



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Távközlési és Médiainformatikai Tanszék

ERŐFORRÁSOK OPTIMALIZÁLÁSA OPTIKAI
HÁLÓZATOKBAN ÉS PEER-TO-PEER FORGALOM
AZONOSÍTÁSA IP HÁLÓZATOKBAN

Tézisfüzet

Perényi Marcell

Témavezetők:

Cinkler Tibor Ph.D., Molnár Sándor Ph.D.
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Távközlési és Médiainformatikai Tanszék

Budapest, Magyarország
2009

1. Bevezetés

A távközlés két igen fontos, ám egymáshoz szorosan nem kapcsolódó területén állítottam fel téziseket. A tézisek egy része *hálózati erőforrások konfigurálásával és méretezésével* foglalkozik, a másik része pedig a *peer-to-peer forgalomazonosítás és forgalomelemzés* területén fogalmaz meg új állításokat IP hálózatokban. A tézisek két olyan technológiával foglalkoznak, melyek – különösen a multimédiás alkalmazások és szolgáltatások előretörése révén – különösen jelentőséggel bírtak az elmúlt években az Internet és számítógépes hálózatok fejlődésében. Érdekes módon a két technológia egymással szemben hat: az egyik a forgalom növekedéséért felelős, a másik technológia pedig a megnövekedett forgalom kiszolgálását könnyíti meg.

1.1. Peer-to-Peer forgalom elemzése és forgalomanalízis

A P2P rendszerek legfőbb jellemzője, hogy nem a megszokott kliens-szerver architektúrára épülnek, hanem egyenrangú peer-ek együttműködésén alapulnak. Ezen az elven alapul a P2P rendszerek rendkívüli alkalmazkodó, „túlélő” képessége, köszönhetően annak, hogy folyamatosan új peer-ek csatlakoznak a rendszerhez, míg persze mások elhagyják azt.

Mára a P2P alkalmazások adják az Internetes forgalom legnagyobb részét, és valószínűleg az azonosítatlan forgalom jelentős részét is, túlszárnyalva ezzel a klasszikus web forgalmat [1][2]. Ezért a P2P forgalom tekinthető felelősnek a távközlési hálózatokban fellépő sosem látott mértékű forgalomművekedésért.

A másik tényező, mely jelentősen növelte a hálózati forgalmat, a magas minőségű (elsősorban a nagyfelbontású videó) multimédiás tartalmak megjelenése. Multimédia forgalom továbbítására, elosztására két ígéretes megközelítés kínálkozik: *multicast* továbbítás, ill. *P2P alapú* továbbítás. A két lehetőség nem feltétlenül zárja ki egymást. A multicast továbbítás [3] kétségtelenül a nagy sávszélességet igénylő multimédiás forgalom továbbításának leggazdaságosabb módja, különösen, ha egy alsóbb hálózati rétegben valósítjuk meg. Másfelől a P2P szétosztás nagyon kényelmes, könnyen megvalósítható az alkalmazási rétegben. Noha pazarolja a sávszélességet, az Interneten különösen népszerű.

A P2P elv legfontosabb alkalmazási területe a *fájlmegosztás* [4] (kép, film, zene fájlok, alkalmazások stb.), mely gyakorta *illegális tartalom* terjesztésével társul. Ez a tartalom tulajdonosai és a kiadók számára

jelentős veszteséget jelent, így ők erősen ellenérdekeltek a P2P fájlmegosztók használatában. Az első népszerű P2P alapú multimédia tartalmegosztó rendszernek (Napster) számos követője akadt (BitTorrent [5], Gnutella [6], eDonkey stb.).

A P2P technológiát sokszor olyan *kommunikációs szolgáltatások* biztosítására használják, mint az „Internetes jelenlét” (presence), chat, a – hagyományos vonalas telefontal azonos vagy akár jobb minőségű – Internetes telefonbeszélgetések (Voice over IP, VoIP), videokonferencia vagy fájlátvitel. Többek között olyan népszerű alkalmazások születtek, mint a Skype, a Windows Live vagy a Google Talk. Ezen szolgáltatások némelyike valódi alternatívát jelent a hagyományos telefonos (akár mobiltelefonos) szolgáltatásokhoz képest, mert jóval olcsóbban vagy akár ingyenesen használhatók.

A P2P alkalmazások több okból is fejfájást okoznak a vonalas és a mobil telefonos szolgáltatóknak:

- A fájlmegosztási adatforgalom emészt fel a sávszélesség legnagyobb részét, mind a hozzáférési, mind a gerinchálózatokban. Különösen a „megszállott” felhasználók (ún. „heavy user”-ek) visznek el jelentős sávszélességet.
- A P2P forgalom sokszor illegális fájlmegosztással társul, ezért a szolgáltatókra nagy nyomás nehezedik, hogy fellépjenek az illegális tartalmak ellen.
- A P2P VoIP alkalmazások veszélyeztetik a hagyományos telefonos szolgáltatók (különösen a mobilszolgáltatók) kiváltságait. A mobilszolgáltatók a beszédszolgáltatást általában perc alapon, míg az adatátvitelt forgalomarányosan számlázzák. Ezen szolgáltatások megfelelő árazásának érdekében fontos tudni a VoIP alkalmazások (köztük a Skype [7], mint a legnépszerűbb VoIP alkalmazás) által generált hívások számát, hosszát és a kapcsolódó adatforgalmat. Ennek ismeretében a szolgáltató meghatározhatja a beszédforgalom percdíjának és az adatátvitel forgalomalapú díjának számára kedvező arányát.

A felsorolt okok miatt számos szolgáltató igyekszik a hálózatán belül szabályozni, korlátozni vagy éppen megtiltani a P2P alkalmazások használatát. Ennek következményeképpen az újonnan megjelenő, népszerű P2P alkalmazások próbálják elrejteni jelenlétüket és a generált forgalmat, mely *alaposan megnehezíti a forgalom azonosítását* (bővebb áttekintés olvasható a Disszertáció 8.1 fejezetében).

A P2P forgalom megbízható azonosítása a *forgalomszűrés, blokkolás, „formálás”, mérés és a forgalomanalízis* elengedhetetlen feltétele.

1.2. Optikai hálózatok

A P2P alkalmazások és a gazdag multimédiás tartalom az Internetes forgalom robbanásszerű növekedéséhez vezetett. Ezt a megnövekedett forgalmi igényt kezelni kell tudni a hálózati szolgáltató részéről. A rohamosan növekvő forgalmi terhelés és kapacitás-problémák megoldásának egyetlen lehetséges módja (különösen hosszú távon) az *optikai technológia* [8][9] alkalmazása.

A több hullámhosszon történő adatátvitelt, a *WDM (Wavelength Division Multiplexing, [10])* technológiát, a meglévő optikai összeköttetések kapacitásának megnövelése érdekében vezették be.

A kezdeti, „single hop” WDM alapú, optikai rendszerekben (All Optical Networks, AON) az átvitelt során a hullámhosszakat tisztán az optikai tartományban kezelték, bármiféle elektronikus konverzió nélkül [11][12].

A WDM hálózatok sikerrel oldották meg a kapacitásproblémát, azonban az állandóan változó forgalmi igények továbbra is nehéz helyzet elé állítják a hálózati szolgáltatót. Az újonnan megjelenő forgalmi igények gyakran nem elégíthetők ki a hálózat áttervezés nélkül, ami igen költséges és bonyolult, ezért a szolgáltatók igyekeznek elkerülni ezt a megoldást. Különösen igaz ez alacsony aggregációs szinteken, ahol a forgalom még változékonyabb. Egy olyan rendszerre van szükség, mely képes biztosítani a WDM hálózatok által nyújtott sávszélességet, ugyanakkor rendelkezik a SONET/SDH [13] hálózatok rugalmas tervezési és felügyeleti jellemzőivel. A megoldás kellően rugalmas kell hogy legyen, hogy ki tudja elégíteni a dinamikusan változó forgalmat.

Noha a folyamatosan változó (*dinamikus*) *forgalmi igények* kezelése a szolgáltató szempontjából jóval bonyolultabb, mint a statikus konfiguráció, a dinamikus hálózatokra az utóbbi időben – elsősorban a kutatás területén – több figyelmet fordítottak.

Az *újrakonfigurálható optikai hálózatok* (pl. [14]) megteremtik a lehetőséget a változó forgalmi igényekhez való gyors alkalmazkodáshoz előzetes tervezés, konfigurálás vagy a meglévő igények megszakítása nélkül. A múltban az újrakonfigurálható optikai hálózati technológia túlságosan drága és éretlen volt ahhoz, hogy széles körben használják. A mostanra megérett szilikon alapú PLC (Planar Lightwave Circuit) elemeknek köszönhetően az *újrakonfigurálható optikai leágazó/nyaláboló modulokat* (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer, ROADM) egyre több szolgáltató kezdi el telepíteni. Az ROADM technológia valódi

áttörést jelent a WDM hálózatokban, megteremtve azokat az új funkciókat és azt a rugalmasságot, mely a mai bonyolult optikai hálózatokban szükséges. Az ROADM lehetővé teszi, hogy a szolgáltató távolról újrakonfigurálja a ki- és a becsatolni kívánt sáv szélességet, kiküszöbölve ezzel az időigényes és bonyolult kézi újrakonfigurálást.

Az ROADM azonban önmagában nem elég. A technológia valódi lehetőségeinek kihasználásához a nagyvárosi- és a gerinchálózatokban *hullámhosszankénti jelszint menedzsment*, *jelszint mérési* és hibaizolációs képességekre van szükség. Az ilyen funkcióval (mely az igazi áttörést jelenti a WDM technológiában) rendelkező optikai eszközök, termékek már majdnem minden gyártó piaci kínálatában elérhetőek ([15]-[18]).

A következő lépés egy teljesen újrakonfigurálható optikai WDM hálózat kialakítása felé a hangolható SFP (Small Form-factor Pluggable) modulok használata, ahol a hullámhosszak kiosztása a forgalom változásának függvényében történik. Egy további újítás a hangolható *diszperzió kompenzáló modulok* használata, melyek ma már készen kapható termékek ([19][20]).

A *fizikai hatások figyelembe vétele* optikai hálózatokban – az útvonalválasztás, konfiguráció és felügyelet szemszögéből – népszerű kutatási témává vált [21].

Úgy tűnik, hogy az optikai hálózatok fejlődése egy *teljesen újrakonfigurálható hálózat* felé tart, ahol a vezérlő és a menedzsment sík (CP és MP) olyan új funkciókkal gazdagodik, mint a hullámhosszak kiválasztása, hangolása, a jelminőség és a diszperzió kompenzáló modulok beállítása, valamint – változtatható optikai erősítők segítségével – a jelszint meghatározása. A hagyományos funkciók, mint pl. az útvonalválasztás és hullámhossz-hozzárendelés (Routing and Wavelength Assignment, RWA), természetesen továbbra is a CP és a MP fő feladatai maradnak.

Jelenleg az optikai technológia elsősorban a gerinchálózatokban uralkodik. Ugyanakkor megfigyelhető egy folyamat, hogy az optikai végződés egyre közelebb kerül a végfelhasználóhoz (*Fiber to the Curb/Building/Home*, FTTC/FTTB/FTTH). A közeljövőben egyre több szélessávú felhasználónak lesz közvetlen optikai hozzáférése. Az optikai kapcsolat nem csak szélessávú Internet-hozzáférést kínál, hanem *nagyfelbontású TV adások (HDTV)* is elérhetőek lesznek rajta keresztül, így helyettesíti a hagyományos kábeltévés szolgáltatást is. Az optikai hozzáférés mindkét típusú igény kielégítéséhez elegendő sáv szélességgel és emellett kimeríthetetlen tartalékokkal rendelkezik a jövőbeni hasznosítás céljára.

Ahogy korábban említettem, a multicast továbbításnak (*optikai multicast*) jelentős szerepe lehet a videó csatornák szétesztésében, mind az optikai, mind a hozzáférési optikai hálózatokban, ami jelentős erőforrás- és költségmegtakarítást tesz lehetővé [26][27].

2. Kutatási célkitűzések

A céloom olyan új modellek, módszerek, algoritmusok, hálózat-tervezési és útvonalválasztási stratégiák kidolgozása volt többretegű¹ optikai hálózatokban, melyek jobb teljesítményt, magasabb átbocsátást és alacsonyabb beruházási (CAPEX) és működtetési (OPEX) költségeket eredményeznek.

Az IP forgalom azonosítása és elemzése területén a céloom megbízható forgalomazonosító módszerek kidolgozása volt, melyek az ezt követő forgalomelemzést hatékonyan szolgálják. Az elemzés eredményeképpen új forgalmi modelleket hozhatunk, és vizsgálhatjuk a felhasználói viselkedést.

3. Kutatási módszertan

A disszertációban érintett két kutatási terület eltérő módszertant alkalmaz. Az erőforrás optimalizálás optikai hálózatokban egy speciális hálózati modellre épül. A választott modell a *hullámhossz-gráf* [28], mely a fizikai hálózatot – beleértve a fizikai útvonalválasztó eszközöket, összeköttetéseket, optikai szálakat és hullámhosszakat – egy logikai hálózatként írja le. A hullámhossz-gráf a fizikai hálózatból származtatható, figyelembe véve a topológiát és az útvonalválasztó eszközök kapcsolási képességeit, mint pl.:

- teljes vagy korlátozott, elektronikus vagy optikai hullámhossz konverziós képesség
- optikai vagy elektronikus fényút-elágaztatási képesség
- kötegelési (grooming) képesség (esetleg korlátozott számú kötegelő porttal)

A hullámhossz-gráf kellően rugalmas és általános, hogy mindezen tulajdonságokat figyelembe vegye különböző védelmi módszerekkel és különböző típusú forgalmi igényekkel együtt.

Számos algoritmust (minimális költségű hálózati folyamatok, Suurballe algoritmus [29], Dijkstra algoritmus [30]) valósítottam meg és használtam a *szimulációk* során. A javasolt új algoritmusok és technikák jóságát

¹ Több architektúrális réteggel (elektronikus és optikai) rendelkező optikai hálózat

szintén szimuláción keresztül tanulmányoztam és igazoltam. Dinamikus útvonalválasztás esetén *diszkrét esemény vezérelt szimulációt* (discrete event simulation) alkalmaztam. Statikus útvonalválasztásnál *egészértékű lineáris programozást* (Integer Linear Programming, ILP [31]) használtam az NP-nehéz problémák (melyek általánosságban a *hálózati folyamatok elméletébe* tartoznak) megfogalmazására és optimális megoldás előállítására. Az ILP példányok megoldására egy kereskedelmi szoftvert (ILOG CPLEX [32]) használtam. Az 1.1. ALTÉZISBEN statisztikát alkalmaztam a hálózati erőforrások kihasználtságának kiértékeléséhez dinamikus szimuláció során.

A forgalomazonosítás és forgalomelemzés területén (3. TÉZIS) az alkalmazott módszertan a *mérés, modellezés és statisztikai analízis*. A háttérben mindig egy adott alkalmazás (pl. Skype) vagy egy általánosabb alkalmazáscsoport (pl. P2P alkalmazások) *modellje* áll. Modell létrehozása azért szükséges, mert ezen alkalmazások „fekete doboznak” tekinthetők, ahol a belső műveletek és a protokollok rejtve maradnak.

A cél a modell különböző tulajdonságainak meghatározása forgalmi mérés által, és a karakterisztikus jellemzők kiválasztása. A következő lépés ezen jellemzők lehető legpontosabb statisztikus leírása, amihez nagy mennyiségű *mérési adatra* van szükség.

A végső cél egy döntési mechanizmus kidolgozása, mely a korábban beazonosított forgalmi jellemzőkön alapul. A döntési folyamat a modell bizonyos tulajdonságait és a modellel kapcsolatos feltételezéseket is kihasználhatja.

Az ismerttetett célok eléréséhez *relációs adatbázis-kezelő rendszert* és *SQL programnyelvet* [33] használtam. A választott robusztus kereskedelmi szoftver (Microsoft SQL Server 2005, [33]) igen hatékonynak bizonyult a munka minden fázisának (mérési adatok tárolása, feldolgozása, forgalomazonosító módszerek futtatása, forgalmi analízis) támogatásához. A teljes forgalomazonosítási folyamatot és forgalmi analízist adatbázis műveletek és tárolt eljárások formájában valósítottam meg.

Az azonosítási módszereket nagyméretű, valós forgalmi méréseken futtattam. A forgalomazonosítás eredményét szintén a *statisztika* módszerével értékeltem ki, és vontam le a következtetéseket.

4. Eredmények

1. TÉZIS: *Két különböző módszert javasoltam hálózati erőforrások méretezésére és konfigurálására – kötegelésre képes, többretegű – optikai hálózatokban végpont-végpont igények elvezetésére. Először megalkottam egy gyors, általános, statisztikus kihasználtság alapú módszert a kötegelési képesség és a hullámhosszak számának együttes optimalizálására dinamikus forgalmi igények esetére. Másodszor pedig megadtam az útvonalválasztás és hullámhossz-hozzárendelés, valamint a jelszintek meghatározásnak együttes problémáját megoldó, egyértelmű ILP² megfogalmazást statikus forgalmi igényekre.*

1.1. ALTÉZIS: *Megalkottam egy gyors, általános módszert*

- a) *a kötegelési képesség³ méretezésére hálózati csomópontonként,*
- b) *a hullámhosszak számának méretezésére összeköttetésenként,*
- c) *ill. a) és b) együttes méretezésére.*

Az iteratív méretezési folyamat minden egyes lépésében egy dinamikus szimuláció kerül végrehajtásra. Minden lépés végén módosul a hálózati konfiguráció az összeköttetések és a csomópontok kihasználtságát leíró hisztogramoknak és egy szabályrendszernek megfelelően.

Igazoltam, hogy a hálózati konfiguráció gyorsan konvergál egy állandó egyensúlyi helyzethez.

Megmutattam, hogy a módszer nem függ az útvonalválasztó algoritmustól, a hálózati topológiától, a védelmi módszertől és a forgalmi terheléstől. Szintén megmutattam, hogy milyen mértékű kötegelő port és hullámhossz megtakarítás érhető el, amennyiben megengedünk csekély mértékű blokkolást a hálózatban. A megtakarítás függ az alkalmazott védelmi módszertől.

Kapcsolódó fejezet a disszertációban: 2. fejezet

Kapcsolódó publikációk: [C10] [C11] [C12]

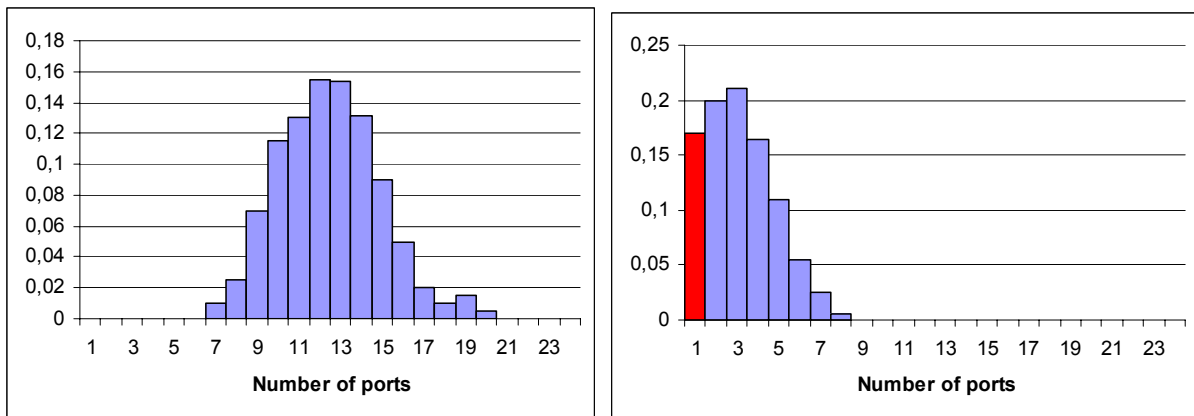
A javasolt módszer meghatározza a szükséges kötegelő portok számát minden egyes hálózati csomópontban és a szükséges hullámhosszak számát minden egyes összeköttetésen, ill. képes a két erőforrástípus együttes optimalizálására is. Kizárólag a kötegelési képesség optimalizálása akkor célszerű, ha kellően nagy számú szabad hullámhossz

² Integer Linear Programming (ILP): egészértékű lineáris programozás

³ grooming portok (lehetővé teszik alacsony sáv szélességű igények összefogását egy hullámhossz-csatornára)

áll rendelkezésre az összeköttetéseken, hiszen a blokkolást ilyenkor elsősorban a kötegelő portok hiánya okozza. Másfelől pedig kizárólag a hullámhosszak optimalizálása akkor hasznos, ha a kötegelési képesség elegendően nagy (túlméretezett), mert ilyenkor a hullámhosszak hiánya jelenti a szűk keresztmetszetet. Ugyanakkor egy tipikus helyzetben mind a kötegelési képességet, mind a hullámhosszak számát optimalizálni kell.

A javasolt módszer egy iterációs sorozatot visz véghez. Az iteráció minden lépésében egy dinamikus szimulációt hajt végre, melyhez mindig ugyanazt az (előre legenerált) dinamikus igényhalmazt használja fel. A szimuláció során a módszer adatokat gyűjt minden csomópontról és összeköttetésről, és kiszámítja a kihasználtságot leíró hisztogramokat.



1. ábra: A szabad kötegelő portok számának eloszlása egy alacsony terheltségű csomópontban (balra) és nagy terheltségű csomópontban (jobbra)

A hisztogram nullánál felvett értéke nagy jelentőséggel bír. Ez mutatja meg ugyanis, hogy a csomópont az idő mekkora részében volt olyan állapotban, ahol – a szabad O/E, E/O konverziós portok hiánya miatt – további hullámhossz-konverzióra és/vagy kötegelésre nem képes.

A hálózati konfiguráció a kihasználtsági hisztogramoknak megfelelően módosult a következő elvet követve:

- Ha egy csomópont „alacsony kihasználtságú” (az egy csomópontra eső blokkolás alacsonyabb az előírt küszöbértéknél), akkor a kötegelő portok számát csökkentjük. Másfelől a kötegelő portok számát növeljük a „túlterhelt csomópontokban”.
- A hullámhosszak számát egy összeköttetésen hasonlóképpen módosítjuk az adott összeköttetés kihasználtságának megfelelően.

A kötegelő portok számát k -val változtatjuk (alapértelmezésben csökkentjük, de a negatív k érték növelést jelent) az iteráció minden lépésében a következő összefüggés szerint:

$$k := k_{\max} - 1, \text{ that } \sum_{i=0}^{i=k_{\max}} p_i \leq TH_n,$$

ahol p_i annak az eseménynek a relatív gyakorisága, hogy a szabad hullámhosszak száma éppen i , TH_n pedig az előírt küszöbérték. A hullámhosszak számát teljesen hasonló módon módosítjuk.

Ha a cél a kötegelő portok és a hullámhosszak számának együttes optimalizálása, akkor további döntési szabályok kerülnek bevezetésre, melyek a két eltérő erőforrástípus közötti kapcsolatot, megkötéseket fejezik ki.

Természetesen a valóságban nem lehetséges a hullámhosszak számának állítgatása ilyen finom lépésekben. Ugyanakkor, ha a cél például egy virtuális topológia (pl. egy virtuális magánhálózat, VPN) megtervezése a fizikai topológia felett, akkor ez a megközelítés indokolható.

Az erőforrások száma a csomópontokban (ill. az összeköttetéseken) kizárólag lokális információ alapján módosul, ezért a módszer tekinthető az általános, globális erőforrás-méretezési probléma szétbontásának (dekompozíció). Az egy csomópontra eső blokkolás (ill. az egy összeköttetésre eső blokkolás) egyenletes beállítása „kiegyensúlyozott” és pártatlan (fairness) hálózatot eredményez.

Az iteráció folyamán a hálózati konfiguráció előbb-utóbb (általában igen gyorsan, néhány lépésben) elér egy „egyensúlyi helyzetet”, melyben további módosítás már nem történik. Ritkán előfordulhat minimális mértékű „bolyongás” az egyensúlyi helyzet körül, de ez egy egyszerű megállási feltétellel kiküszöbölhető.

A szimulációk igazolták, hogy a hálózati konfiguráció minden esetben ugyanahhoz az egyensúlyi helyzethez konvergál – függetlenül attól, hogy „túlméretezett” vagy „alulméretezett” kiinduló állapotból indítottuk-e.

Számos módszert javasoltak már kötegelési képesség méretezésére optikai hálózatokban (pl. [22][23]), azonban ez az első módszer, mely a statisztikus kihasználtság alapú megközelítést alkalmazza.

További széleskörű szimulációkat végeztem különböző hálózati topológiák, védelmi módszerek (útvonalválasztó módszerek) és forgalmi terhelések alkalmazása mellett. Az eredmények azt mutatják, hogy a javasolt módszer jól működik a felsorolt tényezők bármilyen kombinációja mellett. Természetesen az optimalizálás eredményét befolyásolják a tényezők (a módszer szempontjából bemeneti paraméterek), de a módszer minden esetben hasonlóan viselkedik.

Megvizsgáltam miként befolyásolja az egy csomópontra eső blokkolás és az egy összeköttetésre eső blokkolás küszöbértéke az összesített hálózati

blokkolást. Megmutattam, hogy az összesített blokkolás beállítható a helyi küszöbértékek hangolásával. Az eredmények megmutatták, hogy ezek a blokkolási görbék hasonlóak az összes kipróbált védelmi módszer esetében.

Szintén tanulmányoztam a szükséges hálózati erőforrások számát, melyek egy adott összesített blokkolási arány eléréséhez kellenek. Megmutattam, hogy jelentős mértékű kötegelő port és hullámhossz megtakarítás érhető el, amennyiben – nulla blokkolás helyett – megengedünk kismértékű blokkolást a hálózatban. Az eredmények azonban azt is megerősítik, hogy egy adott blokkolás eléréséhez szükséges erőforrások száma jelentősen eltér különböző védelmi módszerek alkalmazása esetén.

1.2. ALTÉZIS: *Megadtam az egyrétegű útvonalválasztás és hullámhossz-hozzárendelés, valamint a jelszintek meghatározásának együttes problémáját megoldó, egyértelmű ILP megfogalmazást többretegű optikai hálózatokra. A módszer a (statikus igények) útvonalválasztását az optikai rétegben hajtja végre, és állítja be a jelszinteket optimális módon, közben figyelembe véve a fizikai hatásokat. A módszer egy linearizált fizikai modellen alapul, és globális optimumot ad eredményül.*

Kapcsolódó fejezet a disszertációban: 3.3 fejezet

Kapcsolódó publikációk: [J1] [J2] [C1] [C3] [P1]

Megadtam a pontos ILP megfogalmazását egy rétegek közötti (cross-layer) optimalizálási problémának. A problémát az útvonalválasztás (Layer 2) és a megfelelő jelszintek beállításának (Layer 1) együttese alkotja [21]. A javasolt módszer statikus igények egy halmazának elvezetésére képes (globálisan) optimális módon.

Különösen kedvező, hogy a módszer könnyen alkalmazható a jelenlegi optikai hálózatokban, mert a legtöbb modern optikai kapcsolóeszköz támogatja a jelszintek hullámhosszankénti külön-külön állítgatását ([15]-[18]).

A fizikai hatások figyelembevétele az útvonalválasztásban az utóbbi időben népszerű kutatási témává vált [24][25]. Azonban, legjobb tudomásom szerint, ez az első módszer, mely a problémát optimális módon oldja meg. A múltbéli gyakorlat az volt, hogy az útvonalválasztást és a jelszintek meghatározását egymástól függetlenül végezték. Általában – egy legrövidebb út alapú útvonal-elvezetés után – a jelszinteket manuálisan állították be.

A 1.2. ALTÉZIS esetében (az 1.3. ALTÉZISSEL ellentétben) azt feltételezzük, hogy az útvonalválasztásban csak az optikai réteg vesz részt, tehát minden igényhez egy teljes fényutat rendelünk hozzá a forrástól a nyelő csomópontig. Ugyanakkor hullámhossz-kapcsolás természetesen megengedett az út mentén.

A módszer figyelembe veszi a fizikai hatásokat az útvonalválasztásban. A módszer egy *linearizált fizikai modellen* alapul, mely egy összeszedett zaj által korlátozott rendszert feltételez, ahol minden fizikai hatást (pl. hullámhossz-kapcsolás) büntetésként veszünk figyelembe a jelszint szempontjából. Megmutattam, hogy amennyiben a jelszintet milliwattban fejezzük ki, akkor a jelszint és a megengedett legnagyobb áthidalható távolság közötti összefüggés lineáris lesz. A nemlineáris hatások kiküszöbölés érdekében az egy optikai szálba becsatolt teljesítményt korlátozzuk.

A fizikai hálózat és a hálózati eszközök modellezéséhez *hullámhossz-gráf modellt* használtam. Az ILP megfogalmazás könnyedén illeszthető bármilyen – a hullámhossz-gráfban megjeleníthető – eszközmodellhez.

Végül magát a módszert pedig egy *ILP megfogalmazás* írja le (mint *matematikai modell*). Az ILP példányok megoldásához az ILOG CPLEX [32] szoftvert használtam. A módszer a gyakorlatban jól alkalmazható. Közepes méretű hálózatokra elfogadható időn belül képes eredményt szolgáltatni. Ezenkívül a módszer összehasonlítási alapként szolgálhat más (heurisztikus) algoritmusok jóságának kiértékeléséhez.

A javasolt módszert szabadalmi bejegyzés is védi [P1].

1.3. ALTÉZIS: *Megadtam a kétrétegű útvonalválasztás⁴ és hullámhossz-hozzárendelés, valamint a jelszintek meghatározásának együttes problémáját megoldó, egyértelmű ILP megfogalmazást többrétegű optikai hálózatokra. A módszer – az 1.2. ALTÉZISSEL ellentétben – a (statikus) igények elvezetését az optikai és az elektronikus rétegben együttesen hajtja végre, támogatja a 3R jelregenerációt⁵, a hullámhossz konverziót és a kötegelést. Ugyanakkor az ILP megfogalmazás komplexitása a megoldást gyakran igen megnehezíti.*

Kapcsolódó fejezet a disszertációban: 3.4 fejezet

Kapcsolódó publikációk: [J1] [J2] [C1] [C3]

Az 1.2. ALTÉZISSEL összevetve, az 1.3. ALTÉZIS ILP megfogalmazása az elektronikus réteget is használja az útvonalválasztás során. Tehát az útvonalválasztás és hullámhossz-hozzárendelést az elektronikus és az optikai rétegben együttesen oldja meg. A javasolt módszer szintén statikus igények egy halmazának elvezetésére képes (globálisan) optimális módon.

Az ILP megfogalmazás az elektronikus réteg minden funkcióját támogatja: hullámhossz konverzió, kötegelés (grooming) és 3R jelregeneráció.

A módszer – akárcsak az 1.2. ALTÉZISBEN bemutatott ILP megfogalmazás – figyelembe veszi a fizikai hatásokat az útvonalválasztásban:

- a kapcsolat a jelerősség és a fényút számára megengedhető legnagyobb áthidalható fizikai távolság között,
- ill. az egy fényszálba becsatolható maximális teljesítmény korlátozása a nemlineáris hatások kiküszöbölés miatt.

Ugyanakkor, az útvonalválasztási modell különbözősége miatt, ebben az esetben egy igény útvonala (a forrástól a nyelőig) több fényútból is állhat. Ez további növeli az útvonalválasztás komplexitását, mert a fizikai korlátozásokat természetesen minden egyes fényútra külön-külön betartatjuk.

Másfelől az intelligensebb útvonalválasztási modell lehetővé teszi, hogy olyan igényeket (vagy igények egy „szerencsétlen” kombinációját) is elvezessünk, ami korábban megoldhatatlan volt több fényút alkalmazása nélkül. Akár egyetlen igény elvezetése is problémába ütközhet, amennyiben az igény által áthidalt távolság olyan nagy, hogy a jelerősség

⁴ Együttesen útvonalválasztás az elektronikus és az optikai rétegben

⁵ 3R: re-amplification, re-shaping, re-timing (újraerősítés, újraformálás, újraidőzítés)

önmagában meghaladná az egy szálba becsatolható legnagyobb jelerősséget. Több igény összejátszása még könnyebben teremthet ilyen „kedvezőtlen” helyzetet. Viszont – több fényutat megengedve – az igény felmehet az elektronikus rétegbe, hogy ott 3R jelfrissítés történjen.

Mindezen jellemzőket számba véve a javasolt módszer három tényező teljes, együttes optimalizálására képes: az útvonalválasztás az elektronikus és az optikai rétegben, valamint a jelszintek meghatározása.

Sajnálatos módon az 1.3. ALTÉZIS ILP megfogalmazása számos kiegészítő kényszert és egy újabb szintnyi ILP változót tartalmaz. Ennek eredményeképpen ez az ILP megfogalmazás jóval összetettebb, és realiztikus méretű hálózatokra nem alkalmazható, míg a másik ILP megfogalmazás közepes méretű hálózatokon jól teljesít. Ugyanakkor a probléma – az optimalitás elvesztésének kárára – relaxálható és közel optimális megoldás nyújtható elfogadható időn belül.

Emellett természetesen, mivel a javasolt módszer optimális megoldást szolgáltat, a módszer összehasonlítási alapként szolgálhat más heurisztikus algoritmusok számára. A számítási teljesítmény rohamos növekedésével várhatóan a módszer alkalmazhatósága is fokozatosan javul.

2. TÉZIS: *Megadtam egy új ILP megfogalmazást többesadós⁶ igények elvezetésére többretegű optikai hálózatokban, és a módszer segítségével megvizsgáltam két további problémát. Először megmutattam az optikai rétegben megvalósított multicast költséghatékonyságát az elektronikus rétegbeli megvalósítással szemben, és hogy miként befolyásolja az elérhető nyereséget a komponensek költsége, a forgalmi terhelés és a kötegelési arány⁷. Másodszor megmutattam, hogy mely paraméterek és miként befolyásolják a dinamikus multicast fák újrakonfigurálásával elérhető nyereséget. Meghatároztam az újrakonfigurálási periódus optimális hosszát, amennyiben mind az újrakonfigurálás, mind az útvonalválasztás költségét figyelembe vesszük a teljes költségben.*

A 2. TÉZIS statikus és dinamikus multicast útvonalválasztással foglalkozik többretegű optikai hálózatokban. Az elmúlt években a gerinchálózatok forgalma jelentősen növekedett az Internet és más hálózati alkalmazásoknak köszönhetően. Sok igénytípus, melyek a legnagyobb forgalmi terhelést jelentik, sorolható a multicast (többesadás, pont-többpont) kategóriába a hagyományos unicast (pont-pont) osztályozás helyett. Ebbe a kategóriába esnek a digitális médiaforgalmazó, -szétosztó, vagy streaming rendszerek (pl. IP-TV, IP-rádió). A gerinchálózatban megvalósított többesadás különösen akkor bír nagy jelentőséggel, ha az átvitt tartalomnak nagy a sávszélesség-igénye (pl. nagyfelbontású tévécsatornák egy csoportjának szétosztása).

A sávszélesség-megtakarítás ellenére a legtöbb Internetszolgáltató nem teszi közvetlenül elérhetővé a multicast szolgáltatást a végfelhasználók számára. Ugyanakkor a többesadás szolgáltatás a gerinchálózatokban jelenlévő igen fontos jellemző, mely a Triple-play⁸ koncepció jól skálázható megvalósításának kulcsa: a TV csatornák általában többesadással jutnak el a tartalom terjesztőjétől a végfelhasználóhoz közeli helyi tartalomszolgáltatókhoz (cache/relay szolgáltatókhoz).

Tehát mind a statikus, mind dinamikus multicast megközelítésnek megvan a maga szerepe: a statikus megközelítés a gerinchálózatokra vonatkozik, ahol a forgalom viszonylag állandó, míg a dinamikus eset a hozzáférési hálózatoknál (a végfelhasználóhoz közel) indokolt, ahol a forgalom „változékonyabb” (különösen, ha feltételezzük az előfizetők számának dinamikus ingadozását).

⁶ Multicast

⁷ Hány darab igényt lehet összefogni (multiplexálni) egyetlen hullámhossz-csatornára

⁸ TV, telefon, vezeték Internet-hozzáférés összefoglaló neve

2.1. ALTÉZIS: *Megadtam egy új ILP megfogalmazást többesadós igények elvezetésére többrétegű optikai hálózatokban, mely támogatja*

- *egy statikus igényhalmaz elvezetését, mely unicast és/vagy multicast igényekből (akár vegyesen) áll,*
- *a multicast igények optikai és elektronikus rétegbeli elágaztatását (amit egy új csomópontmodell támogat),*
- *a multicast fa topológiájára vonatkozó ILP kényszerek használatát, melyek valós technikai megkötéseket fejeznek ki,*
- *a topológiai és útvonalválasztási kényszerek újrafogalmazását büntetőtagként a célfüggvénybe*

Az ILP megfogalmazás biztosítja a multicast fák optimális útvonalválasztását (beleértve a döntést, hogy az elágaztatás az optikai vagy az elektronikus rétegben történjen).

Kapcsolódó fejezet a disszertációban: 4.3 fejezet

Kapcsolódó publikációk: [J4] [C6]

A javasolt ILP megfogalmazás képes elvezetni egy statikus igényhalmazt, mely unicast és/vagy multicast igényeket tartalmazhat (akár vegyesen is), és globálisan optimális eredményt szolgáltat.

Kétrétegű optikai hálózatot feltételezünk, ahol a felső, elektronikus réteg időkapcsolásra képes, míg az alsó optikai réteg hullámhossz-kapcsolásra. Az elektronikus rétegben hullámhossz-konverzió és kötegelés is lehetséges.

A multicast fák elágaztatása az elektronikus rétegben, ill. az optikai rétegben hajtható végre. A kapcsolóeszközök rendelkezhetnek az optikai elágaztatás képességével, de ez nem szükségszerű.

Létrehoztam egy-egy egyszerű eszközmodellt a hullámhossz-gráfban, mellyel mindkét eset modellezhető. A modellben a logikai élekhez megfelelő költségek hozzárendelésével pontosan meghatározható az elágaztatás költsége az optikai rétegben, ill. az elektronikus rétegben.

Számos technikai kényszert fogalmaztam meg, melyekkel az útvonalválasztás különböző tulajdonságai befolyásolhatók. Ezek a kényszerek valós technikai megszorításokat fejeznek ki.

Mivel a legtöbb jelenlegi kapcsoló-berendezés nem képes elágaztatásra sem az optikai, sem az elektronikus rétegben technikai vagy szoftver hiányosságok miatt, szükség lehet az elágaztatás korlátozására mindkét rétegben.

A jel tisztán optikai elágaztatásának további következményei is vannak: a jelteljesítmény 3 dB-lel csökken, ha a jelet kétfelé osztjuk. Ennél több

irányú osztás esetén a jelteljesítmény még jelentősebben csökken, mely megnehezíti a hibamentes azonosítást a vevőben. Ezért ILP kényszerek segítségével lehetséges az osztások számának korlátozása minden egyes részigényre⁹ külön-külön, ami meghatározza, hogy milyen minőségű jelet lát a vevő.

Különböző kényszerek alkalmazhatók, melyekkel befolyásolható a fa topológiája: ilyen a fa méretének, a fa mélységének (melyen keresztül a végpont-végpont késleltetést szabályozhatjuk) vagy a fa szélességének a korlátozása.

A kényszerek egy része átfogalmazható büntetőtagként a célfüggvénybe. Ezzel a technikával nem kell kivárnunk, amíg a megoldó meghatározza a költség globális optimumát, így rövidebb időn belül juthatunk (nem optimális, de általában elfogadható minőségű) eredményhez.

2.2. ALTÉZIS: *A 2.1. ALTÉZISBEN javasolt ILP megfogalmazást felhasználva összehasonlítottam két megközelítést: az első szerint az optikai rétegben is megengedhető a multicast fák elágaztatása, míg a második szerint az elágaztatás kizárólag az elektronikus rétegben lehetséges. Rámutattam az első megközelítéssel elérhető nyereségre a másodikkal szemben*

- *a forgalmi terhelés függvényében,*
- *az optikai és az elektronikus réteg költségarányának függvényében,*
- *ill. a kötegelési arány függvényében.*

Kapcsolódó fejezet a disszertációban: 4. fejezet

Kapcsolódó publikációk: [J4] [C6]

Megvizsgáltam multicast útvonalválasztás esetén a fák optikai rétegbeli, ill. elektronikus rétegbeli elágaztatásának problémáját. Az unicast esetre, összehasonlítási alapnak tekintve, szintén végeztem szimulációkat.

A jelenlegi kapcsolóeszközök nem rendelkeznek optikai elágaztatási képességgel. Ugyanakkor az útvonalválasztás és az elágaztatás költsége az optikai rétegben jóval alacsonyabb, mert az optikai-elektronikus konverziós portok meglehetősen drágák. Ezért az optikai elágaztatási képesség jelenléte egy eszközben igen fontos és költséghatékony lehet.

Megmutattam, hogy az optikai elágaztatással elérhető nyereség a forgalmi terhelés, a hálózati komponensek (pl. konverziós portok) költségének és a kötegelési arány függvénye.

⁹ A fa gyökere (forrása) és egy levél csomópont közötti útvonal

A forgalmi terhelés szempontjából az optikai elágaztatás csak akkor múlja felül az elektronikus elágaztatást, amennyiben a fában résztvevő csomópontok száma alacsony – a hálózatban lévő összes csomópont számához képest. Ahogy egyre több csomópontra terjed ki a fa, az optikai elágaztatás előnye szertefoszlik.

A kötegelési aránytól függetlenül az optikai elágaztatás kevesebb konverziós portot használ, mint ez elektronikus. Ugyanakkor nem csökkenti a forgalom elvezetéséhez szükséges hullámhosszak számát. A szimulációk megmutatták, hogy a kis sávszélességű (a hullámhosszkapacitáshoz képest) igények esetén a kötegelés képes kompenzálni az unicast útvonalválasztás jelentős hátrányát a multicast elvezetéshez képest.

2.3. ALTÉZIS: *Megmutattam, hogy mely paraméterek és miként befolyásolják a dinamikus multicast fák újrakonfigurálásával elérhető nyereséget, beleértve a következőket:*

- *az újrakonfigurálási nyereség a hálózati erőforrások számában mérve különböző dinamikus útvonalválasztó algoritmusok esetén*
- *hogyan befolyásolja az újrakonfigurálási periódus hossza, a hálózati topológia és a forgalmi terhelés az újrakonfigurálási nyereséget*
- *hogyan hat a kötegelési képesség jelenléte vagy annak hiánya az újrakonfigurálási nyereségre*
- *milyen gyorsan távolodik az optimalizált fa az optimális topológiától*

Egy realiztikus költségmodellt feltételezve meghatároztam az újrakonfigurálási periódus optimális hosszát, amennyiben mind az újrakonfigurálás, mind az útvonalválasztás költségét figyelembe vesszük a teljes költségben.

Kapcsolódó fejezet a disszertációban: 5. fejezet

Kapcsolódó publikációk: [J3] [J5] [C5]

A 2.3. ALTÉZISBEN dinamikus multicast fákkal foglalkoztam, ahol a végpontok („levél csomópontok”) állandó váltakozása a fa topológiájának „elromlásához” (eltávolodás az optimálishoz képest) vezet a hálózati erőforrások számában, az útvonalválasztás költségében mérve. Ez az elromlás a fa rendszeres újrakonfigurálásával orvosolható, mellyel jelentős mennyiségű hálózati erőforrás takarítható meg.

Számos dinamikus útvonalválasztó algoritmust vizsgáltam meg, míg az optimális topológiát a 2.1. ALTÉZISBEN javasolt ILP megfogalmazást alkalmazva számoltam ki. A dinamikus útvonalválasztó algoritmusok

közös vonása, hogy egy újonnan érkező igényt a meglévő aktív igények megszakítása nélkül képesek elvezetni. Ugyanakkor ezek az algoritmusok jóval költségesebbek a hálózati erőforrásokban mérve. Az ILP-vel történő újrakonfigurálás képes meghatározni az optimális topológiát, azonban van néhány hátulütője: az optimalizált hálózati konfiguráció (topológia) igen eltérő lehet az előzőhöz képest, az újrakonfigurálás meglehetősen számításigényes, és továbbiak. Ezek a hátrányok figyelembe vehetők a *teljes költségben*, mint *újrakonfigurálási költség*, az *útvonalválasztási (hálózati) költség*en felül.

Széleskörű szimulációval megmutattam, hogy különböző bemeneti tényezők és adottságok (hálózat mérete, forgalmi terhelés, kötegelés, az újrakonfigurálási periódus hossza) *miként* befolyásolják az útvonalválasztás tulajdonságait (költség, erőforrások használata) és az újrakonfigurálással elérhető nyereséget.

Összefoglalva az eredményekből azt a következtetést lehet levonni, hogy

- ha a hálózat mérete nő,
- ha nő a forgalmi terhelés,
- ha a kötegelés kevésbé alkalmazható,

akkor

- az átlagos útvonalválasztási költség nő,
- több hálózati erőforrás (hullámhosszak és konverziós portok) szükséges,
- a fa topológiája gyorsabban távolodik az optimális topológiától.

Az eredmények megmutatták továbbá, hogy a ritkább újrakonfigurálás szintén növeli az átlagos hálózati költséget és a szükséges erőforrások számát.

Az újrakonfigurálás akkor különösen hasznos, ha nagy sávszélességű (a hullámhossz-kapacitáshoz képest) igényeket feltételezünk, mert ilyenkor a kötegelés kevésbé alkalmazható. Kisebb sávszélességű igények esetén a kötegelés ritkább újrakonfigurálást tesz lehetővé. Az eredmények a konverziós portok, a hullámhosszak számára és a teljes költségre is hasonlóak.

Egy realiztikus költségmodellt feltételezve az újrakonfigurálási periódusnak van egy optimális hossza, amennyiben mind az újrakonfigurálás, mind az útvonalválasztás költségét figyelembe vesszük a teljes költségben.

3. TÉZIS: *Új, folyamdinamika-alapú forgalomazonosítási módszereket alkottam peer-to-peer (P2P) forgalom azonosítására IP hálózatokban. A módszerek olyan azonosítási problémákat oldanak meg, ahol a hagyományos port-alapú és csomagtartalom-alapú módszerek gyakran nem alkalmazhatók.*

Mivel az utóbbi időben a web-alapú alkalmazások (különösen a P2P alkalmazások) változó, véletlenszerűen kiválasztott kommunikációs portot (TCP/UDP) használnak az adatforgalmazásra, a hagyományos port-alapú forgalommonitorozó és -osztályozó módszerek nem alkalmazhatók. Noha a csomagtartalom-alapú módszerekkel elérhető nagy pontosság, megbízható alkalmazás-minták¹⁰ gyakran nem állnak rendelkezésre. Ráadásul a csomagtartalom-alapú azonosítás gyakran jogi és titoktartási problémákat és aggályokat is felvet. A csomagtartalom letárolása emellett igen erőforrás-igényes és kivitelezhetetlen, különösen nagy sáv szélességű összeköttetések esetén. Ezenfelül – a szolgáltatók és hatóságok szempontjából – nemkívánatos alkalmazások (pl. a Skype vagy fájlmegosztó alkalmazások, mint a BitTorrent) egyre inkább hajlamosak a forgalmuk titkosítására, felismerhetetlenné téve ezzel a csomagtartalmat.

Ugyanakkor a folyamdinamika alapú azonosítási módszerek kizárólag a csomagok fejléceit és az időinformációkat használják. A forgalmi adatok lementéséhez kevesebb tárolókapacitás szükséges, ami lehetővé teszi az offline¹¹ feldolgozást. A folyamdinamika-alapú módszerek igen gyorsak és hatékonyak lehetnek, ám a megbízhatóságukat igazolni kell.

A port- és csomagtartalom-alapú módszerek mellett számos olyan felügyelt vagy felügyelet nélküli tanulási módszeren nyugvó módszert javasoltak P2P forgalom azonosítására, mint a neurális hálózatok [36], döntési fák [37], SVM¹² [38], vagy a klaszter analízis [39]. Ezen módszerek legnagyobb hátránya, hogy nem használják ki a folyamatok közötti összefüggéseket (pl. párhuzamos, egymást követő folyamatok), hanem csak egyéni folyamatokkal (és ezek jellemzőivel) foglalkoznak.

Létrehoztam egy relációs adatbázison alapuló keretrendszert, mely alkalmas nagyméretű forgalmi mérések hatékony tárolására és feldolgozására. A forgalomazonosítási módszerek is Transact SQL [33] script-ek (deklaratív módon) és tárolt eljárások formájában lettek megvalósítva.

¹⁰ Application pattern (payload pattern)

¹¹ Nem valós idejű (realtime) feldolgozás

¹² Support Vector Machine (SVM)

3.1. ALTÉZIS: *Megalkottam egy hatékony és összetett, heurisztikus módszert általános P2P forgalom azonosítására. A módszer a legjelentősebb P2P alkalmazások által generált forgalom karakterisztikus jellemzőin alapul. A módszer képes szétválasztani a P2P és nem P2P adatfolyamokat, ami lehetővé teszi a további forgalmi analízist. A módszer pontosságát egy próbamérésen igazoltam, és a módszert több valós forgalmi mérésen alkalmaztam.*

Kapcsolódó fejezet a disszertációban: 8. fejezet

Kapcsolódó publikációk: [J6] [C9]

A javasolt módszer tisztán folyamdinamikán alapul: a csomagtartalomra nincsen szükség. Csak azokat a tulajdonságokat használja, melyek a csomagok fejlécéből és az időbélyegekből kinyerhetők.

A módszer folyamszinten dolgozik. A folyamleírók és a folyamszintű statisztikák a csomagszintű mérési állományból (mely csak a fejléceket tartalmazza) nyerésre, és a következő mezőket tartalmazzák:

- Kimenő vagy bejövő folyam
- A forrás IP címe és kommunikációs portja
- A cél IP címe és kommunikációs portja
- Használt protokoll (a TCP és UDP kommunikáció megkülönböztetésére)
- TOS¹³, tunnel
- Folyam kezdetének és végződésének időpontja, időtartama
- Átvitt bájtok száma, átvitt csomagok száma

A hagyományos, port-alapú technikán fölül a módszer kihasználja a legjelentősebb P2P alkalmazások (beleértve a fájlmegosztó alkalmazások) által generált forgalom alapvető karakterisztikus jellemzőit. A módszer a P2P és a nem P2P forgalom közötti fő különbségekre koncentrál, úgymint:

- Párhuzamos TCP és UDP kommunikáció
- Véletlenszerűen kiválasztott, nem állandó kommunikációs port
- Több párhuzamos és egymást követő folyam (szegmentált letöltés)
- Hosszú élettartamú folyamok, nagy folyamméret
- A P2P alkalmazások gyakran a HTTP portokat használják

A javasolt módszer hét heurisztikus lépésből áll (a lépések sorrendje kötött), ezek lényege a következő:

¹³ Type of Service (Szolgáltatás típusa)

0. Az ismert (hagyományos) alkalmazások port-alapú azonosítása.
1. A párhuzamos UDP és TCP kapcsolatot felépítő alkalmazások P2P alkalmazások.
2. A P2P és a web forgalom elkülönítése a HTTP kommunikációs portokon (80, 443 stb.)
3. Azonosítás az ismert P2P alkalmazások alapértelmezett portja alapján.
4. Az azonos folyamleíróval (IP címek, portok, protokoll típus) rendelkező folyamatok nagy valószínűséggel P2P alkalmazásokból származnak.
5. Ha egy gazdagép (adott IP címmel) újra és újra ugyanazt a bizonyos változó portot választja ki TCP vagy UDP kommunikációra, akkor ez nagy valószínűséggel P2P alkalmazás (mivel a többi szerveralkalmazás már ki lett szűrve).
6. Azok az adatfolyamok feltételezhetően P2P alkalmazásokból erednek, ahol az átvitt adatmennyiség vagy a folyamat élettartama nagy.

A módszer minden lépése folyamatok egy csoportját jelöli meg P2P vagy „nem P2P” címkével. A már felbélyegzett folyamatok nem vesznek többé részt az azonosítási folyamatban. A további lépések csak a még nem megjelölt folyamatokkal foglalkoznak, ami megmagyarázza, hogy a lépések sorrendje miért fontos. A javasolt módszer folyamatábrája látható a 2. ábrán.

A módszer pontosságát egy próbamérésen ellenőriztem, és a módszert több valós forgalmi mérésen futtattam.

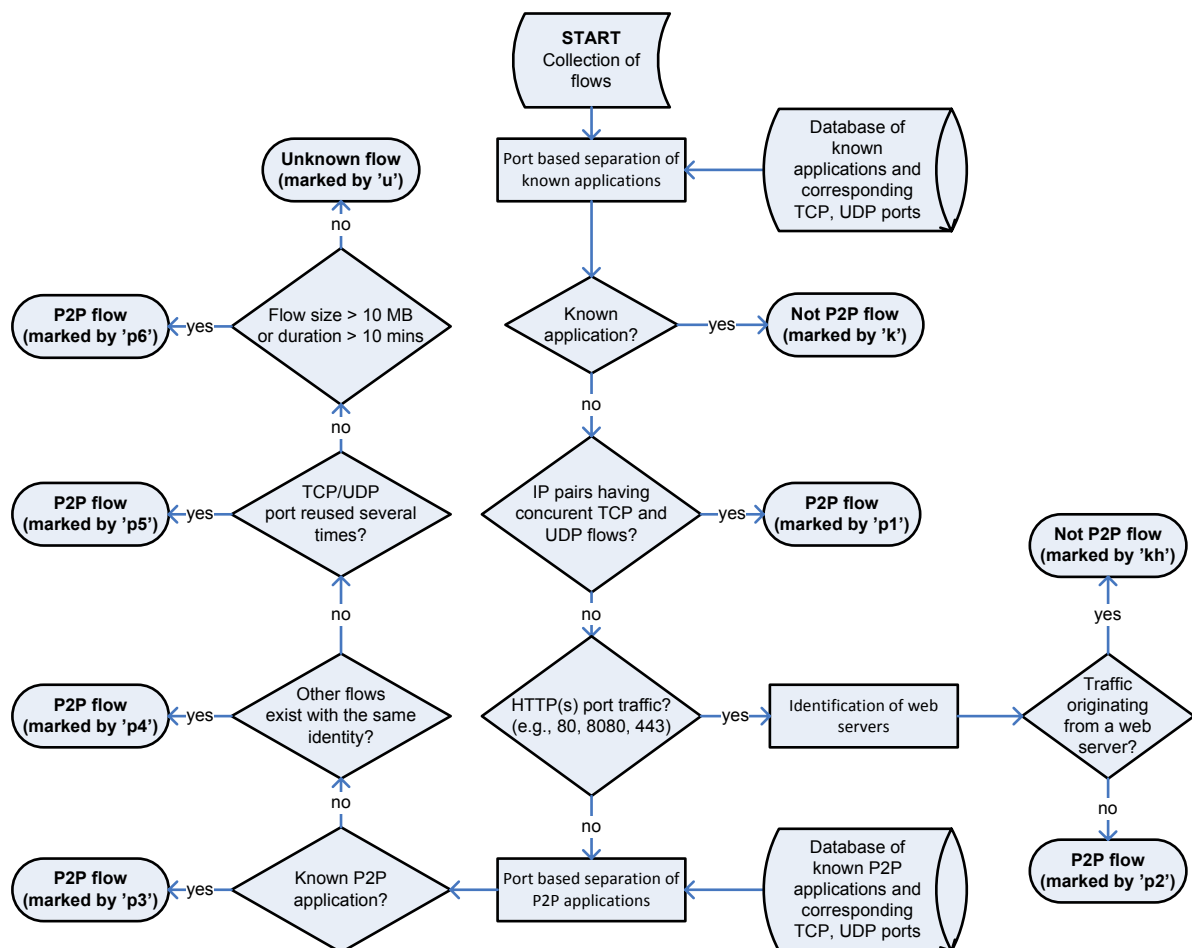
I. táblázat: Az azonosítási módszer validálásának eredménye

Heurisztikus lépés	Találati arány (%)
(0) Known Applications	93.01
(1) Heuristic	99.91
(2) Heuristic 2 (HTTP identification)	95.35
(3) Heuristic	99.79
(4) Heuristic	99.97
(5) Heuristic	99.51
Összesített P2P	99.14
Összesített nem P2P	97.19

A I. táblázat mutatja minden heurisztika teljesítményét külön-külön és az összesített teljesítményt. A találati arány (százalékban kifejezve) a

heurisztika által *helyesen* megjelölt és a heurisztika által *összesen* megjelölt folyamatok számának aránya. Érdeemes észrevenni, hogy a 6. (leggyengébb) heurisztika nem szerepel a táblázatban. Ennek oka, hogy ez már nem jelölt meg egy folyamatot sem. A táblázat utolsó két sora mutatja a helyesen megjelölt P2P (ill. nem P2P) folyamatok számának és az összes P2P (ill. nem P2P) folyamatok számának arányát. A statisztikák igen meggyőzőek minden lépésre és az összesítésre. Az átlagos találati arány magasabb, mint 99%. Az azonosítatlan folyamatok aránya körülbelül 0.1%. A tévesen megjelölt P2P, ill. a be nem azonosított P2P folyamatok aránya 0.3% ill. 0.8%.

Az itt bemutatott módszerre épülő, átfogó forgalomanalízis legfontosabb, újszerű eredményeit az 5.2 fejezet mutatja be.



2. ábra: A P2P forgalomazonosító módszer folyamatábrája

3.2. ALTÉZIS: *Módszereket alkottam a Skype (mint egy egyedi és népszerű P2P alkalmazás) forgalmának azonosítására. A módszer olyan karakterisztikus jellemzőkön alapul, melyek nem voltak használatosak a folyamdinamika-alapú azonosításban. Három – egymásra épülő – módszert javasoltam, melyek a forgalom következő komponenseit azonosítják:*

- *a kliens-super-node¹⁴ (SN) forgalmat, mely a felhasználói jelenlétről árulkodik,*
- *a kliensek alapértelmezett kommunikációs portjait, ami megbízhatóbbá teszi a hívások felismerését, és*
- *a Skype beszédhívásokat.*

A módszert valós forgalmi méréseken ellenőriztem és alkalmaztam.

Kapcsolódó fejezet a disszertációban: 9. fejezet

Kapcsolódó publikációk: [C7] [C8]

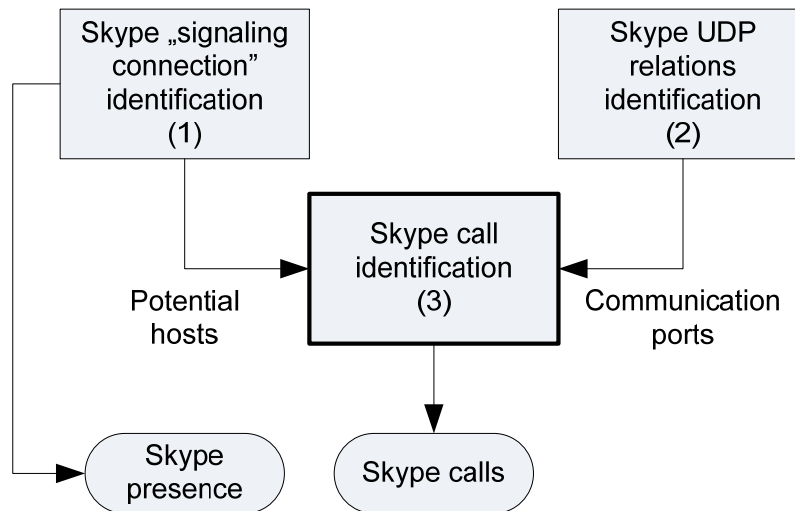
A Skype a legnépszerűbb peer-to-peer technológiára épülő, ingyenes VoIP alkalmazás. A Skype egyre inkább a hagyományos telefonszolgáltatók (különösen a mobilszolgáltatók) fő ellenfelévé válik, mivel átalánydíjas beszélgetést tesz lehetővé.

A Skype számos technikát alkalmaz, hogy elfedje a jelenlétét: véletlenszerűen kiválasztott kommunikációs portot használ, és erősen titkosít minden forgalmat, amely a Skype „magas szintű” (overlay) hálózatában halad. Ezért a hagyományos forgalomazonosító módszerek nem alkalmazhatók a Skype forgalom felismerésére.

Ebben a tézisben három folyamdinamika alapú módszert mutatok be a Skype forgalom különböző komponenseinek felismerésére. A módszerek egyáltalán nem használnak csomagtartalmat, kizárólag a csomagok fejlécét, az ebből kinyerhető folyamszintű információt, a folyamatok közötti kapcsolatokat és azok időbeli viselkedését vizsgálják. Az azonosítás folyamszinten és nem valós időben (offline) történik.

Az első módszer a kliens és a super-node (SN) közötti kapcsolatot azonosítja. A második meghatározza a kliensek választott kommunikációs portját. Végül a harmadik (az első kettőre támaszkodva) felismeri a beszédhívásokat. A teljes azonosítási folyamat és a három módszer szerepe látható a 3. ábrán.

¹⁴ A Skype „overlay” hálózatát az egyenrangú kliensek és a kitüntetett kliensek, a super-node-ok, alkotják.



3. ábra: A három módszer szerepe a teljes azonosítási folyamatban

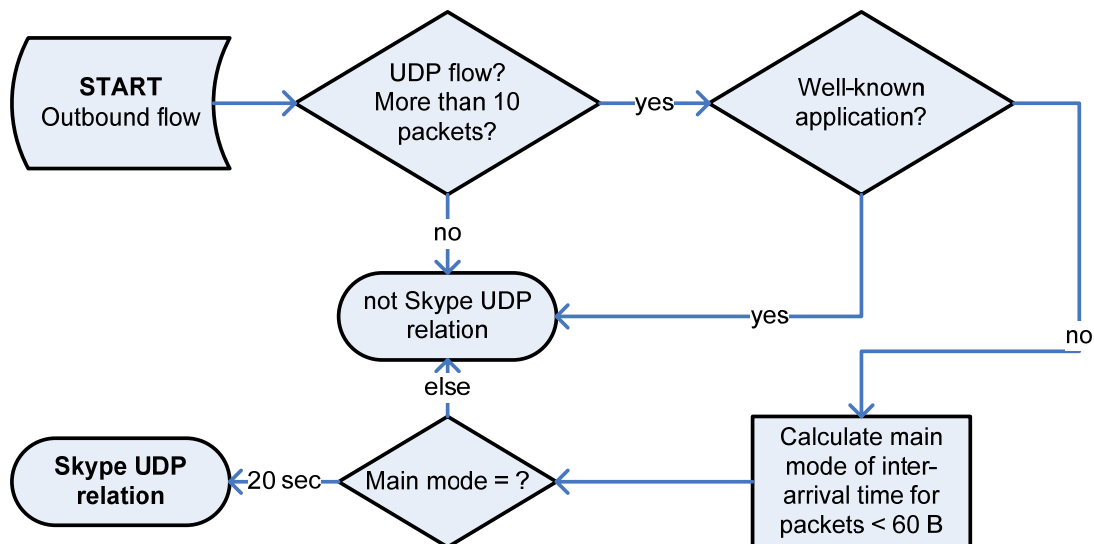
Felismertem, hogy a Skype kliens állandó TCP kapcsolatot tart fenn egy SN-dal, amíg a kliens be van jelentkezve. Javasoltam egy módszert, mely ezt a jelzskapcsolatot hivatott felismerni. Egy TCP kapcsolat Skype jelzskapcsolat, amennyiben megfelel a következő kritériumoknak:

1. A folyam sem a kimenő, sem a bejövő irányú sávszélessége nem nagyobb, mint 320 bps.
2. A csomagok intenzitása (kimenő és bejövő irányban külön-külön) nem nagyobb, mint 0.4 csomag/mp.
3. Minden kimenő csomag kisebb, mint 1000 bájt (beleértve a TCP és IP fejléceket).
4. Egy 1 perces periódusidő figyelhető meg a 70 és 250 bájt közötti kimenő adatcsomagokra. Pontosabban a csomagok egy bizonyos hányada egy adott, periodikus időrésben kerül kiküldésre.

A módszer segítségével megbecsülhető a Skype felhasználók száma a hálózaton belül.

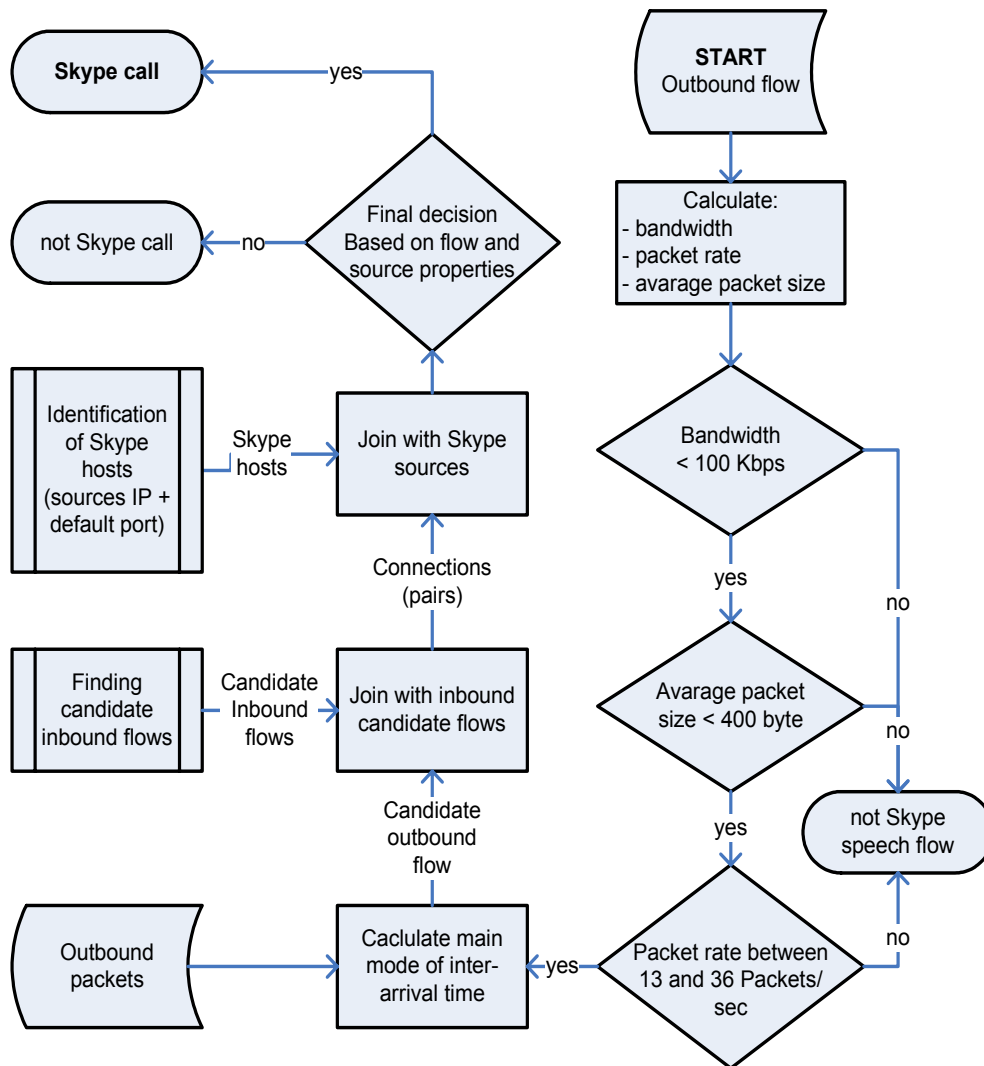
Fontos, hogy beazonosítsuk a Skype kliensek véletlenszerűen kiválasztott (de a későbbiekben állandó) kommunikációs portját, ami a Skype kliens és más kliensek között forgalom vizsgálatával valósítható meg. Ezek az ún. „UDP viszonyok”¹⁵ a 4. ábrán bemutatott egyszerű azonosítási módszerrel ismerhetők fel.

¹⁵ „UDP relations”



4. ábra: A Skype kliensek közötti „UDP viszonyok” azonosításának folyamata

A Skype beszélhívások felismeréséhez már egy jóval összetettebb azonosítási módszerre van szükség, amely a 5. ábrán látható. A módszer számos folyam- és csomagszintű szűrési feltételt alkalmaz (a kapcsolatok időbeli viselkedésének elemzésén túl). Ilyen feltétel többek között a sávszélesség, a csomagráta, az átlagos csomagméret vagy a csomagok köztes idejének fő modusa. A módszer szintén erősen támaszkodik a potenciális Skype kliensek listájára és az alapértelmezett kommunikációs portokra, melyeket az előző módszer azonosított.



5. ábra: A Skype beszédhívások azonosításának folyamata

A módszereket valós forgalmi méréseken ellenőriztem és alkalmaztam vezetékes és mobil hálózatokban.

Az itt bemutatott módszerre épülő, átfogó, összehasonlító forgalomanalízis legfontosabb, újszerű eredményeit az 5.3 fejezet mutatja be.

5. Eredmények alkalmazása

5.1. Optikai hálózatok

Az optikai hálózatok területén bemutatott minden új eredmény gyakorlati ipari vagy valóéletbeli alkalmazással rendelkezik.

A kötegelő portok és a hullámhosszak számának méretezése és optimalizálása fontos kérdés mind a statikus, mind a dinamikus optikai hálózatokban. Az 1.1. ALTÉZIS ezt a problémát oldja meg többretegű optikai hálózatokban. Noha ezek a hálózatok még kísérleti stádiumban vannak, az eredményeim nagyon hasznosak lesznek a bevezetésükkor.

Mivel a kötegelő (konverziós) portok igen drágák, ezen erőforrások szükséges számának meghatározása közvetlen kihatással van a költségekre (CAPEX). Az eredményeim azt mutatták, hogy optimalizálás segítségével a kötegelő portok száma jelentősen (20%-kal vagy többel) csökkenthető.

Noha a rendelkezésre álló hullámhosszak száma egy optikai szálban nem állítható finom lépésekben vagy egyesével (mivel a kapcsolóeszközben használt interfész típusától függ), a szükséges hullámhosszak számának optimalizálása mégis nagy jelentőséggel bír. Lehetővé teheti egy drágább (több hullámhosszat támogató) interfész kicserélését egy olcsóbbra (kevesebb hullámhosszat támogatóra) az alacsony kihasználtságú összeköttetésekben. Egy olyan szituáció is elképzelhető, ahol több szolgáltató osztozik egyetlen fizikai hálózaton, és a használt erőforrások mennyisége után fizetnek. Ekkor minden szolgáltatónak saját érdeke, hogy a lehető legkevesebb hálózati erőforrást használjon.

Az 1.2. ALTÉZISBEN és az 1.3. ALTÉZISBEN javasolt – az útvonalválasztás és a jelszintek meghatározásának együttes problémáját megoldó – módszer közvetlenül alkalmazható valós környezetben. A módszerek (eredményei) könnyen megvalósíthatók a jelenlegi optikai hálózatokban, mert a modern kapcsolóeszközök már most is támogatják a jelszintek hullámhosszankénti külön-külön állíthatóságát. Jóllehet a gyakorlatban ez a funkció nincs kihasználva. Valójában általában egy legrövidebb út alapú útvonalválasztást alkalmaznak, a jelszinteket pedig kézzel állítják be bármifajta optimalizálási módszer használata nélkül. Ugyanakkor én megmutattam, hogy ezeket a szisztematikus optimalizálási módszereket alkalmazva jelentősen jobb teljesítmény érhető el. Az 1.2. ALTÉZISBEN javasolt módszert szabadalom is védi [P1].

A 2.1. ALTÉZISBEN javasolt optimalizálási módszer útvonalválasztáshoz és hálózattervezésre alkalmazható. Számos olyan tényezőt és adottságot (pl. unicast és multicast igények, elektronikus vagy optikai elágaztatás,

topológia kényszerek) vesz figyelembe, melyek a jövő hálózatainak tervezésekor fontosak.

A 2.2. ALTÉZIS az optikai rétegben valamint az elektronikus rétegben megvalósított elágaztatást hasonlítja össze több szempontból. A – globális optimumot adó – szimulációból nyert eredmények szintén hálózattervezési célokra használhatók.

Manapság az optikai többesadás (különösen a dinamikus multicast) igen népszerű kutatási terület. Általában elmondható, hogy a többesadás megvalósítása a hálózat lehető legalacsonyabb rétegében a leggazdaságosabb. A multicast szolgáltatás (noha a végfelhasználók számára közvetlenül nem elérhető) a gerinchálózatokban jelenlévő igen fontos jellemző, mely a Triple-play koncepció hatékony megvalósításának kulcsa: a TV csatornák általában többesadással jutnak el a tartalom terjesztőjétől a végfelhasználókhöz közeli helyi tartalomszolgáltatókhoz (cache/relay szolgáltatókhoz). A közönség időben változhat: új ügyfelek jelenhetnek meg, akik előfizettek a tartalomra, míg más ügyfelek – lejárt előfizetéssel – elhagyhatják a hálózatot. Ebben az esetben az ügyfél alatt nem feltétlenül egy egyedülálló végfelhasználót értünk, hanem inkább egy helyi szolgáltatót. Egy másik példa lehet egy virtuális LAN szolgáltatás, ahol a LAN broadcast csomagokat minden végponthoz el kell juttatni.

A 2.3. ALTÉZISBEN dinamikus multicast fák újrakonfigurálását vizsgáltam meg több szempontból. A kiterjedt elemzés eredményei hálózatméretezési és -tervezési célokra használhatók fel. Várhatóan az eredmények még nagyobb jelentőségre tesznek majd szert, amint az optikai technológia egyre beljebb hatol a hozzáférési hálózatban, közelítve a végfelhasználóhoz (FTTC, FTTB, FTTH), és amint a nagyfelbontású digitális média egyre több felhasználónak válik elérhetővé.

5.2. P2P forgalom elemzése

A 3.1. ALTÉZISBEN javasolt forgalomazonosítási módszert több nagyméretű forgalmi mérésre alkalmaztam, és egy széleskörű forgalmi elemzést végeztem. Megmutattam a hasonlóságokat és a különbségeket a P2P és a nem P2P forgalom között több szempontból. Szintén vizsgáltam a P2P és a nem P2P felhasználók és alkalmazások viselkedését. A forgalmi analízis részletei a Disszertáció 8.5 fejezetében olvashatók.

Megvizsgáltam és összehasonlítottam a P2P és a nem P2P forgalmat csomag-, folyam- és aggregált szinten. Megerősítettem számos általános, aggregált forgalomra érvényes karakterisztikát. Ezenfelül a következő új megállapításokat tettem:

- Csomagszinten léteznek bizonyos alkalmazások, melyek bizonyos csomagméretek gyakori megjelenéséért felelnek a forgalomban (pl. a Gnutella az 528 bájtos, a BitTorrent a 128 bájtos, az eDonkey az 1200 bájtos csomagokért felel).
- A folyammméretek eloszlása az aggregált (számos P2P alkalmazás által együttesen generált) P2P forgalomban „heavy-tailed” (Pareto, [35]) modellt követ. Hasonlóképpen a folyammméretek eloszlása az aggregált nem P2P forgalomban szintén Pareto eloszlású. Az eloszlás jellemző paramétere¹⁶ -0,3 a P2P forgalomra, ill. -0.25 a nem P2P forgalomra.
- Az aktivitási sorrend alapján, a P2P felhasználók 10%-a felelős a forgalom 90%-áért. A különbség nagyobb a „megszállott” és a „hobby” P2P felhasználók között, mint a nem P2P felhasználók között.
- Az aktív P2P felhasználók száma és az összes felhasználók száma közötti kapcsolat erős lineáris összefüggést mutat, ami azt sugallja, hogy a felhasználók mindig egy bizony hányada (0.2-0.3) használ P2P alkalmazásokat.
- A felhasználók – generált forgalom szerinti – rangsorában a népszerű Zipf törvény [34] megfelelően írja le a lista első 10%-ának forgalmát mind a P2P, mind a nem P2P esetben. A standard Pareto eloszlás megfelelő modell a legnagyobb forgalmú felhasználók forgalmának modellezésére.

5.3. Skype forgalom elemzése

A 3.2. ALTÉZISBEN javasolt forgalomazonosítási módszert több nagyméretű forgalmi mérésre alkalmaztam, és megmutattam a Skype forgalom sajátos tulajdonságait folyamszinten és aggregált szinten. A Skype felhasználók viselkedését is elemeztem. Megvizsgáltam a Skype forgalom és a felhasználók viselkedését vezetékes és mobil hálózati környezetben. A forgalmi analízis részletei a Disszertáció 9.7 fejezete mutatja be.

Tanulmányoztam a Skype hívások és a Skype felhasználók számának ingadozását számos forgalmi mérésben, beleértve egy vezetékes ADSL tartományban készült mérést, ill. mobil hálózatokban készült méréseket. Szintén elemeztem a „beszédés órák”¹⁷ napi ingadozását. *Az eredmények azt mutatják, hogy a Skype egyedi napi görbével rendelkezik, mely*

¹⁶ shape (alak) paraméter

¹⁷ A Skype felhasználók által lebonyolított összes beszélgetések hossza egy adott órában.

különbözik a hagyományos PSTN hálózatokban tapasztalt általános napi görbétől. Az eredmények azt sugallják, hogy a legtöbb Skype felhasználó a Skype-ot hobbicélra használja szabadidős tevékenységként. A fő forgalmas órák éjjel vannak. Az átlagos híváshossz szintén hosszabb ezekben az órákban.

Szintén meghatároztam a Skype hívások legfontosabb karakterisztikus jellemzőit, úgymint a sáv szélesség, a csomagráta, az átlagos csomagméret és a hívások időtartama. *Az eredmények rávilágítottak, hogy a Skype hívások időtartamának eloszlása exponenciálishoz hasonló. Ezek a tulajdonságok segíthetik a hálózat méretezését a szolgáltató számára. Megadtam a felhasználói viselkedést leíró jellemzőket, úgymint a legaktívabb felhasználók („heavy users”) rangsora, MOU¹⁸ stb. Ezek a szolgáltatások árazásával kapcsolatos döntéseket segíthetik.*

Végeztem Skype forgalomazonosítást 3G mobil hálózatokban is, ami különösen foglalkoztatja a hálózati szolgáltatókat a szolgáltatások árazása miatt. Az eredmények ismeretében a szolgáltató meghatározhatja a beszédforgalom percdíjának és az adatátvitel (Skype) általánydíjának számára kedvező arányát. *Megállapítottam, hogy a Skype forgalom karakterisztikus jellemzői nagyon hasonlóak a vezetékes hálózatban és a szélessávú mobil hálózatban, mely azt sejteti, hogy a Skype mindkét környezetben jól alkalmazható.*

6. Köszönetnyilvánítás

A szerző ezúton szeretné kifejezni köszönetét azért a rengeteg segítségért és támogatásért, melyben a kutatási évek alatt részesült. Köszönet illeti a témavezetőket, ill. a Távközlési és Médiainformatikai Tanszék, valamint a High-Speed Network (HSN) Lab valamennyi munkatársát.

¹⁸ Minutes of Use: annak mérőszáma, hogy a felhasználó hány percig használ egy szolgáltatást havonta

7. Irodalomjegyzék

- [1] N. B. Azzouna, and F. Guillemin, "Impact of peer-to-peer applications on wide area network traffic: an experimental approach", in *Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference*, Vol.3, 2004, pp. 1544-1548.
- [2] S. Kamei, and T. Kimura, "Practicable network design for handling growth in the volume of peer-to-peer traffic", in *Proc. of IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and signal Processing*, Vol.2, 2003, pp. 597-600.
- [3] B. Quinn and K. Almeroth, "IP multicast applications: Challenges and solutions", IETF RFC 3170, Sep. 2001
- [4] K. P. Gummadi, R. J. Dunn, S. Saroiu, S. D. Gribble, H. M. Levy, J. Zahorjan, "Measurement, Modeling, and Analysis of a Peer-to-Peer File-Sharing Workload", in *Proc. of 19th ACM Symposium on Operating Systems Principles (SOSP-19)*, Bolton Landing, NY, 2003
- [5] J. A. Pouwelse, P. Garbacki, D.H.J. Epema, H.J. Sips, "The BitTorrent P2P File-Sharing System: Measurements and Analysis", 4th Int. workshop on Peer-to-Peer Systems (IPTPS'05), Feb. 2005.
- [6] E. Adar, B. A. Huberman, "Free Riding on Gnutella", Technical report, Xerox PARC, Aug. 2000.
- [7] Skype Official Website, <http://www.skype.com/intl/en/>
- [8] Govind P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", 3rd Edition, *John Wiley & Sons*, 2002
- [9] Mohammad Ilyas, Hussein T. Mouftah, "The Handbook of Optical Communication Networks", *CRC Press*, 2003
- [10] Achyut K. Dutta, Niloy K. Dutta, Masahiko Fujiwara, "WDM Technologies – Volume III: Optical Networks", *Elsevier Academic Press*, 2004
- [11] P. E. Green "Optical Networking Update" , *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol 14 no. 5 pp 764-779, June 1996
- [12] I. Chlamtac, A. Ganz, G. Karmi, "Lightpath Communications: An Approach to High Bandwidth Optical WANs", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 40, no. 7, pp.1171-1182, July 1992
- [13] Harry G. Perros, "Connection-oriented Networks: SONET/SDH, ATM, MPLS and Optical Networks", *John Wiley & Sons*, 2005
- [14] "Architecture for the automatically switched optical network (ASON)", ITU-T Recommendation G.8080/Y.1304, July 2006
- [15] XC-VXL-10G/2.5G Cross Connect Cards for the Cisco ONS 15454 SDH MSPP, Cisco ONS 15454 60G/5G High-Order/Low-Order XC-VXC Cross-Connect Card, <http://www.cisco.com/>

- [16] LambdaXtreme™ , Lambda Unite MMS datasheet
<http://www.alcatel-lucent.com/wps/portal>
- [17] MARCONI MHL 3000 CORE datasheet, <http://www.ericsson.com>
- [18] OptiX BWS 1600G DWDM datasheet, <http://www.huawei.com>
- [19] LambdaDriver WDM Tunable Cards datasheet, <http://www.huawei.com>
- [20] LambdaDriver Tunable 10GE WDM cards, TM-DXFP20T and TM-DXFP35T DM Tunable Cards, <http://www.mrv.com>
- [21] B. Ramamurthy, D. Datta, H. Feng, J. P. Heritage, B. Mukherjee: “Impact of Transmission Impairments on the Teletraffic Performance of Wavelength-Routed Optical Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, no. 10, October 1999, pp. 1713–1723
- [22] N. S. C. Correia , J. Coimbra, and M. C. R. Medeiros, “Sparse traffic grooming in WDM networks using coarse granularity OXCs”, *Photonic Network Communications*, Volume 17, Number 1 / February, 2009
- [23] M. Sivakumar, K.M. Sivalingam, “Limited Grooming Architectures and Groomer-port Placement in Optical WDM Mesh Networks”, in *Proc. of 3rd International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems (BROADNETS)*, 2006
- [24] Jun He, M. Brandt-Pearce, S. Subramaniam, “QoS-Aware Wavelength Assignment With BER and Latency Constraints for All-Optical Networks”, *Journal of Lightwave Technology*, Volume 27, Issue 5, 2009
- [25] L. Pavel, “OSNR Optimization via end-to-end Power Control: A Central Cost Approach”, in *Proc. IEEE INFOCOM 2005*, Miami, March 2005.
- [26] X. Zhang et al., “Constrained Multicast Routing in WDM Networks with Sparse Light Splitting”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, issue 12, p. 1917, Dec. 2000
- [27] A. Khalil et al., "Dynamic provisioning of low-speed unicast/multicast traffic demands in mesh-based WDM optical networks", *Journal of Lightwave Technology*, Volume 24, Issue 2, Feb. 2006
- [28] T. Cinkler, R. S. Castro, S. Johansson, “Configuration and Re-Configuration of WDM networks”, NOC’98, European Conference on Networks and Optical Communications, Manchester, UK, 1998
- [29] J. W. Suurballe, “Disjoint paths in a network”, *Networks vol. 4*, pp. 125-145, 1974
- [30] E. W. Dijkstra, “A note on two problems in connecting with graphs”, *Numer. Math. Vol. 1*, pp. 269-271, 1959
- [31] Alexander Schrijver, “Theory of Linear and Integer Programming”, *John Wiley and Sons*, 1998.
- [32] ILOG CPLEX Mathematical Programming Optimizer, <http://www.ilog.com/products/cplex/>
- [33] Microsoft SQL Server 2005 (www.microsoft.com/SQL/default.aspx) and *Transact SQL* reference: [http://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa260642\(SQL.80\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa260642(SQL.80).aspx)

- [34] L.A. Adamic, B.A. Huberman, “Zipf’s law and the Internet”, *Glottometrics*, Vol. 3, 2002, pp. 143-150
- [35] V. Brazauskas, R. Serfling, “Favorable estimators for fitting Pareto models: A study using goodness-of-fit measures with actual data”, *ASTIN Bulletin*, vol. 33, no. 2, 2003, pp. 365-381
- [36] B. Raahemi, A. Hayajneh, and P. Rabinovitch, “Classification of peer-to-peer traffic using neural networks”, in Proc. Artificial Intelligence and Pattern Recognition, Orlando, USA, July 2007
- [37] B. Raahemi, W. Zhong, J. Liu, “Peer-to-Peer Traffic Identification by Mining IP Layer Data Streams Using Concept-Adapting Very Fast Decision Tree”, in Proc. 20th IEEE Int. Conf. on Tools with Artificial Intelligence 2008 (ICTAI), Dayton, OH, USA, 2008
- [38] Y. Yang, R. Wang, Y. Liu, X. Zhou, „Solving P2P Traffic Identification Problems Via Optimized Support Vector Machines”, in Proc. Int. Conf. on Computer Systems and Applications 2007 (AICCSA), Amman, Jordan, 2007
- [39] G.P.S. Junior, J.E.B. Maia, R. Holanda, J.N. de Sousa, “P2P Traffic Identification using Cluster Analysis”, 1st Global Information Infrastructure Symposium 2007 (GIIS), Marrakech, Morocco, 2007

8. Publikációk

FOLYÓIRATCIKKEK

- [J1] Zsigmond, Szilárd, Perényi, Marcell and Cinkler, Tibor, “OSNR based routing in WDM optical networks”, *Híradástechnika*, Volume LXIII, Number 7, pages 47-54, 2008
- [J2] Zsigmond, Szilárd, Perényi, Marcell and Cinkler, Tibor, “Jel/zaj viszonyon alapuló útvonalválasztás WDM hálózatokban”, *Híradástechnika*, Volume LXIII, Number 6, pages 35-42, 2008
- [J3] Perényi, Marcell, Soproni, Péter and Cinkler, Tibor, „Periodic Reconfiguration of Groomed Multicast Trees in WDM Networks”, *Híradástechnika (English issue)*, Volume LXIII, Number 1, pages 2-10, 2008.
- [J4] Soproni, Péter, Perényi, Marcell and Cinkler, Tibor, „Multicast és forgalomkötegelés többretegű hálózatokban”, *Híradástechnika*, Volume LXII, Number 2, pages 19-24, 2007.
- [J5] Perényi, Marcell, Soproni, Péter and Cinkler, Tibor, „Multicast fák rendszeres újrakonfigurálása többretegű optikai hálózatokban”, *Híradástechnika*, volume LXII, number 2007/8, pages 14-22, 2007.
- [J6] Perényi, Marcell, Dang, Trang D., Gefferth, András and Molnár, Sándor, „Identification and Analysis of Peer-to-Peer Traffic”, *Journal of Communication*, Academy Publisher, Volume 1, Number 7 Nov/Dec 2006, pages 36-46, ISSN 1796-2021, 2006.

KONFERENCIACIKKEK

- [C1] Perényi, Marcell, Zsigmond, Szilárd and Cinkler, Tibor, “ILP Formulation of Signal Power Based Routing for Single- and Multi-Layer Optical Networks”, in Proc. of 5th Int. Conf. on Broadband Communications, Networks and Systems (BROADNETS), London, UK, 2008
- [C2] Cinkler, Tibor, Perényi, Marcell and Soproni, Péter, “Restoration of Multi-Cast Trees in Optical-Bearable Grooming-Capable Two-Layer Networks”, in Proc. of 10th Int. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON), Athens, Greece, 2008
- [C3] Cinkler, Tibor, Zsigmond, Szilárd and Perényi, Marcell, “Traffic Grooming and Power Level Tuning for Physical Impairment Constrained Routing”, in Proc. of 10th Int. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON), Athens, Greece, 2008
- [C4] Fernández-Palacios, Juan, Duque, Raul, Aracil, Javier, Gruenzinger, Ripert, Cinkler, Tibor, Soproni, Péter, Perényi, Marcell, Tapolcai, János, Fodor, Péter, Gulyás, András and Hernández, José Alberto, “Network

- Resilience Requirements and Algorithms for Multicasting and Broadcasting Digital TV”, in *Proc. of 13th Int. Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS)*, Budapest, Hungary, 2008
- [C5] Perényi, Marcell, Soproni, Péter, Cinkler, Tibor and Larrabeiti, David, „Regular Reconfiguration of Light-Trees in Multilayer Optical Networks”, in *Proc. of 12nd Int. Conf. on Optical Networking Design and Modeling (ONDM)*, Vilanova i la Geltru, Spain, 2008.
- [C6] Soproni, Péter, Perényi, Marcell and Cinkler, Tibor, „Grooming-Enhanced Multicast in Multilayer Networks”, in *Proc. of 11th Int. Conf. on Optical Networking Design and Modeling (ONDM)*, Athens, Greece, 2007.
- [C7] Perényi, Marcell and Molnár, Sándor, „Enhanced Skype Traffic Identification”, in *Proc. of 2nd International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools (VALUETOOLS)*, Nantes, France, 2007.
- [C8] Perényi, Marcell, Gefferth, András, Dang, Trang D. and Molnár, Sándor, „Skype Traffic Identification”, in *Proc. of GLOBECOM 2007*, IEEE, Washington, USA, 2007.
- [C9] Dang, Trang D., Perényi, Marcell, Gefferth, András and Molnár, Sándor, „On the Identification and Analysis of P2P Traffic Aggregation”, in *Proc. of Networking 2006*, Coimbra, Portugal, 2006.
- [C10] Perényi, Marcell, Hegyi, Péter, Szigeti, János, Cinkler, Tibor and Sallai, Gyula, „Joint grooming capability and wavelength number optimization with protection”, in *Proc. of World Telecommunications Congress (WTC)*, Budapest, Hungary, 2006.
- [C11] Perényi, Marcell, Ladányi, Ákos and Cinkler, Tibor, „Joint Grooming Capability and Wavelength Number Optimization”, in *Proc. of 7th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Barcelona, Spain, 2005.
- [C12] Perényi, Marcell and Cinkler, Tibor, „Grooming node placement in switched multilayer networks”, in *Proc. of 9th Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Milan, Italy, 2005.
- [C13] Soproni, Péter, Botzheim, János, Cinkler, Tibor and Perényi, Marcell, „Protection of Multicast Demands Against Single Link Failure in Two Layer Optical Networks with Bacterial Evolutionary Algorithm”, 13th Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM2009), Braunschweig, Germany, 2009

SZABADALMAK

- [P1] Zsigmond, Szilárd, Perényi, Marcell, Cinkler, Tibor, „Signal Power Based Routing In WDM All-Optical Networks”, 2008

NEM TUDOMÁNYOS PUBLIKÁCIÓK

Perényi, Marcell, „Hardver”, TinInformatika könyvsorozat, TypoTex kiadó, 2001