energie transpondérů a dosah přenosu za měnících se podmínek přenosové rychlosti a modulačního formátu.

■ **Tabulka 2.1** Spotřeba energie[10]

Modulační formát	Přenosová rychlost (Gb/s)	Spotřeba energie (W)	Dosah (km)
BPSK, M=1	12.5	112.374	4000
QPSK, M=2	25	133.416	2000
8-QAM, M=3	37.5	154.457	1000
16-QAM, M=4	50	175.498	500
32-QAM, M=5	62.5	196.539	250
64-QAM, M=6	75	217.581	125

Následuje porovnání fragmentace přenosu přes jednoduchý kanál s přenosem využívající super-kanály. Proměnná přenosová rychlost, modulační formát a modulační rychlost mají za následek rozdílné využití počtu slotů, dosah i počet transpondérů. [9]

■ **Tabulka 2.2** Jednoduchý kanál

Gb/s	Modulace	Mod. rychlost(Gbaud)	Počet slotů	Dosah(km)	Transpondéry
100	16QAM SDFEC	16	3	400	0.7
100	16QAM SDFEC	16	4	400	0.7
100	QPSK SDFEC	32	3	1400	1
100	QPSK SDFEC	32	4	2100	1
200	16QAM SDFEC	32	3	300	1
200	16QAM SDFEC	32	4	400	1

■ **Tabulka 2.3** Superkanál

Gb/s	Modulace	Mod. rychlost(Gbaud)	Počet slotů	Dosah(km)	Transpondéry
200	2×QPSK SDFEC	2 x 32	7	1900	2
400	2×16QAM SDFEC	2 x 32	7	400	2
400	4×QPSK SDFEC	4 x 32	13	1900	4
1000	5×16QAM SDFEC	5 x 32	16	400	5
1000	10×QPSK SDFEC	10 x 32	31	1900	10
1000	10×QPSK SDFEC	2 x 32	32	1900	10

2.2 Problém modulace signálu

Pojmem modulace se nazývá proces, měnící charakter nosného signálu pomocí modulujícího signálu. Proces konvertuje data na elektrické signály optimalizované pro přenos. Dnešní zdroje informací generují signály, které jsou ve své původní podobě nevhodné pro přenos na velké vzdálenosti. Modulace tedy vznikla za účelem posílení signálu a pro podporu přenosu na velkou vzdálenost. Využívá se hlavně při přenosu elektrických nebo optických signálů.

K úspěšnému provedení modulace potřebujeme modulátor a demodulátor. V prvotní fázi využíváme modulátor, který moduluje daný signál. Modulátor musí obsahovat nelineární prvek, aby bylo možné modulaci provést. Na opačné straně procesu se nachází demodulátor, sloužící extrahování modulovaného signálu (nesené informace). [11, 12, 13]

2.2.1 Intermodulace

Při modulaci může docházet k intermodulaci, procesu setkání dvou nebo více různých frekvencí v nelineárním prostředí a jejich vzájemné modulaci. Tento nechtěný efekt je způsobený právě přítomností nelineárních prvků v systému. [14]

■ **Tabulka 2.4** Porovnání 64QAM a QPSK [6]

Modulační formát	64QAM		QPSK	
Rychlost(Gb/s)	Dosah(km)	Počet slotů	Dosah(km)	Počet slotů
40	685	1	2585	2
100	546	2	2007	5
160	475	3	1710	8
400	335	7	1133	20
600	274	10	877	30

2.2.2 Modulační formáty

V RSA algoritmech se k efektivnímu využití spektra používají různé druhy modulačních formátů. Různé modulační formáty mají vhodné vlastnosti postupně pro přenos na krátkou, střední i dlouhou vzdálenost. Správným výběrem lze zmírnit blokování požadavků a zamítnutí nových žádostí. Algoritmy zavádějí ohodnocující metriky, počítané například jako poměr obsazeného spektra k dostupnému spektru v daném spoji. Na základě těchto metrik zvolí algoritmy nejvhodnější modulační formát pro konkrétní volbu. Při vysoké hodnotě metriky se volí spektrální efektivní modulační formáty s použitím více regenerátorů, naopak při nízké hodnotě metriky se využijí méně spektrálně efektivní modulační formáty bez potřeby regenerátorů [13].

Mezi dva hlavní typy modulačních formátů patří v současnosti QPSK a QAM, které budou probrány v následujících sekcích.

2.2.3 QPSK

Systém QPSK využívá ke své funkčnosti fázový posun. Rozšiřuje standardní PSK formát přidáním kvadratury, v které jsou modulovány najednou 2 bity, výběrem jednoho ze čtyř pravděpodobných fázových posunů. Může tím přenášet až dvakrát tolik informace oproti PSK s využitím stejné šířky pásma. [6]

2.2.4 QAM

QAM poskytuje významné výhody pro přenos dat. Systém QAM funguje pod mnoha podsystemy například 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM atd. Vyšší řády slouží k vyšší datové rychlosti, vzniká však větší riziko datových chyb a šumu. Celý princip je o tom, nalézt rovnováhu mezi kvalitní datovou rychlostí a přijatelnou bitovou chybovostí. [12]

Moderní algoritmy reagují na úroveň spojení za běhu a zaměňují modulační formáty ve snaze najít optimální podmínky pro datový přenos.

2.2.5 Číselné porovnání

V tabulce 2.4 se porovnávají 2 formáty 64QAM a QPSK. Formát QPSK má tendenci využívat více FS a dosahovat tím větších přenosových vzdáleností.

2.3 Problém odolnosti vůči chybám

Odolnost a ochrana sítě je v EON nesmírně důležitá. Při stále zvyšujících se rychlostech přenosu může jen malý výpadek znamenat ztrátu obrovského množství dat. Využívají se dva základní přístupy k řešení tohoto problému, a to jmenovitě ochrana (protection) a obnovení (restoration). [6, 15]

2.3.1 Obnovení

Obnovení zdroje je reaktivní přístup řešení, který reaguje na ztrátu signálu a snaží se znovu nalézt novou trasu pro požadavek. [6]

2.3.2 Protekce

Přístup protekce zdroje má dvě hlavní formy, a to "Dedicated Path Protection (DPP)" a "Shared Backup Paths Protection (SBPP)". Hlavní vlastnosti těchto přístupů [6, 15]

- DPP
 - Spoje vyhrazené pro každé připojení
 - Vysoká účinnost
 - Neefektivní využití spektra
- SBPP
 - Sdílení záložních cest mezi více spoji s disjunktními primárními cestami
 - Efektivní využití spektra
 - Může selhat při vícenásobném selhání spojů v jeden okamžik (se stejnou záložní cestou)

[15, 16]

Na problém odolnosti vůči chybám se ještě detailněji podíváme v kapitole 4.

2.4 QoS

QoS je další problém, který se musí v dnešní době stále narůstajícího rychlostního přenosu, brát v potaz. Hlavním negativním projevem je ztráta nebo zpoždění dat, jevy které nechceme, aby se při síťové komunikaci stávaly a aby byla komunikace co nejkvalitnější. QoS lze zajistit s ohledem na různé charakteristiky připojení, jako je dostupnost, přežití nebo kvalita přenosu. Jednou z možností, jak zaručit požadovanou úroveň služeb, je sledování přijatelné úrovně poškození, jako je bitová chybovost nebo poměr optického signálu k šumu. Ve studii [17] se poprvé navrhuje monitorování časového výkonu, která umožňuje dynamické přizpůsobení sítě za účelem maximalizovat její účinnost. V případě, že spoj v dané optické cestě zaznamená zhoršení, monitorovací mechanismus umístěný na koncových uzlech detekuje problém a informuje o tom řídicí rovinu. Strategie výše má za následek možnost obsloužit různé požadavky variabilní úrovně kvality a posílit spoje, kde se kvalita přenosu právě zhoršila. Poskytovatelé mohou také zavést úrovně priority různým klientským požadavkům, a v důsledku toho obsluhovat primárně ty s nejvyšší prioritou. [18, 19]

2.4.1 Důležité parametry QoS

■ Ztráta

Ztráta paketu je jedním z hlavních parametrů výkonu a kvality sítě, čím vyšší je provoz a vytížení sítě, tím více hrozí bitová ztráta. Ztrátovost sítě lze vypočítat dle následujícího vzorce. Čím menší ztrátovost, tím kvalitnější je daná síť.

$$\text{Ztrátovost} = \frac{\text{Počet ztracených paketů}}{\text{Počet celkových paketů}}$$

[20]

■ Zpoždění

Zpoždění paketu je dáno zbržděním po cestě a jeho krátkém uvíznutí ve frontě. Zpoždění lze důkladně analyzovat například dle jeho autokorelační funkce. Funkce automatické korelace zpoždění se používá pro indikaci toho, jak zpoždění paketů bude korelovat s následujícími sekvenčními pakety. [18, 20]

■ Zatížení provozu

Zatíženost nebo obsazenost provozu v síti nám udává hodnotu vytíženosti sítě. Čím větší vytíženost, s tím větší pravděpodobností bude docházet ke zhoršení kvality přenosu.

$$\text{Zatíženost} = \frac{\text{Počet přicházejících paketů}}{\text{Počet paketů, které lze přenést}}$$

[20]

2.4.2 Řídící rovina

Řídící rovina (Control Plane) je vyžadována za účelem automatizace a udržení kvality přenosu. V minulosti byla používána robustní řídicí rovina WSON (Wavelength Switched Optical Networks), která již implementovala vlastnosti typu dynamické správy sítě, optimalizace využití spektra, postupy k ustání zátěže včetně obnovy spojení a další. S přechodem na EON a díky unikátním vlastnostem technologie, nebylo možné pokračovat ve využití stávajícího konceptu a bylo potřeba vyvinout modernější a komplexnější řídicí rovinu. Ve většině případů se jednalo o rozšíření současné dostupné architektury. V EON však přicházejí další provozní omezení, které musí být požadavkem na vývoj nové řídicí roviny. [18, 19]

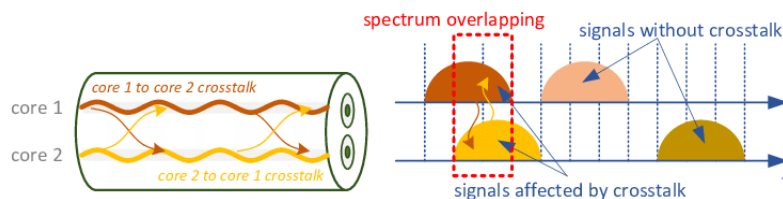
2.4.2.1 Požadavky na řídicí rovinu

Následuje seznam požadavků, které by měla správná řídicí rovina pro EON podporovat. [19]

- Umožnění optickým kanálům, aby byly škálovatelné ve velikosti a šířce
- Zařídit podporu optických kanálů k různým modulačním formátům
- Povolit změnu velikosti kanálu
- Dodržovat přiřazené frekvence
- Umožnění alokace super-kanálů buď na souvislou část spektra, nebo jejich umístění v oddělených pozicích na spektrální mřížce
- Podporovat směrování vlnového pásma super-kanálů i s rozděleným spektrem
- Bezproblémově spravovat uzly, které mají funkci fixní, nebo flexibilní mřížky, což znamená nasazení segmentů flexibilní mřížky i ve starších sítích s pevnou mřížkou
- Umožnit rychlou obnovu při selhání sítě
- Povolit reverzibilní obnovení, tedy obnovení sítě do původního stavu po detekci a reakci na problém

2.5 Přeslech

Přeslech (Crosstalk) je rušení, ke kterému dochází ve vícejádřových vláknech v důsledku souběžných přenosů v sousedních jádrech na stejné frekvenci. Mezi rušením je přeslech nejvýraznějším problémem vícejádřových vláken a jeho intenzita závisí na přenosové rychlosti, použité modulaci a především na fyzikální vlastnosti daného vlákna. Dosáhnutí nízkých nebo žádných přeslechů, je jednou z hlavních výzev pro architekturu vícejádřových jader. Toto rušení degraduje signál, snižuje kvalitu a ohrožuje přenos. K přeslechům může dojít, když se stejné úseky spektra ve vláknech překrývají. Viz 4.2 [21, 22, 11]



■ Obrázek 2.2 Přeslech [23]

Nejlepší algoritmy snažící se o útlum přeslechu se snaží buď úplně eliminovat nebo alespoň minimalizovat přeslechy mezi sousedními jádry efektivním přidělováním světelných cest. Tím se minimalizuje poměrový přeslech, který je definován pro každý slot spektra jako počet jader, která způsobují přeslechy pro tento slot ku počtu všech dostupných jader. V důsledku toho, pokud síť není přetížená, lze se přeslechu vyhnout. Další přístup mimo jiné zmíněný v [24], aplikuje navíc také mechanismus prioritizace jader. Během procesu alokace jsou jádra analyzována v daném pořadí podle priority. Základní priorita je předem stanovena a to tak, aby redukovala přeslech. [23, 24]

Kapitola 3

RSA

Tato kapitola se zabývá stěžejním problémem EON. Správné směrování a alokace spektra je naprosto klíčový faktor fungování k rychlému a efektivnímu fungování sítě. V této kapitole je tento problém důkladně rozebrán, jsou popsány rozdíly mezi off-line a on-line verzí, algoritmické postupy směrování i alokace. Na závěr je představen konkrétní algoritmus SEPA a jeho implementace.

Řešení RSA problému je jednou z hlavních zodpovědností EON. Při příchodu požadavků s různými nároky na alokaci zdrojů, algoritmy RSA musí zkontrolovat všechny dostupné podmínky a možnosti a vybrat tu nejlepší pro každou poptávku tak, aby se uspokojil maximální počet požadavků klienta. Hlavní úspěch RSA algoritmů se hodnotí napříč různými parametry. Například některé z algoritmů RSA se snaží zmírnit pravděpodobnost blokace, zatímco jiné chtějí zefektivnit využití zdrojů nebo energetickou účinnost.

Dohromady můžeme RSA rozdělit na dva dílčí podproblémy: směrování a alokace spektra. Pro řešení problému RSA bylo navrženo mnoho přístupů. Některé z nich se snaží řešit dílčí problém se směrováním, některé upřednostňují hlavně efektivní alokaci spektra a jiné se snaží oba problémy vyřešit co nejlépe najednou. Platí, že hlavním cílem stávajících metod, který mají víceméně společný, je efektivní a úsporné využití zdrojů v reakci na přichozí požadavky.

3.1 Frekvenční sloty

EON používá FS k přizpůsobení k vlnovým délkám a požadavkům na vícenásobný přenos dat. Tento koncept byl zaveden pro pokrytí problému neelastického charakteru tehdejších frekvenčních sítí. Díky tomu dokážou EON přiřadit potřebné množství souvislých FS k požadavkům. [25], [6]

3.2 Omezení spojitosti a souvislosti

V RSA existují dvě důležitá omezení související s FS koncepcí, a to kontinuita a spojitost zdrojů spektra. Kontinuita spektra je nejdůležitějším rozdílem mezi sítěmi EON a WDM. Podle kontinuity musí být FS volný ve všech spojích světelné cesty. Dále podle omezení spojitosti musí mít dostupné FS spojitost ve všech navazujících spojích světelné cesty. V problému RSA musí být zajištěno, aby byly obě omezení zaručeny. Vyšší komplexností zvyšují tyto omezení náročnost stávajících algoritmů. [26, 1, 6]

3.3 Off-line RSA

Off-line RSA řeší stále stejný problém, musí se akorát obejít bez dynamického rozhodování a bez reakce na měnící se požadavky v síti. Vstupem jsou obvykle dopředu známé dopravní požadavky a cílem je přiřadit fyzickou cestu a souvislé množství spektra každému požadavku a minimalizovat celkové množství využitého spektra. Off-line RSA lze využít při dopředu dobře známém provozu a vytíženosti sítě. Výhodou pro off-line RSA také je, když už změna nastane, aby v síti přetrvávala co nejdéle. Vzhledem k tomu, že se pro spoje předpokládá, že zůstanou na svém místě po relativně dlouhou dobu, stojí za to pokusit se optimalizovat způsob, jakým síťové zdroje off-line přiřazovat. Off-line RSA algoritmy se naopak nehodí na velmi rychle se měnící a dynamický stav sítě, kde by off-line algoritmy postrádaly potřebnou dynamiku a účinnost. [6]

3.3.1 Definice Off-line RSA

Je dán graf $G = (V, A)$, kde V je množina uzlů a A množina spojů v síti a matice poptávaného spektra $T = [t_{sd}]$, kde t_{sd} je množství spektra potřebného k provedení poptávaného provozu ze zdrojového uzlu s do cílového uzlu d . V tomto grafu přiřadí fyzickou cestu a spektrum pro každou poptávku tak, aby se minimalizovalo celkové využití spektra využívaného na jakémkoliv spoji uvnitř této sítě pod těmito třemi omezeními.

- Každé poptávce je přiřazeno potřebné spojitě množství spektra
- Každé poptávce je přiřazeno stejné množství spektra podél všech spojů jeho trasy
- Požadavkům, které sdílejí spoje, nejsou přiřazeny překrývající se části dostupného spektra

[6]

3.3.1.1 Algoritmy statického provozu

Off-line RSA problém se řeší pomocí algoritmů statického provozu. Statické algoritmy znají provoz sítě předem a informace o provozu jsou definovány konstantně a navíc trvání poptávky nikdy nevyprší. Algoritmy RSA navržené pro statický provoz vyhledávají vhodné trasy a následně přiřazují příslušné zdroje požadavkům.

3.4 On-line RSA

On-line RSA problém je komplexnější, při jeho řešení vhodným algoritmem, z něj vzejdou v mnoha případech mnohem lepší výsledky než ze statického řešení RSA problému. V rámci dynamického provozu jsou síťové požadavky odesílány a zpracovávány za běhu, dle aktuálního vytížení. Požadavky na připojení přicházejí tedy v náhodných časových intervalech a v závislosti na aktuálním stavu sítě, algoritmy přepočítávají dostupné množství spektrálních zdrojů a zda mohou, nebo nemohou nové připojení provést a navázat. Stav sítě se vyvíjí v čase, nová spojení jsou přijímána a stávající spojení jsou uvolňována. Pokud požadavek na připojení nemůže být přijat z důvodu nedostatku zdrojů, je zablokovan. Tím vzniká pravděpodobnost blokování požadavků na připojení a ujímá se jako klíčová výkonnostní metrika v on-line RSA problému. [6]

3.4.1 Algoritmy dynamického provozu

Algoritmy podporující dynamický provoz reagují za běhu na měnící se podmínky provozu. Proto musí tyto algoritmy aktualizovat své informace a přizpůsobit se novým podmínkám, aby vybraly nové neefektivnější řešení a maximálně vyhověly aktualizovaným požadavkům.

3.5 Směrování

V této části bude rozebráno směrování, jeden z dvou hlavních dílčích problému RSA. Směrování lze rozdělit na dvě hlavní části, elastické a neelastické směrování. Hlavním požadavkem při směrování je nalézt cestu z počátečního do koncového uzlu pro daný požadavek.

3.5.1 Jednocestné směrování

Jednocestné směrování neprokazuje elastické vlastnosti a nepodporuje vícecestnost, přenášená data daného požadavku nelze rozdělit mezi více spojů najednou. Část požadavku mezi danými dvěma uzly musí být provedena právě jednou cestou. Mezi nejnámější algoritmy jednocestného směrování patří následující. [24, 1]

■ FR (Fixed Routing)

Algoritmy patřící mezi fixně směrovací jsou statické, hledají cestu s využitím algoritmů nejkratších cest. Po obdržení požadavku algoritmus vypočítá potřebnou cestu a zkontroluje, zda je ve všech spojích cesty dostatečné množství FS. Pokud na jednom ze spojů nenalezne dostatečný počet, požadavek na připojení bude zablokován.

■ FAR (Fixed Alternate Routing)

Fixní alternativní směrování je rozšíření předchozího algoritmu a bylo představeno již v [27]. Tento přístup využívá směrovací tabulku, která je off-line a předpočítaná pro všechny uzly v síti. Po přijetí požadavku se algoritmus pokusí sestavit cestu podle dostupných spojů dle směrovací tabulky, pokud se mu to nepodaří, je požadavek zablokován. Tento přístup je komplexnější a stojí více výpočetních sil než výše zmíněný FR, má ale nižší pravděpodobnost blokace. [27]

■ LCR (Least Congested Routing)

Algoritmus LCR lze přeložit jako nejméně přetěžované směrování, jelikož se snaží sestrojít cestu přes nejméně vytížené cesty. O cestách mezi spoji si drží záznam vytíženosti (počet stále dostupných FS). K tomu navíc využívá předem definovanou tabulku cest mezi uzly podobně jako algoritmus FAR. Pokud má při vytváření cesty na výběr z více dostupných spojů, vybere si ten, který má více dostupných FS, je tedy méně vytížený. [27]

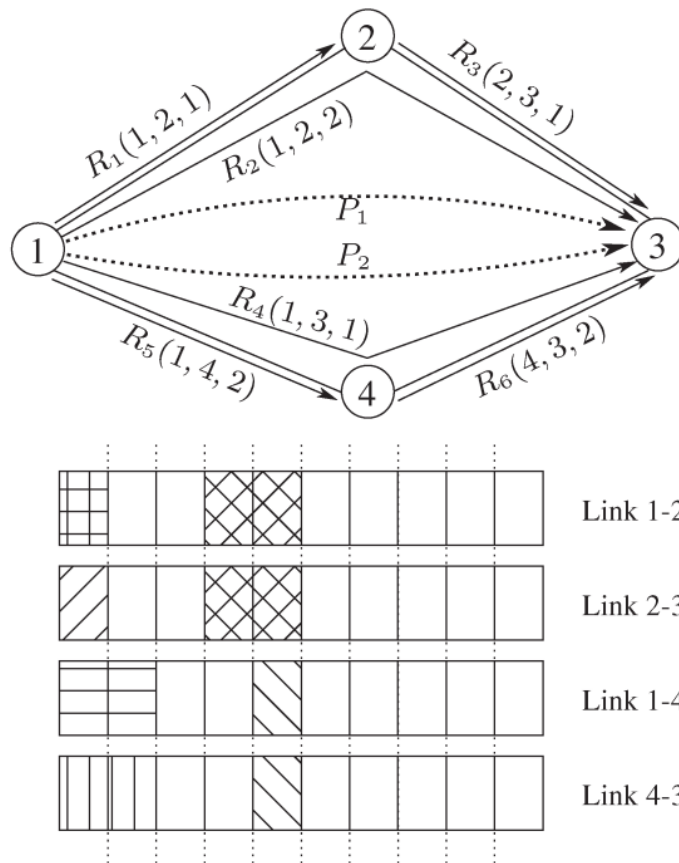
■ AR (Adaptive Routing)

Adaptivní směrování. V [28] se definuje algoritmus adaptivního směrování, kde hlavním rozdílem je, že cesty mezi zdrojem cílem jsou vybírány dynamicky. Informace o aktuálním provozu vychází ze všech aktivních připojení, z kterých se pak volí nejkratší cesta. Jelikož při dynamickém výběru se procházejí postupně všechny dostupné cesty a možnosti, jak se do cíle dostat, algoritmus nenažde řešení a zablokuje požadavek pouze v případě, kdy skutečně neexistují volné FS na žádných trasách. Algoritmus tím velmi snižuje pravděpodobnost blokace, na druhé straně dynamické přepočítávání cesty může být výpočetně náročné.

3.5.2 Elastické směrování

V EON může jednocestné směrování způsobovat fragmentační problém. Problému fragmentace se bude více zabývat kapitola 3, kde má tento problém vlastní sekci. Důsledkem toho, se začaly v EON rozvíjet vícecestné směrovací algoritmy. Vícecestné směrování může provést požadavek, který by jednocestným směrováním proveden být nemohl, navíc minimalizuje fragmentační problém a pravděpodobnost blokace, tudíž se jeví jako daleko výhodnější a efektivnější variantou, než směrování bez elastického charakteru. [1]

Na obrázku 3.1 je situace, kdy pomocí elastického můžeme dosáhnout úspěšného provedení požadavku, který bychom bez elastických vlastností nebyli schopni odeslat. Nechť máme přicházející požadavky $R(S, D, F)$, kde S je zdroj, D je cíl a F je počet potřebných FS. Pokud bychom v dané situaci dostali požadavek $R(3, 1, 4)$ byl by zablokovaný. Naštěstí díky vícecestnému směrování můžeme požadavek odeslat přes simultánně přes P_1 a P_2 a dosáhnout tím cílového uzlu. [1]



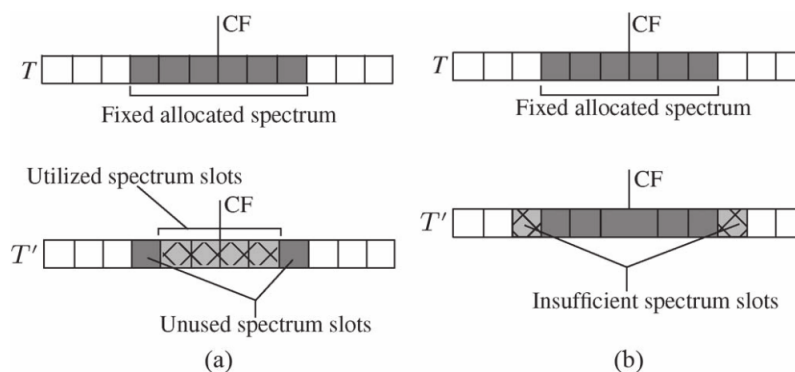
■ **Obrázek 3.1** Vícecestné směrování [1]

3.6 Alokace spektra

Alokace spektra je po směrování druhým podproblémem, který se RSA snaží řešit. Stejně jako směrování i alokace spektra je rozdělena na několik hlavních přístupů, které algoritmy RSA využívají. Na nejznámější přístupy se podíváme v následující sekci. [1, 26]

3.6.1 FSA (Fixed Spectrum Allocation)

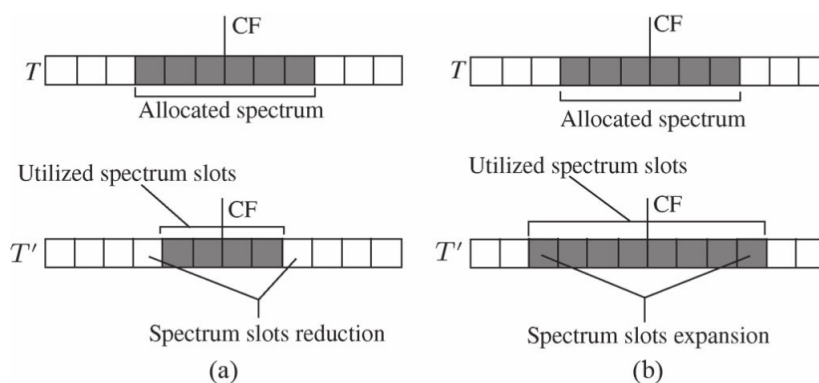
Ve fixní alokaci spektra zůstane přiřazená šířka spektra i CF (centrální frekvence) navždy stejná. Tento přístup neposkytuje žádnou elasticitu, alokace spektra probíhá nezávisle rozdílným požadavkům na šířku spektra. Na obrázku 3.2 a) vidíme případ, kdy množství fixně alokovaného spektra je větší než množství dostačující k provedení požadavku. Tím dochází k využívání nepotřebných zdrojů, které by mohly být použity jinak. V b) naopak vidíme situaci, kdy fixní přiřazené množství nestačí a poptávka tak nemůže být správně provedena.



■ Obrázek 3.2 Fixní alokace spektra [1]

3.6.2 SESA (Semi-elastic Spectrum Allocation)

V polo-elastické spektrální alokaci zůstává stále stejná CF, ale šířka alokovaného spektra se může měnit. Je implementován koncept rozšiřování a redukce šířky spektra. K lepšímu pochopení je na obrázku 3.3 graficky znázorněna ukázka těchto dvou principů. V části a) vidíme redukci. Po všimnutí, že požadavek nevyužívá plnou hodnotu přidělených spektrálních slotů, dojde k redukci. V b) Je naopak ukázka rozšíření slotů, potom co přijatý požadavek využívá všechny přidělené FS.

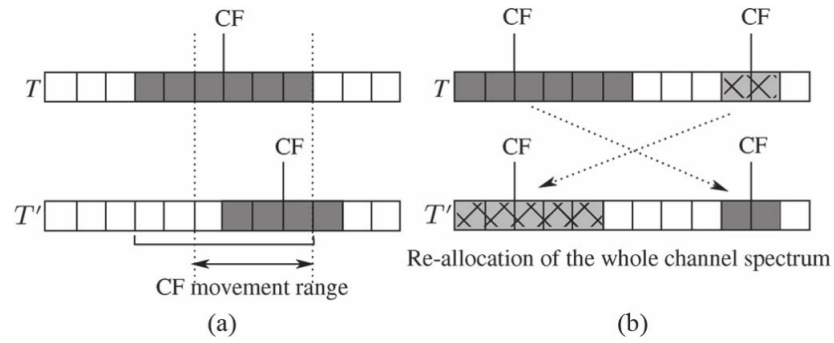


■ Obrázek 3.3 SESA alokace spektra [1]

3.6.3 ESA (Elastic Spectrum Allocation)

V elastickém alokování spektra je možno měnit šířku alokovaného spektra i CF. Pokud je potřeba, lze tedy v podstatě realokovat a přemístit frekvenční sloty v kanále dle potřeby. Na obrázku 3.4 je znázorněno posunutí CF a) i s realokací celého kanálu v b).

[1, 26]



■ Obrázek 3.4 ESA alokace spektra [1]

3.7 SETA-RSA

SETA-RSA (Spectrum efficient time-aware routing and spectrum assignment algorithm) je heuristický RSA algoritmus navržený v [29], určený hlavně pro minimalizaci spotřeby spektra v komplexních dynamických sítích.

3.7.1 Ukázka algoritmu

Algorithm 1 Algoritmus SETA-RSA [29]

Require: Pre-compute K shortest paths for each $s - d$ node pairs

```

1: while Network is running do
2:   When a request  $r(s, d, b_r, t_s, t_d)$  arrives, load the pre-computed paths set  $P$  for node pair  $s - d$ 
3:   Make an empty routing and spectrum assignment solution set  $L$  to record the path, the allocated spectrum, and the spectrum consumption information for  $r$ 
4:   for Each path  $p$  in  $P$  do
5:     for Each slot  $f$  in the slot set  $F$  along  $p$  do
6:       Check the availability of the consecutive  $b_r$  slots from  $f$ 
7:       if All the  $b_r$  slots from  $f$  are available then
8:         Calculate the additional comprehensive spectrum consumption  $C_{total}$  caused by the new service request  $r$  assuming the  $b_r$  slots are allocated to  $r$ 
9:         Add  $p, f$  and  $C_{total}$  to  $L$  as an possible solution  $l$ 
10:        end if
11:      end for
12:    end for
13:    Check the solution set  $L$ 
14:    if  $L$  is non-empty then
15:      Found the solution  $l$  with minimum  $C_{total}$  in  $L$ 
16:      Select the path and assignment the spectrum to  $r$  according to  $l$ 
17:      Update the network
18:    else
19:      Block the request  $r$ 
20:    end if
21: end while

```

Problém odolnosti vůči chybám

V optických sítích může mít selhání spojení za následek obrovské ztráty dat. V této kapitole bude detailně rozebrán problém odolnosti vůči chybám. Tento problém se dá rozdělit na ochranný přístup a přístup obnovy, oba tyto přístupy jsou popsány v této kapitole. Protekční přístup řešení využívá zejména dedikované a sdílené ochranné cesty. Závěrem kapitoly jsou znázorněny konkrétní algoritmy a postupy obnovovacích přístupů.

4.1 Protekce

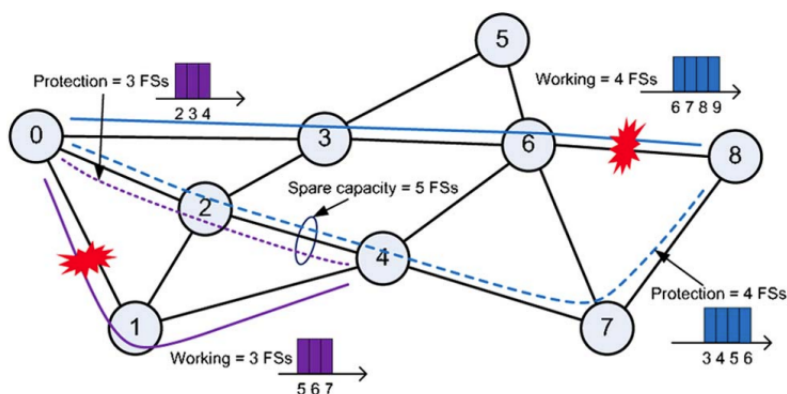
Hlavní zásadou protekčních přístupů je jejich schopnost provozu sítě bez ohledu na selhání, jelikož každý spoj má dopředu přiřazenou záložní cestu v případě selhání. V zásadě mají tyto přístupy větší účinnost, jelikož k úplné ztrátě dat by došlo jen v případě selhání na spoji v primární a zároveň i v záložní cestě, což ve většině síťových topologií není velmi pravděpodobné. Na druhou stranu mají tyto přístupy poměrně velké využití zdrojů, protože musí alokovat zdroje i pro záložní cesty i v případech, kdy k žádnému problému nedošlo. Přístupy se dají rozdělit na dedikované ochranné trasy a na sdílené ochranné trasy. Více o těchto dvou řešeních v následujících podsekcích. [15, 30]

4.1.1 Protekční schéma

Jak je znázorněno na obrázku 4.1, když dojde k problému na některém ze spojů, náhradní cesta je již k dispozici přímo mezi startovním a koncovým uzlem cesty. Pokud například selže spoj označený (6-8), je poškozena pracovní cesta (0-3-6-8) a provede se přepnutí daného provozu z pracovní cesty na definovanou záložní cestu, v našem případě označenou (0-2-4-7-8). Nápodobně, pokud selže spoj označen (0-1), je poškozena pracovní trasa (0-1-4) a provádí se přepnutí na předem definovanou záložní cestu označenou (0-2-4). [30]

4.1.2 DPP

DPP (Dedication Path Protection) je off-line směrovací a alokační problém v sítích s flexibilní mřížkou. Cílem je opět minimalizovat přidělenou šířku spektra do sítě. V DPP má každé připojení své záložní zdroje, oproti SBPP, ve kterém mohou být záložní zdroje sdíleny mezi jednotlivými požadavky, jejichž primární cesty nemají vysokou pravděpodobnost současného selhání. V DPP rozlišujeme dva scénáře přidělení a to přidělení stejného kanálu (SC) a přidělení různých kanálů (DC) [31]



■ **Obrázek 4.1** Protekční přístup záložní trasy [30]

■ SC

Přídělení stejného kanálu je nákladově efektivní scénář, ve kterém jsou transpondéry sdíleny mezi záložní připojeními a poptávka po provozu přidělila stejný kanál na své primární a záložní cestě. Takové řešení snižuje náklady na síť a zkracuje dobu přepínání připojení.

■ DC

V případě stejnosměrného proudu je omezení nacházející se v SC mít stejný provozní kanál v primárním i záložním připojení uvolněno, čímž se sníží požadavky na spektrum. Jedním ze způsobů implementace tohoto scénáře je instalace vyhrazených transpondérů pro pracovní i záložní cesty. Je to však poměrně drahý přístup, protože zdvojnásobuje náklady na transpondéry instalované v síti. Alternativní řešení je používat laserově laditelné transpondéry, které jsou schopny modifikovat centrální frekvenci přenášeného optického signálu.

[31, 16]

DPP alokační problém dále využívá tři možnosti přiřazení záložních cest

4.1.3 DPP 1+1

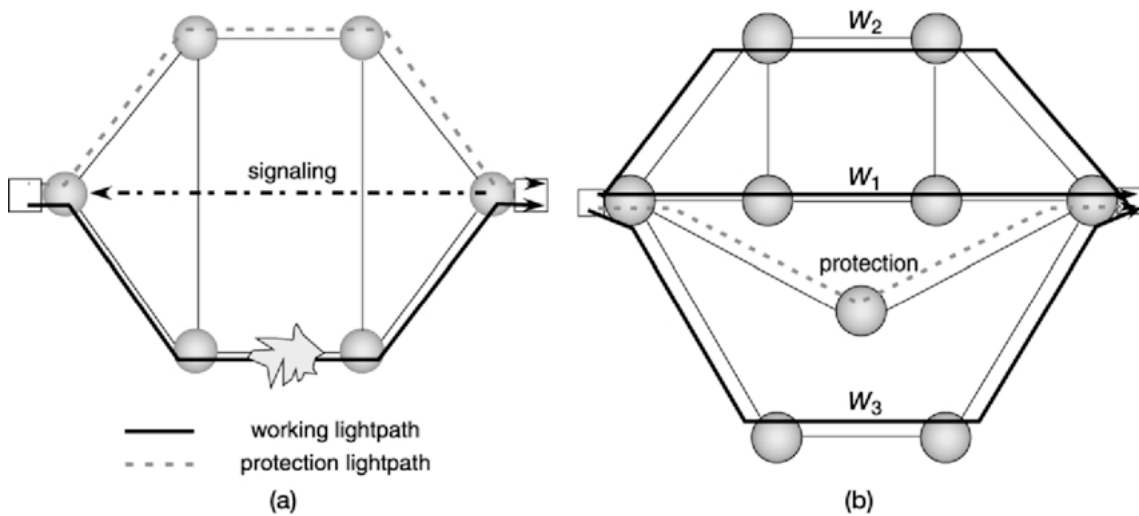
Vlastnosti 1+1 schématu:

- Každá primární cesta má zcela spojově disjunktní záložní cestu
- Data jsou odesílána najednou po obou cestách (primární i záložní)
- V cíli se zvolí nejlepší ze signálů

4.1.4 DPP 1:1

Vlastnosti 1:1 schématu:

- Každá primární cesta má zcela spojově rozdílnou záložní cestu
- Data jsou posílána pouze po primární cestě, dokud spojení neselže
- Nevyužitá zdroje záložních cest mohou být použity na nechráněné části spojení
- Vyžaduje signály navíc k informování zdrojového uzlu



■ Obrázek 4.2 a)1:1 DPP; b)1:3 SBPP [32]

4.1.5 DPP 1:N

Vlastnosti 1:N schématu:

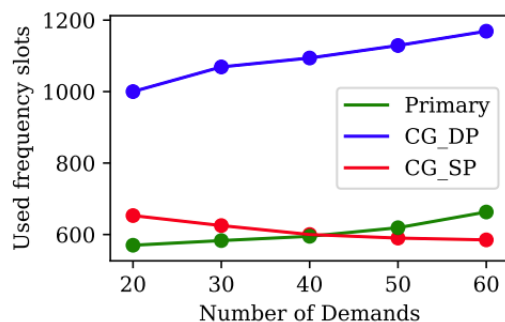
- Ochranné zdroje jsou sdíleny do N primárních cest
- Dokáže redukovat spektrální náročnost
- Nemusí být schopno ochránit vícenásobné selhání spojů

4.2 SBPP

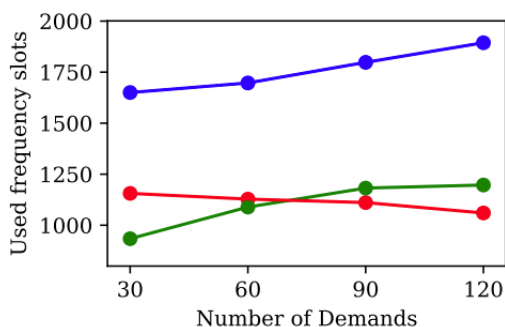
SBPP (Shared Backup Path Protection) je slibnou technikou ochrany sítě díky mnoha výhodám, a to zejména provozní jednoduchosti, účinnosti a rychlosti. U SBPP je ochranná cesta předem identifikována a ochranné zdroje jsou propojeny na ochranou cestu v reálném čase. Účinnost ochrany je realizována sdílením ochranných zdrojů na společných spojích ochranné světelné cesty, jejichž odpovídající primární trasy mezi sebou nesdílí žádný společný spoj. Ve srovnání s ostatními technikami SBPP má dvě hlavní výhody. [30, 16]

- Efektivní sdílení nevyužitých zdrojů
- Nezávislost na selhání sítě (nepotřebuje identifikovat lokaci chyby)

Díky chybové nezávislosti systému může SBPP využívat mnohem jednodušší správu a kontrolu sítě.

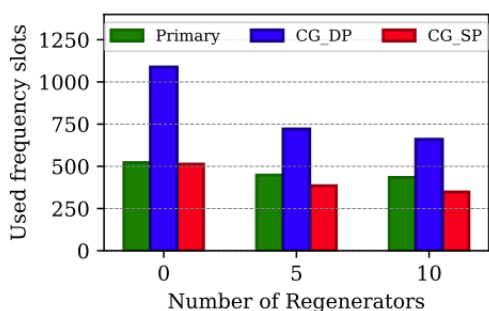


(a) nobel-US

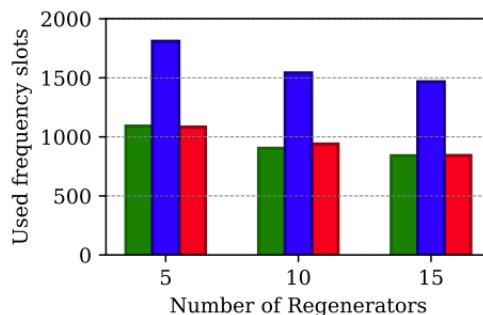


(b) USnet

■ **Obrázek 4.3** Porovnání DPP a SBPP s nárůstem požadavků [33]



(a) nobel-US



(b) USnet

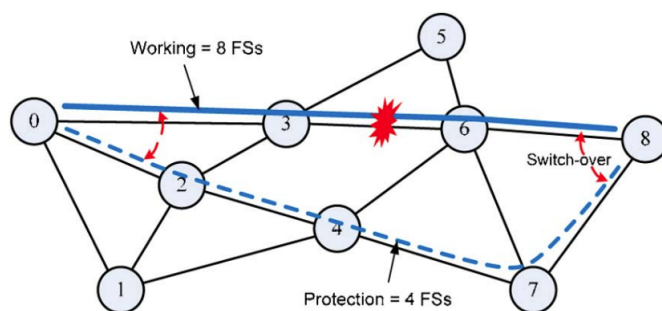
■ **Obrázek 4.4** Porovnání s využitím regenerátorů [33]

4.3 Porovnání DPP a SBPP

V této sekci porovnáme dva probírané koncepty DPP a SBPP. Na obrázku 4.3 se pro přesnější výsledky držíme konstantní dopravní zátěže, mění se pouze počet požadavků. Oba systémy ochrany sítě projevují velmi odlišné chování. Čím se zvyšuje počet požadavků, tím se zvyšuje výkon z hlediska využití frekvenčních slotů. Můžeme si však všimnout, že ve DPP schématech se jak v primární, tak v záložní cestě, s přibývajícím požadavky neustále zvyšuje počet potřebných zdrojů. SBPP přístup je v tomto ohledu daleko efektivnější. Podrobné výsledky lze nalézt v [15].

Výsledky se podobají i datům z obrázku 4.3 a SBPP přístup má lepší výsledky průměrně o 20-40%. V našem případě jsou zkoumány 2 různé síťové topologie USnet a US-Novel, obě protekční schémata mají použit CG model, který je definován v [33], kde se také používá k analýze dat.

Na obrázku 4.4 lze pozorovat porovnání ve stejných typologických sítích, tentokrát závislé na počtu regenerátorů.



■ **Obrázek 4.5** Zmáčknutí pásma v BSR, částečné zotavení [30]

4.4 Obnovení

Ve srovnání s protékčím přístupem mají obnovovací přístupy lepší využití zdrojů a nižší pravděpodobnost blokace, jelikož obnova nemusí dopředu zálohovat zdroje, předtím než dojde k selhání. Podle stylu výpočtu obnovené cesty lze dále rozdělit obnovující technologie na reaktivní a proaktivní. Reaktivní obnova vypočítá novou cestu poté, co dojde k poruše, oproti tomu proaktivní obnova spočívá v již pravidelném předvýpočtu obnovujících zdrojů předtím, než dojde k selhání. [34, 35]

4.4.1 BSR

V jednom z prvních schémat řešící obnovení spoje byl zaveden algoritmus BSR (Bandwidth Squeezed Restoration) v [36]. Algoritmus předpokládá přenosovou rychlost jako součet závazné rychlosti a přebytkové rychlosti. V důsledku toho obnova nezačne, dokud opakující se selhání nezpůsobí pokles datové rychlosti připojení pod hodnotu závazné rychlosti. V tento moment se zvolí nová záložní cesta, která může podpořit připojení a vrátit závaznou rychlost na požadovanou úroveň. Šířku pásma přidělenou připojením, která nejsou ovlivněna poruchou, lze zmáčknout na odpovídající závaznou rychlost a ušetřenou šířku pásma přidělit do postiženého místa, aby bylo maximálně podpořeno oslabené místo spojení. Technika BSR by byla obzvlášť užitečná v síti, která nemá dostatečnou ochrannou kapacitu pro úplnou obnovu. Obrázek 4.5 ukazuje příklad BSR. Při selhání spojení (3-6), je pracovní cesta (1-3-6-8) porušena. Bez BSR je vyžadováno 8 frekvenčních slotů v ochranné cestě (0-2-4-7-8) pro zotavení po selhání. Použitím BSR se však můžeme částečně zotavit ze selhání, například poskytnutím pouze čtyř frekvenčních slotů podél záložní cesty zobrazené na obrázku 4.5, i když by plná obnovovací šířka pásma nebyla na této cestě k dispozici. [30, 34]

4.4.2 PL-LR

PL-LR (Proactive Restoration with Low Re-provisioning) je algoritmus založený na proaktivním obnovení. Vypočítává záložní trasy pro připojení citlivá na zpoždění (připojení s vysokou prioritou), přitom nepočítá záložní trasy předem, ale až při detekci selhání nějakého spoje. Potíž pro proaktivní přístupy je v tom, že volně označené zdroje záložních tras mohou být v jakýkoliv okamžik použity pro pracovní cesty jiných spojení, a tím se záložní trasy stanou nedostupné. V tomto případě se musí za vysokých výpočetních podmínek vypočítat a přesměrovat nová záložní trasa. [35]

Algoritmus PR-LR se v zásadě snaží vybrat FS, které zůstanou nezměněny až do ukončení aktuálního připojení. Jinými slovy, snaží se snížit počet výpočetních operací. Dále PR-LR podporuje svým prioritním značením připojení kvalitu služeb. Když dojde k poruše, spojení s vysokou prioritou přepne na svou záložní cestu, ale připojení s nízkou prioritou je znovu nastavena tak, aby byla doba obnovy připojení s vysokou prioritou vždy kratší než připojení s nízkou prioritou. V [35] se autoři snaží tento výpočetní čas zkrátit ve třech krocích.

4.4.2.1 První krok

PL-LR se při hledání platné záložní cesty nejprve snaží najít frekvenční sloty, který byly rezervované pro připojení s nízkou prioritou a čas provedení tohoto připojení je pozdější než čas provedení aktuálního připojení. Pokud algoritmus nalezne dostatečně velké místo v těchto frekvenčních slotech, přiřadí je jako záložní cestu aktuálnímu poškozenému připojení. Pokud není nalezeno dostatečné množství slotů, algoritmus pokračuje druhým krokem.

4.4.2.2 Druhý krok

Tento krok probíhá podobně jako první krok. Snaží se najít frekvenční sloty rezervované pro připojení s nejnižší prioritou, tentokrát ale nehledí na čas provedení, využije daný slot, i když se má toto připojení dokončit dříve než připojení, pro které hledá záložní cestu. Pokud najde dostatek těchto slotů, přiřadí je na vytvoření záložní cesty. Pokud nenajde dostatek takto volných slotů, musí algoritmus pokračovat třetím krokem.

4.4.2.3 Třetí krok

V třetím kroku je snaha o nalezení požadovaného počtu frekvenčních slotů z volných zdrojů. Pokud se to nepovede, aktuální připojení nemá k dispozici přepínatelnou záložní dráhu. Přechází se do obnovovací fáze, během které se algoritmus ještě snaží najít volné spektrální sloty připojení z vysokou prioritou, pokud tak neučiní, připojení musí být obnoveno reaktivně za využití vyšší výpočetní ceny.

4.5 Quazi Path Restoration

V [37] byla provedena studie Quazi Path Restoration algoritmu. Tato strategie obměňuje techniky obnovy připojení. Jednou z hlavních výhod tohoto algoritmu je dopředná rezervace záložního spektra. Rozdělení spektra minimalizuje konflikt při přidělování spektra a způsobuje, že síť přežije více připojení, ve srovnání se stávající ochranou sdílené cesty (SPP), které bylo diskutováno výše. Jelikož opětné nasměrování sítě je vyžadováno pouze v poškozených trasách, vyžaduje se méně předem připraveného záložního spektra. Výsledky simulace také ukazují, že navrhovaná QPR strategie nabízí výhodný kompromis mezi pravděpodobností blokad a zárukou úspěšného obnovení spojení. Popis QPR algoritmu je znázorněn v následující sekci.

4.5.1 Ukázka algoritmu

Algorithm 2 Quazi Path Restoration

Require: Given a network with V nodes, E links, and each link with F frequency slots

N : Number of connection requests

$R(s, d, f)$: Connection request with source s , destination d , and frequency slot demand f

$P_{s,d}^i$: Primary path between source s to destination d for connection request R_i

S_B : Backup path between source s to destination d for connection request R_i

S_p : Spectrum for primary route assignment

S_B : Spectrum for backup route assignment

```

1:  $BandwidthAccepted \leftarrow 0$ 
2:  $RequestsAccepted \leftarrow 0$ 
3: for  $i \leftarrow 1$  to  $N$  do
4:   Search for primary route  $P_{s,d}^i$  for  $R_i$  from  $S_p$ 
5:   if  $P_{s,d}^i$  is available then
6:      $BandwidthAccepted \leftarrow BandwidthAccepted + f_i$ 
7:     Assign the frequency slots to links of the route
8:      $RequestsAccepted \leftarrow RequestsAccepted + 1$ 
9:   end if
10: end for
11:  $BandwidthRecovered \leftarrow 0$ 
12:  $BandwidthFailed \leftarrow 0$ 
13: for  $i \leftarrow 1$  to  $E$  do
14:    $NFR^i$  : Number of requests failed when  $i^{th}$  link failure is considered
15:   for  $j \leftarrow NFR^i$  do
16:      $BandwidthFailed \leftarrow BandwidthFailed + 1$ 
17:     Search for backup route  $B_{s,d}^j$  for  $R_j$  from  $S_B$ 
18:     if  $B_{s,d}^j$  is available then
19:        $BandwidthRecovered \leftarrow BandwidthRecovered + 1$ 
20:     end if
21:   end for
22: end for

```

Závěr

Závěrem práce bych chtěl především zhodnotit splnění stanovených práce. Před samotným psáním byla provedena rešerše na téma elastických optických sítí a s nimi spojených problémů. Získané znalosti a data jsem následně využil k psaní této práce.

Prvním cílem práce bylo porovnání nastupující technologie elastických optických sítí (EON) s technologií hustého vlnového multiplexu (DWDM). Řešení tohoto problému bylo rozebráno v první kapitole, která se celá věnuje porovnání EON a DWDM. Byly diskutovány výhody a nevýhody obou technologií, popis jejich funkčnosti a na závěr i konkrétní porovnávací data. Výsledky této porovnávací sekce ukázaly, že nová technologie EON má velké množství výhod a její použití dokáže využívat a přidělovat zdroje mnohem efektivněji. Důležitým poznatkem této sekce jsou hodnoty, kolik procent spektrálních zdrojů a za jakých podmínek dokáže EON oproti DWDM ušetřit a efektivněji využít. S dobrými výsledky je samozřejmě spojena vyšší komplexnost technologie, vyšší složitost a složitější architektura.

Dalším cílem práce byla studie problému EON. V druhé kapitole byly obecně popsány nejčastější problémy, konkrétně jsem vybral problém fragmentace spektra, problém modulace signálu, problém odolnosti vůči chybám, problém kvality služeb a jako poslední problém jsem vybral přeslech, nechtěný efekt stávající se ve vícejádrových optických sítích. Některé problémy obsahují kromě teoretické i číselnou sekci, kde se například porovnávají jejich stávající možnosti řešení.

Součástí studie problémů spojených s technologií EON bylo vybrat konkrétní problémy a ty rozebrat do detailu. Vybral jsem dva konkrétní problémy, problém směrování a alokace spektra (RSA) je řešen ve třetí kapitole a jelikož mě zaujal problém odolnosti vůči chybám při jeho studii ve druhé kapitole, rozhodl jsem se tento problém rozvést více detailněji v samostatné kapitole a zařadit ho do problémů, kterým se bude tato práce detailně věnovat. Podrobně jsou rozebrány dva hlavní přístupy. Protekční přístup, fungující jako proaktivní ochrana, která zabraňuje velkým ztrátám a maximalizuje úspěšnost přenosu dat za cenu většího využití zdrojů, a přístup obnovy, který reaguje na defekty v síti a až po spatření problému přechází do fáze obnovy a zajištění opětovného provozu spojů. V problému RSA byla rozebrána on-line i off-line verze problému, rozdíl mezi dynamickými a statickými algoritmy, nejpoužívanější směrovací přístupy i mnoho technik alokace spektra a jeho vývoj. Oba problémy obsahují i konkrétní ukázky algoritmů, které jsou v praxi používány.

Psaním této práce jsem velmi rozšířil své znalosti v oblasti optických sítí, poznal detailně novou rozšiřující se technologii a splnil tím svůj nepsaný osobní cíl. Tato práce může přinést užitečné informace osobám zabývajícím se optickými sítěmi a seznámit je s problémy, které se u nich vyskytují. V práci je stále prostor pro detailní rozbor dalších problémů, tudíž může sloužit jako kostra pro případná rozšíření.

Bibliografie

1. CHATTERJEE, Bijoy Chand; SARMA, Nityananda; OKI, Eiji. Routing and spectrum allocation in elastic optical networks: A tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* [online]. 2015, roč. 17, č. 3, s. 1776–1800 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z DOI: 10.1109/COMST.2015.2431731.
2. ZHU, Benyuan; FINI, John M; YAN, Man F; LIU, Xiang; CHANDRASEKHAR, S; TAUNAY, Thierry F; FISHTEYN, Michael; MONBERG, Eric; DIMARCELLO, Frank V. High-capacity space-division-multiplexed DWDM transmissions using multicore fiber. *Journal of lightwave technology* [online]. 2011, roč. 30, č. 4, s. 486–492 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z DOI: 10.1109/JLT.2011.2173793.
3. HAMDANI, Mustafa Maad; AUDAH, Lukman; RASHID, Sami Abduljabbar; AL-MASHHADANI, Mohammad A. Coarse WDM in metropolitan networks: challenges, standards, applications, and future role. In: *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2020, sv. 1530, s. 012062 [cit. 2022-04-03]. Č. 1. Dostupné z DOI: 10.1088/1742-6596/1530/1/012062.
4. GERSTEL, Ori; JINNO, Masahiko; LORD, Andrew; YOO, SJ Ben. Elastic optical networking: A new dawn for the optical layer? *IEEE communications Magazine* [online]. 2012, roč. 50, č. 2, s12–s20 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z DOI: 10.1109/MCOM.2012.6146481.
5. BUBNÍK, Lukáš. *Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH*. Optoelektrotechnika, [b.r.]. ISBN 978-80-88058-20-5.
6. TALEBI, Sahar; ALAM, Furqan; KATIB, Iyad; KHAMIS, Mohamed; SALAMA, Reda; ROUSKAS, George N. Spectrum management techniques for elastic optical networks: A survey. *Optical Switching and Networking* [online]. 2014, roč. 13, s. 34–48 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z DOI: DOI:10.1016/j.osn.2014.02.003.
7. OKI, Eiji; CHATTERJEE, Bijoy Chand. Design and control in elastic optical networks: Issues, challenges, and research directions. In: *2017 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)* [online]. 2017, s. 546–549 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z DOI: 10.1109/ICCNC.2017.7876187.
8. CHATTERJEE, Bijoy Chand; BA, Seydou; OKI, Eiji. Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* [online]. 2017, roč. 20, č. 1, s. 183–210 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z DOI: 10.1109/COMST.2017.2769102.
9. AMAR, Djamel; LE ROUZIC, Esther; BROCHIER, Nicolas; AUGÉ, Jean-Luc; LEPERS, Catherine; PERROT, Nancy. Spectrum fragmentation issue in flexible optical networks: analysis and good practices. *Photonic Network Communications* [online]. 2015, roč. 29, č. 3, s. 230–243 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z DOI: 10.1007/s11107-015-0487-1.

10. ZOUNEME, Boris Stephane; ANOH, Georges Noghbou; OUMTANAGA, Souleymane. Minimization of Spectrum Fragmentation for Improvement of the Quality of Service in Multi-fiber Elastic Optical Networks [online]. [B.r.] [cit. 2022-04-05]. Dostupné z DOI: 10.14569/IJACSA.2020.0110535.
11. BRASILEIRO, Ítalo; COSTA, Lucas; DRUMMOND, André. A survey on crosstalk and routing, modulation selection, core and spectrum allocation in elastic optical networks. *arXiv preprint arXiv:1907.08538* [online]. 2019 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z DOI: 10.48550/arXiv.1907.08538.
12. FORMATS, QAM. 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM, 256-QAM. *Diakses* [online]. [B.r.] [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/modulation/quadrature-amplitude-modulation-types-8qam-16qam-32qam-64qam-128qam-256qam.php>.
13. JANZEN, Robert; CHIRHEL, Sorina; KIM, Yeonjae; AIBIN, Michal. Modulation Assignment in Elastic Optical Networks Using Data Analytics. In: *2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE)* [online]. 2019, s. 1–4 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z DOI: 10.1109/CCECE.2019.8861862.
14. SHCHERBININ, Andrey D; LEONID, A Belov; KONDRASHOV, Alexander S. Intermodulation distortion analysis of a complex signal in a microwave optics transmission line. In: *ITM Web of Conferences* [online]. 2019, sv. 30, s. 14002 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z DOI: 10.1051/itmconf/20193014002.
15. WALKOWIAK, Krzysztof; KLINKOWSKI, Mirosław. Shared backup path protection in elastic optical networks: Modeling and optimization. In: *2013 9th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN)* [online]. 2013, s. 187–194 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6529859>.
16. KLINKOWSKI, Mirosław. An evolutionary algorithm approach for dedicated path protection problem in elastic optical networks. *Cybernetics and Systems* [online]. 2013, roč. 44, č. 6-7, s. 589–605 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z DOI: 10.1080/01969722.2013.803885.
17. GEISLER, David J; PROIETTI, Roberto; YIN, Yawei; SCOTT, Ryan P; CAI, Xinran; FONTAINE, Nicolas K; PARASCHIS, Loukas; GERSTEL, Ori; YOO, SJ Ben. The first testbed demonstration of a flexible bandwidth network with a real-time adaptive control plane. In: *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication* [online]. 2011, s. 1–3 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z DOI: 10.1364/ECOC.2011.Th.13.K.2.
18. LÓPEZ, Víctor; JIMÉNEZ, Rodrigo; DIOS, Óscar González de; FERNÁNDEZ-PALACIOS, Juan Pedro. Control plane architectures for elastic optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking* [online]. 2018, roč. 10, č. 2, A241–A249 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z DOI: 10.1364/JOCN.10.00A241.
19. SÓCRATES-DANTAS, Joana; CAREGLIO, Davide; PERELLÓ, Jordi; SILVEIRA, Regina Melo; RUGGIERO, Wilson Vicente; SOLÈ-PARETA, Josep. Challenges and requirements of a control plane for elastic optical networks. *Computer Networks* [online]. 2014, roč. 72, s. 156–171 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z DOI: 10.1016/j.comnet.2014.07.007.
20. GUNDETI, V. *Quality of service of wireless optical networks* [online]. 2014 [cit. 2022-04-21]. Dostupné z DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03772. Dis. pr.
21. RODRIGUES, Edson; OLIVEIRA, Helder MN Da S; DA FONSECA, Nelson LS. Crosstalk and Fragmentation-aware Algorithm for Space-Division Multiplexing Elastic Optical Networks. In: *2021 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)* [online]. 2021, s. 1–6 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z DOI: 10.1109/LATINCOM53176.2021.9647845.

22. ZHAO, Yongli; HU, Liyazhou; ZHU, Ruijie; YU, Xiaosong; LI, Yajie; WANG, Wei; ZHANG, Jie. Crosstalk-aware spectrum defragmentation by re-provisioning advance reservation requests in space division multiplexing enabled elastic optical networks with multi-core fiber. *Optics express* [online]. 2019, roč. 27, č. 4, s. 5014–5032 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z DOI: 10.1364/OE.27.005014.
23. KLINKOWSKI, Mirosław; LECHOWICZ, Piotr; WALKOWIAK, Krzysztof. A study on the impact of inter-core crosstalk on SDM network performance. In: *2018 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)* [online]. 2018, s. 404–408 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z DOI: 10.1109/ICCNC.2018.8390393.
24. TODOE, Hideki; HIROTA, Yusuke. Routing, spectrum and core assignment for space division multiplexing elastic optical networks. In: *2014 16th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks)* [online]. 2014, s. 1–7 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z DOI: 10.1109/NETWS.2014.6958538.
25. TAKAGI, Tatsumi; HASEGAWA, Hiroshi; SATO, Ken-ichi; SONE, Yoshiaki; KOZICKI, Bartłomiej; HIRANO, Akira; JINNO, Masahiko. Dynamic routing and frequency slot assignment for elastic optical path networks that adopt distance adaptive modulation. In: *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference* [online]. 2011, s. 1–3 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z DOI: 10.1364/OFC.2011.0TuI7.
26. KLINKOWSKI, Mirosław; RUIZ, Marc; VELASCO, Luis; CAREGLIO, Davide; LOPEZ, Victor; COMELLAS, Jaume. Elastic spectrum allocation for time-varying traffic in flexgrid optical networks. *IEEE journal on selected areas in communications* [online]. 2012, roč. 31, č. 1, s. 26–38 [cit. 2022-04-18].
27. SUBRAMANIAM, Suresh; BARRY, Richard A. Wavelength assignment in fixed routing WDM networks. In: *Proceedings of ICC'97-International Conference on Communications* [online]. 1997, sv. 1, s. 406–410 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z DOI: 10.1109/ICC.1997.605312.
28. JUE, Jason P; XIAO, Gaoxi. An adaptive routing algorithm for wavelength-routed optical networks with a distributed control scheme. In: *Proceedings Ninth International Conference on Computer Communications and Networks (Cat. No. 00EX440)* [online]. 2000, s. 192–197 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z DOI: 10.1109/ICCCN.2000.885490.
29. QIU, Yang; FAN, Zheyu; CHAN, Chun-Kit. Efficient routing and spectrum assignment in elastic optical networks with time scheduled traffic. *Optical Fiber Technology* [online]. 2016, roč. 30, s. 116–124 [cit. 2022-05-06].
30. SHEN, Gangxiang; WEI, Yue; BOSE, Sanjay K. Optimal design for shared backup path protected elastic optical networks under single-link failure. *Journal of Optical Communications and Networking* [online]. 2014, roč. 6, č. 7, s. 649–659 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z DOI: 10.1364/JOCN.6.000649.
31. KLINKOWSKI, Mirosław; WALKOWIAK, Krzysztof. Offline RSA algorithms for elastic optical networks with dedicated path protection consideration. In: *2012 IV International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems* [online]. 2012, s. 670–676 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z DOI: 10.1109/ICUMT.2012.6459751.
32. MAIER, Guido; PATTAVINA, Achille; DE PATRE, Simone; MARTINELLI, Mario. Optical network survivability: protection techniques in the WDM layer. *Photonic Network Communications* [online]. 2002, roč. 4, č. 3, s. 251–269 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z DOI: 10.1023/A:1016047527226.

33. TOMASSILLI, Andrea; JAUMARD, Brigitte; GIROIRE, Frédéric. Path protection in optical flexible networks with distance-adaptive modulation formats. In: *2018 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)* [online]. 2018, s. 30–35 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z DOI: 10.23919/ONDM.2018.8396102.
34. SHEN, Gangxiang; GUO, Hong; BOSE, Sanjay K. Survivable elastic optical networks: survey and perspective. *Photonic Network Communications* [online]. 2016, roč. 31, č. 1, s. 71–87 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z DOI: 10.1007/s11107-015-0532-0.
35. SHAKOURI, Saba; RAHBAR, Akbar Ghaffarpour. Proactive restoration with low re-provisioning in Elastic Optical Networks. *Computer Networks* [online]. 2021, roč. 197, s. 108284 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z DOI: 10.1016/j.comnet.2021.108284.
36. SONE, Yoshiaki; WATANABE, Atsushi; IMAJUKU, Wataru; TSUKISHIMA, Yukio; KOZICKI, Bartłomiej; TAKARA, Hidehiko; JINNO, Masahiko. Highly survivable restoration scheme employing optical bandwidth squeezing in spectrum-sliced elastic optical path (SLICE) network. In: *Optical Fiber Communication Conference* [online]. 2009, OThO2 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z DOI: 10.1364/OFC.2009.OThO2.
37. YADAV, Dharmendra Singh; BABU, Sarath; MANOJ, BS. Quasi Path Restoration: A post-failure recovery scheme over pre-allocated backup resource for elastic optical networks. *Optical Fiber Technology* [online]. 2018, roč. 41, s. 139–154 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z DOI: 10.1016/j.yofte.2018.01.011.