

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei

# **Cross-layer forgalom- és protokoll elemzés**

## **Cross-layer network traffic and protocol analysis**

OROSZ PÉTER

Témavezető: Dr. Sztrik János



DEBRECENI EGYETEM  
Informatikai Tudományok Doktori Iskola  
Debrecen, 2009.



## Tartalomjegyzék

1.	A doktori értekezés előzményei és célkitűzése	1
2.	Alkalmazott vizsgálati módszerek	2
3.	Az értekezés új tudományos eredményei	2
3.1.	Aszimmetrikus kapcsolatok	2
3.2.	Nagysebességű, magas késleltetésű kapcsolatok	3
3.3.	Vezeték nélküli védett hálózatok	4
3.4.	Mobil WiFi hálózatok	4
3.5.	Multimédia alkalmazások mobil 802.11a/b/g hálózatokon	5
4.	Publikációk	7
5.	Background and aims	9
6.	Methodology	10
7.	New results	10
7.1.	Asymmetric connections	10
7.2.	High bandwidth-delay connections	11
7.3.	Secured Wifi networks	11
7.4.	Mobile WiFi networks	12
7.5.	Multimedia applications on mobil 802.11a/b/g networks	13
8.	<b>Publications</b>	14



## 1. A doktori értekezés előzményei és célkitűzései

A nagytávolságú WAN (*Wide Area Network*) adatkommunikációs hálózatok fizikai sávszélessége a technológiai fejlődésnek köszönhetően egyre dinamikusabban növekszik, átlépve a MAN (*Metropolitan Area Network*) környezetben elterjedten alkalmazott 1 Gbit/sec-os átviteli kapacitást. A fizikai sávszélesség növekedése azonban nem elegendő ahhoz, hogy a nagyságrendbeli átviteli teljesítménytöbbletet alkalmazás-szinten is érzékelhessük. Tudjuk, hogy IP (*Internet Protocol*) hálózaton nagymennyiségű adatot megbízhatóan TCP (*Transmission Control Protocol*) szállítási protokoll segítségével továbbíthatunk. Azonban a TCP torlódásvezérlő (*congestion control*) és ablakméret-szabályzó (*windowing*) mechanizmusa komoly korlátot jelent az effektív átviteli teljesítményre a nagytávolságú és nagy sávszélességű (pl. nemzetközi, interkontinentális) kapcsolatokon. A standard Reno alapú TCP torlódásvezérléséből eredő szűk keresztmetszetre egy gyakorlati példával szeretnénk rávilágítani: Egy 100ms késleltetésű, 10Gbit-es kapcsolaton 1500 bájtos standard TCP csomagokat forgalmazunk. Ahhoz, hogy egy TCP adatfolyammal tartósan elérjük a 10 Gbit-es fizikai kapcsolat maximális hasznos sávszélességét (*net bandwidth*), az effektív ablakméretet 121665 Kbájt méretűre kellene beállítani, ezen kívül a csomagvesztési arány nem lehetne több mint egyetlen torlódási esemény 5 millió csomagonként.

A klasszikus (Reno alapú) TCP protokoll átvitelt vezérlő mechanizmusai a hálózati technológiák egy másik szegmensében, a vezeték nélküli helyi hálózatokban (*WiFi – Wireless fidelity, WLAN – Wireless Local Area Network*) is komoly teljesítménycsökkenést eredményezhetnek. A torlódásvezérlő és az újraküldést szabályzó mechanizmusok természetükből adódóan a mobil WiFi hálózatokban még súlyosabb anomáliákat generálnak. Ebben az esetben mobil hálózat alatt olyan infrastruktúrát értünk, melyben a rádiós cellák közötti fizikai mozgás biztosított a vezeték nélküli kliens számára.

A kialakított tesztrendszerekkel és a benne végzett mérésekkel céloim az volt, hogy megvizsgáljam az utóbbi időben megjelent alternatív TCP változatok teljesítményparamétereit, valamint karakterisztikus viselkedésüket nagysebességű, magas késleltetésű (valós) optikai hálózatokon és mobil WiFi környezetben, továbbá kidolgozzak olyan beállítási módszereket, melyekkel hatékonyan befolyásolható az alap algoritmus működése. Korábbi

tanulmányokban találhatunk konkrét alternatív TCP variánsra végzett összehasonlító elemzéseket, azonban több variánsra kiterjedő komplex, kereszt réteges (*cross-layer*) vizsgálatokat bemutató tanulmányból ez ideig kevés született. Természetesen a korábbi kutatások eredményeiből kiindulva terveztem meg az alkalmazott vizsgálati módszereket. A disszertáció első részében bemutatom azokat az elemzéseket, melyeknél nagysebességű, valamint aszimmetrikus kapcsolatokon vizsgáltam a TCP protokoll működését befolyásoló kernel-változókat (pl. puffer- és ablakméretek, torlódásvezérlés) először alapértelmezett értékekkel, majd a tapasztalatok alapján módosított paraméter-beállításokkal és módosított algoritmusokkal dolgoztam. A második részben mobil vezeték nélküli környezetben folytattam a kereszt-réteges vizsgálatokat, IPv4 és IPv6 infrastruktúrán, valamint továbblépve megnéztem a TCP viselkedését védett WiFi hálózatban bekövetkezett roaming események kapcsán.

## 2. Alkalmazott vizsgálati módszerek

A többrétegű (*cross-layer*) forgalomelemzés egy viszonylag újkeletű elemzési technika, melynek legfőbb célja a kommunikáció során a hálózati rétegekben végbemenő folyamatok egymásra és magára a kommunikációra kifejtett hatásának komplex vizsgálata. A TCP/IP referenciamodell egyes rétegeiből kinyert információk együttes vizsgálata vezet el a kommunikáció során felmerülő komplex problémák megértéséig. Például vezeték nélküli hálózatok esetén a médium jellegéből adódó relatíve gyakori bithibák nagyságrendjére a TCP szegmensek vizsgálatából is tudunk következtetni. A többréteges analízis során megfigyelhető, hogyan hatnak az egyes rétegekben bekövetkező események a rétegmodell többi elemére.

## 3. Az értekezés új tudományos eredményei

### 3.1. Aszimmetrikus kapcsolatok

A TCP teljesítményét egyértelműen meghatározza a nyugták beérkezési ideje. Az erősen torlódott felfelé irányú kapcsolaton a nyugták viszont csak késleltetéssel továbbíthatóak. Ebben a fázisban a lefelé irányú TCP folyam átviteli sebessége a rendelkezésre álló fizikai sáv szélesség 70%-a körüli értékre csökken, az alkalmazott torlódásvezérlés függvényében. A

kliens irányából újabb TCP folyamat indítottunk, még erőteljesebb torlódási jelenséget generálva a felfelé irányú kapcsolaton, ami további átviteli-teljesítmény csökkenést eredményezett a lefelé irányú TCP folyamaton (3. fázis). Az effektív átviteli ráta ekkor 40% körüli értéket vett fel. Ebben a helyzetben az erősen torlódott, eredendően is alacsony sávszélességű felfelé irányú következtében a rendelkezésre álló lefelé irányú sávszélességet a TCP nem képes hatékonyan kihasználni. Így kimutattuk, hogy a felfelé irányú alacsony sávszélessége közvetlen hatással van a lefelé irányú TCP folyamati átviteli teljesítményre.

**1. tézis:** Rámutattam, hogy a felfelé irányú kapcsolati terheltség az alkalmazott torlódásvezérlő algoritmustól függetlenül közvetlen hatással van a lefelé irányú TCP folyamati teljesítményére, minthogy uplink torlódás hatására a TCP önszabályzó mechanizmusa lecsökkenti az effektív ablakméretet. További problémát okoz a nyugták érkezési időközének burst-ös változása (*ACK compression*) az uplink-en, ami torlódást okoz a lefelé irányon. Ebben a helyzetben a TCP nem képes hatékonyan kihasználni a fizikai downlink sávszélességet[J4].

### 3.2. Nagysebességű, magas késleltetésű kapcsolatok

Ebben a tesztsorozatban célt az volt, hogy a nagysebességű kapcsolat B x D szorzata alapján az alapértelmezett TCP kernel-változók hangolásával javítsam a TCP kapcsolat átviteli karakterisztikáját.

**2. tézis:** Nagysebességű, magas késleltetésű hálózatokon a TCP-t hangolni kell az optimális átviteli teljesítmény eléréséhez. A B x D szorzat, az egyidejű TCP kapcsolatok száma, valamint a csomagvesztési arány ismeretét felhasználva a TCP kernel-változók megfelelő hangolásával jelentős, egyes esetekben közel 200%-os átviteli teljesítménynövekedés érhető el. Ugyanakkor bármely TCP variánst is néztem, az általam végzett mérések során alkalmazott relatíve alacsony (~4,4ms) késleltetésű WAN környezetben a torlódásvezérlő algoritmus optimálisra hangolt kernel változókkal sem volt képes az 1 Gbit-es kapcsolat fizikai sávszélességéhez közeli átviteli teljesítményt nyújtani [C7].

### 3.3. Vezeték nélküli védett hálózatok

Hangsúlyozottan az adatkapcsolati szintű roaming eseményre fókuszáltunk. Azt láttuk, hogy a 802.11a szabvány mobilitás tekintetében nem igazolta hatékonyságát. Nyilvánvalóan a hosszabb mérési intervallumokon túl a roaming esemény a TCP kapcsolatok lebontását is eredményezte számos esetben, annak ellenére, hogy a 802.11a a kevésbe terhelt, tehát kevésbe zajos 5.4GHz-es tartományban üzemel. Mindegyik biztonsági protokoll kombináció többletterhelést jelent a roaming időre. Következésképpen az alkalmazási rétegben érzékelhető QoS paraméterek minőségét is csökkentik. Bármely roaming szakaszt is nézzük, jelentős különbségek adódnak a hitelesítési mechanizmusok (MSCHAP, GTC) és a vezeték nélküli technológiák között is (IEEE 802.11a/b/g). Az LLC (Logical Link Control) aktivitás ideje valójában az alkalmazott PEAP verziótól (vagyis a tunel-en belül használt hitelesítéstől) függ. Ebben a tekintetben az L2-es roaming minden esetben gyorsabban ment végbe MSCHAP belső hitelesítéssel. Ennek ellenére a hitelesítő és titkosító mechanizmusok közötti eltérések jóval kisebb nagyságrendűek, mint a szállítási rétegben tapasztalható késleltetés, mely nagyságrendileg a másodperces tartományban mozog.

### 3.4. Mobil WiFi hálózatok

A mobil WiFi környezetben elérhető alkalmazási rétegbeli szolgáltatás minőség a komplex roaming folyamattól függ, ahol az összteljesítmény a protokoll stack számos komponensének függvénye, hangsúlyozva az alkalmazott TCP torlódásvezérlő mechanizmus jelentőségét.

Minél hosszabb a roaming periódus, annál nagyobb számú TCP csomagot kell újraküldeni, ami ennek megfelelően rontja a TCP átviteli teljesítményét és a szolgáltatásminőséget[J1].

A mobil kliens bázisállomásokhoz viszonyított relatív sebessége és a roaming végrehajtásának kölcsönhatása jelentősen befolyásolja a TCP kapcsolatokat, miközben kevésbé hat az UDP átvitelre. Az összehasonlító mérésekből statisztikai módszerekkel nyert eredmények lehetővé teszik, hogy valós képet kapjunk az IPv4 és az IPv6 mobil átvitel esetén tanúsított viselkedésre vonatkozóan, valamint választ kaphatunk arra a kérdésre, hogy valóban magasabb minőségű mobil adatátvitelt eredményez-e az IPv6 protokoll vezetékek nélküli adatkapcsolati réteg fölött elődjéhez, az IPv4-hez képest. A



hagyományos elektronikus alkalmazások az IPv4 protokoll „best effort” jellege miatt lassúbb átvitel biztosítanak mobil WiFi környezetben, míg az IPv6 protokoll az alsóbb rétegekhez történő gyors adaptáció miatt hatékony átvitel képes biztosítani.

Az időérzékeny alkalmazások (IP telefon, videokonferencia, stb.) az IPv4 protokoll QoS korlátai miatt mobil WiFi környezetben nagy kieséseket szenvednek, így az eredményül kapott szolgáltatás-minőség elfogadhatatlan. Az IPv6 gyors adaptációja miatt a kiesések kisebbek, ezért a jelenlegi mobil WiFi környezetben fast roaming esetén közel elfogadható szolgáltatási minőséget nyújt az infokommunikációs alkalmazások számára[J1].

### **3.5. Multimédia alkalmazások mobil 802.11a/b/g hálózatokon**

A különböző IEEE 802.11 szabványok eltérő módon viselkednek beltéri környezetben végrehajtott cellaváltások esetén.

**3. tézis:** Kimutattuk, hogy a roaming folyamat lejátszódása nagymértékben függ a bázisállomáson beállított beacon periódus ( $T_b$ ) időtől. Ha beacon periódust az alapértelmezett 100 ms értékről 50 ms, majd 20 ms-ra csökkentjük, akkor az MT gyakrabban érzékeli a jel/zaj viszony változását, így mozgás közben érzékenyebb lesz a környezeti viszonyok változására[J2].

Vizsgálataink összegzéseként megállapítjuk, hogy a legoptimálisabb TCP átviteli teljesítményt akkor kapjuk, ha az adott hálózati paraméterek, valamint forgalom-karakterisztika ismeretében választjuk ki a megfelelő torlódásvezérlő mechanizmust, valamint a kernel-változók értékeit megfelelő eljárással összehangoljuk a forgalom karakterisztikája alapján: sávszélesség, késleltetés, egyidejű TCP kapcsolatok száma, csomagvesztés, forgalom jellege, teljesítmény és méltányosság, valamint beacon periódus.

*A közelmúltban már megjelentek bizonyos operációs rendszereken olyan TCP változatok, mely képesek a TCP kernel-változók dinamikus szabályozására a kapcsolati paraméterek függvényében. A korszerű mechanizmusok minden kiépülő TCP kapcsolathoz karakterisztikájának megfelelő (útvonal sáv szélessége, késleltetés, konkurens kapcsolatok, forgalom jellege) egyéni puffer méreteket, és válaszfüggvény paramétereket állítanak be, bizonyos esetekben kettős torlódásvezérlést alkalmaznak.*

**4. tézis:** Kimutattuk, hogy az L2-es roaming esemény IEEE 802.11a szabványú hálózaton jelentősen hosszabb időt vesz igénybe, mint a 802.11b/g esetén. A valós idejű multimédia alkalmazások számára a szabvány 802.11a technológia roaming teljesítménye elfogadhatatlan szolgáltatásminőséget nyújt cellaváltáskor.

A kedvezőtlenebb mérési eredmények magyarázata, hogy az 5Ghz-es tartományban több csatorna áll rendelkezésre (Európában 19 nem átfedő csatorna), mint a 2,4Ghz-es sávban (3 nem átfedő csatorna), így cellaváltáskor a szkennelési idő (channel probe) is természetesen megnövekszik. Míthogy a kliens a szkennelést csatornaszám és frekvencia tekintetében növekvő sorrendben hajtja végre az 1. csatornától egészen a keresett csatornáig, így két szomszédos rádiós cella esetén a cellaváltási sebességet optimalizálni lehet azáltal, hogy két szomszédos nem átfedő csatornát alkalmazunk. A szabvány meghatározza a csatorna szkennelési időt:

$$N_{ch} * T_{min} \leq t \leq N_{ch} * T_{max},$$

ahol  $N_{ch}$  a csatornák száma,  $T_{min}$  az a legkisebb idő, amennyit a kliensnek várakoznia kell a probe response válaszcsomagra,  $T_{max}$  az a maximális idő amennyit várakoznia kell a kap probe response-ra,  $t$  a teljes effektív szkennelési idő.

A gyakorlatban a legtöbb gyártó 30-40ms tartományban állítja be a  $T_{max}$ -ot, ez a timeout tartomány nem alkalmas valós idejű multimédia alkalmazások számára, mivel a legkedvezőtlenebb esetben  $T_{max}$  akár 570-760ms teljes szkennelési időt eredményez.

## 4. Publikációk

Az értekezés alapjául szolgáló közlemények

### **Nemzetközi folyóirat cikkek**

- [J1] *Evaluation of IPv6 Services in Mobile WiFi Environment* – Zoltán Gál, Péter Orosz, Andrea Karsai. Selected Papers of Info-Communications Technology, Volume LX., (2005) pp 47-54.
- [J2] *Effect of WiFi Systems on Multimedia Applications* – Zoltán Gál, Andrea Karsai, Péter Orosz. Info-communications-technology Volume LXII. 2007 (2007/1) Selected papers pp 8-14.
- [J3] *Performance Evaluation of Centralized IEEE802.11i-based Security Suites on Mobile WiFi Networks* – Péter Orosz, János Sztrik, Seokjun Lee, Youngjin Oh, Chesoong Kim, Telecommunications Review Vol. 17 No. 6, (2007/12) pp 1133-1143.
- [J4] *Dynamics and Congestion Control of Alternative TCP Variants on Asymmetric Lines* – Péter Orosz, János Sztrik, Chesoong Kim. ISAST Transactions on Communications and Networking, No. 1 Vol. 2, (2008) pp 71-74.

### **Előadások, konferencia cikkek**

- [C1] *Vastag kliensek menedzsmentje Tivoli környezetben / Management of Thick Clients in IBM Tivoli Environment* – Orosz Péter, Gál Zoltán. Networkshop 2004 Conference, Győr, Hungary.
- [C2] *IP kapcsolatok elemzése mobil WiFi környezetben* – Gál Zoltán, Orosz Péter, Karsai Andrea. Networkshop 2005 Conference, Szeged, Hungary.
- [C3] *Központosított EAP alapú hitelesítés vezeték nélküli hálózatokban / Centralized EAP Based Authentication for Wireless Networks* – Orosz Péter, Sztrik János, Chesoong Kim. Informatics in Higher Education 2005 Conference, Debrecen, Hungary.
- [C4] *WiFi rendszeren működő multimédiás alkalmazások elemzése* – Gál Zoltán, Karsai Andrea, Orosz Péter. Networkshop 2006 Conference, Miskolc, Hungary.

- [C5] *Adatbiztonság elemzése mobil WiFi környezetben / Security Analysis in Mobile WiFi Environment* – Orosz Péter, Gál Zoltán, Karsai Andrea. Networkshop 2006 Conference, Miskolc, Hungary.
- [C6] *TCP dynamics and congestion control on asymmetric lines* – Orosz Péter, Sztrik János, Che Soong Kim. ICAI '07 Nemzetközi konferencia és Proceedings, Eger, Hungary.
- [C7] *Alternatív TCP variánsok és torlódásvezérlő mechanizmusok vizsgálata magas késleltetésű, nagy sávszélességű hálózatokon / Observation of alternative TCP variants and congestion control mechanisms on high bandwidth delay networks* – Orosz Péter. Networkshop 2007, Eger, Hungary.
- [C8] *Alternatív TCP torlódásvezérlő mechanizmusok vizsgálata magas késleltetésű, nagy sávszélességű hálózatokon / Observation of alternative TCP congestion control mechanisms on high bandwidth delay networks* – Orosz Péter. Informatika a felsőoktatásban 2008, Debrecen, Hungary.

## 1. Background and aims

Due to the dynamically growing technological development, the physical bandwidth of the wide area data communication networks are passing over the 1Gbps bandwidth capacity widely applied in MAN (*Metropolitan Area Network*) implementations. However, higher physical bandwidth alone is not a sufficient factor to gain considerable benefits in the performance on the level of the application layer. We know that large amount of data can be safely transferred only by TCP (*Transmission Control Protocol*) in IP (*Internet Protocol*) networks. Nevertheless, congestion control and windowing mechanism of TCP set a serious limiting factor for the effective transmission throughput on long distance high bandwidth connections. I would like to give a practical example on the bottleneck of standard Reno TCP congestion control: 1500 byte standard TCP packets are transferred through a 10Gbit connection with 100ms delay. To permanently reach the maximum net bandwidth of the 10Gbit physical connection with a TCP data stream the effective window size should be set to 121665 Kbyte, and the packet loss ratio could not be higher than 5 million per congestion event[1].

The transmission-control mechanisms of the classic (Reno-based) TCP protocol can also cause severe setbacks in the performance in another segment of the network technologies, namely in the wireless local area networks. (*WiFi – Wireless fidelity, WLAN – Wireless Local Area Network*). The mechanisms controlling the congestion and regulating the retransmissions by their nature can generate more serious anomalies in the mobile WiFi networks. In this case under “mobile network” we mean those infrastructures in which the physical movement of the wireless client is enabled between the radio cells.

I set up test environments with the intent of investigating the performance and characteristics of the novel alternative TCP variants on real high bandwidth-delay optical network and a mobile WiFi environment, furthermore to work out a configuration method in order to effectively manipulate the base-algorithm. We can find comparative analysis of TCP variants in previous publications; however few papers were published so far presenting comparative cross-layer investigation of multiple variants. I designed the applied methods based on previously published research results. In the first part of the dissertation I present such analysis where I investigated kernel level TCP variables that have direct effect on the operation of TCP on

high speed and asymmetric connections (eg. buffer and window sizes, congestion control). I worked with the default variables settings first, then I modified these variables based upon my previous experiences. In the second part I continued my cross-layer observations on mobile wireless networks with IPv4 and IPv6, moreover I stepped forward to analyze TCP behavior on roaming events in secured WiFi networks.

## 2. Applied methods

Cross layer traffic analysis is a relatively new technique that helps us to get a more extensive insight on the impact the different processes running in the network layers have on each other, and their effects on the communication itself. Joint investigation of the information retrieved from each layer of the TCP/IP reference model helps us to understand the complex problems arising during the communication process. For example, in case of a wireless network by observing the transmitted TCP segment stream we can deduce the order magnitude of the relatively frequent bit-errors that evolve from the characteristics of the medium. Applying cross-layer analysis we can observe how an event occurring in a given layer affects the other elements of the reference model.

## 3. New results

### 3.1. Asymmetric connections

Performance of TCP is determined by the arrival time of acknowledgements. Acknowledgements could be transferred with high latency on a heavily congested uplink. In the first measurement phase transfer rate of the TCP stream fell to approx. 70% of the available net bandwidth depending on the applied congestion control mechanism. Another TCP stream has been initiated from the client side generating a more serious congestion situation on the uplink that drove to a further transfer rate degradation (third phase). Effective rate has fallen down to approx. 40% and around. In this case TCP is not able to effectively utilize the available downlink bandwidth due to the fully congested low bandwidth uplink. I pointed out that low uplink uplink

bandwidth of has a direct effect on the transmission performance of TCP stream on downlink.

**Thesis #1:** I pointed out how uplink load impacts the performance of downlink TCP stream irrespectively of the applied congestion control algorithm, since TCP's self-clocking mechanism decreases the effective window upon uplink congestion. Further issue rises due to the bursty arrival time of the ACKs (compression) on the uplink that drives to a congestion event on the downlink. In this situation TCP is not able to effectively use the available bandwidth on the downlink[J4].

### 3.2. High bandwidth-delay connections

With this series of tests we intended to enhance the transmission characteristics of TCP by tuning the default TCP kernel variables based on the  $B \times D$  product of the connection.

**Thesis #2:** In order to get the optimal end-to-end transmission performance we need to adjust TCP parameters on high BDP networks. Using the  $B \times D$  product, number of concurrent TCP sessions and packet loss ratio we can adjust kernel level TCP variables achieving a significant increase (200 percent in some cases) in the transmission performance. However, none of TCP variants I observed was able to get close to the available physical bandwidth of the 1Gbps connection even with optimized kernel variables on the relatively low-latency (~4,4msec) long distance network used in my measurements[C7].

### 3.3. Secured WiFi networks

In this paper we have investigated the performance of IEEE802.11i-based security suites on IEEE802.11a/b/g mobile WiFi systems. We have focused on L2 roaming events. We found that the 802.11a standard can not prove its efficiency in terms of mobility. Obviously, apart from presenting longer intervals for all measured phases, roaming events produced disconnection of the TCP session in several cases. However, 802.11a operates at 5.4GHz frequency range that is less congested. All of the measured security protocol combinations added their overhead to roaming time. Therefore, the QoS

parameters experienced at the application layer declined. If we observe any roaming phase, significant differences arise between authentication mechanisms (MSCHAP, GTC) as well as WiFi technologies (IEEE 802.11a/b/g). Time of LLC activity actually depends on the applied PEAP version. At this point L2 roaming was faster with MSCHAP in all cases. However, differences between the performance of authentication and encryption mechanisms are smaller of order compared to the transport layer latency that is in the second domain.

### **3.4. Mobile WiFi networks**

Applications layer QoS in mobile WiFi environment depends on a complex roaming process where the overall performance is built up from several components of the protocol stack especially of the congestion control mechanism applied.

The longer the roaming phase the larger number of TCP segments have to be resent, which negatively affects the TCP transmission and the quality of service[J1].

TCP connections are significantly, UDPs are less affected by the interaction between the mobile station's relative speed and the roaming execution[5,6]. The results gained statistically from the comparative measurements give us a practical review about the behavior of IPv4 and IPv6 protocols in mobile environment, furthermore we knew the answer that the performance of IPv6 over wireless data link layer is really higher compared its predecessor IPv4. The conventional applications provide slower transmission over mobile links due to the best effort nature of IPv4, while IPv6 assures effective data transfer because of its quick adaptation to lower layers.

Time sensitive applications (IP phone, video conference) suffer significant dropouts due to the limitations of IPv4's QoS in mobile WiFi environment therefore the provided quality is unacceptable. The quick adaptation of IPv6 decreases the interval of dropouts [4].



### 3.5. Multimedia applications on mobile 802.11a/b/g networks

Different IEEE 802.11 technologies have dissimilar behaviors during L2 roaming event in indoor environment[7].

**Thesis #3:** We pointed out that the roaming process heavily depends on the beacon period (T<sub>b</sub>) set on the access points. When the beacon period decreases from the default 100ms to 50ms and 20ms then mobile client can sense the signal-to-noise ratio more frequently therefore it will be more sensitive to changes in the RF environment[J2].

Summarizing our investigations we can establish that optimal performance of TCP transmission could be reached by applying congestion control mechanism based on our knowledge about the given network' parameters and traffic characteristics. Furthermore we should adjust kernel variables according to the bandwidth, delay, concurrent TCP streams, packet loss, traffic shape, performance, fairness and beacon period .

*Recently such TCP variants had been released with some Operating Systems that are capable of adjusting TCP kernel variables according to the network parameters. Novel mechanisms set up buffer sizes and response functions that adapt to the characteristics of the TCP connection.*

**Thesis #4:** We showed that L2 roaming process takes significantly more time on IEEE 802.11a network than on 802.11b/g. Roaming performance of 802.11a technology provided an unacceptable quality of service for real time multimedia applications.

Explanation of the worse measurement values is the following: more non-overlapping channels (19 in EU) are available on the 5Ghz frequency range than on the 2.4Ghz; subsequently channel probing time increases at radio cell changes. Since wireless client scans radio channels starting from channel 1 to the channel of the AP, roaming time could be optimized by selecting the lowest non-overlapping consecutive channels for neighboring APs. The standard defines the channel probing time values as following:

$$N_{ch} * T_{min} \leq t \leq N_{ch} * T_{max},$$

where  $N_{ch}$  is the number of channels,  $T_{min}$  is the smallest time period that the client has to wait for probe response,  $T_{max}$  is the maximum time value waiting for,  $t$  is the total channel probing interval.

In practice most of the hardware vendors set  $T_{max}$  up on their devices in the 30-40ms range, however this timeout interval is not adequate for real time multimedia applications, since  $T_{max}$  in the worst case could result in an overall scanning time of 570-760ms.

#### 4. Publications

For publications see pp. 6-7.