

Számítógépes hálózatok forgalom-dinamikája

Doktori értekezés tézisei

Fekete Attila

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Fizika Doktori Iskola

Statisztikus fizika, biológiai fizika és
kvantumrendszerek fizikája program

Iskolavezető: Dr. Horváth Zalán, MHAS, egyetemi
tanár

Programvezető: Dr. Kürti Jenő, D.Sc., egyetemi tanár

Témavezető: Dr. Vattay Gábor, D.Sc., egyetemi tanár



Eötvös Loránd Tudományegyetem
Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék
Budapest, 2008

Bevezetés

Az utóbbi években a komplex hálózatok – ezen belül az *internet* és más kommunikációs hálózatok – kutatása komoly figyelmet kapott a fizikán belül. Számos publikáció jelent meg az internet topológiájáról és forgalmáról egyaránt. A jelentős érdeklődés főként annak köszönhető, hogy bár a kommunikációs hálózatok ember-alkotta rendszerek, rengeteg párhuzam vonható bennük a fizika hagyományos területével. Nagyszámú kölcsönható adatfolyam modellezéséhez átlagtér módszerek, torlódott és torlódás mentes állapotok vizsgálatához a fázisátmenetek elmélete, számítógépes vírusok terjedésének modellezéséhez sejtautomaták, a forgalomban megfigyelt hosszútávú korrelációk megértéséhez a kritikus jelenségek elmélete, a hálózat kialakulásának modellezéséhez a növekedési folyamatok elmélete bizonyult hasznosnak, hogy csak néhány példát említsünk. Jelen dolgozatban a statisztikus fizika eszközeivel vizsgáljuk számítógépes hálózatok forgalmának néhány alapvető tulajdonságát.

Az internetet milliányi számítógép, hálózati berendezés és vezeték alkotja. Az internet kifejllesztésénél döntő szempont volt egy esetleges külső támadással szembeni nagyfokú ellenállóképesség. Ennek a szempontnak két fontos következménye van. Egyrészt a hálózat nagyrészt decentralizált, és csak kisebb részei tartoznak egy-egy önálló szervezet irányítása alá. Másrészt a hagyományos telefonhálózatoktól eltérően az adatforgalom nem rögzített csatornákon, hanem kisebb adatsomagokban zajlik. A decentralizált, lokális fejlődés és a csomag-kapcsolt adatátvitel következtében az internet szerkezete és forgalma is rendkívül összetett.

A hálózat csomópontjain az adatsomagok torlódhatnak és így sorban állásra kényszerülhetnek. A torlódások elkerülése érdekében kifejlesztett eljárások közül jelenleg a TCP algoritmus a legelterjedtebb, ezért a TCP algoritmus működésének tanulmányozása alapvető fontosságú. Habár a TCP dinamikája önmagában determinisztikus, ám egy valós hálózatban működés közben számos véletlen hatás érheti a csomópontokban kialakuló sorok és torlódások miatt. Egy önálló TCP kapcsolat tanulmányozásához ezért a dinamikai rendszerek elmélete és a sztochasztikus folyamatok elmélete kitűnő hátteret biztosít.

A dolgozat egyik célkitűzése a TCP dinamikájának vizsgálata egy egyszerű sztochasztikus hálózat-modellben. A valós hálózat hatását egy vezeték néhány effektív paraméterével közelítjük, mint például a sávszélesség, a csomag késleltetés illetve a csomagvesztési valószínűség.

Az imént vázolt modellben a vezetékek effektív paraméterei szabadon változtathatók. Egy komplex számítógépes hálózatban azonban az egyes élek fizikai paraméterei nagyrészt rögzítettek. A hálózat együttes adatforgalma szempontjából döntő fontosságú, hogy élek paraméterei, különösképpen az élek sávszélessége, miként kerültek egymáshoz viszonyítva rögzítésre. A sávszélesség lehetséges elrendezéseinek szempontjából lényeges, hogy az internet fejlődése decentralizált, ezért az infrastruktúra fejlesztése lokális információk alapján történik. A dolgozat másik célkitűzése az, hogy meghatározzuk, hogy egy komplex hálózatban hogyan kell a vezetékek valós fizikai paramétereit a hálózat lokális tulajdonságai alapján úgy rögzíteni, hogy az adatforgalom minél hatékonyabb legyen.

Alkalmazott módszerek

A dolgozat első részében az internet-forgalom szabályozásában meghatározó szerepet játszó TCP algoritmus stacionárius viselkedését tárgyaltuk egy egyszerű hálózati modellben, mely egy végtelen méretű pufferből és egy hozzá kapcsolódó vezetékből áll. A TCP diszkrét állapotterű dinamikáját folytonos-idő közelítésben vizsgáltuk, és a véletlen csomagvesztési folyamatot Poisson-folyamattal modelleztük. Az egymással kölcsönható párhuzamos TCP folyamatok leírásához átlagtér közelítést alkalmaztunk.

Véges méretű puffer esetén a TCP forgalma limitált. A torlódási ablak időfejlődése ezért nemcsak a vezetéken történő véletlen csomagvesztésektől, hanem a puffer determinisztikus telítődésétől is függ. A torlódási ablak stacionárius eloszlását eme kevert vesztési folyamat leképezéséhez rendelt Frobenius–Perron operátor segítségével határoztuk meg. A modell numerikus vizsgálatához az ns-2 csomagszintű hálózat-szimulátort használtunk.

A dolgozat utolsó felében komplex hálózatok éleinek optimális kapacitás-elosztását vizsgáltuk abban az esetben, amikor a hálózat egy lokális tulajdonsága, az élek „fiatalabb” csúcának fokszáma ismert. A tanulmányozott hálózatmodel kezdeti attraktivitással bővített skálafüggetlen, növekvő Barabási–Albert fa volt, melyben a fokszám-eloszlás skálakitevője a kezdeti attraktivitással, mint kontroll-paraméterrel szabadon beállítható. A fa ágain kialakuló klasztereknek és a „fiatalabb” csúcs fokszámának együttes eloszlását a növekedési folyamatra felírt master-egyenlet segítségével határoztuk meg. A levezetett analitikus eredményeket számítógépes szimulációkkal ellenőriztük.

Tézisek

1. A TCP algoritmus torlódási ablakának stacionárius eloszlására adtunk analitikus formulát arra az esetre, amikor a számítógépes adatforgalom végtelen pufferen halad át. Az ideális torlódásiablak-dinamikán túl figyelembe vettük a TCP algoritmus csomagvesztések utáni FR/FR üzemmódjának hatását is. A kapott eloszlásfüggvény pontosan írja le a torlódási ablak eloszlását néhány százalékos csomagvesztési valószínűség esetén is. Meghatároztuk továbbá a TCP és a hálózat kölcsönhatását leíró úgynevezett „ $1/\sqrt{p}$ formula” FR/FR-ből származó korrekcióját.
2. A puffer utáni vezeték késleltetést okoz, mely nagy távolságok esetén nem elhanyagolható. Bevezettünk egy módszert, mellyel a torlódási ablak rövid időskálán megfigyelhető lépcsős időfejlődése analitikusan tárgyalható. A modell minden paramétere kifejezhető a vezeték jellemzőivel, és nincs szükség további ismeretlen paraméterek illesztésére mérési vagy szimulációs adatok alapján.
3. Véges méretű puffer esetén a puffer telítődése miatt is bekövetkezhet csomagvesztés. Levezettünk egy analitikus formulát, mely megadja a pufferben eldobott, és az összes elvesztett csomag arányát. Ez a formula lehetővé teszi, hogy a pufferben történő csomagvesztéseket úgy tekintsük, mintha az a vezetéken történt volna. Megmutattuk azt is, hogy ez az arány – és egyben a rendszer alapvető viselkedése – csupán a paraméterek egy bizonyos kombinációjától függ. Az előző tézispontok eredményei alapján kiszámítottuk a torlódási ablak eloszlását mind lokális (LAN), mind tág (WAN) hálózati környezetben. Megmutattuk azt is, hogy az eloszlások alakja jelentősen eltérhet a hagyományos egycsúcsú, normálisszerű eloszlásoktól és hogy az FR/FR algoritmusok miatt egy éles csúcs jelenhet meg az eloszlásokban.
4. Komplex fa struktúrájú számítógépes hálózatokban meghatároztuk egy véletlenszerűen kiválasztott ágon kialakuló klaszter méretének és a klaszter leágazásánál lévő csúcs fokszámának együttes eloszlását. A levezetett formula egzakt véges méretű hálózatok esetén is, ezért jól vizsgálhatóak a véges-méret effektusok. Az együttes eloszlásból meghatároztuk az ágak méretének és a csúcsok fokszámának határ- és feltételes eloszlásait, valamint a feltételes és feltétel nélküli várható értékeit. Rá-

mutattunk, hogy – termodinamikai határesetben – a foksám fluktuációi divergálnak, amint a kontroll-paraméter a klasszikus BA hálózatnak megfelelő értékhez tart. Kimutattuk továbbá, hogy az ágaikon kialakuló klaszterek méretének skálakitevője független a kontroll-paramétertől. Megvizsgáltuk egyes mennyiségek viselkedését abban a határesetben, amikor a hálózat foksám-eloszlása elveszti skálafüggelenségét, és kimutattuk, hogy számos mennyiség a skálafüggelentől minőségileg eltérő viselkedést mutat.

5. Az előző tézispont alapján megadtuk skálafüggelent fa hálózatok él-köztességének – azaz a hálózat élein áthaladó legrövidebb utak számának – eloszlását és várható értékét azzal a feltétellel, hogy az él „fiatalabb” csúcsának foksáma ismert. Megadtuk továbbá a hálózat méretével átskálázott él-köztesség feltételes eloszlását és várható értékét végtelen méretű hálózat esetén. Megmutattuk, hogy a feltételes eloszlás skálakitevője független a kontroll-paramétertől.

Következtetések

- A kidolgozott elemi TCP modell alapján lehetségessé vált a számítógépes hálózatok forgalmának pontos statisztikai leírása általános hálózati környezetben. Pontos becslés adható továbbá a véges méretű pufferekben kialakuló torlódásokra.
- Skálafüggelent fa struktúrákban megadtuk az él-köztességnek a hálózat lokális struktúrájától függő egzakt statisztikus leírását. Ez a leírás nem csupán a számítógépes hálózatok sávszélességének optimális elrendezését adja meg, hanem jóval általánosabb problémákra alkalmazható.

A tézisek alapjául szolgáló publikációk

- [1] Attila Fekete, Gábor Vattay, and Ljupco Kocarev.
Distribution of edge load in scale-free trees.
Phys. Rev. E, 73:046102, April 2006.
- [2] Attila Fekete, Gábor Vattay, and Ljupco Kocarev.
Traffic dynamics in scale-free networks.
Complexus, 3:97–107, 2006.

- [3] Attila Fekete and Gábor Vattay.
On buffer limited congestion window dynamics and packet loss.
In *GLOBECOM'02: Global Telecommunications Conference*, volume 3, pages 2599–2603. IEEE, 2002.
- [4] Attila Fekete, Gábor Vattay, and András Veres.
Improving the $1/\sqrt{p}$ law for single and parallel TCP flows.
In J. M. da Souza, N. L. S. Fonseca, and E. A. S. da Silva, editors, *Teletraffic Engineering in the Internet Era*, Teletraffic Science and Engineering, pages 869–883. North-Holland, Amsterdam, December 2001.
Proceedings of 17th International Teletraffic Congress.

Egyéb kapcsolódó publikációk

- [5] Gábor Vattay, Krisztián Diriczi, Attila Fekete, Ljupco Kocarev, Máté Maródi, and József Stéger.
Statistical properties of chaos in communication networks.
In Ljupco Kocarev and Gábor Vattay, editors, *Complex Dynamics in Communication Networks*, pages 49–68. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, 2005.
- [6] Attila Fekete, Gábor Vattay, and Ljupco Kocarev.
Adaptive Traffic in Complex Networks.
In *Proc. NOLTA: IEICE Research Society of Nonlinear Theory and its Applications*, Bologna, Italy, November 2006.
- [7] Ljupco Kocarev, Marjan Sterjev, Attila Fekete, and Gábor Vattay.
Public-key encryption with chaos.
Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 14(4):1078–1082, December 2004.
- [8] Gábor Vattay, Attila Fekete, József Stéger, and Máté Maródi.
Modeling Competition, Fairness and Chaos in Computer Networks.
In *Proc. IASTED Communications, Internet and Information Technology (CIIT'02)*, November 2002.
- [9] Attila Fekete and Gábor Vattay.
Self-similarity in bottleneck buffers.
In *GLOBECOM'01: Global Telecommunications Conference*, volume 3, pages 1867–1871. IEEE, November 2001.