



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
HÍRADÁSTECHNIKAI TANSZÉK

Overlay Hálózatok Tervezése és Teljesítményelemzése

Some Performance and Design Aspects of Overlay Networks

Ph.D. értekezés téziséhez

szerző:

Király Csaba

témavezetők:

Dr. Do Van Tien, BME
Dr. Lo Cigno Renato, UNITN

Budapest, 2012

1. Bevezetés

Az elmúlt évek során az overlay hálózati technológiákra épült szolgáltatások komoly fejlődést mutattak mind számukat, mind az általuk generált forgalom mennyiségét tekintve.

A szélessávú hozzáférés elterjedése, az erősebb processzorok és a magas szintű programozási nyelvi eszközök (mint például egyszerűsített hálózati API-k és könyvtárak) fejlődése lehetővé tette olyan rendszerek tervezését, melyek a hálózatot magas szintű absztrakcióval kezelik, a hálózati kapcsolatokat látszólag egyszerű „csövek” szintjén valósítják meg. Így az alkalmazás függetleníthető az alatta meghúzó hálózati technológiáktól, de egyben el is veszi azt a lehetőséget, hogy kihasználja annak fajlagos tulajdonságait. Ez a trend olyan rendszerekhez vezetett, ahol számos hálózati funkciót a protokoll hierarchia magas szintjén, az alkalmazási rétegben valósítanak meg, és a kölcsönhatás a magas szintű algoritmusok és a hálózat között döntő tényezővé válik a rendszer teljesítménye szempontjából.

Jó példák az ilyen overlay hálózatok által megvalósítható funkciók bemutatására az Anonymous Routing Overlay hálózatok és a Peer-to-Peer Streaming Overlay hálózatok. Mindkét esetben az overlay technikák használata az alkalmazási rétegben lehetővé tette nagyszabású elosztott rendszerek gyors fejlesztését és bevezetését, új kutatási területeket és szolgáltatási modelleket teremtve.

Az Anonymous Routing Overlay hálózatok fő célja a kommunikáló felek személyazonosságának védelme. Biztosítják a személyazonosság titkosságát mind a másik kommunikáló fél felé, mind külső megfigyelőkkel, támadókkal szemben. Ahhoz, hogy ennek jelentőségét megvilágítsuk, érdemes átgondolni, hogy egyetlen IP csomag mennyit árul el az Interneten kommunikáló felekről. Amikor A elküld egy IP csomagot B -nek, a csomag titkosítatlan formában tartalmazza mind A , mind B címét a csomag teljes útvonalán át. Ennek következtében B megismeri A címét. Ez megnehezíti anonim szolgáltatások — mint pl. anonim fizetés vagy anonim szavazás — megvalósítását. Még ha magasabb protokoll szinteken az anonimitást biztosítjuk is, maga az IP réteg felfedheti A kilétét.

A és B címének együttes megjelenése a csomagban azt is jelenti, hogy B személyazonossága ismertté válik A Internet szolgáltatója, vagy akár kormánya számára. Végül érdemes megjegyeznünk, hogy a kommunikációba az IP csomagok útjának bármely pontján belehallgatva felfedhető a két fél közötti kapcsolat.

Az Anonymous Routing Overlay hálózatok ezen azonosítók elrejtéséhez nyújtanak megoldásokat. Ezek közül legismertebb a Tor [9] rendszer, melyet százezrek használnak világszerte. Bár a Tor rendszert már szolgáltatásként használják, teljesítménye több vonatkozásban is elmarad az elvárhatótól: a rendelkezésre álló sávszélesség viszonylag alacsony, és a késleltetések egy nagyságrenddel meghaladják a normál IP csomagokra jellemző késleltetési értékeket.

Peer-to-Peer streaming overlay hálózatok esetében a szűk keresztmetszet szintén az IP rétegben található. Az IP Multicast technológia, ami egy Internet szolgáltató egységes hálózatában tökéletes megoldást nyújt az IP-TV szolgáltatás meg-

valósítására, Internet méretekben nem alkalmazható [13]. A megoldást ebben az esetben is alkalmazás szintű overlay technológiák jelentették. Több olyan megoldást is kifejlesztettek, melyek segítségével TV csatornákat lehet sugározni az Interneten optimalizált hálózati erőforrás kihasználás mellett [11, 19]. Bár több ilyen rendszer jelenleg is elérhető (pl. PPLive, SopCast, PPStream, TV Ants), ezen rendszerek teljesítményének elemzése és erőforrás-kihasználásuk optimalizálása további kutatást igényel.

2. Kutatási célkitűzések

A disszertáció fő célkitűzése overlay hálózatok teljesítmény problémáinak azonosítása, ezen problémák okainak és következményeinek elemzése korszerű rendszerek esetében, valamint új megoldások kidolgozása. A disszertáció két fő részből áll.

Az első rész célja Anonymous Routing Overlay hálózatok teljesítmény-jellemzőinek elemzése, és rendszerszintű megoldások kidolgozása az ilyen rendszerekben előforduló nagy késleltetések csökkentésére.

Először betekintést nyújtunk az overlay hálózatokban gyakran alkalmazott szállítási technológiák teljesítmény-jellemzőibe. Megvizsgáljuk a TCP kapcsolatok működését rövid-élettartamú kapcsolatok esetében, és meghatározunk egyes teljesítmény-jellemzőket (mint pl. a teljesítési idő eloszlását) a TCP protokoll nyílt sorbanállási hálózat alapú modelljének segítségével [J1].

Következő lépésben a TCP alapú és a datagram alapú overlay hálózatok teljesítménye közötti különbségeket vizsgáljuk az Anonymous Routing Overlay hálózatok példáján keresztül. Először ismertetjük az ún. „onion routing” hálózatok jellemzőit, majd bemutatjuk az új IPpriv rendszert, mely hasonló célokat valósít meg, mint a Tor rendszer, de eltér attól mind megoldásaiban, mind teljesítményében [C3]. Az IPpriv rendszer sajátossága nem csupán datagram alapú működésében keresendő, hanem abban is, hogy minden egyes anonimitáshoz szükséges rendszerfunkciót IPsec segítségével valósít meg, így kernel-szintű vagy akár router-alapú működésének köszönhetően nagyobb teljesítményt tesz lehetővé.

A disszertáció második részében az overlay hálózatok egy másik elterjedt példáját, a peer-to-peer hálózatokat vizsgáljuk. Konkrétan, célunk a P2P Streaming Overlay hálózatok teljesítményének elemzése és javítása.

P2P streaming hálózatoknál minden peer-nek el kell döntenie, hogy a videó melyik részét küldje, és ezt melyik peer-nek küldje. Ezt a döntést ütemezésnek (scheduling) nevezik. Első lépésben jellemezzük az ilyen rendszerek teljesítményének határait idealizált hálózati környezetet feltételezve, majd ismertetünk egy új ütemezési eljárást, amely ezt megvalósítja, így optimálisnak nevezhető [B1].

Ezt a vizsgálatot egyes feltevések elhagyásával fejlesztjük tovább, például elhagyjuk a sávszélesség homogenitásának feltételezését, és az ütemezés hálózattudatos változatát írjuk le, amely figyelembe veszi a többi peer sávszélességét, és teljesítményben felülmúlja az irodalomban leírt más algoritmusokat [C2, C1].

Végül példát adunk arra, hogy az overlay hálózatok hogyan teszik lehetővé bizonyos hálózati funkciók teljesítését akkor is, amikor az alacsonyabb réteg azokat nem támogatja. A csomag-prioritás például általában nem támogatott az Interneten, „overlay router”-ként szolgáló alkalmazások mégis lehetővé teszik hatékony prioritási technikák megvalósítását. Bemutatunk egy média-tudatos ütemezési eljárást, és a végfelhasználó által érzékelt videó-minőség mérésével megmutatjuk, hogy ez mennyiben befolyásolja a rendszer teljesítményét [C7, C8].

3. Alkalmazott módszertan

A disszertáció az overlay hálózatok két nagyban eltérő területét, nevezetesen az Anonymous Routing Overlay hálózatokat és a P2P Streaming Overlay hálózatokat tárgyalja.

Mindkét esetben a vizsgálatot a rendszer teljesítményét nagyban meghatározó technológiák, algoritmusok analitikus vizsgálatával kezdjük. Ezt követően új algoritmusokat ill. teljes rendszer-architektúrákat ismertetünk, majd ezek teljesítményét elemezzük korszerű rendszerekkel összevetve azokat. A probléma összetettségétől függően analitikus módszereket, szimulációt vagy a rendszer tényleges megvalósítására épülő méréseket használunk. Az analitikus eredmények érvényességét szimulációk és/vagy ellenőrzött kísérletek segítségével is ellenőrizzük.

A TCP-vel kapcsolatos eredményeket az ismert ns-2 szimulátor segítségével ellenőrizzük (az ns-2 szimulátor használata TCP protokoll teljesítmény elemzésére nagyon elterjedt [5–7, 10]). Az IPpriv rendszer teljesítményét valós kísérletek segítségével elemezzük, figyelmet fordítva arra, hogy a teljesítménykülönbségekhez hozzájáruló egyes tényezőket elválasszuk egymástól, mind laboratóriumi környezetben, mind az Interneten végrehajtott mérések segítségével.

P2P Streaming hálózatok vizsgálatához a kutatás kezdetekor nem álltak rendelkezésre szimulátorok, ezért az algoritmusokkal együtt két szimulátor is kifejlesztésre került. Az SSSim (Simple and Scalable Simulator) szimulátor egyszerűbb szerkezete egy az egyben megfelel az analitikus modell feltételezéseinek, így megfelelő eszköz az analitikus eredmények ellenőrzésére [C12]. Később az összetettebb P2PTVsim szimulátor is kifejlesztésre került, hogy a rendszer teljesítményét a szigorú feltételekhez kötött matematikai modellnél általánosabb esetekben is lehessen vizsgálni [1].

4. Új tudományos eredmények

Az értekezés új tudományos eredményeit két fő csoportba rendeztem: először az Anonymous Routing Overlay hálózatokkal kapcsolatos eredményeket (beleértve néhány általános TCP-vel kapcsolatos állítást), majd a P2P Streaming Overlay hálózatokkal kapcsolatos eredményeket tárgyaljuk.

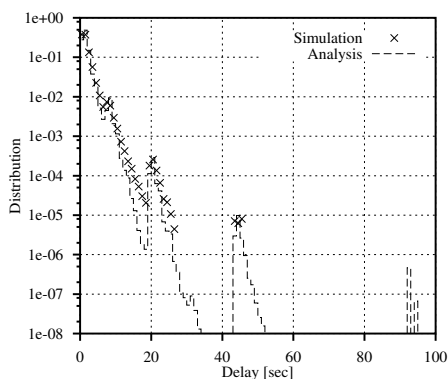
4.1. Anonymous Routing Overlay hálózatok teljesítménye

1.1. Tézispont. [J1, C4] Új módszert dolgoztam ki rövid TCP kapcsolatok teljesítési idejének vizsgálatára. A módszer a TCP protokoll nyílt többosztályú sorbanállási hálózat alapú modelljére épül (lásd az értekezés 2.4 fejezetét)

Mint korábban említettük, az overlay hálózati megoldások egy része TCP alapú átvitelt használ a hálózat elemei között. Bár a hosszú élettartamú TCP kapcsolatok teljesítményéről sok tudható [2, 3, 16], a rövid TCP kapcsolatok teljesítési idejéről kevés eredmény szerepel az irodalomban.

Több cikk [7, 15, 17, 18] javasolt olyan módszereket, melyekkel az *átlagos* teljesítési idő becsülhető. Egy N szegmensből álló TCP kapcsolat életútja azonban a csomagvesztések előfordulásától függően megannyi különböző módon alakulhat, és ennek megfelelően élettartama is igen eltérő lehet. Különböző típusú szolgáltatások más-más követelményeket támasztanak a TCP kapcsolatokkal szemben, és ezek az átlagnál bonyolultabb statisztikai jellemzők kiszámítását igénylik, mint pl. az N szegmensből álló TCP kapcsolat teljesítési idejének *eloszlása* vagy kvantilisei.

Egy olyan új módszert dolgoztam ki a rövid élettartamú TCP kapcsolatok teljesítési idő eloszlásának becsülésére, ami a TCP protokoll nyílt többosztályú sorbanállási hálózat alapú modelljére (OMQN) épül, és tetszőleges pontossággal adja meg a TCP kapcsolatokat szimbolizáló igények sorbanállási hálózatban töltött idejének diszkrét közelítését.



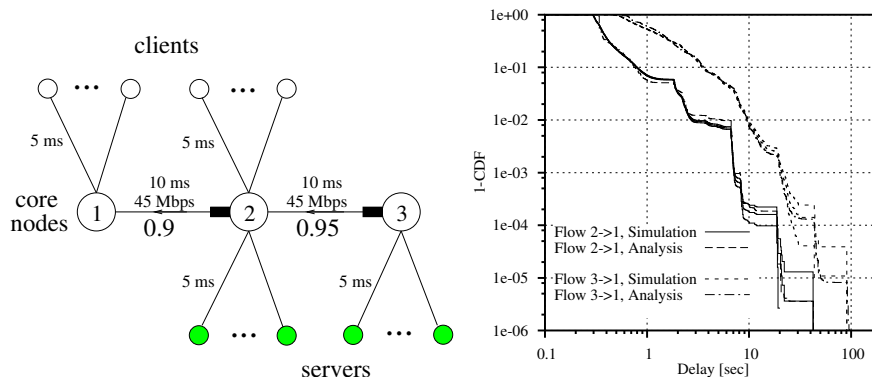
1. ábra. $N_s = 100$ szegmensből álló TCP kapcsolat teljesítési idejének eloszlása. Analitikus módszer és szimuláció összehasonlítása

Az 1. ábra 100 szegmensből álló TCP kapcsolatok teljesítési idejének eloszlását ábrázolja. Az egyik görbe ns-2 szimuláció, a másikat az új módszer szerint határoztuk meg. A szimulációs görbe kiszámításához 1,125 millió kapcsolat szimulálására volt szükség, mely 3 órát vett igénybe (csak akkor ábrázoltunk egy pontot, ha legalább 5 minta az adott intervallumba esett). Az analitikus eredmények kiszámításához 2 másodpercnél kevesebbre volt szükség.

1.2. Tézispont. [J1, C4] ns-2 szimulációk segítségével megmutattam, hogy a módszer nagy pontossággal képes meghatározni a TCP teljesítési idő eloszlását külön-

böző hálózati környezetek esetén. A módszer számítási igénye alacsony, és nem függ a hálózati topológiától, a konkurens TCP folyamatok számától, illetve a hálózati paramétereiktől. (lásd az értekezés 2.5 fejezetét)

A módszer pontosságát több különböző hálózati környezetben ellenőriztük, összehasonlítva azt ns-2 szimulációs eredményekkel. A vizsgálatok kiterjedtek egyszeres és többszörös szűk keresztmetszetek hatásaira és keresztirányú UDP forgalom esetére is.



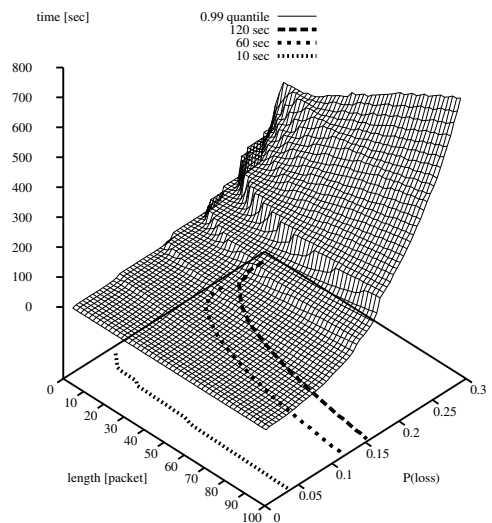
2. ábra. Kétszeres szűk keresztmetszet. Hálózati konfiguráció (bal oldal) és eredmények (jobb oldal). TCP kapcsolatok teljesítménye a 2-es router-hez kapcsolódó szerverek és az 1-es router-hez kapcsolódó kliensek között, valamint a $3 \rightarrow 1$ útvonalon.

A 2. ábra több szűk keresztmetszetű hálózat esetén mutatja különböző hálózati pontok közötti TCP kapcsolatok teljesítési idejének eloszlását mind ns-2 szimuláció segítségével meghatározva (vékonyabb vonalak jelzik a 99%-os konfidencia intervallum határait), mind az analitikus módszerrel kiszámolva.

Az új módszer lehetővé teszi a teljesítési idő eloszlás olyan tulajdonságainak vizsgálatát is, amelyek meghatározása szimuláció segítségével túl számításigényes lenne. A 3. ábra pl. a kvantilis eloszlását mutatja egy kiterjedt paraméterter felett, melynek kiszámítása szimulációs módszerekkel rendkívül időigényes lenne.

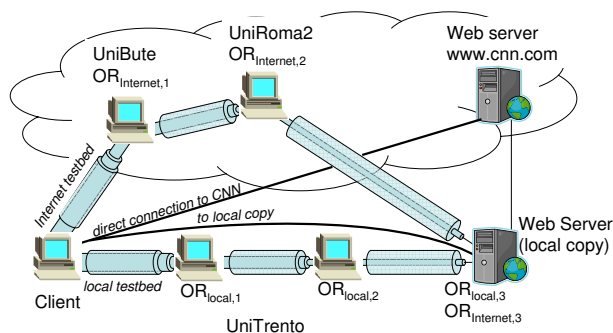
1.3. Tézispont. [C3, C5, C6] *Új rendszer-architektúrát dolgoztam ki Anonymous Routing Overlay hálózat megvalósítására. A rendszer teljes egészében szabványos IPsec megoldásokra épül, így elkerüli a más rendszerek teljesítményét hátrányosan befolyásoló TCP alagutak használatát. (Lásd az értekezés 3.3 fejezetét)*

A TCP alagutak használatából adódó teljesítmény problémák elemzéséből [C5] kiindulva kifejlesztettem egy új datagram alapú megoldást. Az új rendszer-architektúra, mely az IPpriv nevet kapta, teljes egészében szabványos IPsec funkciókra épül, így lehetővé teszi Anonymous Routing funkció megvalósítását akár egy új, hálózatszolgáltató központú modellben is.



3. ábra. Analitikus eredmények: a teljesítési idő 99%-kvantilise a kapcsolat hossz (N_s) és a TCP szegmens veszteségi valószínűség (P_L) függvényében.

1.4. Tézispont. [C3, C5] Megvalósítottam az 1.3 tézispontban ismertetett rendszert, és összehasonlítottam teljesítményét TCP alapú megoldásokkal mind emulált, mind valós környezetben, megmutatva, hogy a rendszer késleltetése nagy mértékben javítható. (lásd az értekezés 3.4 fejezetét)



4. ábra. Teszt környezet

Annak érdekében, hogy jobban megértsük az overlay hálózati technológia használatának hatását és a kommunikáció anonimizálásának 'árát', méréseket végeztünk mind kontrollált körülmények között helyi hálózatokban, mind az Interneten. A teljes teszt rendszert a 4. ábra illusztrálja.

Az IPpriv rendszer teljesítményét a Tor rendszerrel összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy míg az overhead (a rendszer által átvitt adatok mennyiségét tekintve) a két rendszer esetében nagyjából azonos, a letöltési idő az IPpriv esetében akár 3–4-szeres sebességet is elérhet.

4.2. Peer-to-Peer Streaming Overlay hálózatok teljesítménye

A bemutatott új kutatási eredmények második csoportja a P2P Streaming rendszerekhez, egész pontosan az ütemezés problémaköréhez kapcsolódik. A chunk (a médiafolyam elemi egysége) és peer kiválasztási stratégia (más néven ütemezés) a P2P Streaming rendszerek teljesítményének meghatározó tényezője (egyéb tényezők: overlay topológia optimalizáció [C9], chunk csere és jelzési protokoll, aggregált- és P2P átviteli sebesség szabályozás [C10, C11], stb.).

2.1. Tézispont. [B1] *Új ütemezési eljárást dolgoztam ki P2P Streaming rendszerekhez. Az új ún. Earliest-Latest peer ütemezési algoritmusról (ELp) bizonyítottam, hogy a jól ismert Latest Useful chunk ütemezési algoritmussal (LUC) együtt alkalmazva optimális teljesítményt nyújt (idealizált hálózati modell keretei között). (lásd az értekezés 4.4 fejezetét)*

Ismert tény, hogy amennyiben minden egyes peer egységnyi kapacitással rendelkezik, a chunk-ok terjesztési sebességének alsó határa $\delta_{lb} = (\lceil \log_2(N) \rceil + 1)T$, ahol N a peer-ek száma a rendszerben és T egy chunk átviteli ideje. Ez az alsó határ egyszerűen belátható, hiszen azon peer-ek száma, melyek már birtokolják az adott chunk-ot, legfeljebb duplázódhat minden T idő elteltével. Ismert az is [14], hogy központosított ütemezési eljárások el tudják érni ezt az elméleti határt. Azt is bizonyították [4], hogy egy logaritmusos határ elérhető aszimptotikusan, azaz ha $N \rightarrow \infty$ and $M_c \rightarrow \infty$ (ahol M_c a chunk-ok száma). Ha azonban valós rendszereket tekintünk, ezen aszimptotikus eredmények keveset árulnak el a tényleges teljesítmény és δ_{lb} közötti különbségről.

Az optimális algoritmus keresésében segítséget nyújthat az alábbi megfigyelés: az optimális terjesztési idő elérésének szükséges feltétele, hogy az adott chunk-ot már birtokló peer-ek száma minden ciklusban megduplázódjon. Ennek eléréséhez pedig elengedhetetlen, hogy minden egyes peer, ami megkapja a chunk-ot, azt rögtön elkezdje terjeszteni, és folyamatosan terjessze, míg a chunk el nem terjed az egész rendszerben.

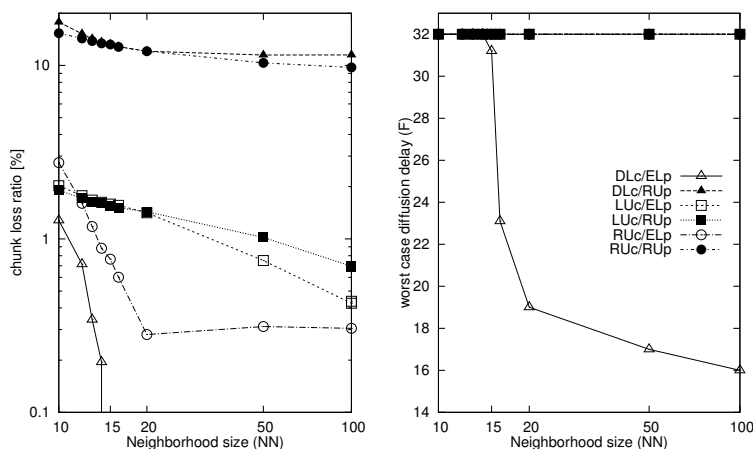
Ezen megfigyelés alapján megalkottam az ún. Earliest-Latest peer kiválasztási algoritmust, és formálisan bizonyítottam annak optimalitását a [4] cikkben is alkalmazott idealizált modell keretein belül.

2.2. Tézispont. [B1] *Megmutattam, hogy az ELp algoritmus nem csak a LUC algoritmussal kombinálható, hanem optimális teljesítményt nyújt határidő alapú chunk kiválasztó algoritmusok (DLC) egy teljes osztályával együtt alkalmazva is. Ez a kombináció egy robusztus ütemezőt eredményez, mely közel optimális teljesítményt nyújt a matematikai modell egyes feltevéseinek elhagyása esetén is (lásd az értekezés 4.5 fejezetét).*

Bár az ELp/LUC ütemező optimális teljesítményt nyújt az idealizált modell keretein belül, ismert, hogy maga a LUC chunk kiválasztó algoritmus mohó jellegéből adódóan érzékeny több, a modell kereteiben idealizált körülményre.

A hálózati topológia megszorításai, vagy pl. eltérések az egyes chunk-ok méreteiben könnyen előidézhethetnek olyan szituációkat, ahol egy későbbi chunk „megelőz” egy korábbi, így ellehetetlenítve annak terjedését a hálózatban.

Az ismert „Deadline Driven Scheduling” [12] technikára alapozva kidolgoztunk egy új határidő alapú chunk kiválasztó algoritmust (DLc), amely kiküszöböli a LUC algoritmus fent említett gyengéit. Bizonyítjuk, hogy a DLc algoritmust az ELp algoritmussal kombinálva optimális ütemezők egy teljes osztályát kapjuk.



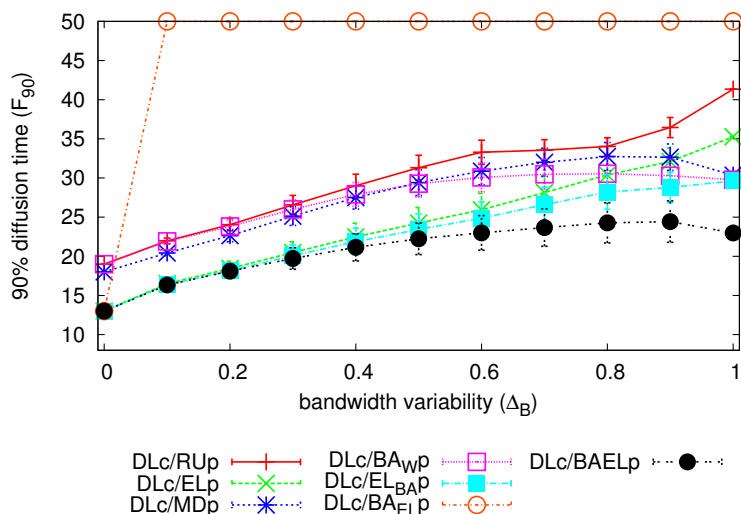
5. ábra. Chunk veszteség és terjesztési sebesség a topológia gráf fokának függvényében (10000 peer)

Szimulációk segítségével azt is megmutatjuk, hogy a DLc/ELp ütemező rugalmasan alkalmazkodik az idealizált modell teljes gráf topológiájától eltérő, annál realisztikusabb topológiákhoz is, elfogadható teljesítményt nyújtva akár $\log_2(N)$ fokú gráfok esetén is. Ezen szimulációs eredményeket illusztrálja az 5. ábra.

2.3. Tézispont. [C2, C1] *Olyan kiterjesztést javasoltam a 2.1 tézispont algoritmusához, mely a hálózati jellemzők figyelembevételével ér el teljesítményjavulást heterogén sávszélesség eloszlás esetén. Az új BAELp algoritmus ekvivalens az ELp algoritmussal homogén sávszélesség eloszlás esetén (így rendelkezik a korábban megállapított optimalitási tulajdonsággal), és jobb teljesítményt nyújt heterogén sávszélesség eloszlás esetén, mint más ismert algoritmusok. (Lásd az értekezés 5. fejezetét)*

Ellentétben az előbbi 2.1 és 2.2 tézispontokban használt modellel, a valóságban az overlay hálózatokban részt vevő peer-ek sávszélessége nem azonos. Az ütemezés során kiválasztott peer számára rendelkezésre álló sávszélesség befolyásolja a chunk későbbi terjesztési sebességét.

Ahhoz, hogy egy ütemezési eljárás jól kezelje a különböző sávszélesség eloszlású eseteket, mind a peer sávszélességét [8], mind a peer állapotát figyelembe kell vennie az ELp algoritmus szerint.



6. ábra. Ütemezési teljesítmény a sávszélesség eloszlás függvényében (bal oldal: homogén, jobb oldal: heterogén)

Ezen kritériumok integrálására több lehetőség is nyílik, melyek közül a legkézenfekvőbb a két algoritmus hierarchikus kombinációja: az EL_{BAP} algoritmus, mely először az ELp kritérium szerint rangsorol, majd a holtversenyben győztes jelöltek között sávszélességük alapján dönt, illetve a BA_{ELP} algoritmus, mely fordított sorrendben értékeli ki a két szempont szerint.

Bár ezen hierarchikus módszerek bizonyos esetekben hatékonynak bizonyulnak, a két paramétert hatékonyabban integrálja az új BA_{ELP} (Bandwidth Aware Earliest Latest) algoritmus, mely együttesen a két szempont szerint értékeli ki az adott peer disztribúciós potenciálját.

Az új BA_{ELP} algoritmus teljesítményét összevetettük a BA_{ELP} , EL_{BAP} algoritmusokkal, valamint más irodalomból ismert algoritmusokkal, különböző sávszélesség eloszlások esetén (ennek egy példája figyelhető meg a 6 ábrán). Megállapítható, hogy a BA_{ELP} algoritmus jobb teljesítményt nyújt, mint a többi vizsgált algoritmus.

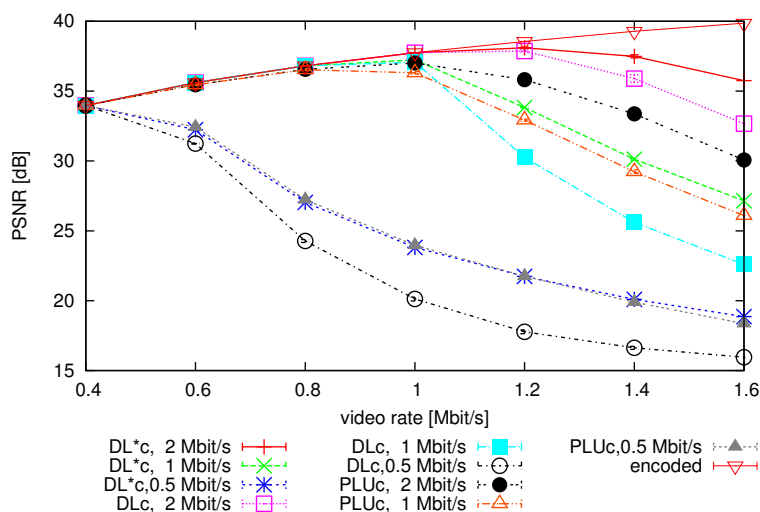
2.4. Tézispont. [C7, C8] *A 2.2 tézispontban ismertetett algoritmusra alapozva kidolgoztam egy új ütemezési algoritmust, mely a média szerkezetét kihasználva és az egyes chunk-okhoz megfelelő prioritást rendelve képes növelni a teljes rendszer hatékonyságát. (lásd az értekezés 6. és 7. fejezetét)*

Az értekezés korábbi fejezeteiben a chunk fogalmát absztrakt módon, az ütemezési algoritmus által kezelt adat egységeként értelmeztük, és az ütemezési eljárás teljesítményét chunk-vesztési valószínűséggel illetve chunk-terjesztési késleltetés statisztikáival jellemeztük. Egy valós rendszerben azonban a végfelhasználó által tapasztalt minőség megannyi egyéb paramétertől is függ, mint pl. az eredeti médiafolyam chunk-okra darabolásának módjától, a kódolási bitrátától, a használt videó codec-től, stb.

Míg a hagyományos P2P fájl-megosztó rendszerek a fájlokat azonos méretű darabokra osztják fel, addig P2P streaming esetén a médiafolyam szerkezetét figyelembe vevő algoritmusok is kidolgozhatók.

Az értekezés utolsó részében a média belső szerkezetét kihasználó algoritmusokat vizsgáljuk. Bevezetjük a végfelhasználó által érzékelt képminőség közvetlen mérését, majd ennek segítségével megvizsgáljuk a média kódolás, a médiafolyam chunk-okra darabolása, valamint a hálózati paraméterek és a végfelhasználó által érzékelt minőség összefüggéseit.

Bemutatjuk a DLc algoritmus továbbfejlesztett változatát, mely (tartalom alapján) prioritást rendel az egyes chunk-okhoz, és az ütemezés során felhasználja ezt az információt a jobb minőség elérése érdekében.



7. ábra. A végfelhasználó által megfigyelhető minőség (PSNR átlag) különböző ütemezési eljárások (DL*c: prioritás-alapú DLc; PLUc: prioritásos LUc), és különböző sávszélességek (heterogén hálózat 3 peer osztállyal: 2 Mbit/s; 1 Mbit/s és 0.5 Mbit/s) esetén, a kódolási bitráta függvényében

Megmutatjuk, hogy a prioritások hatékonyan alkalmazhatók az overlay hálózati szinten még akkor is, ha az alatta meghúzódó hálózati réteg ezt közvetlenül nem támogatja. Az elért eredményeket a 7. ábra illusztrálja, mely a kódolási bitráta és az észlelt minőség közötti összefüggéseket mutatja különböző sávszélességű kapcsolattal rendelkező felhasználók esetében. Hasonló, a kódolási bitrátát is magában foglaló összehasonlítás csupán chunk veszteség és késleltetés mérésével a chunk-ok eltérő médiatartalma miatt nem lenne lehetséges.

5. Az értekezésben bemutatott eredmények felhasználása

A TCP-vel kapcsolatos eredmények széleskörűen alkalmazhatóak rendszerek teljesítményanalízisének. Példaként említhetjük egyes P2P rendszerek gyors és agresszív kapcsolatnyitási stratégiáját, vagy HTTP böngészők esetén használt párhuzamos letöltési szálak teljesítményét, illetve különböző HTTP alapú rendszer-folyamatok közötti kommunikációt biztosító mechanizmusokat. Rövid élettartamú TCP kapcsolatok teljesítési idejének statisztikája mindezen alkalmazások vizsgálatakor fontos lehet.

A bemutatott IPpriv rendszer alkalmazásának vannak korlátai, hiszen az IPsec alrendszer beállításai sokszor adminisztrátori jogosultságokat követelnek. Másrészt viszont a rendszer két fontos újítást foglal magában. Megmutatja, hogy a korábban az anonimitás biztosításához szükségesnek vélt késleltetés nagy része tulajdonképpen az anonimitás szempontjából mellékes döntésnek, az overlay hálózatban alkalmazott szállítási protokollnak tudható be. Emellett az IPsec alapú működés megvalósítható alternatívát nyújt a végfelhasználók hozzájárulásán alapuló modellhez képest. Mivel a szolgáltatás akár routereken is implementálható, lehetőséget teremt egy hálózati szolgáltatásként működő, hatékony anonimizációs szolgáltatás létrehozására.

Az értekezésben bemutatott P2P Streaming eredmények nem csak alkalmazhatóak, de már használatban is vannak a nyílt forráskódú PeerStreamer keretrendszerben, mely jelenleg is több TV csatornát tesz elérhetővé az Interneten.

6. Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetet mond a következő szervezeteknek és projekteknek, amelyek-től a kutatási munka különböző szakaszaiban anyagi támogatást kapott: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, University of Trento, Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Telecomunicazioni, a 6. kutatási keretprogram DISCREET és a 7. kutatási keretprogram NAPA-WINE projektje.

Hivatkozások

- [1] The P2P-TVSim simulator. URL <http://www.napa-wine.eu/cgi-bin/twiki/view/Public/P2PTVSim>.
- [2] E. Altman, K. Avrachenkov, and C. Barakat. A stochastic model of tcp/ip with stationary random losses. In *Proceedings of the conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication*, SIGCOMM '00, pages 231–242, New York, NY, USA, 2000. ACM.

ISBN 1-58113-223-9. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/347059.347549>. URL <http://doi.acm.org/10.1145/347059.347549>.

- [3] A. Berger and Y. Kogan. Dimensioning bandwidth for elastic traffic in high-speed data networks. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 8(5):643–654, oct 2000. ISSN 1063-6692. doi: 10.1109/90.879350.
- [4] T. Bonald, L. Massoulié, F. Mathieu, D. Perino, and A. Twigg. Epidemic live streaming: optimal performance trade-offs. In *Proc. of SIGMETRICS*, pages 325–336, Annapolis, Maryland, USA, June 2008. ACM. ISBN 978-1-60558-005-0.
- [5] G. Buchholz, A. Gricser, T. Ziegler, and T. V. Do. Explicit loss notification to improve tcp performance over wireless networks. In *HSNMC'03*, pages 481–492, 2003.
- [6] G. Buchholz, T. Ziegler, and T. V. Do. Tcp-eln: On the protocol aspects and performance of explicit loss notification for tcp over wireless networks. In *Proceedings of the First International Conference on Wireless Internet*, pages 172–179, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society. ISBN 0-7695-2382-X. doi: 10.1109/WICON.2005.31. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1092359.1092623>.
- [7] N. Cardwell, S. Savage, and T. Anderson. Modeling tcp latency. In *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, volume 3, pages 1742–1751 vol.3, mar 2000. doi: 10.1109/INFCOM.2000.832574.
- [8] A. Couto da Silva, E. Leonardi, M. Mellia, and M. Meo. A bandwidth-aware scheduling strategy for p2p-tv systems. In *Proceedings of the 8th International Conference on Peer-to-Peer Computing 2008 (P2P'08)*, Aachen, September 2008.
- [9] R. Dingledine, N. Mathewson, and P. Syverson. Tor: The second-generation onion router. In *Proceedings of the 13th USENIX Security Symposium*, August 2004.
- [10] M. Garetto, R. Lo Cigno, M. Meo, and M. Marsan. Closed queueing network models of interacting long-lived tcp flows. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 12(2):300 – 311, april 2004. ISSN 1063-6692. doi: 10.1109/TNET.2004.826297.
- [11] B. Li, Y. Qu, Y. Keung, S. Xie, C. Lin, J. Liu, and X. Zhang. Inside the new coolstreaming: Principles, measurements and performance implications. In *Proc. of IEEE INFOCOM 2008*, Phoenix, AZ, USA, Apr. 15–17 2008.

- [12] C. L. Liu and J. Layland. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard real-time environment. *Journal of the ACM*, 20(1), 1973.
- [13] J. Liu, S. G. Rao, B. Li, and H. Zhang. Opportunities and challenges of peer-to-peer internet video broadcast. *Proceedings of the IEEE*, 96(1):11–24, 2008. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2007.909921>. URL <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2007.909921>.
- [14] Y. Liu. On the minimum delay peer-to-peer video streaming: how realtime can it be? In *MULTIMEDIA '07: Proceedings of the 15th international conference on Multimedia*, pages 127–136, Augsburg, Germany, September 2007. ACM. ISBN 978-1-59593-702-5. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1291233.1291259>.
- [15] M. Mellia and H. Zhang. Tcp model for short lived flows. *Communications Letters, IEEE*, 6(2):85–87, feb 2002. ISSN 1089-7798. doi: 10.1109/4234.984705.
- [16] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose. Modeling tcp reno performance: a simple model and its empirical validation. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 8(2):133–145, apr 2000. ISSN 1063-6692. doi: 10.1109/90.842137.
- [17] B. Sikdar, S. Kalyanaraman, and K. Vastola. Analytic models and comparative study of the latency and steady-state throughput of tcp tahoe, reno and sack. In *Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM '01. IEEE*, volume 3, pages 1781–1787 vol.3, 2001. doi: 10.1109/GLOCOM.2001.965883.
- [18] B. Sikdar, S. Kalyanaraman, and K. S. Vastola. An integrated model for the latency and steady-state throughput of tcp connections. *Perform. Eval.*, 46:139–154, October 2001. ISSN 0166-5316. doi: 10.1016/S0166-5316(01)00048-7. URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=570289.570294>.
- [19] X. Zhang, J. Liu, and T. shing Peter Yum. Coolstreaming/donet: A data-driven overlay network for peer-to-peer live media streaming. In *in IEEE Infocom*, 2005.

Publikációk

Folyóirat cikkek

- [J1] C. Kiraly, M. Garetto, M. Meo, M. Ajmone Marsan, and R. Lo Cigno. Analytical computation of completion time distributions of short-lived tcp connec-

tions. *Performance Evaluation*, 59:179 – 197, 02/2005 2005. ISSN 01665316. doi: 10.1016/j.peva.2004.07.002.

- [J2] R. Birke, E. Leonardi, M. Mellia, A. Bakay, T. Szemethy, C. Kiraly, R. Lo Cigno, F. Mathieu, L. Muscariello, S. Niccolini, J. Seedorf, and G. Tropea. Architecture of a network-aware p2p-tv application: the napa-wine approach. *Communications Magazine, IEEE*, 49(6):154 –163, june 2011. ISSN 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2011.5784001.
- [J3] C. Kiraly, T. V. Do. Sztratoszferikus platformok és szolgáltatásaik. (in Hungarian) *Magyar Távközlés* (Hungarian Telecommunications Journal) 2004/3: 23 – 26, 2004.

Könyv fejezetek

- [B1] L. Abeni, C. Kiraly, and R. Lo Cigno. *On the Optimal Scheduling of Streaming Applications in Unstructured Meshes*, volume 5550 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 117–130. Springer Berlin / Heidelberg, 2009.

Konferencia cikkek

- [C1] L. Abeni, C. Kiraly, and R. Lo Cigno. Scheduling P2P multimedia streams: Can we achieve performance and robustness? In *2009 3rd International Conference on Internet Multimedia Services Architecture and Application (IMSAA)*, pages 1 – 6, Bangalore, India, 2009. IEEE. ISBN 978-1-4244-4792-3. doi: 10.1109/IMSAA.2009.5439486.
- [C2] L. Abeni, C. Kiraly, and R. Lo Cigno. Robust scheduling of video streams in network-aware P2P applications. In *ICC 2010 - 2010 IEEE International Conference on Communications*, pages 1 – 5, Cape Town, South Africa, 2010. IEEE. ISBN 978-1-4244-6402-9. doi: 10.1109/ICC.2010.5502542.
- [C3] C. Kiraly and R. Lo Cigno. IPsec-based anonymous networking: A working implementation. In *ICC 2009 - 2009 IEEE International Conference on Communications*, pages 1 – 5, Dresden, Germany, 2009. IEEE. doi: 10.1109/ICC.2009.5199102.
- [C4] C. Kiraly, M. Garetto, R. Lo Cigno, M. Meo, and M. Ajmone Marsan. Computation of the completion time distribution of short-lived TCP connections. In *Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs '03)*, Ilkley, England, 2003.

- [C5] C. Kiraly, G. Bianchi, and R. Lo Cigno. Solving performance issues in anonymization overlays with a L3 approach. Technical Report TR-DISI-08-041, University of Trento, September 2008.
- [C6] C. Kiraly, S. Teofili, G. Bianchi, R. Lo Cigno, M. Nardelli, and E. Delzeri. *Traffic Flow Confidentiality in IPsec: protocol and implementation*, volume 262 of *IFIP International Federation for Information Processing*, pages 311 – 324. Springer US, Boston, MA, 2008. ISBN 978-0-387-79026-8.
- [C7] C. Kiraly, L. Abeni, and R. Lo Cigno. Effects of P2P streaming on video quality. In *ICC 2010 - 2010 IEEE International Conference on Communications*, pages 1 – 5, Cape Town, South Africa, 2010. IEEE. ISBN 978-1-4244-6402-9. doi: 10.1109/ICC.2010.5502003.
- [C8] C. Kiraly, R. Lo Cigno, and L. Abeni. Deadline-based differentiation in P2P streaming. In *GLOBECOM 2010 - 2010 IEEE Global Communications Conference*, pages 1 – 6, Miami, FL, USA, 2010. IEEE. ISBN 978-1-4244-5636-9. doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683450.
- [C9] C. Kiraly and R. Lo Cigno. On the effects of overlay localization on P2P networks. In *IEEE INFOCOM Workshops 2009 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops*, pages 1 – 2, Rio de Janeiro, Brazil, 2009. IEEE. ISBN 978-1-4244-3968-3. doi: 10.1109/INFCOMW.2009.5072170.
- [C10] R. Birke, C. Kiraly, E. Leonardi, M. Mellia, M. Meo, and S. Traverso. Horse rate control for P2P-TV streaming systems. In *Peer-to-Peer Computing (P2P), 2011 IEEE International Conference on*, pages 202 – 205, 31 2011-sept. 2 2011. doi: 10.1109/P2P.2011.6038736.
- [C11] R. Birke, C. Kiraly, E. Leonardi, M. Mellia, M. Meo, and S. Traverso. Aggregate flow control for P2P-TV streaming systems. In *NEM Summit 2011*, Sept. 2011.
- [C12] L. Abeni, C. Kiraly, and R. Lo Cigno. SSSim: a simple and scalable simulator for P2P streaming systems. In *2009 IEEE 14th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, pages 1 – 6, Pisa, Italy, 2009. IEEE. ISBN 978-1-4244-3532-6. doi: 10.1109/CAMAD.2009.5161473.