

Hullámhossz-osztásos, csomagkapcsolt optikai hálózatok

DEME ILDIKÓ, KOVÁCS ATTILA PH.D. HALLGATÓK

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Szélessávú Hírközlő és Villamosságtan Tanszék
deme@mht.bme.hu, kovacs@mht.bme.hu

Kulcsszavak: WDM, csomagkapcsolt optikai hálózatok, optikai címfeldolgozás

Napjaink egyre növekvő sávszélesség igénye szükségessé tette a nagysebességű, transzparens optikai hálózatok alkalmazását. Mivel az aktív optikai eszközök nagy része még fejlesztés alatt áll, és a használatukkal járó megkötések miatt a hálózati eszközöket tervező mérnökök a legtöbb esetben korlátokba ütköznek, így joggal merül fel a kérdés: milyen fejlesztési, kutatási irányzatok várhatóak a közeljövőben, milyen konkrét problémák várnak megoldásra? Cikkünk a modern, csomagkapcsolt optikai hálózatok várható fejlődési irányzatait próbálja bemutatni különös tekintettel a soros és segédvívós címzést alkalmazó megoldásra. Az optikai csomagkapcsolás elvi és gyakorlati problémáira egyaránt kitérünk.

Ha végig követjük az elmúlt tíz év IP hálózatainak fejlődését, akkor elmondhatjuk, hogy az szinte minden, a skálázhatósággal, menedzselhetőséggel vagy éppen átlátszósággal szembeni igényt kielégíti. A cikk tartalmi korlátai miatt még az IP hálózatok nyújtotta szolgáltatások töredékét sem tudjuk felsorolni. Azonban, mint a legtöbb rendszernek így ezeknek a hálózatoknak is vannak vele született korlátai. Nevezetesen a sebesség, a sávszélesség és a csatorna kihasználás. A felforruló problémákra az optikai hálózatok alkalmazása nyújt egy lehetséges alternatívát, ám az egyben számtalan, újabb megoldandó probléma elé állítja a kutatókat és a fejlesztőket.

Cikkünk konkrét megoldásokon keresztül világít rá ezek közül néhányra. Az alábbiakban kizárólag a csomagkapcsolt hálózatok vizsgálatára szorítkozunk. Sorra veszünk néhány alapfogalmat, és megvizsgáljuk az optikai címzéslehetőségeit. Bemutatunk egy lehetséges optikai router architektúrát, amely egyben szemlélteti a megoldandó problémákat is.

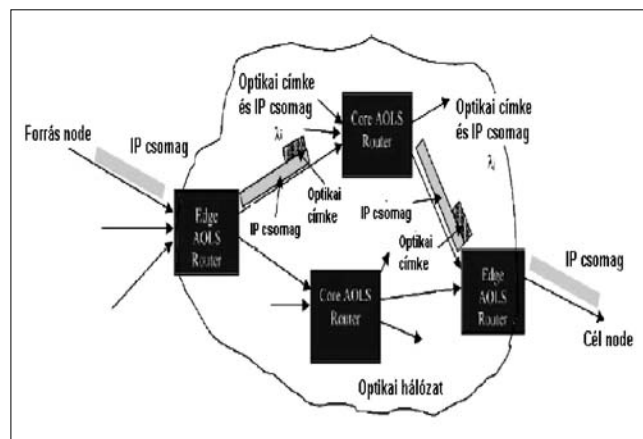
Csomagkapcsolt optikai hálózatok

Nagysebességű optikai gerinchálózatok már néhány éve világszerte működnek, de ezen hálózatokban a dinamikus útvonalválasztás, a széleskörű forgalommenedzsment, a transzparencia és a skálázhatóság a mai napig nem megoldott. Akár az IP hálózatokban, itt is szükség van útvonalválasztó eszközökre, úgynevezett routerekre. Ezek az eszközök számos paraméter figyelembe vétele alapján (pl. a *routing tábla*, amely az egyes bejövő adatcsomagok címe alapján a csomaghoz rendelt útvonalat tartalmazza –, prioritások, adatforgalom, stb.) meghatározzák az adott csomag továbbításának útvonalát. Ez az „útvonal” lehet egy adott optikai szál, vagy (hullámhossz osztásos rendszereknél) egy adott hullámhossz is. A konkrét útvonal kijelölését *optikai kapcsoló mátrixok*, illetve *hullámhossz konverterek* végzik.

A gyors működés alapfeltétele, hogy minél kevesebb optikai/elektromos átalakítást hajtsunk végre, és ahol lehetőségünk van, ott az optikai tartományban végezzük el az adatcsomaggal, az irányítással (routeléssel) járó műveleteket. Nyilván a rendszernek ez a leggyengébb pontja. Ezért, továbbá az IP hálózatokkal való transzparencia miatt, kétféle routert különböztetünk meg. Úgynevezett edge azaz élroutert, és core másnéven belső hálózati routert (1. ábra).

Az élrouterek mindig az optikai és az IP hálózatok határán foglalnak helyet. Szerepük a transzparencia biztosítása és a kapszuláció, enkapszuláció. Ezekben az eszközökben elkerülhetetlen az optikai elektromos átalakítás, ezért sebességük korlátozott, de ugyanakkor kiküszöbölik a tisztán optikai rendszerek egy rendkívül jelentős hátrányát, nevezetesen azt, hogy az optikai rendszerek nem rendelkeznek az elektromos memóriákhoz hasonló optikai tároló képességgel. Emiatt bármilyen műveletet is végzünk az optikai tartományban lévő adattal, azt a művelet idejére csak optikai készletelés használatával tudjuk tárolni (bufferelni). Az optikai tárolás lehetséges megoldásait a core router felépítését taglaló részben említjük meg.

1. ábra Optikai/IP hálózat



Az edge router egyfajta átjáró az IP hálózatok és az optikai hálózat között. Mivel tartalmaz elektromos memóriát, így lehetőség nyílik arra, hogy a változó hosszúságú, többnyire nagyon rövid IP csomagokat tárolja, majd réselt optikai hálózat esetén a megfelelő és mindig állandó csomagméretet létrehozva továbbítsa az optikai hálózat felé. Réseletlen optikai hálózatok esetén változó lehet a továbbított csomag mérete, annak csak minimális hosszára kell megkötést tenni. A minimális hossz a későbbi, core routerekben történő minimális címfeldolgozási idő határozza meg. Az elektronikus memória használatával a különböző hálózatok felé mutatott átlátszóság is megoldott, legyen az szinkron (SDH SONET), vagy aszinkron (IP). Az edge router feladatai közé tartozik az IP címek optikai címmé való leképezése is. Ha maximalista tervezési szempontokból indulunk ki, akkor olyan optikai hálózat kialakítása lenne a cél a jövőben, amely IP transzparens, nem réselt, azaz a csomagok hossza tág határok között változhat, valamint hullámhossz osztásos csomagkapcsolt felépítésű.

A továbbiakban ezen hálózatok lehetséges, és egyben fejlesztés alatt álló változatával foglalkozunk.

Optikai cím

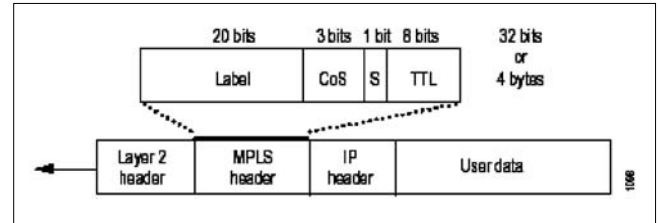
Az optikai cím szerepe hasonló az IP címéhez. Egyrészt kijelöli a hozzá tartozó csomag célcímét és közvetve annak útvonalát, másrészt az optikai csomag kezdetét és végét is jelezheti. A cím kizárólag az optikai hálózaton belül érvényes, mivel az edge router teszi a csomaghoz és távolítja is el az optikai hálózat határainál. Az optikai címek és az általuk kijelölt útvonalak a *routing táblákban* tárolódnak. A cím hosszát és felépítését az alábbi szempontok határozzák meg.

A hossza jelentősen befolyásolja a címinformáció feldolgozási idejét. Ez az idő a cím hosszától és bitsebességétől függő *felismerési időből* (*recovery time*) és a címinformáció alapján történő útvonal kijelölésből tevődik össze. A cím tartalmaz egy *előtagot* (*preamble*) amelynek a szinkronizációban van szerepe, magát a *címinformációt*, opcionálisan *start* és *stop* „*unique word*”-öket, amelyek a címinformáció kezdetét és a végét határolják, és *élettartam biteket*, (*Time to Live, TTL*) amelyek az esetlegesen végtelen ciklusban keringő csomagokat hivatottak kiszűrni. Mindezen kívül szükség lehet a csomagtovábbítás minőségének (sorban állások és ütközések kezelésének) jelzésére is (*QoS, Quality of Service bitek*). Az optikai címezést használó csomagkapcsolt hálózatokat tekintve jelenleg két fő irányzat van kibontakozóban. Az *MPLS (Multi Protocol Label Switching)* rendszerek továbbfejlesztéseként megjelenő *MPλS (Multi Protocol Lamda Switching)** [2,3,4], illetve a tisztán optikai csomagkapcsolású (*AOLS, All Optical Label Swapping*) hálózatok [1].

* Az MPLS általánosítása a GMPLS, mely magába foglalja a „hullámhossz”, helyesebben az „optikai csatorna” kapcsolást is. Az MPλS ennek az eljárásnak egy régebbi megnevezése. (Szerk. megj.)

MPLS struktúra esetén az optikai cím (2.ábra) rövid, fix hosszúságú 32 bites címkéket jelent. Az MPLS rendszer ezeket a címkéket az adatcsomagok (IP csomag fejléce) fölé helyezi. Ebből következően az MPLS transzparens, hiszen nem függ az alatta lévő hálózati rétegtől (ATM, Frame Relay, SDH, stb.).

2.ábra MPLS fejléc



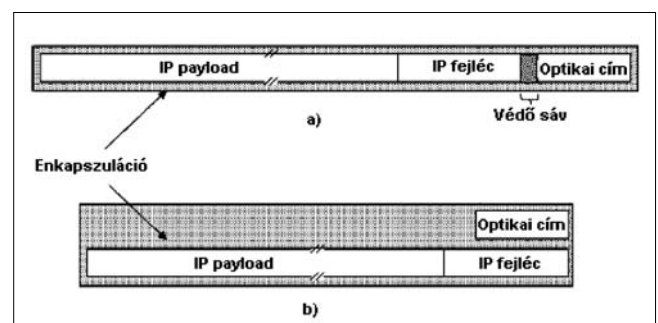
Az MPλS WDM linkekre és OXC (*optical crossconnect*) node-okra épül. Ezenknél a hálózatoknál az OXC útvonalkapcsoló elemek egy-egy hullámhosszat egyedi címként kezelnek. Mivel az OXC egyszerű *optikai kapcsoló*, és nem képes szétosztani az egy hullámhosszhoz tartozó adatot több irányba, így ezen hálózatok hátránya, hogy skálázhatóságuk a rendelkezésre álló hullámhosszak (OXC-k) számától függ, amely jelenleg kb. 100 de a jövőben ez 3000-re is bővíthet. Az MPIS hálózatok legfőbb előnye, hogy valós idejű, dinamikus csatornakiosztást tesznek lehetővé.

Az MPIS rendszerrel [2,3,4] ellentétben, ahol az optikai címet különböző hullámhosszak kombinációja jelenti, a tisztán optikai csomagkapcsolásos hálózatokban (AOLS) a cím feldolgozása optikai/elektromos átalakítás nélkül, optikai korrelátorok segítségével történik. A rendszer előnye, hogy jóval gyorsabb útvonalirányítást tesz lehetővé. Kivitelezése nehézkes és drága. A jelenleg feldolgozható optikai címek pedig viszonylag rövidek, így a hálózatok mérete korlátozott. Erre csak a címezésre használható hullámhosszak számának növelése nyújthat megoldást. A következőkben két, különböző lehetséges módszerrel megvalósított optikai csomagkapcsolást írunk le.

Soros címezés

Soros címezés esetén (3/a. ábra) az optikai cím az adatcsomag elé van fűzve. Az adat és a cím között biztonsági időrést (*Guard Band*) kell hagyni.

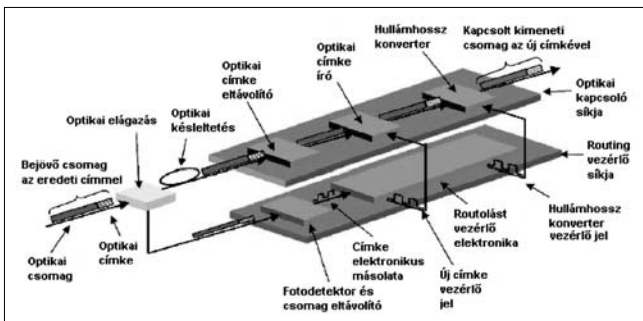
3.ábra Optikai címezési módok
a) soros címezés b) segédvívős címezés



Mivel a cím és az adat is optikai tartományban kerül továbbításra, hogy elkerüljék az optikai-elektromos átalakítást a címet optikai korrelátorok segítségével dolgozzák fel, bár a címinformáció elektronikus feldolgozása is lehetséges. Az optikai címfeldolgozás *FBG* (fiber Bragg grating) technológián alapul [2,3,4]. Ebben az esetben az optikai címet hullámhossz billentyűzéssel előállított, néhány bit hosszú szavak jelentik. Ha például 1 csatornában X hullámhossz áll rendelkezésre, akkor az adatcsomag számára dedikált hullámhosszon kívül $W=X-1$ hullámhossz használható az optikai cím leírására. A címeket az egymás után következő hullámhosszak sorrendje különbözteti meg. Ha minden hullámhosszat csak egyszer engedünk meg használni az optikai címben, akkor $K^W - (K-1)^W$ számú egyedi címet hozhatunk létre, ahol W a címzésre használható különböző hullámhosszak száma, K az optikai cím hossza bitekben. Ez például 16 különböző hullámhosszat és 8 bites címet figyelembe véve több mint a ma rendelkezésre álló IP címek száma (2^{32}). Jelenleg mintegy 100 különböző hullámhossz kezelésére képes eszközök állnak rendelkezésre, de a jövőben ez a szám elérheti a 3000-t is. Ez jól tükrözi a több-hullámhosszas címzésű optikai hálózatokban rejlő skálázhatóságot. Az *FBG* címfeldolgozás sajátossága, hogy ha az optikai korrelátor egyezést érzékel, csak az előre meghatározott irányba tudja irányítani a csomagot, az irány dinamikus változtatása nehézkes és lassú.

A másik lehetőség, ha a soros optikai címet a segédvívös címzéshez hasonlóan elektronikusan dolgozzuk fel (4. ábra). Ez úgy történik, hogy az optikai adatcsomag fénytjeljesítményének egy részét kicsatoljuk, és detektáljuk, majd elektromos alapsávi jellé alakítva feldolgozzuk.[1] Ezalatt az eredeti adatcsomag változatlan formában, ám késleltetve halad tovább, miközben a fejléc eltávolításra és hullámhossz konverzió után újraírásra kerül.

Az optikai cím és az adatcsomag bitsebessége egymástól viszonylag függetlenül tág határok között változhat. A címke bitsebességének csak az elektronika borsztös feldolgozási sebessége szab határt.

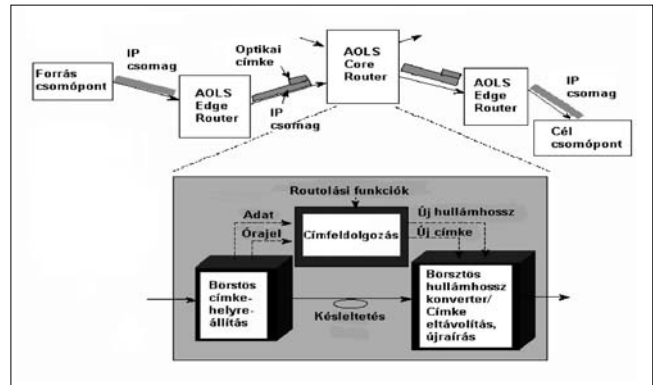


4. ábra AOLS elektronikus címfeldolgozással

Segédvívös címzés

Segédvívös címzést használva [5] (3/b. ábra) a címinformáció az adattal megegyező hullámhosszon, ám attól spektrumban néhány GHz-el távolabb kerül továbbításra.

Ez a megoldás lehetővé teszi, hogy az adattól függetlenül a címinformáció optikai szűréssel elkülöníthető, és az adatcsomag módosítása nélkül feldolgozható legyen. Természetesen a tisztán optikai címfeldolgozás nem lehetséges, a címinformációt alapsávi elektromos jellé kell alakítani. Az elektronikus címfeldolgozás és útvonalirányítás (5. ábra) az adatcsomag késleltetése alatt történik.



5. ábra Segédvívös címzésű AOLS routing

Az IP csomagok enkapszulációja után az edge router által generált optikai cím változatlan marad az optikai hálózaton belül. Annak feldolgozására és a hullámhossz konverzió után, az új hullámhosszú adatcsomag segédvívjére való modulálására van szükség. A módszer előnye, hogy rendkívül flexibilis címstruktúra használható, hiszen annak csak a címfeldolgozó áramkörök sebessége szab határt. Mivel az optikai cím hossza lényegesen kisebb, mint a *hasznos terhelés* (néhány byte), ez nagyságrendekkel kisebb címfeldolgozási sebességet tesz lehetővé. Így olcsóbb, egyszerűbb áramkörökkel megvalósítható a vezérlés.

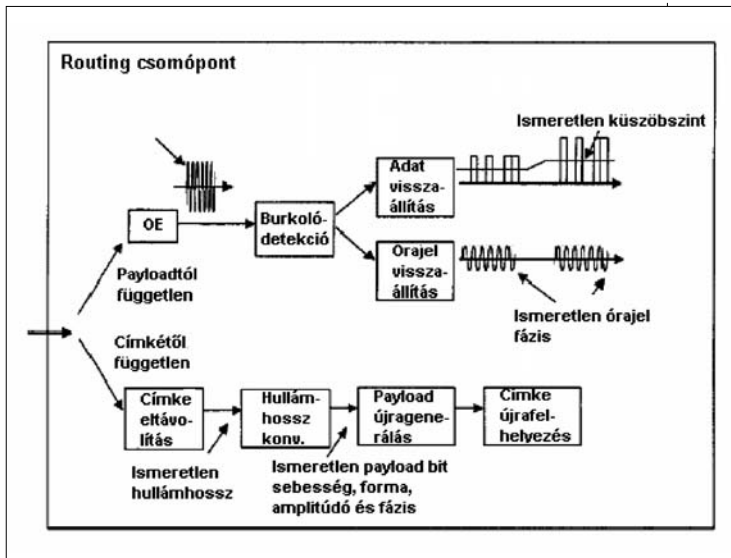
A csatorna kihasználtsága maximalizálható, ha az útvonalirányítást a hasznos terhelés időbeni hossza alatt végrehajtjuk. Ekkor ugyanis a csomagok minimális szünetekkel követhetik egymást. Mivel az adatcsomagok hossza tág határok között változhat, továbbá egy-egy hullámhossz nem csak egy konkrét címnek felletethető meg, így a rendszer rendkívül jól skálázható.

Core router

A belső routerek felépítése és funkciója merőben eltér az edge routerekétől.

Feladata a bejövő adatcsomag optikai címe alapján annak továbbítására használt útvonal kiválasztása, és az adatcsomag hullámhossz konverziójával történő elirányítása. Funkcionális felépítése a következő (6. ábra, 7. ábra):

A bejövő adatcsomaggól vissza kell nyernie a címinformációt, amely a különböző hullámhosszúságú csatornák *multiplexálásával* és a fejléc leválasztásával, majd annak optikai vagy elektromos úton történő feldolgozásával történik. Segédvívös címzés esetén a multiplexer és *szűrő fokozatok* után, (amelyek szétválasztják az e-



6. ábra Core router főbb funkciói

gyes hullámhosszakot, illetve a hasznos terhelést és a segédvívön lévő címet), az optikai tartományban lévő címet detektálják (O/E konverzió) és alapsávba keverik le. A bősztős adattovábbítás miatt minden egyes bejövő csomag, azaz új cím feldolgozása esetén újraszinkronozásra van szükség. A szinkronizálás és adatvisszaállítás után feldolgozásra kerül a címinformáció. Ezalatt az adatot változatlan formában késleltetik. A késleltetés történhet cirkulátorral, vagy akár több száz méter hosszú optikai szállal is. A késleltető szál hosszát a vezetett fény sebessége és a feldolgozási idő határozza meg.

Soros címzés használatakor a címinformációt optikai korrelátorok segítségével dolgozzák fel. Ehhez a hasznos terhelés előtt elhelyezkedő címet szintén le kell választani. Hullámhossz billentyűzéses soros címzés esetén a címleválasztás szűrő, cirkulátor és FBG alkalmazásával valósítható meg. Az optikai korrelátort MSFBG (multi section fiber Bragg grating) felhasználásával készíthet [3]. Ez az optikai eszköz annyi szekciót tartalmaz, ahány bites a hullámhossz billentyűzéses cím. A cím egyezése esetén a MSFBG a címben előforduló minden hullámhosszon reflektál. Az így előálló reflektált fénytjeljesítényt elektromos jellé alakítva egy optikai kapu vezérelhető, és a csomag a megfelelő irányba továbbítható.

7. ábra Core router funkciói a címzés módszere szerint

	Címke visszaállítás	Címke törlés	Hullámhossz konverzió	Címke írás	Gyors hullámhossz hangolás
Soros címke	Optikai elágazás+Börsztős feldolgozás	SOA XGM / IWC XPM WC			Hangolható hullámhosszú gyors lézerező
Optikai segédvívös címke	Optikai szűrő + Börsztős feldolgozás		SOA XGM / IWC XPM WC		
	Optikai elágazás+MMIC+Börsztős feldolgozás	SOA XGM / IWC			

A soros cím feldolgozása elektronikusan, szűrés nélkül, az optikai jel kicsatolásával pusztán időzítési alapon is elvégezhető (4.ábra) [1].

Ezt a hasznos terhelés és a cím közötti időrés (time guard) és sebesség különbség (kb. 10:1) teszi lehetővé. A címfeldolgozás ideje alatt az adatot a segédvívös címezéshez hasonlóan itt is minden esetben késleltetni kell.

Segédvívös címezést alkalmazva az alapsávi címinformációt a routing tábla alapján kezelik le. A változatlanul hagyott adatcsomag hullámhossz konverziója után, az adathoz tartozó újírt címet felkeverik és rámodulálják az új hullámhosszú csomag segédvívjére. Meghatározott számú hullámhosszat egy optikai közegbe demultiplexálhatunk. Ebben az esetben az irányítás kizárólag hullámhossz konverzióval történik, de ez kiegészíthető egy optikai kapcsolómátrix

fokozattal is. Ezáltal nem csak elméleti, hanem fizikai irányításról is beszélhetünk.

Gyakorlati és elvi problémák

A teljesség igénye nélkül szeretnénk kitérni néhány, az optikai csomagkapcsolással kapcsolatos problémára. Core routerek esetén az egyik legnagyobb gyakorlati probléma az ütközések (ugyan abban az időben ugyanazon a csatornán/hullámhosszon kell egy vagy több csomagot továbbítása) kezelése. Mivel nem áll rendelkezésre optikai memória, ahol akár több csomag tetszőleges ideig való tárolása lehetséges, az ütközések problémáját vagy kaszkád késleltető láncokkal, vagy a csomagok eldobásával lehet orvosolni amennyiben nem áll rendelkezésre szabad csatorna (hullámhossz). A késleltető láncokkal csak véges számú egymás utáni ütközések kezelhetők le, és alkalmazásukhoz nagyszámú optikai kapcsolóelem illetve rendkívül gyors vezérlő elektronika szükséges.

A bősztős adattovábbítás miatt minden bejövő adatcsomag esetén el kell végezni az adat és órajel visszaállítást. NRZ alapsávi jelből ez csak szinkronizációs előtagok (preamble), vagy speciális kódolás (8B/10B) segítségével lehetséges [6], és a többszörös túlminta-vételezéshez szintén nagysebességű áramkörökre van szükség. Ez az inkább gyakorlati korlát limitálja a minimális csomagméretet, és közvetve a maximális bitsebességet is.

A fenti problémára megoldást nyújtana az, ha a címfeldolgozás valós időben tisztán optikai úton történne. Ez elméletben lehetséges, ám több gyakorlati korlátja van. Egyrészt a szükséges korrelátorok, csatolók, kapcsolók még nem integrálhatók elfogadható méretűvé, másrészt a hullámhosszak, irányítási útvonalak dinamikus kezelése megfelelően hangolható eszközök és a hatalmas számítási teljesítmény hiányában jelenleg nem megoldható.

Összegzés

Cikkünkben megkíséreltünk átfogó képet adni a csomagkapcsolt optikai hálózatok fejlesztésének, megvalósítási lehetőségeinek jelenlegi állapotáról, lehetséges jövőbeni fejlődési irányairól.

Összességében elmondható, hogy számos probléma vár még megoldásra (például: optikai memória implementálása, ütközés kezelés, forgalom menedzsment, bősztös címfeldolgozás sebességének növelése), de a fejlődés egyértelműen az optikai csomagkapcsolt hálózatok felé mutat. Annak ellenére, hogy az optikai csomagkapcsolás terén egyre több funkciót lát el az optikai réteg, úgy véljük, hogy az optikai eszközök jelenlegi korlátai miatt (méret, bonyolultság, költségek) még nem lehet az optikai/elektromos átalakítást teljesen kiküszöbölni. Bár a cél kétségtelenül ez.

Irodalom

- [1] Daniel J. Blumenthal,
„Photonic packet switching and optical label swapping,”
Optical Networks Magazine,
Nov./Dec. 2001.
- [2] H. Harai, N. Wada, F. Kubota, and W. Chujo,
“Photonic packet forwarding in a multi-wavelength
label switching node,”
IEEE ICC 2001, Workshop on Next Generation
Switching/Routing: The Optical Role,
No. WS2-7, June 2001.
- [3] N. Wada, Hiroaki Harai,
“Photonic packet routing based on multiwavelength
label switching using multi section fiber Bragg gratings”
ITCOM 2002.
- [4] K. Habara et al.,
“Large-capacity photonic packet switch prototype
using wavelength routing techniques,”
IEICE Trans.on Communication,
vol. E83-B, pp.2304–2311, Oct. 2000.
- [5] Tamás Marozsák, Attila Kovács, Ildikó Deme:
“All-optical routing for packet switched networks”
Third Hungarian WDM workshop,
“Intelligence in Optical Networks”,
08. April 2003., Budapest
- [6] Attila Kovács, Ildikó Deme:
“Clock and data recovery from high speed
asynchronous NRZ coded data stream”,
Microcoll 2003 Konferencia, Budapest

Hírek

Magyar részvétel európai kutatási projekteken

A **LABELS** (Lightwave Architectures for the Processing of Broadband Electronic Signals) projektben az optikai tartományi mikrohullámú jelfeldolgozás területén olyan alkalmazások kutatásán dolgozik, melyek kulcsfontosságúak lehetnek a következő generációs mobil távközlésben és az azok egyik pilléréként funkcionáló optikai alaphálózat megvalósításában.

A kutatás két egymással összefüggő területre összpontosít:

Azon alkalmazások, melyeknél az RF rendszer elemek által szolgáltatott vagy fogadott jelek optikai tartományban való feldolgozása történik, természetesen előnyösebb jellemzőkkel bírnak a hagyományos áramkör, tápvonal, koaxiális kábel alapú, túlnyomórészt elektronikus alapokon megvalósított technikákhoz képest.

A rádiófrekvenciás jelek közvetlen optikai feldolgozása és szűrése, valamint az ezeket kísérő optikai segédvívön szállított információ alapsávban történő feldolgozása, felhasználása. A tervezett rendszer segédvívő-multiplexált optikai MPLS hálózat részeként kerül megvalósításra, mely technika jelentős szerepet hivatott betölteni a jövő optikai alapú IP hálózataiban a segédvívön hordozott hálózat-management funkciók beépítésével.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Szélessávú Hírközlő Rendszerek Tan­székének Optikai- Mikrohullámú Távközlés Laboratóriuma e második alkalmazáscsoport kutatási és megvalósítási feladataiban vállalt és teljesít jelentős szerepet az utóbbi másfél évben.