

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Távközlési és médiainformatikai tanszék

Útvonalválasztás és védelem a jövő rugalmas spektrumú optikai hálózatában

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

Készítette

Jakab Csaba

Konzulens

dr. Cinkler Tibor

2014. október 23.

Tartalomjegyzék

Kivonat	2
Abstract	3
Bevezető	4
0.1. Flexi-grid	5
1. Technológiák	6
1.1. OFDM	6
1.2. Hálózati elemek	8
2. Rugalmas optikai hálózat	9
2.1. OFDM alapú optikai hálózati architektúra	10
3. RSA módszerek	12
3.1. A modell	12
3.2. Algoritmusok	14
3.3. Spektrum kitöltési stratégiák	15
3.4. RSA szimuláció	17
3.5. RSA eredmények	20
4. Védelem	22
4.1. Megosztott védelem	22
4.2. Spektrum függő védelem	23
4.3. Szimulációs eredmények	23
5. Anycast	25
5.1. Szimulációs eredmények	26
6. Értékelés	27
Irodalomjegyzék	30

Kivonat

Napjainkban az optikai gerinchálózatok legjelentősebb kihívásai közé tartozik az új szolgáltatásokkal (felhő, 4K video stream, cloud computing) és technológiák miatt rohamosan növekvő forgalom kiszolgálása és alkalmazkodás az növekvő igényekhez.

Egy új, jobb spektrumhasznosítású, skálázható, a forgalmi változásra gyorsan reagáló optikai gerinchálózati architektúra felelne meg a jövő Internete elvárásainak.

Az IP forgalom korántsem tekinthető statikusnak a dinamikusan változó forgalmat egy rugalmas gerinchálózat (EON: elastic optical network) illeszkedik a legjobban.

A kutatók több lehetséges technikát is megvizsgáltak ,hogya az optikai spektrumot rácsmentessé tegyék: mint az OFDM moduláció alkalmazása az optikai átvitel során vagy a Nyquist-WDM rendszerek. Egy ilyen rugalmas spektrumú optikai hálózatban komplexebb feladat az útvonalválasztás és spektrum lefoglalás (RSA: Routing and Spectrum Allocation). A dinamikus forgalmat jobb hatásfokkal tudjuk elvezetni, viszont az optikai szál spektruma töredezetté válhat. A töredezettség megszüntetéséhez forgalomkötegelési módszereket kell alkalmaznunk. A változtatható sáv szélességű összeköttetések és rugalmas frekvencia kiosztás megnehezíti a védelmi utak választását.

A rendelkezésre állás biztosítása itt is fontos szempont. Az üzemi utak megfelelő rendelkezésre állását hozzárendelt és megosztott védelmi utakkal biztosítjuk. Több RSA algoritmust is megvalósítottunk, az általunk javasolt RSA algoritmus együttesen kezeli az útvonalválasztás és spektrum lefoglalás problémáit. Dinamikus forgalmakkal szimulációt futtatunk több referencia hálózaton és megmutattuk a javasolt SASP módszer (Spectrum Aware Shortest Path Routing) hatékonyságát.

A spektrum töredezettségét forgalomkötegeléssel csökkentjük. Megvalósítottunk hozzárendelt és megosztott védelmet is, a szimuláció során bemutatjuk előnyeiket, hátrányaikat az általunk javasolt módszer hatékonyságát. Megosztott védelem esetén két él független üzemi úthoz tartozó, szomszédos védelmi út spektruma átlapolódhat. (A szimulációk során összevetjük a megosztott és hozzárendelt védelmet.) A módszer tovább általánosítható anycast és multicast esetekre is.

Abstract

The elastic optical networks recently come into focus in research as the emerging traffic calls for a more data- rate flexible, agile, reconfigurable, and resource-efficient optical network.

To meet the needs of the future Internet, the optical transmission and networking technologies are moving forward to a more efficient, flexible, and scalable direction. Researchers investigate some promising techniques (Optical-OFDM, Nyquist WDM) to make the optical spectrum gridless. In such spectrum elastic networks routing and spectrum allocation (RSA) is a more complex challenge. Spectrum elastic, gridless optical core network can cause spectrum fragmentation. We can defragment the spectrum with traffic grooming algorithms. The survivable traffic grooming is a complex problem in elastic optical networks with flexible spectrum grid. To provide appropriate availability we use special spectrum elastic dedicated and shared path protection.

We implemented multiple RSA algorithms. We propose an RSA algorithm which simultaneously handles the routing and spectrum allocation problems. We made dynamic traffic simulations on multiple networks, and show the efficiency of the proposed SASP (Spectrum Aware Shortest Path Routing) method. We used traffic grooming to decrease spectrum fragmentation.

We implemented dedicated and shared protection and compared the efficiency, and showed the benefits of our method. If the working paths of two connections are link disjoint physically, and if their backup paths are adjacent on a fiber link, then the two backup lightpaths can share spectrum. The method is generalizable further to anycast and multicast cases.

Bevezető

Az IPTV, videó letöltés, videó folyamok, felhő alapú számítás és egy egyéb internet alkalmazások rohamos fejlődéséhez alkalmazkodni kell. Ezek a szolgáltatások előre meg nem jósolható, változó kapacitásokat követelnek az optikai gerinchálózatban.

A teljesen rácsmentesen állíthatóság az optikai eszközök korlátai miatt nem megvalósítható. A gyakorlatban kis sebességű vékony spektrumszeletek adják a legkisebb spektrumegységet (OFDM vivők, spectrum slice, NWDM).

Az ortogonális frekvenciaosztásos multiplexálás (OFDM) és ennek az optikában használt változata, az O-OFDM jobb spektrumkihasználtságot tesznek lehetővé, a sok, részben átlapolódó ortogonális vivőnek köszönhetően.

A sok kisebb sebességű vivőfrekvencia használatának további előnye, hogy a sáv szélességet rugalmasan tudjuk lefoglalni, finomabb spektrum felosztást használva. Az ilyen rugalmas, O-OFDM-et használó hálózatokat rugalmas spektrumú optikai hálózatoknak nevezzük (EON). Ezzel a módszerrel a sáv szélesség majdnem fele megspórolható.

Az OFDM előnyeivel egy új, rugalmas, a jövőbeni elvárásoknak megfelelő optikai hálózati architektúra építhető ki mely lehetővé teszi az optikai jelek kezelését változó adatsebességgel és sáv szélességgel.

A [1] szerzői kiváló összefoglalást nyújtanak, a rugalmas spektrumú optikai hálózatokról. Az O-OFDM-ről tartalmaz összefoglalókat találhatunk [2] és [3] cikkekben. A technológiai háttérrel a [4] és [5] szerzői írnak. Forgalomkötegelési algoritmusokat mutatnak be rugalmas spektrumú optikai hálózatokra [4], [6] és [7] cikkek szerzői. A [8] cikk kiváló összefoglalót nyújt a távolság adaptív spektrum lefoglalásról.

A [9] és [10] cikkek szerzői ILP-vel és heurisztikus algoritmusokkal valósítanak meg útvonalválasztást és spektrumlefoglalást. [11] a spektrum töredezettségének csökkentésére javasol algoritmusokat. A [12] cikkben a SILCE (spectrum-sliced elastic optical path network) hálózaton, dinamikus útvonalválasztás esetén mutatnak be RSA algoritmust. A [13] cikkben egy igény egyszerre több útvonalon való elvezetését mutatják be, ami töredezett spektrum esetén számottevően kevesebb blokkolással jár.

A [5] cikk szerzői az útvonalválasztás, spektrum lefoglalás és modulációs szint választás problémájára (RMLSA: Routing Modulation Level and Spectrum Allocation), javasolnak ILP-t és heurisztikus algoritmust ami szekvenciálisan kezeli az útválasztás és spektrum lefoglalás feladatát.

A dolgozatban röviden bemutatjuk a rugalmas spektrumú optikai hálózatok technikai, technológiai alapjait, majd ismertetjük a rugalmas spektrumú optikai hálózatok (EON:

Elastic Optical Network) koncepcióját és a különböző változatokat. Ismertetünk több kombinatorikus algoritmust az RSA (Routing and Spectrum Allocation) megoldására, összevetjük hatékonyságukat az általunk javasolt SASP (Spectrum Aware Shortest Path Routing) megoldással. Bemutatjuk az üzemi utak védelmét megvalósító dedikált és megosztott védelmi módszereinket és összevetjük hatékonyságukat az általunk javasolt SAP (Spectrum Aware Protection) heurisztikus algoritmussal. Végül a tartalomszolgáltató hálózatok és felhőszámítás miatt egyre népszerűbb anycast útvonal választási és spektrum lefoglalási algoritmusunkat mutatjuk be.

0.1. Flexi-grid

A rugalmas vagy felxibilis optikai hálózatokat két fő okból tekinthetők rugalmasnak[2]:

- az optikai spektrum rugalmas felosztása (nincs kötött frekvenciarács)
- egy összeköttetés mentén dinamikusan változtatható adatátviteli sebesség

A rugalmas optikai hálózatok (EON)[2] adóvevői a BVT-k(Bandwith Variable Transceiver) képesek a rugalmas optikai utak lefoglalására. Egy EOP időben változó szélességű spektrumot foglalhat el.

- **Eltérő sáv szélesség igények:** Ugyan annak a hálózatnak kell kiszolgáltatnia eltérő sáv igényeket(10G,40G,100G...). Minden igényhez a bitsebességének megfelelő méretű spektrum szeletet kell lefoglalni.
- **Kisebb távolság a csatornák között:** A koherens vevők megjelenésével, kisebb üres sáv használható a csatornák elkülönítésére. (A különböző csatornák között védő/szűrő sáv hagyása szükséges a demultiplexálás miatt.)
- **Távolság és spektrális hatékonyság:** Egy rövid optikai összeköttetés mentén magasabb szintű moduláció alkalmazható, növelve a spektrális hatékonyságot, míg nagyobb távolságok esetén kevesebb állapotú modulációt alkalmazunk, hogy a nagyobb zaj és diszperzió terhelés ellenére is hibamentes legyen az átvitel.
- **Dinamikus hálózatmenedzselés:** Az optikai réteg közvetlenül tud reagálni az ügyfél réteg felől érkező, váltakozó sáv szélességű kérésekre.

A rugalmas optikai hálózatokkal kapcsolatban az egyik legfontosabb kérdés, hogy hogyan határozzuk meg a szükséges spektrális erőforrásokat és hogyan foglaljuk le ezeket adaptívan, egy optikai csatornához a legkevesebb védősávot használva. Az EON-hálózatok megvalósítására kiválóan alkalmas az optikai OFDM modulációs technika. A [3] cikkben egy ilyen OFDM alapú optikai hálózati architektúrára láthatunk példát. A cikk végén összehasonlítják a különböző spektrumallokálási stratégiákat a spektrális hatékonyság szempontjából, a forgalom függvényében. Feltéve, hogy a teljes igénybe vehető spektrum használatban van, a szerzők által definiált SLICE nyújtja a legjobb spektrális hatékonyságot (b/s/HZ) alacsony forgalmak esetén is.

1. fejezet

Technológiák

A két legigéretesebb modulációs technika az OFDM és az N-WDM. Mindkét technika az ortogonalitáson alapul.

Az OFDM átvitel során idő tartományban négyszög formájú T_s hosszú impulzust viszünk át, míg frekvenciatartományban sinc függvény alakú a jel spektruma. N-WDM esetben fordított a helyzet, frekvenciatartományban szabályos négyszög alakú a spektrum és $1/T_s$ széles, míg időtartományban sinc függvény alakú az elemi jel.

1.1. OFDM

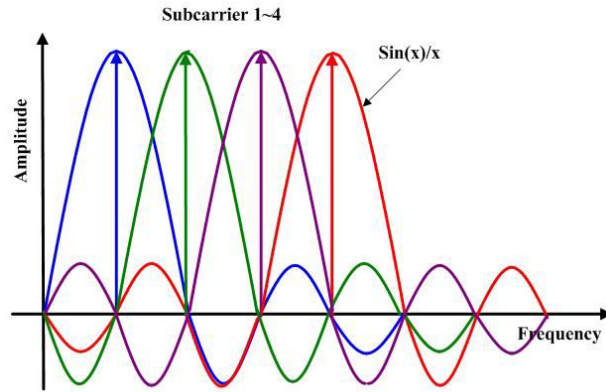
Az O-OFDM (Optical Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) egy modulációs technika. Az OFDM moduláció alkalmazása, a vezeték nélküli(802.11a/g/n Wi-Fi, 802.16 WiMAX, LTE), DAB and DVB) és vezetékes(DSI) hálózatokban hatékonynak bizonyult, ezért most az optikai hálózatokban került figyelembe. Az OFDM előnyeivel egy új, rugalmas, a jövőbeni elvárásoknak megfelelő optikai hálózati architektúra építhető ki mely lehetővé teszi az optikai jelek kezelését változó adatsebességgel és sávszélességgel.

Ortogonalitás:

Az OFDM egy speciális frekvenciaosztásos multiplexálás. Az OFDM jel spektruma sok alacsonyabb sebességű vivőfrekvenciából áll. Ezek az al-vivők (sub-carrier) olyan távolságra vannak, hogy ortogonálisak legyenek egymásra. Ennélfogva a nincs szimbólumközi áthaladás a szomszédos vivők között és nincs szükség üres védősávra a szétválasztás végett. Az (1) egyenletből kapjuk, hogy a vivők egymástól $1/T$ vagy ennek egész számú többszöröse távolságra vannak, ahol T a szimbólumidő. Az 1. ábra jól szemlélteti, hogy az egyes vivők maximum amplitúdójánál van egy-egy szomszédos vivőfrekvencia zérus helye, így nem okoznak áthallást a szomszédos csatornák a mintavételezéskor.

$$\Delta f = \frac{k}{T} \quad (1.1)$$

(I) Védősáv Az OFDM egy speciális több vivő frekvenciás modulációs forma. OFDM átvitel során nagy sebességgel továbbíthatunk adatot több, kisebb sebességű, ortogonális



1.1. ábra. OFDM jel spektruma [?]

vívő frekvencián. A WDM modulációs technikával ellentétben, OFDM esetén, a csatornák közötti áthallás elkerülése végett, nem kell szabad sávot hagyni a csatornák között. A szomszédos csatornák ortogonalitása (a frekvenciatartományban zérus értéke van a szomszédos vívő maximum helyén) miatt elhagyható a vívők közti üres sáv.

Az OFDM vívők n/T_s távolságra vannak. Az x ábrán láthatjuk, hogy ahol egy csatornának maximuma van ott a többi 0 értékű.

Az optikai szálban a különböző frekvenciájú összetevők eltérő terjedési sebessége miatt, úgynevezett kromatikus diszperzió lép fel. A diszperzió szimbólum közti (ISI) és vívő frekvenciák közti (ICI) áthallást okoz. Az áthallások kiküszöbölésére egy védősávot és egy ciklikus prefix kódot illesztnek a jelhez.[14]

(II) Csatornabecslés Becsülnünk kell csatorna hatását az átvitt jelre, hogy az átvitel után visszkapjuk az eredeti szimbólumokat. Az egyik módszer, hogy periodikusan olyan szimbólumokat küldünk át amit mind a vevő, mind az adó ismer. A csatorna állapotára vonatkozó információ ezek után csatorna becslő algoritmusokkal nyerhető ki.

A másik módszer a modulált jel karakterisztikáját használja, ami független az átvitt adattól.

(III) Adaptív moduláció: Az adaptív moduláció egy jól bevált technika a vezeték nélküli hálózatokban. Minden vívőhöz, a csatorna állapotától függően, külön állítjuk az átviteli paramétereket (modulációs és kódolási szintek), hogy maximális átviteli kapacitást vagy minimális fogyasztást érjük el.

Jel előállítás módjai: Az OFDM moduláció és demoduláció megvalósítható inverz diszkrét Fourier transzformáció (IDFT) és diszkrét Fourier transzformáció (DFT) alkalmazásával [1].

Az OFDM technika előnyei:

- több kisebb sebességű vívőre osztva, lassabb szimbólumidővel továbbítjuk az adatfolyamot, így kisebb szimbólum közti áthallást kapunk.
- sebességnövelés és spektrum kiterjesztés a vívőszám emelésével
- hatékony spektrum kihasználás, az átlapolt vívőknek köszönhetően

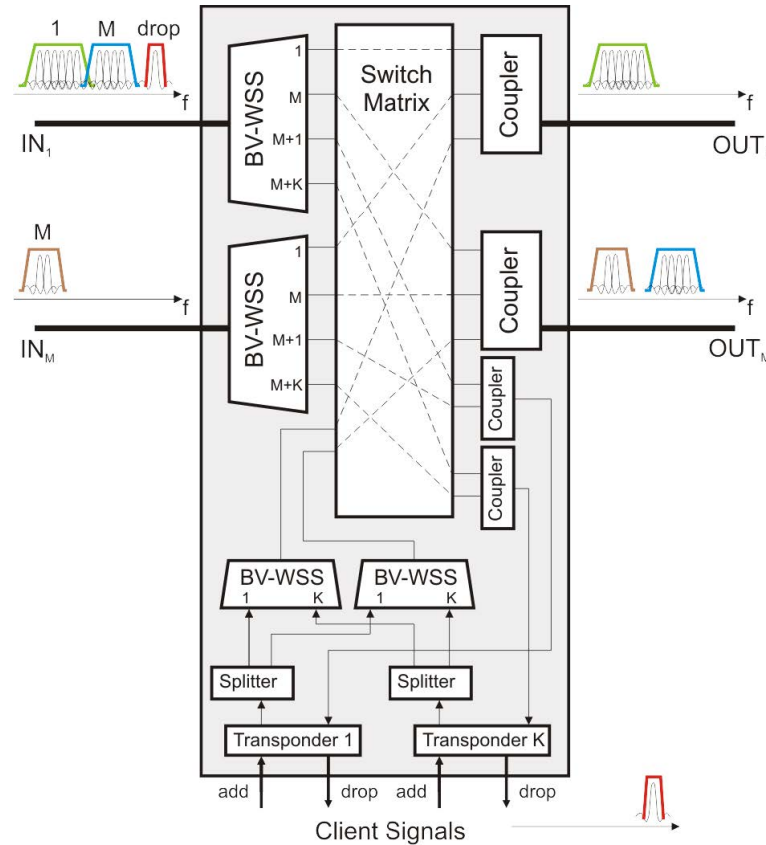
- távolság függvényében állítható moduláció
- Energiatakarékosság az adaptív moduláció és a vivők dinamikus ki-be kapcsolása miatt

Hátrány: nagy peak-to-average ratio csúcsstényezjű jel. Nagy dinamikatartományú adó és vevő kell. További nehézséget okoz az OFDM jel érzékenysége a frekvencia és fázis zajra.

1.2. Hálózati elemek

1. Rugalmas optikai hálózat csomópontja (*Bandwidth Variable Wavelength Cross Connect*):

Egy O-OFDM hálózat csomópontjai folyamatosan változtatják a kapcsolt ablak sáv-szélességét, a hagyományos WDM hálózatok csomópontjaival szemben ahol fix csatornákat kapcsolgatunk. A BV-WXC lehetővé teszi eltérő adatsebességű fényutak létrehozását. Egy ilyen BV-WXC-t láthatunk a 1.2 ábrán.



1.2. ábra. Az OFDM hálózat csomópontja(BV-WXC) [9]

2. Adó/vevő, *Date-Rate/Bandwidth-Variable Transponder*:

- OFDM vivőfrekvencia szám állítható
- adaptív moduláció
- Szuper csatorna allokalásának lehetősége

2. fejezet

Rugalmas optikai hálózat

A szélessávú internet szolgáltatások (IPTV, video on demand, felhőszámítás) gyors terjedése miatt, változatos, a Gb/s -tól Tb/s-ig terjedő sebességű forgalmi igények megjelenése várható. A jövő internetének mind időbeli, mind a térbeli forgalmi mintái dinamikusan fognak változni.

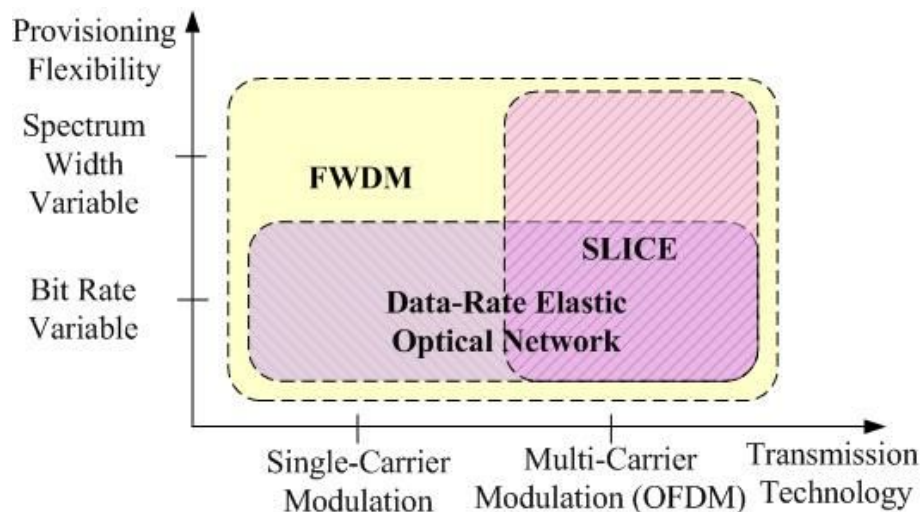
A forgalomtól függetlenül minden WDM csatorna ugyanazt a sávszélességet foglalja el. A WDM rendszerek kötött frekvenciakiosztása és durva spektrum tagoltsága, gyenge spektrum kihasználtsághoz és a különböző típusú forgalmak nem elég rugalmas kezelését eredményezi.

Egy új, rugalmas spektrumú (állítható adatsebesség és rugalmas spektrum lefoglalás), hatékony, olcsó és energiatakarékos optikai hálózati architektúra felelne meg a jövő elvárásainak. A kutatók számos lehetséges architektúrát javasoltak már (2.1 ábra):

- I Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network (SLICE) A [3][15] cikkek szerzői javasoltak először egy OFDM alapú rugalmas spektrumú optikai hálózati architektúrát SILCE néven. Vívőfrekvencia multiplexálást és rugalmas spektrum lefoglalást használ. A SLICE lehetővé teszi a sub-wavelength és super-wavelength (Optikai út ami egy transponder/hullámhossz kapacitásánál nagyobb forgalmat visz) optikai utak létesítését. A hálózat szélén változtatható adatsebességű adókat(data rate/bandwidth variable transponders), az optikai gerinc hálózatban BV-WXC-ket (Bandwidth Variable Wavelength Crossconnects) használ.
- II Flexible Optical WDM (FWDM) A rugalmas WDM architektúrát a [16] szerzői vezették be. Rugalmas csatorna kiosztást és rugalmas spektrum lefoglalást tesz lehetővé.

A fő különbség a SLICE-hoz képest, hogy az FWDM a jelenlegi WDM architektúrán alapul: egy-vívős modulációt és a több vívős (OFDM) is modulációt is használhat. Itt is BV-WXC-k alkotják a csomópontokat, a hálózati struktúra is nagyon hasonló.
- III Data-Rate Elastic Optical Network A [17] szerzői egy adatsebesség-rugalmas optikai hálózatot javasolnak (Data-Rate Elastic Optical Network). Ez a rugalmas optikai hálózat struktúra egy és több vívő frekvenciás multiplexálást is használ, rugalmasan,

többféle adatsebességet támogat. Az FWDm-el és SLICE-al ellentétben, itt kötött a spektrum rács, ami miatt teljesen kompatibilis a jelenlegi WDM rendszerekkel, viszont nincs lehetőség a spektrum rugalmas lefoglalására.



2.1. ábra. A SLICE, FWDM és Data-Rate Elastic Optical Network összehasonlítása rugalmasság és átviteli technológia alapján [17]

2.1. OFDM alapú optikai hálózati architektúra

Az OFDM alapú optikai hálózatban különböző adatsebességű sub és super hullámhosszak utakat is használunk, lehetőség van a forgalmak rugalmas kezelésére a rugalmas spektrumban. A hálózat fő alkotó elemei a BV-WXC-k és az állítható adatsebességű adó-vevők.

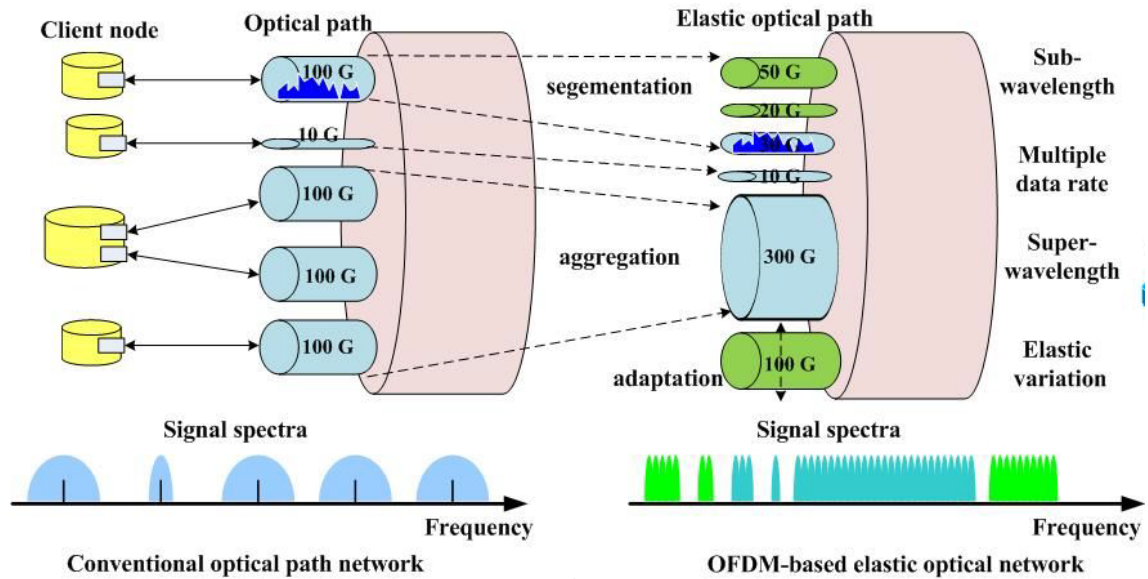
A 2.2 ábra a spektrum rugalmas optikai hálózat különböző lehetőségeit mutatja egy fényvezető szálban.

Az igényelt end-to-end sávszélességet több alacsonyabb sebességű vivőre osztva alokálja a BVT. Egy ilyen end-to-end kapcsolat mentén időben csökkenhet vagy nőhet a bitsebesség igény aminek függvényében változtathatjuk az alokált vivők számát.

Több csatorna összefogható egy szuper csatornává a köztük lévő védősávot lecsökkentve még jobb spektrum kihasználtság érhető el.

A spektrum rugalmas optikai hálózatokkal sokkal jobb spektrumkihasználtság érhető el (2.2 ábra) mint a kötött rácsú WDM rendszerekkel. A 2.2 ábra alapján láthatjuk, hogyha egy WDM csatorna nincs teljesen kihasználva akkor körülötte marad egy szabad spektrumsáv, amit a fix frekvencia kiosztás miatt a szomszédos csatornák sem tudnak átvenni. A WDM spektrum mellett ehhez a forgalomhoz tartozó OFDM spektrum hatékonyabb erőforrás kihasználtságát látjuk: a zöld frekvenciasávok a WDM rendszerhez képest nyert plusz spektrumot jelentik.

A sub-wavelength forgalomhoz, az állítható adatsebességű adó-vevők foglalják le a megfelelő számú vivőt. A super wavelength, több OFDM csatorna összefogva, a vivők közti



2.2. ábra. A WDM és OFDM optikai utak összehasonlítása (EON előnyei)[3]

védősáv nélkül.

Az OFDM előnyei:

- (1) Spektrum rugalmas szolgáltatások, sub és super hullámhosszak.
- (2) Hatékony spektrum kezelés, az adatforgalom függvényében rugalmas sáv szélességű optikai linkek. A spektrumkihasználás hatékonysága 5-95%-al nagyobb mint a WDM rendszerekben [?](erősen forgalom és topológia függő).
- (3) Állítható moduláció és vivőszám: távolság függő adatsebesség, meglévő link dinamikus sáv szélesség változtatása. Rövidebb összeköttetés esetén magasabb szintű moduláció használatával nagyobb átviteli kapacitás érhető el.
- (4) OFDM vivők kapcsolásával energiatakarékos üzemmód.
- (5) Optikai hálózat virtualizációja.

Az OFDM alapú optikai hálózat egy köztes megoldás a kötött WDM rendszerek és az optikai csomagkapcsolt hálózatok között mivel finomabb spektrumkiosztást tesz lehetővé mint a WDM, de durvább felbontású mint az optikai csomagkapcsolt hálózatok.

3. fejezet

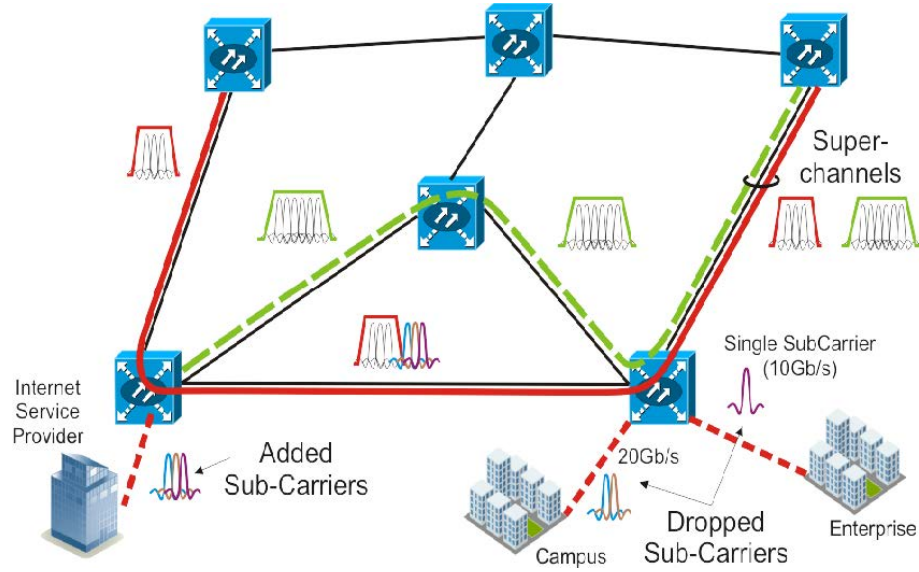
RSA módszerek

Az általunk kidolgozott algoritmusok az előző fejezetben részletezett rugalmas optikai hálózat koncepción alapulnak. A modellünk a 2.1 ábrának megfelelően több vivős modulációt használ és spektrum rugalmas.

A rugalmas spektrumú optikai hálózatokban nem alkalmazható a WDM rendszereknél használatos RWA (Routing and Wavelength Assignment) megközelítés[5]. Az útvonalválasztás és spektrum lefoglalás az EON hálózatokban komplexebb feladat mint, a kötött spektrumú WDM hálózatokban. Az összefüggő vivők lefoglalása kulcsfontosságú, mivel a szomszédos vivők átlapolódnak a frekvencia tartományban, így növelve a spektrum hatékonyságot. Az RSA NP-nehéz probléma, kiszámítsa még egy kis hálózatok esetén is nagyon számításigényes [9]. Az általunk javasolt algoritmus a SASP (Shpectrum Aware Shortest Path Routing) együttesen kezeli a spektrum lefoglalási és útvonalválasztási feladatokat.

3.1. A modell

A modellben egy All-Optical, transzparens, spektrum rugalmas optikai gerinc hálózatot tételezünk fel. A transzparens, tisztán optikai hálózatokban egy-egy linkhez fényutak tartoznak. Itt nincs O/E/O (optikai-elektromos-optikai) átalakítás a csomópontokban mint a pont-pont hálózatok esetében. A fényutak végponttól végpontig ugyan azt a hullámsávot vagy spektrumszeletet használják. Minden csomópont az optikai út mentén lefoglalja a megfelelő sáv szélességet, majd ha forgalom növekszik a transmitter növeli az átviteli kapacitást és minden WXC a fényút mentén kiszélesíti a kapcsolt spektrum ablakot. A frekvencia tartományban egy vivő sáv szélessége GHz-ben adható meg és a kapacitását Gbps-ban fejezzük ki. A modellben feltételezem, hogy az igényelt forgalom nagysága megfeleltethető az OFDM vivők számának. Célunk a sáv szélesség maximalizálása, az erőforrások minél hatékonyabb kihasználása, nagy rendelkezésre állás biztosítása. A legfontosabb erőforrás a rendelkezésre álló sáv szélesség. Fontos szempont a forgalmi igények teljesítése, a kért sáv szélesség biztosítása egy optikai összeköttetés létrehozásával, spektrum hatékony módon. Egy a modellünknek megfelelő, egyszerű teszhálózat látható a 3.1 ábrán. Az egyes éleken különböző állapotú az OFDM spektrum. A spektrum rugalmas optikai hálózatot egy irányítatlan gráffal modelleztem. Optikai gerinchálózatokban egy fényút mentén általában



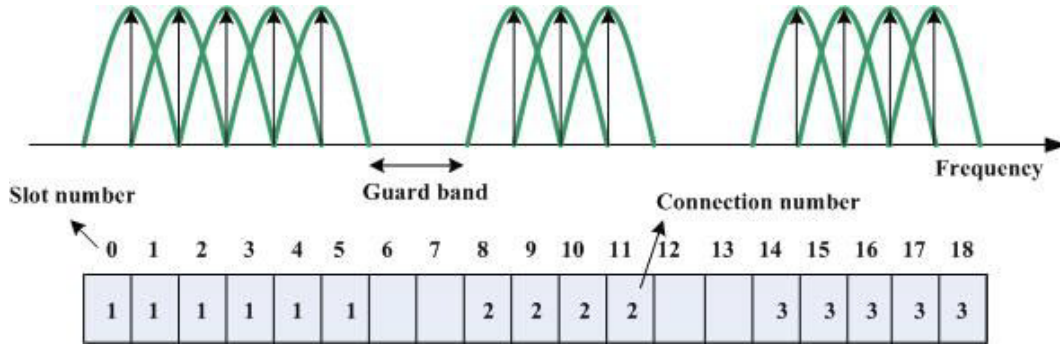
3.1. ábra. Az O-OFDM alapú spektrumrugalmas optikai hálózat[9]

ugyanakkora sávszélesség van használatban mindkét irányban, így egy irányítatlan gráf jól modellezi a hálózatot. Ha eltérő útvonalakon lenne lehetőség a két irány elvezetésére sokkal bonyolultabb, átláthatatlan hálózatot kapnánk valamint gondot okozna a két irány eltérő késleltetése is. így ettől a lehetőségtől eltekintettem. A modellben arra törekszek, hogy egy optikai út mentén a csomópontok száma minél kisebb legyen. Ezt a megfontolást azzal indokolom, hogy így más csomópontok között több szabad spektrum marad mintha egy rövidebb, de több központon átmenő utat választanánk, tehát a hálózat legfontosabb erőforrását az optikai szálak spektrumát kevésbé terheljük. A modellben egy útvonal hosszát csak az élek száma határozza meg. A későbbiekben kitérek egy olyan modellre is ahol az útvonalak hosszát a központok földrajzi távolsága adja.

A modellező gráf tehát irányítatlan, nem tartalmaz negatív és párhuzamos éleket. Minden él egységnyi hosszúságú és minden élhez tartozik egy adott hosszúságú $\{0,1\}$ sorozat ami a megfelelő optikai szál OFDM spektrumát reprezentálja. Ha 0 érték tartozik egy OFDM vivőhöz akkor azt felhasználhatónak tekintjük, nincs rajta forgalom, ellenben ha 1-es értékű akkor az algoritmus nem foglalhat le azon frekvencián.

Egy optikai OFDM hálózat egy élének spektrumát láthatjuk az 3.2 ábrán. Az OFDM vivők növekvő frekvencia szerint rendezettek és a különböző összeköttetések között védősáv van, hogy azok szétválaszthatók legyenek a vevőben.

A rugalmas spektrumú optikai hálózatot egy irányítatlan gráffal reprezentáljuk. Adott egy $G(V, E, S)$ gráf, ahol V a csomópontok és E az élek halmaza, míg S a minden élhez rendelt vivő frekvenciák halmaza. S minden elme egy rendezett $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_{MAX}\}$ halmaz ahol f_i az egyes OFDM vivőfrekvenciákat jelenti. Legyenek a kisebb indexű vivők az alacsonyabb frekvenciájúak. Jelöljön d egy kérést. Egy d kérés négy elemből áll (s_d, t_d, n_d, l_d) ahol s_d és t_d a kezdő és vég csomópontjai a kérésnek, n_d az igényelt frekvencia szeletek száma és l_d az összeköttetés élettartama. Anycast esetben egy kérés három elemből áll (s_d, n_d, l_d) , a cél csomópont az R halmaz egy tetszőleges eleme. R halmaz az is-



3.2. ábra. Egy optikai szál OFDM spektruma, a különböző összeköttetések között védősáv elhelyezése szükséges

métlőszerverek halmaza (lsd. Anycast fejezet). Jelölje P_s, t az optikai utat ahol a kiinduló csomópont t a vég csomópont. Minden P_d halmaz tartalmaz adott számú útvonalat amit s_d -ből t_d -be vezetnek. az útvonalak E egy részhalmaza ként vannak megadva. **Blokko-**
lást akkor kapunk ha az adott algoritmus nem tudja kiszolgálni a kérést, nem talál olyan útvonalat ami mentén az adott spektrum lefoglalási stratégia megfelelő számú, szabad, szomszédos OFDM vivőt lát.

Az RSA inputja:

- i **Forgalmi igény:** egy d kérésnek az s forrásból, a t cél csomópontba kell hurokmentes összeköttetést létesíteni.
- ii **Vivő kapacitás:** egy vivőfrekvenciának egységnyi kapacitásúnak kell lennie. Egy élhez tartozó adott vivőfrekvencia, egyszerre csak egy összeköttetést szolgálhat ki.
- iii **Spektrum folytonosság:** Egy fényút ugyanazokat a vivőfrekvenciákat kell használja minden élen végig az út mentén. Egy fényút vivőinek egymás mellett kell elhelyezkedniük.
- iv **Védő vivő:** A különböző fényutakat el kell választani egy védősávval ha osztoznak közös szálon. Az ilyen védősávokat védő vivőnek is nevezik (Guard carrier) [?]. Ezek teszik lehetővé az utak fizikai szétválasztását.

Ahhoz, hogy hatékony módszereket dolgozzunk ki, először meg kell határoznunk algoritmusok kiértékelésének szempontjait. Egy módszer nem feltétlen akkor jó, ha minden igényt megpróbál kiszolgálni, ez a spektrum túltelítéséhez vezethet ahogy az [?] ábrán láthatjuk. Az útvonalválasztást és a spektrum lefoglalást együtt kell kezelni.

3.2. Algoritmusok

I. Dijkstra algoritmus és spektrum allokálás:

Az itt ismertetett RSA módszer (*Dijkstra*) Dijkstra algoritmusát[18] használva keresi meg a gráfban, adott két pont között a legrövidebb útvonalat. Az algoritmus futási ideje a csúcsok számának négyzetével arányos. Ezt az algoritmust referenciaként használjuk, nem

tartozik a SASP módszerek közé.

$$O(|V^2|) \quad (3.1)$$

Az algoritmus tehát egyetlen, a legrövidebb útvonalat talál. Futása során nem figyeli a szabad spektrumot.

Ha az így talált útvonal mentén van elég szabad spektrum egy fényút létrehozásához akkor azt alokálja egyébként blokkolást kapunk. Mivel itt csak egyetlen lehetséges útvonalat tekintünk itt kapjuk a legtöbb blokkolást,

II. *K legrövidebb út:*

A K-shortest paths algoritmust [19] alapján implementáltam. Az algoritmus egy gráfban a forrástól a nyelőig, K darab útvonalat talál meg, amik legrövidebb hosszúságúak és hurokmentesek. A K-shortest path algoritmusok közül ez az egyik leghatékonyabb, a számítási bonyolultság felső korlátja K-val lineárisan nő. Az algoritmus motorját a *LEMON* függvénykönyvtár gyors, kupac adatszerkezettel megvalósított, általam módosított Dijkstra algoritmus adjja.

III. *A módosított Dijkstra algoritmus (SASP):*

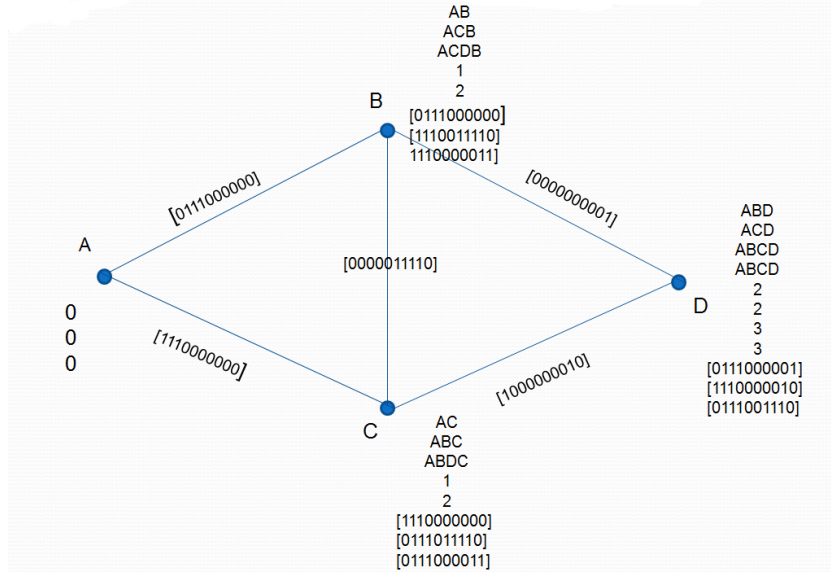
Az általunk javasolt **SASP** (Spectrum Aware Shortest Path Routing) algoritmus alapja Dijkstra legrövidebb útválasztó algoritmus[18]. Az algoritmus futási időben vizsgálja a hálózat éleinek terhettségét és ennek függvényében választ legrövidebb útvonalat. A hálózat pillanatnyi állapotától függő gráfot hozunk létre amin futtatjuk az algoritmust.

Ez az algráf nem tartalmazza azokat az éleket ahol az igényelt sáv szélesség már nem lenne lefoglalható. A dijkstra algoritmusba beépített spektrumfigyelés. Minden vizsgálandó élre ellenőrzés. Összes vizsgálat száma E. Ez a Dijkstra algoritmus kupac adatszerkezetet használ. Minden iteráció során az éppen feldolgozás alatt álló csomópont szomszédjait vizsgáljuk. Ha már egyszer jártunk az éppen vizsgált csomópontban akkor is elmentjük a lehetséges útvonalakat (hurokmentesen) és a hozzájuk tartozó spektrumot. A futás végére minden csomópontához tartozóan lesz egy, a forrástól oda vezető útvonalhalmaz és azon utakhoz tartozó spektrum. Az algoritmus futási ideje a K-shortest path módszer futási idejével azonos (K=20) esetén. Az útvonalak tárolására *LEMON path* adatszerkezet használata mellett döntöttem mivel a *path* objektum a gráf éleit tárolja és implementálva van hozzá, a csomópontokat is bejáró iterátor.

A módosított Dijkstra algoritmus működését szemlélteti a 3.3 ábra. Modellünknek megfelelően minden élhez tartozik egy adott hosszú $\{0,1\}$ sorozat az OFDM spektrum állapotát reprezentálva. A módosított Dijkstra algoritmus futása során minden bejárt csomópontához tartozóan kiszámolja az addig megtalált lehetséges útvonalakat és elmenti azok spektrumát és hosszát.

3.3. Spektrum kitöltési stratégiák

Az alábbiakban kerülnek bemutatásra az általam implementált spektrumfüggő legrövidebb útválasztó (SASP) módszerek. Három különböző spektrumfeltöltési módszerrel foglaltuk le a hálózat egyes linkjeinek spektrumát. Mindegyik alokálási stratégia a teljes út



3.3. ábra. Egy szemléltető gráf, felülrol: a lehetséges útvonala, azok hossza, és azok spektruma A csomópontból indítva a keresést

spektrumát vizsgálja. Vizsgáljuk, hogy a különböző módszerek közül melyikkel kapjuk a legkevesebb blokkolást, melyik okozza a legkisebb töredezettséget a hálózat spektrumában. A kérések sorban egymás után érkeznek, nem ismerjük őket előre.

Egy optikai út spektruma:

$$P_s, t = \{x_1, x_2, x_3 \dots\} \quad x_i = \{0, 1\} \quad 1 \quad \text{ha} \quad \exists e \in P \wedge P \subset E \quad \text{ahol} \quad f_i = 1 \quad (3.2)$$

A (3.2)-ből láthatjuk, hogy egy optikai út spektrum az összes $e \in P$ él spektrumának logikai vagy kapcsolatából számítható.

A spektrum kitöltési probléma hasonlít egy ládapakolási problémához, ahol az adott útvonal aktuális spektrumának szabad szeleti a ládák és a lefoglalni kívánt vivők száma egy elem. A kérdés, hogy melyik "ládába" "pakoljuk" az igényelt forgalmat.

(i) **Egy oldalú feltöltés:**

A szabad spektrumot a legkisebb indexű OFDM vivőtől keressük. Az optikai út spektrumának legalacsonyabb indexű vivőjétől kezdve felfelé lépünk, ha találunk $n_d + 2$ széles üres sávot ott a védősávot beiktatva lefoglaljuk az n_d széles frekvenciasávot. A hálózat spektruma az alacsonyabb frekvenciákon várhatóan telítettebb lesz.

(ii) **Hézag kitöltés:**

Az adott optikai út spektrumát vizsgálva, a legnagyobb szabad sáv közepén foglaljuk le az igényelt sávot.

Ez egy mohó algoritmus: a ládák méretük szerinti csökkenő sorrendben vannak indexelve és az első legalább $n_d + 2$ szélességű ládába "pakolunk".

Ez a módszer okozza várhatóan a legnagyobb töredezettséget a spektrumban, így dinamikus megszűnő és érkező forgalmakra szimulálva itt kapjuk a legtöbb blokkolást. A szabad erőforrások minden sikeres allokálás során megfelel az algoritmus, általában két keskeny szabad sávot hagyva a lefoglalt vivőfrekvenciák mellett.

Ennek a módszernek létjogosultsága a már létrejött dinamikus változó szélességű összeköttetések esetén van. Ilyen körülmények között ahelyett, hogy folyamatosan új kérések érkeznenek, ezzel új összeköttetéseket hozva létre, a már meglévő linkek bitsebessége változik. A hízagkitöltési stratégia minden összeköttetés mellett a lehető legnagyobb szabad spektrumot hagyja, így lehetővé téve az adott link által lefoglalt OFDM vivők számának növelését vagy csökkentését, a spektrumban szomszédos összeköttetések változatlansága mellett. Egy új problémakörrel foglalkoznak [20] szerzői amikor a hálózat közel maximális kihasználtsága mellett egy csatorna sávszélességét növelve a szomszédos csatornák sávszélességét csökkentjük.

(iii) **Két oldalú feltöltés:**

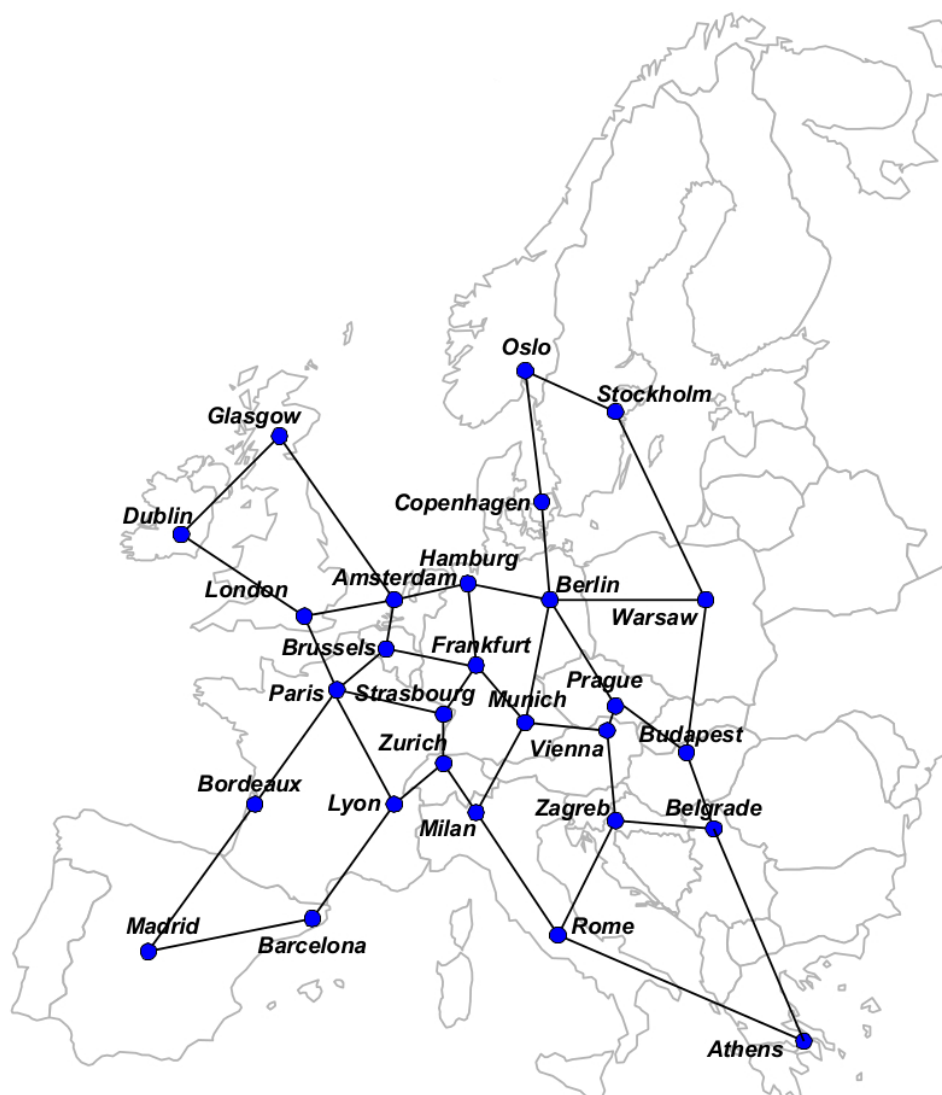
A két széle (legkisebb és legnagyobb frekvencia) felől vizsgáljuk az adott optikai út spektrumát. Ez is egy mohó algoritmus, ahol először talál elég $n_d + 2$ széles üres sávot ott allokál. Az út spektrumának vizsgálata párhuzamosan történik a két irányból, az iterációt a kisebb indexű vivőktől kezdve.

(iv) **Spektrum függő védelem (lásd. Védelmek fej. SAP) :**

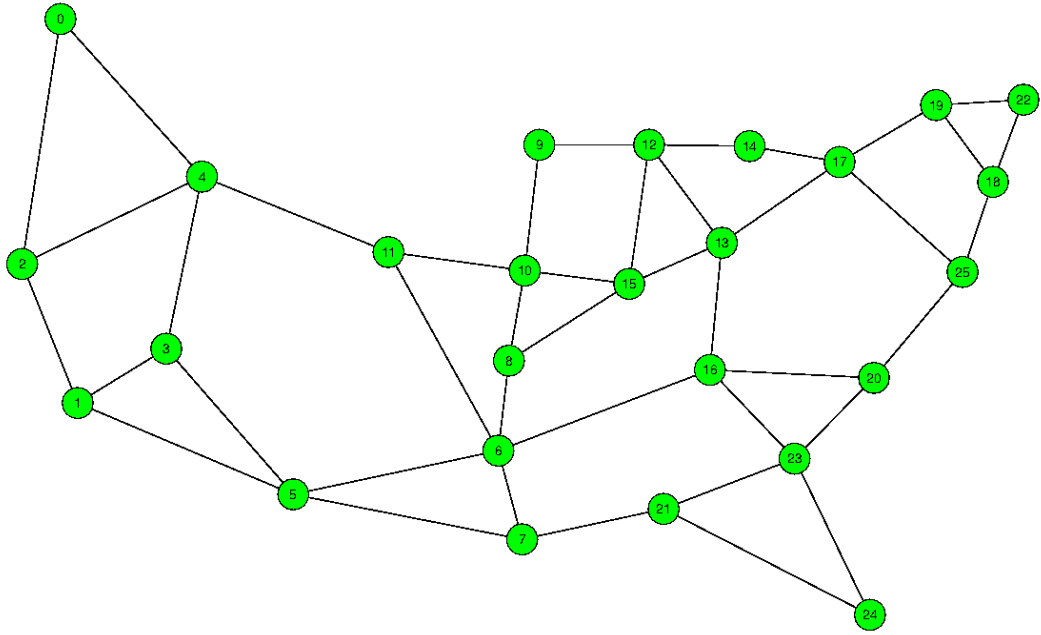
Az optikai spektrumot szétválasztjuk üzemi és védelmi linkek szerint. A spektrum egyik felében foglalunk le üzemi útnak, a másik felében védelmi útnak.

3.4. RSA szimuláció

A szimulációkat az alábbi 3.1 és 3.2 ábrákon látható hálózatokra futtattam. Az 3.1 ábrán lévő a 28 csomópontos és 41 élű európai teszhálózat és a 3.2 ábrán látható 26 csomópontos 42 élet tartalmazó észak-amerikai hálózat topológiája jelentősen eltér. Mindkét hálózatban a csomópontok a már korábban leírt tulajdonságokkal jellemzett BV-WXC-k. A kliens réteg felől érkező kérések két ilyen csomópont között igénylik az optikai összeköttetés létrehozását, növelését. Az egyszerűség és átláthatóság kedvéért a modellben két csomópont közötti él, minden esetben két darab egy módusú optikai szálát jelent. A két szálon a spektrum szeletek teljesen szimmetrikusan vannak lefoglalva: egyik szál az egyik irányba a másik a másik irányba. Következésképpen a két szál jellemezhető egy spektrummal. A gyorsabb futás érdekében eltekintettem attól, hogy külön kezeljem a két irányt, a szimmetria miatt teljesen azonos a két szál viszont a futási időt növelné, ezért egy függvénnyel kitöröltem a párhuzamos éleket a gráfokból. Szimulációim célja az egyes RSA algoritmusok hatékonyságának összevetése, a hálózatok dinamikus terhelése esetén.



3.4. ábra. COST 266 EU hálózat, 28 Node, 41 Link



3.5. ábra. *USFNEÉszak-amerikai hálózat 26 csomóponttal*

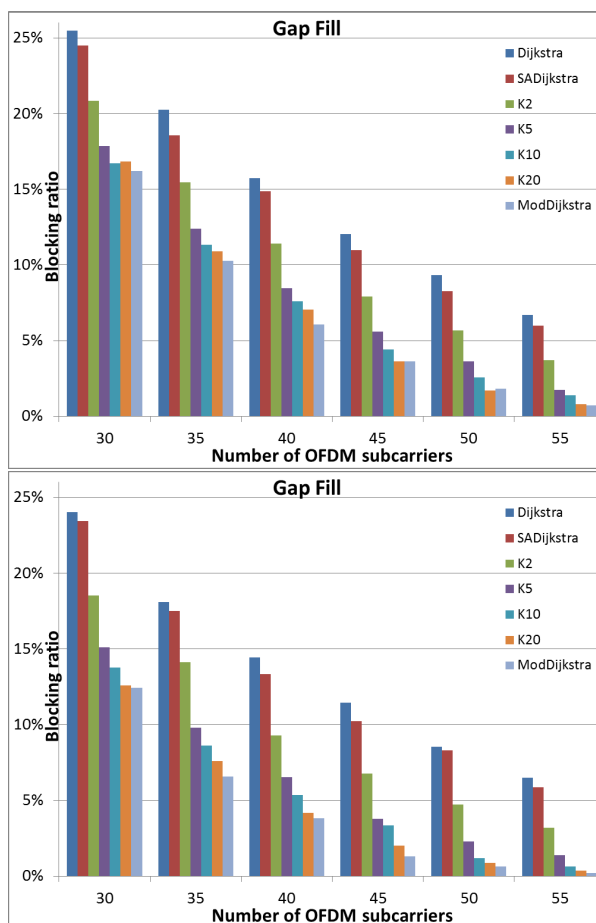
A modellben end-to-end grooming-ot használok. Ha egy meglévő fényút két végpontjához újabb kérés érkezik akkor a program megpróbálja a meglévő fényút mellé, spektrum folytonosan, védősáv használta nélkül allokálni az igényelt sáv szélességet. Amennyiben nincs elég szabad sáv a meglévő fényút mellett, új útvonalat keres. A *pathmatrix* -ből tudjuk, hogy milyen fényutakon van összeköttetés két csomópont között. Ha egy már meglévő fényúthoz érkezik csökkentés vagy növelés, akkor megkeressük a mátrixból a fényutat, ellenőrizzük, hogy kiszolgálható-e a kérés, majd a fényút mentén végrehajtjuk a megfelelő hullámsávban. Az end-to-end grooming forgalomkötegelési módszerrel csökkenthető a hálózat spektrumának töredezettsége.

Az algoritmusok hatékonyságát legjobban a valóságos körülményekhez hasonló szimulációs környezetben vizsgálhatjuk. Az optikai gerinc hálózatok terhelése folyamatosan változik. Minden kérés rendelkezik tartási idővel. A kérés sikeres teljesítése esetén elmenti a program a tartási időt, majd azt minden iteráció során csökkenti. Amikor eléri a nullát az összeköttetés mentén fel lesz szabadítva a kérés során lefoglalt sáv szélesség. A felszabadított és lefoglalt linkek aránya között egyensúlyra törekedtem. Mivel ha a blokkolások száma végig a futás során nulla, nem lehet összehasonlítani az algoritmusokat és spektrum feltöltési stratégiákat. Ellenben ha a blokkolások száma túl magas, akkor a normálistól nagyon eltérő körülmények között szimulálunk. A blokkolások száma függ a hálózat topológiájától, az OFDM vivők számától, a beérkező kérésektől (útvonal hossza, igényelt sáv szélesség) és a tartási időtől.

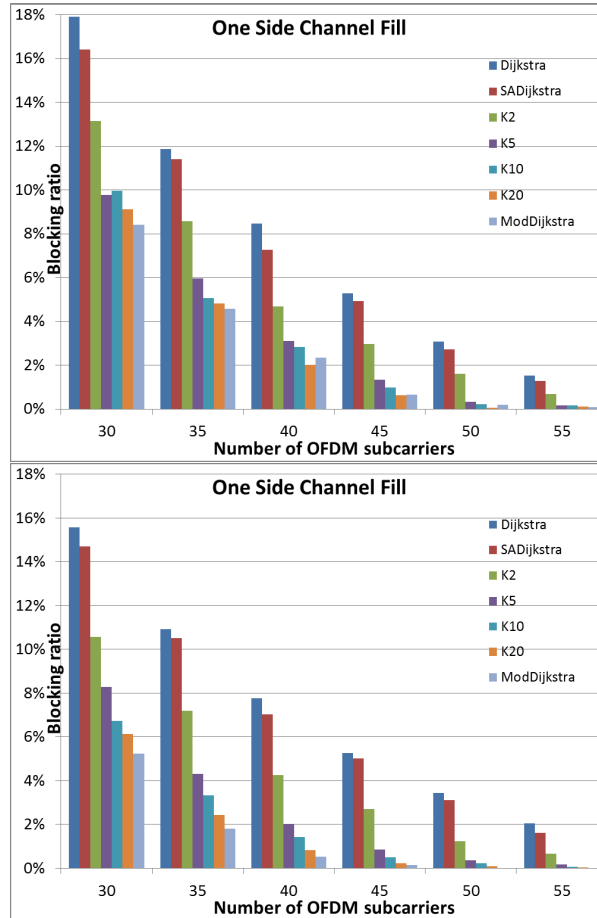
Szimulációim eredményessége szempontjából a tartási időt úgy kellett megválasztani, hogy a blokkolások aránya 30% alatt legyen. Az egyes kérések tartási ideje exponenciális eloszlású, 33 várható értékkel.

3.5. RSA eredmények

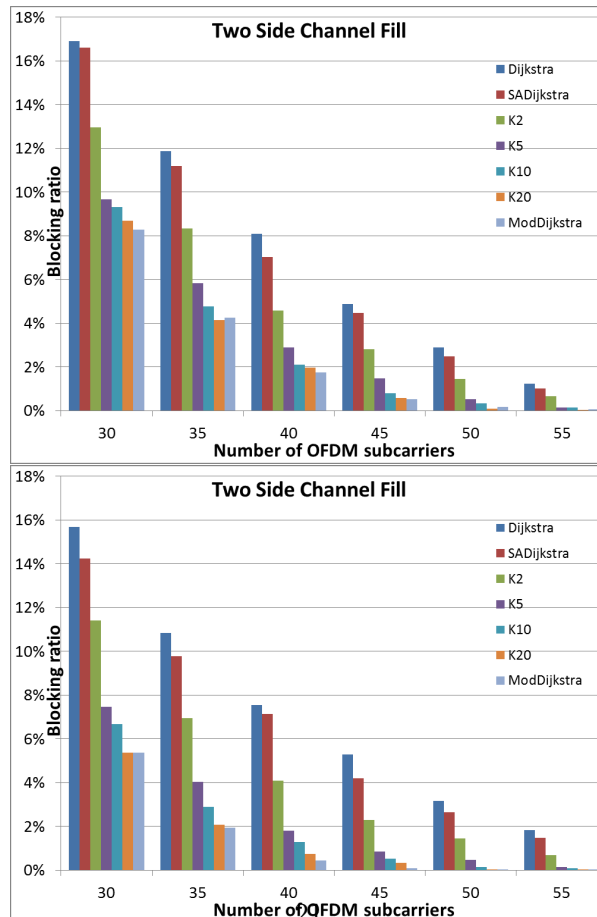
Egy hálózatra az összes futtatást ugyanazokkal az adatokkal végeztem. A véletlen szám generátort mindig ugyanazzal a file-al inicializáltam. A kérések véletlenszerűen érkeztek két csomópont között és szélességük 1-5 OFDM vivőfrekvencia között alakult. Az egyes összeköttetések tartási idejét exponenciális eloszlású véletlen szám generátorral adtam meg. A szimulációs körülmények minden futtatás során azonosak voltak az adott hálózatra. A megfelelő blokkolási arányokat az OFDM vivők számának növelésével értem el. Ezzel a módszerrel, különböző terheltségi szintek mellett lehet összehasonlítani az RSA módszereket.



3.6. ábra. Hézag kitöltés az EU és US hálózatra: Blokkolások vs. vivők száma a 7 RSA módszerre.



3.7. ábra. Egy oldalú kitöltés az EU és US hálózatra: Blokkolások vs. vivők száma a 7 RSA módszerre.



3.8. ábra. Két oldalú spektrum kitöltés az EU és US hálózatra: Blokkolások vs. vivők száma a 7 RSA módszerre.

4. fejezet

Védelem

Az optikai hálózatok megbízhatósága az egyik legfontosabb szempont a tervezésnél. A szolgáltatóknak is komoly bevételkiesést okoz egy gyengébb rendelkezésre állású hálózat. Optikai gerinchálózatok esetén útvonal és csomópont védelemről is beszélhetünk. A meghibásodásoknak általában az optikai kábelek vannak kitéve, ezért a gráf modell alapján a gráf éleinek védelme az elsődleges szempont.

Modellünkben útvonalvédelmet valósítottunk meg. A védelmi utaknak él függetlennek kell lenniük az üzemi úttól[21]. Dedikált vagy hozzárendelt útvonalvédelemnek nevezzük amikor minden üzemi fénýúthoz tartozik egy védelmi út. A forgalmat küldhetjük egyszerre mindkét úton vagy egy meghibásodás esetén átkapcsolunk a védelmi útra(7 ms). A védelmi út keresésnél feltételezzük, hogy az üzemi úttól eltérő hullámhosszon is elvezethetjük a védelmit. A védelmi útnak az üzemi úttól élfüggetlennek kel lennie. A szimulációs hálózatnak legalább kétszeresen élfüggetlennek kell lennie, hogy védelmi utat találjunk.

4.1. Megosztott védelem

Védelem és üzemi szétválasztása frekvenciában SRLG (Shared Risk Link Group). Az SRLG az élek egy olyan halmaza amik közös kockázatnak vannak kitéve meghibásodás esetén. Például az egy SRLG-ba tartozó élek meghibásodása (pl kábel szakadás) esetén a többi élen is megszakad az átvitel. Megosztott védelem szempontjából az SRLG tágabb halmazt jelöl mint hozzárendelt védelem esetén. Nem elég az üzemi úttól való élfüggetlenség. Olyan védelmi spektrum nem megosztható ami az üzemi úthoz, vagy az üzemi úttal legalább egy közös éllel rendelkező üzemi úthoz tartozik. Egy üzemi út védelmének kialakításakor a következő szempontoknak kell teljesülni: (i) a védelmi út élfüggetlen az üzemitől, (ii) ha osztozunk egy meglévő védelmi kapacitáson, akkor ahhoz a védelemhez tartozó üzemi útnak nem lehet közös éle az eredeti üzemi úttal (egy SRLG-be tartoznak).

Egy SRLG tartozó éleknek :

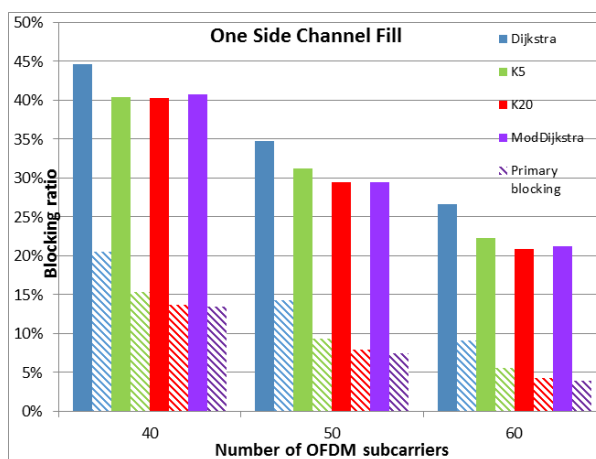
- nem mehet közös élen a védelmük
- nem megosztható a védelmük

4.2. Spektrum függő védelem

Az általunk javasolt algoritmus a spektrum függő védelmi algoritmus (SAP: Spectrum Aware Protection) a módosított Dijkstra algoritmuson alapul (SASP). Védelmi út választásához és lefoglalásához módosítottuk a SASP algoritmust. A spektrumban szétválasztottuk az üzemi és védelmi utakat. Ez a módszer adja a legjobb eredményeket.

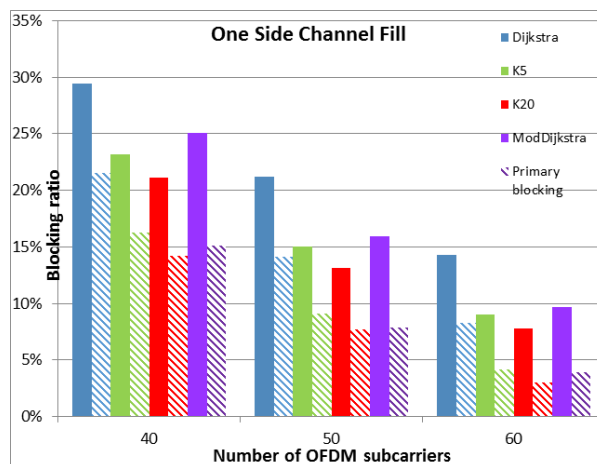
4.3. Szimulációs eredmények

Az alábbi ábrákon (4.1, 4.2) a dedikált 4.1) és a megosztott 4.2 védelem eredményeit láthatjuk a különböző RSA módszerekkel a vivőszám függvényében. Megkülönböztetjük az *üzemi utak blokkolását*, ebben az esetben sem üzemi sem védelmi utat nem tudunk lefoglalni, valamint a *védelmi utak blokkolását*, amikor lefoglaltunk üzemi utat de ahhoz tartozó védelmit már nem tudunk. A telt oszlopok az összes blokkolás (üzemi+védelmi és csak védelmi) arányát mutatják, a satírozott oszlopok az üzemi utak blokkolási arányát mutatják. A két szomszédos oszlop különbsége az az arány amikor találtunk üzemi utat, de hozzá védelmet már nem tudtunk lefoglalni. Minden ábrán három különböző algoritmus blokkolási arányait hasonlítottunk össze az OFDM vivők számának növelése mellett.

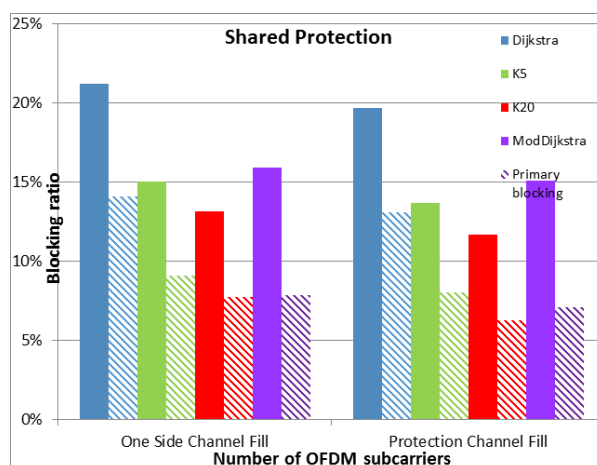


4.1. ábra. Hozzárendelt védelem az EU hálózaton: Blokkolások vs. vivők száma a 4 RSA módszerre.

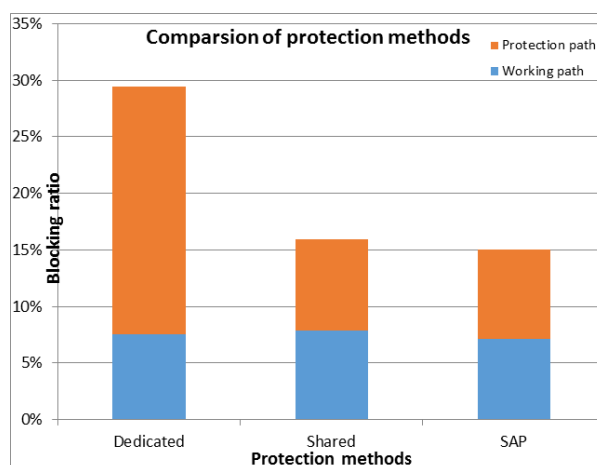
A 4.4 ábrán azonos szimulációs körülmények között hasonlítottuk össze a különböző védelmi módszereket. A hozzárendelt védelemmel kapjuk a legtöbb blokkolást, a megosztott védelemmel jelentősen kevesebbet, míg a legjobban az általunk javasolt SAP (Spectrum Aware Protection) teljesít.



4.2. ábra. Megosztott védelem az EU hálózaton: Blokkolások vs. vivők száma a 4 RSA módszerre.



4.3. ábra. A védelmi és az egyoldali spektrumkitöltési stratégiák összehasonlítása



4.4. ábra. A különböző védelmi módszerek összehasonlítása

5. fejezet

Anycast

Napjainkban az új internet szolgáltatások, mint a felhőszámítás, (cloud computing), tartalom szolgáltató hálózatok, (Content Delivery Network) vagy videó streamelés rohamos terjedése miatt nagy szükség van az ezeket kiszolgáló új átviteli technikákra. Ilyen technika az anycast, ami egy csomóponttól egy csoport bármelyik tagjához biztosít átvitelt.

Az anycast technikával az unicast átvitelhez képest jelentősen csökkenthetjük a hálózati forgalmat. A CDN (tartalom szolgáltató hálózat) esetén egy szolgáltató által nyújtott tartalmat több szerverhez is feltöltünk, így a kliens rövidebb úton, kisebb késleltetéssel juthat hozzá. Jelenleg az Akamai a legnépszerűbb CDN rendszer az interneten. Az Akamai, a teljes internetforgalom 15-30% -át bonyolítja le közel 100 000 szerveren keresztül [22]. A Cisco szerint 2016-ra az internet teljes fogyasztói forgalmának 86%-a videó tartalom lesz, peer-to-peer-en, vagy szervereken keresztül szolgáltatva [23]. A szakirodalomban fellelhető EON anycast megoldások közül a [10] szerzői off-line esetre javasolnak ILP algoritmust és heurisztikus algoritmust, míg a [24] szerzői dinamikus esetre mutatnak algoritmusokat. A [10] szerzői által javasoltan mi is 1-4 szerveret feltételezünk a teszt hálózatokban. Anycast útválasztásnál egy kliens adott számú szerver közül bármelyikhez kapcsolódhat. A szerverek tipikusan ugyanazt a tartalmat szolgáltatják. Az anycast igények kiszolgálása egy spektrum rugalmas optikai hálózatban RSA (Routing and Spectrum Allocation) probléma. A szerverek hálózaton belüli, topologikus elhelyezkedés lehet véletlenszerűen választott is, vagy előre meghatározott. Mi az utóbbit választottuk, tipikusan nagy foksámú, nem szomszédos csomópontokat választottunk. A kienstől minden szerverhez keresünk utat SASP algoritmussal, majd lehetőségek közül a legrövidebbet választjuk. Így egyrészt a rövidebb úttal, kisebb késleltetést és jobb spektrumkihasználást kapunk, másrészt rövidebb úton magasabb szintű moduláció alkalmazható[13]. Üzemi utak választásánál is alkalmazzuk az end-to-end groomingot. Ha van meglévő út a célcsoomópont és a szerver között, akkor azt próbáljuk bővíteni az igényelt sávszélességgel.

Az anycast üzemi utakat is elláttuk védelemmel. A védelmi utak választása három különböző módon történt:

- (i) Csak az útvonalnak kell különböznie az üzemitől. Link hibát feltételezünk a hálózatban, a szerver meghibásodással nem számolunk.
- (ii) Csak a szervernek kell különböznie az üzemitől, a védelmi útnak lehet közös éle az

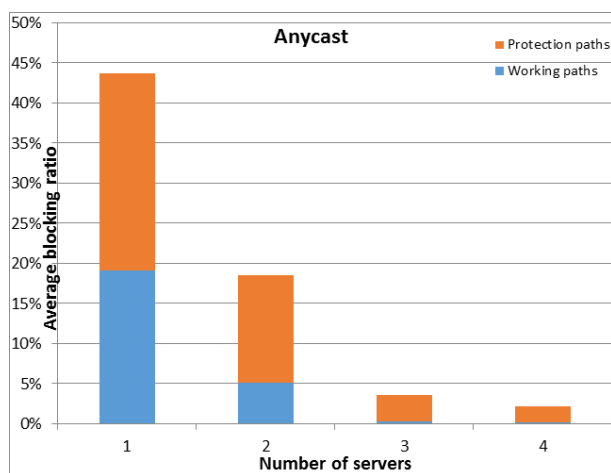
üzemivel. Csak a szerver hibától védünk.

(iii) A védelmi út élfüggetlen az üzemítőől, valamint másik szerverhez kell kapcsolódjon a kliens. Szerver és élhibától is védünk. Ez a legbiztosabb védelem, viszont több erőforrást igényel.

Védelmi útválasztásnál is alkalmazzuk az end-to-end groomingot.

5.1. Szimulációs eredmények

A 5.1 ábrán az anycast szimuláció eredményeit láthatjuk. Itt csak anycast igények érkeztek dinamikusan.



5.1. ábra. Anycast üzemi és védelmi blokkolások a szerverszám függvényében

6. fejezet

Értékelés

Dolgozatomban kifejtettem az általam kidolgozott RSA algoritmusok, védelmi módszerek és anycast módszerek működését és valós optikai gerinchálózatok modelljein futtatott szimulációkkal támasztottam alá hatékonyságukat. Új kihívás a védelem és a népszerű anycast routing megvalósítása ezekben a hálózatokban.

A *SASP* módszer spektrumfoglaltság függő útvonalválasztást valósít meg end-to-end grooming-ot használva. Szimulációinkat előre nem ismert, időben változó, véletlenszerű igényekkel és dinamikusan megszűnő, újra érkező forgalmakkal futtattuk. Az algoritmusokat összevetve a különböző helyzetekben, a *SASP* (módosított Dijkstra) algoritmust ajánljuk *SAP* (Spectrum Aware Protection) védelemmel. Kevésbé jól, de még elfogadható eredményekkel teljesítenek a *K10* és *K20* algoritmusok.

A spektrumfoglalási stratégiák közül az egy oldalról és két oldalról lefoglaló módszerek között nincs jelentős különbség. A két oldalról feltöltés a legtöbb esetben valamivel jobban teljesít, kevesebb a blokkolások aránya. A védelmi spektrum feltöltés, védelmi szimulációk esetén kevesebb blokkolást ad. A hézag kitöltési stratégia a már meglévő összeköttetések dinamikus változása (bitsebesség növelés, csökkentés) esetén lehet eredményes.

Módszereink spektrumfoglaltság függő útvonalválasztást valósítanak meg end-to-end grooming-ot használva figyelembe véve a védelmi utak biztosítását.

Irodalomjegyzék

- [1] G. Zhang, M. De Leenheer, A. Morea, and B. Mukherjee, „A survey on ofdm-based elastic core optical networking,” *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 15, no. 1, pp. 65–87, 2013.
- [2] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, and S. B. Yoo, „Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 50, no. 2, pp. s12–s20, 2012.
- [3] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, and S. Matsuoka, „Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, no. 11, pp. 66–73, 2009.
- [4] Y. Zhang, X. Zheng, Q. Li, N. Hua, Y. Li, and H. Zhang, „Traffic grooming in spectrum-elastic optical path networks,” in *Proc. OFC/NFOEC*, 2011.
- [5] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Varvarigos, „Elastic bandwidth allocation in flexible ofdm-based optical networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 9, pp. 1354–1366, 2011.
- [6] P. N. Ji, A. N. Patel, D. Qian, J. P. Jue, J. Hu, Y. Aono, and T. Wang, „Optical layer traffic grooming in flexible optical wdm (fwdm) networks,” in *European Conference and Exposition on Optical Communications*, Optical Society of America, 2011.
- [7] G. Zhang, M. De Leenheer, and B. Mukherjee, „Optical traffic grooming in ofdm-based elastic optical networks [invited],” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 4, no. 11, pp. B17–B25, 2012.
- [8] M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka, and A. Hirano, „Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network [topics in optical communications],” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 48, no. 8, pp. 138–145, 2010.
- [9] M. Klinkowski, D. Careglio, *et al.*, „A routing and spectrum assignment problem in optical ofdm networks,” 2012.
- [10] K. Walkowiak and M. Klinkowski, „Joint anycast and unicast routing for elastic optical networks: Modeling and optimization,” in *Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 3909–3914, IEEE, 2013.

- [11] M. Zhang, W. Shi, L. Gong, W. Lu, and Z. Zhu, „Bandwidth defragmentation in dynamic elastic optical networks with minimum traffic disruptions,” in *Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 3894–3898, IEEE, 2013.
- [12] S. Shirazipourazad, Z. Derakhshandeh, and A. Sen, „Analysis of on-line routing and spectrum allocation in spectrum-sliced optical networks,” in *Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 3899–3903, IEEE, 2013.
- [13] X. Chen, Y. Zhong, and A. Jukan, „Multipath routing in elastic optical networks with distance-adaptive modulation formats,” in *Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 3915–3920, IEEE, 2013.
- [14] W. Shieh, H. Bao, and Y. Tang, „Coherent optical ofdm: theory and design,” *Optics Express*, vol. 16, no. 2, pp. 841–859, 2008.
- [15] M. Jinno, H. Takara, and B. Kozicki, „Concept and enabling technologies of spectrum-sliced elastic optical path network (slice),” in *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*, p. FO2, Optical Society of America, 2009.
- [16] A. N. Patel, P. N. Ji, J. P. Jue, and T. Wang, „Routing, wavelength assignment, and spectrum allocation algorithms in transparent flexible optical wdm networks,” *Optical Switching and Networking*, vol. 9, no. 3, pp. 191–204, 2012.
- [17] O. Rival and A. Morea, „Elastic optical networks with 25–100g format-versatile wdm transmission systems,” in *Optoelectronics and Communications Conference (OECC), 2010 15th*, pp. 100–101, IEEE, 2010.
- [18] E. W. Dijkstra, „A note on two problems in connexion with graphs,” *Numerische mathematik*, vol. 1, no. 1, pp. 269–271, 1959.
- [19] J. Y. Yen, „Finding the k shortest loopless paths in a network,” *management Science*, vol. 17, no. 11, pp. 712–716, 1971.
- [20] Y. Sone, A. Watanabe, W. Imajuku, Y. Tsukishima, B. Kozicki, H. Takara, and M. Jinno, „Highly survivable restoration scheme employing optical bandwidth squeezing in spectrum-sliced elastic optical path (slice) network,” in *Optical Fiber Communication-incudes post deadline papers, 2009. OFC 2009. Conference on*, pp. 1–3, IEEE, 2009.
- [21] H. Péter, *Védelem és forgalomterelés többretegű hálózatokban*. PhD thesis, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, The address of the publisher, 7 2010. An optional note.
- [22] Akamai, „@ONLINE,” June 2014.
- [23] Cisco, „Cisco visual network index @ONLINE,” June 2014.

- [24] L. Zhang and Z. Zhu, „Dynamic anycast in inter-datacenter networks over elastic optical infrastructure,” in *Computing, Networking and Communications (ICNC), 2014 International Conference on*, pp. 491–495, IEEE, 2014.

Ábrák jegyzéke

1.1. OFDM jel spektruma [?]	7
1.2. Az OFDM hálózat csomópontja(BV-WXC) [9]	8
2.1. A SLCIE, FWDM és Data-Rate Elastic Optical Network összehasonlítása rugalmasság és átviteli technológia alapján [17]	10
2.2. A WDM és OFDM optikai utak összehasonlítása (EON előnyei)[3]	11
3.1. Az O-OFDM alapú spektrumrugalmas optikai hálózat[9]	13
3.2. Egy optikai szál OFDM spektruma, a különböző összeköttetések között védősáv elhelyezése szükséges	14
3.3. Egy szemléltető gráf, felülről: a lehetséges útvonala, azok hossza, és azok spektruma A csomópontból indítva a keresést	16
3.4. COST 266 EU hálózat, 28 Node,41 Link	18
3.5. USFNEÉszak-amerikai hálózat 26 csomóponttal	19
3.6. Hézag kitöltés az EU és US hálózatra: Blokkolások vs. vivők száma a 7 RSA módszerre.	20
3.7. Egy oldalú kitöltés az EU és US hálózatra: Blokkolások vs. vivők száma a 7 RSA módszerre.	21
3.8. Két oldalú spektrum kitöltés az EU és US hálózatra: Blokkolások vs. vivők száma a 7 RSA módszerre.	21
4.1. Hozzárendelt védelem az EU hálózaton: Blokkolások vs. vivők száma a 4 RSA módszerre.	23
4.2. Megosztott védelem az EU hálózaton: Blokkolások vs. vivők száma a 4 RSA módszerre.	24
4.3. A védelmi és az egyoldalú spektrumkitöltési stratégia összehasonlítása	24
4.4. A különböző védelmi módszerek összehasonlítása	24
5.1. Anycast üzemi és védelmi blokkolások a szerverszám függvényében	26