

IP hálózatok forgalmi méretezése

Molnár Sándor

Kivonat:

Az utóbbi években az IP hálózatok fejlesztése jelentős méreteket öltött. Szinte mindenki egyetért abban, hogy a következő évtizedek hálózatainak alapvető technikája az IP lesz. Azonban az IP hálózatoknak még nem alakult ki egységes tervezési eljárása és világszerte kutatások folynak az „Internet Erlang formulájának” megalkotásán. Ezen cikk ezt a problémakört célozza meg és áttekintést kíván adni a jelenlegi és a lehetséges jövőbeli forgalmi tervezési eljárásokról.

1. Az IP hálózatok forgalma

A forgalomelmélet sikere a telefonhálózatok forgalmi méretezési eljárásaiban vitathatatlan. Jól kidolgozott eljárások és módszerek segítségével tudjuk évtizedek óta megbízhatóan tervezni a telefonhálózatokat [1]. Mielőtt az IP hálózatok forgalmi méretezési problémáira rátérnénk, érdemes megvizsgálni mi volt az oka a telefonhálózatok sikeres forgalmi méretezésének.

Az egyik alapvető jellemző a telefonhálózatok forgalmának *statikus természete*. Ez azt jelenti, hogy lehetett találni „tipikus felhasználót” és „tipikus felhasználói viselkedést”. A forgalmi jellemzők változékonysága általában korlátozott volt és így a forgalmi jellemzők kis szórása lehetővé tette az átlagértékekkel való számításokat, amik pontossága elegendőnek bizonyult. A telefonhálózatok statikus természete vezetett ahhoz, hogy olyan általánosan érvényes modelleket lehetett alkotni, mint például az, hogy a telefonhívások érkezési folyamata nagy aggregációnál jól modellezhető Poisson folyamattal [1]. Ez a modell azt feltételezi, hogy a telefonhívások függetlenek és a hívások közötti idők exponenciális eloszlásúak. A modell egyik előnye (ami a sikerének is egyik legfőbb oka), hogy mindössze egy paraméterrel (az érkezési intenzitással) jellemezhető. A Poisson folyamat memóriamentes tulajdonságának köszönhetően számos analízis egyszerűvé válik (pl. PASTA), így a teljesítményanalízisben sokszor még akkor is használták ezt a modellt, amikor a valódi érkezési folyamat nem volt éppen Poisson jellegű. A másik ilyen általános érvényű modell a telefonhívások hosszának modellezése exponenciális eloszlással [1]. Ennek a modellnek az elterjedtségét is az egyszerűségének köszönheti, hiszen ez a modell analitikusan is jól kezelhető. Valójában az közismert, hogy a telefonhívások hossza sokszor jelentősen eltér az exponenciálisától. Ez az eltérés azonban nem okozott lényegi hibákat a tervezésben, aminek az okát újra a Poisson érkezési modell előnyös tulajdonságaiban találjuk meg. Több teljesítményjellemző ugyanis Poisson érkezési folyamat esetén nem függ a kiszolgálási idő eloszlásától, csak annak átlagértékétől.

Jelentős változás történt akkor, amikor a telefonhálózatokat már nem csak beszéd, hanem más információ átvitelére is elkezdtek használni. A FAX forgalma és az Internet forgalom átvitele a telefonhálózaton keresztül jelentősen felborította a telefonhálózatok forgalmának statikus természetét. A hívások hossza a nem beszédforgalom esetében jóval nagyobb lett egy tipikus telefonhívás hosszánál, és a hívások hosszának változékonysága is jelentősen megnövekedett. A beszédforgalom jól megjósolható statikus és homogén természete sajnos nem mondható el az adatforgalomra. Az adatforgalom esetében sokkal nagyobb változékonyságot tapasztalunk a nagyon rövid kapcsolatoktól a nagyon hosszú hívásokig, és az átvitt időegységenkénti adatmennyiség a kapcsolat ideje alatt is nagyon ingadozhat. Az adatforgalom ezen „csomósodásának” (burstiness) persze az az alapvető oka, hogy itt általában már nem emberek, hanem gépek „beszélgetnek” egymással. Nem véletlen, hogy míg a beszédforgalom esetében az áramkörkapcsolás ideálisnak bizonyult, adatforgalomnál a csomagkapcsolás technikája sokkal megfelelőbb.

Az elmúlt évek forgalomelméleti kutatásainak egyik kulcskérdése az volt, hogy milyen forgalomleíró jellemzőket használjunk a rendkívül borsztös és összetett struktúrájú adatforgalom jellemzéséhez. Ilyen jellemzőkkel szemben elvárjuk, hogy lehetőleg egyszerűek legyenek (így a felhasználók számára könnyen érthetőek és meghatározhatóak, pl. a csúcssebesség), jelentősen meghatározzák a lényeges teljesítményjellemzőket (pl. átlagsebesség) és a hálózat által szabályozhatóak legyenek (pl. az úgynevezett „lyukas vödör” (leaky bucket) eljárás paraméterei). Az irodalomban sok javaslat található forgalomleíró paraméterekre, de a gyakorlat azt mutatta, hogy elég kevés azon forgalomjellemzők száma, amelyek eleget tesznek a fenti követelményeknek. Ezért csak néhány jellemző került mostanáig „elfogadásra”, melyek az úgynevezett „token bucket” eljáráshoz kötődnek. Ez az eljárás hasonló az ATM „leaky bucket” forgalomleíró jellemzőihez, és a definiált jellemzők is hasonlóak az ATM-ben megismert jellemzőkhöz: a csúcssebesség, a token bucket két paramétere (a tokenek által szabályozott átlagsebesség és a vödör mérete), valamint a minimális és maximális csomagméret. A token bucket-es jellemzés széles körben elterjedt, de még ma is kutatás tárgya az, hogy vajon a token bucket mennyire alkalmas a forgalom dinamikájának leírásához. A tervezési szempontból számos más jellemző is szóba kerül, pl. a későbbiekben tárgyalandó fraktális forgalom Hurst paramétere [3,4].

Az IP hálózatokban általában sokféle adatforgalom keveredik, melyet csomagkapcsolással továbbítunk. Egy fontos jellemzője az adatforgalomnak, hogy ha megfigyeljük valamilyen időegység alatt továbbított byte-ok (vagy csomagok) számát, akkor ennek változékonysága (borsztössége) általában több *időskálán keresztül* is megfigyelhető [2,3,4,6]. Ez teljesen más, mint a beszédforgalom Poisson dinamikája, ahol egyértelműen található egy meghatározó időskála, és a forgalom egyáltalán nem borsztös több időskálán keresztül. További eltérés az IP forgalom *hosszú távú összefüggősége* (*long-range dependence*), amely azt jelenti, hogy több időskálán keresztül is a forgalomban jelentős korrelációk, összefüggések figyelhetők meg [2,3,4,6]. Ezen túlmenően sokszor több időskálán keresztül a forgalom számos statisztikája azonos (pl. autokorrelációs függvény), nevezetesen a forgalomnak *önhasonló* (*self-similar*) *struktúrája* van [2,3,4]. Az adatforgalom forgalmi jellemzőiben pedig gyakran találunk extrém nagy változékonyságot (pl. Interneten letöltött fájlok hossza),

amik matematikailag a *lassan lecsengő (heavy-tailed) eloszlások* (pl. Pareto eloszlás) segítségével írhatóak le [3,4]. Mindezek a tulajdonságok a *fraktális folyamatoknál* is megfigyelhetők, és ez az oka az utóbbi években a fraktális forgalmi modellek népszerűségének [3]. További érdekes kutatási eredmény, hogy az IP forgalom fraktális szerkezete is összetett és számos részletes analízis *multifraktál* struktúrákat fedezett fel [5,6].

A fraktális forgalmi modellek azért is figyelemre méltóak, mert ezen modellek kevés forgalmi paraméter segítségével képesek nagyon bonyolult és több időskálán összefüggő forgalom leírására. A fraktális modellek ezen előnye vitathatatlan a klasszikus (általában Markovi) modellekkel szemben [3]. A fraktális forgalmi modellek és azok alkalmazása (pl. a sorbanállás-elméletben) azonban még gyerekcipőben jár, így eddig még kevés tervezési eljárás született ami ezekre a modellekre épít [3]. Ezzel szemben a jól kidolgozott klasszikus modellek felhasználásával számos tervezési technikát fejlesztettek ki. További előnye a fraktális modelleknek, hogy ahogyan egyre jobban megértjük az Internet hálózati forgalmának természetét, valamint azt, hogy milyen forgalomgeneráló mechanizmusok, protokollok okozzák a megfigyelt jelenségeket, ezek alkalmas magyarázatot kínálnak arra miért „kell” fraktális tulajdonságokat találnunk [7]. Valószínű, hogy a jövőben egyre inkább megfigyelhető lesz a klasszikus modellekről a fraktális modellekre történő váltás a forgalomméretező eljárásokban.

2. QoS IP hálózatok

Az IP hálózatok forgalmi jellemzőit nagymértékben meghatározza, hogy milyen hálózati mechanizmusok formálják és alakítják a forgalmat a hálózaton belül. A különböző minőség garantáló IP architektúrák mechanizmusai számos forgalmi tulajdonságért „felelősek”, ezért a következőkben áttekintjük ezeket a technikákat.

Az Internetnek ugyan óriási a sikere és népszerűsége, de még mind a mai napig nem tud garantált minőségi jellemzőkkel rendelkező szolgáltatást nyújtani. Ezért számos erőfeszítés történt az utóbbi években, hogy olyan IP alapú hálózatokat fejlesszenek ki, melyek hatékonyan tudják támogatni a garantált minőségi igényeket (QoS, Quality of Service) [8]. Ilyen QoS igények vonatkozhatnak a sávszélességre, a késleltetésre és annak ingadozására, a csomagvesztési arányra, a szolgáltatás igénylésének blokkolási arányára, a megbízhatóságra, stb. Az IP QoS biztosításához alapvetően két eltérő filozófia létezik, a „nagy sávszélesség” és a „menedzselt sávszélesség” elve.

A „nagy sávszélesség” filozófia arra épít, hogy annak ellenére, hogy a forgalmi igények rohamosan növekednek, a jövőben olyan olcsó lesz a sávszélesség, hogy hatalmas kapacitású linkeket tudunk majd használni. Mindemellett várható, hogy a kapcsolóelemek csomagtovábbítási ideje is jelentősen csökkenni fog. Az ilyen túlméretezett hálózat gyakorlatilag minden problémát megoldana, és nem volna szükség bonyolult tervezési és forgalommenedzselési eljárásokra. Gondoljunk bele, ha a mai Internet ilyen volna (végponttól végpontig), akkor az egy olyan csomagkapcsolt hálózat

lenne, ami számos valós idejű alkalmazást ma is lehetővé tenne. Nyilvánvaló azonban, hogy politikai és gazdasági tényezők fogják meghatározni azt, hogy mennyire lesz olcsó a jövőben a sávszélesség, és ha a „nagy sávszélesség” filozófia a gerinchálózatban meg is valósul, a hozzáférési hálózatokban ez már kevésbé valószínű.

A „menedzselt sávszélesség” elve arra épít, hogy korlátozott sávszélesség áll majd rendelkezésünkre a jövőben is, így forgalomszabályozási eljárások szükségesek a kapacitás menedzselésére. A kidolgozott technológiák különböző eljárásokat kínálnak ennek megvalósítására.

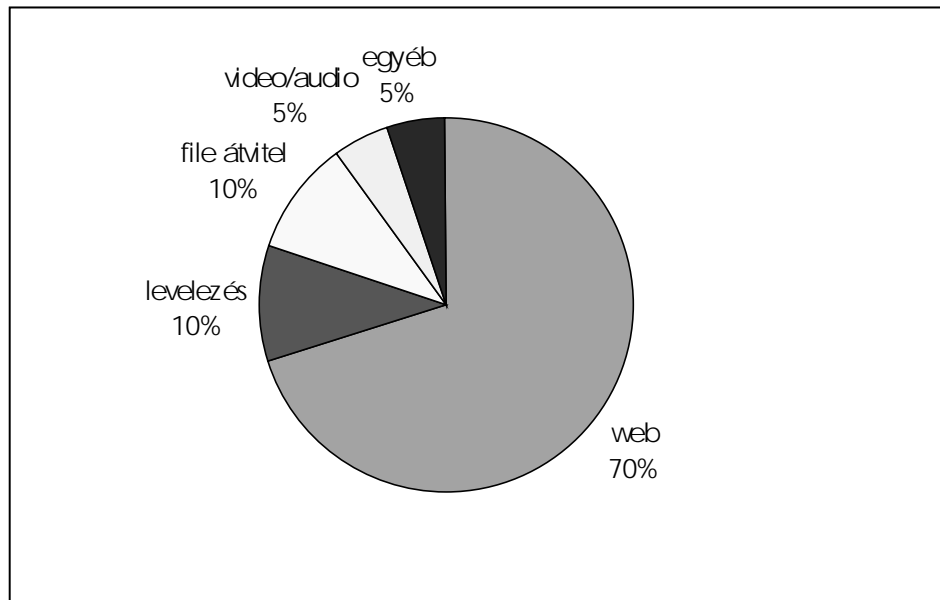
Az adatkapcsolati réteg protokollok QoS támogatása nem új gondolat, már a keretkapcsolás (Frame Relay) is tartalmazott QoS támogatást, de az igazi QoS technika úttörője az ATM (Asynchronous Transfer Mode) volt. Az ATM-ben a kapcsolat felépítése előtt létrejön egy forgalmi szerződés a felhasználó és a hálózat között, melyben a hálózat garantálja a felhasználó számára az igényelt QoS jellemzőket (pl. cellavesztési és késleltetési garanciák). Az ATM-ben öt szolgáltatási kategóriát is létrehozta a különböző jellegű szolgáltatások támogatására. Itt kell megemlítenünk a népszerű MPLS protokollt (Multi Protocol Label Switching), ami szintén egy második rétegbeli QoS támogató technika. Az MPLS alapelve lényegében ugyanaz, mint az ATM alapelve, egy címke kapcsolású kapcsolatorientált protokoll.

Az IP egy hálózati réteg protokoll, amely számos adatkapcsolati protokollra épülhet és egy kapcsolatmentes, de nem megbízható hálózati réteg szolgáltatást nyújt. Az eredeti IP elképzelésben is már biztosítottak egy mezőt (TOS, Type of Service) az IP csomag fejrészeben QoS célokra, bár gyakorlatilag ezt az opciót szinte sosem használták ki. Az utóbbi években két fontos irányzat figyelhető meg az IP hálózatok QoS támogatására: az integrált szolgáltatású (IntServ, Integrated Services) és a differenciált szolgáltatású (DiffServ, Differentiated Services) eljárások. Az IntServ hálózatok végpontok közötti szolgáltatás garanciákat tudnak adni minden egyes kapcsolatra, azonban a fő hátránya ennek az elképzelésnek, hogy nem jól skálázhatóak, hiszen a szükséges kapcsolatonkénti QoS információt a kapcsolat útvonalán minden csomópontnak tartalmaznia kell. Ezen eljárás támogatására dolgoztak ki többféle erőforrás-lefoglalási protokollt (pl. RSVP, Resource Reservation Protocol). A DiffServ hálózatok más elvre épülnek. Ezekben a hálózatokban olyan differenciálást hajtanak végre, hogy lehetőség van különböző csomagok eltérő kezelésére (ütemezés, sorbanállás, stb.). Ezen eltérő kezelésmódot pedig gyakorlatilag az IPv4 TOS mezőjének újradefiniálásával létrehozott DS mező határozza meg.

Az IP fölötti szállítási protokollok közül meg kell említenünk a TCP-t (Transmission Control Protocol), mely a nem megbízható hálózati réteg IP protokoll felett a legnépszerűbb végpontok közötti megbízható szállítási réteg protokoll. A TCP forgalom ma a gerinchálózatok forgalmának több mint 90%-át teszi ki. A TCP mechanizmus forgalomformázó tulajdonságainak megismerése elengedhetetlen feltétel a forgalomméretező eljárások kidolgozásához [6]. A legutóbbi kutatások például kimutatták azt, hogy a TCP képes „elszállítani a fraktális tulajdonságokat” a hálózat egyik pontjáról a másikra, oda is, ahol amúgy semmi fizikai oka nincs a fraktális

tulajdonságok megjelenésének [9]. Így a TCP mintegy terjesztője a „fraktális vírusnak” az Interneten. A TCP hatásain túlmenően valószínűleg számos más mechanizmus, pl. video képváltások, stb. is fontos szerepet játszanak a széleskörben megfigyelt fraktális tulajdonságok kialakulásához.

Az alkalmazások száma nagyon változó képet mutat. Ma még a web forgalma a domináns (1. ábra), de a közeljövőben várható a video és audio alkalmazások arányának a növekedése.



1. ábra: Az alkalmazások aránya az Interneten

3. Forgalmi méretezés

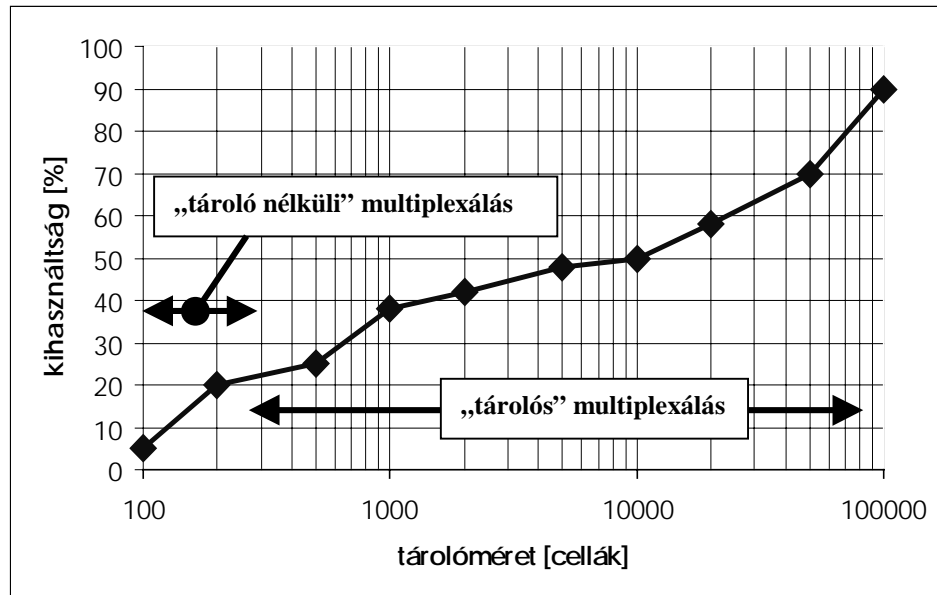
A nagyon fontos gyakorlati kérdések, amelyek az IP hálózatok tervezőit, méretezőit és üzemeltetőit izgatják a következők: Mekkora sáv szélességet kell biztosítanunk az adott IP hálózatban ahhoz, hogy egy adott forgalomtípus esetén a kívánt QoS követelményeket biztosítani tudjuk? Hogyan befolyásolja a kihasználtságot, ha több különböző forgalmi típust multiplexálunk? Mekkora multiplexálási nyereség érhető el? Mi az az egyszerű és jól kezelhető forgalmi modell, ami kevés és jól meghatározható forgalmi jellemzőt használ, és segítségével tervezhetjük a hálózatainkat? A kérdésekre adott válasz nagyrészt függ a forgalom jellemzőitől és az alkalmazott IP hálózati architektúráktól (lásd az előző fejezetek áttekintését). A következőkben összefoglaljuk a szóba jöhető lehetőségeket.

Kétfajta szabályozási elv lehetséges [10], mely nagymértékben befolyásolja a forgalmi méretezési elveket. Az egyik ilyen szabályozási kategória a „nyílt hurkú szabályozás”, mely többnyire a valós idejű, interaktív beszéd és video alkalmazásoknál használatos

(stream traffic). Ezen eljárás tulajdonképpen egy torlódást megelőző forgalmi szabályozás, ami az ATM-nél már jól ismert „forgalmi szerződés” fogalmán alapszik. A felhasználó forgalmi jellemzőivel leírt igényére a hálózat kapcsolatfelépítési mechanizmusa vagy elfogadja az igényelt kapcsolatot és biztosítja az igényelt QoS-t, vagy erőforrások hiányában elutasítja az igényt. Az eljárás hatékonysága nagymértékben függ attól, hogy mennyire pontosan tudja a felhasználó előre jellemezni a sokszor nagyon ingadozó forgalmát. Annak érdekében, hogy a forgalmi jellemzők valóban „kézben tarthatóak” legyenek, forgalomformázási mechanizmusokat (pl. shaping) alkalmazhatunk, amelyek legtöbbször a már említett „token bucket” elv alapján működnek. A hálózat pedig ellenőrizheti a forgalmi szerződésben deklarált forgalmi jellemzőket (policing) és a „szabálytalankodó csomagokat” szankcionálhatja (pl. eldobhatja vagy alacsonyabb prioritásra helyezheti őket).

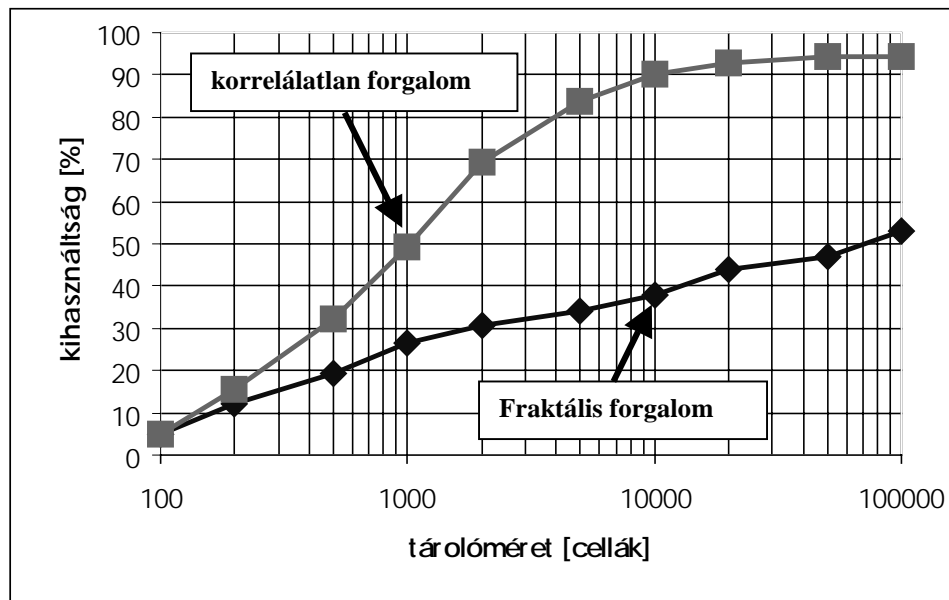
Amennyiben a forgalmi méretezésnél multiplexálási nyereséget nem tűzünk ki célul, akkor a legegyszerűbb módszer az, hogy minden kapcsolatnak forgalmában előfordulható maximális sávszélességet biztosítjuk (peak rate allocation). Ez az eljárás nagyon pazarló a sávszélességgel, de mivel sokszor kevés az ismeretünk a forgalom statisztikáiról, nagyon sokszor ma még ezt alkalmazzák. Amennyiben szeretnénk kihasználni a forgalom véletlenszerű ingadozásából adódó statisztikus multiplexálási nyereséget, kétfajta lehetőségünk van [10,11]: az úgynevezett tároló nélküli (bufferless multiplexing, rate envelope multiplexing) vagy tárolós statisztikus multiplexálás (buffered multiplexing, rate sharing). Az elnevezések onnan származnak, hogy ha a csomagforgalom folyadékmodelljét tekintjük, akkor az első esetben olyan statisztikus multiplexálást hajtunk végre, melynél nincs szükség tárolóra a folyadékmodellben (a valóságban rövid tárolókra az úgynevezett cellatorlódás kiküszöbölésére ilyenkor is szükség van). Ennél a méretezési elvnél a méretezési kritérium az, hogy annak a valószínűsége, hogy az aggregált forgalom meghaladja a kapacitást kisebb legyen egy adott küszöbnél. Ennek a módszernek a nagy előnye, hogy a link túlcusordulási valószínűség csak a forgalmi intenzitás stacioner eloszlásától függ, és nem függ a forgalom összefüggőségi struktúrájától. Így például ezen tervezési eljárásoknál egyáltalán nem érdekes, hogy a forgalomnak van-e fraktál struktúrája vagy nincs, ami jóval egyszerűbb tervezési módszerekhez vezet. A tároló nélküli statisztikus multiplexálás hátránya azonban, hogy általában kis link kihasználtságot tudunk vele elérni.

A link kihasználtságát növelhetjük, ha tárolót is használunk, és ez a tárolós statisztikus multiplexálás elve (2. ábra) [11]. Ennél a multiplexálásnál a tervezési kritérium az, hogy a tároló túlszordulási valószínűsége kisebb legyen egy adott küszöbnél.



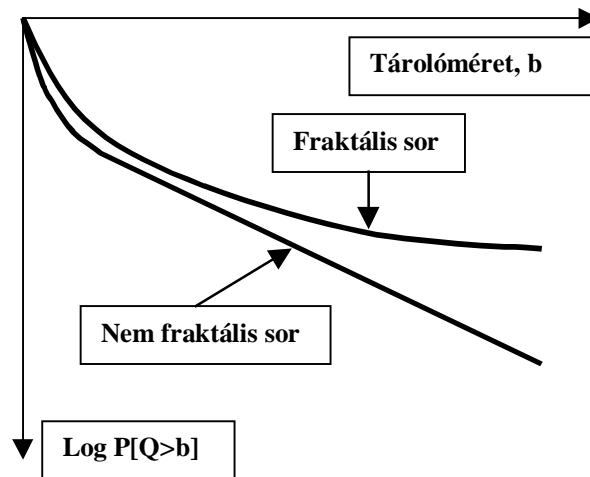
2. ábra: Statisztikus multiplexálási alternatívák

Sajnos ebben az esetben a csomagvesztési és késleltetési jellemzők nagyon sok forgalmi jellemzőtől függenek, pl. erősen függenek a forgalom korrelációs struktúrájától. Például fraktális forgalom esetén nagyon nehéz megbízható tervezési módszereket adni és a fraktális tulajdonságok erősen leronthatják az elérhető kihasználtságot (3. ábra).



3. ábra: A forgalom belső korrelációjának hatása

A fraktális forgalom további kellemetlen hatása, hogy a tárolókban sokkal hosszabb sorokat tud kialakítani és a tároló túlszordulási valószínűségének becslése is jóval nehezebbé válik. Ennek egyik fő oka az, hogy míg nem fraktális soroknál a sorfokeloszlásának becslésére majdnem mindig találunk egy alkalmas aszimptotát, fraktális soroknál ilyen nincs (4.ábra).



4. ábra: A sorhossz (Q) alakulása fraktális és nem fraktális forgalom esetén

Egy alternatív megoldást kínál a determinisztikus multiplexálás, ami megfelelő forgalomformázási kritérium mellett veszteségmentes és késleltetés garantált átvitelt eredményezhet, bár jóval kisebb multiplexálási nyereséggel.

Egy fontos jelenség megkönnyítheti a jövőbeli IP hálózatok tervezését. A forgalom aggregációjának a rohamos növekedése (amit ma is megfigyelhetünk az Interneten) ugyanis azt eredményezheti, hogy jól alkalmazhatóak lesznek azok a matematikai törvények (nevezetesen a centrális határeloszlás tételek), melyek lehetővé teszik egyszerű Gauss modellek alkalmazhatóságát. Tehát arról van szó, hogy a forgalom bármennyire is borsztös, ingadozó és forgalmi típusonként teljesen más statisztikákat mutat, nagy aggregációban sokszor úgy viselkedik, mintha Gauss folyamat volna. Ma sok esetben az aggregáció még nem elég nagy ahhoz, hogy a Gauss modell pontos legyen a tervezéshez, és lehet, hogy a hozzáférési hálózatokban nem is fogja elérni azt az aggregációs határt, amitől kezdve biztonságosan alkalmazható lenne, de a gerinchálózatokban ez a határátlépés várható.

A „zárt hurkú szabályozás” elve elsősorban olyan forgalom esetében használatos, amelynél van módunk a forgalom intenzitásának befolyásolására (elastic traffic) [10,11]. Ezt az alapelvet használja a TCP az Interneten és az ABR is az ATM-ben. Ezek a protokollok a teljes kapacitás kihasználására törekszenek, miközben fair sávszélesség-megosztást próbálnak biztosítani a kapcsolatok között. Többféle központi és elosztott algoritmust dolgoztak ki a sávszélesség szétosztására ilyen hálózatokban [10,11], ahol általában a kihasználtság és a késleltetés jellemzők az optimalizálás célparaméterei. A

szabályozó mechanizmusok (pl. TCP) tökéletlenségeinek javítására pedig az utóbbi években számos eljárást fejlesztettek ki (pl. RED, Random Early Detection). A hatékony méretezési eljárások kidolgozása zárt hurkú szabályozás esetén ma is a kutatás egyik intenzív területe, ahol még sok a nyitott kérdés. Például nem dőlt még el, hogy mennyire hatékony az az elképzelés, amely a nyílt hurkú szabályzáshoz hasonlóan itt is kapcsolatfelépítési mechanizmus alkalmazását látja fontosnak. A távközlési világ kutatói inkább egy ilyen hálózatban gondolkodnának, míg az adatkommunikációs világ fejlesztői ezt nem látják szükségesnek.

Összefoglalva azt mondhatjuk, hogy a telefonhálózatok tervezéséhez hasonlóan nincs és valószínűleg a közeljövőben nem is lesz olyan általánosan használatos tervezési módszer, amit az „Internet Erlang formulájának” nevezhetnénk. Ennek egyik fő oka az, hogy az IP hálózatokban használatos egyre szaporodó szolgáltatástípusok forgalma sokkal összetettebb, mint a beszédforgalom, és általános forgalmi modell nehezen konstruálható. A második meghatározó tényező, hogy a különböző szolgáltatások QoS igénye rendkívül eltérő lehet, ami eltérő kezelésmódot igényel. Ezen igények megvalósítására alkalmazandó különböző IP architektúráknak viszont eltérő forgalomformázó hatásuk van. Harmadik tényezőként az is jelentősen befolyásolja majd a tervezési eljárásokat, hogy milyen útvonalirányítási és számlázási stratégiákat vezetnek majd be a IP hálózatok szolgáltatói, aminek jelentős visszacsatoló hatása lehet a felhasználói viselkedésre. Azonban azt megállapíthatjuk, hogy amint egyre jobban megismerjük az IP forgalom természetét és a QoS IP architektúrák forgalomszabályozó hatásait, a megfelelő forgalomméretező eljárások folyamatosan megszületnek majd.

Irodalom

- [1] H. Akimaru, K. Kawashima, “*Teletraffic, Theory and Applications*”, Springer, 1999.
- [2] W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger, and D. Wilson, “On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-15, February 1994.
- [3] W. Willinger, M. Taqqu, and A. Erramilli, “*A Bibliographical Guide to Self-Similar Traffic and Performance Modeling for Modern High-Speed Networks Stochastic Networks: Theory and Applications*”, Royal Statistical Society Lecture Notes Series, Vol. 4, Oxford University Press, 1996.
- [4] S. Molnár, T. D. Dang, A. Vidács, Heavy-Tailedness, Long-Range Dependence and Self-Similarity in Data Traffic, *7th International Conference on Telecommunication Systems Modeling and Analysis*, Nashville, Tennessee, USA, March 18-21, 1999.
- [5] A. Feldmann, A. C. Gilbert, and W. Willinger, “Data networks as cascades: Investigating the multifractal nature of Internet WAN traffic”, *ACM Computer Communication Review*, vol. 28, pp. 42-55, Sept. 1998.
- [6] S. Molnár, T. D. Dang, “Scaling Analysis of IP Traffic Components”, *ITC Specialist Seminar on IP Traffic Measurement, Modeling and Management*, Monterey, CA, USA, September 18-20, 2000.
- [7] M. Taqqu, W. Willinger and R. Sherman, “Proof of a fundamental result in self-similar traffic modeling” *Computer Communication Review*, 27 (1997) 5-23.
- [8]] X. Xiao, L. M. Ni, “Internet QoS: A Big Picture”, *IEEE Network Magazine*, March 1999.
- [9] A. Veres, Zs. Kenesi, S. Molnár, G. Vattay, “On the Propagation of Long-Range Dependence in the Internet”, *ACM SIGCOMM 2000*, Stockholm, Sweden, August 28 - September 1, 2000.
- [10] J. W. Roberts, “Engineering for Quality of Service”, chapter in the book on “*Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation*” edited by K. Park and W. Willinger, John Wiley & Sons, 2000.
- [11] J. Roberts, U. Mocci, and J. Virtamo, eds. Broadband network teletraffic. Final Report of action COST 242. Springer Verlag, 1996.