



**MULTIMÉDIÁS ALKALMAZÁSOK MINŐSÉGI PARAMÉTEREINEK
JAVÍTÁSÁRA SZOLGÁLÓ ÚJ MÓDSZEREK IP ALAPÚ
HÁLÓZATOKBAN**

Tézisfüzet

Huszák Árpád

Tudományos témavezető
Imre Sándor DSc.

Budapest, 2009

1. Bevezetés

Az új vezetékes és vezeték nélküli technológiák ma már biztosítják azokat a feltételeket, melyek lehetővé teszik a multimédiás alkalmazások használatát. Az audio/videó szolgáltatások is robbanásszerű fejlődésen mentek át, hogy kielégíthessék az újabb és újabb felhasználói igényeket. A multimédiás szolgáltatások minőségi paramétereit alapvetően befolyásoló hálózati jellemzők a hálózat késleltetése, hibavalószínűsége, illetve a hozzáférhető hálózati kapacitás.

A késleltetés és csomagvesztés kezelésére, valamint a videófolyam hatékonyabb átvitelére új módszereket dolgoztam ki, melyek a szállítási-, illetve az alkalmazási rétegben használhatók. Az adatok hiba nélküli kézbesítésért a szállítási réteg felel. A mai szállítási protokollok vagy megbízhatatlanok, vagy teljesen megbízhatóak, amit a csomagok újraküldésével ér el. A multimédiás alkalmazások adatainak továbbítására azonban egy köztes megoldás hatékonyabbnak bizonyul, ahogy azt munkámban is igazolom. A multimédiás alkalmazások által használt megbízhatatlan protokollok nem küldik újra az elveszett, illetve sérült csomagokat, azonban a körülmények ezt sok esetben lehetővé tennék. Kidolgoztam több módszert, amely a DCCP protokoll [1] nyugtázási mechanizmusát kihasználva, és a torlódáskezelő algoritmus által mért hálózati információk alapján képes eldönteni, hogy mely csomagokat érdemes újraküldeni. A szelektíven újraküldött csomagok sikeres továbbítása esetén jelentős javulást érhetünk el a multimédiás szolgáltatás minőségében. A döntési mechanizmus több szempont alapján is működhet. Többen vizsgálták mind a csomag tartalma alapján [2][3], mind a hálózati késleltetés alapján [4][5] történő újraküldést.

Mobil eszközeink többnyire több interfésszel is rendelkeznek, ezért a hatékonyság tovább növelhető, ha az elérhető hálózati kapcsolatok közül többet is használunk párhuzamosan a multimédiás adataink továbbítására. Az adatfolyam csomagjainak prioritása nem egyforma, ezért a csomagok ügyes megosztása az interfészeken a videó minőség javulását okozhatja. A legfontosabb adatokat a legjobb minőségű csatornákon érdemes továbbítani, azonban a csatornák sorrendjének meghatározása sem egyértelmű feladat. Számos sorrend meghatározó algoritmust mutattak be [6][7][8], azonban az ún. *sorrend-felcserélődési* probléma többnél is jelentkezik. Megfelelő normalizáló eljárások alkalmazásával ez a jelenség jelentősen csökkenthető és meg is szüntethető, elkerülve ezzel a fölösleges cellaváltásokat és csökkentve a multimédiás adatfolyamokra érzékeny késleltetést.

Az IP alapú hálózat késleltetését sok tényező befolyásolja. Mobil hálózati struktúrák esetén a cellaváltások miatti késleltetés jelentős hatással van az alkalmazás minőségére. A késleltetés és az adminisztrációs üzenetek csökkentésére dolgozták ki a MIPv6 (Mobile IPv6) protokollt [9]. A MIPv6 kiterjesztett változatai, a HMIPv6 (Hierarchical MIPv6) [10] és a RegIPv6 (Regional Registration for IPv6) [11], melyek lehetővé teszik a jelzések számának további csökkentését, a mobil eszköz és az otthoni ügynök között. A két protokoll leglényegesebb tulajdonsága, hogy hierarchikus fa struktúrát ír elő a domain-en belüli routerek elrendezésére, majd ezt használja ki a mobil terminálok vándorlásának hatékonyabb elrejtésére. A domain területen belül több potenciális hálózati ügynök közül kell kiválasztani a megfelelőt, amely feladata, hogy az általa lefedett területen elrejtse a terminál mozgását. A protokollokat leíró szabványok nem adnak útmutatást arra vonatkozóan, hogy milyen szempontok alapján kell választani a potenciális hálózati ügynökök közül, pedig a helyes választással jelentős adminisztrációs jelzescsökkenés érhető el. Munkám során a hálózati ügynökök hálózati hierarchiaszintjének meghatározását tűztem ki célul, ezzel segítve a hatékony ügynökválasztást.

2. Kutatási célok

Multimédiás alkalmazások rendkívül érzékenyek a csomagvesztésre és késleltetésre, ezért mindkét hálózati paraméter értékét a legalacsonyabb értéken kell tartani, illetve hatékonyan kell kezelni a jobb szolgáltatási minőség érdekében. Kutatásaim fő célja olyan módszerek kidolgozása volt, melyek a hálózati struktúra megfelelő elrendezésével, szelektív újraküldési technikák alkalmazásával és többutas adattovábbítás lehetőségével képesek hatékonyan csökkenteni a mérhető csomagvesztési arányt és késleltetést.

A bemutatott problémákhoz kapcsolódóan, kutatási területem a következő három fő témára csoportosítható:

1. Jelenlegi transzport protokollokat két kategóriába csoportosíthatjuk: megbízható és megbízhatatlan. A megbízható protokollok garantálják a hibamentes adatátvitelt, melyet újraküldéssel tud megvalósítani, növelve a késleltetést. A megbízhatatlan protokollok nem foglalkoznak a csomagvesztésekkel, cserébe viszont nem okoznak extra késleltetést. Mindkét kategória szélsőségnek tekinthető. Kutatásom egyik fő célkitűzése egy köztes kategória előnyeinek tanulmányozása. Céлом egy részleges újraküldést megvalósító módszer kidolgozása volt multimédiás alkalmazások számára. Ennél a módszernél a legfontosabb kérdés, hogy hogyan döntsük el egy elveszett csomagról, hogy újraküldjük, vagy sem. A döntéshez a hálózati késleltetést és a mért csomagvesztési arányt használtam fel. Megmutattam, hogy a DCCP szállítási rétegbeli protokoll által szolgáltatott információk alapján működő eljárás a csomagvesztés minimalizálásával, a késleltetés adott érték alatt tartásával és additív jelzésforgalom nélkül javít a szolgáltatás minőségén.
2. A legelterjedtebb videó kódolók (MPEG-2, MPEG-4, H.264) mindegyike különböző fontosságú képtípusokat definiál. Az eltérő prioritású adatokban keletkezett hiba hatása is emiatt eltérő lesz. Céлом ezért az volt, hogy a videófolyam adatait fontosságuk mértéke alapján továbbítsam. A mai mobil eszközeink több hozzáférési hálózatot is használhat párhuzamosan, melyek késleltetése, csomagvesztési aránya, sávszélessége, stb. jelentősen eltérhet. Bemutattam egy új eljárást, mellyel az adatok hatékony elosztása a különböző interfészeken javítani tudja a videó mérhető minőségét.
3. Kutatásom harmadik területe az HMIPv6 és RegReg6 adminisztrációs üzenetei által okozott hálózati terhelés vizsgálata, valamint egy új módszer kidolgozása ennek csökkentésére. Megmutattam, hogy a cellaváltásból adódó adminisztratív forgalom mértéke függ a hálózati ügynök a hierarchikus struktúrában kijelölt helyétől. A kidolgozott módszer a domain-en belüli hierarchikus router-struktúrából és a mobil terminál bolyongási jellemzői alapján választ a lehetséges hálózati ügynökök (GMA/MAP) közül. HMIPv6 esetén a hálózati ügynök neve Mobility Anchor Point (MAP), míg RegReg6 esetén Gateway Mobility Agent (GMA). A megoldás kiegyensúlyozottabb adminisztratív forgalmat generál, miközben hatékonyan elfedi a mobil terminálok mozgását is. A alacsonyabb adminisztrációs forgalom csökkenti a hálózati terhelést, kiegyensúlyozott cellaváltási gyakoriság mellett.

3. Módszertan

A fenti célkitűzések különbözősége eltérő eszközök alkalmazását teszi szükségessé. A továbbiakban röviden ismertetem az alkalmazott módszereket.

Az új módszerek és algoritmusok kidolgozása során kombinatorikai, valószínűségszámítási eszközöket alkalmaztam. Az elméleti modelleken alapuló modellek segítségével általánosabban leírhatók a kidolgozott algoritmusok működése és hatásai. A

sztochasztikus modellek és valószínűség-számítási módszerek az egyes helyzetek kiértékelésekor, valamint a rendszer hatékonyságával összefüggő statisztikák készítésekor egyaránt alkalmazhatók.

A teoretikus megközelítés azonban nem minden esetben célravezető. Ennek oka, hogy a túl sok változó paraméter nehézkessé és túl bonyolulttá tenné az elméleti modellek használatát, valamint a valós környezet hatásait sem tudja hatékonyan figyelembe venni. Az analitikus vizsgálatok mellett ezért a szimuláció és valós tesztkörnyezet létrehozásának lehetőségeivel is éltem.

Az első és második kutatási területen kifejezetten a szimulációs módszerek alkalmazása volt kifizetődőbb, hiszen a hálózat tulajdonságának szimulációjára már kiforrott eszközök állnak rendelkezésünkre (NS2, OMNET++). Ezek az alkalmazások könnyen paraméterezhetők, módosíthatók, és a szolgáltatott eredmények is könnyen értékelhetők. Ennek ellenére, ahol lehetséges volt, éltem az általánosabb leírást nyújtó analitikus módszerekkel. Szimulációk egy részét saját C nyelven készített keretrendszeremben készítettem.

Munkám nagyobbik része a multimédiás alkalmazások, főleg videó minőség javítására szolgáló új technikákra fókuszál, ezért elkerülhetetlen olyan módszer használata, amely a videó objektív minőségének meghatározására szolgál. A *peak signal-to-noise ratio* (PSNR) egy széles körben elfogadott mérőszám a videó minőségromlásának meghatározására. A szimulációk és mérések eredményei így könnyen összehasonlíthatók egyéb eljárások eredményeivel.

4. Új eredmények

4.1. Szelektív újraküldési eljárások

A szabványosított szállítási rétegbeli protokollokat csoportosíthatjuk megbízhatóságuk alapján: megbízható (TCP, SCTP) illetve megbízhatatlan (UDP, UDPLite, DCCP). A szelektív újraküldés lehetővé teszi csupán bizonyos csomagok újraküldését, vagyis egy köztes utat jelent a megbízható és a megbízhatatlan szélsőség között. A sikeresen újraküldött csomag minden esetben javít a multimédiás adatfolyam minőségén, azonban a hibamentes újraküldés lehetősége nem minden esetben áll fenn. A késve megérkezett csomag már nem tud javítani a minőségen, miközben felesleges terhelést jelent a hálózat számára. Hasonlóképpen egy túlterhelt hálózatban sem helyes az újraküldéssel próbálkozni, hiszen a csomag ismét elveszhet, vagy más csomag elvesztését okozza. A hálózat terheltségének becslésére a DCCP [1] protokoll TFRC (TCP Friendly Rate Control) [14] torlódásszabályozó algoritmusát használtam fel. Az egyes újraküldendő csomagok között is tehetünk különbséget, hiszen a csomag tartalma határozza meg, hogy mekkora minőségi javulás valószínűsíthető meg az újraküldéssel. Többen vizsgálták a részleges újraküldés lehetőségét [2]–[5], azonban ezek a megoldások új üzenetek bevezetésével próbálkoztak. A videó minőségének mérésére az általánosan elfogadott *peak signal-to-noise ratio* (PSNR) mérőszámot alkalmaztam.

Kidolgoztam több különböző szelektív újraküldést megvalósító eljárást a DCCP transzport protokoll alkalmazásával, melyek közötti különbség az újraküldés döntési mechanizmusában van. Bemutattam egy új modellt, amely a késleltetés és hálózati terheltség alapú döntési mechanizmus közötti összefüggést írja le.

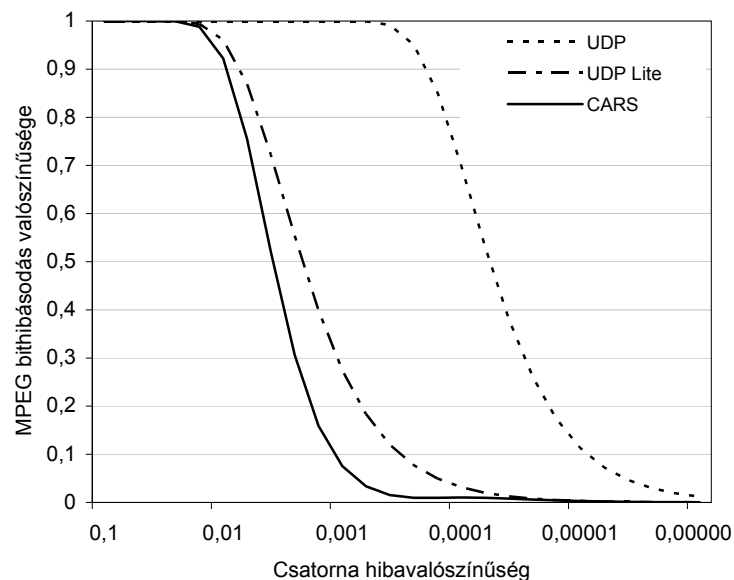
A DCCP egy megbízhatatlan szállítási rétegbeli protokoll, amely csomag-sorszámozás, hibadetektálást és azonosítást végez, miközben torlódásszabályozó algoritmust is alkalmaz. Tulajdonságai alapján a DCCP protokoll kifejezetten alkalmas multimédiás tartalmak továbbítására. A torlódásszabályozó algoritmus szükségszerűen méri a hálózat legfontosabb

paramétereit (késleltetés, hibavalószínűség), amelyeket a szelektív újraküldés döntési mechanizmusaiban is fel tudtam használni. Több független döntési eljárást dolgoztam ki, melyek közül némelyik az MPEG kép struktúra tulajdonságait kihasználva dönt, míg a többi a TFRC torlódáskezelő algoritmus által szolgáltatott információk alapján határoz az újraküldésről.

I.1. TÉZIS [J6, C3] *Kidolgoztam a tartalom alapú szelektív újraküldés módszerét (CARS), amellyel javítani tudtam a vizsgált MPEG típusú videófolyam minőségén, a DCCP jelzéseinek kihasználásával.*

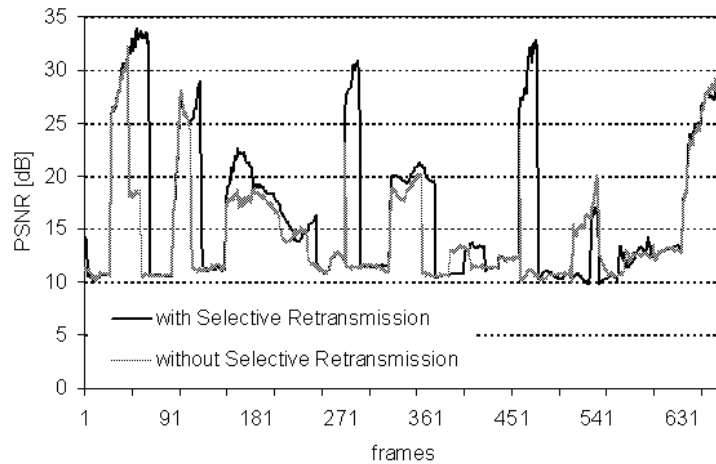
A kidolgozott CARS (Content-Aware selective Retransmission Scheme) eljárás egy DCCP/IP alapú szelektív újraküldés módszer, mely a továbbított csomagokat fontosságuk alapján különbözteti meg. A kiemelt fontosságú csomagok célba juttatásával jelentősen növelhető a szolgáltatások minősége. MPEG típusú multimédiás forgalom esetén egy I-képet tartalmazó csomag elvesztése sokkal nagyobb minőségromlást okoz, mint egy B-képet tartozó, hiszen az I-képre alapuló predikció miatt az I-kép hibája továbbgyűrűzik a többi képre is.

A DCCP transzport protokoll nyugtákkal igazolja a csomagok megérkezését, így az adó oldal azonosítani tudja az elvesztett csomagokat. Szintén az adó oldal feladata a csomagok szelektálása is. Egyszeres újraküldés esetén a megkülönböztetett csomagok hiba nélküli továbbításának valószínűsége $p(1-p)$ -vel nő, ahol p a csomagvesztési valószínűség, a sérült I-képeket tartalmazó csomagok egyszeres újraküldése esetén.



1. ábra. Az MPEG adatfolyam sérült bitjeinek valószínűsége, figyelembe véve a hibaterjedést

Megvalósított valós DCCP tesztkörnyezetben végzett vizsgálatokban, a megkülönböztetett csomagok veszteség nélküli átvitelét vizsgáltam, többszörös újraküldés alkalmazásával. Az eredmények a nagy hibaarányú csatornán, 10^{-2} – 10^{-4} bithiba valószínűség esetén mutattak jelentősebb javulást, akár 50%-kal kisebb hibavalószínűséget a CARS alkalmazásának hatására.



2. ábra Minőségjavulás a teszhálózatban mért eredmények alapján

A módszer hátránya, hogy az újraküldött csomagok minimum RTT (Round Trip Time) időt késni fognak, ezért a vevő oldalon legalább ekkora késleltetésű tárolót (lejátszási késleltetőt) kell alkalmazni.

I.2. TÉZIS [J7, B2, C5, C11] *Kidolgoztam egy új módszert (TRS), amely a TFRC által meghatározott küldési sebesség és a multimédiás adatfolyam sebességének figyelembevételével csökkenti az eredménytelenül újraküldött csomagok számát, miközben a sikeres újraküldés javítani tud a vizsgált videó minőségén. Javaslatot adtam egy becslési eljárásra is, amellyel a TFRC alapú (TRS) és a késleltetés alapú (RSS) újraküldési módszerek küszöbszintjei között összefüggést modellezem.*

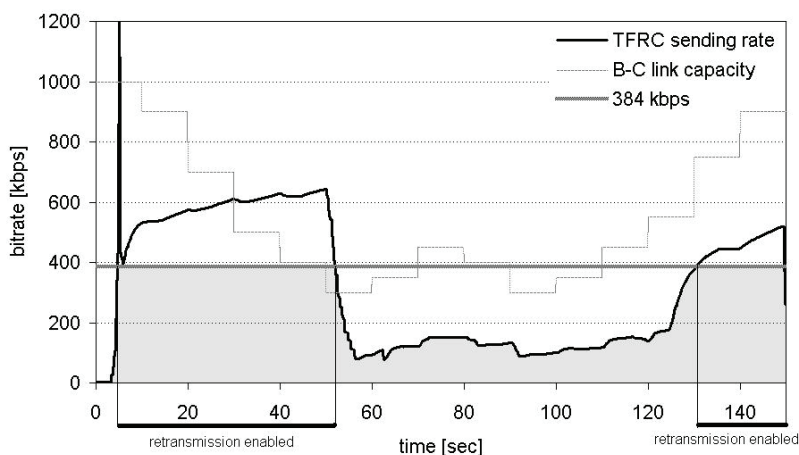
Abban az esetben, amikor a hálózati forgalom megközelíti a hálózat kapacitását, alaposan meg kell fontolni, hogy érdemes-e újabb csomagokat a hálózatba küldeni, hiszen ezek a csomagok torlódást okozhatnak, vagy a már túlterhelt hálózat terheltségét tovább fokozhatják. Annak megállapítására, hogy mikor tekinthető a hálózat túlterheltnek, vagy túlterheléshez közeli állapotban lévőnek, a DCCP TFRC (CCID3) [14] torlódáskezelő algoritmusát használtam fel a kifejlesztett TRS (TFRC-based selective Retransmission Scheme) módszerben.

A hálózatban két módon kerülhet sor csomagvesztésre vagy csomag sérülésre. Az egyik lehetőség, hogy a hálózat valamelyik hálózati router bufferje túlcsoordul, a másik pedig, hogy a csatorna hibázása miatt sérül a csomag. Az első esetben a torlódás megszűnéséig nem küldhetjük újra a csomagot, hiszen az csak kis valószínűséggel érkezik meg, másrészt további terhelést okoz a hálózatban. Ha a routereknek vannak szabad kapacitásai, csupán a rossz minőségű csatorna miatt sérült a csomag, a csomagot újra lehet küldeni.

Abban az esetben, amikor a hálózat TFRC által becsült szabad kapacitása nagyobb (X_{TFRC}), mint a videó folyam sebessége (X_{MPEG}), vagyis

$$X_{TFRC}(t) > X_{MPEG}(t), \quad (1)$$

az újraküldött csomag így többnyire nem fog torlódást előidézni a hálózatban. A torlódáskezelő algoritmus csak késéssel tud reagálni a hálózat túlterhelésére, ezért lesznek olyan esetek, amikor a hálózat már túlterhelt, de a számított küldési sebesség még nem csökkent. Ez az idő viszont elég rövid, mert TFRC gyorsan képes reagálni.



3. ábra A TFRC alapú döntési mechanizmus

Az NS-2 szimulációs vizsgálatok eredményei megmutatták, hogy amikor a hálózat 50%-ban túlterhelt állapotban van, az TRS által kezdeményezett újraküldésekkel 15dB minőségjavulást tudtam elérni anélkül, hogy a túlterhelt időszakokban további terhelést okoznánk.

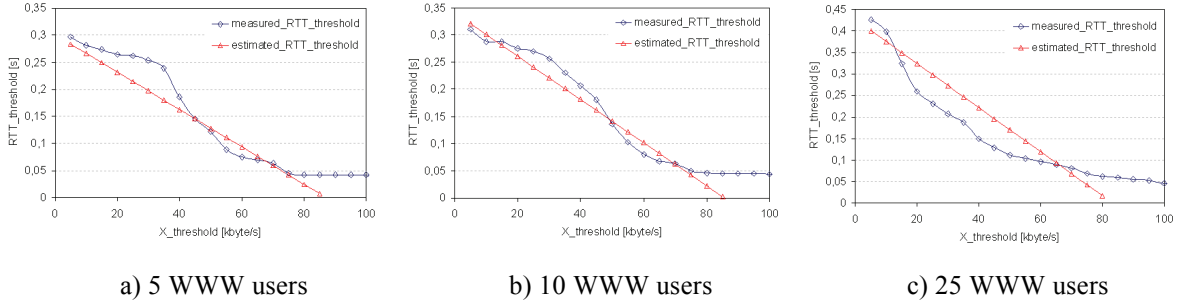
A TFRC küldési sebessége és az aktuális RTT között fordított arányosság figyelhető meg, melyet a TFRC alapú (TRS) és a késleltetés alapú (RSS) újraküldési módszerek küszöbszintjei között összefüggést meghatározására fel lehet használni. Küszöbszintnek tekintem azt a késleltetés-, illetve küldési sebesség értéket, amely az újraküldés engedélyezéséhez/tiltásához köthető. A TFRC és RTT közötti összefüggést kihasználva megbecsülhető, hogy egy adott újraküldést engedélyező küldési sebesség értékhez, mekkora késleltetési küszöbérték tartozik úgy, hogy az újraküldött csomagok száma ugyanakkora legyen TFRC alapú újraküldés és késleltetés alapú újraküldés esetén is. Adott $X_{Threshold}$ TFRC küszöbérték jelenti azt az értéket, amely felett az újraküldés engedélyezett, vagyis az elveszett csomag újraküldhető, ha $X_{TFRC} > X_{Threshold}$.

A modell alapján meghatározhatjuk egy adott $X_{Threshold}$ -hoz tartozó késleltetési küszöböt ($RTT_{Threshold}$) úgy, hogy az újraküldések száma megegyezzen mindkét újraküldési eljárás esetén. A késleltetési küszöb becslése a következő lineáris modellel írható le.

$$RTT_{Threshold} = \frac{(RTT_{min} - RTT_{max})}{2 \cdot X_{recv}} X_{Threshold} + RTT_{max} \quad (2)$$

A képletben X_{recv} jelöli a vevő által mért fogadási sebességet, RTT_{min} és RTT_{max} a késleltetés minimum és maximum értéke. RTT_{min} akkor mérhető, ha a csomag úgy halad végig a hálózaton, hogy nem kell várakoznia egyetlen router tárolójában sem. RTT_{max} torlódás esetén lesz mérhető.

A becslési modell és a szimulációs módszerekkel meghatározott küszöb-párok a következő ábrán láthatók, eltérő mértékben torlódott hálózatokban.



4. ábra Az $RTT_{Threshold}$ becslése különböző mértékben terhelt hálózatok esetén

I.3. TÉZIS [C6] *Kidolgoztam egy új ARC (Analytical Rate Control) algoritmuson alapuló újraküldés–döntési eljárást (ARS), melynek legfontosabb tulajdonsága, hogy képes megkülönböztetni a torlódás és csatornahiba okozta csomagvesztéseket.*

A DCCP protokollban is megvalósított torlódáskezelő algoritmus (TFRC), nem képes különbséget tenni a rossz minőségű csatorna okozta csomagvesztés és a hálózat túlterheltsége miatti csomagvesztések között. A TFRC ezért akkor is csökkenti a küldési sebességet, amikor a pl. rádiós csatorna okozza a hibát, de a hálózati forgalom nem érte el a hálózat kapacitását. A felesleges sebességcsökkenés, és az újraküldés lehetőségének teljes kihasználása érdekében az ARC (Analytical Rate Control) [15] torlódáskezelő algoritmust használtam az ARS (ARC-based selective Retransmission Scheme) döntési mechanizmusban. Az ARC, hasonlóan a TFRC-hez, képletet használ a küldési sebesség meghatározásához:

$$X_{ARC} = \frac{1}{4RTT} \left(3 + \sqrt{25 + \frac{24}{p_c}} \right) \quad (3)$$

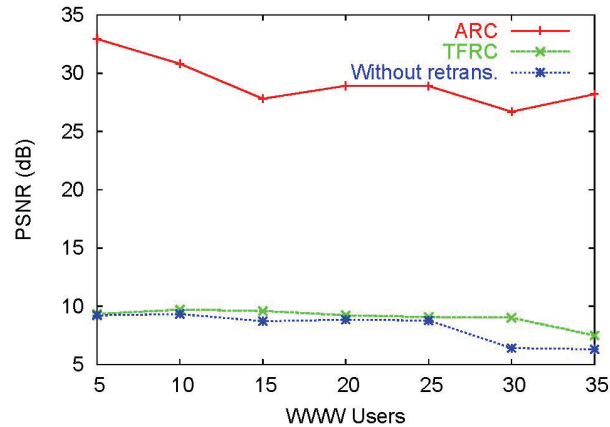
A képletben RTT a körbefordulási idő, p_c pedig a torlódás okozta csomagvesztés valószínűsége, mely a következő képlettel számolható (π a teljes csomagvesztési valószínűség, ω pedig a csatornahiba miatti csomagvesztés valószínűsége):

$$p_c = \left(\frac{\pi - \omega}{1 - \omega} \right) \quad (4)$$

Hasonlóan a TFRC alapú újraküldéshez (TRS), az ARC torlódáskezelő algoritmust használó módszerem (ARS) is akkor engedélyezi az újraküldéseket, ha a számított küldési sebesség (X_{ARC}) nagyobb, mint a videó sebessége (S_{MPEG}):

$$X_{ARC}(t) > S_{MPEG}(t) \quad (5)$$

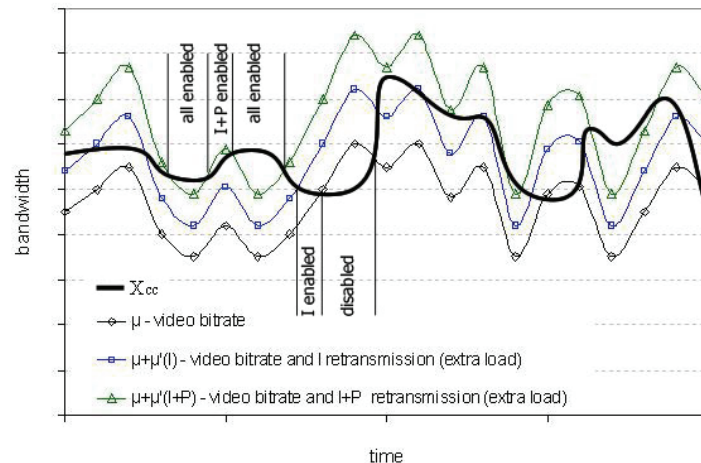
Az ARS döntési mechanizmus olyankor is hatékonyan tudja vezérelni az újraküldéseket, amikor a csatorna hibája magas, amit a TFRC torlódásnak érzékelne. Az ARC hátránya, hogy csatornahiba becsléséhez, más rétegek információjára van szükség. Nagy csomagvesztési arány (10%) mellett, az ARC alapú újraküldési eljárás (ARS) hatása a videó minőségére a következő ábrán látható.



5. ábra Videó minősége újraküldés nélkül, ARC- és TFRC alapú újraküldési módszer esetén

I.4. TÉZIS [C7] Új módszer alkottam (CNRS), amely torlódásközeli állapotban tovább növeli a videófolyam minőségét, az MPEG (H.264) képtípusok megkülönböztetésének hatására. A módszerem a szabad sáv szélesség függvényében dönt arról, hogy mely típusú (MPEG képtípus) csomagok újraküldését engedélyezi.

A torlódáskezelő algoritmusok igyekeznek minél nagyobb küldési sebességet elérni, anélkül, hogy torlódás történne. A küldési sebesség növelésével, azonban egyre kevesebb szabad sáv szélesség marad, amelyet az elveszett csomagok újraküldésére használhatunk. Céлом az volt, hogy az MPEG videó képstruktúrája alapján határozzak meg különböző képtípushoz tartozó újraküldési szinteket. Mindaddig, amíg a szabad sáv szélesség elegendően nagy, minden újraküldést engedélyezhetünk. Ha a szabad hálózati kapacitás lecsökken (torlódásközeli állapot), már nem lesz lehetőség minden elveszett csomagot újraküldeni. Javaslatom alapján, ilyen esetekben már a képtípusok alapján kell szelektálnunk az újraküldésre váró csomagok között. A CNRS (Content-aware and Network-based selective Retransmission Scheme) módszert a következő ábra szemlélteti:



6. ábra Tartalom alapú újraküldés torlódásközeli állapotban

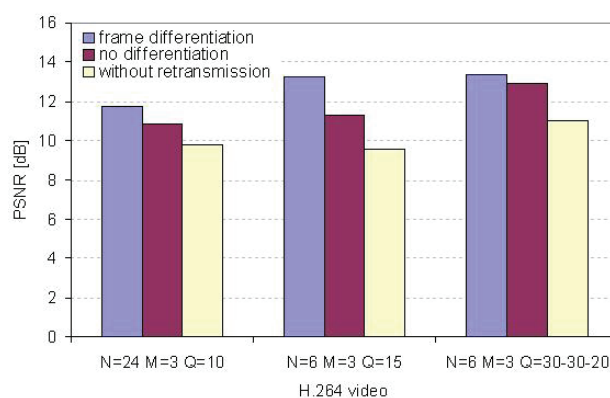
A módszer működése egzakt módon is leírható. A különböző MPEG képtípust tartalmazó csomagok akkor küldhetők újra, ha a következő táblázat egyes elemei igaznak bizonyulnak.

1. Táblázat Újraüldési feltételek

	MPEG videó struktúra (ρ_I, ρ_P, ρ_B)
I-kép	$\mu < X_{cc} < \mu + \mu'_I$
I+P kép	$\mu + \mu'_I < X_{cc} < \mu + \mu'_{I+P}$
minden képtípus	$X_{cc} > \mu + \mu'_{all}$

A képletekben X_{cc} jelöli a torlódásszabályozó által meghatározott küldési sebességet, μ a videó sebességét, μ' pedig az I-, I- és P-, valamint minden képtípus újraüldéséből adódó extra sávszélesség igényt.

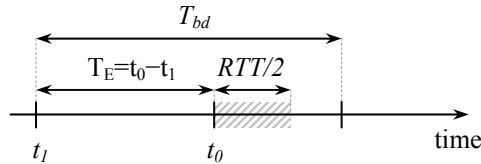
Szimulációs eredményeim bizonyítják a CNRS módszer hatékonyságát, változó csomagvesztési arány és torlódási mérték mellett. Az eljárás hatását a videó minőségére a következő ábrán mutatom be. Az ábráról három különböző struktúrájú videó átlagos minősége olvasható le a bemutatott képtípus megkülönböztetés esetén, megkülönböztetés nélküli esetben (TFRC alapú újraüldés) és újraüldés nélküli esetben.



7. ábra Videó minősége (PSNR)

I.5. TÉZIS [J1, C4, C8] Kifejlesztettem a késleltetés alapú részleges újraüldést (RRS), a TFRC algoritmus folyamatos hálózati méréseit kihasználva. Megmutattam, hogy a késleltetés alapú újraüldés hatékonyan csökkenti a feldolgozás szempontjából későn érkező csomagok számát, miközben az időben megérkezett újraüldött csomagok javítani tudják a videófolyam minőségét. A vevő oldali playout buffer hatékony feltöltésére is adtam javaslatot (Flood method) és megmutattam, hogy a javasolt eljárással az újraüldés nagyobb, mint 95%-os valószínűséggel sikeres lesz.

Valós idejű szolgáltatások esetén egy csomagot újraüldeni csak akkor érdemes, ha az a feldolgozás időpontja előtt megérkezik. A késleltetés alapú szelektív újraüldés döntési mechanizmus (RSS: RTT-based selective Retransmission Scheme) a hálózati jellemzők, és a kliens oldali tároló telítettségétől függően dönt az újraüldés engedélyezéséről. Annak eldöntésére, hogy van-e elegendő idő egy csomag újraüldésére, ismerni kell a csomag feldolgozásáig hátralévő időt, valamint a hálózat késleltetését. A feldolgozásig hátralévő idő meghatározásához, a küldő oldalnak tudnia kell, hogy mennyi adat van a lejátszási tárolóban (payout buffer) és az mekkora késleltetést okoz (T_{bd}). Mivel a cél az volt, hogy külön üzenetek nélkül tudjunk dönteni az adó oldalon az újraüldésről, ezért a forrás a Flood method-nak elnevezett módszer alapján tölti fel a vevő oldali tárolót.

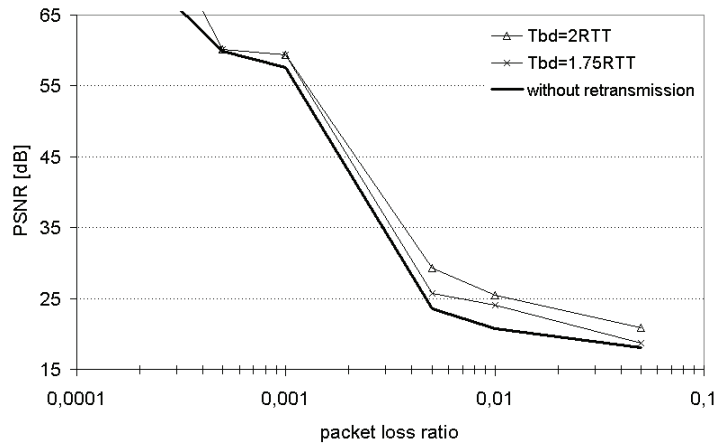


8. ábra Az eljárás idő szekvenciája

Az ábrán t_0 jelöli a döntési pillanatot, amikor megérkezett a DCCP nyugta, amely jelzi, hogy a t_1 időpontban elküldött csomag elveszett. A csomag újraküldéséhez a csatorna körbefordulási idejének felére van szükség. Az elveszett csomag tehát újraküldhető, ha:

$$T_{bd} - (t_0 - t_1) > RTT / 2 \quad (6)$$

A szimulációs eredmények igazolták, hogy javulás elérhető a videó minőségében. A minőségi javulás mértéke függ a vevő oldali tároló késleltetésétől (T_{bd}), hiszen ha az elegendően nagy, akkor akár minden elveszett csomagot is újraküldhetünk.

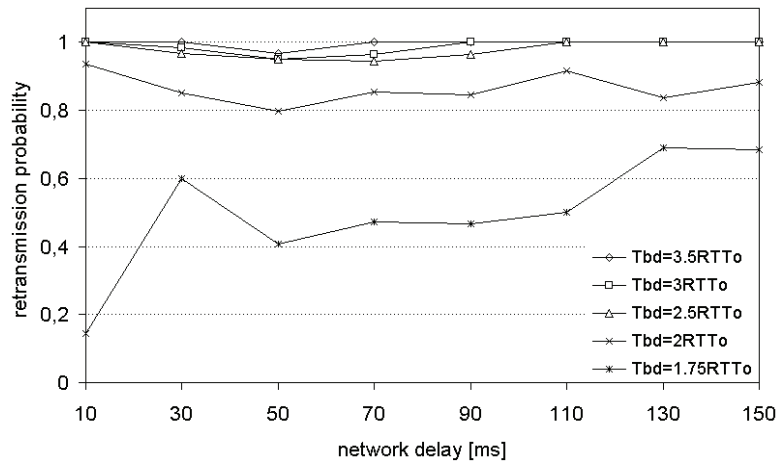


9. ábra MPEG videó minősége (PSNR)

Az újraküldést megvalósító eljárások hatékonyságát jelentősen befolyásolja a vevő oldali tároló késleltetése (T_{bd}). Túl nagy buffer-késleltetés valós idejű alkalmazások esetén elfogadhatatlan, míg túl kis késleltetés esetén az újraküldött csomag nem fog időben megérkezni. A vevő oldali tároló késleltetését ezért a lehető legkisebbre kell állítani, miközben az elegendően nagy marad ahhoz, hogy az újraküldés okozta késleltetést kompenzálni tudja. A buffer-késleltetés beállításához szintén a TFRC által szolgáltatott körbefordulási időt használtam fel, így a tároló késleltetése minden esetben rugalmasan illeszkedik a hálózat tulajdonságaihoz.

Annak érdekében, hogy a vevőnek ne kelljen külön üzeneteket küldeni a bufferszint állapotáról, a kapcsolat felépítése után a küldő szabályozott módon árasztja el (flood) a vevőt T_{bd} késleltetést okozva a további később érkező csomagok számára. A Flood módszer segítségével a playout bufferben felhalmozott csomagok így késleltetést fognak okozni, lehetővé téve a hiányzó csomagok újraküldését.

A körbefordulási idő (RTT) Gauss illetve Gamma modellel leírva becsültem a csomagvesztés detektálási idejét. Megmutattam, hogy $3RTT$ késleltetés bevezetésével, az újraküldött csomagok már elegendően nagy valószínűséggel (95%) a feldolgozás előtt megérkeznek. Az analitikus eredményeket szimulációval is alátámasztottam.



10. ábra Playout buffer késleltetésének (T_{bd}) hatása az újraküldési valószínűsésre

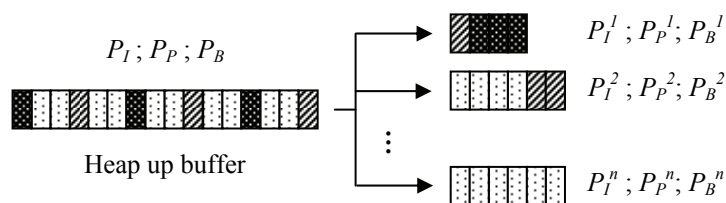
4.2. Videó streaming több útvonalon

A mai mobil eszközök többsége már több interfésszel is rendelkezik, amelyeken keresztül különböző hozzáférési technikát (Ethernet, WLAN, UMTS, stb.) alkalmazó hálózathoz kapcsolódhat. A hatékonyság növelése érdekében a különböző hozzáférési technikát egy időben is használhatjuk. Az elérhető hálózatok jellemzői (sávszélesség, késleltetés, csomagvesztési arány, költség) azonban jelentősen eltérhetnek egymástól. Céлом egy adatfolyam elosztó módszer kidolgozása volt, amely a csomagok prioritásának megfelelően küldi a csomagokat a különböző hálózati interfészekre. A bemutatott módszer előnye, hogy megszünteti a hibaarány homogenitását, és hatékonyan változtatja azt meg az I-, P-, B-képek adataiban. A videó minőségének javítása érdekében a céloom az volt, hogy a legnagyobb prioritással rendelkező I-képek adatait tartalmazó csomagok esetén kisebb legyen az elvesztett csomagok száma, mint más képtípushoz tartozó csomagok esetén. Az általam kifejlesztett módszer először az elérhető hálózatokat rendezi sorba azok minősége alapján, majd a csomagok prioritásuk alapján kerülnek az egyes hálózati interfészek küldési tárolóiba.

Az eljárás nélkülözhetetlen eleme az elérhető hálózatok sorrendbe rendezése, annak előnyei és hátrányai alapján. A hálózati interfészek sorrendbe állítása nem triviális feladat, hiszen több hálózati paramétert kell figyelembe venni, melyek súlya eltérő lehet. Az irodalomban több módszer is fellelhető, melyek különböző attribútumok alapján történő sorrendezési módszereket írnak le. Ezek közül több is használható interfész sorrendezési célokra (pl. TOPSIS, GRA, stb.) [16]–[18]. A GRA (Grey Relational Analysis) a legelterjedtebb, amelyet hálózatválasztásra is alkalmaznak, azonban hasonlóan sok más sorrendezési technikához, a GRA is szenved a *sorrend-felcserélési* (rank reversal) problémától. A jelenség lényege, hogy a sorrend felcserélődhet, ha új hálózat jelenik meg vagy tűnik el. Hálózatválasztási célok esetén a *sorrend-felcserélési* probléma gyakori cellaváltásokat okozhat, emiatt pedig jelentősen megnőhet a késleltetés és adminisztrációs többletforgalom. Az interfészek sorrendbe állításához alkalmazott GRA módszer esetében megoldást találtam az ún. *sorrend-felcserélési* (rank reversal) jelenség hatásainak csökkentésére, illetve megszüntetésére.

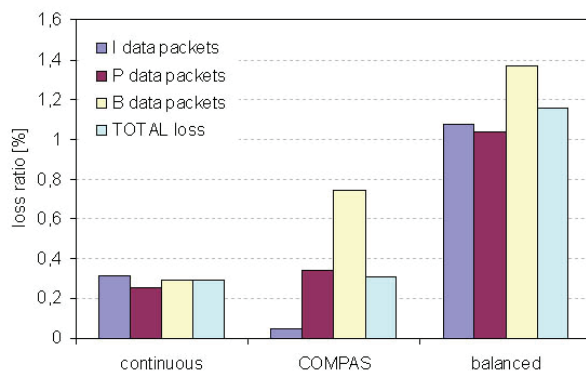
II.1. TÉZIS [J3, C10] *Kidolgoztam egy csomagelosztó eljárást (COMPAS), amely az MPEG videófolyam többutas továbbítására ad hatékony módszert. A módszer az MPEG képtípusai közötti prioritáskülönbségek alapján dönt, hogy mely csomagot melyik hálózati interfészre továbbítsa.*

A több interfész egyidejű használata nagyobb sávszélességet biztosít a videófolyam átvitelére, amely jobb minőségű mozgóképet átvitelét teszi lehetővé. A csomagok hatékony elosztásával a videó minősége tovább növelhető. A rendelkezésre álló csatornák tulajdonságai eltérő, ezért a csomagokat is ennek megfelelően kell szétosztani az interfészekre. Egy olyan eljárást dolgoztam ki, amely a csomag tartalma alapján (I-, P-, B-kép) osztályozza a csomagokat. Az MPEG videófolyamban az I-képben keletkezett hiba okozza a legnagyobb minőségcsökkenést, ezért az I-képet tartalmazó csomagokat kell leginkább védeni, vagyis a legjobb csatornán továbbítani. Az általam bemutatott COMPAS (Content-aware interface selection Method for multi-Path video Streaming) eljárás egy *felhalmozó* tárolót (heap up buffer) alkalmaz, amely növeli azoknak a csomagoknak a számát, melyekből szelektálni lehet, így növelve a csomagelosztás hatékonyságát. Ennek ára, hogy késleltetést visz a rendszerbe. Minél nagyobb a *felhalmozó* tároló, annál több csomagot osztályozhatunk, így hatékonyabban töltve fel az interfészek küldési bufferjeit, cserébe viszont a késleltetés is egyre nagyobb lesz.



11. ábra I-, P- és B-képtípusokat tartalmazó csomagok elosztása a minőségük alapján sorrendbe állított interfészeken

A kidolgozott COMPAS módszer képes csökkenteni a hibák terjedését, amely az MPEG kódolóban használt predikciós módszer okoz. A legnagyobb prioritással rendelkező I-képekben jóval kisebb lesz a hibaarány, mint a B-képek adatainak hibaaránya. Az általam javasolt szelektív módszer összességében nem csökkenti a csomagvesztések számát, viszont megszünteti a csomagvesztések homogenitását az I-, P-, B-képekben.



12. ábra Csomagvesztési arányok az I-, P-, B-képekben, folyamatos-, szelektív-(COMPAS) és egyforma csomagelosztási módszer használata esetén

A csomagvesztési arány homogenitásának megszüntetésével minőségjavulást tudtam elérni, hiszen sikerült csökkentenem a hibák továbbterjedését, amely az MPEG kódolásból adódik. Vizsgálataimat saját szimulációs keretrendszeremben végeztem, amelyet a COMPAS

módszer elemzéséhez implementáltam. A vizsgálatokban a *mother_and_daughter* MPEG-4 referencia videót használtam. Az átlagosan mért minőségjavulás átlagosan 1dB PSNR körül mozgott, mely függ a hálózati jellemzőktől és a felhalmozó tároló méretétől is.

II.2. TÉZIS [J3] *Megmutattam, hogy az általam javasolt módosított normalizálási módszerekkel kevesebb, mint 10%-ra csökkenthető, illetve meg is szüntethető a sorrend-felcserélési probléma GRA sorrendezési technika alkalmazása esetén.*

A Grey Relational Analysis (GRA) [18] egy elfogadott eljárás hálózatválasztási feladatokhoz. A sorrend meghatározásának módja a következő öt pontban foglalható össze:

1. a j darab hálózati paraméterek csoportosítása (*alacsonyabb érték a jobb, magasabb érték a jobb*)
2. az egyes paraméterek minimumának (l_j) és maximumának (u_j) meghatározása
3. Az i . csatorna j . paraméterének normalizálása:

$$\text{alacsonyabb érték a jobb: } s_i^*(j) = \frac{u_j - s_i(j)}{u_j - l_j} \quad (7)$$

$$\text{magasabb érték a jobb: } s_i^*(j) = \frac{s_i(j) - l_j}{u_j - l_j} \quad (8)$$

4. Grey Relational Coefficient (GRC) kiszámolása az i . csatornára:

$$GRC_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^k w_j |s_i^*(j) - 1| + 1} \quad (9)$$

5. a csatornák sorrendbe rendezése a GRC értékek alapján

Belátható, hogy a GRC értékek akkor módosulhatnak, ha egy paraméter minimuma vagy maximuma megváltozik. Ez úgy történhet, hogy olyan új hálózat jelenik meg, vagy tűnik el, mely tartalmaz olyan paramétert, amely legkisebb vagy legnagyobb volt. Ez okozza a sorrend-felcserélés jelenséget is. Céлом az volt, hogy olyan normalizálási módszert adjak, amely csökkenti, esetleg megszünteti a GRC változásának mértéket.

Megmutattam, hogy a paraméterek minimumának, illetve maximumának alkalmazása helyett előre definiált min-max (E_{min_j} , E_{max_j}) értékeket használva a GRC érték nem változik meg, ha új hálózat lesz elérhető, vagy tűnik el. Emiatt a sorrend sem változhat meg. A hátránya a módszernek (*norm_1*), hogy a GRC értékek közötti különbség esetenként nagyon kicsi is lehet.

A második javasolt módszerem (*norm_2*) egy adott paraméterhez, vagy előre definiált minimum értéket, vagy maximum értéket határoz meg. Az alacsony érték a jobb paraméter esetén maximumot, magasabb érték a jobb esetén minimumot. Ennek oka az a feltételezés, hogy általában az a hálózat lesz elérhetetlen melynek paraméterei (pl. jelerősség, késleltetés, stb.) leromlanak.

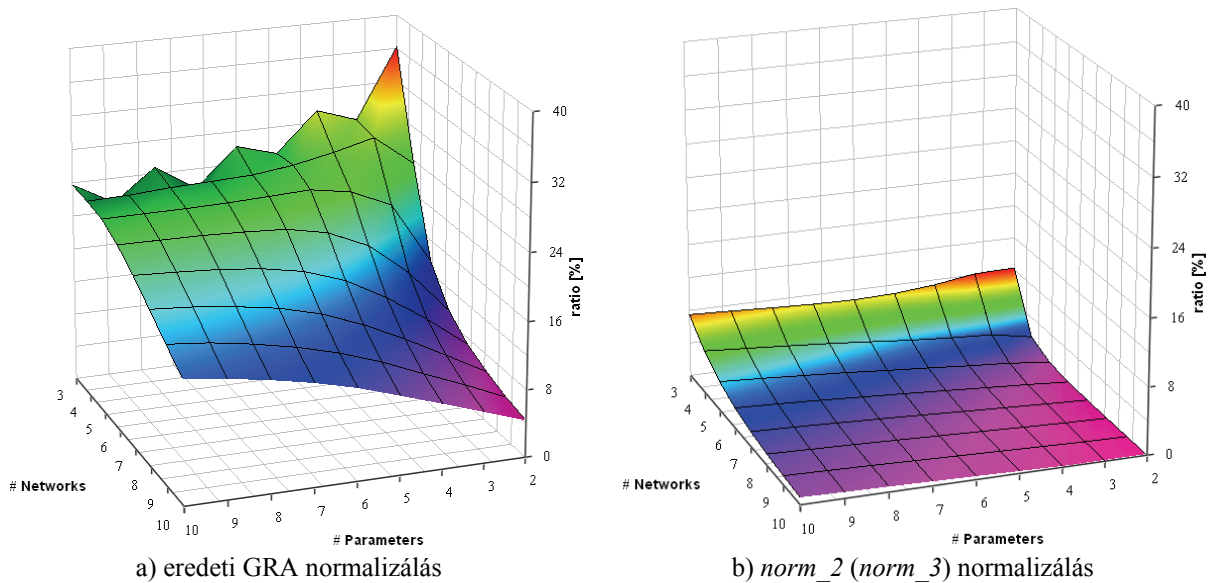
A harmadik javasolt normalizálási technika (*norm_3*) szintén kihasználja az előbbi feltételezést, azonban nincs szükség előre definiált minimum és maximum értékekre.

Az eredeti és a három általam javasolt normalizálási módszert a következő táblázat foglalja össze:

2. Táblázat Normalizálási módszerek a GRA sorrendezési algoritmusban

	GRA	<i>norm_1</i>	<i>norm_2</i>	<i>norm_3</i>
<i>smaller-the-better</i>	$\frac{u_j - s_i(j)}{u_j - l_j}$	$\frac{E_{max\ j} - s_i(j)}{E_{max\ j} - E_{min\ j}}$	$\frac{E_{max\ j} - s_i(j)}{E_{max\ j} - l_j}$	$\frac{l_j}{s_i(j)}$
<i>larger-the-better</i>	$\frac{s_i(j) - l_j}{u_j - l_j}$	$\frac{s_i(j) - E_{min\ j}}{E_{max\ j} - E_{min\ j}}$	$\frac{s_i(j) - E_{min\ j}}{u_j - E_{min\ j}}$	$\frac{s_i(j)}{u_j}$

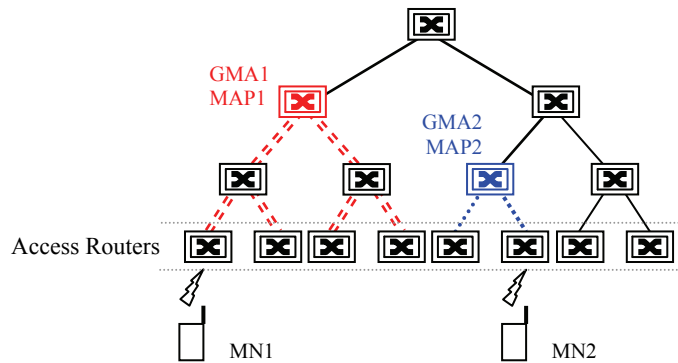
Az bemutatott normalizálási technikák hatékonyságát szimulációs vizsgálatokkal is alátámasztottam. Megmértem a *sorrend-felcserélési* jelenség gyakoriságát a legrosszabbnak tekintet hálózat eltűnése esetén. A *norm_1* módszer esetén nem történt változás a sorrendben, míg *norm_2* és *norm_3* közötti eltérés elhanyagolható.



13. ábra *Sorrend-felcserélési* gyakoriság különböző normalizálási módszerek esetén

4.3. Hierarchikus mobil hálózatok (HMIPv6, RegReg6) vizsgálata

A HMIPv6 és a RegReg6 hierarchikus hálózatokban használható mobilitás kezelő protokoll, melyek két szinten végeznek mozgás elrejtést. A MIPv6-tal ellentétben a két protokoll nemcsak az otthoni ügynök szintjén, de a meglátogatott domain-ben található hálózati ügynök (GMA/MAP) szintjén is végez mozgás elfedést. A cellaváltásból adódó adminisztrációs üzenetek száma nagyban függ a mozgás elrejtésének hatékonyságától, ami a hálózati ügynök által lefedett cellák számától és azok nagyságától függ. Egy hierarchikus fa struktúrában a hálózati ügynök által kiszolgált cellák számát a GMA/MAP hierarchikus szintje határozza meg.



14. ábra Hierarchikus domain struktúra HMIPv6 és RegIPv6 esetén

A hierarchia csúcspontjában elhelyezkedő GMA/MAP az összes cellát kiszolgálja, azonban domain-en belüli üzenetek a teljes utat be kell, hogy járják a legalsó szinttől a csúcsig. Egy alsó szinten lévő GMA/MAP esetén az üzenetek ugyan rövid utat járnak be, azonban a GMA/MAP váltások okozta adminisztrációs terhelés lesz sokkal nagyobb. Ennek a problémának a kezelésére az elsők között próbáltam megoldást találni, azonban az elmúlt években már újabb javaslatok is megjelentek [12][13].

A hatékonyabb mobilitás kezelés érdekében kidolgoztam egy hálózati ügynök (GMA/MAP) választó algoritmust (MASA), és megvizsgáltam ennek a hálózati ügynökváltások számára, valamint az adminisztratív forgalomra gyakorolt hatását. A MASA módszer kihasználja, hogy a hierarchiában elhelyezkedő routerek között több olyan is van, amelyek a GMA/MAP hálózati ügynök szerepét is el tudják látni. Ezek közül a mobil terminál tetszőlegesen választhat, a HMIPv6 és a RegIPv6 protokollok Router Advertisement üzenethez csatolt lista alapján. A listában a Regional Care-of-Address-ek szerepelnek, melyek egy-egy különböző hierarchiaszinteken elhelyezkedő GMA/MAP routert azonosítanak.

III.1. TÉZIS [B1, C2] *Kidolgoztam egy HMIPv6 és RegIPv6 hierarchikus hálózatokban alkalmazható hálózati ügynök (GMA/MAP) választó algoritmust (MASA). Megmutattam, hogy amennyiben a GMA/MAP választás a mobil terminál cellaváltási gyakoriságának figyelembevételével történik (MASA algoritmus), a hálózati ügynökváltások száma csökken, miközben az ügynökváltások okozta additív forgalom közel állandó marad.*

A mobil terminál cellaváltási gyakorisága nehézség nélkül mérhető (pl. a múltbeli események alapján), így ezt felhasználva adhatunk útmutatást, hogy melyik hierarchiaszintről válasszunk GMA/MAP ügynököt. Ezt úgy tesszük, hogy az ügynökváltások száma minimális legyen miközben a kijelölt GMA/MAP router és a mobil terminál közötti út pedig a lehető legrövidebb maradjon. Ha az ügynökváltások számát alacsony szinten tartjuk, az ebből fakadó adminisztráció forgalom (Binding Update) is alacsony szinten marad. A Router Advertisement üzenet rendezett listájából a következő képlet alapján választunk:

$$l = n - \left\lfloor \frac{\eta}{\eta_{max}} n \right\rfloor \quad (10)$$

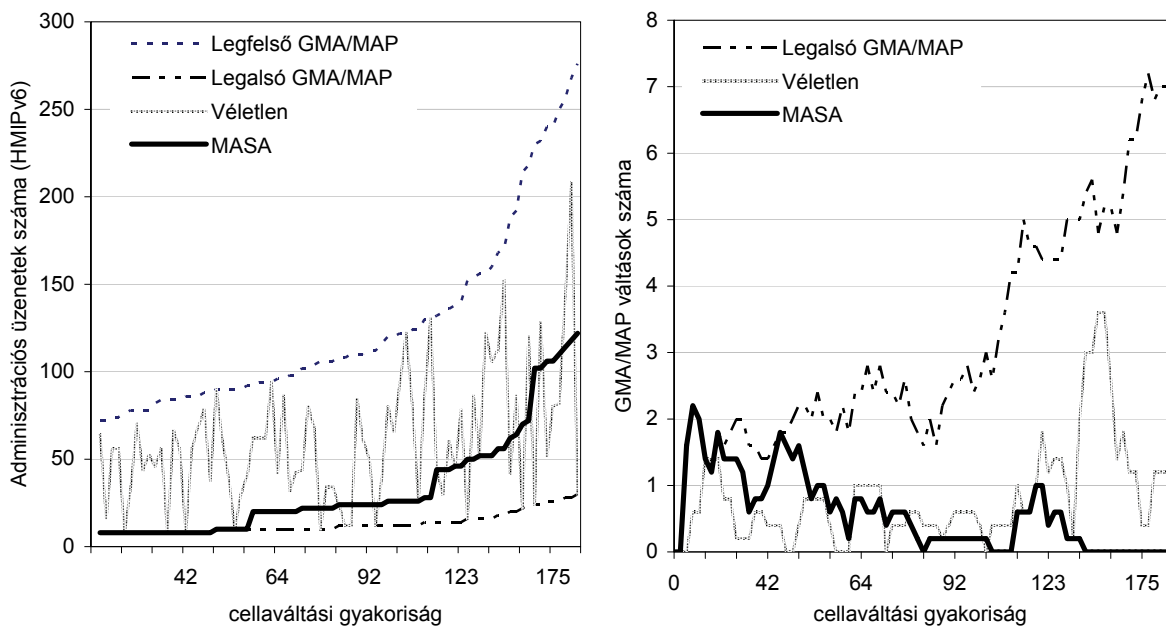
A képletben l a GMA/MAP javasolt helye a hierarchiában, n a szintek száma a hierarchikus domain-ben, η a cellaváltás gyakorisága, η_{max} a cellaváltások gyakoriságának elvi maximuma.

Az ügynökváltás gyakoriságának szempontjából a HMIPv6 és a RegIPv6 ugyanúgy viselkedik. Analitikus módszerekkel megmutattam, hogy egy háromszintű bináris fa struktúrában, ahol minden router képes GMA/MAP funkciókat ellátni, átlagosan 37%-kal

csökken az ügynökváltások száma MASA algoritmus használata esetén a véletlenszerű választáshoz képest. Összetettebb hierarchikus struktúrák vizsgálatára szimulációs eszközöket használtam. Szimulációs módszerekkel megmutattam, hogy nagyobb méretű hierarchikus domain struktúrák esetén is jelentősen csökken az ügynökváltások száma. Hatszintű bináris fa hierarchiában átlagosan 54%, míg kilencszintű hierarchiában 30%-kal csökkent a GMA/MAP váltások gyakorisága.

III.2. TÉZIS [B1, C2] *Megmutattam, hogy HMIPv6 protokoll esetén a jelzésforgalom csökken, a mobil terminál cellaváltási gyakoriságának figyelembevételével történő GMA/MAP választás esetén (MASA).*

A lokális mozgás elrejtéséhez szükséges HMIPv6 adminisztrációs üzenetek (Regional Binding Update), a mobil terminál és a hálózati ügynök közötti csatornát terheli. Mivel a hálózati ügynökválasztó algoritmus a lehető legalacsonyabb hierarchiaszintről próbál GMA/MAP-t választani, ezért a választott hálózati ügynök és a mobil terminál közötti út is a legrövidebb lesz kis és közepes cellaváltási gyakoriság mellett. Gyakori cellaváltás mellett az algoritmus egy magasan elhelyezkedő GMA/MAP-t jelöl ki, így a mobil terminál és a hálózati ügynök közötti út is megnő. A szimuláció ideje alatt a leggyorsabban mozgó terminál 190 cellaváltás kezdeményezett. A szimulációs eredmények megmutatták, hogy hatszintű hierarchikus domain-ben a HMIPv6 jelzésüzenetek száma 12%-kal, míg egy kilencszintű hierarchiában 24%-kal csökken. A hierarchiaszintek növelésével a MASA algoritmus hatékonysága javul a véletlenszerű ügynökválasztáshoz képest, mivel egyre kisebb a valószínűsége annak, hogy véletlenszerű esetben a megfelelő ügynök legyen kiválasztva.



15. ábra Adminisztrációs üzenetek számának és ügynökváltások alakulása HMIPv6 esetén 9 mélységű hierarchiában

5. Az eredmények alkalmazása

A valós idejű alkalmazások számára rendkívül fontos a csomagvesztés minimalizálása, a késleltetés alacsony szinten tartása éppúgy, mint a kiemelt tartalmú csomagok védelme. A disszertációmban bemutatott módszerek és eljárások ebben jelent előrelépést.

Az első téziscsoport szorosan köthető multimédiás adatátvitelhez. A bemutatott módszerek a csomagok szelektív újraküldésével képesek javítani az átvitt videó minőségét, miközben minimális szinten tartja a feleslegesen újraküldött csomagok számát. Módszereim több esetben kihasználják az MPEG videó struktúráját és a képtípusok közötti különbségeket. A eljárások egy részét implementáltam és valós teszhálózatban teszteltem.

Az MPEG képstruktúra a videófolyam többutas átvitele esetén is kihasználható, mint ahogy az a második téziscsoport eredményei alátámasztják. A különböző képtípusokat tartalmazó csomagok hibaarányának megváltoztatásával további minőségjavulást tudtam elérni. A többutas videó streaming megoldáshoz sorrendezési eljárásra volt szükségem. Az ismert technikákban, melyek normalizálást használnak, szinte kivétel nélkül megjelenik *sorrend-felcserélési* jelenség. A sorrend cseréje bizonyos esetekben (pl. nem használjuk ki az összes csatornát) handover-hez vezet, ami késleltetést, rosszabb esetben a kapcsolat megszakadását okozhatja.

A harmadik csoportban bemutatott hálózati ügynökválasztással, adott szinten tarthatjuk az ügynökváltások számát, így az adminisztrációs üzenetek okozta forgalom és késleltetés mértékét is. A bemutatott módszer így hatással van a késleltetésre érzékeny multimédiás alkalmazások minőségére is.

Hivatkozások

- [1] Kohler, Handley, Floyd, "Datagram Congestion Control Protocol", RFC 4340, March 2006
- [2] M. Feamster, H. Balakrishnan, "Packet Loss Recovery for Streaming Video", 12th International Packet Video Workshop, Pittsburgh, PA, April 2002.
- [3] Bing Zheng, Mohammed Atiquzzaman, "Network Requirement for Management of Multimedia over Wireless Channel", Lecture Notes In Computer Science Vol. 2496, Proceedings of the 5th IFIP/IEEE International Conference on Management of Multimedia Networks and Services: Management of Multimedia on the Internet, London, UK, 2002.
- [4] Mike Picuch, Ken French, George Oprica, Mark Claypool, "A Selective Retransmission Protocol for Multimedia on the Internet", Proceedings of SPIE International Symposium on Multimedia Systems and Applications, Boston, MA, USA November 2000.
- [5] H. Hagino, Y. Miyazaki, Y. Onoe, Y. Atsumi, H. Komaki, M. Taniguchi, N. Yamanouchi, "A Playout Time Oriented Retransmission Scheme for Multimedia Streaming Systems", HSNMC 2003, Estoril, Portugal, 23-25 July 2003., pp406-415
- [6] C.L. Hwang, K. Yoon, „Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications”, Springer-Verlag, Berlin, 1981.
- [7] M. Zeleny, "Multiple Criteria Decision Making", McGraw-Hill, 1982.
- [8] K. Yoon, C.L. Hwang, "Multiple Attribute Decision Making Introduction", ISBN: 978-0803954861, Sage Publication, 1995
- [9] D. Johnson, C. Perkins, J. Arkko, "Mobility Support in IPv6", RFC3775, June 2004
- [10] H. Soliman, C. Castelluccia, K. El Malki, L. Bellier, "Hierarchical Mobile IPv6 Mobility Management (HMIPv6)", RFC4140, August 2005
- [11] J. Malinen, C. Perkins, "Mobile IPv6 Regional Registrations", draft-malinen-mobileip-regreg6-00.txt, July 2000
- [12] Ming-Han Liu and Chun-Chuan Yang, "A Multicast Extension to HMIPv6 with Efficient MAP Selection", Proceedings of IEEE 62nd Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC-2005Fall), 25-28 Sept. 2005.
- [13] Tarik Taleb, Tasuku Suzuki, Nei Kato, and Yoshiaki Nemoto, "A Dynamic and Efficient MAP Selection Scheme for Mobile IPv6 Networks", GLOBECOM 2005, St. Louis, Missouri, USA, 28 November - 2 December 2005
- [14] S. Floyd, E. Kohler, and J. Padhye, "Profile for DCCP Congestion Control ID 3: TFRC Congestion Control", draft-ietf-dccp-ccid3-11.txt, IETF, March 2005.
- [15] O. B. Akan and I. F. Akyildiz, "ARC: the analytical rate control scheme for real-time traffic in wireless networks," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 12, no. 4, pp. 634–644, 2004.
- [16] C.L. Hwang, K. Yoon, Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, Springer-Verlag, Berlin, 1981.
- [17] K. Yoon, C.L. Hwang, "Multiple Attribute Decision Making Introduction", ISBN: 978-0803954861, Sage Publication, 1995
- [18] J. L. Deng, "Introduction to grey system theory", The Journal of Grey System, vol.1, no. 1, pp. 1-24, 1989.

Publikációk

Folyóirat cikkek

- [J1] Árpád Huszák, Sándor Imre: "Source Controlled Semi-reliable Multimedia Streaming Using Selective Retransmission in DCCP/IP Networks", Elsevier – Computer Communications, The International Journal for the Computer and Telecommunications Industry, Volume 31., Issue 11., pp. 2676–2684, ISSN 0140-3664, 15 July 2008
- [J2] László Bokor, Árpád Huszák, Gábor Jeney: "Novel Results on SCTP Multihoming Performance in Native IPv6 UMTS-WLAN Environments", Inderscience International Journal of Communication Networks (IJCNS) (to appear)
- [J3] Árpád Huszák, Sándor Imre: "Multipath Video Streaming Using GRA Network Ordering Algorithm without Rank Inconsistency", Journal on Information Technologies & Communications, Special issue on Tools, Modelling Techniques and Analysis Aspects of Heterogeneous Networks, "Research, Development and Application on Information and Telecommunication Technology" Volume E-1, Number 1 (5), pp. 43 – 58, 6 August 2009

Magyar nyelvű folyóirat cikkek

- [J4] Huszák Árpád, Kiefer Tamás, Simon Vilmos, Tilk Gergely László, dr. Imre Sándor, Szabó Sándor: "Mobilitás kezelés az IP alapú mobil hálózatokban", Híradástechnika, Vol. LVIII, No.4., 2003. pp. 4–13
- [J5] Péterfalvi Gábor, Pozsár Balázs, Simon Vilmos, Huszák Árpád, Imre Sándor, "A következő generációs mobil hálózatok fejlődési tendenciái", Híradástechnika, Vol. LX, No. 11, 2005., pp. 10–16.
- [J6] Huszák Árpád, Dr. Imre Sándor: "Videó folyam szelektív újraküldése IP hálózatokban", Híradástechnika, 2005. november, Vol. LX, No.11., 2005. pp. 17-24
- [J7] Huszák Árpád, Imre Sándor: "TFRC alapú szelektív újraküldő algoritmus", Híradástechnika, Vol. LXII, No.5., 2007. pp. 30–38, ISSN 0018-2028

Könyvfejezet

- [B1] V. Simon, Á. Huszák, S. Szabó, Sándor Imre: "Hierarchical Mobile IPv6 and Regional Registration Optimization", International Conference on Parallel and Distributed Computing, Euro-Par 2003, 26-29 August 2003, Klagenfurt, Austria, Published at Springer, Lectures Notes in Computer Sciences; Vol. 2790, ISBN 3-540-40788-X, pp. 1137-1140.
- [B2] Árpád Huszák, Sándor Imre: "Adaptive Retransmission Scheme for Video Streaming Applications", Chapter XVIII, Handbook of Research on Mobile Multimedia (Second Edition), published by IGI-Global - Information Science Reference, pp. 246–260, ISBN 978-1-60566-046-2, USA, September 2008

Konferencia cikkek

- [C1] Vilmos Simon, Árpád Huszák, Sándor Szabó: „Hierarchical Mobile IPv6 and Regional Registration Optimization”, 45th International Symposium Electronics in Marine – ELMAR2003, ISSN 1334-2630, pp. 292–296, Zadar, Croatia, June 16–18. 2003.

- [C2] Á. Huszák, S. Imre: "Agent Selection Algorithm in Hierarchical Mobile Networks", Conftel 2005, Tomar, Portugal, 6-8 April, 2005, ISBN 972-98115-9-8
- [C3] Á. Huszák, S. Imre: "Selective Retransmission of MPEG Video Streams over IP Networks", 5th International Symposium on Communication System Networks and Digital Signal Processing, CSNDSP 2006, Patras, Greece, 18-23 July 2006, ISBN 960-89282-0-6
- [C4] Árpád Huszák, Sándor Imre: "Source Controlled and Delay Sensitive Selective Retransmission Scheme for Multimedia Streaming", IEEE Symposium on Computers and Communications, ISCC 2007, ISBN 1-4244-1521-7, pp. 191–196., Aveiro, Portugal, 1–4 July, 2007
- [C5] Árpád Huszák, Sándor Imre: "TFRC–Based Selective Retransmission for Multimedia Applications", 5th @WAS International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia, MoMM2007, ISBN 978-3-85403-230-4, pp. 53–63., Jakarta, Indonesia, 3–5 December 2007, *Best Paper Award*
- [C6] Kamal Deep Singh, Árpád Huszák, David Ros, César Viho, Gábor Jeney: "Congestion Control and Adaptive Retransmission for Multimedia Streaming over Wireless Networks", 2nd IEEE Conference and Exhibition on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, NGMAST 2008, published by the IEEE Computer Society's Conference Publishing Services, ISBN 978-0-7695-3333-9, pp. 363–369, Cardiff, Wales, UK, 16–19 September 2008
- [C7] Árpád Huszák, Sándor Imre: "Content–Aware Selective Retransmission Scheme in Heavy Loaded Wireless Networks", 10th IFIP International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks, MWCN2008, IFIP International Federation for Information Processing, Volume 284; Wireless and Mobile Networking; Boston: Springer, ISBN 978-0-387-84838-9, pp. 123–134, Toulouse, France, 29–30 September, 2008.
- [C8] Árpád Huszák, Sándor Imre: "DCCP–based Multiple Retransmission Technique for Multimedia Streaming", 6th International Conference on Advances in Mobile Computing & Multimedia, MoMM2008, In Cooperation with ACM SIGMM, ISBN 978-1-60558-269-6, pp. 21-28., Linz, Austria, 24–26 November 2008
- [C9] László Bokor, Árpád Huszák, Gábor Jeney: "On SCTP Multihoming Performance in Native IPv6 UMTS-WLAN Environments", In the proceedings of the Fifth International ICST Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities (TridentCom2009), ISBN 978-1-4244-2847-2, Washington D.C., USA, 6–8 April, 2009.
- [C10] Árpád Huszák, Sándor Imre: "Content-aware Interface Selection Method for Multi-Path Video Streaming in Best-effort Networks", 16th International Conference on Telecommunications, ICT 2009, ISBN 978-1-4244-2937-0, pp. 207–212, Marakech, Morocco, 25–27 May 2009
- [C11] Árpád Huszák, Sándor Imre: "TFRC and RTT Thresholds Interdependence in a Selective Retransmission Scheme", IEEE Symposium on Computers and Communications, ISCC'09, ISBN 978-1-4244-4671-1, pp. 618–623, Sousse, Tunisia, 5–8 July, 2009