



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
TÁVKÖZLÉSI ÉS MÉDIAINFORMATIKAI TANSZÉK

KEVÉS PARAMÉTERES MINŐSÉGBIZTOSÍTÁSI TECHNIKÁK KOMMUNIKÁCIÓS HÁLÓZATOKBAN

Heszberger Zalán

Tézisfüzet

Tudományos vezető

Dr. Bíró József és Dr. Henk Tamás
Nagysebességű Hálózatok Laboratóriuma
Távközlési és Telematikai Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Budapest
2006

1 Bevezetés

Infokommunikációs korszakunkban a fejlődés egyik legfőbb hajtóereje az az igény, hogy a világ bármely két pontja között szélessávú kapcsolat jöjjön létre. A vezetékes vagy vezeték nélküli, fix vagy mobil, egyes- vagy többesadású, diszkrét vagy szórt jellegű adatkapcsolat, mind az adatátviteli módok lehetséges formáit képviseli, a globális információs társadalom kiépítése kapcsán. Meglepő módon azonban, minél jobban növekszik a hálózatok kapacitása, annál nagyobb az igény a sáv szélesség további növelése iránt. Egyre gyakrabban tűnnek fel hálózatok túlterhelését okozó újszerű alkalmazások. Jóllehet gerinchálózati szinten jelenleg (bár valószínűleg nem sokáig) a technológia vezet az igényekkel szemben, a hozzáférési hálózatokban (legyen az vezetékes vagy vezeték nélküli) az igények messze meghaladják a rendelkezésre álló sáv szélességet.

A kapacitás-hiány enyhítésének egyik lehetséges megoldását a meglévő átviteli hálózatok kihasználtságának növelése jelentheti. Az ilyen irányú törekvések többnyire az ún. statisztikus multiplexálás kihasználására irányulnak. E művelet során a különféle, váltakozó sebességű, egymástól többnyire csak lazán függő adatfolyamok, egy közös átviteli közegen való egyesítése során fellépő ún. multiplexálási nyereséget igyekeznek megbecsülni ill. kihasználni. Ez az eljárás akkor lehet eredményes, ha az egyes folyamok fluktuációja nagy, azaz amikor az adatsebességek átlagának és csúcsertékének az aránya kicsi. A végtelen időskálán egy átviteli link kihasználtsága megegyezik a rajta átfolyó forgalom sebessége átlagának a link teljes kapacitására vonatkozó hányadosával. Az egyes folyamokhoz dedikált (áramkör-kapcsolt) csatornák világától távolodva azonban számottevő mellékhatásként jelentkeznek, a folyamokénti átvitel-minőség garantálhatatlan jellege. Ezen probléma megoldása érdekében napjainkra számos hálózati minőségbiztosítási architektúra került kidolgozásra. Ezen architektúrákkal kapcsolatos kutatások központi témája olyan forgalom- és hálózati irányítási funkciók megalkotása, melyek segítségével a csomagkapcsolt forgalom számára (akár folyamokénti) átvitel-minőségi garanciák nyújtása válik lehetővé.

A világméretű Internet napjainkban tipikusan az ún. "legjobb szándék" (best-effort) elvet használja, amely ugyan a hálózat kedvező átlagos kihasználását nyújtja, de a valós-idejű ill. kvázi-valós idejű (főként multimédiás) alkalmazások esetében a megbízhatóságot jelentősen csökkenti. Továbbá ez az eljárás számottevő nehézséget okoz a hálózatüzemeltetők, ill. hálózat és alkalmazás szolgáltatók számára megfelelő árképzési mechanizmus kialakításában is.

A minőségi garanciák nyújtására alkalmas Internet létrehozásához az első lépést mindenképp az elvárt QoS (Quality of Service) képességek megtervezése jelenti. Ehhez olyan átvitel-minőségi mértékeket kell definiálni, amelyek hálózat oldali teljesítése garantálható. Szükséges továbbá olyan, a forgalmi folyamatokat jellemző mutatók meghatározása, amelyek a hálózat felhasználójától megkövetelhetők, továbbá olyan

kapcsolódó eljárásoké, amelyek feladata óvintézkedéseket hozni arra az esetre, ha a megállapodásban rögzített feltételek nem teljesülnek (pl. többlet forgalom kezelése). Ugyanakkor a kialakított átvitel-minőségi mutatóknak és forgalom-leíró módszereknek nemcsak egy meghatározott időintervallumban kell érvényesnek lenniük, de alkalmazniuk kell, hogy legyenek más szervezési feladatok ellátására is. Támogatniuk kell, tipikusan pl. az használat-orientált árképzési eljárásokat, a költségek elszámolását, de távlatilag a hálózat tervezésében is szerepet kell kapniuk.

A következő lépés a QoS hálózati architektúrák tervezésben, a forgalom-menedzselő algoritmusok és a hozzájuk tartozó protokollok kidolgozása. Ezek közül is talán a legfontosabbnak számítanak azok a erőforrás-lefoglaló algoritmusok, amelyek a kommunikációs végpontok közötti összeköttetés létrehozásához csomópontról-csomópontra haladva a tervezett útvonalon, lefoglalják a hálózati erőforrásokat a garantált átviteli minőség elérése érdekében. Az új hálózati architektúrák tervezésében kiemelt jelentőségűek lehetnek, azok az elképzelések, amelyek a "best effort" elv szerinti eljárásból a QoS alapú eljárásokba vezető konverziót szolgálják.

Dolgozatom olyan átvitel-minőségi mértékek számítására/bebecslésére összpontosít, amelyek egyrészt az adatátviteli szolgáltatások minőségének mérését szolgálják, másrészt a szolgáltatás teljesítése érdekében, jó mennyiségi forrásfelmérést is nyújtanak. A kidolgozott eljárások egyik legfontosabb jellegzetessége, hogy a hálózat/link forgalmi állapotáról csak igen kevés információ ismeretét igénylik, amely a valós rendszerekben történő alkalmazást jelentős mértékben megkönnyíti. Nyilvánvaló ugyanakkor, hogy korlátozott mennyiségű információ használata mellett az eredményül kapott mértékek leíró képessége behatároltabb. Mindazonáltal, széleskörű valós mérések és szimulációk igazolják, hogy a kidolgozott módszerek és eljárások jó kompromisszumot jelentenek az egzakt elvárások és a gyakorlati lehetőségek között.

2 Kutatási célkitűzések

A disszertációm eredményei szerkezetileg három fő részbe sorolhatóak. Az első részben újszerű, véletlen jelenségek kapcsán kevés statisztikai paraméter ismeretét feltételező, a jelenségeket leíró valószínűségi változók összegének momentum-generáló függvényét becsülő eljárásokat mutatok be. Az eredmények alapján lehetőség nyílik a minőségbiztosított hálózatokban átvitelminőséget jellemző mutatók kevés forgalmi paraméter alapján történő becslésére. Az első téziscsoport részeként bemutatásra kerül az is, hogy a kidolgozott formulák adott feltételek mellett optimális eredményt nyújtanak (azaz az adott feltételek teljesülése esetén jobb felső becslés nem adható). E rész eredményei általános (távközlési alkalmazásokon is túlmutató) jellegűek, melyek a disszertáció további részeiben kiaknázásra kerülnek.

A disszertáció második részében – az első téziscsoport eredményeit felhasználva – link telítési (szaturációs) valószínűsége (P_{sat}) ill. munkamennyiség (csomag) veszteségi arányra (Workload Loss Ratio – WLR) vonatkozó felső becslési ill. közelítési eljárásokkal foglalkozom. Ezek a formulák adatátvitel-minőségi mutatók becsléseként jelentős szerepet játszhatnak a jövő minőségbiztosított kommunikációs hálózataiban. A bemutatott algoritmusok alapvető tulajdonsága, hogy a számításokhoz a forgalmi szituációról ismertnek feltételezett paraméterek száma igen csekély – erre vonatkozik tehát a "keves paraméteres" megjelölés – azoknak csak első rendű statisztikai mutatói kerülnek felhasználásra. Az e részben addicionálisan közölt szuboptimális (zárt formában megadható) formulák kifejlesztését a (valós idejű számítást célzó) algoritmusok iránti igény motiválta.

A harmadik téziscsoport célja a P_{sat} ill. WLR átvitel-minőségi mutatókhoz rendelhető un. ekvivalens kapacitás becsülő módszerek bemutatása. A kifejlesztett formulák célja, hogy a telítési ill. csomagvesztési arányra vonatkozó minőségbiztosítási korlátok helyett, explicit, kapacitás típusú jellemzést segítő eljárásokat nyújtson forgalommenedzsment algoritmusok számára. A ilyen algoritmusok tipikusan a kommunikációs linkek sávszélességét kezelik szűkös erőforrásként, amely esetekben tehát olyan eljárásokkal kényelmes dolgozni, mely az adott méretű forgalom adott minőségű átviteléhez a szükséges link kapacitást explicit módon megadja. Gyakori eljárás pl. mérésalapú hívásfogadási algoritmus kapcsán, hogy a rendszer méri a védett linken folyó forgalom tulajdonságait, ill. megállapítja annak az adott átviteli minőség biztosításához (pl. előírt maximum csomagvesztés) szükséges (ekvivalens) sávszélességet. Ekkor egy újonnan érkező forrás azonnali beengedésére akkor van lehetőség ha a korábban megállapított ekvivalens sávszélesség és az újonnan érkező folyam csúcs sávszélességének összege nem haladja meg a védett link teljes kapacitását. Ebben az esetben gyors döntést akkor lehet hozni, ha az ekvivalens sávszélesség értéke az új igény beérkezésekor már rendelkezésre áll. Mivel gyakran ekvivalens kapacitásra vonatkozó – a számítások során ésszerűtlen pontatlanság bevezetése nélkül kreálható – zárt alakú

formulák nem adhatók, gyors, numerikus algoritmusok kidolgozása szükséges, melyek segítségével az eljárások valós-idejű környezetben is használhatók maradnak. Ezen cél érdekében az utolsó tézisben olyan fix-pontos algoritmusokat mutatok be, melyek implicit alakban adott ekvivalens kapacitás formulák gyors numerikus számítására alkalmasak.

3 Módszertan

A modellezési keretrendszerben, a kommunikációs folyamatok adatsebesség-idő függvényekkel vannak jellemezve. Ezt a függvényt a kutatás során stacioner sztochasztikus folyamatnak tekintem. Ezáltal az egyes folyamatok tehát egy-egy, a pillanatnyi sebességeloszlást reprezentáló valószínűségi változójukkal teljesen jellemezettek. E valószínűségi változókat többnyire függetlennek feltételezem. A kutatás az ún. folyadék-alapú tároló-mentes átvitel koncepciójának keretében ad átvitel-minőséget jellemző mutatókat becsülő eljárásokat kevés forgalmi paraméter ismeretében. E koncepció lényege, hogy a forgalmat tetszőlegesen oszthatóknak tételezzük fel, ill. a tárolók hatásától az átvitel során eltekintünk.

Disszertációm eredményei elsősorban analitikus eljárások alkalmazásán alapulnak. Minthogy azonban egyes formulák kidolgozása során olyan közelítésekre vagy egyszerűsítő feltételezésekre is sor került, amelyek hatása analitikusan nehezen kezelhető, numerikus ill. szimulációs vizsgálatokra is szükség volt az eredmények érvényességének és egzaktságának alátámasztására. A numerikus analízist a Mathematica szoftver numerikus és szimbolikus számítási eszközeivel, míg a szimulációkat az NS2 (Network Simulator) diszkrét esemény szimulátorral végeztem.

4 Új eredmények

4.1 Kevés paraméteres momentum-generáló függvény becslési technikák nem-negatív értékű valószínűségi változók összegére

Az átviteli jellemzők kevés paraméter alapján történő becslése igen hasznos eszköz szolgáltatási osztályok menedzselésére modern minőségbiztosítási hálózatokban. Ilyen modellek konstrukciója, csak igen kevés információt igényel, mégis gyakran kellő pontossággal tudja jellemezni a valós rendszereket. Az első téziscsoport, a tárolómentes forgalommenedzsment modellezési koncepció keretében, nem-negatív értékű, korlátos, adatátviteli sebességet reprezentáló valószínűségi változókkal foglalkozik. A véletlen események becslését célzó, kevés-paraméteres közelítési technikák pusztán a reprezentáns valószínűségi változók várható értékével és maximum értékével operálnak, csak ezek ismeretét tételezik fel. Jelen kutatás során, további megszorítást jelent, hogy az egyes forgalmi folyamatok külön-külön vett várható értékeit sem ismerjük, pusztán az aggregát várható érték ismeretét használjuk ki. Célszerűnek mutatkozik a valószínűségi változók momentum-generáló függvényének felső becslési technikáival elkülönülten is foglalkozni. E területen belül, az így nyert eredmények sikeresen használhatók fel a Csernov-alapú átvitel-minőségi mutatók approximációja során.

Az első téziscsoport tehát nem-negatív valós értékű és korlátos valószínűségi változók összegének momentum generáló függvénye (MGF) konzervatív becslési technikáival ill. azok legfontosabb tulajdonságaival foglalkozik. A valószínűségi változókról feltételezzük, hogy függetlenek, ugyanakkor azonban nem szükséges, hogy azonosak legyenek. A legtöbb e témával foglalkozó publikáció (pl. Hoeffding a témában alapműnek számító publikációja [13]) valószínűségi változók összegének vizsgálatakor eredményeiben feltételezi nemcsak a várható érték, de a szórás ismeretét is. A bemutatott becslések közül néhány optimálisnak bizonyul, leginkább azok, melyek esetében a változók azonos eloszlásúak és függetlenek. Sok kapcsolódó eredmény javítását tartalmazza Talagrand cikke [24], ahol a Hoeffding eredményeket nagylejtésű típusú eredményekkel [27] kombinálja. Az úgynevezett "hiányzó faktor" Talagrand művében egy olyan értékre utal, mely függ egyben a szórástól is. A későbbiekben, a témában számos hasonló eredmény született még (lásd pl. [19], [12]), melyek többnyire elsősorban pusztán matematikai érvényűek, és általában a farok-eloszlást vizsgálja adott feltételek mellett. Kommunikációs hálózatokkal foglalkozó kutatók, érdemben először a 90-es évek elején kezdtek foglalkozni a témával, leginkább az ATM (Asynchronous Transfer Mode) technológia bevezetése kapcsán. Számos kapcsolódó kutatás célja [4] [9] olyan kevésparaméteres forgalomjellemező technikák kidolgozása,

melyben a szórás ismeretét kiküszöbölik. A legtöbb ilyen eredmény ugyanakkor csak azonos csúcsertékű folyamatok esetére érvényes, az inhomogén, azaz különböző csúcsertékű esetet csak indirekt módon kezeli, mely végül igen pontatlan becsléseket eredményez. Turányi és szerzőtársai kutatási munkájukban [25] olyan hívásfogadási algoritmusokat mutatnak be, melyek az ekvivalens kapacitás koncepcióján alapulnak, és már a különböző csúcsertékű esetre is direkt megoldást szolgáltatnak.

Az ebben az alfejezetben bemutatott MGF közelítési technikák heterogén valószínűségi változók (véges) összegére vonatkoznak. A változókat független, nem-negatív, valós értékűnek és korlátosnak feltételezem. A bemutatott konzervatív becslések legfontosabb tulajdonsága, hogy a felhasznált információ kizárólag a változók száma, egyenkénti maximum értéke, valamint az összegük aggregát várható értéke. A bemutatott eredményeket számos nemzetközi fórumon publikáltam, melyek közül reprezentatív értékűek [J6] és [C17].

Jelentsen X_1, X_2, \dots, X_n n számú független valószínűségi változót, ahol $0 \leq X_i \leq p_i$, és jelölje $X \doteq \sum_{i=1}^n X_i$, $M \doteq E[X]$ (azaz p_i a változók csúcsertéke, és M az aggregát várható érték).

Jelentse továbbá $G_X(s) = E[e^{sX}]$, $s > 0$ az X valószínűségi változók momentum generáló függvényét.

Tézis 1. [J6] [C17] *Két felső becslési technikát dolgoztam ki, nem-negatív, valós értékű korlátos valószínűségi változók (véges) összegének momentum generáló függvényére, ill. megvizsgáltam azok legfontosabb tulajdonságait, valamint feltételeket adtam azok optimális viselkedésére vonatkozólag is. Megmutattam, hogyan alkalmazhatók ezen eredmények minőségbiztosított hálózatok átvitel-minőségi mutatóinak becslésére a tároló-mentes forgalom-átviteli modellezés keretein belül.*

4.1.1 Felső becslési technikák valószínűségi változók összegének momentum-generáló függvényére

Tézis 1.1. [J6] [C17] *Az alábbi egyenlőtlenségeket fogalmaztam meg nem-negatív és független valószínűségi változók momentum-generáló függvényének felső becslésére:*

$$G_{X(s)} \leq G_{X,ih}(s) = \prod_{i=1}^n \frac{e^{sp_i} - 1}{p_i} \left(M + \sum_{k=1}^n \frac{p_k}{e^{sp_k} - 1} \right)^n \quad (1)$$

és

$$G_{X(s)} \leq G_{X,so}(s) = \left(1 - \frac{M}{n_y p} + \frac{M}{n_y p} e^{sp} \right)^{n_y}, \quad (2)$$

ahol $p = \max_i \{p_i\}$ és $n_y = \lceil \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{p} \rceil$.

Az (1) és (2) egyenlőtlenségek jelentősége abban áll, hogy a felhasznált információ mindkét esetben csupán az egyes változók száma, csúcserőke valamint az aggregát várható érték. További számottevő előnyük, hogy a formulák különböző csúcserőkek esetén is alkalmazhatók. A formulák optimalitására vonatkozólag az 1.3 Tézis fogalmaz meg feltételeket. Az eredmények alkalmazhatók ugyanakkor arra az általános esetre is ha $a_i \leq X_i \leq b_i$ és $p_i = b_i - a_i$.

4.1.2 Az MGF felső becslések fontos tulajdonságai

A valószínűségi változók momentum-generáló függvénye rendelkezik néhány olyan tulajdonsággal, mely fontosnak bizonyul, hogy a közelítései esetében is igaz maradjon. Ha ugyanis ezen tulajdonságok nem öröklődnek, a becslések használata a legtöbb valós esetben ésszerűtlenné, nehezen felhasználhatóvá válik. A jelenlegi kutatások keretében ezen tulajdonságok, az MGF 0 pont környezetében való viselkedésére vonatkoznak, nevezetesen:

$$G_X(s)|_{s=0} = 1 \quad (3)$$

továbbá

$$\frac{d}{ds}G_X(s)|_{s=0} = M. \quad (4)$$

Tézis 1.2. [J6] [C17] *Bebizonyítottam, az alábbi – (1) és (2) MGF közelítésekre vonatkozó – alapvető tulajdonságokat:*

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_{X,ih}(s)|_{s=0} = 1 \quad (5)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_{X,so}(s)|_{s=0} = 1 \quad (6)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{d}{ds}G_{X,ih}(s)|_{s=0} = M \quad (7)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{d}{ds}G_{X,so}(s)|_{s=0} = M \quad (8)$$

Bebizonyítottam továbbá (2)-re vonatkozólag, hogy:

$$G_{X,so}(s) = E[e^{sY^{\text{ON/OFF}}}], \quad (9)$$

ahol

$Y^{\text{ON/OFF}} = \sum_{i=1}^{n_y} Y_{i,\text{ON/OFF}}$, $Y_{i,\text{ON/OFF}}$ *homogén valószínűségi változók*

és

$P(Y_{i,\text{ON/OFF}} = 0) = 1 - \frac{M}{n_y p}$ és $P(Y_{i,\text{ON/OFF}} = p) = \frac{M}{n_y p}$ *így végül* $E[Y_{i,\text{ON/OFF}}] = \frac{M}{n_y}$.

A (9) formula adja az 1.3 Tézisben a (2) optimalitásával kapcsolatosan bemutatott eredmények alapját.

A becslések másodrendű tulajdonságainak vizsgálatára jelen kutatás keretein belül nincs szükség, hiszen a vizsgált eredmények a valószínűségi változóknak csak elsőrendű momentumait használják fel.

4.1.3 MGF korlátok analitikus vizsgálata

Legújabb – valószínűségi változók összegének felső becslésével foglalkozó – kutatások gyakran validálják eredményeiket azáltal, hogy összehasonlítják azokat néhány korábbról jól ismert eredménnyel, és megmutatják, hogy azokhoz képest az újak jobban viselkednek néhány speciális esetben (pl. néhány reprezentatív szimulációs beállítás esetén). Általános elsőbbségük azonban gyakran még korlátozott feltételek mellett sem bizonyított. Ezen gyakorlattal ellentétben, mind a $G_{X,ih}(s)$, mind a $G_{X,so}(s)$ esetében adható ilyen optimalitásra vonatkozó általános kritérium.

Tézis 1.3. [J6] [C17] *A $G_{X,ih}(s)$, nem-negatív, valós értékű, korlátos valószínűségi változók összegének MGF becslése optimális az s -ek egy S halmazán, ha a következő feltételek teljesülnek:*

1. *Minden ismert információ: n a valószínűségi változók száma, M az aggregát várható érték, ill. p_1, p_2, \dots, p_n a valószínűségi változók csúcserőve.*
2. *A következő egyenlőtlenség teljesül:*

$$0 \leq \frac{M - \sum_{k=1}^n \left(\frac{p_i}{e^{s p_i} - 1} - \frac{p_k}{e^{s p_k} - 1} \right)}{n} \leq p_i, \quad \forall i, s \in S. \quad (10)$$

A $G_{X,so}(s)$ optimális, feltéve, hogy – hasonlóan a $G_{X,ih}(s)$ esetéhez – csak n a valószínűségi változók száma, M az aggregát várható érték, ill. p_1, p_2, \dots, p_n a valószínűségi változók csúcserőve ismertek, továbbá, hogy a maximum értékek megegyeznek.

Megmutattam továbbá, hogy ha (10) nem teljesül, vagy a maximum értékek nem azonosak, $G_{X,ih}(s)$ és $G_{X,so}(s)$ akkor is jobb eredményt ad, mint $G_{X,hoe}(s)$ számos eloszlás és sok s esetében, ahol

$$G_{X,hoe}(s) = e^{sM} e^{\frac{s^2 \sum_{i=1}^n p_i^2}{8}}. \quad (11)$$

A (10) feltételt alaposabban megvizsgálva, látható, hogy az tulajdonképpen a p_i maximum értékek valamifajta diverzitására vonatkozó korlátot szab meg, egy az egyenként vett várható értékek által felállított korlát közé szorítja a maximum

értékeket (könnyen látható, hogy az egyenlőtlenség nyilvánvalóvá válik ha a maximum értékek megegyeznek). Másrészt, az eredmények s -nek az MGF független változójának is függvényei. Amint az a következő téziscsoportban forgalom-átvitel jellemzési célok kapcsán látható lesz, az ott használt formulák (melyek az MGF becsléseit is tartalmazzák) s szerinti optimalizálást igényelnek, mely jellemzi az s tipikus működési tartományát. Jelen kutatást érintő gyakorlati alkalmazásokban, az (10) feltétel által meghatározott S halmaz, kiterjedt szimulációs eredmények alapján, többnyire magában foglalja a keresett s^* működési pontot (számos szélsőséges esetben, egyéb egyszerűsítő feltételezésekkel is élni lehet, mely esetekben a formulák végül elfogadható eredményeket szolgáltatnak).

Megjegyzendő, hogy a $G_{X,\text{hoe}}(s)$ MGF becslő, az egyik – független valószínűségi változók összegével kapcsolatos kutatások alapjául szolgáló – híres Hoeffding formula [13] levezetésében alapvető szerepet játszik. Ez a tény is hangsúlyozza a jelen tézis-füzetben közölt eredmények jelentőségét.

4.2 Telítési valószínűségekre és csomagvesztési arányra vonatkozó konzervatív becslési technikák

Távközlési alkalmazásokban, a tároló-mentes folyadék-alapú multiplexelési modell, melyet olyan esetekben alkalmazunk, amikor az adatfolyamok átvitele során a tárolás minimális, pl. a késleltetés alacsonyan tartása érdekében, egy link forgalmának aggregát (adat)átviteli sebessége az egyes különálló folyamok pillanatnyi sebességének összegével adható meg. Ezen keretrendszerben, stacionárius rendszert feltételezve, a különálló folyamok sebessége nem-negatív, valós értékű (jelen kutatás keretei között független) valószínűségi változók segítségével modellezhető.

Valós távközlési alkalmazásokkal kapcsolatos kutatások legtöbbször igen erős megszorításokkal élnek a hálózat állapotáról vagy a hálózati forgalomról ismertnek feltételezett információk kapcsán. Számos kutatás esetében [23], [1] még a rendszer stacionaritásának feltételezését is elvetik. A forgalom-átvitel jellemzési kutatások kapcsán sztochasztikus modellezési megfontolások gyakran csak a várható érték ill. a szórás ismeretét követelik meg az egyes folyamok adott valószínűségi jellemzői kapcsán. A vizsgálatok egy jelentős része a folyamok pillanatnyi sebességének várható értékével operál. Számos kutatás, pl. mérés-alapú hívásengedélyezési eljárások vizsgálata [21] még ennél is tovább megy, és csak folyamok aggregát várható értékének ismeretét tételezi fel. Ilyen körülmények között a Hoeffding formulák alkalmazása természetesen adódik. F.P. Kelly számos munkájában [17] [16] használja ezeket az eredményeket távközlési hálózatokban alkalmazható díjazási eljárások kidolgozására. Sok más kutatóval egyetemben S. Floyd, Jamin et al., Bricchet et al., Gibbens et al. alkalmazzák a Hoeffding formulákat mérés-alapú hívásengedélyezési algoritmusok konstrukciójára [8] [15] [2] [4] [10] főként tároló-mentes multiplexelési modellezési megfontolások mellett, egyszerű forgalomjellemezést használva. Ezekben a munkákban a hívásélfogadási algoritmus a link-telítési (szaturációs) valószínűséget mint átvitelminőség jellemzőt használja fel a döntések meghozatalára, de néhány esetben a csomagvesztési arány használata is javasolt [18].

A következő téziscsoportban konzervatív felső becslési és közelítési technikákat javasolok a telítési valószínűség (P_{sat}) ill. a munkamennyiség (csomag) veszteségi arány (WLR) számításához, tároló-mentes rendszermodellt használva.

A levezetett formulák a Csernov felső-korlátozási technikán alapulnak [5]. A téziscsoportban közölt eredmények számos idegen-nyelvű nemzetközi fórumon (folyóirat ill. konferencia) került publikálásra, melyek közül a legfontosabbak: [J5], [C9] és [C10].

Az eredmények levezetése során az alábbi két formula használta alapvető szerepet játszott:

$$P_{\text{sat}} \leq e^{\inf_{s>0} \Lambda_X(s) - sC} \quad (12)$$

és

$$WLR \leq \frac{1}{s^* M} e^{\inf_{s>0} \Lambda_X(s^*) - s^* C},$$

ahol $s^* = \operatorname{arginf}_s \Lambda_X(s) - sC$.

A téziscsoport első tézisében, az első téziscsoportban bemutatott MGF korlátozási technikákat közvetlenül alkalmaztam, melynek eredményeképp az ott bemutatott optimalitási tulajdonságok, ezen téziscsoport esetében is alkalmazhatók (a Csernov korlátok halmazán). A 2.2 ill. 2.3 Tézisben, ugyanakkor a levezetéskor alkalmazott egyszerűsítő feltételezések alkalmazása okán, az eredmények validálása már csak numerikus ill. szimulációs technikák segítségével oldható meg. A ezen tézisek eredményei összehasonlító elemzésének célja, a széles körben alkalmazott Hoeffding formulákkal való viszony megállapítása.

Tézis 2. [J5] [C9] [C10] Újszerű felső becslési és közelítési technikákat adtam meg két fontos forgalom-átvitel minőségi mutató, a telítési (szaturációs) valószínűség valamint a munkamennyiség (csomag) veszteségi arány számításához. A javasolt formulák számításához szükséges processzálási kapacitás csökkentése érdekében, praktikusán használható zárt formulában megfogalmazható alternatívákat adtam a javasolt formulák helyettesítésére.

4.2.1 Konzervatív P_{sat} és WLR becslések

Tézis 2.1. [J5] [C9] Kevés paramétert használó, telítési valószínűségre (P_{sat}) vonatkozó felső becsléseket adtam a következő formában:

$$P(X > C) \leq e^{-s^* C} \left(\frac{M + \sum_{j=1}^n \frac{p_j}{e^{s^* p_j} - 1}}{n} \right)^n \prod_{k=1}^n \frac{e^{s^* p_k} - 1}{p_k}, \quad (13)$$

ahol s^* a következő egyenlet megoldásával kapható:

$$\sum_{k=1}^n \frac{e^{s p_k} p_k}{e^{s p_k} - 1} - \frac{n \sum_{j=1}^n \frac{e^{s p_j} p_j^2}{(e^{s p_j} - 1)^2}}{M + \sum_{j=1}^n \frac{p_j}{e^{s p_j} - 1}} - C = 0, \quad (14)$$

valamint

$$P(X > C) \leq \left(\frac{M - n_Y p}{C - n_Y p} \right)^{n_Y - \frac{C}{p}} \left(\frac{M}{C} \right)^{\frac{C}{p}}, \quad (15)$$

ahol $p = \max(p_i, i = 1, \dots, n)$, $n_Y = \lceil \sum_{i=1}^n p_i / p \rceil$.

Kevés paramétert használó, munkamennyiség arányra (WLR) vonatkozó felső becsléseket adtam a következő formában:

$$WLR \leq \frac{1}{s^* M} e^{\hat{\Lambda}_{X,ih}(s^*) - s^* C}, \quad (16)$$

ahol $s^* = \operatorname{arginf}_s \Lambda_{X,ih}(s) - sC$ és $\hat{\Lambda}_{X,ih}(s) = \log G_{X,ih}(s)$,

$$WLR \leq \frac{1}{s^* M} e^{\hat{\Lambda}_{X,so}(s^*) - s^* C}, \quad (17)$$

ahol $s^* = \operatorname{arginf}_s \Lambda_{X,so}(s) - sC$ és $\hat{\Lambda}_{X,so}(s) = \log G_{X,so}(s)$,

$$WLR \leq \frac{1}{s_{hoe}^* M} e^{\hat{\Lambda}_{X,hoe}(s_{hoe}^*) - s_{hoe}^* C}, \quad (18)$$

ahol $s^* = \operatorname{arginf}_s \Lambda_{X,hoe}(s) - sC$ és $\hat{\Lambda}_{X,hoe}(s) = \log G_{X,hoe}(s)$.

Megmutattam, hogy a fent közölt telítési (szaturációs) valószínűség formulák öröklik a levezetéskor felhasznált megfelelő MGF becslési technikák előző téziscsoportban megmutatott optimalitási tulajdonságait. Ez annyit jelent tehát, hogy a közölt Csernov-típusú közelítések a legjobbak, amik adhatók, ha az első téziscsoportban megfogalmazott feltételek teljesülnek.

Könnyen látható, hogy a P_{sat} és az annak megfelelő WLR korlátok (13) és (16) esetében az optimális s , csak olyan implicit egyenletek megoldásával határozhatók meg, melyek s -et nem-algebrai formában tartalmazzák. Ezen hátrány igen sajnálatos, hiszen, amint azt az analitikus és szimulációs vizsgálatok mutatják, (13) számottevően pontosabb eredményeket szolgáltat, mint korábbi eredmények (amelyek pl. csak azonos csúcértékű folyamatok esetén alkalmazhatók direkt módon), olyan esetekben, amikor az aggregát forgalom igen heterogén jellemzőkkel rendelkező folyamatokból tevődik össze. A 2.2 tézisben, módosított, tovább közelített (tehát a korábban említett értelemben nem optimális, mégis sok esetben kellően pontos) zárt formában megadható formulákat javaslom, a fent említett probléma kiküszöbölésére, mely a valós időben történő számítás lehetőségét hivatott elősegíteni.

4.2.2 Valós időben számítható és zárt formában megadható konzervatív

P_{sat} és WLR becslések

A 2.1 Tézisben javasolt (13) és (16) felső becslések implicit formulákban megadott, valós idejű kiértékelésre kevésbé alkalmas eredmények, melyek számítása többnyire csak numerikus algoritmusok segítségével lehetséges. Valós alkalmazások, ugyanakkor, sok esetben, valós időben kezelhető formulák alkalmazását igénylik, számításigényes eljárások alkalmazása számottevő nehézségekbe ütközik. A következő tézis erre a problémára nyújt megoldást:

Tézis 2.2. [J5] [C9] *Újszerű, valós időben számítható, zárt formában megadható konzervatív felső becsléseket adtam a telítési (szaturációs) valószínűségre:*

$$P(X > C) \leq \left(\frac{1}{n} \left(M + \sum_{j=1}^n \frac{p_j}{e^{\frac{C-M}{K} p_j} - 1} \right) \right)^n e^{-\frac{(C-M)C}{K}} \prod_{k=1}^n \frac{e^{\frac{C-M}{K} p_k} - 1}{p_k}, \quad (19)$$

ahol

$$K = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^n p_k^2 - \frac{1}{n} \left(M - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n p_k \right)^2$$

és

$$P(X > C) \leq e^{-C \sqrt{\frac{n}{P_2}} \log \frac{C(P-M)}{M(P-C)}} \left(\frac{M + \sum_{j=1}^n \frac{1}{L_j}}{n} \right)^n \prod_{k=1}^n L_k, \quad (20)$$

ahol

$$L_j = \frac{1}{p_k} \left(\left(\frac{C(M-P)}{M(C-P)} \right)^{p_k \sqrt{\frac{n}{P_2}}} - 1 \right), \quad P = \sum_{k=1}^n p_k, \quad \text{valamint} \quad P_2 = \sum_{k=1}^n p_k^2$$

valamint a munkamennyiség (csomag) veszteségi arányra (WLR):

$$WLR \leq \frac{1}{\tilde{s}^* M} e^{\hat{\Lambda}_{X,ih}(\tilde{s}^*) - \tilde{s}^* C}, \quad (21)$$

ahol \tilde{s}^* a következő két lehetőség valamelyike:

$$\begin{aligned} \tilde{s}_1^* &= \frac{C - M}{\frac{1}{4} \sum_{k=1}^n p_k^2 - \frac{1}{n} \left(M - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n p_k \right)^2} \\ \tilde{s}_2^* &= \sqrt{\frac{n}{\sum_{k=1}^n p_k^2}} \log \frac{C (\sum_{k=1}^n p_k - M)}{M (\sum_{k=1}^n p_k - C)} \end{aligned}$$

Megmutattam, hogy (10-20 forgalmi folyamat tartalmazó) átlagos multiplexálási nyereséget felmutató, (MPEG2 ill. MPEG4 tömörített) videó és hang forgalmi folyamatot tartalmazó aggregátumok esetében, a fenti formulák alkalmazása a szükséges erőforrások megbecslésére, akár 40%-os javulást is eredményezhet a korábban alkalmazott technikákkal (többnyire a $G_{X,hoe}(s)$ közelítésből származó formulák felhasználásával) elérhető eredményekhez viszonyítva.

Érdemes megjegyezni, hogy mindkét a tézisben közölt P_{sat} korlát a (13) formulából való közelítésből származik, addicionális felső korlátozási lépések alkalmazásával. Szintén érdemes megjegyezni, hogy a (20) konzervatív becslés a (13) becsléshez hasonlóan

szintén rendelkezik azzal az optimalitási tulajdonsággal, hogy a legjobb Csernov-típusú közelítés, ami adható, akkor, ha a forgalom homogén, azaz az egyes folyamatok csúcserőforrása megegyezik. Ezen tulajdonság rendkívül hasznos, mivel egy homogénhez közeli forgalmi szituáció esetén, zárt formában megadható jellege mellett, jobb eredményeket ad, egyes csak implicit alakban megadható formulák eredményeivel szemben is.

4.2.3 Telítési (szaturációs) valószínűségre és munkamennyiség (csomag) veszteségi arányra vonatkozó közelítő formulák

Előre definiált minőségi garanciák nyújtása többnyire felső becslések alkalmazásával lehetséges. Ezen esetekben a becsült átvitel-minőségi mutatók a vállalt szolgáltatás szigorú feltételek közötti biztosításához szükségesek. Ilyen eset pl. ha áramkörkapcsolt jellegű szolgáltatást nyújtunk egy folyamat számára. Gyakran ugyanakkor (pl. ún. kvázi-valós idejű folyamatok esetén) általános közelítések alkalmazása is elfogadható. Ezen esetekben a multiplexálási nyereség jelentősen növekszik, mivel a közelítési hiba sokkal kisebb lehet, jobb erőforrás kihasználást eredményezve ezáltal. A következő tézisben a Bahadur-Rao javító eljárás segítségével ilyen kevés forgalmi paraméter ismeretét igénylő közelítő formulákat adok meg a telítési valószínűségre és a munkamennyiség (csomag) veszteségi arányra vonatkozólag.

Tézés 2.3. [C10] *Hatékony, kevés forgalmi paraméter ismeretét igénylő eljárást dolgoztam ki telítési (szaturációs) valószínűség közelítésére:*

$$P_{sat} \approx e^{-I - \frac{1}{2} \log 4\pi I}, \quad (22)$$

ahol

$$I = - \inf_s \Lambda_X(s) - sC \quad (23)$$

valamint a a munkamennyiség (csomag) veszteségi arányra vonatkozólag:

$$WLR \approx e^{-I - \frac{1}{2} \log 4\pi I - \log s^* M}, \quad (24)$$

ahol

$$s^* = \operatorname{arginf}_s \Lambda_X(s) - sC. \quad (25)$$

Numerikus és szimulációs vizsgálatok is azt mutatják, hogy a fenti tézisben közölt becslések, nagyon gyakran konzervatív felső korlátnak bizonyulnak, azonban ezen tulajdonság létezése általános esetben nyilván nem garantált

4.3 Ekvivalens sáv szélesség közelítő eljárások és azok kapcsolata telítési valószínűség és csomagvesztési arány becslőkkel

Kommunikációs hálózati forgalom egyszerű jellemzésére szolgáló módszer, az un. ekvivalens kapacitás érték meghatározása. Ez az a sáv szélesség mennyiség, amely alkalmazásakor ismert hálózati forgalom mellett, az átvitel-minőségi jellemzők, pl. a link-telítési valószínűség vagy a csomagvesztési valószínűség adott értéken tarthatók. Ilyen értelemben létezik tehát ekvivalens sáv szélesség, mely a telítési valószínűséghez tartozik ($C_{\text{equ,sat}}$) ill. van olyan, ami a csomagvesztéshez ($C_{\text{equ,wlr}}$). Újabb, minőség-biztosítási garanciát nyújtó hálózatokkal kapcsolatos kutatások igen gyakori célja $C_{\text{equ,sat}}$ ill. $C_{\text{equ,wlr}}$ becslő eljárások kidolgozása, különböző forgalmi paraméter halmazok ismerete mellett. Turányi et al [25] olyan hívás engedélyezési algoritmusokat javasol, melyek a szaturációs valószínűség alapján határozzák meg kevés-paraméterrel definiált forgalom ekvivalens kapacitását. Közismert tudományos munkájában [17] F. P. Kelly egy ekvivalens sáv szélességhez hasonló paraméterezhető eljárást elemez, melyre a kutatói közösség általában az effektív sáv szélesség néven hivatkozik.

Az ekvivalens sáv szélesség direkt használatával operáló eljárásoknak számos előnye van. Sok távközlési alkalmazás esetén, alapvető, hogy a forgalom menedzsment döntések valós időben történjenek meg, akár szuboptimális erőforrás-kihasználást eredményező formulák használata árán is. Ilyen esetekben, jelentős idő takarítható meg azáltal, hogy az ekvivalens sáv szélességet explicit módon határozzuk meg, a hozzá tartozó pl. telítési valószínűség vagy csomagvesztési valószínűség helyett, annak ellenére, hogy ez utóbbiak gyakran sokkal pontosabban és gyorsabban számíthatók, zárt formulák alkalmazásával, míg az előbbi igen gyakran pl. csak numerikus optimalizálást tartalmazó eljárásokkal közelíthető kellő pontossággal. Az ekvivalens sáv szélesség számítására alkalmazott eljárások tehát gyakran számottevően nehezebbnek és pontatlanabbnak bizonyulnak, mint a kapcsolódó minőség-átviteli mutatók meghatározása, ugyanakkor Seres et al. [22] megmutatja, hogy ez az addicionális idő általában átkerül nem kritikus időszakokba. A jobb érthetőség kedvéért, tekintsünk egy mérésalapú hívásengedélyezéssel kapcsolatos példát. A feladat döntést hozni egy újonnan érkező folyam beengedéséről vagy elutasításáról, attól függően, hogy a jelenlegi link forgalom adott átvitelminőséghez kötött ekvivalens sáv szélességének és az újonnan érkező folyam csúcs adatátvitel sebesség értékének összege meghaladja-e a link kapacitását vagy nem. Könnyű látni, hogy a döntés egy művelet (ti. összeadás) és egy összehasonlítás elvégzésével meghozható, ha a jelenlegi link forgalom ekvivalens sáv szélesség értéke rendelkezésre áll, mely – akár numerikus optimalizálást is tartalmazó – számítására bármikor a hívás beérkezése előtt idő van. Ugyanakkor ha a szabály explicite pl. a csomagvesztés vagy a szaturációs valószínűség

szinten tartására van megadva, a kiértékelés csak akkor végezhető el ha már az új forgalmi hívás beérkezett.

A következő téziscsoportban, kevés forgalmi paraméter ismeretét igénylő ekvivalens kapacitást becslő formulák kidolgozásával foglalkozom. Megvizsgálom továbbá azok kapcsolatát az előző téziscsoportban megadott telítési valószínűség (P_{sat}) ill. csomagvesztési arány (WLR) konzervatív becslésére ill. közelítésére vonatkozó formulákkal. Egyes javasolt eljárások alkalmazása esetében további teljesítmény javulást érhetünk el numerikus számítási algoritmusok alkalmazásával. E célból újszerű rekurzív fix-pont típusú egyenletek kerülnek ismertetésre. Az eredmények több rangos idegen nyelvű nemzetközi fórumon is publikálásra kerültek, melyek közül a legfontosabbak [J2],[J5] és [C13].

A vizsgált ekvivalens kapacitás mutatók a következő két definíción alapulnak:

$$C_{\text{equ,sat}} \stackrel{\text{def}}{=} \inf\{C : P_{\text{sat}} \leq e^{-\gamma}\}, \quad (26)$$

$$C_{\text{equ,wlr}} \stackrel{\text{def}}{=} \inf\{C : WLR \leq e^{-\gamma}\}. \quad (27)$$

Tézis 3. [J2] [J5] [C13] *Az ekvivalens kapacitás kapcsán*

- *ekvivalencia-relációk segítségével összefüggést teremtettem a telítési valószínűséget ill. csomagvesztési arányt becslő eljárások ill. az ekvivalens kapacitás számítása között,*
- *felső becsléseket ill. közelítéseket vezettem le különböző javasolt eljárások alkalmazásával ekvivalens kapacitás számításához,*
- *fix-pont típusú egyenleteket javasoltam csak numerikusan kiértékelhető ekvivalens kapacitás ill. telítési valószínűség becslő formulák számításához.*

4.3.1 Kapcsolat az ekvivalens sávszélesség ill. a (link)telítési valószínűség és a csomagvesztési arány becslő formulák között

Legyenek

$$C_{\text{equ,sat}}^{CH} \stackrel{\text{def}}{=} \inf\{C : \inf_{s>0} \exp(\Lambda_X(s) - sC) \leq e^{-\gamma}\}, \quad (28)$$

$$C_{\text{equ,wlr}}^{CH} \stackrel{\text{def}}{=} \inf\{C : \inf_{s>0} \exp(\Lambda_X(s) - sC - \log sM) \leq e^{-\gamma}\}, \quad (29)$$

ahol $\Lambda_X(s)$ az X kumuláns generáló függvénye (CGF), az ekvivalens kapacitás számításához használt definíciók adott telítési valószínűség és csomagvesztési arány mellett (a jelölések értelmezéséhez ld. a 2. Téziscsoportot tartalmazó alfejezetet). Jelölje

továbbá $\widehat{C}_{\text{equ,sat}}^{\text{CH}}$ és $\widehat{C}_{\text{equ,wlr}}^{\text{CH}}$ a fent definiált $C_{\text{equ,sat}}^{\text{CH}}$ valamint $C_{\text{equ,wlr}}^{\text{CH}}$ ekvivalens kapacitások felső becsléseit, melyeket az alábbi módon definiálunk:

$$\widehat{C}_{\text{equ,sat}}^{\text{CH}} \stackrel{\text{def}}{=} \inf\{C : \inf_{s>0} \exp(\widehat{\Lambda}_X(s) - sC) \leq e^{-\gamma}\}, \quad (30)$$

$$\widehat{C}_{\text{equ,wlr}}^{\text{CH}} \stackrel{\text{def}}{=} \inf\{C : \inf_{s>0} \exp(\widehat{\Lambda}_X(s) - sC - \log sM) \leq e^{-\gamma}\}, \quad (31)$$

ahol $\widehat{\Lambda}_X(s)$ az X CGF-ének tetszőleges felső korlátja.

Tézis 3.1. [J5] [C13] *Eljárást adtam telítési valószínűséghez ill. csomagvesztési arányhoz tartozó ekvivalens kapacitás felső becslésére az alábbi állítások bizonyításának alapján:*

$$\inf_s \Lambda_X(s) - sC < -\gamma_{\text{sat}} \Leftrightarrow \inf_s \frac{\Lambda_X(s) + \gamma_{\text{sat}}}{s} < C, \quad (32)$$

$$\inf_s \Lambda_X(s) - sC = -\gamma_{\text{sat}} \Leftrightarrow \inf_s \frac{\Lambda_X(s) + \gamma_{\text{sat}}}{s} = C, \quad (33)$$

$$\inf_s \Lambda_X(s) - sC - \log sM < -\gamma_{\text{loss}} \Leftrightarrow \inf_s \frac{\Lambda_X(s) + \gamma_{\text{loss}} - \log sM}{s} < C, \quad (34)$$

$$\inf_s \Lambda_X(s) - sC - \log sM = -\gamma_{\text{loss}} \Leftrightarrow \inf_s \frac{\Lambda_X(s) + \gamma_{\text{loss}} - \log sM}{s} = C, \quad (35)$$

ahol $\Lambda_X(s)$ az X CGF-ének tetszőleges, s szerint monoton, felső korlátja.

Következmény:

$$\widehat{C}_{\text{equ,sat}}^{\text{CH}} = \inf_s \frac{\tilde{\Lambda}_X(s) + \gamma_{\text{sat}}}{s} \quad (36)$$

valamint

$$\widehat{C}_{\text{equ,wlr}}^{\text{CH}} = \inf_s \frac{\Lambda_X(s) + \gamma_{\text{loss}} - \log sM}{s} \quad (37)$$

A tézis közvetlen következménye, pl. a téziscsoport bevezetésében felvázolt telítési valószínűség (P_{sat}) vagy csomagvesztési arány (WLR) alapú, vagy alternatív módon $C_{\text{equ,sat}}$ ill. $C_{\text{equ,wlr}}$ mutatókra vonatkozó hívás-elfogadási algoritmus esetében, hogy az ebben a tézisben bemutatott algoritmusok alapján a két típusú feltétel ekvivalens, az eltérő optimalizációs feladat ellenére is. Ugyanakkor fontos hozzátenni, hogy az

ekvivalencia csak az optimális s paraméter esetén igaz. Mivel a gyakorlatban sokszor szuboptimális (cserébe viszont zárt formában megadható) formulák alapján történik a döntés, a két eljárás alapján kivitelezett híváselfogadás jelentősen különböző eredményeket adhat.

Szintén fontos megjegyezni, hogy a fent felvázolt tézis eredményei nem függenek a $\Lambda_X(s)$ függvény becslési eljárásától. Az egyetlen szükséges feltétel, az ekvivalens kapacitás és a telítési valószínűség vagy csomagvesztési arány között fennálló monoton csökkenő kapcsolat. Előfordulhat, hogy a Csernov korlátra vonatkozó bizonyos (pl. az egyszerű átláthatóságot célzó) becslési lépések után az adódó felső korlát [C27], [7] esetében ez a tulajdonság eltűnik.

4.3.2 Hatékony telítési valószínűségre ill. csomagvesztési arányra vonatkozó ekvivalens kapacitás formulák

A 3.1 Tézis eredményei alapján lehetővé válik az ekvivalens kapacitás explicit formulák alapján történő becslése az alábbi módokon:

$$\widehat{C}_{\text{equ,sat}}^{\text{CH}} = \inf_s \frac{\widehat{\Lambda}_X(s) + \gamma_{\text{sat}}}{s} \quad (38)$$

ill.

$$\widehat{C}_{\text{equ,wlr}}^{\text{CH}} = \inf_s \frac{\widehat{\Lambda}_X(s) + \gamma_{\text{loss}} - \log sM}{s}. \quad (39)$$

A fenti formulákat felhasználva kevés paraméteres konzervatív felső becsléseket ill. közelítéseket vezettem le az ekvivalens kapacitás számításához, melyeket a következő tézis foglal össze:

Tézis 3.2. [J2] [C13] *Levezettem az ekvivalens kapacitásra vonatkozó alábbi két felső becslést:*

- *adott telítési valószínűség mellett:*

$$\widehat{C}_{\text{equ,sat}} = \inf_{s>0} \frac{\widehat{\Lambda}_X(s) + \gamma_{\text{sat}}}{s}. \quad (40)$$

- *adott csomagvesztési arány mellett:*

$$\widehat{C}_{\text{equ,wlr}} = \inf_{s>0} \frac{\widehat{\Lambda}_X(s) + \gamma_{\text{loss}} - \log sM}{s}, \quad (41)$$

ahol $\widehat{\Lambda}_X(s)$ az alábbi két lehetőség valamelyike: $\widehat{\Lambda}_{X,ih}(s) = \log G_{X,ih}(s)$ vagy $\widehat{\Lambda}_{X,so}(s) = \log G_{X,so}(s)$,

és két közelítési eljárást:

- adott telítési valószínűség mellett:

$$\tilde{C}_{equ,sat} \approx \inf_{s>0} \left\{ \frac{\widehat{\Lambda}_X(s)}{s} + \frac{\gamma}{s} - \frac{\gamma \log 4\pi\gamma}{s(1+2\gamma)} \right\} \stackrel{\text{def}}{=} \tilde{C}_{equ,sat}^{\text{B-R}}, \quad (42)$$

- adott csomagvesztési arány mellett:

$$\tilde{C}_{equ,wlr} \approx \inf_{s>0} \left\{ \frac{\widehat{\Lambda}_X(s) + \gamma - 1 + \log M + \frac{2\gamma}{1+2\gamma} \log \frac{1+2\gamma}{4M\sqrt{\pi\gamma^{\frac{3}{2}}}}}{-\frac{1}{M} + s} \right\} \stackrel{\text{def}}{=} \tilde{C}_{equ,wlr}^{\text{B-R}}, \quad (43)$$

ahol $\widehat{\Lambda}_X(s)$ a $\Lambda_X(s)$ tetszőleges felső korlátja, pl. $\widehat{\Lambda}_{X,ih}(s)$ vagy $\widehat{\Lambda}_{X,so}(s)$.

Fontos megjegyezni, hogy a fenti tézis eredményei (néhány egyszerűbb megszorítástól eltekintve) nem rögzítik az alkalmazott CFG becslési eljárást, az itt javasolttól eltérő, esetleg valamilyen szempont alapján jobb tulajdonságúak, is felhasználhatók.

4.3.3 Hatékony fix-pont típusú algoritmusok ekvivalens kapacitás gyors számításához

A korábbi tézisekben javasolt technikák, sok esetben tartalmaznak olyan, telítési valószínűség, csomagvesztési arány vagy ekvivalens kapacitás becslésére alkalmas formulákat, melyek implicit módon adóttak, vagy valamilyen optimalizációs feladatot tartalmaznak. Néhány esetben ez a kiértékelését jelentősen megnehezítő tulajdonság könnyen, számottevő hatékonyság veszteség nem okozó egyszerűsítéssel kiküszöbölhető. Gyakran ugyanakkor ez, az eredmények számottevő – ésszerű – romlása nélkül, nem kivitelezhető. Ez a helyzet az előző 3.2 Tézisben adott ekvivalens kapacitást becslő formulák esetén. Ezen esetekben a formulák hatékony, zárt formában való megadására vonatkozó törekvések sikertelennek bizonyultak. A formulák kiértékeléséhez jelentős processzálási kapacitást igénylő eljárásokra van szükség, mely valós-idejű rendszerek esetében igen gyakran okoz – sokszor feloldhatatlan jellegű – problémát.

A probléma enyhítésére fix-pontos típusú algoritmusok alkalmazását javasoltam, melyek legfontosabb előnye, hogy általában igen gyorsan konvergálnak, és adnak kellő pontosságú eredményt. További szempont volt, hogy a javasolt közelítések jellegénél

fogva, a formulák második deriváltjainak alkalmazása ésszerűtlen mértékű pontatlanságot eredményezett volna a számítások kapcsán. A fix-pont jellegű optimalizáló algoritmusok ennek kapcsán is megfelelőnek bizonyultak.

Tézis 3.3. *Rekurzív, fix-pont típusú egyenleteket adtam meg a közölt ekvivalens sávszélesség becslő formulák hatékony, gyors számításához:*

$$s_{n+1} = \sqrt{\frac{\gamma s_n^2}{-\Lambda(s_n) + s_n \frac{\partial_s \Lambda(s)}{\partial s} \Big|_{s=s_n}}} \quad (44)$$

$$s_{n+1} = \sqrt{\frac{\gamma}{\frac{\partial_s \alpha(s)}{\partial s} \Big|_{s=s_n}}}, \quad (45)$$

és a szaturációs valószínűségekre ($P_{sat} = e^{-\gamma}$) a (12) formában:

$$s_{n+1} = \frac{s_n^2 (C + \frac{\partial_s \Lambda(s)}{\partial s} \Big|_{s=s_n}) - 2s_n \Lambda(s_n)}{2s_n \frac{\partial_s \Lambda(s)}{\partial s} \Big|_{s=s_n} - 2\Lambda(s)} \quad (46)$$

valamint

$$s_{n+1} = \frac{C - \alpha(s_n) + s \frac{\partial_s \alpha(s)}{\partial s} \Big|_{s=s_n}}{2 \frac{\partial_s \alpha(s)}{\partial s} \Big|_{s=s_n}} \quad (47)$$

Megmutattam, hogy a javasolt eljárások sok, gyakorlatban előforduló forgalmi szituációban általában már kevés lépés után is (tipikusan 3-6) kellő pontosságú ($\epsilon = 10^{-6}$ relatív hibájú) eredményeket szolgáltatnak.

Érdemes megjegyezni, hogy a javasolt egyenletek X CGF-étől ($\Lambda(s)$) vagy effektív sávszélességétől ($\alpha(s)$) függenek, egyikük vagy másikuk alkalmazása attól is függhet, tudjuk-e valamelyiket közvetlenül is mérni.

5 Az eredmények alkalmazhatósága

Az első téziscsoportban javasolt momentum-generáló függvény becslő eljárásokkal kapcsolatos eredmények messze túlmutatnak távközlési alkalmazásokon, igen fontos következményeik lehetnek pl. a statisztikus mérnökségben. Az optimalitási feltételekkel támogatott becslések hatékony eszközök lehetnek minden olyan területen, ahol statisztikus jelenségek tulajdonságainak vizsgálata a cél, kevés rendelkezésre álló információ alapján. A javasolt két momentum-generáló felső becslés az alapja a 2. ill. 3. Téziscsoportban bemutatott telítési (szaturációs) ill. munkamennyiség (csomag) vesztési arány becslő formuláknak.

A javasolt formulák direkt módon felhasználhatók minőség-biztosított hálózatokban alkalmazható olyan forgalommenedzsment eljárások konstrukciójára, ahol a cél a link-telítési valószínűség vagy a csomagvesztési arány adott szinten (vagy alatt) tartása. Ilyen menedzsment algoritmusok fejlesztése a célja számos távközlési kutatásnak [14], [3], [8]. A valószínűségi változók összegének farok- valószínűségére vonatkozó eredményeket ugyanakkor a megbízhatóság elméletben ill. a biztosításmatematikában ill. azon belül a kockázat elemzésben és még számos egyéb területen is hasznosítják [6]. A tézisekben javasolt egyszerűsített, hatékonyan számítható formulák olyan valós-idejű rendszerekben alkalmazhatók, ahol az egyes műveletek elvégzésére vonatkozó időre igen szoros korlátok vonatkoznak.

A 3. Téziscsoportban bemutatott, zárt alakban megfogalmazható ekvivalens kapacitás becslő formulák célja kettős. Először is, sok forgalommenedzsment eljárásban, ahol a központi erőforrás a link kapacitás, ilyen jellegű formulák alkalmazása sokkal kényelmesebb és kiértékelésük jelentősen kevesebb számítási kapacitást igényel. Másodszor pedig, ezen formulák pontossága sokkal könnyebben összemérhető korábbi kutatásokból származó eredményekével [11], [26], [20]. A gyorsabb számíthatóság érdekében, azon formulák esetében, melyek csak numerikusan kezelhetőek, a 3. téziscsoport hatékony fix-pont típusú algoritmusokat ad meg, melyek alkalmazása forgalommenedzsment eljárásokban, valós-idejű környezetben nyilvánvaló.

A disszertációban bemutatott eredményeket számos, többnyire hazai kutatási ill. alkalmazott kutatási projekt hasznosította, pl. IKTA, NKFP, Jedlik Ányos Program. A legutolsó Internetes keresés 12, a kutatás során publikált cikkekre vonatkozó (idegen) hivatkozást mutatott ki, melyek közül 5 rangos idegennyelvű folyóiratokban, 7 pedig nemzetközi konferenciákon történt. A publikált cikkek, 2 esetben nyertek "legjobb cikk" (Best Paper Award) díjat.

Felhasznált irodalom

- [1] H. Alnowibet K., Perros, *Nonstationary analysis of circuit-switched communication networks*, Performance Evaluation Journal **63** (2006), 892–909.
- [2] L. Breslau, S. Jamin, and S. Shenker, *Comments on the performance of measurement-based admission control algorithms*, Proceedings of the Conference on Computer Communications (IEEE Infocom) (Tel Aviv, Israel), March 2000.
- [3] L. Breslau, E. Knightly, S. Shenker, I. Stoica, and H. Zhang, *Endpoint admission control: Architectural issues and performance*, ACM SIGCOMM Symposium on Communications Architectures and Protocols (Stockholm, Sweden), Aug./Sept. 2000.
- [4] F. Brichet and A. Simonian, *Conservative gaussian models applied to measurement-based admission control*, International Workshop on Quality of Service (IWQoS) (Napa, USA), May 1998.
- [5] H. Chernoff, *A measure of asymptotic efficiency of tests of a hypothesis based on the sum of observations*, Annals of Mathematical Statistics **23** (1952), 493–507.
- [6] L. Devroye, L. Györfi, and G. Lugosi (eds.), *A probabilistic theory of pattern recognition*, Applications of Mathematics, Springer-Verlag, 1996.
- [7] A. Faragó, *Blocking probability estimation for general traffic under incomplete information*, IEEE International Conference on Communications (New Orleans, LA), vol. 3, June 2000, pp. 1547–1551.
- [8] S. Floyd, *Comments on measurement-based admissions control for controlled-load services*, submitted to IEEE Computer Communication Review, July 1996.
- [9] R. J. Gibbens and P. J. Hunt, *Effective bandwidths for the multitype UAS channel*, Queueing Systems **9** (1991), 17–28.
- [10] R.J. Gibbens and F. P. Kelly, *Measurement-based connection admission control*, International Teletraffic Congress (ITC) (Washington, D.C.), June 1997, pp. 879–888.
- [11] R. Guérin, H. Ahmadi, and M. Naghshineh, *Equivalent capacity and its application to bandwidth allocation in high-speed networks*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications **9** (1991), no. 7, 968–981.
- [12] P. Hitczenko and Montgomery-Smith S., *Measuring the magnitude of sums of independent random variables*, Annals of Probability **29** (2001), no. 1, 447–466.

- [13] W. Hoeffding, *Probability inequalities for sums of bounded random variables*, Journal of the American Statistical Association **58** (1963), 13–30.
- [14] S. Jamin and S. Shenker, *Measurement-based admission control algorithms for controlled-load service: A structural examination*, Tech. report, CSE-TR-333-97, University of Michigan, April 1997.
- [15] S. Jamin, S. J. Shenker, and P. B. Danzig, *Comparison of measurement-based admission control algorithms for controlled-load service*, Proceedings of the Conference on Computer Communications (IEEE Infocom) (Kobe, Japan), April 1997, p. 973.
- [16] F. P. Kelly, *Charging and accounting for bursty connections*, url: cite-seer.ist.psu.edu/kelly96charging.html, 1996.
- [17] F.P. Kelly, *Notes on effective bandwidths*, Stochastic Networks: Theory and Applications **4** (Oxford University Press, 1996), 141–168.
- [18] Guoqiang Mao and Daryoush Habibi, *Loss performance analysis for heterogeneous on-off sources with application to connection admission control*, IEEE/ACM Transactions on Networking (TON) **10** (2002), no. 1, 125–138.
- [19] I. Pinelis, *Optimal tail comparison based on comparison of moments*, High Dimensional Probability **43** (1998), 297–314.
- [20] M. Reisslein, *Measurement-based admission control: A large deviations approach for bufferless multiplexers*, IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC) (Antibes, France), July 2000.
- [21] J. Roberts, *Engineering for quality of service*, Draft chapter from the book Self-similar Network Traffic and Performance Evaluation edited by K. Park and W. Willinger., 1998.
- [22] G. Seres, Á. Szilávik, J. Zátanyi, and J. Bíró, *Quantifying resource usage - a large deviation-based approach*, IEICE Transactions on Communications (Japan) **E85-B** (2002), no. 1, 938–952.
- [23] S. G. Shekhovtsov, O. I.; Gorokhov, *Data transmission over nonstationary communication channels*, Tech. report, Izdatel'stvo Leningradskogo Universiteta, 1985.
- [24] M. Talagrand, *The missing factor in hoeffding's inequalities*, Annales de l'institut Henri Poincaré (B) Probabilités et Statistiques **31** (1995), no. 4, 689–702.

- [25] Z. Turányi, A. Veres, and A. Oláh, *A family of measurement-based admission control algorithms*, PICS'98 (Lund, Sweden), May 1998.
- [26] M. Villen-Altamirano and M. F. Sanchez-Canabate, *Effective bandwidth dependent of the actual traffic mix: An approach for bufferless CAC*, International Teletraffic Congress (ITC) (Washington, USA), November 1997, ITC'15.
- [27] A. Weiss, *An introduction to large deviations for communication networks*, Selected Areas in Communications, IEEE Journal on **13** (1995), 938–952.

Publikációk

Folyóirat publikációk

- [J1] Z. Heszberger, M. Martinecz and J. Bíró. Architecture and Configuration of Broadband Access Networks Supporting Multimedia Applications. *IJCA Journal Special Issue*. pages 34–46, April, 2007.
- [J2] Z. Heszberger. Novel Equivalent Capacity Approximation Through Asymptotic Loss Analysis. *Accepted to Computer Communications*. Special Issue on ATM & IP Networks: Performance Modelling and Analysis
- [J3] M. Martinecz, J. Bíró and Z. Heszberger. Novel Resource-reservation algorithms in Packet-switched Networks. To appear in *Híradástechnika - Telecommunications - hungarian periodical, Selected Papers*. pages 24–29, June, 2005.
- [J4] M. Martinecz, J. Bíró and Z. Heszberger. Újszerű erőforrásigény-becslő módszerek csomagkapcsolt hálózatokban. *Híradástechnika - Telecommunications - hungarian periodical*. pages 13–18, Sept, 2004.
- [J5] Z. Heszberger, J. Zátanyi, and J. Bíró. Performance bounds for rate envelope multiplexing. *Performance Evaluation, Volume 48, Issue 1, May 2002, Pages 87-101*. Special Issue on ATM & IP Networks: Performance Modelling and Analysis
- [J6] Z. Heszberger, J. Zátanyi, and J. Bíró. Efficient Chernoff-based resource assessment techniques in multi-service networks. *Telecommunication Systems, Volume 20, Issue 1,2, 2002, Pages 59-80*. Special Issue: Wide Area Networks Design and Analysis
- [J7] Z. Heszberger and J. Bíró. An Optimization Neural Network Model with Time-Dependent and Lossy Dynamics. *Neurocomputing, Volume 48, Issues 1-4, October 2002, Pages 53-62*.
- [J8] Z. Heszberger, J. Zátanyi, and J. Bíró. Efficient resource usage techniques in multiservice networks. *Periodica Polytechnica Ser. Electrical Engineering, Volume 44, Issue 1, 2000, Pages 91-102*.

- [J9] Z. Heszberger. Számlázás ATM-hálózatokban. *Magyar Távközlés - Hungarian Telecommunications Periodical*. volume 8, pages 44–47, July, 1997.
- [J10] Z. Heszberger. Pricing ATM services. *Magyar Távközlés - Hungarian Telecommunications Periodical*, *Selected Papers II.* pages 59–62, 1997.

Konferencia publikációk

- [C1] J. Bíró, A. Gulyás, Z. Heszberger. A Novel Probabilistic Extension of Network Calculus for Workload Loss Examinations. In Proc. of *The Second Conference on Next Generation Internet Network - EuroNGI 2006*, pages 152–161, April, 2006.
- [C2] A. Gulyás, J. Bíró, Z. Heszberger. A Probabilistic Network Calculus for Characterizing Long-run Network Behavior. In Proc. of *IEEE International Conference on Communications - ICC 2006*, Vol. 1., pp. 465–470, June 2006.
- [C3] A. Kern, M. Martinecz and Z. Heszberger. Architecture and Configuration of Broadband Access Networks. In Proc. of *ISCC'2005, The Tenth IEEE Symposium on Computers and Communications*, volume 1, pages 172–181, La Manga del Mar Menor, Cartagena, Spain, June, 2005.
- [C4] A. Gulyás, J. Bíró, Z. Heszberger and T. Szénási. Dependency Criteria on Regulated Inputs for Buffer Overflow Approximation. In Proc. of *IEEE International Conference on Communications - ICC 2005*, volume 1, pages 83–87, Seoul, Korea, May, 2005.
- [C5] J. Bíró, A. Gulyás and Z. Heszberger. A Novel Direct Upper Approximation for Workload Loss Ratio in General Buffered Systems. *Lecture Notes in Computer Science - LNCS 3042 (Proc of IFIP Networking 2005)*, pages 718–730, Waterloo, Ontario, Canada, May, 2005.
- [C6] J.J. Bíró, M. Martinecz, Sz. M. Kis and Z. Heszberger. Novel Equivalent Capacity Approximation Through Asymptotic Loss Analysis. In Proc. of *Second International Conference on the Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks*, pages P5/1-P5/9, Ilkley, West Yorkshire, U.K., July,

2004.

- [C7] J.J. Bíró and Z. Heszberger. An Optimization Neural Network Model with Lossy Dynamics and Time-Varying Activation Functions. In Proc. of *IEEE International Joint Conference on Neural Networks 2004 - IJCNN'04*, pages 2245–2249, Budapest, Hungary, July, 2004.

- [C8] J.J. Bíró and Z. Heszberger. Analog Neural Networks as Asymptotically Exact Dynamic Solvers. In Proc. of *IEEE International Joint Conference on Neural Networks 2004 - IJCNN'04*, pages 2267–2272, Budapest, Hungary, July, 2004.

- [C9] J. Bíró, Z. Heszberger, A. Gulyás and T. Szénási. Distribution-Free Conservative Bounds for QoS Measures. In Proc. of *IEEE International Symposium on Computers and Communications - ISCC'2004*, pages 112–119, Alexandria, Egypt, July, 2004.

- [C10] J. Bíró, Z. Heszberger and M. Martinecz. A Family of Performance Bounds for QoS Measures in Packet-Based Networks. *Lecture Notes in Computer Science - LNCS 3042 (Proc of IFIP Networking 2004)*, pages 1108–1119, Athens, Greece, May, 2004.

- [C11] J. Bíró, Z. Heszberger, M. Martinecz, N. Felicián and Octavian Pop. Towards a Framework of QoS Measure Estimates for Packet-Based Networks. In Proc. of *IEEE International Conference on Communications - ICC 2004*, volume 4, pages 2231–2235, Paris, France, June, 2004.

- [C12] J. Bíró, Z. Heszberger, F. Németh, M. Martinecz. Bandwidth Requirement Estimators for QoS Guaranteed Packet Networks. In Proc. of *International Network Optimization Conference - INOC 2003*, pages 41–49, Evry-Paris, France, May, 2003.

- [C13] J. Bíró, Z. Heszberger, and M. Martinecz. Equivalent Capacity Estimators for Bufferless Fluid Flow Multiplexing. In Proc. of *IEEE Global Telecommunications Conference - Globecom 2003*, volume 7, pages 3706–3710, San Francisco, CA, USA, Dec. 2003.

- [C14] J. Bíró, Z. Heszberger, N. Felicián, and M. Martinecz. Bandwidth Requirement Estimators for QoS Guaranteed Packet Networks. In *INOC 2003, International Network Optimization Conference*, volume 1, pages 95–100, Evry/Paris, France, October, 2003.
- [C15] J. Bíró, Z. Heszberger, T. Dreilinger, A. Gulyás, and M. Martinecz. Parsimonious Estimates of Bandwidth Requirement in Quality of Service Packet Networks. In Proc. of *First International Working Conference on Performance Modeling and Evaluation of Heterogenous Networks - HET-NETs '03*, pages 69/1-69/9, Ilkley, UK, 21-23 July 2003.
- [C16] J. Bíró, Z. Heszberger, Gergely Kún and M. Martinecz. Advanced QoS Provision for Real-Time Internet Traffic. In *IEEE International Packet Video Workshop - Packet Video 2003*, pages 26–28, Nantes, France, April, 2003.
- [C17] J. Zátanyi, Z. Heszberger, and J. Bíró. Packet Loss Based QoS Provision for Real-Time Internet Traffic. In Proc. of *International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems - SPECTS 2002*, pages 65–72, San Diego, California, July 2002.
- [C18] J. Zátanyi, Z. Heszberger, and J. Bíró. Chernoff-based resource assessment techniques in communication networks. In Proc. of *Polish-Czech-Hungarian Workshop 2001 on Circuit Theory, Signal Processing, and Telecommunication Networks*, pages 56–66, Budapest, Hungary, Sept. 2001.
- [C19] J. Zátanyi, Z. Heszberger, and J. Bíró. Traffic management research studies supporting QoS network evolution. In Proc. of *9th IFIP Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM & IP Networks*, pages 245–251, Budapest, Hungary, June, 2001.
- [C20] Z. Heszberger, J. Zátanyi, J. Bíró, and T. Henk. Efficient bounds for bufferless statistical multiplexing. In Proc. of *IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2000*, volume 1, pages 641–646, San Francisco, CA, USA, Nov./Dec. 2000.

- [C21] Z. Heszberger, J. Zátanyi, and J. Bíró. Performance bounds for rate envelope multiplexing. In Proc. of *8th IFIP Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM & IP Networks*, pages 9/1–9/10, Ilkley, England, July, 2000.
- [C22] Z. Heszberger, J. Zátanyi, and J. Bíró. Efficient CAC algorithms based on the tail distribution of aggregate traffic. In Proc. of *2nd Conference of PhD Students on Computer Sciences*, page 47, Szeged, Hungary, July 2000.
- [C23] Z. Heszberger, J. Bíró. Neural Networks for Global Optimization. In Proc. of *2nd Conference of PhD Students on Computer Sciences*, ext. vol., Szeged, Hungary, July 2000.
- [C24] Z. Heszberger, J. Zátanyi, and J. Bíró. Optimization techniques for tail distribution estimation based on the Chernoff bounding method. In Proc. of *17th European Conference on Operational Research - EURO XVII*, page 155, Budapest, Hungary, June, 2000.
- [C25] Z. Heszberger, J. Bíró, and T. Henk. Neural Networks for Global Optimization. In Proc. of *17th European Conference on Operational Research - EURO XVII*, page 93, Budapest, Hungary, June 2000.
- [C26] Z. Heszberger, J. Bíró, and E. Halász. An Optimization Neural Network Model with Time-Dependent and Lossy Dynamics. In Proc. of *ESANN, 10th European Symposium on Artificial Neural Networks*, pages 287–292, Bruges, Belgium, April 2000.
- [C27] Z. Heszberger, J. Bíró, and T. Henk. Comparison of Simple Tail Distribution Estimators. In Proc. of *ICC '99, IEEE International Conference on Communications*, volume 3, pages 1841–1845, Vancouver, CA, June 1999.