

PŘEPÍNÁNÍ A SMĚROVÁNÍ OPTICKÝCH SIGNÁLŮ - JE UŽ TO TADY?

Anton Kuchar

Ústav fotoniky a elektroniky AV ČR v.v.i., Chaberská 57, 182 51 Praha 8,
kuchar@ufe.cz

Anotace

V příspěvku je referováno o současném stavu techniky přepínání a směrování optických signálů s cílem odpovědět na otázku, zda její vývoj dospěl již tak daleko, že v uzlech optických sítí již lze provádět tyto funkce čistě optickými prostředky. Z podaného přehledu metod přepojování optických okruhů a paketů a vysvětlení problému směrování v sítích WDM vyplývá, že ryze optickými prostředky lze v současné době sestavovat pouze okruhy na bázi vlnových délek, protože komerčně provozované ústředny pro směrování paketů se zatím neobejdou bez O/E/O převodníků a elektronického zpracování přenášených paketů v mezilehlých uzlech optických sítí.

Klíčová slova

Telekomunikační sítě, širokopásmové sítě, optické komunikace, optické přepojování signálů, ROADM, OXC.

1. Úvod

Exponenciální nárůst provozu v telekomunikačních sítích stále pokračuje, zejména díky rostoucí oblíbenosti video komunikace, decentralizaci výpočetních operací rozvojem "cloud computing" a rostoucímu počtu vysokorychlostních pevných i mobilních (zejména "chytrých" telefonů) přípojek k Internetu. Stále více služeb se přesouvá na Internet. Odhaduje se, že provoz na Internetu roste ročně o 30 až 40%. Při tomto tempu růstu by se provoz na Internetu za 20let zvýšil proti současnému stavu až tisíckrát [1]! Protože lze předpokládat, že přenos signálů na dálku bude i nadále zajišťován prostřednictvím optických sítí, vzniká otázka, jak zajistit, aby nárůst jejich přenosové kapacity držel krok s požadavky poskytovatelů služeb založených na přenosu informace. Jsou dvě možnosti, jak řešit tento úkol: Technickým pokrokem v oblasti optického sdělování a zdokonalováním architektury optických sítí. V našem příspěvku se zaměříme na první možnost.

Pro spojení mezi uzly sítí a pro komunikaci s pevnými koncovými body sítě nemají optické komunikace konkurenci. Avšak zatímco poslední kvalitativní skok ve vývoji optických spojů - aplikace sofistikovaných modulačních metod a koherentního příjmu optických signálů s využitím výkonných elektronických signálových procesorů - umožnil násobně zvýšit přenosovou kapacitu spojů na jednotlivých vlnových délkách na 100 Gb/s a výše, s využitím DWDM pak přenosovou kapacitu jednotlivých světlovodů na desítky Tb/s, úzkým hrdlem světlovodných sítí se stávají jejich uzly, standardně vybavené optoelektronickými převodníky a elektronickými přepojovacími, resp. směrovacími ústřednami. Řešením tohoto problému by mohlo být zavedení ryze optického přepojování/směrování přenášených signálů. Cílem tohoto přehledového příspěvku je informovat posluchače jak daleko postoupila optifikace uzlů telekomunikačních sítí uplatněním jednotlivých metod přepínání a směrování optických signálů. Jedná se o systémový pohled zahrnující technické i ekonomické

aspekty aplikace optického zpracování signálů v uzlech telekomunikačních sítí. Je podán přehled základních metod přepojování optických signálů manipulací vlnových délek, dávek i jednotlivých paketů. Hodnotícími kritérii pro aplikovatelnost příslušných zařízení jsou jejich propustnost, rozšiřitelnost, zpoždění, která vnášejí do přenosu signálů, jejich energetická spotřeba, atd. Závěr příspěvku obsahuje odpověď autora na otázku uvedenou v nadpisu a její zdůvodnění.

2. Přepojování optických signálů

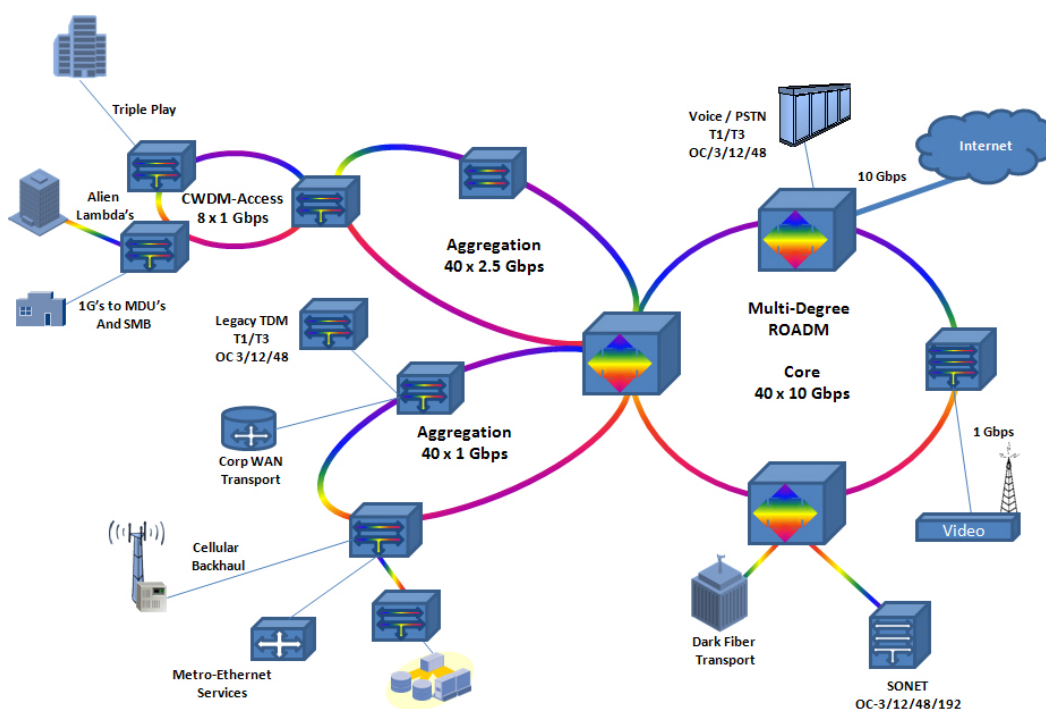
Základní dělení přepojování signálů v optickém tvaru:

- Přepojování okruhů ("Optical Circuit Switching", OCS) na úrovni vlnových délek v sítích využívajících DWDM
- Přepojování paketů ("Optical Packet Switching", OPS), resp. jejich skupin ("dávek" - "Optical Burst Switching", OBS).

2.1. Přepojování optických okruhů

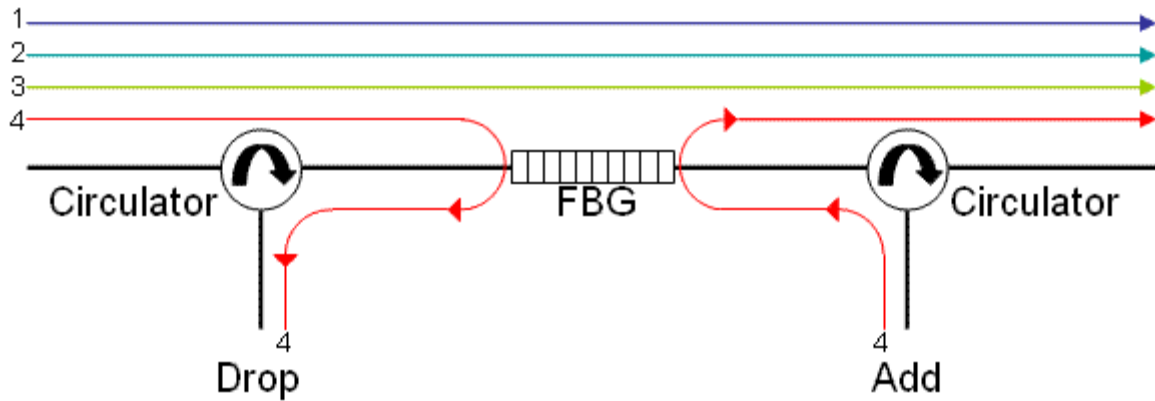
Přepojování optických okruhů na úrovni vlnových délek se v uzlech sítě provádí pomocí optických multiplexorů, umožňujících z vlnového multiplexu vyčlenit, resp. do něj včlenit signál přenášený na určité vlnové délce (Optical Add-Drop Multiplexer - OADM), resp. pomocí optických přepojovačů, umožňujících z vlnového multiplexu na vstupu přepojovat signály přenášených světlovodou na vícero vlnových délkách na kterýkoliv výstup (křížový přepínač optických signálů, Optical Cross-Connect - OXC).

Obecné schéma optické sítě využívající WDM a OADM je na obr. 1 [2]. V první generaci OADM se příchozí WDM signálové toky na jednotlivých optických vláknech po vlnovém demultiplexování na vstupu OADM přepojovaly do odboček (pro místní provoz) ručně. Obdobně se začleňovaly signály z místního provozu na přidělených vlnových délkách do výstupního vlnového multiplexoru ručně.

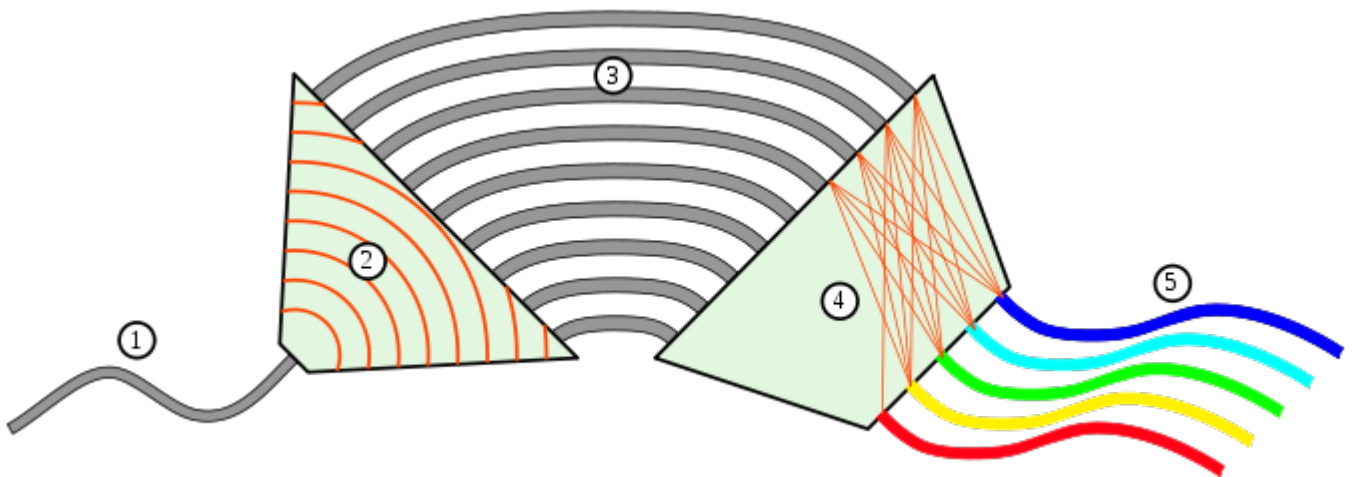


Obr. 1. Obecné schéma telekomunikačních sítí využívající optický přenos a přepojování signálů pomocí OADM [2].

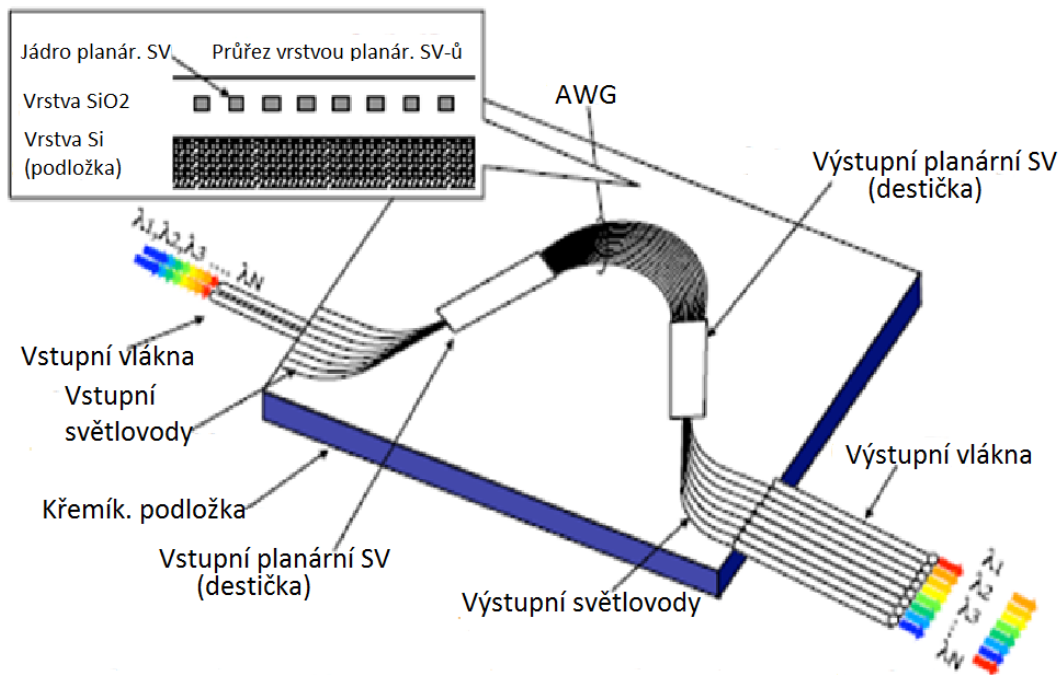
Pro selekci, resp. filtraci vlnových délek se využívají tenkovrstvové filtry, Braggovské mřížky vytvořené na optických vláknech (Fibre Bragg Grating, FBG) spolu s optickými cirkulátory (viz obr. 2 [3]), fázované řady planárních optických vlnodů (Arrayed Waveguide Gratings, AWG, viz obr. 3, detailně na obr. 4), apod.



Obr. 2. OADM první generace [3]. FBG = Braggovská mřížka

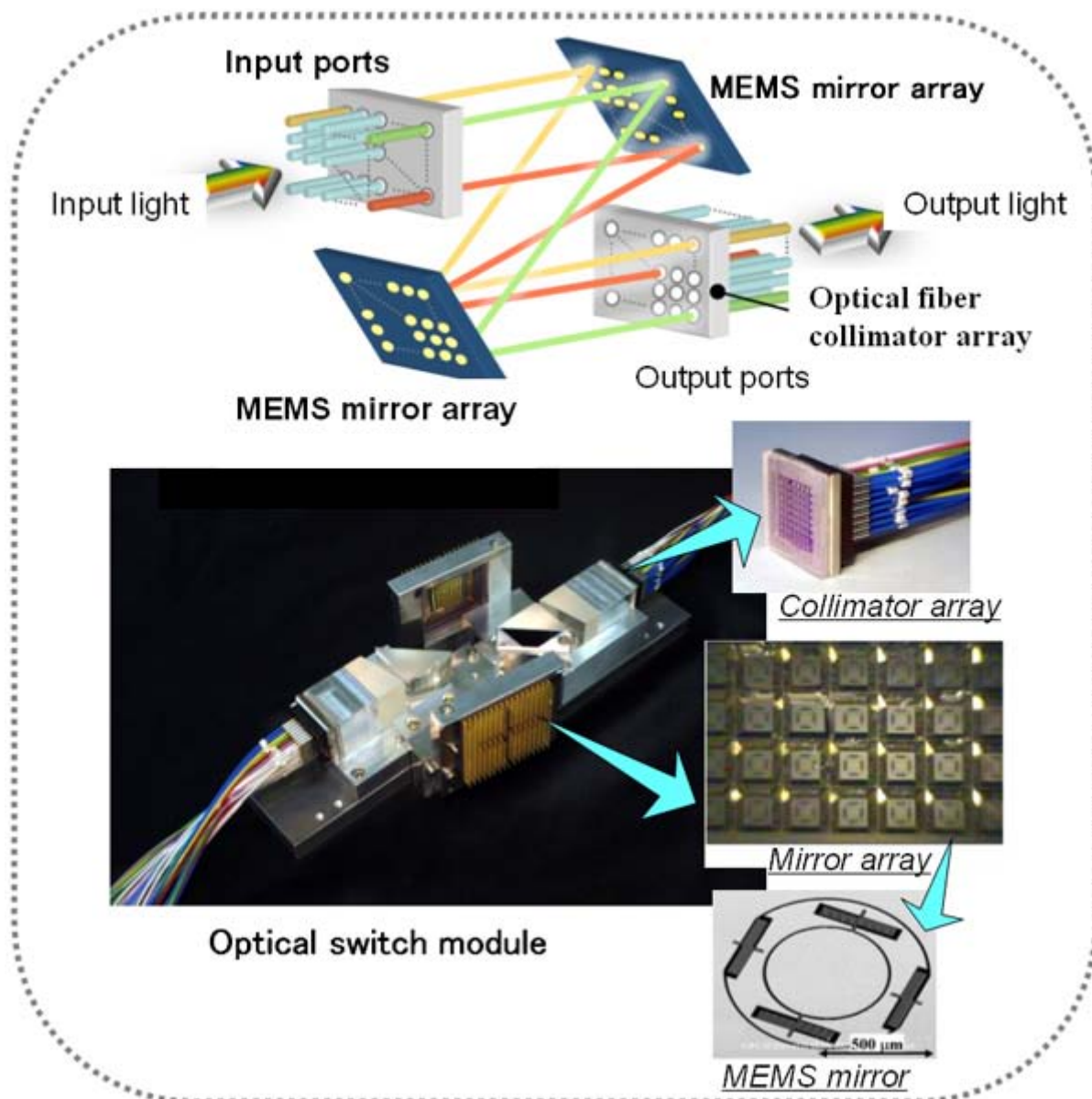


Obr. 3. Fázované řady planárních optických vlnodů (Arrayed waveguide gratings, AWG), [3])



Obr. 4. Znáznornění fázované řady optických planárních vlnovodů ve funkci vlnového demultiplexoru

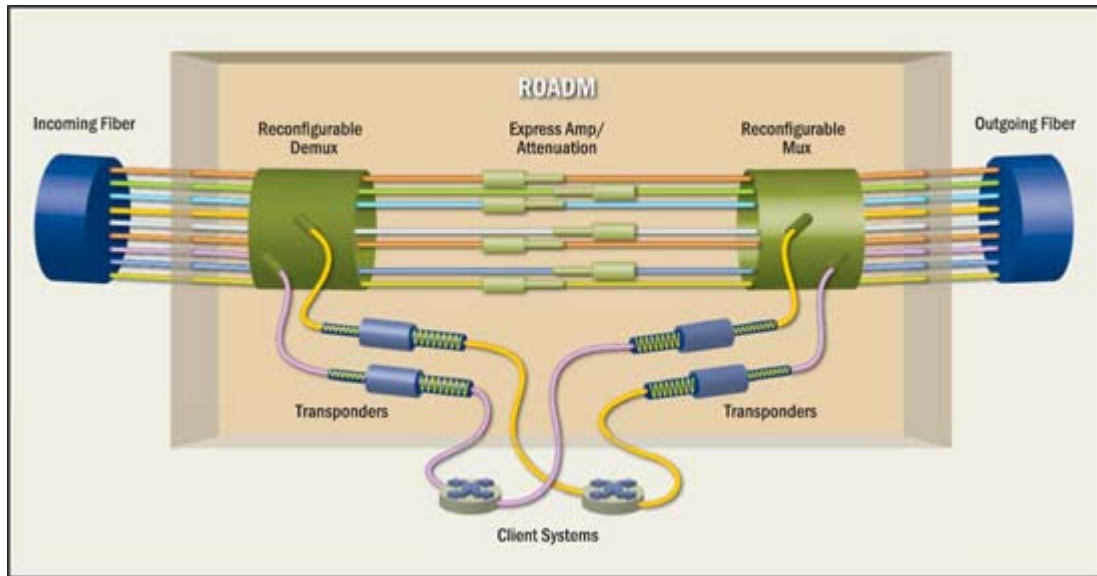
Druhá generace OADM umožňuje výběr vlnových délek pro místní provoz (vy/za-členění) z/do vlnového multiplexu naprogramovat, resp. ovládat na dálku. Tento typ OADM se nazývá rekonfigurovatelný OADM (ROADM). Jádrem ROADM jsou vlnově selektivní spínače (WSS), které plní funkci přepojovací matice. Vlnová selekce se provádí pomocí vhodných typů přeladitelných optických filtrů jako u první generace OADM. Pro spínání a rekonfiguraci se využívají mikroelektromechanické systémy (MicroElectroMechanical Systems, MEMS, viz obr. 5), tekuté krystaly, planární optické vlnovody, ap.



Obr. 5. Modul optického spínače využívajícího matici MEMS

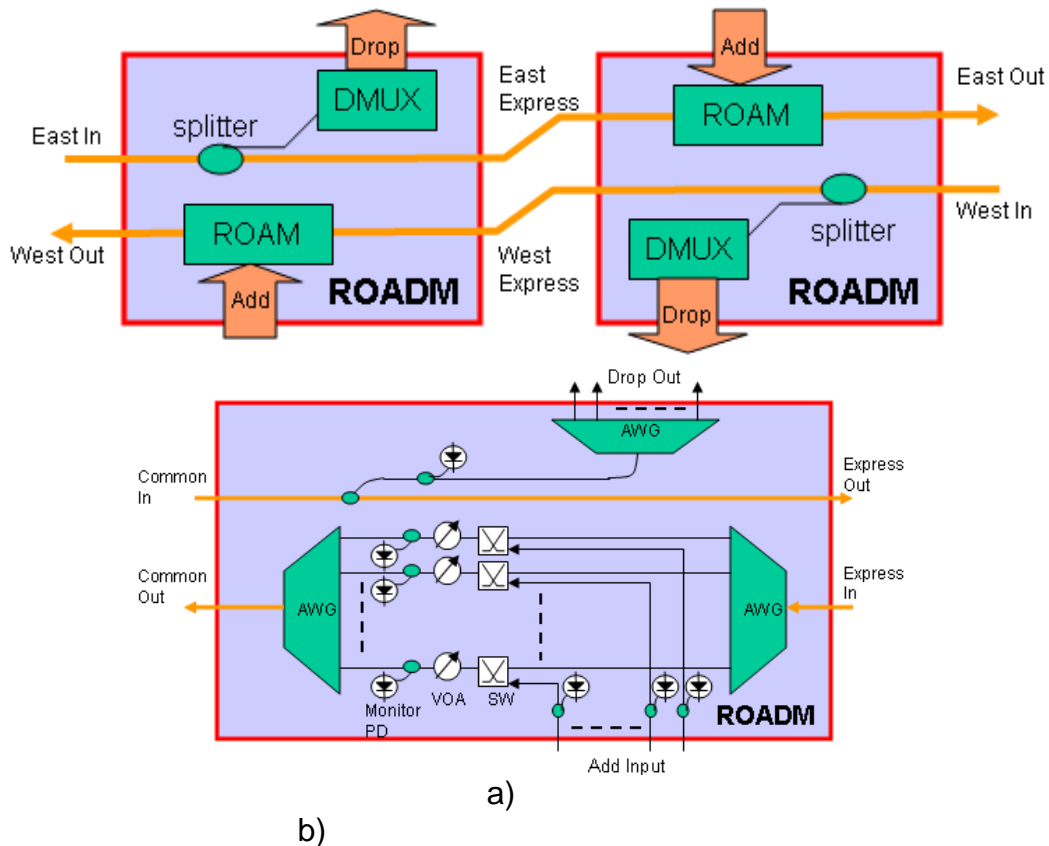
Obr. 6 ilustruje princip činnosti ROADM. Vstupní vlákno zleva přivádí soubor vlnových délek do rekonfigurovatelného WDM demultiplexoru, který umožňuje z něj vybrat vlnové délky nesoucí signály určené pro místní provoz. Ostatní vlnové délky po případném zesílení, resp. utlumení (kvůli vyrovnání výkonové úrovně postupujících vlnových délek) jsou v rekonfigurovatelném multiplexoru zkombinovány

s vlnovými délkami nesoucími signály generovanými klienty v dané lokalitě pro komunikaci s ostatními klienty připojenými k síti v dalších uzlech. Transpondéry jsou O/E, resp. E/O převodníky signálů. "Client Systems" jsou elektronické směrovače, např. IP paketů.

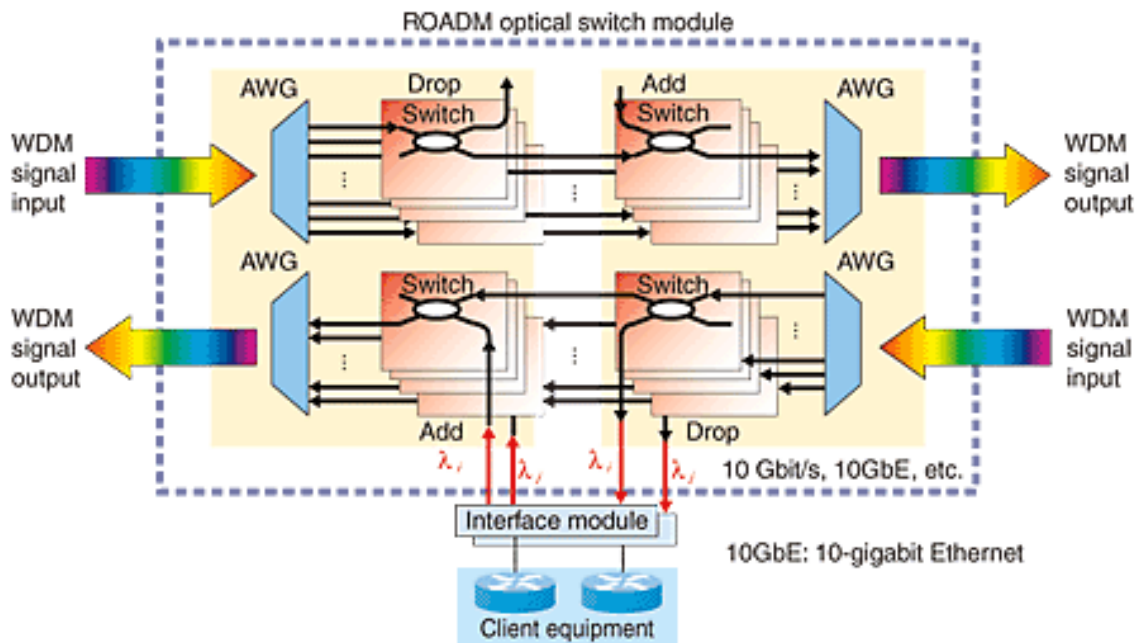


Obr. 6. Ilustrace činnosti ROADM v uzlu sítě [4].

Příklad ROADM modulu pro využití v optické metropolitní síti je na obr. 7, jiný příklad uspořádání kompletního modulu OADM je na obr. 8.

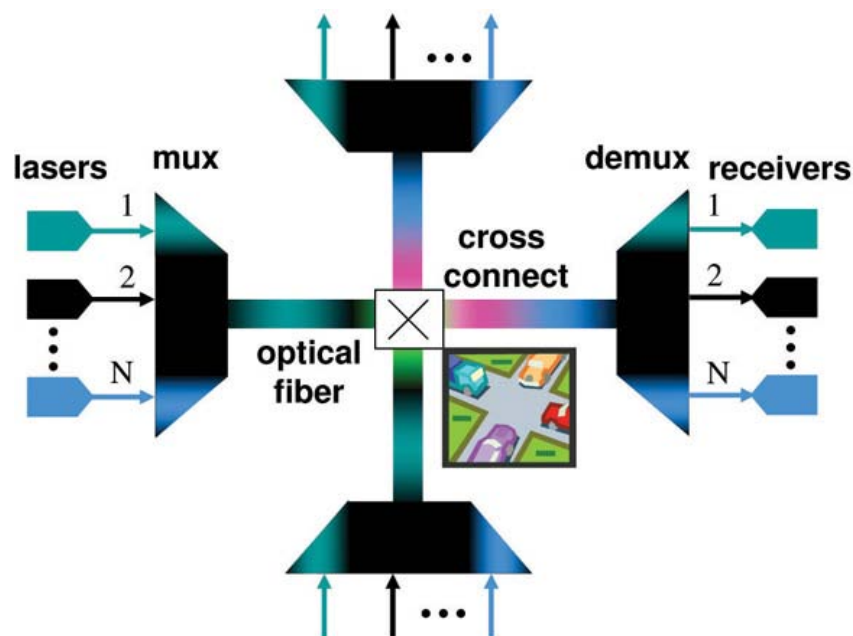


Obr. 7. Příklad ROADM modulu pro využití v optické metropolitní síti [5]. a) Funkční schéma. b) Vnitřní uspořádání. PD = fotodetektor, VOA = proměnný optický atenuátor, SW = optický přepínač 1x2.

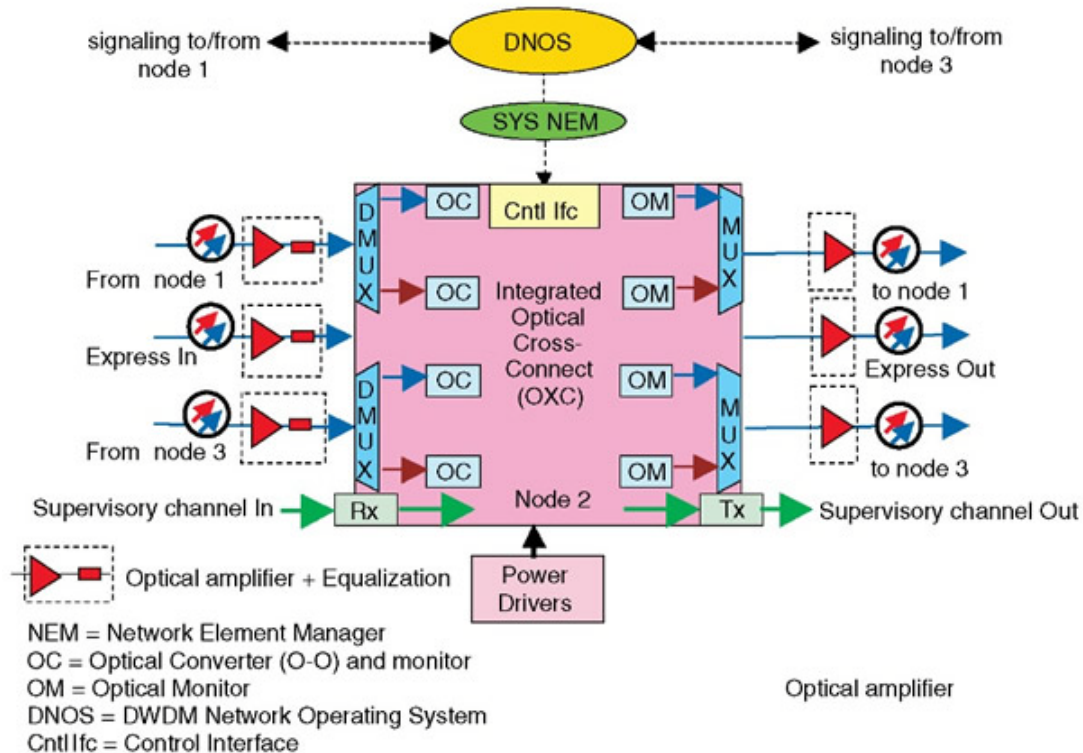


Obr. 8. Typická konfigurace spínacího modulu ROADM v optické metropolitní síti [6].

Optické křížové spínače (OXC) jsou využívány v polygonálních páteřních sítích. Kromě vy/začlenění signálů místního provozu umožňují nasměrovat kterýkoliv vstupní signálový tok (včetně místního provozu) na libovolný výstup. Princip činnosti křížového přepínače optických signálů je znázorněn na obr. 9. Příklad uspořádání experimentálního OXC je na obr. 10.



Obr. 9. Funkce křížového přepínače optických signálů (OXC). Zleva - vstupní signálové toky, vpravo výstupy z uzlu, zdola - vstupy z, nahoře výstupy místního provozu do daného uzlu sítě [7].



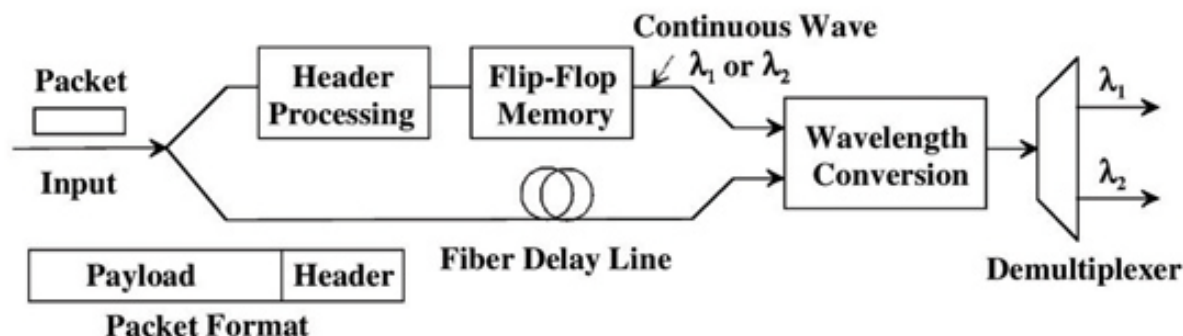
Obr. 10. Příklad uspořádání experimentálního přepínače optických signálů [8].

2.2. Přepojování optických paketů

Protože většina telekomunikačních služeb je již poskytována přes Internet na bázi IP protokolu, kdy signály jsou přenášeny nepravidelně a v různě dlouhých dávkách a intenzita provozu se rychle mění, je využívání sítí s přepojováním okruhů neefektivní. Proto již řadu let se snaží výzkumní pracovníci navrhnout a výrobci realizovat techniku přenosu a přepojování paketů v optickém tvaru. Paketové sítě umožňují rychlé sestavení spojů na požádání a s výhodou využívat statistické multiplexování, čímž se dosáhne lepšího využití přenosové kapacity sítí. Umožňují také poměrně snadno realizovat tzv. multicasting, t.j. rozesílání paketů dat do mnoha destinací najednou v téměř reálném čase. V současné době jsou elektronické IP směrovače propojeny optickými okruhy. Na jejich vstupech jsou pakety převedeny do elektrického formátu, roztříděny na místní a tranzitní, které jsou pak převedeny do optického tvaru a odeslány dál do sítě. Nevýhodou tohoto způsobu (ryze elektronického) přepojování paketů je významné navýšení nákladů na pořízení a provoz O/E/O převodníků, zejména na jejich spotřebu energie. Kromě toho neustále rostou požadavky na propustnost IP směrovačů (= součin počtu portů a jejich přenosových rychlostí), které přes pokroky elektronických technologií tyto požadavky splňují jen s velkými obtížemi. Důležitým faktorem je i jejich spotřeba energie. Uvádí se, že dnešní elektronické IP směrovače mají spotřebu energie kolem 10W na 1 Gb/s. Zvážíme-li, že již komerčně nabízené a instalované (koherentní) přenosové systémy umožňují přenášet 100 Gb/s na jedné vlnové délce a těch může být v jednom vlákne např. 100 i více, pak např. elektronický směrovač řádu 4x4 by musel mít kapacitu (propustnost) $100 \times 100 \times 4 = 40 \text{ Tb/s}$ a tudíž příkon 400 kW!

Logickým krokem ve vývoji paketových směrovačů by tedy bylo přepojovat pakety v optickém tvaru, kdy by se do elektronického tvaru převáděly pouze pakety určené pro místný provoz, zatímco pakety určené pro tranzit by zůstaly (a nasměrovány) v optickém tvaru, čímž by se podstatně zjednodušila konstrukce a

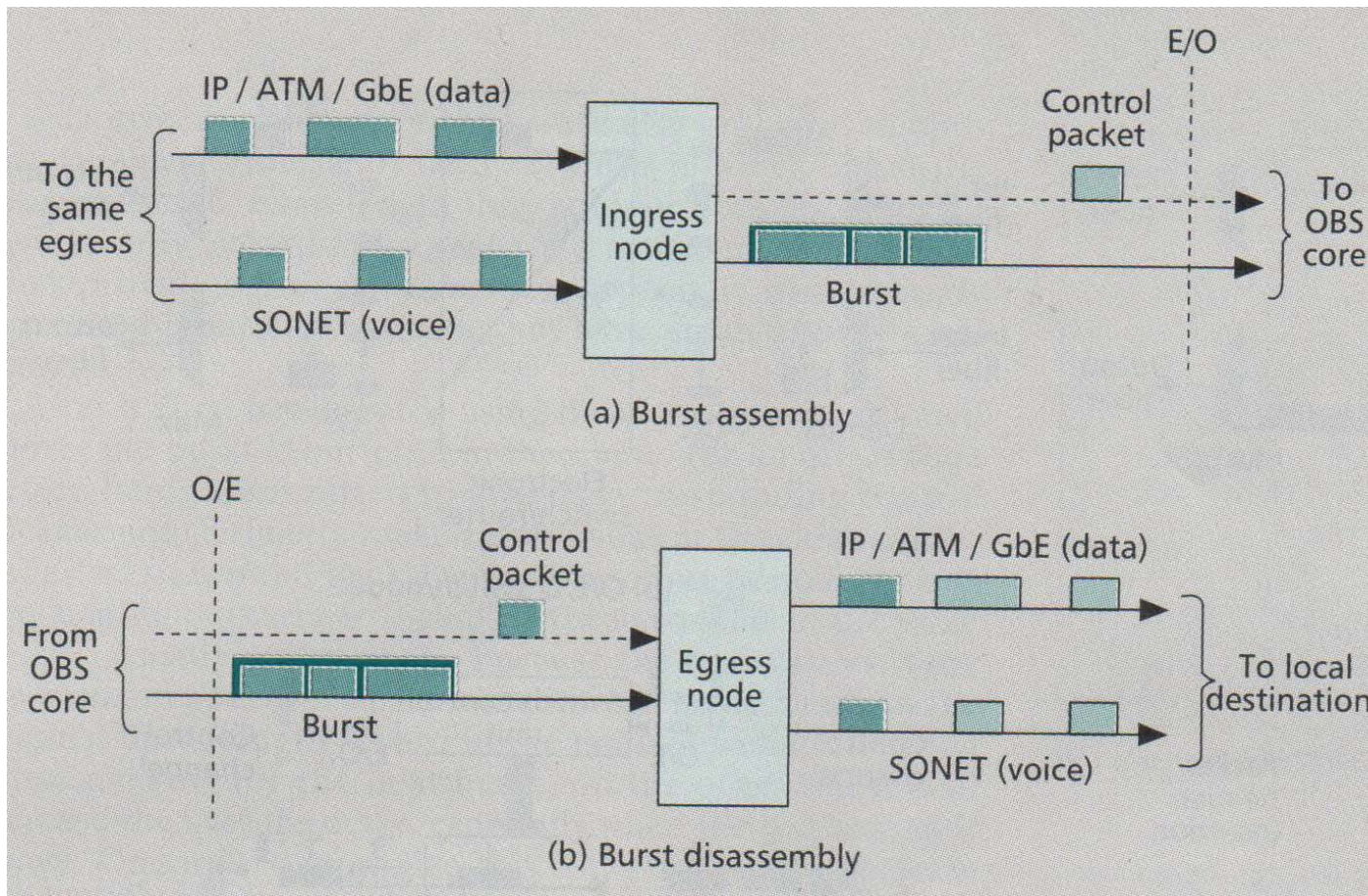
současně snížila energetická spotřeba paketových směrovačů. Funkční schéma ryze optického přepínače paketů je na obr. 11.



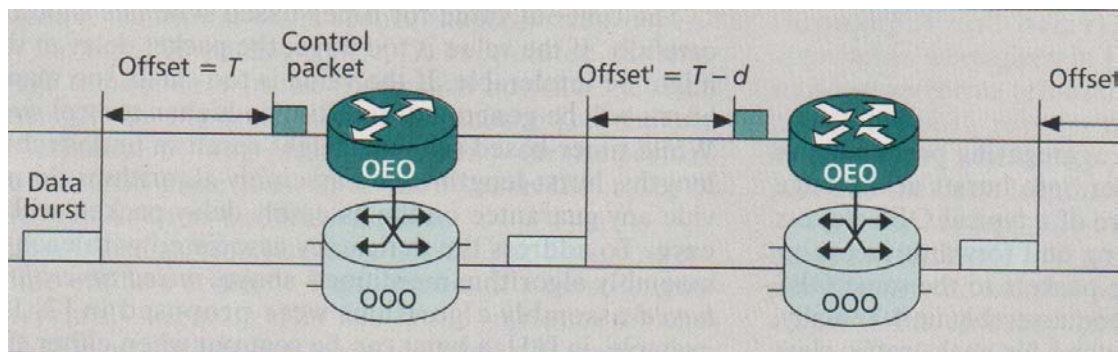
Obr. 11. Princip funkce ryze optického přepínače paketů (OXC) s jedním vstupem a dvěma výstupy. Header = hlavička paketu, payload = užitečná data, wavelength conversion = měnič vlnové délky [7].

Problém realizace ryze optického přepínače spočívá především v tom, že zatím se nepodařilo realizovat prakticky použitelnou optickou paměť typu RAM, která je pro realizaci ústředěn s ryze optickým přepojováním paketů nezbytná pro řešení kolizních situací, kdy do uzlu dorazí současně více paketů z různých zdrojů určených pro stejnou destinaci. Pak na příslušném výstupu OXC by došlo ke kolizi. Musí tudíž být pomocí paměti vytvořena fronta paketů čekajících na odeslání do stejného směru. V různých prototypy byly pro funkci paměti použity světlovodné (vláknové) zpoždovací linky, které jsou rozměrné a pro praktické použití těžkopádné. Chybí také prakticky použitelné velmi rychlé optické obvody pro zpracování hlaviček paketů, proto se v prototypy hlavičky paketů po oddělení části optického výkonu přichozícího signálu převádějí do a zpracovávají v elektrickém tvaru. Problémem jsou také rychlé optické spínače pro realizaci spojovacího pole (matice) řízené informacemi získanými z hlaviček paketů. Tyto matice jsou nedílnou součástí všech směrovačů paketů. Optická hradla, která by rychlostí spínání pro tento účel vyhovovala (polovodičová, planární), jsou spolu s napájecími obvody příliš rozměrná a náročná na spotřebu energie. Z uvedených důvodů nebylo ryze optické přepojování paketů zatím uplatněno v praxi.

Kompromisní alternativou ryze optického přepojování paketů v uzlech světlovodných sítí (OPS) je optické přepojování dávek (skupin paketů, Optical Burst Switching, OBS). Je to kompromis mezi OCS a OPS. Princip optických sítí využívajících OBS spočívá v ryze optickém přepojování a směrování skupin paketů (dávek, skládajících se typicky z několika desítek až stovek kB, např. IP pakety), které mají stejnou adresu místa určení, stejné požadavky na kvalitu služby, atd. Cesta, po které jsou doručovány, je předem vytyčena speciálním krátkým (řídícím) paketem, vyslaným po separátním kanálu s dostatečným předstihem před dávkou dat (skupin paketů, přenášejících uživatelská data). Řídící paket obsahuje informaci na kterém kanálu (vlnové délce) přijde dávka dat, jak bude dlouhá a adresu destinace. V mezilehlých uzlech sítí jsou řídicí pakety zpracovávány elektronicky. Jejich spínače nastaví tak, aby dávky, které nejsou určeny pro místní provoz (tranzit) prošly daným uzlem v optickém tvaru přímo na určený výstup, který jim předtím zarezervoval řídicí paket. Mechanismus přenosu dávek dat optickými sítěmi znázorňují obr. 12 a 13.



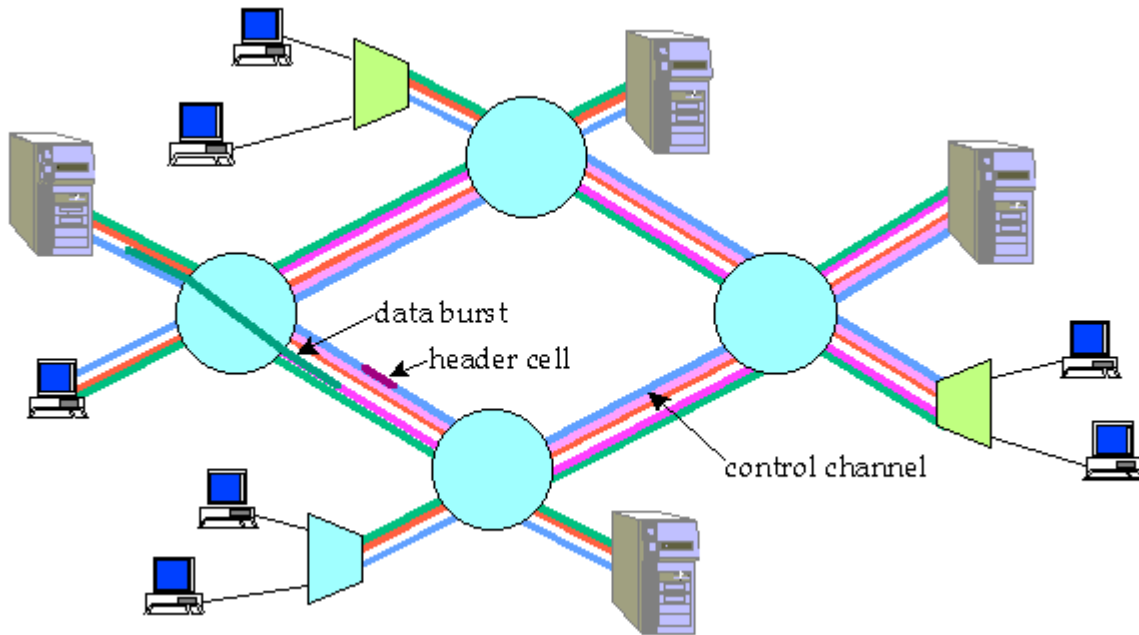
Obr. 12. Znárodnění procesu sestavování (a) a rozdřlování (b) dávek dat v koncových uzlech sítě využívající OBS. Ingress node = vstupní (přístupový) uzel sítě, Egress node = výstupní uzel sítě (destinace) [12].



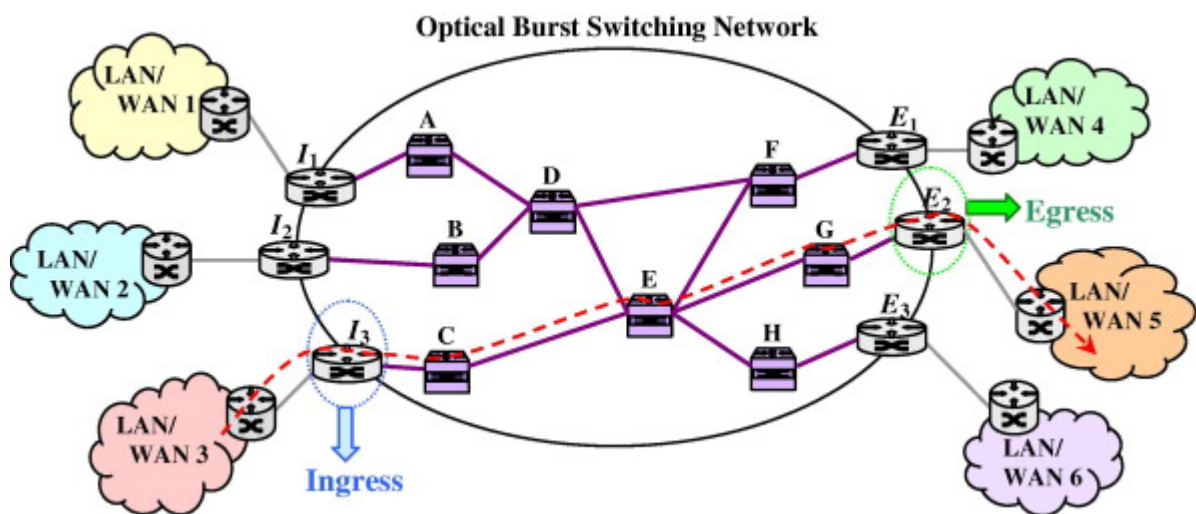
Obr. 13. Dávky dat (Data burst) a řídicí pakety (control packet) jsou sítěmi využívající OBS přenášeny samostatnými kanály. Offset = předstih, ve kterém je do sítě vyslán řídicí paket před dávkou dat, pro kterou v mezilehlých uzlech sítě nastaví cestu od zdroje dat k jejich příjemci [12].

Spínače pro OBS jsou mnohem jednodušší než spínače pro OPS a pro svojí činnost potřebují mnohem menší kapacitu vyrovnávací paměti pro řešení kolizních stavů. Daní za toto zjednodušení je však větší složitost přístupových uzlů sítě, ve kterých jsou tříděny přicházející od koncových zákazníků a seřazovány do dávek dat,

vypočítává se potřebný předstih řídicího paketu a prováděny funkce. Bylo navrženo mnoho metod, jak tento princip přenosu a přepojování dávek dat realizovat. Zatím však byla do zkušebního provozu uvedena pouze jedna síť tohoto typu v Irsku. Mezi problémy, které je při návrhu sítí OBS řešit, patří především realizace vhodné metody sestavování dávek paketů (agregace), stanovení optimálního předstihu signálního paketu před odesláním vlastní dávky paketů, zabezpečení přenášených dat proti zneužití, atd. Princip činnosti sítí OBS znázorňuje obr. 14 [9], topologie je na obr. 15 [10].



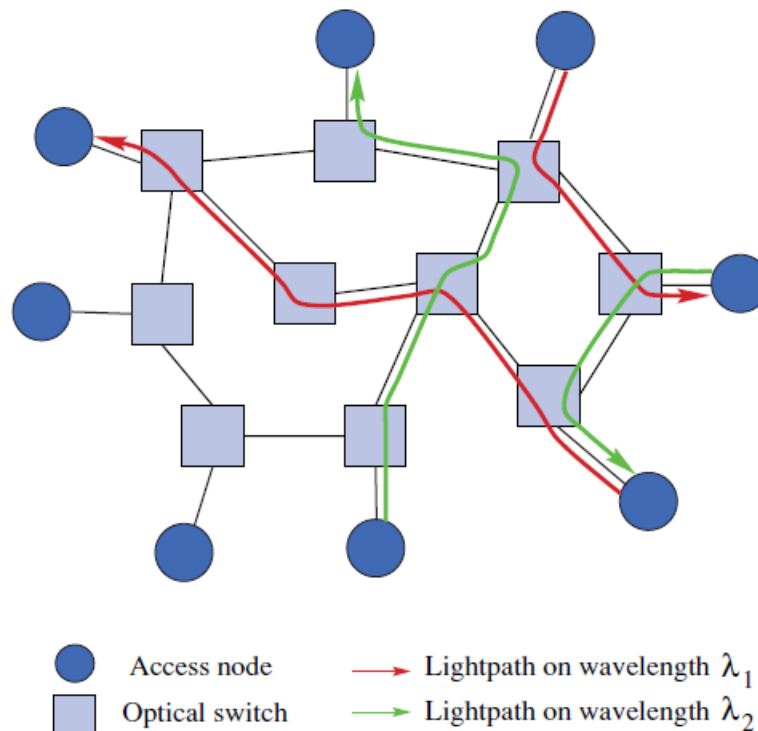
Obr. 14. Schematické znázornění činnosti sítě s optickým přepojováním dávek dat (OBS). Burst = dávka dat (soubor paketů), header = řídicí paket vysílaný zvláštním (řídicím) kanálem (např. na určité vlnové délce) s dostatečným předstihem před dávkou dat [9].



Obr. 15. Příklad uspořádání sítě s optickým přepojováním dávek dat (OBS) [10].

3. Směrování optických signálů

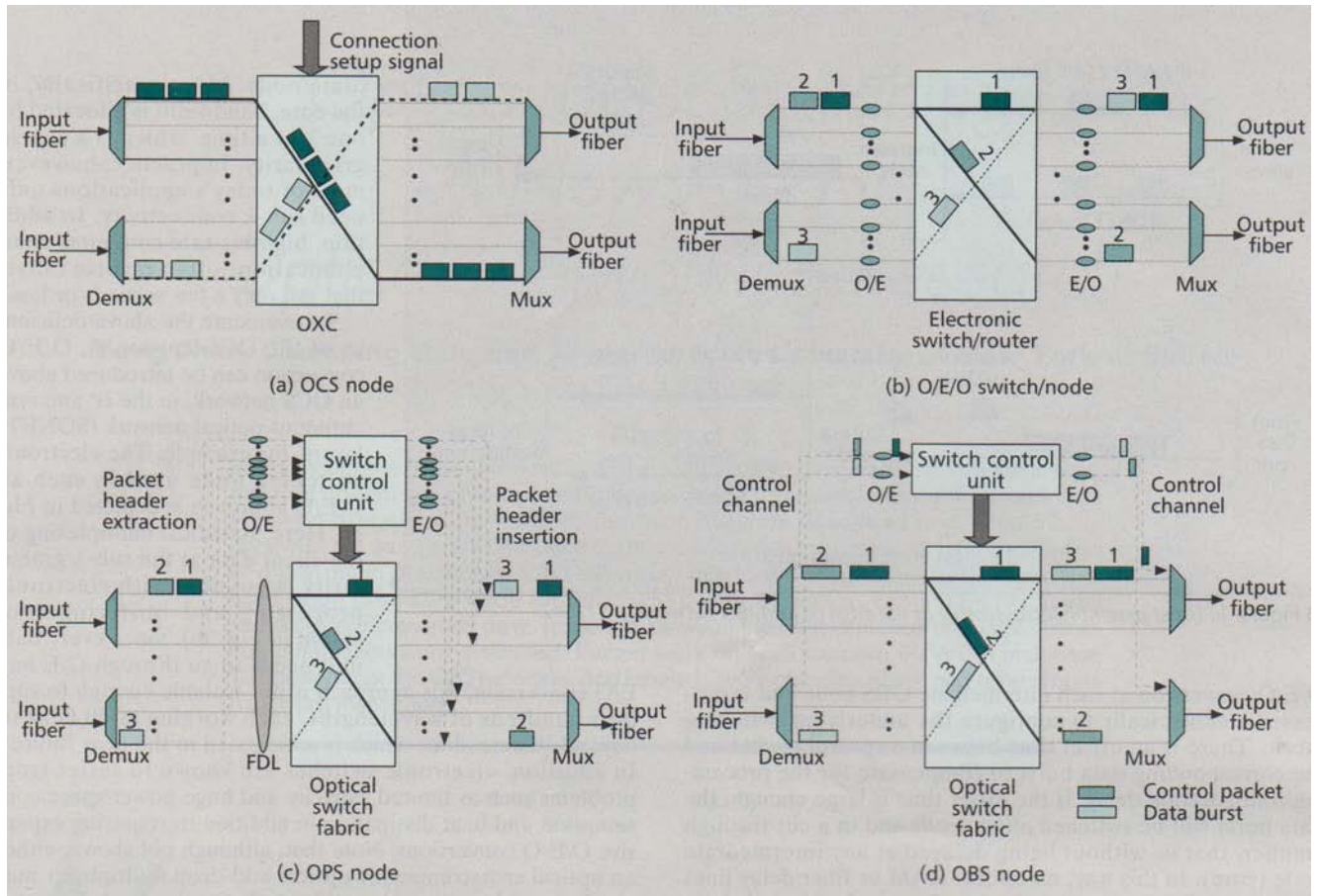
Samostatným problémem při realizaci ryze optického přenosu a přepojování signálů je vytyčení optimální trasy (cesty) v sítích WDM, po které bude signál po stanovenou dobu přenášen od zdroje přes mezilehlé uzly sítě k příjemci do místa určení (destinace) a určení vlnové délky optické nosné, na které se přenos uskuteční od zdroje signálu k příjemci. Tento problém je v literatuře nazýván "Routing and Wavelength Assignment" (RWA). Bylo navrženo mnoho řešení tohoto problému - matematických algoritmů pro výpočet optické cesty od zdroje signálu do místa určení při respektování požadavku, aby v mezilehlých uzlech sítě nebylo třeba měnit vlnovou délku, protože měniče vlnové délky jsou zatím velmi drahé. Vstupními parametry pro řešení problému RWA jsou údaje o momentálním stavu sítě, t.j. zejména které vlnové délky jsou na jednotlivých úsecích vytyčené cesty volné. Intenzita provozu v různých částech sítě se může rychle měnit, proto zvolený algoritmus by měl být dostatečně rychlý a realizován v reálném čase buď v řídicím centru sítě, nebo decentralizovaným způsobem v uzlech sítě. Problém RWA má dvě varianty - statickou, kdy provozní požadavky jsou známy předem (naplánovány) a dynamickou, kdy požadavky na spojení přicházejí náhodně. Princip RWA je ilustrován na obr. 16 [11].



Obr. 16. Ilustrace principu směrování signálů v sítích WDM (problém RWA) [11].

V ryze optických paketových sítích (OPS) je informace pro nasměrování paketů obsažena v jejich hlavičce. V sítích s přepojováním dávek paketů (OBS) je tato informace obsažena v řídicím paketu, který sestaví cestu datovým dávkám před jejich odesláním do místa určení nakonfigurováním mezilehlých uzlů sítě.

Obr. 17 ukazuje pro porovnání základní alternativy realizace přepojování a směrování signálů v optických sítích.



Obr. 17. Porovnání funkce základních řešení pro přepojování signálů v optických sítích [12].

4. Závěr

V současné době je přepojování signálů v uzlech sítě ryze optickými prostředky pouze na úrovni přepojování okruhů. Optické okruhy jsou realizovány na jednotlivých vlnových délkách. Ačkoliv bylo navrženo mnoho způsobů, jak efektivněji využívat přenosovou kapacitu jednotlivých vlnových délek přenášejících nespojitě toky dat, jemněji granulované přepojování (rámců, paketů) se v praxi zatím provádí výhradně elektronicky. Zavedení ryze optického přepojování s jemnějším rozlišením než vlnová délka do praxe stále ještě není na pořadu dne jednak proto, že pro to chybí některé základní prakticky použitelné prvky a také proto, že elektronika stále ještě nevyčerpala svůj potenciál pro realizaci složitých, na energii neustále méně náročných a přitom stále rychlejších a hustěji integrovaných obvodů potřebných pro realizaci vysokokapacitních telekomunikačních paketových ústředí.

Literatura

- [1] Saleh A.A.M.: "Technology and architecture to enable the explosive growth of the Internet". IEEE Commun. Magazine, Jan. 2011, pp. 126 - 132
- [2] [Sol-WDM-Network.jpg](#)
- [3] Wikipedia
- [4] Int. Engineering Consortium, January 2006, Vol. 2: Broadband Trends
- [5] http://www.ntt-electronics.com/en/products/photonics/recon_roadm.html
- [6] <https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr200706sf2.html>

- [7] <http://spie.org/x14149.xml> (obr. 9 a 11)
- [8] <http://www.globalspec.com/reference/21567/160210/chapter-4-9-2-large-optical-cross-connect-systems>
- [9] http://www.isoc.org/inet99/proceedings/4j/4j_3.htm
- [10] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366409002461>
- [11] <http://www.sprintlabs.com/~hzang/publications/RWA.pdf>.
- [12] Chen Y., Quiao Ch., Yu X.: "Optical burst switching - a new area in optical networking research". IEEE Network, May/June 2004, str. 16 - 23.