

Címkefeldolgozás és csomópont-megvalósítás optikai csomagkapcsolt hálózatokban

KOVÁCS GÁBOR, BÁNKY TAMÁS, BERCELI TIBOR

BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék
{kovacsg, banky, berceli}@hvt.bme.hu

Lektorált

Kulcsszavak: segédvivős rendszerek (SCM), hullámhosszosztás (WDM), optikai szűrés, hullámhossz átalakítás

A tisztán optikai csomagkapcsolt megoldások a mai optikai távközlés kutatásainak egyik központi területéhez tartoznak. Cikkünk egy olyan csomagkapcsoló központot mutat be, mely segédvivős nyalábolással oldja meg a csomagtovábbításhoz szükséges információk továbbítását, ezen címke információ elektronikus feldolgozásával, míg az alapsávi nagysebességű csomag jelkezelését mindvégig az optikai tartományban végzi. A segédvivőn található címke és az alapsávi jel szétválasztása optikai szűrők felhasználásával történik.

1. Bevezetés

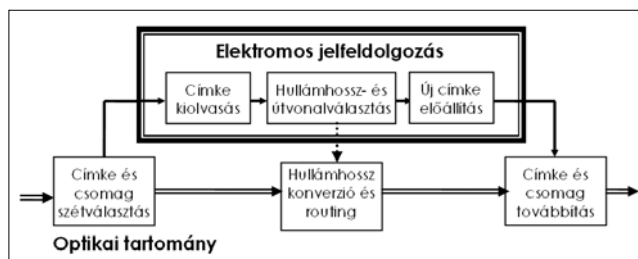
A tisztán optikai csomagkapcsolt megoldások a mai optikai távközlés egyik legintenzívebben kutatott tématerületei. A kutatások célja olyan hálózati technológia kialakítása, mely lehetővé teszi a hálózati adatforgalom optikai tartományban történő transzparens továbbítását. A transzparencia ezekben a hálózatokban kétféleképpen is értelmezhető.

Ha hálózati protokoll szempontjából értelmezzük a transzparenciát, akkor azt jelenti, hogy a rendszer alkalmas bármely, tetszőleges hálózati protokollú jel módosítása nélküli átvitelére. Ez megoldható egy köztes protokoll réteg beiktatásával, mely, például az MPLS-hez hasonlóan, címkével látja el a csomagokat, a hálózaton belüli útvonalválasztás pedig a címkék alapján történik.

Fizikai réteg szempontjából értelmezett transzparencián azt értjük, hogy opto-elektronikus átalakításra csak a hálózat szélén található csomópontokban kerül sor, a köztes csomópontokban az átvitel mindvégig az optikai tartományban marad. Ennek megoldása speciális eszközöket igényel, és bár a szakirodalomban lehet találni a csomagtovábbítást és adatfeldolgozást is az optikai tartományban végző kísérletekről szóló beszámolót [1], várhatóan még hosszabb ideig szükség lesz elektronikus jelfeldolgozó berendezésekre ezen eszközökben.

Egy lehetséges köztes megoldás azonban az, ha szétválasztjuk az információs adatfolyamot a csomagtovábbításhoz szükséges jelzésátviteltől, és míg az információs csomagokat tisztán optikai úton továbbítjuk,

az ehhez szükséges routing információk feldolgozását elektronikus tartományban végezzük [2,3]. Ennek blokk-sémáját az 1. ábra mutatja.



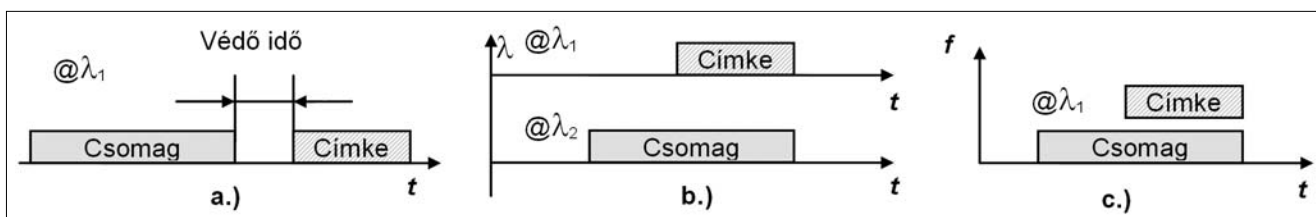
1. ábra A csomagfeldolgozás fő funkciói

Jelen cikkünkben egy ilyen csomagkapcsoló központ kialakításának szempontjait vizsgáljuk meg, majd az IST-LABELS (IST-2001-37435) projekt keretében megvalósított berendezés részleteit mutatjuk be.

2. A címkeinformáció továbbításának kérdései

Fontos kérdés a címkék továbbításának, és az információs adatcsomagokkal való nyalábolásának módja. A továbbiakban a továbbítandó információt csomagnak (mely magába foglalhat például egy IP csomagot, annak fejrészével együtt), míg a rendszeren belüli csomagtovábbításhoz szükséges információt címkének fogjuk nevezni. A címke és a csomag főbb nyalábolási technikáit a 2. ábra mutatja.

2. ábra Címke nyalábolási technikák: a) TDM, b) WDM, c) SCM



Időosztásos multiplexálás esetén (Time Division Multiplexing – TDM) a címke időben megelőzi a csomagot, és optikai kapcsoló alkalmazásával tudjuk szétválasztani őket [4,5]. Míg a címkét elektronikusan feldolgozzuk, addig a csomagot egy optikai késleltető vonalon késleltetjük, majd újra időben multiplexáljuk azokat.

Egy másik megoldás a hullámhosszosztásos multiplexálás (Wavelength Division Multiplexing, WDM), mely gyakorlatilag egy teljesen független optikai csatorna felhasználását jelenti a címke továbbítására. Egy működő WDM rendszerben nem igényel külön kiegészítő hardver elemeket, spektrális szempontból azonban nem hatékony.

További lehetőség a segédvívös nyálábolás alkalmazása (Subcarrier Multiplexing, SCM), mely során az optikai vívőt egy frekvencia-multiplexált elektromos jellel moduláljuk. A módszer lényege, hogy az alapsávban továbbítja a nagysebességű információs adatcsomagokat (például IP csomag+fejréssz), míg a címke információ egy segédvívőre multiplexálva időben párhuzamosan halad. Ez mind idő, mind spektrum szempontjából hatékony megoldás, melynek ára a bonyolult adó és vevő struktúra (adóoldalon segédvívőre keverés, majd optikai modulálás, vételi oldalon nagysebességű vevő, és lekeverés). A vevőoldali struktúra azonban jelentősen egyszerűsíthető optikai előszűrés alkalmazásával, melyet a következő bekezdésben részletesen bemutatunk. Mint látni fogjuk, ezzel a módszerrel a vevőben egyszerű, alacsony sáv szélességű fotodióda is alkalmazható, és lekeverésre sincs szükség. A csomópontot tehát ilyen jelek kezelésére alakítottuk ki.

3. A megvalósított csomagkapcsoló központ

Ebben a részben, az előzőekben bemutatott megfontolások alapján kialakított csomagkapcsoló központ főbb funkcionális elemeit mutatjuk be.

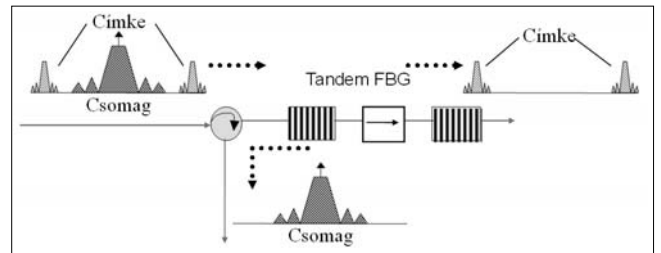
Mint látni fogjuk, első lépésben megtörténik a csomag és a címke szétválasztása. Ezt követően a címkét detektáljuk, és több lépésben feldolgozva előállítjuk az új címkét. Végül a címkét a segédvívőre keverjük, és az új hullámhosszú optikai vívőre moduláljuk. Eközben a csomag egy optikai késleltető vonalon halad végig, és a címkével azonos időpontban jelenik meg a kimeneten.

3.1. Optikai előszűrés

Mikrohullámú jelek optikai tartományban történő szűrése vonzó alternatívája lehet az elektromos jelfeldolgozásnak, amennyiben a kívánt sáv szélesség néhány GHz fölé esik. Ezt a fajta megoldást alkalmaztuk csomópontunkban is a címke és a csomag szétválasztására.

Egy egyszerű optikai szűrőstruktúra látható a 3. ábrán. Egy optikai szűrő (Fiber Bragg Grating, FBG) zárósávja reflektálja az alapsávi jelet az optikai vívővel együtt, melyet egy optikai cirkulátor juttat az egyik kimenetre. Ezalatt a segédvívőket a szűrő átereszt, és ezek

egy másik kimeneten jelennek meg. Mivel a visszavert jelet is fel akarjuk használni a további lépésekben (hiszen az alapsávi információt tartalmazza), ezért a szűrőnek szigorú előírásoknak kell megfelelnie az alapsávi jelre vonatkozólag (például sáv szélesség, csoportfutási idő stb.) Szintén fontos előírás, hogy az áteresztő sávhoz képest jelentős elnyomással kell rendelkeznie az optikai vívőre nézve, a hibamentes címke detektálás elérése érdekében. A szűréssel kapcsolatos további részletek olvashatók [6] és [7]-ben.



3. ábra Az optikai szűrés blokkvázlata

3.2. Elektronikus jelfeldolgozás

Az elektronikus jelfeldolgozás megvalósítására programozható hardver áramkört alkalmaztunk (Field Programmable Gate Array, FPGA). Ez egyfelől biztosította az átviteli sebességhez szükséges nagysebességű jelfeldolgozást, másrészt a rugalmas kialakítást, mely a fejlesztés során elengedhetetlen volt. Ugyanakkor a 155 Mbit/s működési sebesség biztosításához külön órajel panelt kellett építeni.

Az átvitelre egy 155 Mbit/s sebességű NRZ jelet használtunk, az ebből összeállított csomag szerkezetét mutatja a 4. ábra.

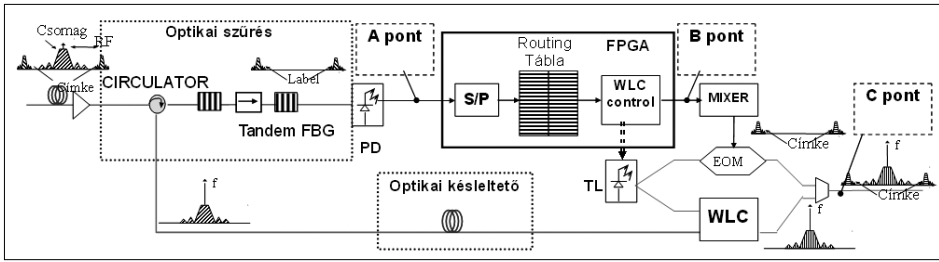
N bit training sorozat	16 bit azonosító	32 bit címke információ
------------------------	------------------	-------------------------

4. ábra A címke keretszerkezete

Az órajelek csomagonkénti szinkronizálásához minden csomag elején egy 0101 alternáló sorozatot használtunk. Ezt követően a kereten belüli pozíció azonosítására egy 16 bites pozícióazonosító szó következett (speciális állapot-érzékeny algoritmussal, amely kiszűri a címkén belüli szóegyezéseket), végül pedig a 32 bites címke információ. A vevőben ezt a 32 bitet egy soros-párhuzamos átalakítással tettük alkalmassá a párhuzamos adatfeldolgozásra.

Mint később látni fogjuk, manapság szinte kizárólag fix értékű optikai késleltetők állnak rendelkezésre, ezért az elektronikus jelfeldolgozás megvalósításában is fix késleltetésű módszereket alkalmaztunk.

Ennek érdekében a routing-táblában való keresésre is speciális, fix késleltetési idővel rendelkező algoritmust használtunk. Legoptimálisabb a direkt címezhető táblák alkalmazása lett volna, melyek esetén a keresési idő mindig egy órajel ciklusú, ám ennek nagy címke méret esetén megvalósíthatatlanul nagy a memória igénye (2^n – ahol n a címke mérete). Ugyanakkor 2^m méretű táblák ($m \ll n$) és hasító függvények alkalmazása esetén elérhető olyan keresés, melynek várható



5. ábra A csomópont blokkvázlata

értéke továbbra is egy órajel ciklus, és a címke n bitjéből kiválasztott m bitje alapján azonosítja a kimenő érték pozícióját (ám ekkor már szükség van a kis valószínűséggel bekövetkező ütközések kezelésére).

A projekt kisméretű demonstrációs környezetében a $n = 32$ bites címkekhez $m = 9$ bites hasító függvény használtunk, ami 512×64 bit méretű memória használatát tette szükségessé, és egy órajel ciklusú keresést tett lehetővé. További részletek a hasító függvényekről [8]-ban található.

A következő lépés a hullámhossz átalakító modul vezérlése volt, ami az új címke értéke alapján történt. A hullámhossz konverzió két lépésben, kapuzó üzemmódban működő félvezető optikai erősítők (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) felhasználásával történt (további részletek: [9, 10]), melyhez az új hullámhosszat egy hangolható lézer biztosította.

3.3. Kimenőjel előállítás

A hullámhossz konverter vezérlését követően az FPGA jelkimenetén megjelenik az új címke, melyből egy mikrohullámú keverő előállítja a 18 GHz-es segédvívőre modulált címket. Ez tartalmazta a 155 Mbit/s sebességű, ASK-modulált NRZ jelet, Mach-Zehnder modulátor meghajtására alkalmas teljesítményszinten ($\sim +25$ dBm).

Mint azt korábban említettük, a kimeneten szükség van az alapsávi csomag és a segédvívőn található címke szinkronizálására. Ez azt jelenti, hogy a címkefeldolgozással megegyező értékű késleltető vonalat kell beiktatni az alapsávi csomag útjába.

Számos hátrányos tulajdonsága ellenére a legegyszerűbb optikai szálakat alkalmazni, mely fix értékű késleltetést jelent a rendszer szempontjából. Bár például optikai kapcsolók és eltérő hosszúságú szálak alkalmazá-

sával változtatható idejű késleltető modult is lehet építeni, ezek korlátozott felbontóképessége, és az optikai kapcsolók kapcsolási sebessége miatt nem praktikusak. Ugyanakkor kutatások zajlanak valós változtatható késleltetésű eszközök kifejlesztésére [11], de ezek értéke jelenleg néhány ns nagyságrendjébe esik, ami gyakorlati alkalmazáshoz még nem megfelelő. Végül tehát egy 240 m hosszú optikai szál szolgált az optikai késleltetés megvalósítására.

4. Kísérleti eredmények

A megépített optikai csomagkapcsoló központ blokkélmáját mutatja az 5. ábra. Ez tartalmazza mind a szükséges optikai, mind az elektronikus blokkokat.

A jel áthaladása a csomóponton az alábbiak szerint alakul. A bemenetre érkező segédvívős jel tartalmazza a 10 Gbit/s sebességű alapsávi csomagot és a 18 GHz-es segédvívőre modulált 155 Mbit/s sebességű címket. Ez az SCM jel a circulatoron áthaladva az optikai előszűrőbe érkezik, és a korábban leírt módon szétválasztásra kerül. Az alapsávi jel a circulator harmadik kimenetén keresztül az optikai késleltetővonalra továbbítódik, míg a címket egy fotodetektorral detektáljuk.

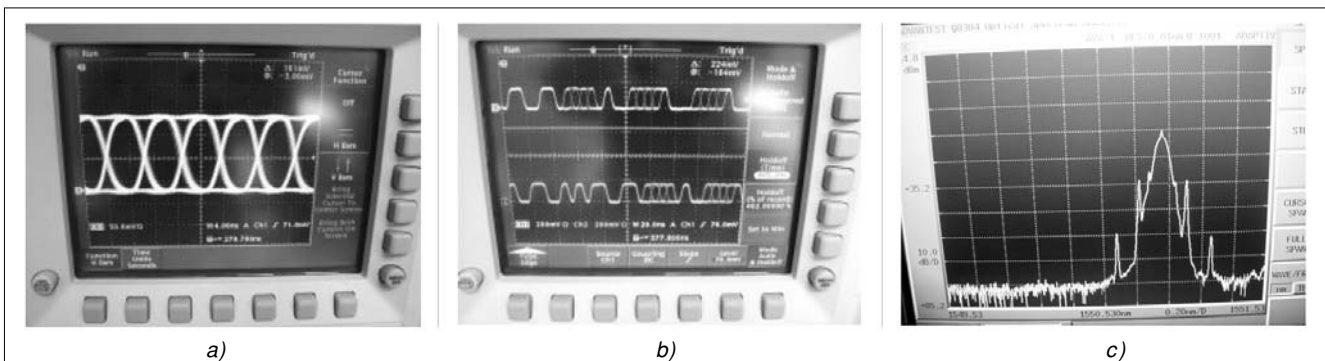
A 6. ábra a vett címke szemábráját, és az FPGA bemenetén és kimenetén megjelenő hullámformát mutatja.

A csomópont áramköreinek kialakítása során több koncepcionális kérdés merült fel. Ilyen volt a segédvívős címke detektálásának kérdése. Ezzel kapcsolatban elmondható, hogy ugyan két oldalsáv jelenik meg a detektoron, de ez az azonos modulációs tartalom miatt ez nem jelent problémát, és a diszperzióból származó követelményeket nem a segédvívő frekvenciája, hanem az alapsávi jel sávszélessége határozza meg [12].

A további kérdések többnyire az FPGA-n belüli jel-feldolgozó eljárások kialakításával (például milyen órajel kinyerési vagy routing-tábla keresési megoldást alkalmazunk), illetve az egyes eszközök közötti interfészek megfelelő kialakításával kapcsolatosak. A fotodió-

6. ábra Mért eredmények

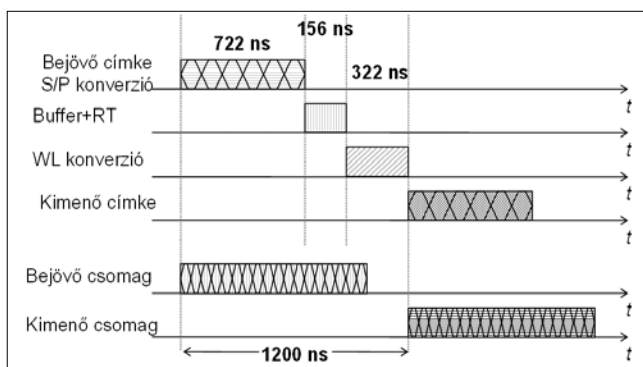
a) a vett címke szemábrája (A pont); b) a vett (alsó A pont) és az előállított (felső B pont) címke hullámformája; c) a kimenő SCM jel optikai spektruma (C pont)



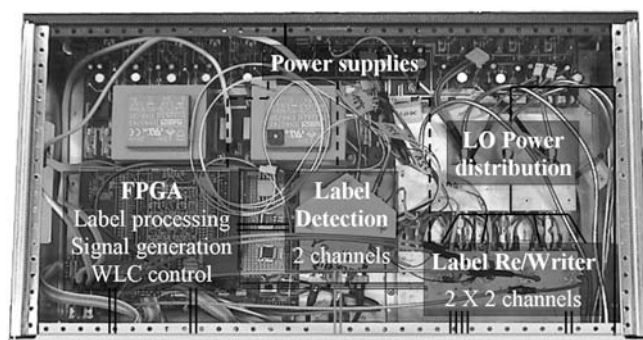
da és az FPGA között az alacsony jelszint miatt, a közösmódusú zavarelnyomás érdekében differenciális jelátvitelt valósítottunk meg, míg az FPGA kimenete és a keverő között a jelszintek és az illesztő impedanciák beállítása igényelt további munkát. Az FPGA és a hangolható lézer között 9 jelvezetékű párhuzamos kábel történik a kommunikáció.

Az alapsávi csomag késleltetéséhez ismernünk kellett az elektronikus eszközök által bevitt összes késleltetés értékét. Ez az érték a már említett jelfeldolgozási fázisokból tevődik össze (7. ábra). Láthatóan a címke soros-párhuzamos átalakítása ($112 \text{ bit} \times 6,45 \text{ ns/bit} = 722 \text{ ns}$) és a lézerhangolás (322 ns) teszi ki a késleltetés legnagyobb részét. Ugyanakkor ezek az értékek a konfiguráció továbbfejlesztésével jelentősen csökkenthetők. Például a címke elején található training sorozat csökkentésével, illetve a bitsebesség növelésével mind a soros-párhuzamos átalakítás, mind a jelfeldolgozási sebesség gyorsítható. Szintén várható, hogy a közeljövőben tovább csökken a lézerek hangolási ideje, ami javíthatná a csomópont teljesítményét. Egy lehetséges megoldásként 64 bites címkemérettel, 622 Mbit/s jelsebességgel és 50 ns-os lézerhangolási idővel számolva a csomópont teljes késleltetés 300 ns alá csökkenthető.

A fejlesztés végső fázisában a csomópontok elektronikus eszközeit közös dobozba integráltuk (8. ábra).



7. ábra Összesített csomóponti késleltetés



8. ábra

Cikkünkben az optikai csomagkapcsolás egy úttörő eredményét, egy optikai csomagkapcsoló központot mutattunk be. Elemeztük a címketovábbítás főbb lehetséges módszereit, majd egy kiválasztott megoldást megvalósító berendezést mutattunk be. Az optikai elemeken felül elsősorban az elektronikus eszközök kiala-

kításának főbb szempontjaira koncentráltunk. Bemutattunk mérési eredményeket a címke adás és vétel területén, megadva a jövő kutatás-fejlesztési irányvonalait hasonló rendszerek tekintetében.

Irodalom

[1] Naoya Wada: „Ultrafast photonic packet routing technology”, Journal of the National Institute of Information and Communications Technology, Vol.49, No.1, March 2002.

[2] Kovács Attila, Deme Ildikó: Segédvívös címzésű, csomagkapcsolt optikai router, Híradástechnika, LIX.évf., 2004/2., pp. 25–27.

[3] Kovács Attila, Deme Ildikó: Hullámhossz-osztásos, csomagkapcsolt optikai hálózat, Híradástechnika, LIX.évf., 2004/2., pp.37–41.

[4] M. Yano, F. Yamagishi, T. Tsuda: „Optical MEMS for Photonic Switching-Compact and Stable Optical Cross-connect Switches for Simple, Fast, and Flexible Wavelength Applications in Recent Photonic Networks”, Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.11, No.2, March/April 2005, pp.383–394.

[5] X. Ma, G. S. Kuo: „Optical switching technology comparison: optical MEMS vs other technologies”, IEEE Optical Communications, November 2003, pp.S16–S23.

[6] M. Popov, P.-Y. Fonjallaz, D. Berlemont, O. Gunnarsson: „Direct microwave optical filtering: concept, configurations, and tenability”, International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP'2003), Budapest, September 10-12, 2003.

[7] M. Popov, A. Martinez, J. Capmany, D. Pastor, P.Y. Fonjallaz, B. Ortega: „Fiber-Bragg-Grating Based Device for Payload and Label Separation in Highly Packed Subcarrier-Multiplexed Optical Label Swapping”, Photonics Technology Letters, Vol.17, No.11., 2005.

[8] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein: „Introduction to Algorithms”, MIT Press/McGraw Hill, Cambridge/Boston 2001.

[9] J. Capmany, S. Sales, D. Pastor, A. Martínez, B. Ortega: „Wavelength Conversion of SCM Signals Using Semiconductor Optical Amplifiers: Theory, Experiments and Applications”, Journal of Lightwave Technology, Vol.21, No.4., April 2003.

[10] Kovács Gábor: Hullámhossz konverzió megvalósítása félvezető optikai erősítők felhasználásával, Híradástechnika, LIX.évf., 2004/2, pp.15–18.

[11] R. S. Tucker, P. C. Ku, C.J. Chang-Hasnain: „Slow-Light Optical Buffers: Capabilities and Fundamental Limitations”, Journal of Lightwave Technology, Vol.23, No.12., December 2005.

[12] Gábor Kovács, Tibor Berceli: „Analysis of Fiber Dispersion Effect on Suppressed Carrier Systems”; Nefertiti Summerschool, Panticosa, Spain, 27-29 September, 2004.