

Kivonat

A jövő Internet kutatások, szakítva a fokozatos fejlődési követelményt szem előtt tartó korlátozásokkal és ezzel teljesen szabad utat adva a fundamentumokban újszerű kialakításoknak, egy 10-20 év múlva vizionálható hálózat építőelemeit kutatják az alapvető működési elvek, mechanizmusok valamint architektúrája téren. A *torlódásszabályozási* kérdéseket vizsgálva olyan újszerű irányra juthatunk, amelyben torlódásszabályozás nélkül is összeomlás nélkül működhet a hálózat, megfelelő kapacitások és hibajavító kódolás alkalmazása mellett. Az Internet méretének robbanásszerű növekedése olyan új kihívások elé állítja az üzemeltetést, amelyet a hagyományos központi (menedzser-ágens) megközelítésben már lehetetlen kezelni. A *nagyméretű hálózatok* kutatása olyan paradigmájában új megközelítéseket vizsgál, amelyek alkalmasak lehetnek a méret növekedés kezelésre. A piac és a környezet oldaláról tekintve a *társadalmi és gazdaságossági* szempontok egyre jelentősebb mértékben befolyásolják a technikai fejlődés által létrejövő hálózatok kialakítását, beleértve azok alapvető működési elvét, mechanizmusait és a kialakuló architektúrát. Ezen három témakör rövid áttekintése és kitekintése olvasható a cikkben.

Kulcsszavak: jövő Internet, torlódásszabályozás, nagyméretű hálózatok, társadalmi-gazdaságossági szempontok.

Abstract

Future Internet research programs try to ignore and overcome the barriers of incremental development and encourage clean slate designs, which propose new visions, architectures and paradigms for the coming 10-20 years. Recent results in congestion control research has showed that networks operating without explicit congestion control (like TCP) may survive without congestion collapse if appropriately designed in network resources and if end systems apply appropriate erasure coding schemes. The exponential growth of the Internet makes it hardly impossible to manage the network with traditional centralized approaches (like manager-agent); hence research results of *complex networks* are expected to spread over the Internet with its autonomic behaviors. On the other hand *socio-economic* considerations begin to come to the front in deciding technological alternatives or simply influencing requirements, hence having emerging architectural and fundamental impact. In this article we give overview and outlook in these three topic areas.

Keywords: Future Internet, congestion control, complex networks, socio-enomics

A jövő Internetjének kutatásai

Henk Tamás, Szabó Róbert, Molnár Sándor, Sonkoly Balázs, Csernai Márton, Gulyás András,
Heszberger Zalán, Gyarmati László, Trinh Anh Tuan

BME Távközlési és Médiainformatikai Tanszék

{henk, szabo, molnar, sonkoly, csernai, gulyas, heszi, gyarmati, trinh}@tmit.bme.hu

1 Bevezetés

A jövő Internet kutatások, szakítva a fokozatos fejlődési követelményt szem előtt tartó korlátozásokkal és ezzel teljesen szabad utat adva a fundamentumokban újszerű kialakításoknak, egy 10-20 év múlva vizionálható hálózat építőelemeit kutatják az alapvető működési elvek, mechanizmusok valamint architektúrája téren. A jövő Internet hosszú távú kutatási programjait mind az USA (Future Internet Design - FIND) mind az EU és Japán különböző hosszú távú kutatási programjai keretében széleskörűen támogatja.

A BME Távközlési és Médiainformatikai Tanszékének kutatói több éve aktív szereplői ezen kutatásoknak, amelyből három kiemelt területről adunk összefoglalást:

Torlódásszabályozás: a mindenkor 10 legfontosabb csomagkapcsolt hálózati problémák egyike, melyre kielégítő megoldást igen – hiszen működik az Internet –, de optimálist megoldást mindeztidáig nem sikerült találni. Ebben a fejezetben *Molnár Sándor és Sonkoly Balázs* áttekintést ad a torlódásszabályozás történetéről, a torlódásszabályozás jelenlegi kihívásairól és lehetséges jövőbeli megoldásából. A szerzők kitérnek egy forradalmian új ötlet megvalósíthatóságára is, ami szerint lehetséges volna olyan Internetet létrehozni, ahol nincs torlódásszabályozás, hanem a tömeges csomagvesztéseket hatékony hibajavító kódolás kezeli.

Hálózatmenedzsment: az Internet célja, hogy a felhasználói számára különböző igényeket kielégítő kommunikációs szolgáltatást nyújtson. A kommunikációs szolgáltatás sem más mint bármely hétköznapi szolgáltatás amit igénybe veszünk: üzemeltetni kell. A jövő Internetét billió nagyságrendben mért kommunikációs csomópontok fogják alkotni; ezek hagyományosan kézi üzemeltetése kivitelezhetetlennek látszik. *Csernai Márton, Gulyás András és Heszberger Zalán* ezen komplex hálózatok üzemeltetésére és szervezésére használható újfajta paradigmákat mutat be az olvasóknak, melyek egyik lehetséges fejlődési irányát adhatják az Internetnek.

Társadalmi-gazdaságossági szempontok: a kommunikációs hálózatok tervezésében, üzemeltetésében a korábbi évtizedekben a technológiai szempontok voltak elsődlegesek. Az Internet együttműködő szervezetek hálózataként jött létre, ahol a közösségi érdek szerint készítették az átviteli eljárásokat. Az Internet fejlődésével egyre több profit orientált vállalat kapcsolódott a globális hálózathoz, akik elsősorban saját érdekeiket tartják szem előtt, a hasznuk maximalizálásában érdekeltek. Ezért kiemelten fontos megérteni, hogy a társadalmi-gazdasági

szempontok, hogyan befolyásolják a technikai fejlődés által létrejövő hálózatok kialakítását, beleértve azok alapvető működési elvét, mechanizmusait és a kialakuló architektúrát. *Trinh Anh Tuan és Gyarmati László* a társadalmi-gazdaságossági szempontok tükrében két esettanulmányt tárgyal: az Internet szolgáltatók árképzési lehetőségeit hűségese előfizetők esetén és a felhasználói viselkedést közösségi oldalakon.

2 Torlódásszabályozás

Az Internet forgalmának a torlódásszabályozására évtizedek óta a TCP protokollt (*Transmission Control Protocol, szállításvezérlő protokoll*) használják. Az Internet folyamatos evolúciója során nagyon sokat változott a hálózat és az azon használt alkalmazások forgalmának jellege, ezért a TCP is folyamatos módosításra szorult. A vezeték nélküli vagy a nagysebességű hálózati környezet szintén olyan újabb kihívásokat jelent, amit a jelenlegi TCP verziók csak sokféle kompromisszum árán tudnak megvalósítani.

A mai Internet egyik legfontosabb szállítási protokollja a megbízható adatátvitelt biztosító TCP protokoll sok évtizedes múltra tekint vissza. A kezdeti protokoll, ami a *Network Control Protocol (NCP)* nevet viselte, még a '70-es évekből származik. Ebből a protokollból alakult ki a TCP/IP hálózatok két alapvető protokollja, a hálózati rétegben működő IP protokoll és a szállítási rétegben működő TCP protokoll [1]. A TCP számos funkcióval rendelkezik, ami a megbízható adatátviteli szolgáltatáshoz szükséges. Ezen funkciók közül az egyik legfontosabb a torlódásszabályozás, a hálózat megóvása a túlterheléstől. A kapcsolatorientált TCP protokoll zárthurkú szabályozást végez, melynek során az adó entitás az adási sebességét a beérkező nyugták alapján állítja a hálózati körülményekhez azzal a céllal, hogy a hálózat jó kihasználtsággal működjön, de a túlterhelés ne okozzon összeomlást. A kezdeti verzió az RFC 793 dokumentumban lett rögzítve 1981-ben. Az alap mechanizmust fokozatosan fejlesztették és egészítették ki újabb módszerekkel, mint például a *Slow Start (lassú indulás)*, *Congestion Avoidance (torlódás elkerülés)*, RTO számítás, késleltetett nyugtázás hozzáadása 1989-ben (RFC 1122), szelektív nyugtázás bevezetése 1996-ban (RFC 2018), vagy a *NewReno* verzió definiálása 2004-ben (RFC 3782).

A TCP feladata, hogy egy zárthurkú, visszacsatolt, elosztott rendszerben valósítsa meg a torlódásszabályozást oly módon, hogy a felhasználók hatékonyan tudják kihasználni a rendelkezésre álló erőforrásokat és ezen erőforrások, jelen esetben a hálózati sávszélességek, valamilyen értelemben igazságosan legyenek szétosztva közöttük. Az utóbbi elvárásra a protokollok *fairness* tulajdonságaként szoktunk hivatkozni, ami alapvető hangsúlyt kap a jövő hálózataiban is a hatékonyság mellett. Az új protokollok és szabályozási mechanizmusok esetében – a hagyományos TCP „hagyományos” tervezési módszereitől eltérően – már a tervezési fázisban sikeresen használhatók a szabályozástechnikából és az optimalizálás elméletből ismert eredmények és technikai apparátus.

Egy TCP kapcsolat során a küldő fél adatcsomagokat bocsát a hálózatba, a fogadó oldal pedig kumulatív nyugtákkal válaszol, melynek segítségével az addig helyesen beérkezett csomagokról informálja az adó oldalt. A TCP adó egy nyugta beérkezésekor küldhet ki új csomagot vagy csomagokat a hálózatba, amivel egyfajta „önszabályozás” van beépítve a rendszerbe (*self-clocking*). A torlódásszabályozás a TCP esetében egy csúszó ablakos módszer szerint történik, melynek során a küldő fél egyszerre csak a *torlódási ablaknak (congestion*

window) megfelelő mennyiségű nyugtázatlan csomagot tarthat kint a hálózatban. Ez a torlódási ablak egy az adó entitás által szabályozott belső változó (sok másik mellett), melynek segítségével az adási sebesség kontrollálható. A torlódásvezérlési algoritmus egyik fő feladata ezen változó szabályozása a hálózati viszonyok függvényében. A TCP Reno a kapcsolat különböző fázisaiban különböző algoritmusok szerint állítja a torlódási ablakot. A kapcsolat indulásánál, amikor még nem ismertek a hálózati körülmények az összeköttetés útvonalán, a *Slow Start* algoritmus szerint történik a torlódási ablak és ezáltal az adási sebesség növelése. Ebben a fázisban – az algoritmus nevével ellentétben – a torlódási ablak exponenciálisan növekszik addig, amíg el nem ér egy küszöbértéket vagy csomagvesztés nem következik be. Ezt követően a hosszú távú viselkedést a *Congestion Avoidance* fázis határozza meg, amikor a protokoll az adási sebességet próbálja úgy szabályozni, hogy ne következzen be komoly torlódás. Ebben a szakaszban a torlódási ablak szabályozása az *AIMD (Additive Increase Multiplicative Decrease, additív növelés multiplikatív csökkentés)* mechanizmus alapján történik, melynek hatására a torlódási ablak a jellegzetes *fűrészfog* görbe szerint oszcillál.

Jól látható tehát, hogy a TCP Reno számára a torlódásjelző a csomagvesztési esemény, ami akkor következik be, ha telítődnek a szűk keresztmetszetet jelentő linkeken a várakozási sorok. Ez az ún. *csomagvesztés* alapú torlódásszabályozási elv számos új, nagysebességű TCP verzióban is megjelenik, azonban több hátránya is van. Maga a torlódásjelzés egy „egy-bites” információ (van csomagvesztés / nincs csomagvesztés), így nem tesz lehetővé kifinomult szabályozást. Ezenkívül a csomagvesztés alapú szabályozás magában hordozza a várakozási sorok megtöltését, mivel visszaszabályozás csak csomagvesztés esetében van, illetve az oszcilláció folyamatos jelenlétét, ami a teljes rendszerre vonatkozó stabilitási problémákat vet fel. Egy másik megközelítés az egyes csomagok késleltetését méri és ez alapján állítja az adási sebességet. Ezek a *késleltetés* alapú módszerek, melyek azt célozzák meg, hogy egy összeköttetés csak adott számú csomagot tartson a hálózati út mentén levő várakozási sorokban. Ezen protokollok valamilyen módszerrel megbecsülik a körülfordulási idő (*RTT, round-trip time*) jelterjedésből adódó komponensét és a késleltetés másik komponensét, a sorban állási időt próbálják szabályozni különböző algoritmusok szerint. Ebben az esetben a torlódásjelzésre egy „sok-bites” késleltetés információ szolgál. A legújabb módszerek kombinálják a késleltetés- és a csomagvesztés alapú szabályozási elveket és valamilyen *hibrid* módszert alkalmaznak a torlódásszabályozásra, melyben az adó reagál a csomagvesztésekre és a késleltetés változására is. Kifinomultabb mechanizmust alkalmaznak azok a protokollok, melyek passzív vagy aktív *mérési módszerekkel* próbálják megbecsülni a rendelkezésre álló sáv szélességet és ez alapján végzik a szabályozást. Az eddig bemutatott alapelvek esetében az intelligencia az adó oldalon van implementálva és a konkrét algoritmusok rugalmasan fejleszthetők, cserélhetők és nem igénylik a hálózat egyéb elemeinek módosítását. Van azonban olyan elképzelés is, hogy a torlódás aktuális mértékéről a hálózati routerek adjanak explicit információt az adó oldalnak. Ezek az *explicit torlódásjelzési* módszerek azonban a jelenlegi hálózati eszközök módosítását igénylik.

Az alábbiakban a teljesség igénye nélkül röviden áttekintjük a fontosabb protokollokat, illetve azok lehetséges jövőbeli szerepét. Erről egy tömör összefoglalás található az 1. táblázatban, míg egy bővebb változat [2]-ben olvasható. Először a hagyományos TCP-hez közelebb álló jelentősebb csomagvesztés alapú verziókat mutatjuk be. Az egyik első nagysebességű TCP verzió a *HighSpeed TCP* [3], ami az *AIMD* elv egyszerű módosításán alapul. A protokoll azáltal válik adaptívvá és többé-kevésbé skálázhatóvá, hogy az additív növelés és a multiplikatív csökkentés hagyományosan fix paramétereit a torlódási ablak függvényében változtatja. Ezáltal nagysebességű és nagy kiterjedésű környezetben, nagy torlódási ablakok

esetében a növekedés agresszívabb, a visszaszabályozás pedig jóval enyhébb lesz. Egy másik korai verzió a *Scalable TCP* [4], ahol a skálázhatóságot az *MIMD* mechanizmus bevezetésével oldják meg. Itt a hosszú távú viselkedést meghatározó *Congestion Avoidance* fázisban is egy a *Slow Start* algoritmushoz hasonló multiplikatív növelést alkalmaznak (természetesen más, kevésbé agresszív működést eredményező paraméterekkel) a hagyományos additív helyett. A *Scalable TCP* jövőbeli alkalmazhatósága azonban alapvetően megkérdőjelezhető, mivel nagyon komoly *fairness* problémái vannak [2]. A hagyományos AIMD-elv és így a TCP Reno nem képes biztosítani az igazságos működést abban az esetben, ha a különböző kapcsolatoknak jelentősen különbözik a körülfordulási idejük. Ezt az ún. „*RTT unfairness*” problémát igyekszik orvosolni a BIC TCP [5] és annak egy továbbfejlesztése a CUBIC [6]. A BIC TCP esetében egy additív növelési és egy bináris keresésen alapuló módszer van kombinálva egyéb a hatékonyságot és a *fairness*-t javító módszerekkel, míg a CUBIC hasonló működést próbál elérni jóval egyszerűbb szabályozási mechanizmussal, ahol a torlódási ablak korábbi lineáris, logaritmusos és exponenciális szakaszai helyett köbös függvényekkel történik a közelítés. Fontos megemlíteni, hogy a Linux kernel 2.6.8-as verziójától az alapértelmezett TCP protokoll a BIC TCP volt egészen a 2.6.19-es verzióig, ahol a CUBIC váltotta fel. Jelenleg a CUBIC a Linux rendszerek alapértelmezett TCP protokollja, ezáltal a mai hálózati forgalomban jelentős szerepet kap.

Jelentős kutatási eredmények születtek a késleltetés alapú torlódásszabályozás témakörében is számos protokoll javaslattal. A késleltetés alapú szabályozás először a TCP Vegas protokollban jelent meg. Ennek a nagysebességű környezethez továbbfejlesztett, módosított változata a FAST TCP [7]. A szabályozás a korábbiakban említett elven történik, a protokoll a mért körülfordulási késleltetés alapján megpróbálja két paraméterként beállított határérték között tartani a várakozási sorokban levő csomagjainak számát. Itt nehézséget okoz a megfelelő paraméterválasztás, illetve annak hangolása. A FAST TCP protokoll a megfelelő paraméter beállítás mellett biztató eredményeket mutat mind hálózati kihasználtság, mind *fairness* szempontból [2]. A legújabb TCP javaslatok különböző algoritmusok szerint kombinálják a csomagvesztés- és a késleltetés alapú szabályozási elveket. Több ilyen módszert publikáltak és implementáltak, ezek közül talán a legfontosabb a Compound TCP [8]. Ezt a verziót a Microsoft Research munkatársai dolgozták ki és a Windows Vista, valamint a Windows Server 2008 operációs rendszerek alapértelmezett TCP protokollja. Ezenkívül elérhető más Windows változatokhoz is „*hotfix*” formában és elkészült a Linux implementáció is. A protokoll lényege, hogy két torlódási ablak változót tart karban, egy hagyományos AIMD alapon szabályozottat és egy késleltetés alapú módszerrel vezéreltet. Az aktuális torlódási ablak a két komponens összegeként adódik. A különböző hálózati állapotokra más és más módon vezérli a két komponensét úgy, hogy az eredő viselkedés hatékony hálózati kihasználtságot és a hagyományos TCP protokollal igazságos együttműködést mutasson.

A sávszélesség becslésen alapuló torlódásszabályozási módszert alkalmazó TCP verziók közül az egyik legfontosabb a TCP Westwood [9], melynek számos változata van. Az évek során több becslési módszert dolgoztak ki, implementáltak és teszteltek, melyeket különböző változatokba építettek bele. Végül pedig meg kell említeni az explicit torlódásjelzésen alapuló és ezáltal módosított hálózati architektúrát igénylő XCP [10] protokollt. Itt a routerek explicit módon informálják az adó oldalt a torlódás mértékéről és jelezhetik felé az aktuálisan számára elérhető adási sebességet. Ebben a módszerben a kihasználtság- és a *fairness* szabályozása jól különválasztható. A protokoll komoly hátránya, hogy a hálózati routerek módosítását igényli.

Az, hogy az itt bemutatott (illetve a korlátos hely miatt kimaradt) számos TCP javaslat közül melyek lesznek a jövő hálózatában meghatározóak, nem lehet megmondani. Jelenleg is intenzív kutatás zajlik a világ több meghatározó kutatóintézetében, melynek során igyekeznek a meglévő javaslatokat összehasonlítani. Azonban ez nem egyértelmű feladat, mivel nincsenek egységes szempontok, metrikák, hálózati környezetek és vizsgálati módszerek, melyek konkrét választ adhatnának arra a kérdésre, hogy melyik a „*legjobb*” vagy az „*optimális*” protokoll.

1. táblázat: Nagysebességű TCP protokollok

protokoll	típus	kik, mikor javasolták	főbb jellemzők
HighSpeed TCP	csomagvesztés alapú	S. Floyd, International Computer Science Institute (ICSI), Berkeley University of California, 2003.	AIMD
Scalable TCP	csomagvesztés alapú	T. Kelly, CERN & University of Cambridge, 2003.	MIMD
BIC TCP / CUBIC	csomagvesztés alapú	I. Rhee et al., Networking Research Lab, North Carolina State University, 2004. és 2005.	jó kihasználtság, fairness és stabilitási tulajdonságok
FAST TCP	késleltetés alapú	S. Low et al., Netlab, California Institute of Technology, 2004. (ma: FastSoft Inc.)	bízható fairness tulajdonságok
TCP Westwood	mérés alapú	M.Y. Sanadidi, M. Gerla et al., High Performance Internet Lab, Network Research Lab, University of California, Los Angeles (UCLA), 2001 és 2005 között	több változat, különböző becslési módszerek
Compound TCP	hibrid	K. Tan et al., Microsoft Research, 2005.	AIMD + késleltetés alapú komponens
XCP	explicit torlódásjelzés	D. Katabi et al., Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2002.	routerek módosítása szükséges

A torlódásszabályozási protokollok kutatása eddig azt mutatja, hogy nehéz a sokféle újabb kihívásokra egy optimális megoldást találni és nem valószínű, hogy lehetséges lesz egy univerzális protokollt kifejleszteni. Ezt igazolja az is, hogy az utóbbi évtizedben az újabb és újabb alkalmazások sokszor saját torlódásszabályzó módszereket használnak, amelyek sokszor nem tudnak hatékonyan együtt működni a TCP-vel (*TCP friendliness*).

Egy érdekes kutatási irány amit a *GENI (Global Environment for Network Innovations)* is támogat, hogy a probléma megoldását egy teljesen újszerű megközelítéssel is lehetne kezelni, ami nem igényel torlódásszabályzást. Ennek az alternatív megoldásnak az alapelve az, hogy minden alkalmazás amilyen gyorsan lehet próbálja elküldeni mindig az adatait. Természetesen ha sok alkalmazás küld maximális sebességgel akkor magas csomagvesztés várható. Ezen vesztesékből eredő hibákat azonban hatékony hibajavító kódolással védeni lehet.

Ennek a megoldásnak számos előnye van, de természetesen felvet néhány eddig még nem megoldott problémát is. Az egyik legfontosabb előny, hogy ezzel az eljárással a leghatékonyabb erőforrás kihasználást tudunk elérni a hálózatban, hiszen minden forrás maximális sebességgel ad, ezért a módszer a rendelkezésre álló erőforrásokat azonnal kihasználja. További előny, hogy a hálózati routerek egyszerűek lehetnek és nem szükséges a csomagtárolás sem. Ennek az is következménye, hogy a végpontok közötti csomagkésleltetést alacsony értéken lehet tartani. Ez a technika megoldást nyújthat a tároló nélküli optikai kapcsolókat tartalmazó hálózatok számára is.

A javaslat természetesen felvet olyan problémákat amiket szükséges megoldani a hatékony működéshez. A legfontosabb kérdés az, hogy a hibajavító kódolási technikákkal lehetséges-e hatékony működést elérni. Az utóbbi években jelentős a fejlődés a hibajavító kódolási módszerek területén is és a kidolgozott módszerek lehetséges megoldást nyújtanak a kérdésre, mint például a *Fountain Codes* [11] alkalmazása. További fontos megoldandó feladat a *fairness* biztosítása a különböző folyamok között. Ennek megoldása egy a routerekben alkalmazott szelektív csomageldobó módszer lehet. Erre egy lehetséges érdekes technika például az *Approximate Fair Dropping (AFD)* [12] alkalmazása lehet.

A kutatás ebben a kérdésben még csak a kezdeti fázisban van, de máris számos meglepő eredményhez vezetett. Úgy tűnik, hogy tévhitnek bizonyul az, hogy a „*torlódási összeomlás*” jelensége olyan gyakori volna a torlódásszabályzás nélküli hálózatokban, mint azt eddig gondoltuk [13]. A kezdeti eredmények azt mutatják, hogy ilyen hálózatokban is a hatékonyság 90% felett marad a legtöbb topológia esetén akkor, ha az alkalmazások maximális sebességeinél a link kapacitások egy-két nagyságrenddel nagyobbak. Amennyiben fair csomageldobási eljárást is alkalmazunk meglepően jó stabilitási és hatékonysági jellemzőket lehet elérni. Számos gyakorlati kérdésre azonban még nincs válaszunk, mert az eddigi vizsgálatok jó része sok olyan egyszerűsítő feltételezéssel élt, amit a gyakorlatban nem hanyagolhatunk el, mint például a tökéletes hibajavító kód feltételezése.

A fenti kérdések alapos megválaszolása ma még intenzív kutatás tárgya és remélhetőleg a közeljövőben válaszokat kapunk majd arra a kérdésre, hogy lehetséges-e a jövő Internetét felépíteni úgy, hogy nem lesz szükség semmilyen torlódásszabályzásra, így a ma még általánosan használt TCP és annak minden problémája elfelejthető.

3 Paradigmaváltás a hálózatmenedzsmentben

Az aktuális hálózati kutatások jelentős része tényként kezeli, hogy a jövő Internetét a résztvevő kommunikációs csomópontok (billiók nagyságrendben mért) igen nagy száma, illetve az azok között létrejövő komplex és heterogén kapcsolathalmaz jellemzi majd. Mindemellett a hálózattól jövőben elvárt funkcionális követelmények is igen széleskörűek lesznek, a hálózat menedzsment emberi erővel többnyire már nem megoldható, minél magasabb szintű automatizmus megvalósítása lesz szükség. Egy ilyen nagyléptékű, bonyolult rendszer megtervezése olyan összetett feladat, melyhez ma még nem állnak rendelkezésre megfelelő módszerek.

A nagyméretű hálózatok leírására alkalmas eszköztár az elmúlt években intenzív fejlődésen ment keresztül, ma már az e forrásból származó valós alkalmazások nem ritkák, példaként a komplex keresés problémakörére melyre részletesebben is kitérünk majd. A jövőbeli Interneten, mint összetett rendszerben, lezajló folyamatok vizsgálata is modern eszközöket igényel. A hagyományos, a globális viselkedést a részek működésének összességére visszavezető -- induktív -- metodológia a rendszer komplexitása révén érvényét veszti. A probléma ésszerű kezeléséhez, olyan önszerveződő rendszer modellben célszerű gondolkodni, melyben a központi irányítást (centralizált folyamatszabályozást) az elosztott működés (decentralizált döntésmechanizmus) váltja fel. A hálózat monitorozása a részek független megfigyelése helyett “makro” szinten, a megjelenő un. kiemelkedő (emergens) tulajdonságok szintjén történik.

3.1 Nagyméretű hálózatok

Az Internetet érintő egyik legfontosabb folyamat napjainkban az IP protokoll több mint 20 évvel ezelőtt bevezetett 4-es verziójáról az IPv6-ra való áttérés. Ennek oka jelentős részben, hogy a rendelkezésre álló hálózati címek lassan elfogynak. Az IPv4 32 byte-os címtartománya (~4.3 milliárd variáció) még azokban az időkben keletkezett, amikor átlagosan egy számítógépre (mainframe) kb. 200 felhasználó jutott. Napjainkban ez nagyjából az 1:1 aránynál tart, több mint 1,2 milliárd felhasználó mellett, amely szám, azonban akár már a közeljövőben megduplázódhat elsősorban a fejlődő országok révén (becslések szerint a felhasználók száma minden évben kb. 150 millióval növekszik). A mobil eszközök terjedésével ugyanakkor az eszköz/ember arány rövidtávon várható, hogy még tovább fog nőni és eléri a felhasználónkénti 200 hálózati eszköz értéket. A mobil eszközök száma becslések szerint 2010-re utoléri az Internetbe kapcsolt PC-k számát. Jellemző tendencia, hogy a digitális személyi asszisztens funkciót betöltő eszközök, személyi kommunikátorokká válnak, ami azonban az igazi áttörést hozza az az infokommunikációs implantátumok megjelenése. Az érzékelők és beavatkozók (szenzorok/aktuátorok) világában intelligens anyagok segítségével vezetékmentes kommunikációra képes mikroeszközök kerülnek beépítésre az emberi szervezetbe, melyek élet fenntartó/támogató ill. ember-gép interfész szerepet is betölthetnek. A szenzor-hálózatok legegyszerűbb formációjaképp az RFID (Radio Frequency IDentification) technológiát, a magukat azonosítani tudó aktív vagy passzív eszközöket, máris széles körben alkalmazzák.

Az Internet komplexitását azonban nem csupán a résztvevő eszközök száma növeli. Az elérhető szolgáltatások rohamos növekedésével mind nagyobb az igény a fizikai kapcsolatoktól független logikai kapcsolati háló kiépítésére. A virtuális internetszolgáltatók, mobilszolgáltatók, ill. a szolgáltatás oldaláról a virtuális magánhálózatok fejlődése mind ebbe az irányba mutat, de hasonló hatása van az egyenrangú hálózati (P2P) kommunikációs eljárás mind szélesebb körű alkalmazásának is. Az ilyen struktúrákhoz szükséges kapcsolatok ún. átfedő (overlay) hálózatok segítségével alakíthatók ki. Mindez jelentősen megnehezíti a hálózatok effektív menedzselhetőségét.

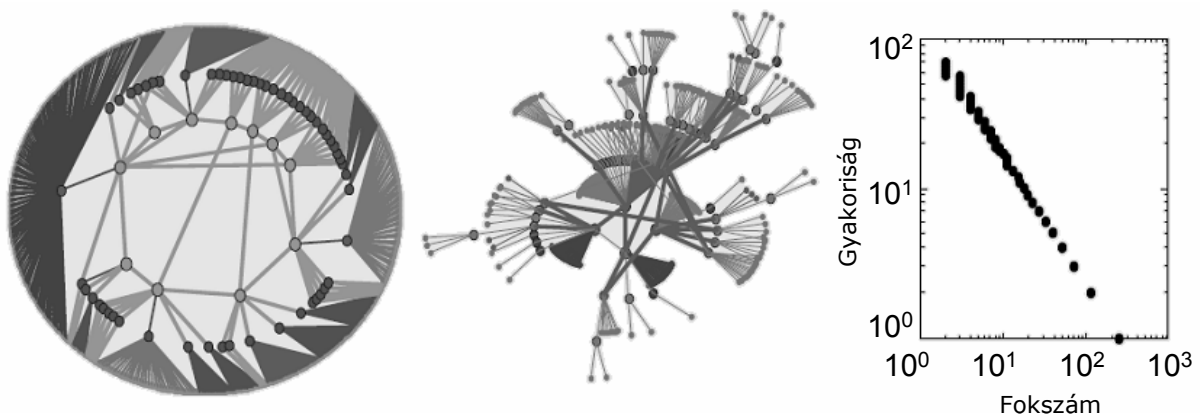
Az igen nagy méretű, komplex hálózatok effektív vizsgálatához első közelítésben olyan elmélet kidolgozására van szükség, mely eltekint az hálózatot alkotó csomópontok egyedi tulajdonságaitól és a kapcsolatok struktúrájára, a hálózat jellegére, felépítésére koncentrál. Ilyen értelemben tehát az eredmények az információs technológia területétől elrugaszkodva, sokkal szélesebb körben is alkalmazhatóak. Kétségtelenül számos való életbeli hálózatot lehet leírni komplex hálózati modellekkel. Ilyen például egy szervezet, ami egymással kapcsolatban álló emberek hálózata. Ide sorolhatjuk továbbá a táplálkozási láncokat, a globális gazdasági hálózatot, vagy akár a szavak közötti kapcsolatokat egy nyelvben. Érdeemes megemlíteni még a betegségeket is, amelyek az emberek közösségi hálózatán belül terjedhetnek (pl. szexuális úton terjedő betegségek). A komplex hálózatok kutatásának középpontjában tehát a hálózatok különböző tulajdonságaival és dinamikus viselkedéseivel kapcsolatos kérdések állnak.

Az 50-es évek óta a komplex hálózatokat az Erdős-Rényi [14] modellel írták le, amelyek akkoriban az egyetlen ésszerű és kellően precíz megközelítése volt ezeknek a hálózatoknak. Ennek ellenére a kutatók sejtették, hogy a valós életben előforduló komplex hálózatok se nem teljesen regulárisak, se nem pedig teljesen véletlenszerűek. A számítógépek és az internet elterjedése során olyan nagyméretű adatbázisok jöttek létre, amelyekből valós komplex

hálózatok adatai könnyen hozzáférhetővé váltak. Ezeknek a topológiai adatoknak a vizsgálata során az elmúlt évtizedben két jelentős felfedezés született, az egyik a Watts és Strogatz féle „kicsi a világ” hatás valamint a Barabási-Albert skálafüggetlen hálózati modell. A kisvilág hatás azt fejezi ki, amit Milgram is kimutatót a 60-as években a híres kísérletében [15], azaz átlagosan két véletlenszerűen kiválasztott ember között kevés kapcsolaton keresztül vezet a legrövidebb út a világ közösségi hálózatában, ahhoz képest hogy többmilliárd ember él a földön. A skálafüggetlen hálózati modell pedig a komplex hálózatok egy másik nagyon érdekes tulajdonságát világítja meg, tudniillik a valós komplex hálózatok fokszámeloszlásának hatványfüggvény alakja van, nem pedig a véletlen hálózatokra jellemző Poisson eloszlás. A fokszámeloszlás skálamentessége szemléletesen azt jelenti, hogy nagy fokszámú csomópontok (hub-ok) kialakulása nagy méretű hálózatokban igen valószínű (ld. 1. ábra).

A komplex hálózati modellek alapvető jellemzéséhez tipikusan három karakterisztikus tulajdonságot szokás kiemelni: az átlagos úthosszt, csoportképződési (klaszterezettségi) együtthatót valamint a fokszámeloszlást [16]. Az átlagos úthossz egy gráf tetszőleges két csúcsa közötti (legrövidebb) távolságok átlaga. Ez a tulajdonság jól jellemzi a hálózat „effektív” méretét. Érdekes felfedezés volt, hogy a legtöbb valós komplex hálózatban az átlagos úthossz relatíve rövid. Ez a méretbeli tulajdonság vezetett a „kisvilág” elnevezéshez.

A komplex hálózatok alapparamétereinek felmérése fontos lépés volt a tudományterület fejlődésében. Ezek után intuitív módon fel lehet állítani különböző matematikai modelleket, amelyek hasonló statisztikus tulajdonságú hálózatokat eredményeznek.



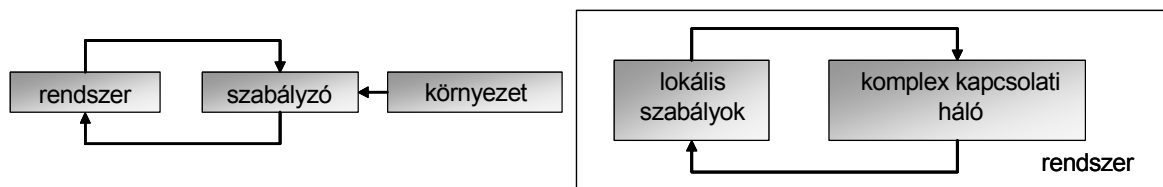
1. ábra Az Internet router szintű modelljei: Mérnöki modell (balra), skálafüggetlen modell (középen) és a fokszámeloszlás (jobbra)

A valós komplex hálózatok további érdekes területe a dinamikus rendszerek által felvetett problémák. Érdekes megfigyelés pl., hogy az interneten haladó útvonalválasztó üzenetek szinkronizációjakor, ugyan a hálózat topológia nem kifejezetten ez alapján lett kialakítva, az útvonalválasztók mégis könnyen összeszinkronizálják az üzenetváltásaikat, és ha a hálózat egyik részén megtörik a szinkronizációt valamilyen véletlenszerűség bevezetésével (módosítunk egy determinisztikus protokollt), a hálózat egy másik része szinkronizálódik össze [17]. Az ilyen, és

ehhez hasonló jelenségek pontosabb megértéséhez egy további részben független tudományterület, az önszerveződő rendszerek vizsgálatára van szükség.

3.2 Evolúció és önszerveződés kommunikációs hálózatokban

A mai távközlési rendszerek a jól bevált globális hálózatmenedzsment paradigmája alapján működnek. Ez a megközelítés a rendszer irányítását egy külső szabályzó egység megvalósításával oldja meg. Ez az egység folyamatosan figyeli a rendszer állapotát és a környezetet. Ha a rendszerben valami probléma lép fel, vagy a környezet megváltozik, a szabályzó kiszámítja a megfelelő megoldást, és a rendszert a megfelelő állapotba vezérli (2. ábra). Ez a megoldás egészen addig működőképes, amíg a keresett megoldást sokkal gyorsabban meg tudjuk határozni, mint amilyen gyorsan a probléma változik. Ez a kritérium természetesen határt szab a rendszer komplexitásának és dinamikájának, hiszen a szabályozó sokkal bonyolultabb kell, hogy legyen, mint maga a rendszer. Gondolhatunk itt arra, hogy pl. a link-state útválasztási protokollok nagyméretű, komplex topológián nem alkalmazhatók.



2. ábra A globális menedzsment (balra) és az önszerveződő rendszer (jobbra) felépítése

Egy természetes módja a komplexitás kezelésének az önszerveződés, amellyel magának a rendszernek a komplexitását kihasználva megbirkózhatunk a menedzsment komplexitásával is. Egy önszerveződő rendszerben nagyszámú, bonyolult módon összekapcsolt eszköz egyszerű lokális szabályok végrehajtásával, valamilyen globális viselkedést valósít meg. Látható, hogy ezzel a szabályozó hurok a rendszer belsejébe kerül (2. ábra), így a rendszer képes önmagát szervezni. Egy ilyen rendszer gyakorlatilag megadott keretek között önállóan fejlődik, evolvál, viszont annak ellenére, hogy nem tudjuk pontosan mi történik a rendszer egy adott pontján, mégis rendszer-szinten pontosan leírható globális viselkedést figyelhetünk meg. Az önszerveződés tehát nem valamely rendszerre jellemző tulajdonság, hanem egy olyan *paradigma*, amely segítségével bizonyos valós rendszerek (így pl. a bonyolult kommunikációs hálózatok) könnyebben megérthetők illetve tervezhetők.

Az önszerveződés klasszikus jegyeit mutató algoritmusok már a kezdetektől szerepet játszottak az Internet kialakulásában ill. sikerében. Gondoljunk itt pl. a cikk előző fejezetében taglalt kommunikációs protokollra, a TCP-re. E protokoll hálózati torlódás kezelő technikája is egyfajta önszerveződő technika abban az értelemben, hogy decentralizált módon képes egy linken jelenlévő forgalmi folyamatok jellemzőit szabályozni, elérve ezzel valamely előre definiált emergens hatást, pl. fair erőforrás szétosztás, magas linkkihasználtság. A folyamat során minden egyes végpont szigorúan lokális információ alapján önálló lokális döntéseket hoz egy globális cél érdekében. További példa az Ethernetből jól ismert CSMA/CD algoritmus. A CSMA/CD

szabályrendszere biztosítja, hogy a közös csatornán kommunikáló felek képesek legyenek a szimultán adások és az ezekből következő ütközések detektálására, valamint ezek elhárítására központi irányítás nélkül is. Amennyiben a CSMA/CD csatornán több fél azonos idejű adási kísérlete miatt ütközés jön létre, úgy az érintett felek külön-külön, de véletlenszerűen meghatározott ideig felfüggesztik adási kísérleteiket abban a reményben, hogy így a következő próbálkozás alkalmával már nem egyszerre próbálnak majd adni. Amennyiben az újabb adási kísérlet során ismét ütközés jön létre, úgy a közreműködő felek növelik a várokozási időt, így csökkentve az újabb ütközések esélyét. Könnyen belátható, hogy ezen egyszerű lokális szabályok segítségével a rendszer megoldja a közös csatorna hatékony és fair felosztását a kommunikáló felek között.

Az önszerveződő rendszerek igen intenzív interdiszciplináris kutatási területet jelentenek, és vizsgálatuk számos tudományágban (biológia, fizika, társadalomtudomány) központi kérdés. Az ilyen elven működő rendszereknek számos előnyös tulajdonsága van, ugyanakkor a mérnöki gyakorlatban mégis igen kevés helyen találkozunk velük. Ennek oka leginkább, hogy az önszerveződés mechanizmusát még nem értjük teljesen. Az ilyen rendszerek tervezése a hagyományostól eltérő alapvetően új szemléletmódot és tervezési eszközöket kíván.

3.3 Keresés nagy hálózatokban

A természetben sok nagyméretű hálózat (emberi szociális kapcsolatok, fehérje hálózatok, idegsejt hálózatok stb.) igen fontos jellemzője a jó kereshetőség. Milgram 1961-es kísérlete [18] megmutatta, hogy az emberi társadalomra nem csupán az igen rövid utak megléte a jellemző, de az emberek képesek igen hatékonyan meg is találni azokat pusztán a hálózat nagyon kicsi, lokális részének ismeretére támaszkodva.

A jó kereshetőség -- természetben önszerveződő módon kialakuló -- tulajdonságának mesterséges hálózatokban való átvitele komoly kihívást jelent a kutatók számára. Az egyik legfontosabb alkalmazási terület a sok-csomópontos nagyméretű kommunikációs hálózatok hatékony megvalósítása.

Az Internet eredeti koncepciójának kialakításában az egyik legfontosabb elem a jó útvonalválasztási protokoll technológia megalkotása volt. A jelenleg is használatos keretrendszer alapját kitüntetett szerepű eszközök (routerek), ill. az azokból létrehozott hálózat alkotja. A struktúra jellemzője, hogy egyes kiemelt eszközöknek szüksége van részben vagy egészben a globális hálózat ismeretére az útvonalválasztási döntés meghozatalához. Hasonló módon, mivel a megfelelő hálózat topológiai ismeretek megszerzéséhez időre van szükség, a rendszernek kvázi statikus jellegűnek kell lennie, struktúra változás csak igen korlátozott sebességgel történhet. Figyelembe véve, hogy a jövő globális internetjét várhatóan a jelenleginél akár két-három nagyságrenddel nagyobb számú csomópontból álló dinamikusán változó struktúrájú hálózat jellemzi majd az eredeti koncepció számottevő módosításra szorul.

A kereshetőség hatékony megvalósítását az egyenrangú (P2P) hálózatok területén is kiemelt problémaként kezelik. E hálózatok az Internetet alpinfrastruktúraként felhasználva ún. átfedő (overlay) hálózatot alkotnak, ezen működnek a speciális P2P címzési és tartalomkeresési algoritmusok. Az erős hálózati dinamizmushoz, felhasználók gyors, véletlenszerű ki és

belépéséhez, az alkalmazott eljárások a determinisztikus, de kevésbé skálázható „hálózat-elárasztás” technikát alkalmazzák vagy kétséges kimenetelű, de skálázhatóbb sztochasztikus eszközökkel operálnak. Az így létrejött megoldások mindazonáltal továbbra is erősen függenek az internet adta lehetőségektől. A tanszéken folyó kapcsolódó kutatások célja, olyan átfedő hálózati architektúra (ill. hozzá tartozó protokollok) kidolgozása, mely a résztvevő nagyszámú tag aktív mozgását (ki- ill. be lépését, meghibásodását) minimális teljesítmény csökkenés mellett képes lekezelni. A kutatások újszerűségét elsősorban a P2P átfedő hálózatok hagyományos gyűrűszerű jellegétől eltérő komplex hálózati struktúrák/elvek alkalmazása adja.

A jövő hálózati kutatások újabbán mind gyakrabban vetik fel a probléma ún. „clean slate” tiszta lappal való megoldásának lehetőségét. A javasolt technikák számottevő hasonlóságot mutatnak a jóval korábban már az infrastruktúra mentes (ad-hoc) hálózatok kialakítása esetében is kutatott eljárásokkal. Az egyik ilyen elképzelés alapja a földrajzi elhelyezkedés alapú ún. geográfiai vagy geometriai címzés és az azt figyelembe vevő keresési algoritmusok. A kommunikáló terminálok tehát pl. földrajzi koordinátaikkal jellemzettek és az útvonalválasztást az egyszerű „mohó” algoritmus biztosíthatja: ha X keresi Y-t, X első lépésként megkeresi azon Z szomszédját, aki legközelebb áll Y-hoz. Az algoritmus globális működésének garantálásához a hálózat topológiájának természetesen bizonyos feltételeket teljesítenie tennie, pl. az ad-hoc hálózatok alkotta egységnyi körlap gráf (UDG - Disk Unit Graph) alkalmas struktúra. Olyan esetekben, ahol a szükséges kapcsolódási feltételek nem teljesülnek, tehát pl. előfordul, olyan hogy X nem kapcsolódik Y-hoz, de minden szomszédja távolabb van Y-tól, tehát nincs hova továbblépni, módosított technikák kialakítására van szükség. Ilyen esetekben virtuális koordináták bevezetése adhat megoldást. A feladat tehát ezen virtuális koordináták terminálokhoz rendelése úgy, hogy a mohó feltétel teljesüljön és ezáltal az útvonalválasztás mindig garantálható legyen [19]. A feltétel formálisan az alábbi módon fogalmazható meg:

Minden X és Y ($X \neq Y$) csomópont párhoz létezik, olyan Z, hogy $d(Z, Y) < d(X, Y)$, ahol $d(A, B)$ az A és B távolságát jelöli.

A virtuális koordináták természetesen szükség esetén elrugaszkozhatnak a sík vagy a tér Euklideszi koordinátáitól és egyéb absztrakt halmazokból is választhatóak, ekkor azonban definiálni kell hozzá megfelelő távolságfogalmat is. A fent ismertetett mohó útvonalválasztásra alkalmas virtuális koordináta címzési hozzárendelést, a hálózat mohó beágyazásának (greedy embedding) nevezik. Ha mohó beágyazásra nincs lehetőség a kapcsolati gráf speciális jellege, vagy egyéb körülmények (pl. mozgó vagy meghibásodó csomópontok ill. kapcsolatok okozta dinamikus szerkezetváltozás) miatt kiegészítő keresési eljárásokra lehet szükség, ilyen megoldás például a irány/zárvány alapú útvonalválasztás (face routing) [20]. Aktív kutatási területeinkhez tartozik az adott topológiai kényszerfeltételek (pl. maximum fokszám) mellett hatékonyan működő komplex hálózati keresési ill. topológia-menedzsment algoritmusok vizsgálata.

A fentiekben ismertetett útvonalválasztási technikák közös jellemzője, hogy igen könnyen skálázható nagy hálózatokra is, hiszen az egyes csomópontoknak csak a vele kapcsolatban álló szomszédait kell ismernie. Nem szükséges pl. nagy cím-táblák karbantartása, ill. a döntési mechanizmus is igen egyszerű. Az ilyen típusú technikákat gyakran router-menetes útvonalválasztásnak is szokás nevezni. Az eljárás halmaza igazán hatékony formát olyan kiegészítő címzési algoritmusokkal nyerhet, mely a hálózati címeket lokális szabályokon alapuló,

önszerveződő módon tudja biztosítani. Kutatásaink az elméleti alapok vizsgálata mellett konkrét eljárások megvalósítását célozza.

A nagyméretű, dinamikus ill. struktúramentes hálózatok menedzsmentje napjainkban igen aktívan kutatott terület, melyhez mára számos alaperedmény áll rendelkezésre, de a technológiai alkalmazáshoz az igazán nagy kihívások még hátra vannak.

4 Társadalmi-gazdasági szempontok a jövő Internetében

A kommunikációs hálózatok tervezésében, üzemeltetésében a korábbi évtizedekben a technológiai szempontok voltak elsődlegesek. Az Internet együttműködő szervezetek hálózataként jött létre, ahol a közösségi érdek szerint készítették az átviteli eljárásokat. Az Internet fejlődésével egyre több profit orientált vállalat kapcsolódott a globális hálózathoz, akik elsősorban saját érdekeiket tartják szem előtt, a hasznuk maximalizálásában érdekeltek. Ezért már jelenleg is sok rendszer tervezésekor figyelembe veszik a társadalmi, gazdasági szempontokat, különböző ösztönző eljárásokkal próbálják a résztvevők elvárt viselkedését kikényszeríteni. Ezen törekvések a jövő Internetének kialakítása során még fontosabb szerepet fognak játszani, több nemzetközi kutatási projekt elsőszámú célja a gazdasági-társadalmi szempontok érvényesítése, ilyen például az NSF FIND [21] és az Euro-NF [22].

Azonban számos jelenlegi rendszerben is jelen vannak már a szereplők érdekeit figyelembe vevő, a felhasználók viselkedését befolyásoló módszerek. A peer-to-peer alapú fájlcsere rendszerek sikeressége azon alapul, hogy a résztvevők együttműködését a beépített szabályokkal elősegítik. Például a Bittorrent fájlcsere esetén azok a felhasználók tölthetnek le adatokat gyorsan, akik maguk is hozzájárulnak a rendszer működéséhez, adatok feltöltésével [23]. Hasonlóképpen, gazdasági megfontolások alapján osztanak el szűkös erőforrásokat (hirdetési terület) aukciós rendszerek segítségével az Internetes hirdetési vállalatok [24]. Azonban nem csak az alkalmazási rétegben alkalmaznak társadalmi-gazdasági módszereket. Az alsóbb rétegekben például vizsgálják a jelek egymásra hatását, de az Internetes útvonalválasztás során is fontos figyelembe venni, hogy az egyes szereplők eltérő érdekekkel rendelkeznek [25].

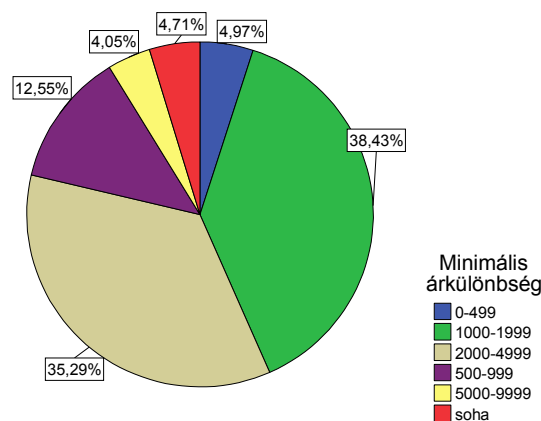
Az egyes szereplők eltérő érdekeit játékelmélettel lehet vizsgálni, amely megfelelő eszközt nyújt a modellezésre, a stratégiák vizsgálatára. A korábban említett aukciós eljárások mellett fontos szerepe van a mechanizmus tervezésnek (mechanism design) is, mellyel kikényszeríthető a szereplők elvárt viselkedése.

A következőkben két kutatási területet (internet szolgáltatók árképzése és közösségi oldalak felhasználóinak aktivitása) mutatunk be, ahol szintén a társadalmi-gazdasági szempontok kerülnek előtérbe.

4.1 Internet szolgáltatók árképzése előfizetői hűség esetén

A helyi Internet szolgáltatók fontos szerepet játszanak a teljes hálózat életében, hiszen a végfelhasználók számára biztosítják az Internet hozzáférést. Ezen vállalkozások technológiai kihívások mellett, mint például az egyre gyorsabb és jobb minőségű Internet hozzáférés biztosítása, gazdasági problémákkal is szembesülnek. A cégek főleg a forgalmazott adatmennyiség után fizetnek a náluk magasabb hierarchia szinten elhelyezkedő Internet szolgáltatóknak (Tier-1, Tier-2 szolgáltatóknak), azonban a végfelhasználók általában átalánydíjat fizetnek, sokszor a forgalmazott adatmennyiségtől függetlenül. A helyi Internet szolgáltatók elemi érdeke, hogy az Internet hozzáférést olyan áron kínálják, ami a lehető legnagyobb bevételt biztosítja számukra. A felhasználói viselkedés megismerésével a szolgáltatók olyan árakat szabhatnak meg, melyek több bevételt eredményeznek. A felhasználók viselkedésének egyik fontos része a hűség. A hűséges előfizetők olyankor is a megszokott szolgáltatónál fizetnek elő az Internetre, ha egyébként más cégek kedvezőbb csomagokat is kínálnak. Az előfizetői hűség létező jelenség az Internet szolgáltatói piacon, több európai ország kommunikációs hivatalának tanulmánya is beszámol róla [26-29]. Az utóbbi évek felmérése alapján az Egyesült Királyságban az előfizetők 73%-a, Írországban, Finnországban és Máltán 84%-a, míg Portugáliában 81%-a volt hűséges előfizető. Magyarországon is jelentős előfizetői hűséget mutatnak a váltás adatok, hiszen 2007-ben a legnagyobb szolgáltatók esetén még a 10%-ot sem haladta meg a szolgáltatót váltók aránya [30].

Az általunk végzett közvélemény-kutatás eredménye szerint az előfizetők hűsége a szolgáltatók árkülönbségének függvénye. A válaszadók többsége hűséges volt a szolgáltatójához (a megkérdezettek 60%-a nem váltott szolgáltatót az elmúlt öt évben), azonban az emberek döntő többsége megfelelő árkülönbség esetén lecserélné jelenlegi szolgáltatóját. Mindössze a válaszadók 5% mondta azt, hogy bármennyivel is lenne olcsóbb egy másik szolgáltató hasonló előfizetés csomagja, ő nem hagyná el jelenlegi szolgáltatóját. Az árkülönbségekhez tartozó pontos százalékokat az 3. ábra illusztráltuk. A kérdőív további feldolgozása megtalálható a csoportunk honlapján [31].



3. ábra Minimális árkülönbség, amikor a válaszadók szolgáltatót váltanának

A megfigyelt előfizetői viselkedés alapján játékelméleti eszközöket felhasználva meghatározhatóak azok a piaci feltételek (a maximális ár és az árkülönbség aránya), melyek

esetén nem szükséges, hogy a szolgáltatók versenyezzenek az előfizetőkért, a lehető legmagasabb áron tudják a terméküket értékesíteni. Kutatásunk során kiindulásként felhasználtuk azt a korábbi eredményt, mely szerint az előfizetői hűség fontos szerepet játszhat az Internet szolgáltatók árképzésében [32]. Az ismertetett eseten kívül megvizsgáltuk, milyen stratégiák célravezetőek akkor, ha nem áll rendelkezésre elegendő információ az árképzés során [33], továbbá mi a helyzet olyan piacokon, ahol új Internet szolgáltatók jelennek meg [34,35].

4.2 Közösségi oldalak felhasználói aktivitása

A felhasználók szerepe kulcsfontosságú az internetes közösségi oldalak fejlesztésében és sikerességében is. Naponta jelennek meg újabb és újabb közösségi oldalak, melyek bár technológiai szempontból kifogástalanok, mégsem válnak széles körben ismertté. Az oldalak sikeressége a felhasználók viselkedésén múlik, hiszen az oldalak legjelentősebb bevételi forrása hirdetések értékesítéséből származik: minél több időt töltenek el a felhasználók az oldalon, annál több hirdetési felületet lehet eladni. Ennek ellenére kevés információt publikáltak eddig a felhasználók aktivitásáról. Az ismertetett társadalmi szempont vizsgálata érdekében széleskörű mérést végeztünk, majd megvizsgáltuk a felhasználók viselkedését különböző népszerű közösségi oldalon (Bebo, Flixster, MySpace és SkyRock) az oldalon töltött idejük alapján.

A mérés elve a következő egyszerű észrevételen alapult. A vizsgált közösségi oldalakon a felhasználók adatlapján megfigyelhető, hogy az illető mikor tartózkodik az oldalon. Ezt kihasználva lehetőségünk nyílt az egyéni felhasználó viselkedés megfigyelésére. A több mint 3000 egyéni oldalt ismételt, perces mintavételi időközlel letöltöttük a Planetlab [36] erőforrásait használva, feldolgoztuk, majd az így kapott mérési adathalmazt elemeztük statisztikai módszerekkel. Az oldalon eltöltött időn kívül feljegyeztük, hogyan alakult az egyes felhasználók kapcsolatainak száma.

A felhasználókat viselkedésük alapján csoportokra bonthatjuk. A csoportok meghatározása során nem csak a napi átlagos használati időt vettük figyelembe, hanem többek között a napi bejelentkezések számát, és a bejelentkezések között eltelt időt is felhasználtuk. A 2. ábrán a MySpace felhasználók csoportjait szemléltetjük a két bejelentkezés között eltelt átlagos idő és a bejelentkezések átlagos ideje alapján. A vizsgált szempontok alapján 8 eltérő viselkedésű csoport rajzolódik ki. Megfigyelhető, hogy egyes csoportok tagjai nagyon ritkán lépnek be a közösségi oldalra (5-ös, 6-os csoport), míg mások nagyon hosszú időt töltenek el az oldalon egy bejelentkezés alatt (2-es csoport). A további csoportok az aktivitásuk, illetve a bejelentkezési gyakoriság alapján különböztethetőek meg. A mérési eredményeket részletesen [37]-ben ismertettük.



4. ábra MySpace felhasználók csoportosítása

4.3 Összefoglalás

A kommunikációs hálózatok tervezésében egyre nagyobb szerepet kapnak a társadalmi-gazdasági szempontok, melyek a rendszer hosszútávú, hatékony működését biztosítják. Olyan fontos, jelenleg is működő rendszerek alapját képezik ezen elvek, mint például a p2p fájlcsere rendszerek vagy az Internetes hirdetési szolgáltatások.

Két olyan kutatási területet mutattunk be, ahol társadalmi-gazdasági szempontok a meghatározóak. Megvizsgáltuk, hogy milyen módszerekkel modellezhető a helyi Internet szolgáltatók árversenye előfizetői hűség esetén. Később bemutattunk egy olyan mérést, amellyel a közösségi oldalak felhasználóinak aktivitását lehet nyomon követni. A mérési eredmények alapján azonosítottunk különböző felhasználói csoportokat, akik eltérően viselkednek a rendszerben.

A társadalmi-gazdasági szempontok egyre nagyobb szerepet fognak játszani a jövő Internetének tervezésében, működésében. Két fontos kutatási irány esetében is ezek a szempontok az elsőrendűek. A forrás által meghatározott útvonalválasztás (source directed routing) esetén a végfelhasználó dönthet az adatainak útvonaláról. A módszerről már megmutatták, hogy bizonyos esetekben legalább annyi bevételt eredményez a szolgáltatóknak, mint a jelenlegi módszerek. A topológia tudatos elosztott rendszerek azt a problémát kívánják orvosolni, hogy a jelenlegi rendszerek nem veszik figyelembe, hogy a résztvevők milyen fizikai távolságra vannak egymástól, így sok esetben nem a legközelebbi résztvevővel kerülnek kapcsolatba. Egy olyan rendszer, amely a topológiát figyelembe véve hozza létre a kapcsolatokat, jelentősen csökkentheti az Internet szolgáltatók költségeit.

5 Összefoglalás

A jövő Internet kutatások három bemutatott szemelvényéből is jól látható, hogy az alapvető fundamentumoktól (pl. torlódásszabályozás vagy statikus hálózatok) a szintisza technológiai megközelítésen túlmutató (pl. társadalmi-gazdaságossági) szempontokig sok-sok tényező együttesen befolyásolja az Internet fejlődési irányát. Ma még megmondhatatlan, hogy mely területeken lesz olyan jelentős áttörés, amely majd meghatározza a jövő Internet karakterisztikáját. Ezen kutatási területek azért is érdekesek és kihívással teliek, mert sokszor meglepetésszerű eredményeket hoznak. Érdekes új eredmény például, hogy torlódásszabályzás nélküli hálózatokban sem feltétlenül kell torlódási összeomlástól tartani – mint amit a 80-as évek végén az NSFnet elszenvedett, és ami életre hívta a ma is meghatározó TCP torlódásvezérlést – ha az alkalmazások maximális sebességeinél a link kapacitások egy-két nagyságrenddel nagyobbak. Más esetekben olyan kérdésekre kaphatunk érdekes válaszokat, amelyek az Internet egyre nagyobb és nagyobb térnyeréséből fakadnak. Az Internet jelenlegi architektúráját a minimalista elvek határozzák meg és tették lehetővé a jelenlegi méret kiszolgálását. Ugyanakkor az Internet térnyerésével a szűkebb közösség (szakmai közösség) korábban meghatározó igényei mellett egyre erőteljesebben jelentkeznek az üzleti és „közmű” igények. Ezen új igények kiszolgálása a méret és az elvárt szolgáltatások robbanása miatt ma már teljesítőképességi határokat feszeget. A nagyméretű hálózatok vizsgálata és az autonóm viselkedési formák Internetre adaptálása jelenthet kiutat a jövőben. Másrészt viszont az Internet közművesedése a társadalmi és gazdaságossági szempontokat is reflektorfénybe hozza, hiszen a technológia alternatívák választásánál már ma is meghatározó a politikai, társadalmi és gazdasági vonatkozás. Természetesen ezen tényezők jobb megértése visszahat a technológia kutatásokra is. Napjainkban pl. egyre nagyobb hangsúlyt kapnak a „zöld” hálózati kutatások, amelyek energia gazdaságossági szempontokat helyeznek előtérbe és a működés fókuszába.

Irodalom

- [1] V. Jacobson, Congestion avoidance and control, In Proceedings of ACM SIGCOMM 1988, pp. 314-329, Stanford, CA, USA, August 16-18, 1988.
- [2] S. Molnár, B. Sonkoly, T. A. Trinh, A Comprehensive TCP Fairness Analysis in High Speed Networks, Computer Communications, Elsevier, Volume 32, Issues 13-14, 17 August 2009, pp. 1460-1484.
- [3] S. Floyd, Highspeed TCP for large congestion window, IETF RFC 3649, December 2003.
- [4] T. Kelly, Scalable TCP: Improving performance in highspeed wide area networks, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 33(2):83-91, April 2003.
- [5] L. Xu, K. Harfoush, I. Rhee, Binary increase congestion control (BIC) for fast long-distance networks, in: Proceedings of IEEE Infocom 2004, vol. 4, Hong Kong, China, Mar. 7–11, 2004, pp. 2514–2524.
- [6] I. Rhee, L. Xu, CUBIC: a new TCP-friendly high-speed TCP variant, in: Proceedings of Third International Workshop on Protocols for Fast Long-Distance Networks (PFLDnet 2005), Lyon, France, Feb. 3–4, 2005.
- [7] D.X. Wei, C. Jin, S.H. Low, S. Hegde, FAST TCP: motivation, architecture, algorithms, performance, IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN) 14 (6) (2006) 1246–1259.
- [8] K. Tan, J. Song, Q. Zhang, M. Sridharan, A compound TCP approach for highspeed and long distance networks, in: Proceedings of IEEE Infocom 2006, Barcelona, Spain, Apr. 23–29, 2006.
- [9] R. Wang, K. Yamada, M.Y. Sanadidi, M. Gerla, TCP with sender-side intelligence to handle dynamic, large, leaky pipes, IEEE Journal on Selected Areas in Communications 23 (2) (2005) 235–248.
- [10] D. Katabi, M. Handley, C. Rohrs, Congestion control for high bandwidthdelay product networks, In Proceedings of ACM SIGCOMM 2002, Pittsburgh, PA, USA, August 19-23, 2002.
- [11] M. Luby, LT- codes, The 43rd Annual IEEE Symposium on the Foundations of Computer Science, pp. 271-280, 2002.

- [12] R. Pan, L. Breslau, B. Prabhakar and S. Shenker, Approximate fairness through differential dropping, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Volume 33, Issue 2, April 2003.
- [13] T. Bonald, M. Feuillet and A. Proutière, Is the “Law of the Jungle” Sustainable for the Internet?, IEEE INFOCOM 2009, Rio de Janeiro, Brazil, April 19 - 25, 2009.
- [14] P. Erdős and A. Rényi, “On the evolution of random graphs”, Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci., vol. 5, pp. 17-60, 1959.
- [15] S. Milgram, “The small-world problem”, Psychology Today, vol. 2, pp. 60-67, 1967.
- [16] Xiao Fan Wang and Guanrong Chen, Circuits and Systems Magazine, IEEE Volume 3, Issue 1, pp. 6 - 20. (2003).
- [17] S. Floyd and V. Jacobson, “The synchronization of periodic routing messages,” IEEE/ACM Trans. Networking, vol. 2, no. 2, pp. 122-136, 1994. április.
- [18] Milgram, Stanley (1963). "Behavioral Study of Obedience". Journal of Abnormal and Social Psychology 67: 371–378.
- [19] Cedric Westphal, Guanhong Pei, Scalable Routing Via Greedy Embedding, in Proc. of IEEE INFOCOM'09 Mini-Conference, Rio de Janeiro, Brazil, April 2009.
- [20] J. Li, L. Gewali, H. Selvaraj, V. Muthukumar, "Hybrid Greedy/Face Routing for Ad-Hoc Sensor Network," dsd, pp.574-578, Euromicro Symposium on Digital System Design (DSD'04), 2004
- [21] NSF: Future Internet Network Design Initiative, <http://find.isi.edu>
- [22] Euro-NF: Network of Excellence on the Network of the Future, <http://euronf.enst.fr>
- [23] Levin D., LaCurts B., Spring N., Bhattacharjee B.: BitTorrent is an Auction: Analyzing and Improving BitTorrent's Incentives, SIGCOMM 2008.
- [24] Paes Leme, R., Tardos, E., Sponsored Search Equilibria for Conservative Bidders, Fifth Workshop on Ad Auctions, 2009.
- [25] Shavitt Y., Singer Y.: Trading Potatoes in Distributed Multi-Tier Routing Systems, SIGCOMM 2008 Workshop on Economics of Networked Systems, 2008.
- [26] Ofcom - Office of Communications: The Communications Market, 2008.
- [27] Comreg - Commission for Communications Regulation: Consumer ICT Survey, 2008.
- [28] ANACOM: Survey on the use of broadband, 2006.
- [29] FICORA - Finnish Communications Regulatory Authority: Market Review, 2007.
- [30] NHH – Nemzeti Hírközlési Hatóság, <http://www.nhh.hu>
- [31] Economics of Networked Systems Group, BME, http://netecon_group.tmit.bme.hu/
- [32] Biczók, G., Kardos, S., Trinh, T.A.: Pricing Internet Access for Disloyal Users: a Game-Theoretic Analysis, SIGCOMM 2008 Workshop on Economics of Networked Systems, 2008.
- [33] Gyarmati L., Trinh, T.A.: How to Price Internet Access for Disloyal Users under Uncertainty, Annals of Telecommunications, beadva, 2009.
- [34] Gyarmati L., Trinh, T.A.: On Competition for Market Share in a Dynamic ISP Market with Customer Loyalty: A Game-Theoretic Analysis, 6th International Workshop on Internet Charging and QoS Technologies, Aachen, 2009.
- [35] Trinh, T.A., Gyarmati L.: Revisiting Internet Access Pricing for Loyal Customers: the Long-Term Interaction Case, NGI 2009, Aveiro, 2009.
- [36] PlanetLab, <http://www.planet-lab.org>
- [37] Gyarmati L., Trinh A.T.: Characterizing User Groups in Online Social Networks, EUNICE 2009, Barcelona, 2009.