

Egyetemi doktori (Ph.D.) értekezés tézisei
Abstract of Ph.D. Thesis

Infokommunikációs hálózatok hatékonyságvizsgálata

Performance Analysis of Infocommunication Networks

Szilágyi Szabolcs

Témavezetők / Supervisors
Dr. Sztrik János, Dr. Almási Béla



Debreceni Egyetem
Informatikai Tudományok Doktori Iskola

University of Debrecen
PhD School of Informatics

Debrecen
2015

Készült

a Debreceni Egyetem Informatikai Tudományok Doktori Iskolájának
Informatikai Rendszerek és Hálózatok programja keretében

Prepared at

the University of Debrecen,
PhD School of Informatics

Tartalomjegyzék / Content

1. Előzmények és célkitűzések	5
2. Alkalmazott vizsgálati módszerek	7
3. Új tudományos eredmények	10
3.1. Torlódáskezelési algoritmusok hatékonyságvizsgálata szimulációs környezetben	10
3.2. Torlódáskezelési algoritmusok hatékonyságvizsgálata valós mérési környezet segítségével	10
3.3. Az MPT hatékonyságvizsgálata két utas környezetben	11
3.4. Az MPT hatékonyságvizsgálata négy utas környezetben	11
3.5. Az MPT hatékonyságvizsgálata IPv4, IPv6, IPv4-IPv6 (kevert) környezetekben	11
4. Background and aims	13
5. Applied methods	15
6. New results	18
6.1. Analysis of the algorithms for congestion management using simulation environment	18
6.2. Analysis of the algorithms for congestion management using laboratory measurement environment	18
6.3. Investigating the throughput performance of the MPT in two paths measurement environment	18
6.4. Investigating the throughput performance of the MPT in four paths measurement environment	19
6.5. Investigating the throughput performance of the MPT in IPv4, IPv6, and IPv4-IPv6 (mixed) environments	19
Irodalomjegyzék / Bibliography	21
Publikációk / Publications	23

1. Előzmények és célkitűzések

Kezdetben az irodai, a vállalati hálózatok és nem utolsósorban, maga az Internet is csupán adatátvitelre (pl. FTP, e-mail) voltak tervezve, ahol az IP csomagkésleltetés lényegtelennek minősült. Legtöbb esetben a „legjobb szándékú” (Best-effort) kézbesítési szolgáltatás kielégítőnek bizonyult, adatvesztés esetében a TCP protokoll gondoskodott az ismételt adatátvitelről. Később, a multimédiás alkalmazások elterjedése következtében (hangátvitel, videokonferencia) ezek számára külön telefonhálózatokat, illetve videó kommunikációs hálózatokat hoztak létre. Napjainkban az irodai és a vállalati hálózatok átalakulóban vannak konvergált infokommunikációs hálózatokká [1], melyek egyetlen fizikai topológián keresztül biztosítják ugyanazon szolgáltatásokat.

A konvergált infokommunikációs hálózatok számos előnye mellett megjelenik egy óriási hátrány, mégpedig a közös hálózati erőforrásokért (pl. forgalomirányítók puffereiért) való versengés, ami előbb vagy utóbb torlódáshoz (congestion) vezet. A torlódás az az állapot, amikor túl sok csomag van jelen a hálózatban (vagy annak egy részében), ami miatt a teljesítőképesség visszaesik, a csomagküldés pedig késleltetést szenved [2].

A torlódás következményei a csomagkésleltetés, a késleltetés ingadozás (dzsitter) és ami a legsúlyosabb, a csomageldobás. Nem minden alkalmazás érzékeny e problémákra. Például az FTP teljesen immunis a csomagkésleltetésre vagy a dzsitterre, míg a multimédiás alkalmazások (videó átvitel, hangátvitel) nagyon is érzékenyek [2].

Ennélfogva a torlódáskezelési algoritmusok vizsgálata és elemzése nagyon kurrens tudományterület. Az utóbbi években számos dolgozat jelent meg (ld. [3], [4], [5]), melyekben a torlódáskezelési algoritmusok hatékonyságvizsgálatával foglalkoztak, s matematikai modelleken alapuló szimulációs szoftver segítségével (OPNET) határozták meg a legfontosabb paramétereket. Minden esetben arra a végkövetkeztetésre jutottak, mely szerint a WFQ algoritmus a leghatékonyabb sorkezelési mechanizmus a multimédiás alkalmazások, kiváltképpen a hangátvitel számára.

Céлом volt a korábbi tudományos munkákban vizsgált torlódáskezelési algoritmusok mellett (FIFO, PQ, WFQ) további algoritmusok tanulmányozása (CQ, CBWFQ és LLQ¹) és hatékonyságelemzése az OPNET IT Guru Academic Edition² szimulációs szoftver segítségével, valamint valós mérési laborkörnyezet kialakításával. Továbbá meg szerettem volna vizsgálni, hogy létezik-e az interaktív hangátvitel számára a WFQ-nál hatékonyabb torlódáskezelési algoritmus.

Disszertációm második felében az MPT több utas átvitelt biztosító szoftver hatékonyságelemzésével foglalkoztam, melynek fejlesztéséhez az alábbi tények járultak hozzá.

¹ Ezen mechanizmusok bemutatásával disszertációm 2.1.4. fejezetében foglalkozom.

² Jelen dolgozatban említett OPNET szimulációs szoftvert a korábbi tudományos munkáimban használtam. 2012. október 29.-én az OPNET-et felvásárolta a Riverbed cég, majd 2014 tavaszától az OPNET szimulációs szoftvert felváltotta a Riverbed Modeler [12].

Napjainkban az Internet kommunikációs környezete csupán egyetlen adat utat tesz lehetővé az adat továbbítás számára egy adott kommunikációs viszonyon belül. Az egyetlen adatútvonal-megközelítés még elfogadható azon rendszerek esetében, melyek csupán egyetlen hálózati interfésszel rendelkeznek vagy egyetlen „kimeneti ponttal” kapcsolódnak az Internetre. Másfelől, a legtöbb napjainkban használt eszköz rendelkezik több gyárilag beépített hálózati interfésszel, mint például RJ-45-ös csatlakozóval a vezetékes hálózat számára, rádiófrekvenciás interfésszel, amely a vezeték nélküli Wi-Fi hálózati csatlakozást teszi lehetővé, valamint mobil telefon adatátvitel csatlakozó interfésszel (pl. 3G, HSDPA vagy LTE).

Az egyetlen útvonalon alapuló kommunikációs technológia nem képes kihasználni az eszközök többinterfészes előnyeit. A kommunikációs teljesítmény (pl. adatátviteli teljesítmény) jelentősen növelhető lenne, ha a hálózati környezet egy adott kommunikációs viszonyon belül támogatná a több adatútvonal használatát.

Az IETF RFC 6824 „TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses” dokumentum (MPTCP, melyet 2013 januárjában publikáltak) [6], [7], napjainkban egy nagyon felkapott kutatási terület, amely a jelenlegi TCP implementációk kiterjesztésével foglalkozik a több utas kommunikáció támogatása céljából.

Az MPTCP számos előnye mellett rendelkezik egy néhány hátránnyal is:

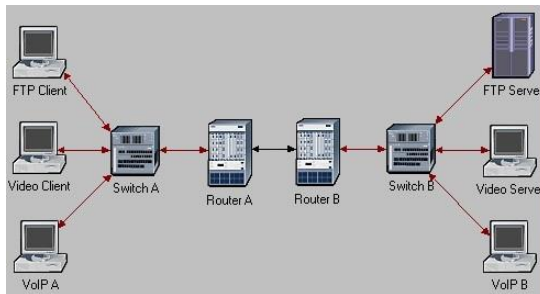
- Hatékony működés eléréséhez az Alkalmazási réteg vagy az operációs rendszer különböző hangolására lehet szükség.
- A Szállítási rétegben működik.
- Csak a TCP szállítási protokollt támogatja, ami például a multimédiás alkalmazások használatakor jelenthet gondot.

Disszertációmban egy új architektúrát vezettem be, amely egy nagyon könnyen használható kiterjesztést nyújt a jelenlegi TCP/IP protokollverem számára, lehetővé téve a kommunikációs végpontok közötti többes útvonalak használatát. Az új több utas környezetet egy MPT³ nevű szoftverkönyvtárban (és szoftver eszközben) implementáltuk a Debreceni Egyetem Informatikai Karán. Az MPT modellezési háttere és architektúrája teljes mértékben különbözik az MPTCP-től, ugyanis az MPT támogatást nyújt az alkalmazások számára úgy a TCP, mint az UDP szállítási protokollok felett, valamint a harmadik rétegben (Hálózati réteg) működik, míg az MPTCP a negyedik rétegben (Szállítási réteg).

³ Az MPT szoftvert a Debreceni Egyetem Informatikai Karán fejlesztettük, melynek aktuális verziója, valamint dokumentációja a <http://irh.inf.unideb.hu/user/almasi/mpt/> oldalon érhető el.

2. Alkalmazott vizsgálati módszerek

Kutatómunkám többnyire gyakorlati jellegű. A szimulációk elvégzésére a jelen kutatási témában megjelent korábbi tudományos munkákban használt szimulációs szoftvert alkalmaztam, nevezetesen az OPNET IT Guru Academic Editiont. A csomagütemezési algoritmusok teszteléséhez használt hálózati topológia a korábbi cikkekben szereplő topológián alapult, melyet tovább általánosítottam, egy bővíthető modell elnyerése érdekében. Az OPNET IT Guru Academic Edition programban használt szimulációs környezetet az 1. ábra mutatja.

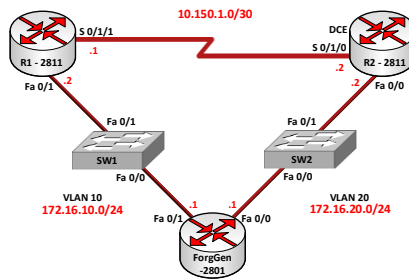


1. ábra. Szimulációs hálózati topológia a torlódáskezelési algoritmusok hatékonyságvizsgálata céljából

A szimulációs környezet két forgalomirányítóból, két darab hálózati kapcsolóból és hat darab végpontból állt. A forgalomirányítók között pont-pont kapcsolatot hoztam létre *ppp-DS1* kapcsolati sebességgel. A többi eszköz *10BaseT* linkkel kapcsolódott egymáshoz (a [3], [8] irodalomban közölteket követve). A szimulációk során, a korábbi tudományos munkáknak megfelelően, három adatforgalom típusát vizsgáltam: a fájlátvitelt (FTP), a video átvitelt és a valós idejű hangátvitelt (VoIP). A *Switch A* kapcsolóhoz csatlakoztattam a klienseket, míg a *Switch B* kapcsolóhoz a kiszolgálók (szerverek) csatlakoztak. Így módon a három forgalomtípus a három kliens-szerver alapú végpont-páros között zajlott. A hálózat szűk keresztmetszetét, ahol a torlódás létrejöhet, a két forgalomirányító közötti rész képezte [8], [9]. Ezért, ebben a zónában aktiváltam a torlódáskezelési algoritmusokat. Szimulációs eredményeimet numerikus, táblázatos formában disszertációm *A. Függeléke* tartalmazza.

Ezen algoritmusok implementációját és hatékonyságelemzését valós hálózati eszközök segítségével, valós laborkörnyezetben is elvégeztem. A mérési környezet fizikai topológiáját a 2. ábra mutatja. A mérési környezetet a Debreceni Egyetem Informatikai Karának Hálózati Laborjában állítottam fel. A hálózati topológia kialakításához három darab forgalomirányítót (egy darab Cisco 2801-es típusút és két darab 2811-es típusút) használtam. A 2. ábrán látható *R1* és *R2*-es útválasztók IOS 12.4 verziójú operációs rendszerrel rendelkeztek. A *ForgGen* forgalomirányító a kommunikációs végpont funkcionálisát látta el. Ezt forgalomgenerálás céljából használtam, melyen egy speciális operációs rendszer, nevezetesen a c2801-

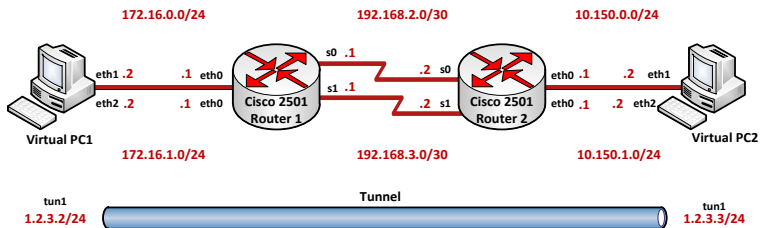
tpgen+ipbase-mz.PAGENT.4.3.0. futott [10], ami lehetővé tette a forgalomgenerálást, a kimenő csomagok időbélyeggel való ellátását, valamint a beérkező csomagok rátája alapján különböző statisztikai kimutatások elvégzését. A generált, illetve a bejövő forgalom szétválasztása céljából két darab Cisco 2960-as típusú kapcsolót használtam (SW1, SW2). Ezek segítségével két VLAN-t (Virtual LAN) hoztam létre (VLAN 10 és VLAN 20) [11]. Az R1 és R2-es forgalomirányítók között soros összeköttetés lett kiépítve, amely egy lassú WAN kapcsolatot szimulált. Három típusú forgalmat generáltam a korábbi tudományos munkákra támaszkodva, nevezetesen FTP, Video és VoIP forgalmakat. A forgalomirányítók konfigurációs fájljainak tartalmát disszertációm B. Függeléke tartalmazza.



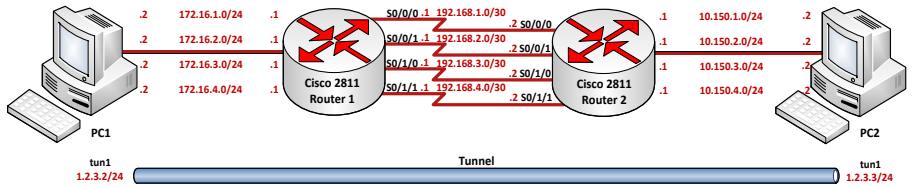
2. ábra. Valós mérési laborkörnyezet a forgalomirányítók torlódáskezelési algoritmusainak VoIP-re gyakorolt hatékonyságelemzése céljából

A mérési laborkörnyezet szűk keresztmetszetének hatására a forgalomirányítók között hálózati torlódás jött létre. Evégett, az R1 és R2 útválasztók soros interfészein (S 0/1/1 és S 0/1/0) beállítottam a különböző torlódáskezelési algoritmust (FIFO, PQ, CQ, WFQ, CBWFQ, LLQ), melyek kódjai megtalálhatóak dolgozatom C. Függelékében.

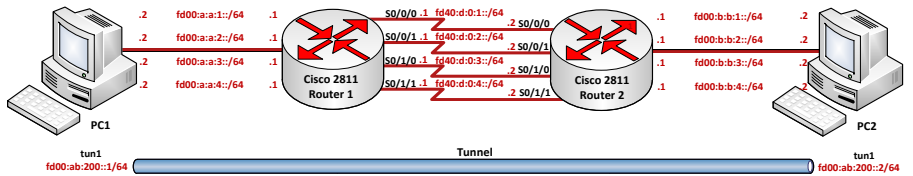
Az MPT szoftver teszteléséhez több olyan mérési környezetet hoztam létre, melyek hűen tükröztek egy olyan két különböző hálózatban lévő csomópont között zajló kommunikációt, melyeket az Internet Felhő (Internet Cloud) választ el. A mérési környezetek végső célja az MPT szoftver-eszköz átviteli teljesítmény hatékonyságelemzésének lehetővé tétele volt.



3. ábra. Az MPT szoftver hatékonyságvizsgálata két utas IPv4-es mérési laborkörnyezetben



4. ábra. Az MPT szoftver hatékonyságvizsgálata négy utas IPv4-es mérési laborkörnyezetben



5. ábra. Az MPT szoftver hatékonyságvizsgálata négy utas tiszta IPv6-os mérési laborkörnyezetben

Az MPT szoftvert három különböző környezetben teszteltem:

- két utas környezetben (3. ábra)
- négy utas környezetben (4. ábra)
- IPv4, IPv6, illetve IPv4-IPv6 (kevert) környezetben (5. ábra, illetve a disszertációm *D. Függeléke*)

A mérési laborkörnyezetek két számítógépet (8GB memóriával, Intel Core i5 2.5 GHz-es processzorral, 6MB cache-sel, Linux OpenSuse 12.0 operációs rendszerrel) tartalmaztak. A PC-k négy hálózati interfésszel rendelkeztek (eth0, eth1, eth2 és eth3), melyek egymáshoz való csatlakoztatása két, illetve négy különböző útvonal segítségével valósult meg. Az útvonalak kialakítására két darab Cisco 2811-es forgalomirányítót használtam. Az útválasztók egymáshoz való kapcsolása két, illetve négy darab soros link segítségével történt, melynek következtében a routerek között két, illetve négy különböző útvonal jött létre. Az útvonalak sávszélességeinek külön-külön való hangolására a DCE hálózati eszköz soros interfészein beállított órajel használtam. A PC-k 100 Mbps-os Ethernet kapcsolattal csatlakoztak a forgalomirányítókhoz. A fizikai Ethernet kapcsolat a hálózat közös része volt. E közös kapcsolat magas sávszélessége (100 Mbps) garantálta azt a tényt, miszerint a hálózat szűk keresztmetszete ne ezen közös részen alakuljon ki. (A soros kapcsolatok maximum órajele 2.000.000 ciklus/másodpercre volt beállítva, melynek következtében a kommunikációs szűk keresztmetszet a forgalomirányítók közötti soros kapcsolatokon alakulhatott ki.). Statikus forgalomirányítást alkalmaztam úgy a PC-k, mint az útválasztók esetében.

Különböző méréseket végeztem, különböző paramétereket használva. Mindazonáltal a várt eredmény beigazolódott: az MPT szoftverkönyvtár hatékonyan összegezte a két, illetve négy útvonal sávszélességét, még a nem azonos sávszélességgel rendelkező utak esetében is. Elmondható, hogy a sávszélességek aggregálása a multimédia adatfolyam átvitelre is érvényes, viszont ebben az esetben, ha az útvonalak sávszélessége különböző, csomag újrendezés (reordering) léphet fel.

3. Új tudományos eredmények

3.1. Torlódáskezelési algoritmusok hatékonyságvizsgálata szimulációs környezetben

1. tézis: A korábbi tudományos munkák szerzői által az OPNET IT Guru Academic Edition szimulációs szoftverben használt hálózati topológiát tovább általánosítottam két hálózati kapcsoló beiktatásával. A korábbi cikkek csupán három torlódáskezelési algoritmust vizsgáltak: a FIFO-t (First In First Out), a PQ-t (Priority Queuing) és a WFQ-t (Weighted Fair Queuing). Minden esetben azt a végkövetkeztetést vonták le, melynek értelmében a WFQ a leghatékonyabb algoritmus a multimédiás alkalmazások számára. Ezzel szemben a korábbi csomagütemezési elvek mellett további három algoritmust használtam: a CQ-t (Custom Queuing), a CBWFQ-t (Class Based Weighted Fair Queuing) és az LLQ-t (Low Latency Queuing). A szimulációs eredményeim alapján arra a következtetésre jutottam, miszerint az interaktív hangátvitel számára az LLQ hatékonyabb torlódáskezelési algoritmus a WFQ-val szemben, úgy a csomagkésleltetés, mint a dszitter tekintetében [J3], [C2], [T1], [T3].

3.2. Torlódáskezelési algoritmusok hatékonyságvizsgálata valós mérési környezet segítségével

2. tézis: A korábban említett torlódáskezelési algoritmusok (FIFO, PQ, CQ, WFQ, CBWFQ, LLQ) hatékonyságelemzését kiterjesztettem valós mérési laborkörnyezetre is. Minden mérési esetben az volt tapasztalható, amint az egyébként várható is volt, hogy a FIFO ütemezési elv torlódás esetén a legalkalmatlanabb kiszolgálási elv a valós idejű hangcsomagok számára. A hangátvitel szempontjából az LLQ és a PQ volt a két legmegfelelőbb algoritmus, ami a csomageldobási rátát, a végponttól-végpontig történő késleltetést és a dszittert illeti. Ezt a két algoritmust alkalmazva egyetlen hangcsomag sem szenvedett csomageldobást. Azonban ismerve a PQ működési elvét, nevezetesen azt, hogy kiszolgálja ugyan maximális mértékig a legnagyobb prioritással rendelkező sort, viszont kiéhezheti a másik hármat, a szakirodalom alapján, illetve a mérési tapasztalataim alapján azt a következtetést vontam le, miszerint a valós idejű hangforgalom számára, minden szempontot figyelembe véve, az LLQ torlódáskezelési algoritmus a legmegfelelőbb [J2], [J5], [T2].

3.3. Az MPT hatékonyságvizsgálata két utas környezetben

Disszertációmban egy új architektúrát vezettem be, amely egy nagyon könnyen használható kiterjesztést nyújt a jelenlegi TCP/IP protokollverem számára, lehetővé téve a kommunikációs végpontok közötti többes útvonalak használatát. Az új több utas környezetet egy MPT nevű szoftverkönyvtárban (és szoftver eszközben) implementáltuk a Debreceni Egyetem Informatikai Karán. Az MPT modellezési háttere és architektúrája teljes mértékben különböző az MPTCP architektúrájától, ugyanis az MPT támogatást nyújt az alkalmazások számára úgy a TCP, mint az UDP szállítási protokollok felett, valamint a harmadik rétegben (Hálózati réteg) működik, míg az MPTCP a negyedik rétegben (Szállítási réteg). Gyakorlatilag a MPT szoftver világszinten egyedinek számít.

3. tézis: Létrehoztam egy mérési környezetet, amely két különálló független útvonal-összeköttetést biztosított két kommunikációs végpont számára. Az átviteli teljesítményt szimmetrikus és aszimmetrikus sáv szélességet alkalmazva és különböző továbbított adatmértéket használva tanulmányoztam. Minden egyes mérési eredmény azt a tényert erősítette meg, hogy az MPT több utas környezet nagyon hatékonyan összegezi a két fizikai útvonal által nyújtott átviteli teljesítménykapacitást [J1], [C1].

3.4. Az MPT hatékonyságvizsgálata négy utas környezetben

4. tézis: Ebben a teszt sorozatban az MPT több utas kommunikációs környezet teljesítményét elemeztem, figyelembe véve a fájl és multimédia adatfolyam-átvitelének lehetőségét. A mérések elvégzése céljából egy dedikált mérési környezetet hoztam létre. A mérési eredmények azt a ténytet bizonyították, miszerint az MPT környezet képes hatékonyan összegezni négy útvonal rendelkezésre álló kapacitását, még az eltérő útvonal kapacitások esetében is. Ez a megállapítás érvényes úgy a fájlátvitelre, mint a multimédia-átvitelre is. Ami a multimédia adatfolyam-átvitel dzsitterjét illeti, azt tapasztaltam, hogy amennyiben az összegzendő útvonalak sebessége nagyjából azonos, a dzsitter értéke eléggé alacsonyan marad, viszont eltérő sebességű útvonalak esetén a dzsitter jelentősen megnő [J4].

3.5. Az MPT hatékonyságvizsgálata IPv4, IPv6, IPv4-IPv6 (kevert) környezetekben

5. tézis: Ezen mérések segítségével az MPT több utas szoftverkönyvtár átviteli teljesítmény összegzésének tulajdonságát vizsgáltam meg. Az MPT eszköz feletti alkalmazások tetszőlegesen használhatják a Szállítási réteg protokolljainak bármelyikét: úgy a TCP, mint az UDP használata engedélyezett. A teszt sorozatok célja az MPT eszköz átviteli teljesítményének hatékonyságvizsgálata volt, IPv4, IPv6 és kevert (IPv4-IPv6) hálózati környezetekben. Ennek érdekében létrehoztam egy mérési laborkörnyezetet, ami a kommunikációban résztvevő csomópont számára négy darab független kapcsolati útvonalat biztosított. Az átviteli teljesítményvizsgálat érdekében szimmetrikus és aszimmetrikus sáv szélességi rátákat, valamint különböző átviteli adatmértéket használtam. Annak ellenére, hogy bizonyos eredmények némi

különbséget mutattak különböző protokoll verziók esetében, a mérési eredmények azt mutatták, hogy az MPT több utas környezet hatékonyan összegezte a fizikai útvonalak átviteli kapacitását úgy IPv4, IPv6, mint kevert IPv4-IPv6 környezetekben [J6].

4. Background and aims

At the beginning computer networks and the Internet were designed mainly for data transfer such as FTP and email, where delay was considered to be unimportant. In most cases the delivery service was effective, and the TCP protocol dealt with data losses. As the multimedia applications became popular (voice transfer, video conferences), separate telephone and video communication networks were set up. Nowadays, office and company networks are transformed into one converged network (see [1]), in which the same network infrastructure is used to ensure all the requested services.

Although converged networks have many advantages, there are some disadvantages too, namely the competition for network resources (buffers of routers), which leads to congestion. Congestion is a state, when in (a part of) the network are too many packets which causes packet delay and loss that degrades performance (see [2]).

Delay in delivering the packets, jitter, loss of packets are consequences of congestion. Different applications show different sensitivity to these issues. For example, FTP is not impacted by delay and jitter, whereas the multimedia applications (video, voice) are very sensitive to them and the loss of packets too (see [2]).

Therefore, the analysis of the algorithms for congestion management is a hot research area. In recent years there have appeared numerous articles that have dealt with the performance evaluation of the congestion management algorithms, using the OPNET simulation tool. In all cases it was concluded that the WFQ algorithm is the most efficient queuing algorithm for multimedia applications, especially for voice transfer.

My goal was to expand the study of congestion management algorithms with other queuing algorithms (CQ, CBWFQ and LLQ⁴), using the OPNET IT Guru Academic Edition⁵ simulation software and a laboratory measurement environment. I also investigated if there is a more efficient congestion management algorithm than WFQ for interactive voice transfer.

In the second part of my thesis I dealt with the throughput performance analysis of the Multipath Communication Library MPT, which contributed to the development of the following facts.

The current Internet communication environment allows only a single path for data transmission in a communication session. The single path assumption is quite acceptable for systems, which use a single connection interface, or a "single exit point" to the Internet. On the other hand, a lot of currently used devices have got factory built-in multiple network interfaces: RJ-45 for the wired network, RF interface for the Wi-Fi wireless network connection, and mobile phone data transfer connection interface (e.g. 3G, HSDPA or LTE).

The single path communication technology is not able to use the advantages of the multiple interfaces. The communication performance (e.g. throughput) could be highly

⁴ I deal with these mechanisms in Chapter 2.1.4. of my dissertation.

⁵ The OPNET simulation software mentioned in this dissertation I used in my previous works. On October, 29, 2012, Riverbed acquired OPNET to build on Riverbed's strong heritage and experience in delivering solutions that improve the performance of technology for business. By the spring of 2014 the OPNET simulator was replaced by Riverbed Modeler [12].

improved if the networking environment would be able to support the usage of multiple paths for a communication session.

The IETF RFC 6824 “TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses” (MPTCP, published in January of 2013, see [6], [7]) is a hot research topic today to extend the current TCP implementations for supporting multiple paths.

The MPTCP besides its advantages has some drawbacks too:

- For the optimal operation application support may be necessary, i.e. the rewriting request of the applications or special operating system’s tuning request may appear.
- Works in Transport layer.
- It is restricted to TCP protocol, which may represent problems in case of multimedia applications.

In my thesis I introduced a new architecture which gives a simple and easy-to-use extension for the current TCP/IP protocol stack to support multiple paths between the communication endpoints. The new multipath environment was implemented in a software library (and software tool) named MPT, and was developed at the Faculty of Informatics, University of Debrecen in Hungary. The modeling background and architecture of MPT is totally different from the MPTCP solution. MPT is able to support applications based not only on the TCP protocol, but also UDP can be used by the applications.

5. Applied methods

My research is mostly practical. The simulation environment was provided by the OPNET IT Guru Academic Edition application, based on mathematical models. The network topology for the performance evaluation was identical to the one used in former articles, which was generalized to obtain an extendable and factual network topology. I used the network topology in OPNET IT Guru Academic Edition, which can be seen in Fig.1.

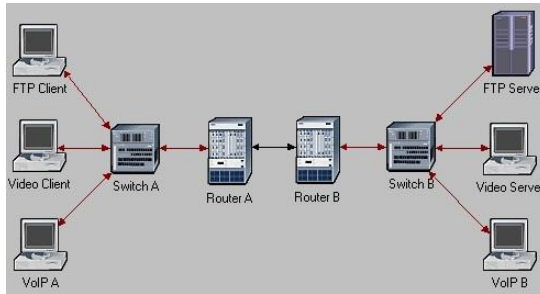


Fig. 1. Simulation network topology for investigating the efficiency of congestion management algorithms

The measurement environment consists of 2 routers, 2 switches and 6 hosts. The routers are connected with a point-to-point link, having the speed of *ppp-DS1*. The rest of the hosts are connected with *10BaseT*. The part between the two routers is actually a narrow cross-section where congestion can happen. For this reason the congestion management algorithm is activated in this area (see [8], [9]). The numerical representation of my simulation results can be found in *Appendix A* of my dissertation.

For the implementation and investigation of these algorithms I created a real laboratory measurement environment too. The measurement environment network topology is shown in Fig. 2. The network laboratory was established in the Faculty of Informatics, University of Debrecen. The measurement environment consists of three routers (two Cisco 2811 type routers and one Cisco 2801 router) and two switches. The *Cisco IOS 12.4* operating system was running on the *R1* and *R2* routers, represented on Fig. 2. The *ForgGen* router was responsible for the functionality of the communication endpoints. I used it to generate the traffic, and create statistics by the special *Cisco IOS c2801-tngen+ipbase-mz.PAGENT.4.3.0* [10]. This operating system is able to perform traffic generation with assigning timestamps to the outgoing packets, so giving the basis of calculating statistics. In order to distinguish between the generated and incoming traffic, two Cisco 2960 switches were used (*SW1*, *SW2*). These switches created two Virtual LANs, namely *VLAN 10* and *VLAN 20* [11]. A serial connection was created between *R1* and *R2*, which simulated a slow WAN connection. I generated three types of traffic, similarly to the previous papers: an FTP, Video and VoIP traffics. The traffic generation code used by *ForgGen* router can be seen in *Appendix B* of my dissertation.

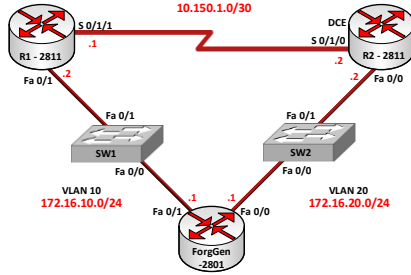


Fig. 2. The measurement environment for investigating the efficiency of congestion management algorithms

The network between the R1 and R2 routers is actually a narrow cross-section where congestion can happen. For this reason I activated the congestion management algorithms in this area (between the R1' S 0/1/1 and R2' S 0/1/0 interfaces). These codes (for FIFO, PQ, CQ, WFQ, CBWFQ and LLQ) can be found in *Appendix C* of my dissertation.

In order to test the MPT software, I created multiple test environments which represent two hosts placed into different networks and separated by the Internet Cloud. The purpose of the measurements was testing the throughput aggregation efficiency of the MPT software tool.

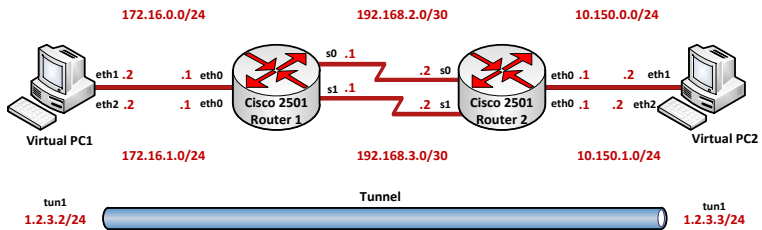


Fig. 3. The two paths IPv4 measurement labor environment

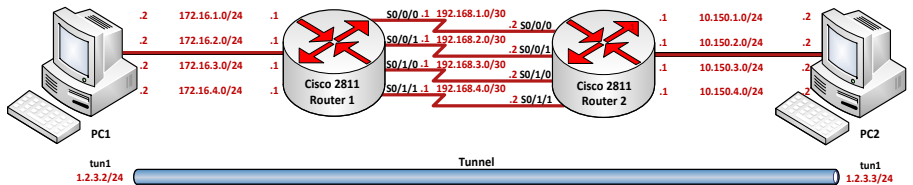


Fig. 4. The four paths IPv4 measurement labor environment

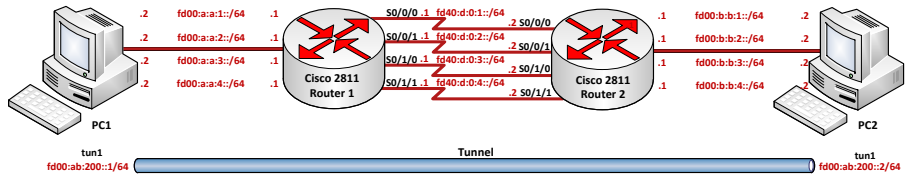


Fig. 5. The four paths IPv6 measurement labor environment

The MPT software was tested in three different environment:

- in two paths measurement labor environment (see Fig. 3.)
- in four paths measurement labor environment (see Fig. 4.)
- IPv4, IPv6, and IPv4-IPv6 (mixt) environment (see Fig. 5., and *Appendix D* of my dissertation)

The measurement test-laboratory contained two PCs (having 8 GB of main memory and Intel Core i5 processor with 2.5GHz, and 6MB cache; using the operating system of Linux OpenSuse 12.0). The PCs were equipped with four interfaces (eth0, eth1, eth2 and eth3). The four interfaces of the PCs were connected to each other by two or by four different paths. The paths were realized by using two Cisco 2811 type routers. The routers were connected to each other by two or by four serial links, thus establishing 2 or 4 different paths. The physical link of the Ethernet connection was common in the paths, but the high speed of this common link (100 Mbps) made it sure that the bottleneck point of the paths was not in the common part of the network. The maximum clock rate of the serial links was set to 2.000.000 cycles per seconds. The clock rate setting of the DCE serial interfaces was used to tune the bandwidth of the paths independently to each other. The PCs were connected to the routers using 100 Mbps Ethernet links, so the bottleneck point of the communication was realized on the serial links between the routers. All the routing settings were implemented by static entries both in the routers and in the PCs.

I performed several measurements with different parameters to conclude the results: the MPT software library efficiently aggregates the bandwidth of two and of the four paths even when the paths' bandwidth are different. The bandwidth aggregation feature also holds in the case of media stream transmission, but in this case packet reordering may occur if the bandwidth of the paths are different.

6. New results

6.1. Analysis of the algorithms for congestion management using simulation environment

Thesis No. 1: By adding two network switches, my dissertation generalizes the topology used in earlier scientific works which also used the OPNET IT Guru Academic Edition for the simulation. The earlier works examined only three congestion management algorithms: FIFO (First In First Out), PQ (Priority Queuing) and WFQ (Weighted Fair Queuing). In all cases their conclusion was that WFQ is the most efficient algorithm for multimedia applications. In addition to these, I studied three other algorithms: CQ (Custom Queuing), CBWFQ (Class Based Weighted Fair Queuing) and LLQ (Low Latency Queuing). Based on my simulation results, I concluded that for interactive voice transfer LLQ is more efficient than WFQ in terms of IP packet delay and jitter as well [J3], [C2], [T1], [T3].

6.2. Analysis of the algorithms for congestion management using laboratory measurement environment

Thesis No. 2: The performance analysis of the mentioned congestion management algorithms (FIFO, PQ, CQ, WFQ, CBWFQ, LLQ) were extended in real laboratory measurements too. In all measurement cases it was proved, as expected, that FIFO is the least appropriate algorithm for real time voice packets. For the voice transfer purpose LLQ and PQ was found to be the most efficient in term of packet loss, end-to-end delay and jitter. Using these two algorithms no packet loss was presented by the system. Knowing the detailed working mechanism of PQ, especially considering the fact that it serves the highest priority row completely, but it starves out the next three: high rate of packet loss may occur. Based on the measurements results, my conclusion was that for real time voice transmission, LLQ is the most efficient congestion management algorithm, taking into consideration all aspects [J2], [J5], [T2].

6.3. Investigating the throughput performance of the MPT in two paths measurement environment

In my dissertation, a new architecture was introduced, which provides an easy to use extension of the present TCP/IP protocol stack to support the communication on multiple paths between endpoints. The new multipath environment was implemented in the MPT software library (and software tool) at the Faculty of Informatics, University of Debrecen. The modelling background and architecture is totally different from MPTCP, as MPT supports applications using TCP as well as UDP, and it works in the third layer (Network layer) whereas MPTCP uses the fourth layer (Transport layer). From this point of view MPT can be considered a globally unique environment.

Thesis No. 3: A measurement environment was created which provided two independent links for the two communication endpoints. The transfer performance was studied using symmetrical and asymmetrical bandwidths and also with data files of different sizes. All measurement results proved that the MPT multipath environment is able to aggregate the transfer capacity of the two physical paths very efficiently. [J1], [C1].

6.4. Investigating the throughput performance of the MPT in four paths measurement environment

Thesis No. 4: This test series analyzes the performance of the MPT multipath communication environment, taking into consideration the possibilities of file and multimedia data transfer. In order to perform the measurements, a dedicated environment was created. The measurement results proved the fact that MPT can efficiently sum the capacity of four paths, even if they have different speed. This statement applies for file transfer and also for multimedia transfer too. Considering the jitter of the multimedia transmission, it can be stated that if the speed of the summarized pathways are roughly the same then the jitter will remain at a relatively low level. On the other hand if the speed of the paths' are really different then the jitter can become much higher. [J4].

6.5. Investigating the throughput performance of the MPT in IPv4, IPv6, and IPv4-IPv6 (mixed) environments

Thesis No. 5: Using the laboratory measurements I examined the MPT multipath software library's capability of throughput summarization. The applications above MPT can use any kind of protocols in the Transport layer: TCP and UDP are both available for use. The purpose of test series was the performance analysis of transfers using MPT in the networks based on IPv4, IPv6 and mixed (IPv4-IPv6) environments. A measurement environment created for this is able to provide four independent pathways for the communication endpoints. In order to examine the transfer performance, symmetrical and asymmetrical bandwidths and packets with different sizes were used. Even if the measurement results were slightly different for different protocol versions, the results showed that MPT could efficiently sum the transfer capability of physical pathways in case of IPv4, IPv6 and also mixed IPv4-IPv6 environments. [J6].

Irodalomjegyzék / Bibliography

- [1] QOS, Implementing Cisco Quality of Service, Student Guide, Ver. 2.2, vol. 2, Cisco Systems Inc., 2006.
- [2] A. S. Tanenbaum and D. J. Wetherall, Számítógép-hálózatok. Harmadik, bővített, átdolgozott kiadás, Budapest: Panem Könyvek, 2013.
- [3] M. M. G. Rashed and M. Kabir, "A Comparative Study of Different Queuing Techniques in VoIP, Video Conferencing and FTP," *Daffodil International University Journal of Science and Technology*, vol. 5, no. 1, 2010.
- [4] T. Velmurugan, H. Chandra and S. Balaji, "Comparison of Queuing Disciplines for Differentiated Services using OPNET," in *ARTCom '09*, Kottayam, Kerala, 2009.
- [5] S. Farhangi, A. Rostami and S. Golmohammadi, "A comparative study between combination of PQ and MWRP Queuing techniques in IP network based on OPNET," *Middle-East Journal of Scientific Research*, vol. 13, no. 8, 2013.
- [6] A. Ford, C. Raiciu, M. Handley and O. Bonaventure, "TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses," IETF RFC-6824, 2013.
- [7] M. Handley and O. Bonaventure, "TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Address," IETF Internet-Draft, 2013.
- [8] L. L. Peterson and B. S. Davie, *Computer Networks: A System Approach - Network Simulation Experiments Manual*, 3rd Edition, Elsevier Inc., 2011.
- [9] A. S. Sethi and V. Y. Hnatyshin, *The Practical User Guide for Computer Network Simulation*, NW: CRC Press Taylor & Francis Group, 2012.
- [10] A. Cisco Networking, "Pagent IOS Tutorial," Cisco Systems Inc., 2009.
- [11] A. Cisco, "CCNP: Optimizing Converged Networks v5.0 - Instructor Lab Manual," Cisco Systems, Inc., 2007.
- [12] "OPNET official homepage," [Online]. Available: www.opnet.com. [Accessed 09. 09. 2013.].

Publikációk / Publications

Folyóiratcikkek / Journal papers

- [J1] Daniela E. Popescu, Daniel Filipaş, **Szabolcs Szilágyi**, *Some Aspects about a Self-Testing Solution for Implementing the TCP/IP Protocol*, Journal of Computer Science and Control Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 82-87, ISSN 1844-6043, University of Oradea Publisher, Oradea, 2008.
- [J2] **Szabolcs Szilágyi**, Béla Almási, *A Review of Congestion Management Algorithms on Cisco Routers*, Journal of Computer Science and Control Systems, Vol. 5, No. 1, pp. 103-107, ISSN 1844 - 6043, University of Oradea Publisher, Oradea, 2012.
- [J3] **Szabolcs Szilágyi**, *Analysis of the Algorithms for Congestion Management in Computer Networks*, Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 3-7, ISSN 1844 - 9689, North University of Baia Mare, Faculty of Engineering, Electrical Engineering Department, Baia Mare, 2013.
- [J4] Béla Almási, **Szabolcs Szilágyi**, *Multipath FTP and Stream Transmission Analysis using the MPT Software Environment*, International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, Vol. 2, Issue 11, pp. 4267-4272, ISSN 2278 - 1021 (Online Version), ISBN 2319 - 5940 (Print), November, 2013.
- [J5] **Szabolcs Szilágyi**, *The Effects of Different Congestion Management Algorithms over VoIP Performance*, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 6, No. 2, pp. 66-70, ISSN 2156-5570 (Online Version), ISSN 2158-107X (Print), Digital Object Identifier: 10.14569/IJACSA.2015.060210, 2015.
- [J6] Béla Almási, **Szabolcs Szilágyi**, *Investigating the Throughput Performance of the MPT Multipath Communication Library in IPv4 and IPv6*, Journal of Applied Research and Technology, (accepted 2015.)

Konferencia-kiadványok / Conference proceedings

- [C1] Béla Almási, **Szabolcs Szilágyi**, *Throughput Performance Analysis of the Multipath Communication Library MPT*, TSP 2013 - The 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing, pp. 86-90, ISBN 978-1-4799-0402-0, Digital Object Identifier: 10.1109/TSP.2013.6613897, 2-4 July, 2013, Rome, Italy.
- [C2] **Szabolcs Szilágyi**, *The Effects of Different Queuing Techniques over VoIP Performance: A Simulation Approach*, Abstracts & Pre-Proceedings of the 9th International Conference on Applied Mathematics, pp. 99-103, ISBN 978-606-93094-8-3, BiblioPhil Publisher, 25-28 September, 2013, Baia Mare, Romania.

Konferencia előadások / Conference talks

- [T1] *A Review of Congestion Management Algorithms on Cisco Routers*, EMES'12 - 11th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, 2012, University of Oradea, 24-25 May, 2012, Oradea, Romania.

- [T2] *A Review of Congestion Management Algorithms on Routers - Forgalomirányítók Torlódáskezelési Algoritmusainak Áttekintése*, amk2012 - BJMT Conference of Applied Mathematics 2012, Széchenyi István University, 21-23 June, 2012, Győr, Hungary.

- [T3] *The Effects of Different Queuing Techniques over VoIP Performance: A Simulation Approach*, ICAM9 - The 9th International Conference on Applied Mathematics, Technical University of Cluj-Napoca, North University Center at Baia Mare, Faculty of Science, Department of Mathematics and Computer Science, 25-28 September, 2013, Baia Mare, Romania.