



INFOKOMMUNIKÁCIÓS HÁLÓZATOK QOS ANALÍZISE

Doktori (PhD) értekezés

Szerző: Gál Zoltán

Témavezető: Dr. Terdik György

**Debreceni Egyetem
Természettudományi Doktori Tanács
Informatikai Tudományok Doktori Iskola**

DEBRECEN, 2010

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi Doktori Tanács Informatikai Tudományok Doktori Iskola "Alkalmazott információ technológia és elméleti háttér" programja keretében készítettem a Debreceni Egyetem természettudományi/műszaki doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából.

Debrecen, 2010.02.15.

Gál Zoltán
jelölt

Tanúsítom, hogy Gál Zoltán doktorjelölt 200...- 200... között a fent megnevezett Doktori Iskola Informatika Programjának keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Az értekezés elfogadását javasolom.

Debrecen, 2010.02.15.

Dr. Terdik György
témavezető

INFOKOMMUNIKÁCIÓS HÁLÓZATOK QOS ANALÍZISE

Értekezés a doktori (Ph.D.) fokozat megszerzése érdekében
az Informatika tudományágban

Írta: **Gál Zoltán** okleveles informatika- és villamosmérnök

Készült a
Debreceni Egyetem Informatikai tudományok doktori iskolája
Alkalmazott információ technológia és elméleti hátttere
programja keretében

Iskolavezető: **Dr. Pethő Attila** egyetemi tanár

Témavezető: **Dr. Terdik György** egyetemi tanár

A doktori szigorlati bizottság:

elnök: **Dr. Sztrik János** egyetemi tanár
tagok: **Dr. Szabó Csaba Attila** egyetemi tanár
Dr. Végh János egyetemi tanár

A doktori szigorlat időpontja: 2009. február 23.

Az értekezés bírálói:

Dr.
Dr.
Dr.

A bírálóbizottság:

elnök: **Dr.**
tagok: **Dr.**
Dr.
Dr.
Dr.

Az értekezés védésének időpontja: 2010.....

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	i
Ábrajegyzék.....	iii
Táblázatjegyzék.....	vi
1. Bevezetés.....	1
1.1. A kutatás témaválasztásának indoklása.....	1
1.2. A kutatás célkitűzése	3
2. Szakirodalmi előzmények, a témakör kutatási háttér munkája.....	5
2.1. Az adatforgalom, mint önazonos folyamat és a hosszúmemória függőség	7
2.2. A bispektrum és a magasabb rendű momentumok alkalmazása az adatforgalom elemzésénél	10
2.3. Adatforgalmak wavelet elemzése	11
2.4. Az OSI szintek QoS mechanizmusai.....	14
3. Alkalmazott módszerek és eszközök	27
3.1. Forgalom idősorok önazonosság és stacionaritás tulajdonságának elemzési módszerei	27
3.2. Forgalom idősorok elemzése bispektrum és a magasabb rendű momentumokkal.....	34
A bispektrum becslésének módszere	39
A Hurst paraméter bispektrumon alapuló becslésének módszere	40
Az idősor linearitásának ellenőrzése bispektrum módszerrel	40
3.3. Forgalom idősorok elemzése wavelet módszerrel.....	41
A H-ss és H-sssi folyamatok wavelet transzformáltja	46
Az LRD folyamatok wavelet transzformáltja	47
A Hurst paraméter becslése wavelet módszerrel	49
4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek	52
4.1. Az Ethernet és az ATM forgalmak magasabb rendű momentumainak jellemzői	54

Tézis_1: Bispektrum alkalmazása ATM WAN forgalomnál.....	55
Tézis_2: A bispektrum Ethernet, LANE és CLIP ATM forgalmaknál	61
4.2. Forgomelemzés ON/(ON+OFF) módszerrel.....	70
Tézis_3: Az ON/(ON+OFF) forgomelemzési módszer és tulajdonságai ..	70
4.3. A QoS mechanizmusok hatása a valós idejű és egyéb forgalmakra	85
Tézis_4: A QoS hatása az IP streaming típusú videó forgalomra.....	85
Tézis_5: A QoS hatása az IP hangforgalomra.....	93
4.4. A kutatási eredmények gyakorlati alkalmazhatósága	101
4.5. További kutatási irányok, elképzelések	103
5. Összefoglaló.....	105
6. Summary.....	107
7. Irodalomjegyzék.....	109
7.1. Hivatkozások	109
7.2. A jelöltnek az értekezés témájához kapcsolódó publikációi	118
7.2.1. Referált folyóiratcikkek	118
7.2.2. Referált konferencia-kiadványok, könyvfejezetek	118
7.2.3. Egyéb konferencia-kiadványok.....	120
7.2.4. Konferencia előadások.....	123
Appendix A: Felhasznált Matlab forráskódok listája	129
Appendix B: Bispektrum ábrák a Tézis_2-höz	130
Köszönetnyilvánítás	131

Ábrajegyzék

1.1. ábra. Átviteli rátaigény és a technológiai kínálat	1
1.2. ábra. Átviteli ráta és minőség növelése a hálózati szolgáltatásoknál	2
2.1. ábra. Diszkrét Fourier transzformált mintavételi pontok	12
2.2. ábra. Diszkrét wavelet transzformált mintavételi pontok	12
2.3. ábra. Daubechies4 anya wavelet	13
2.4. ábra. A QoS mechanizmusok által használt PDU mezők	19
2.5. ábra. A Diffserv QoS modell elemei	20
2.6. ábra. Az L2/L3 kapcsoló Diffserv QoS modellje	21
2.7. ábra. A QoS szerinti hálózat-szolgálat osztályok fejlődése	22
2.8. ábra. A forgalomtípusok megoszlása az Interneten	24
3.1. ábra. A bispektrum frekvencia háromszögei	38
3.2. ábra. A Daubechies6 anya wavelet	43
3.3. ábra. A Coiflet3 anya wavelet	43
3.4. ábra. A Haar4 anya wavelet	43
3.5. ábra. A Symmlet6 anya wavelet	43
3.6. ábra. A gyors, piramis alapú wavelet felbontási algoritmus	46
4.1. ábra. Statisztikus multiplexálási mechanizmusok	53
4.2. ábra. A forgalom belső korrelációjának hatása	54
4.3. ábra. A bispektrum elemzési tartománya	55
4.4. ábra. "Phase Plot" diagram Set_3 esetén	56
4.5. ábra. Becsült bispektrum abszolút értéke f_1, f_2 függvényében Set_3 esetén	57
4.6. ábra. Hisztogram és Gamma sűrűség függv. becsült paraméterekkel, Set_3	58
4.7. ábra. A bispektrum elméleti és becsült karakterisztikus függvények valós, illetve képzetes része, Set_3	59
4.8. ábra. Ethernet, ATM LANE, ATM CLIP forgalom mérése	61
4.9. ábra. A T_i hisztogramja (Eh80, Lh80, Ch80)	63
4.10. ábra. A T_i spektruma (Eh80, Lh80, Ch80)	63
4.11. ábra. A T_i bispektrumának valós része (Eh80, Lh80, Ch80)	63
4.12. ábra. A T_i bispektrumának képzetes része (Eh80, Lh80, Ch80)	64
4.13. ábra. A T_i hisztogramja (Ev400h80, Lv400h80, Cv400h80)	65
4.14. ábra. A T_i spektruma (Ev400h80, Lv400h80, Cv400h80)	65
4.15. ábra. A T_i bispektrumának valós része (Ev400h80, Lv400h80, Cv400h80)	66
4.16. ábra. A T_i bispektrumának képzetes része (Ev400h80, Lv400h80, Cv400h80)	66
4.17. ábra. A T_i bispektrumának valós része (Eh32, Lh32, Ch32)	67
4.18. ábra. A T_i bispektrumának képzetes része (Eh32, Lh32, Ch32)	67
4.19. ábra. A T_i bispektrumának valós része (Ev128h80, Lv128h80, Cv128h80)	67
4.20. ábra. A T_i bispektrumának képzetes része (Ev128h32, Lv128h32, Cv128h32)	68
4.21. ábra. A T_i , illetve L_i technológiai arányai a különböző forgalmaknál	68

4.22. ábra. Adatforgalom mintavételezése	71
4.23. ábra. A $T_{\min}$, minimális mintavételezési periódus függése a ξ_M , mérési hibaaránytól és az átviteltechnikától	73
4.24. ábra. Az ON/(ON + OFF) transzformáció paraméterei	74
4.25. ábra. A csatorna J_k , négyzetes átlagintenzitása és θ_k , fajlagos fázisa	76
4.26. ábra. A BC-pAug89 adatsor Z_k , komplex folyamata és annak hisztogramjai	78
4.27. ábra. A BC-pAug89 adatsor Z_k , komplex folyamata valós és képzetes részének autókorrelációs függvénye	79
4.28. ábra. A BC-pAug89 adatsor Z_k , komplex folyamatának keresztkorrelációs függvénye [-20.000, 20.000], illetve [-200, 200] eltolás tartományokban	79
4.29. ábra. Az F200903311500 adatsor Z_k , komplex folyamata és annak hisztogramjai	80
4.30. ábra. A BC-pAug89 adatsor Z_k , komplex folyamatának keresztkorrelációs függvénye [-20.000, 20.000], illetve [-200, 200] eltolás tartományokban	81
4.31. ábra. A BC-pAug89 adatsor $M(t)$ -csatornaintenzitás, illetve $\tan \varphi(t)$ -csatornaterhelés idősorainak „scalogram”-ja	82
4.32. ábra. Az F200903311500 adatsor $M(t)$ -csatornaintenzitás, illetve $\tan \varphi(t)$ -csatornaterhelés idősorainak „scalogram”-ja	82
4.33. ábra. A BC-pAug89 adatsor $M(t)$ -csatornaintenzitás, illetve $\tan \varphi(t)$ -csatornaterhelés idősorainak 2-LD diagramja	82
4.34. ábra. Az F200903311500 adatsor $M(t)$ -csatornaintenzitás, illetve $\tan \varphi(t)$ -csatornaterhelés idősorainak 2-LD diagramja	83
4.35. ábra. A QoS tartomány és mérési környezete	85
4.36. ábra. A TCP és az UDP részfolyamok bitrátájának átlaga	87
4.37. ábra. A TCP és az UDP részfolyamok bitrátájának szórása	87
4.38. ábra. A TCP és az UDP részfolyamok bitrátájának ferdesége	88
4.39. ábra. A csatornaintenzitás becsült Hurst paraméterei, $\widehat{H}_M$	89
4.40. ábra. A csatornaterhelés becsült Hurst paraméterei, $\widehat{H}_{\tan \varphi}$	89
4.41. ábra. Egyidejű TCP (adat) és az UDP (hang) forgalmak becsült Hurst paramétereinek viszonya	90
4.42. ábra. A mért videóforgalmak véleményértéke (Opinion Score)	92
4.43. ábra. Torlódásos VoIP kapcsolatok mérési környezete	94
4.44. ábra – Codec-ek mért jellemzői	95
4.45. ábra – Csatornaintenzitás (M)	95
4.46. ábra. Csatornaterhelés (UDP, G.728, QoS nincs, Hard R.)	96
4.47. ábra. Wavelet transzf., Tan(Phi) (UDP, G.728, QoS nincs, Hard R.)	96
4.48. ábra – Csatornaterhelés (UDP, G.728, DSCP=8, Piano)	96
4.49. ábra – Wavelet transzf., Tan(Phi) (UDP, G.728, DSCP=8, Piano)	96
4.50. ábra. Hang $\widehat{H}_M$ paramétere	97
4.51. ábra. Hang $\widehat{H}_{\tan \varphi}$ paramétere	97
4.52. ábra. Egyidejű TCP (adat) és az UDP (hang) forgalmak becsült Hurst paramétereinek viszonya	98
4.53. ábra. Hangátvitel tapasztalt minősége	99
4.54. ábra. VoIP gerincforgalom csatornaterhelése	99

4.55. ábra. VoIP gerincforgalom intenzitása	99
4.56. ábra. VoIP gerincforgalom $\widehat{H_{\tan \varphi}}$ paraméterének wavelet becslése	100
4.57. ábra. VoIP gerincforgalom $\widehat{H_M}$ paraméterének wavelet becslése	100

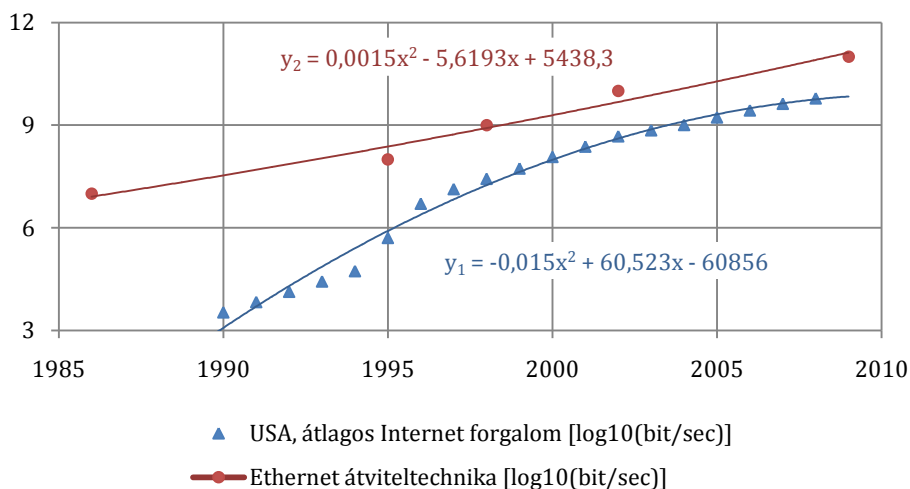
Táblázatjegyzék

2.1. Táblázat: A hálózati forgalmak jellemzői	17
2.2. Táblázat: A Diffserv AFC (Assured Forwarding Codepoint) táblája	18
2.3. Táblázat: QoS Baseline osztályok	23
4.1 Táblázat: ATM WAN forgalmak klasszikusan becsült Hurst paramétere	56
4.2. Táblázat: ATM WAN forgalmak bispektrummal becsült Hurst paramétere	59
4.3. Táblázat: Mérési jellemzők Ethernet, ATM LANE, illetve ATM CLIP esetben	62
4.4. Táblázat: E, L, C összehasonlítása alacsony (h80) átviteli rátánál	64
4.5. Táblázat: E, L, C összehasonlítása magasabb (v400h80) átviteli rátánál	66
4.6. Táblázat: E, L, C összehasonlítása közepes (v128h32) átviteli rátánál	68
4.7. Táblázat: Elemzett klasszikus forgalmak alap jellemzői	77
4.8. Táblázat: Wavelet módszerrel becsült Hurst paraméterek (H)	83
4.9. Táblázat: A QoS mérési adatsorok paraméterei	86
4.10. Táblázat: Adatsorok QoS mérési feltételei	86
4.11. Táblázat: A videó minőségének véleményérték (OS) metrikája	90
4.12. Táblázat: Az OS-véleményérték és a videó minőségének összerendelése	91
4.13. Táblázat: Hang minőségének számszerűsítése	98

1. Bevezetés

1.1. A kutatás témaválasztásának indoklása

Az Internet által forgalmazott éves adatmennyiség, hasonlóan a félvezetőgyártásban ismert 2-es szorzó, kapacitás faktorról nő [17]. Ez szükségessé teszi az egyre nagyobb átviteli rátájú átviteltechnikák implementálását és bevezetését a felhasználói hálózatokban. LAN/MAN környezetben a legszélesebben elterjedt IEEE 802.3 (10 Mbps Ethernet) átviteltechnika 1986-ban jelent meg, majd az egy-egy nagyságrenddel gyorsabb verzióinak létrehozása rendre 1995., 1998., 2002. és 2009. években történt (ld. 1.1. ábra.).



1.1. ábra. Átviteli rátaigény és a technológiai kínálat

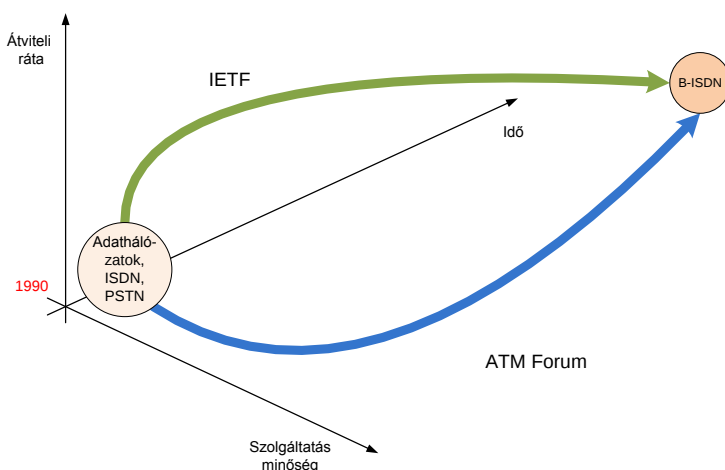
A fenti adatokból ([82], [35]) megfigyelhető, hogy az Amerikai Egyesült Államokban a hozzáférési hálózati rendszerek a felhasználók átlagos infokommunikációs igényeit nagyságrendekkel magasabb sávszélességen szolgálják ki. Az (y_1, y_2) növekvő trendgörbék egymáshoz közeledése azt jelzi, hogy az igények növekedési ritmusa magasabb, mint az Ethernet technológia kínálata. Ugyanakkor azt is láthatjuk, hogy a jelenlegi hálózati szolgáltatások mellett az Internetet legintenzívebben igénybe vevő országban a növekedési ráta hatványkitevője időben csökken. Így a teljes Internet forgalmának évenkénti duplázódását többnyire a fejlődő országok, valamint a nemzetközi egyéb (IP feletti

1. Bevezetés

hang-, illetve videó átvitel) forgalmak okozzák. A 2-3 nagyságrenddel gyorsabb technológiai kínálatot az motiválja, hogy a hozzáférési- és a felhordó hálózatokban az adatforgalom erőteljesen borsztós jellegének hatását a csatorna átviteli rátájának növelésével lehet kompenzálni. Mérések alapján a normalizált forgalom maximuma elérheti a 10^3 nagyságrendet is. A World Wide Web hálózati szolgáltatás grafikus változatának 1994-es elterjedése lényegesen meggyorsította az Internet adatforgalmának növekedését. Érzékelhető növekedés-gyorsulás volt megfigyelhető a Napster fájlmegosztó alkalmazás évezredváltás körüli két éves életciklusa során is. Mindezekből látható, hogy bizonyos újabb hálózati alkalmazások erőteljes forgalom többletet képesek okozni, ami a borsztósság miatt a cégek, intézmények belső hálózatában torlódáshoz vezethet.

Szolgáltatói oldalról joggal tevődik fel a kérdés, hogy az egyre több erőforrást igénylő bővülő hálózati alkalmazások minőségének szinten tartásához, esetleg emeléséhez, a LAN/MAN kommunikációs infrastruktúra fejlesztése milyen mértékben vegye egymáshoz képest figyelembe i.) *az átviteli ráta növelés*, ii.) *a különböző típusú forgalmak prioritás szerinti processzálása* elven működő technológiai megoldásokat.

Előbbi az Internet Engineering Task Force (IETF) fejlesztési szemléletét tükrözi, utóbbi a B-ISDN szolgáltatás megvalósítását célul tűző ATM Forum fejlesztési projektjének képezi alapötletét (ld. 2. ábra.).



1.2. ábra. Átviteli ráta és minőség növelése a hálózati szolgáltatásoknál

A Kossuth Lajos Tudományegyetem, illetve a Debreceni Egyetem Informatikai Szolgáltató Központjának alkalmazottjaként 1991. óta folyamatosan szembesültem ezzel a problémával és hasonlóan más belföldi és külföldi nagy hálózati rendszerek

üzemeltetőihez, széleskörű technológiai felméréseket kellett végezni az új, beszerzésre kerülő hálózati eszközpark Minőség/Ár arány értékének optimális megtalálásához.

Az új évezred elejétől az adat, a hang és a videó forgalmakat továbbító csomagkapcsolt, konvergens hozzáférési és felhordó hálózatok kialakítása van folyamatban. Ez az IETF koncepciója szerint történik, és bár az OSI modell kismértékű módosításával a kommunikációs protokollok vezérlő síkjának fontossága kerül előtérbe, a Quality of Service (QoS) mechanizmusok bevezetésével az univerzális IP platformú hálózat optimális megoldásnak bizonyul.

Mivel a különböző típusú forgalmak QoS jellemzői és igényei eltérnek egymástól, a szakirodalom sokat foglalkozik e forgalmak közös platformon történő továbbításának problematikájával. Az IP protokoll alatti konvergens platform a továbbítási QoS garanciákat az egyes forgalmak statisztikai jellemzőinek mélyreható elemzése alapján implementált algoritmusok segítségével biztosítja. Az intelligens gerinchálózati eszközök egyre több QoS mechanizmus kiválasztását ajánlják fel. A helyes konfigurációs beállítások meghatározásához ma már nem elegendő a klasszikus Internet protokollok működésének ismerete, hanem szükséges az adatforgalmak statisztikai jellemzőinek tudatos alkalmazása is.

A több ezer végpontot és közel kétszáz köztes csomópontot magába foglaló egyetemi gerinchálózat működtetése a napi munkám során szükségessé tette a rendszer tudományos alapokon való kezelését. Ennek érdekében a fentebb felvetett kérdések megválaszolásához mélyreható alkalmazott kutatás igénye fogalmazódott meg bennem, amihez közel két évtizedig professzionális szintre emelt egyetemi produkciós számítógép-hálózati rendszer biztosította a gyakorlati terepet.

1.2. A kutatás célkitűzése

Az Internet óriási, és egyre nagyobb népszerűsége ellenére még a mai napig nem képes garantálni minőségi jellemzőkkel rendelkező szolgáltatásokat. Az utóbbi években jelentős erőfeszítés történt olyan IP alapú hálózatok kifejlesztésére, amelyek a garantált minőségi igényeket (QoS, Quality of Service) hatékonyan tudják támogatni [91].

A telekommunikációs rendszerek szolgáltatásainak a felhasználók számára kielégítő minőségben való garantálása nem triviális feladat, mivel három csoportba sorolt tényező is megváltozik az idők során a technológiai fejlődés következtében:

- a.) Az első tényező az Interneten forgalmazott bájtmenyiség évenkénti duplázódása, ami tulajdonképpen Moore törvény egyenes következménye. Mint ismeretes, Moore szerint az egységnyi területre integrált áramkörti elemek darabszáma évenként duplázódik, vagyis a felhasználóknál az azonos költségen tárolható bájtmenyiség ugyanilyen ritmusban növekszik.
- b.) A forgalmak modellezését nehezítő másik tényező főként a szórakoztató ipar által motivált sávszélesség emésztő alkalmazások megjelenése, mint pl. a zenei és a film műsorok cseréje, stb.
- c.) A harmadik tényező az Internet hagyományos, illetve új, valós idejű kommunikációs szolgáltatásai forgalmának különbözőségéből adódó, még nem teljesen szabványosított QoS átviteli minőségi osztályok bevezetésének és működtetésének rohamos elterjedése. Ezt egyrészt a konvergens (konvergált) hálózati szolgáltatások, elsősorban a hagyományos PSTN telefonrendszert magába olvasztó VoIP (Voice over IP) technológiának a telefonálás percdíját "gyilkoló" forradalmi gazdasági hatása okozza. Hasonló húzóerőt képez az Internet felett igény szerinti (VoD – Video on Demand) televíziózást lehetővé tevő IPTV és a hagyományos interaktív adatátvitelnek a LAN/WAN hozzáférési hálózatokban (DSL, CabelTV, WiFi, stb.) közös IP technológián történő egyidejű használatának igénye is.

Szolgáltatói oldalon az első tényező hatását érzékelni lehet, és a köztes gerinchálózati eszközökben a már rendelkezésre álló üzemmód konfigurációs beállítások segítségével igény szerinti közbe lehet avatkozni. A forgalmak mennyiségi jellemzői, és útvonalának ismerete alapján a szolgáltatói hálózat fejlesztését (topológia, átviteli ráta, kapcsolók teljesítménye, stb.) igény szerinti mértékben kellő körültekintéssel el lehet végezni. A második tényező által okozott rendszeres forgalomváltozás szolgáltatói oldalon esetenként lekezelhető ugyancsak rendszerkonfigurációs lehetőségekkel (hozzáférési listák, felhasználói szabályzatok, stb.). A második tényező által véletlenszerűen, valamint a harmadik tényező által egyre gyakrabban okozott forgalmak kezeléséhez a szolgáltató számára még nem állnak rendelkezésre egyértelmű eszközök. Emiatt szükséges a különböző adatforgalmak mélyebb, statisztikai szintű elemzése is.

A hálózati forgalom folyamatok elemzéséhez a szolgáltatói hálózat erőforrásainak (csatorna, várakozási sor, CPU, stb.) használatát vizsgáltam, amihez egy új, saját módszert, az $ON/(ON + OFF)$ transzformációt vezettem be és alkalmaztam. A Corvil, vagy hatékony sávszélesség (CB- Corvil Bandwidth) fraktál koncentrációs értéket mutat. E felett a forgalom borsztös és multiplexeléssel nem csökkenthető ennek mértéke, míg ez alatt a forgalom torlódik. A CB és a továbbítás késleltetése közötti kapcsolat nem lineáris. Enek okát kutatjuk a továbbiakban.

2. Szakirodalmi előzmények, a témakör kutatási háttér munkája

Napjainkban az Internet hálózat méretével kapcsolatosan továbbra is az exponenciális-növekedés figyelhető meg, miközben forgalma matematikai statisztikai szempontból fraktál (önhasonló és hosszúmemória) tulajdonságú. Ezekkel a tulajdonságokkal az adatforgalom továbbítási rátájának csúcs/átlag arány időszora nagy értékeket mutat, így az adatátviteli technikák minősége nem éri el az optimális szintet. A XXI. század elején az egyik fontos kihívás a hálózati adatok továbbítási folyamata hatékonyságának növelése. 1994-ben Leland, Willinger és társai felismerték, hogy a hálózati forgalom önhasonló-fraktál tulajdonságú [89]. Emiatt a hálózati tervezésben komoly súlyt szerzett a fraktál adatforgalom analízise és modellezése. A változó bitrátájú videó forgalomnál, nagy időskála esetén is beazonosították a hosszúmemóriától való függést [10]. Mandelbrot a fraktál fogalmat már az 1970-es években bevezette és a természet folyamatait multifraktál modellek segítségével tanulmányozta [44]. Mindezek mellett a hálózati forgalmaknál a fraktál fogalma még mindig újnak számít és nem mondható intuitívnek. Ugyanakkor, komplexitásuk mellett a kommunikációs hálózati technológiák erőteljesen fejlődnek, így ezek hatása a forgalmak fraktál jellemzőinél is megjelenik.

A hagyományos telefonhálózatok (POTS – Public Old Telephone System) forgalma lényegében statikus jellegű, ezért viszonylag könnyen lehetett találni tipikus felhasználói viselkedés modellt. Mivel a POTS forgalmi jellemzők csak korlátozott mértékben változékonyak, ezért a forgalom jellegének modellezéséhez az átlagértékkel való számolás kimerítő hatékonyságúnak bizonyult. A telefonhívások keletkezése Poisson folyamat, vagyis a hívások egymástól függetlenek és a köztük eltelt idő exponenciális eloszlású. A telefonszolgáltatásra a hívások Poisson modellje mellett az is jellemző, hogy a beszélgetések tartásideje közelítőleg exponenciális eloszlású. A modell még a tartásidő e jellemzőjének enyhe módosulása esetén is használható volt, mivel a teljesítményjellemzők a Poisson érkezési folyamat esetén nem a tartásidő eloszlásától, hanem annak átlagától függ.

Az Internet dial-up és a fax használata POTS környezetben is szükségessé tette a régi modellek felülvizsgálatát, mivel ezek természete már nem statikus. A hívások mérete és a méret változékonysága ezeknél jóval nagyobb lett, mint a telefonhívásoknál. A beszédforgalom statisztikai szempontból jól prognosztizálható természetű, ellentétben az adatforgalommal. Ugyanakkor az adatforgalomnál az időegység alatt küldött adatmennyiség a kapcsolat ideje alatt is nagyon ingadozhat, ami egyben inhomogenitást okoz. Az adatforgalom borsztösségét megfigyelték az időtartományban és a protokoll adatelemek mérettartományában is. Ez a

börzstősség abból adódik, hogy adatkommunikációs hálózatban a gépek a rendelkezésre álló átviteli csatornán nagyobb rátával is képesek forgalmazni, míg a telekommunikáció esetén az ember által használt egyetlen hangcsatorna átviteli ráta jellemzői rögzítettek. Ezzel is magyarázható, hogy a beszédforgalom számára az áramkörkapcsolás, míg az adatforgalom számára a csomagkapcsolás alkalmazása optimális.

Az utóbbi években a forgalomelmélet kutatásában kulcskérdés volt a börzstős és inhomogén struktúrájú adatforgalom leírásához alkalmazható paraméterek, változók meghatározása. Az érthetőség miatt ezeknek lehetőleg egyszerűeknek kell lenniük, meg kell tudniuk határozni a különböző teljesítmény jellemzőket és a hálózat által, működés közben szabályozhatónak kell lenniük. A szakirodalom sok javaslatot fogalmaz meg a forgalmi paraméterekre vonatkozóan, de a produkciós rendszereknél csak kevés alkalmas kielégítő kezelhetőséget nyújtani [86]. Emiatt csak néhány paramétert fogadott el a szakma, többségük a zsetonos vödör (token-bucket) algoritmushoz kapcsolódik. Ez hasonlít az ATM átviteltechnika szivárgó vödör (leaky-bucket) mechanizmusánál használt jellemzőkhöz, mint a csúcssebesség, a zsetonok által szabályozott átlagsebesség, puffér méret, maximális és minimális csomagméret. A zsetonos vödör működési mechanizmust elég széles körben alkalmazzák a modellezéshez, de még ma is a kutatás tárgyát képezi, hogy ez mennyire hatékonyan jellemzi az adatforgalom dinamikáját. Tervezési szempontból további jellemzőket is javasoltak, amelyek közül a fraktál forgalom Hurst paramétere emelhető ki leginkább [46], [59]. A Hurst paraméter becslésére több, egymástól eltérő módon is lehetséges: a.) Whittle módszer, b.) Geweke-Porter-Hudak módszer, c.) R/S módszer, d.) "Variance-Time" módszer, e.) periodogram-alapú módszer, f.) IDC (Indices of Dispersion for Counts) módszer, g.) Wavelet módszer, stb. [51].

Az IP, csomagkapcsolt hálózat esetén sokféle adatforgalom keveredik. Ezek fontos jellemzője a skálafüggetlenség. Ez azt jelenti, hogy több időskálán keresztül megfigyelhető például a továbbított bájtok, vagy a protokoll adatelemek számának börzstőssége [89], [86]. Ez lényegesen különbözik a beszédforgalom Poisson dinamikájától, ahol létezik egy egyértelmű, meghatározó időskála, miközben a forgalom több időskálán nem börzstős. Az IP adatforgalom jellemzője a hosszú memóriájúság. Ez azt jelenti, hogy több időskálán keresztül a forgalom jelentős korrelációkat tartalmaz. Továbbá, az adatforgalom különböző statisztikai azonosak. Ez figyelhető meg az autókorrelációs függvényénél is, ami miatt az adatforgalmat önhasználó struktúra jellemzi. Az adatforgalom jellemzőinek szórása esetenként erőteljes, ami a lassan lecsengő eloszlások (pl. Pareto), statisztikai modellek segítségével írható le. Ilyen adatforgalmi jellemző például az Interneten elérhető fájlok mérete is. A lassan lecsengő folyamatok tulajdonságai a fraktál folyamatoknál

is jellemzőek. Emiatt az ezzel kapcsolatos forgalmi modellek kutatása ma is nagyon népszerű [86].

A fraktál típusú forgalmi modellek előnye, hogy a komplex, több időskálán összefüggő adatforgalmakat kevés paraméter segítségével írják le. Emiatt e modellek előnyösebben alkalmazhatók a klasszikus Markov modellekhez képest [86]. Az IP csomagok forgalmának fraktál modellezése felszínre hozza az Interneten jelenleg alkalmazott kommunikációs mechanizmusok közül azokat, amelyek az adatforgalmak fraktál struktúráját okozzák. Így beazonosíthatóvá válik az adatforgalmak fraktál jellemzője jelenlétének oka az Interneten.

Az aszinkron adatot, valamint a hangot és videót valós időben továbbító konvergens hálózatokkal szemben támasztott minőségi igények QoS (Quality of Service) mechanizmusok bevezetését tették szükségessé. Ezek elterjedése szükségszerű folyamat a produkciós adatátviteli hálózatokban. Több megoldás is létezik, amelyek az adatforgalmak QoS tulajdonságait befolyásolják, de komplexitása miatt a témakör kutatása is csak a kezdő lépéseknél tart.

2.1. Az adatforgalom, mint önhasznoló folyamat és a hosszúmemória függőség

Az önhasznolóság vagy fraktál jelenség alapvető jellemzője, hogy az időskála széles tartományában érvényesül. A tanulmányozáshoz felhasznált matematikai modellek közös jellemzője, hogy az időtartomány szerinti dinamikájuk "Noah hatás" szerinti hatványfüggvény eloszlást és "Joseph hatás" szerinti hiperbolikusan lecsengő autókorrelációt feltételez [86]. Börsztös vagy fraktál típusú jelenségeket a Hidrológiában, Pénzügyi gazdaságban, Biofizikában, valamint az Infokommunikáció területén is megfigyeltek és mára a csomagkapcsolt hálózatok leginkább kutatott területévé vált. A forgalom modellezés kezdete a hagyományos telefóniára vezethető vissza, ahol kizárólagosan Poisson, általánosabban Markov beérkezési folyamatot és exponenciális erőforrás tartási követelményeket feltételeztek. A modern, nagysebességű csomagkapcsolt hálózatok erőteljesen kombinálják a különböző kapcsolási technikákat és dinamikus keveredő heterogén szolgáltatásokat és alkalmazásokat. Ennek eredményeként a csomagforgalom sokkal komplexebb és börsztösebb, mint a hagyományos hang forgalom, mivel a ($10^{-6}s \dots 10^2s$) széles időskálában működnek. A hagyományos forgalommodellezés ezekre az új rendszerekre olyan új, szofisztikált sztochasztikus modellekkel válaszolt, mint a folyadékáramlás modellek, a Markov-modulált Poisson folyamatok, a csomag sorozat különböző változatai, a sokoldalú Markov beérkezési folyamatok (MAP – Markov Arrival Process), a köteget Markov beérkezési

folyamatok (BMAP – Batched MAP), valamint a TES (Transform-Expand-Sample) modellek. Ezek kifejlesztésének fontos szempontja volt az várakozási sorok és a teljesítmény problémák analitikus kezelhetősége, miközben kevésbé történt meg az aktuális forgalmi adatokkal való statisztikai egyeztetés ellenőrzése. 1990. előtt több ezer tudományos publikáció született a témában, de ezek közül csak ötven vonatkozott konkrét valós forgalmi adatok elemzésére. ez a helyzet az utóbbi másfél évtizedben lényegesen megváltozott és mért, valós adatforgalmakat tartalmazó komoly adatbázisok érhetők el az Interneten az alábbi területeken: CCSN/SS7, ISDN, Ethernet LAN, WAN és NSFNet, VBR forgalom, FASTPAC, DQDB MAN, WWW forgalom, stb. [86]. Magas időfelbontású forgalommérések statisztikai elemzésével kapcsolatosan jelentős mennyiségű publikáció jelent meg, amelyek bizonyítják, hogy a produkciós csomagkapcsolt adatforgalmak önhasznós vagy fraktál tulajdonsággal rendelkeznek. Empirikusan megfigyelték, hogy az 1990 előtt, illetve után mért adatforgalmak tulajdonságai egymástól világosan eltér. Előbbiek rövid memória, utóbbiak pedig hosszúmemória jellemzőket igazolnak [21], [24], [58], [88], [90].

Addig, amíg a hagyományos forgalom modellek és a mért hálózati forgalmak közötti különbség egyértelműen detektálható és izgalmas témának tűnik, egyre inkább előtérbe került az a tény, hogy a hosszúmemóriájú függőség gyakorlati hatással van sok hálózat tervezésére, valamint a forgalmak szabályozásra vonatkozóan. A várakozási sorokba érkező hagyományos Markov (rövid memóriájú) bemeneti folyamatok analitikusan jól kezelt formában modellezhetők és megfelelő módon mutatják a várakozási sorok teljesítményét [22], [23], [34]. Ezeket alkalmazzák a különböző nagysebességű, valósidejű hálózati alkalmazások híváskezdeményezés mechanizmusánál, mint effektív sáv szélesség- igény meghatározási módszer [15], [83].

A Markov várakozási sorra épülő modellekkel ellentétben, a probléma jóval komplexebb mivolta miatt, viszonylag kevés elméleti eredmény létezik a hosszúmemóriájú bemeneti folyamatokat kezelő, várakozási sor modellekkel kapcsolatosan. Ez a kutatási terület jelenleg is dinamikus fejlődik [80]. Kimutatták, hogy az adatforgalmak fraktál szerkezete összetett, amit részletesen elemezve multifraktál struktúrákat azonosítottak be [25], [48]. A fraktál és multifraktál modellek segítségével szemléletesebben lehet további részleteket megismerni a forgalomgeneráló mechanizmusokról [80].

Az Internetnek 1990-től LAN és WAN hálózati környezetben mért forgalmán végzett elemzések azt mutatják, hogy a hálózati forgalom széles időskálán borsztös jellegű. A skála független borsztösség leírható az önhasznóság (SS – Self-Similarity), illetve hosszú memóriájúság (LRD – Long-Range Dependence) fogalmakkal. E jelenség hálózati környezetben, széles körben való elterjedtségének

ellenőrzésére több színvonalas közlés jelent meg, amelyek az önhasonlóság okát és annak következményeit vizsgálták [5], [6], [18], [26], [89], [43], [58], [60], [90]. Ugyancsak sok cikk foglalkozik a hosszú memóriájúságnak a forgalom modellezésére és a hálózat teljesítményének mérésére vonatkozó hatásával. E kutatásokat két kategóriába sorolták: az első csoportba a forgalom jellemzésével és modellezésével foglalkozó írások tartoznak, míg a második csoport a teljesítmény becslésére koncentrál. Mindezen kutatások azt igazolták, hogy a hosszú memória tulajdonság a hálózati forgalmak széles körében előforduló jelenség. Akár egyedi források, mint a változó bitrátájú videó (VBR), korrelált struktúrával rendelkezik, amit önhasonló forgalomként lehet modellezni [26], [32], [65].

Kimutatták, hogy a hosszú memóriájúságnak a hálózat teljesítményére vonatkozóan gyengítő hatása van [5], [6], [38], [43]. Ez leginkább abban nyilvánul meg, hogy önhasonló forgalomnál a várakozási sorok hosszának eloszlása sokkal lassabban cseng le, mint az exponenciális lecsengésű hagyományos Markov források (pl. Poisson) esetén. Az időskála teljesítményre gyakorolt hatása a hosszú memóriájúságnak a várakozási sorok méretének befolyásolásánál jelentkezik [29], [65]. Kimutatták, hogy rövid puffer méretnél és rövid időskálánál a hosszú memóriájúság csak kevésbé érezteti hatását a várakozási soroknál, és a rövid korrelációk a jellemzőek. Ez nem meglepő, mivel ilyen feltételek mellett a rövid korrelációk szórása elegendő ahhoz, hogy jelentős puffer-túlsordulást és queue méret-telítődést okozzon hosszú korrelációs struktúra jelenléte nélkül is. Megfigyelték, hogy a fájlok mértének speciális eloszlásából adódóan nem csak az alkalmazás szintű forgalom önhasonló, de a csomageldobás és az adatkapcsolati réteg forgalom is önhasonló [59]. A torlódások, valamint a terhelésmentes koncentrált periódusok is a hálózati rendszerek belső, lényeges tulajdonságai, amik önhasonlósági feltételeket hoznak létre.

Az aszimmetria mértékét a forgalom börsztösségével ellentétes irányban befolyásolja a hálózati erőforrások viszonylagos nagyságrendje [59]. Ugyanakkor az aszimmetria mértékétől függően az önhasonló börsztösség nem feltétlenül vezet a csomagvesztés és a várakozási sorok késleltetésének csökkenéshez. Az önhasonló börsztösség a csomagvesztési rátát növeli, míg a várakozási sor késleltetési ideje a hálózati erőforrások relatív nagyságrendjétől függ, szemben a forgalom börsztösségével. Gyakorlati szemszögből tekintve, a hálózati erőforrások bizonyos szintre való telítődése alatt az önhasonló börsztösség a hálózat átviteli teljesítményét rontja, ami csomagvesztésként és a várakozási sorok késleltetési idejének növekedéseként, valamint a túlterhelt/alulterhelt koncentrált periódusok feltétel nélküli megjelenéseként érzékelhető. Az említett telítődési szinten a rövid memóriájú korrelációk megnőnek és kizárólagos meghatározó tényezőként fejtik ki hatásukat [59].

2.2. A bispektrum és a magasabb rendű momentumok alkalmazása az adatforgalom elemzésénél

Az idősorok elméletének fejlődése során úgy a frekvencia tartományra, mint az időtartományra vonatkozóan, az idősor modellek megalkotásánál komoly előrelépések történtek, mivel sok esetben felismerték, hogy a gyakorlatban működő folyamatok és a hagyományos Gauss folyamatokra épülő elméletek nem illeszkednek megfelelő módon [42]. A fizikai folyamatok azonban sok esetben nem reprezentálhatók kielégítő módon lineáris modellek segítségével, ezért szükséges a nemlineáris modellek és a magasabb rendű momentumok elemzése [11].

Brillinger kezdte először alkalmazni a harmadrendű spektrum, a bispektrum fogalmát és a becslésekre hatékony módszereket dolgozott ki. Az alapötlet az, hogy az elméleti és a gyakorlati spektrumokat iteratív módon újrászűrova, a legkisebb négyzetek módszerét felhasználva hasonlítja össze [11]. Gauss becsléshez a módszer alapvetően a Whittle által javasoltra redukálódik, amelynek alapján a paraméterek becslése átfogó módon Rice munkásságában található meg. A nem Gauss folyamatok paramétereinek becslésénél korlátot jelent az a tény, hogy a bizonyos modellek szerint pontosan a spektrális és bispektrális sűrűségek ismerete feltételezett.

Fontos aláhúzni, hogy bizonyos HOS módszerek erőteljesen függenek attól a feltételezéstől, hogy az elemzett idősorok stacionáriusak, valamint ezek a lineáris rendszerek függetlenek az időtől. Ezek a feltételezések a gyakorlatban nem minden esetben életszerűek. Ennek kezelése érdekében Priestley bevezette a nem-stacionárius folyamatok spektrális reprezentációját, amelyet oszcilláló vagy lassan változó folyamatoknak nevezett [63]. Ezek számára definiálta a spektrális sűrűség függvény fogalmát, amelynek hasonló fizikai tulajdonságai vannak, mint a másodrendű stacionárius spektrumnak. Priestley és Gabr később kiterjesztette ezt a koncepciót és létrehozta a bispektrum fogalmát [64].

A HOS (Higher-Order Spectra), magasabb rendű statisztika módszer a kumulánsokat és ezek Fourier transzformáltját "polyspectra" néven fogja össze és a hagyományos másodrendű statisztikáktól eltérően a folyamatnak nem csak az amplitúdóját, hanem a fázis információt is hozzáférhetővé teszi [46]. Másoldalról megközelítve, amíg a kumulánsok nem nyújtanak betekintést a Gauss folyamatokba, addig a korreláció ezt lehetővé teszi. A kumuláns alapú jelfeldolgozási módszerek automatikusan kezelik a színes Gauss zajokat, míg a korreláció alapú módszerek nem rendelkeznek ezzel a képességgel. A kumuláns alapú módszerek kiemelik a jel/zaj arányt, ha a jelet Gauss típusú zaj szennyezi. Emiatt előnyösebb a használatuk.

Mivel a HOS statisztikákat nem-Gauss (vagy esetleg nem-lineáris) folyamatok elemzésénél alkalmazzák, valamint a szakirodalom jelenlegi álláspontja alapján az IP, és a csomagkapcsolt adathálózatok működési mechanizmusai nem-Gauss folyamatok, emiatt a HOS módszereknek létjogosultsága van az IP adathálózatok működésének vizsgálatánál [52], [41], [61], [45]. A kumuláns és a "polyspectra" módszerek megalkotása a hagyományos korreláció és a hozzá tartozó spektrum megalkotásával párhuzamosan történt [46]. A "polyspectra" módszer először becsüli adat-generáló modell paramétereit, majd előállítja a polisperktrumot. A módszer a folyamatokat ARMA (Auto-Regressive, Moving-Average) processznek tekinti [56]. A HOS módszerek a következő problémák elemzésére terjednek ki: 1.) a MA processzek azonosítása, 2.) az AR folyamatok azonosítása, 3.) az ARMA processzek azonosítása, 4.) a rend meghatározása, 5.) a kumulánsok kiszámítása, 6.) a polisperktrum számítógépes feldolgozása, 7.) kiterjesztések a többcsatornás és többdimenziós rendszerekre, 8.) az alkalmazások [46].

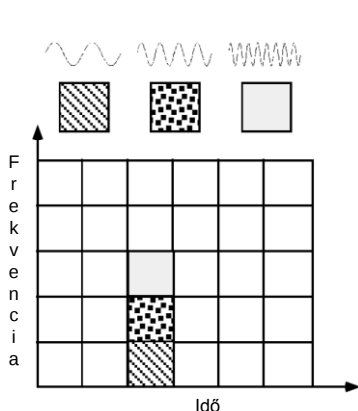
Háromnál magasabb rendű kumulánsokkal való elemzés több okból is előnyösebb, mint az azonos rendű momentumokkal való számolás [46]. Hasonlóan, ahogy a fehér zaj kovariancia függvénye egy impulzus függvény és annak spektruma egy sík, ugyanúgy a magasabb rendű fehér zaj kumulánsai több dimenziós impulzus függvények, és a polisperktrumaik is többdimenziós síkok lesznek. Két, statisztikailag egymástól független véletlen folyamat kumulánsa nem más, mint az egyedi folyamatok kumulánsainak összege [46]. Ugyanez nem mondható el a magasabb rendű momentumokra vonatkozóan. Így a kumulánsokkal való operálás lényegesen egyszerűsíti az elemzést.

2.3. Adatforgalmak wavelet elemzése

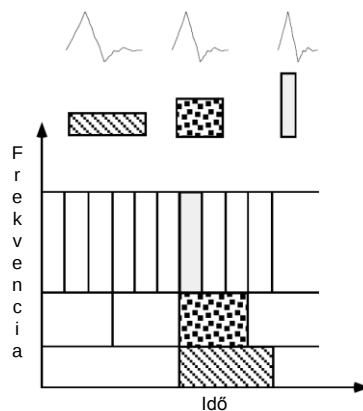
A csomagkapcsolt adathálózatokat wavelet módszerrel legelőször Abry és Veitch 1998-ban tanulmányozta, majd 2003-ban Abry, Flandrin, Taqqu és Veitch mérőföldkőnek számító átfogó tanulmányt készítettek az ön hasonlóság és a hosszúmemória effektusok diszkrét wavelet módszerrel történő elemzése területén [2], [3]. Az MRA (Multi Resolution Analysis néven elterjedt elemzési módszer segítségével speciális wavelet osztályt (multirezolúciós wavelet) alkalmazva egy gyors, piramis alapú dekompozíciós számolási algoritmust is létrehozta. E wavelet-ek analitikus formájának ismerte nem feltétel, csupán az alap tulajdonságaik (nulla momentumok száma, idő vagy frekvencia tartomány, könnyű és rugalmas szabályozhatóság) ismerete szükséges.

A szakirodalomban ez a kutatási módszer újnak számít, de alkalmazása egyre inkább elterjed a hálózati forgalom elemzésében [86]. A Fourier (vagy a Cosinus)

transzformált hátránya, hogy csak frekvencia felbontása van, és nem rendelkezik felbontási képességgel az idő dimenzióban (ld. 2.1. ábra és 2.2. ábra.). Annak ellenére, hogy adott jel minden egyes frekvencia összetevőjét meg lehet határozni, még sem ismerjük az összetevő időbeli elhelyezkedését, mivel végtelen tartományban dolgozik [28]. Ez nagyon nehézkessé teszi az adatforgalom borsztös időpillanatainak beazonosítását. A wavelet analízis ezzel ellentétben approximációs függvényeket alkalmaz, amelyek majdnem véges tartományban definiáltak. Ezáltal a wavelet-ek jól be tudják azonosítani az adatfolyam éles szakadási pontjait.



2.1. ábra. Diszkrét Fourier transzformált mintavételi pontok

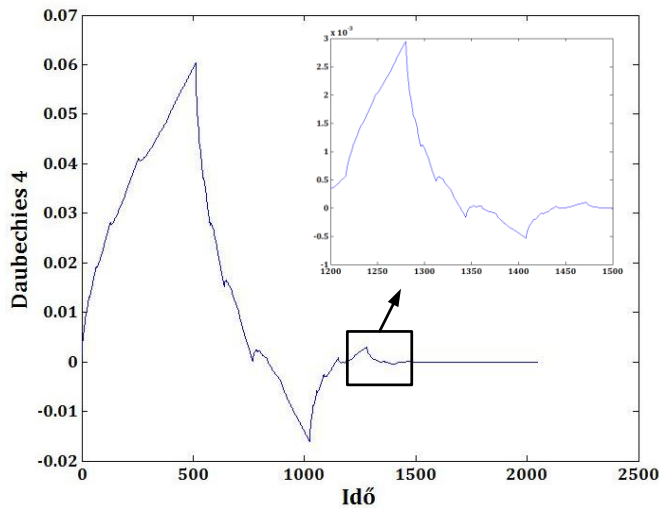


2.2. ábra. Diszkrét wavelet transzformált mintavételi pontok

A forgalom modellezése egyben a hatékonyság elemzését is jelenti. Általában véve, a keresett hatékonysági metrikától, valamint a kérdéses hálózati elemtől függően a skálától való függőség hatása és relevanciája előtérbe kerül. A hatékonyság szempontjából a skála kontextus függő. A szakirodalomban központi helyet foglal el a skálafüggő viselkedés érzékelése, beazonosítása és mérése még abban az esetben is, ha adott elemzés olyan hatékonyság elemzésre irányul, amelynél a skála nem közvetlenül kerül előtérbe. Ennek oka az, hogy a skálázás a klasszikustól eltérő egyéb statisztikai tulajdonságokat indukál. Ezek befolyásolják a modell sok paraméterének becslését, azokét is, amelyek nem a skálázást írják le [62]. Így a hatékonysági modellek prediktív képességét és gyakorlati alkalmazhatósága is a skálázástól függ. Az elemzett adatsor skálától való függetlensége vagy függősége eldönti, hogy szükséges-e a tradicionális statisztikai módszereken túlmenően, a skálázást is figyelembe vevő speciális technikák alkalmazása. Skálafüggőség esetén a feladat nem más, mint éppen a befolyásoló paraméterek meghatározása. Ezek szabályozzák az összes becsült paraméter statisztikai jellemzőit, vagyis a forgalom modell QoS metrikáit [62].

Ha az $X(t)$ másodrendű stacionárius folyamat μ_X átlagát akarjuk meghatározni egy n hosszúságú mintavételből, akkor erre elég jó választ ad az egyszerű átlagbecslő. A klasszikus eredmény az, hogy nagyszámú mintavételnél ($n \rightarrow \infty$), az átlag aszimptotikusan normális eloszlást követ, amelynek várható értéke éppen μ_X , és szórásnégyzete σ_X^2/n , ahol σ_X^2 az $X(t)$ szórásnégyzete. Ha $X(t)$ LRD tulajdonságú, akkor a mintavétel átlaga egyben aszimptotikusan normális eloszlású, amelynek átlaga μ_X . Ennek ellenére a szórásnégyzetet a $[2c_r n^\alpha / (1 + \alpha)](1/n)$ összefüggés adja, ahol $\alpha \in [0,1)$, és $c_r \in (0, \infty)$ a hosszú memóriájúság jellemző paraméterei [8]. Ez azt mutatja, hogy a mintavétel átlagának szórásnégyzete csökken a mintavétel számával, n , és teszi ezt egy olyan rátával, ami lassúbb, mint a klasszikus esetben. Megfigyelve, hogy az LRD alapú és a klasszikus folyamatok szórásnégyzeteinek aránya a végtelenig nő n függvényében, nyilvánvalóvá válik, hogy a hagyományos feltételezésekre vagy olyan egyszerű mennyiségekre, mint a mintavétel átlagára vonatkozó konfidencia intervallumok komoly hibákhoz vezethetnek annak ellenére, hogy az adatsor LRD tulajdonságú [62].

A wavelet alapú elemzés lehetővé teszi, hogy a skálafüggőség érzékelése, beazonosítása és megmérése segítségével az adatforgalom tulajdonságait még jobban megértsük. Fontos kiemelni, hogy a módszernél alkalmazott wavelet család maga is skála független tulajdonsággal rendelkezik (ld. 2.3. ábra.)



2.3. ábra. Daubechies4 anya wavelet

A módszer legfontosabb előnye, hogy ugyanazzal a technikával sokféle a skálázási mód elemezhető. A skála paraméterek becslő algoritmusai elhanyagolható "bias"-t és alacsony szórást implikálnak. A diszkrét wavelet transzformáció (DWT) tetszőleges méretű adatsoron robusztus elemzést tesz lehetővé, miközben a determinisztikus trendeket is képes kiszűrni. Az LRD folyamatok szimulációjánál

időigényes processzási munka szükséges, mivel a múltbeli értékek erőteljesen befolyásolják a jövőbeli értékeket, így nem alkalmazhatók az adatsor hosszának csonkítására épülő approximációk. Ezzel ellentétben a wavelet-ek a lényegesen kevesebb processzást igénylő DWT segítségével jó megközelítést adnak a skálázódó folyamatok mintavételeinek pályájára. A Logscale diagram segítségével látványos módon megjeleníthető az önhasonlóság és/vagy a hosszúmemória függőség mértéke, ami alapján numerikusan határozható meg a skála-exponens értéke.

2.4. Az OSI szintek QoS mechanizmusai

Az IP adathálózatok forgalmának paramétereit erőteljesen befolyásolja az alkalmazott kommunikációs mechanizmusok típusa. Az Internet az egyik, ha nem az egyetlen legnépszerűbb világméretű kommunikációs rendszer. Ennek ellenére ma még nem képes garantált minőséget nyújtani a rajta működő szolgáltatások számára. Ezt a rendszert érintő kutatás-fejlesztés területén számottevő erőfeszítés folyik a QoS átviteli igények kielégítését célzó megoldások létrehozása érdekében [91]. A QoS igények a késleltetés, a sávszélesség, a késleltetés ingadozás, a szolgáltatás blokkolási aránya, a csomagvesztés aránya, a megbízhatóság és egyéb paraméterekre vonatkoznak.

Az IP alapú adathálózatokban a QoS biztosításához két megközelítés létezik. Ezek az alábbiak: *i.)* Nagy sávszélesség koncepció, amelyet az IETF képviselt és elegendő olcsó átviteli rátájú csatornát feltételez a hálózati szolgáltatások számára; *ii.)* Menedzselt sávszélesség koncepció, amelyet a BISDN szolgáltatások megteremtéséhez az ATM Forum alkotott meg és véges, korlátozott átviteli rátájú csatornát igényel.

A nagy sávszélesség koncepció azt feltételezi, hogy a forgalmi igények rohamos növekedése ellenére a későbbiekben a sávszélesség nagyon olcsó lesz, így a felhasználók nagy kapacitású összeköttetéseket tudnak majd használni. További hipotézis, hogy a köztes csomópontok kapcsolási ideje jelentősen csökkenni fog. Egy ilyen túlméretezett hálózat képes lenne nagyon sok forgalmi problémát megoldani, főlegessé téve a bonyolult tervezési és modellezési eljárásokat. Az Internet ilyen irányú és mértékű fejlesztése azonban várhatóan gazdasági és egyéb társadalmi akadályokba ütközne, ami miatt ez a koncepció csak a gerinchálózatokban, és nem a hozzáférési hálózatokban valósulhat meg.

A menedzselt sávszélesség koncepció azonban a növekvő, de korlátozott sávszélességet feltételezi a jövőben is, ami miatt szükséges a forgalom szabályozása

és a kapacitás menedzselése. Különböző technológiák egymástól eltérő eljárásokat kínálnak megoldásként. Az adatkapcsolati réteg protokollok közül már a Frame Relay is képes volt QoS funkciókra. Ezt a DE (Discard Eligible) jelzőbit és a hozzá kapcsolódó FECN/BECN (Forward Explicit Congestion Notification / Backward Explicit Congestion Notification) mechanizmusokkal biztosította a szolgáltatói hálózat, illetve a végpontoknál. Azonban a QoS mechanizmusok explicit módon az ATM (Asynchronous Transfer Mode) átviteltechnikánál jelentek meg. Az ATM-nél a kapcsolat felépítése előtt a felhasználói processz és a szolgáltatói hálózatot képviselő kapcsoló között forgalmi szerződés jön létre, amely garantálja a felhasználó számára az igényelt QoS jellemzőket. Az ATM-nél öt különböző szolgálat kategóriát definiáltak a különböző jellegű adatfolyamok számára. Az MPLS (Multi Protocol Label Switching) átviteltechnika az adatkapcsolati és hálózati rétegek közötti 2,5-ös rétegben működik, amely szintén támogatja a QoS-t. Az MPLS egy címkekapcsolt kapcsolatorientált mechanizmus, amely ebben a tekintetben az ATM-hez hasonló elven működik.

A QoS az Internet technológiák környezetében a VoIP (Voice over IP) megoldás telefonbeszélgetés költségcsökkentő hatásának következtében jelent meg és terjed el egyre inkább [57]. Az Internet és intranet alapú új, sávszélesség igényes alkalmazás, valamint az adat-, hang-, video forgalom IP infrastruktúra feletti konvergenciája ugyancsak a QoS iránti igényeket hangsúlyozza [84]. A jelenlegi Internet alkalmazások többsége Ethernet csomópontokban végződik, így a csomagok ezen átviteltechnikán való homogén továbbítása költségcsökkentést jelent, mivel nem szükséges protokoll-konverzió az adatok továbbítása során [84]. A különböző alkalmazások egymástól eltérő követelményeket támasztanak az adatforgalmat továbbító hálózat felé. A generált forgalom erőforrás igénye időben változó és általában szükséges, hogy a hálózat megfeleljen ennek az igénynek. Bizonyos alkalmazások többé vagy kevésbé toleránsak a forgalom késleltetésére, valamint a késleltetés változásra. Továbbá néhány alkalmazás képes elviselni korláton belül adatvesztést, míg mások nem.

Ezek a követelmények a következő négy QoS-jellegű paraméter segítségével kerülnek kifejezésre. Sávszélesség: az alkalmazás forgalmának továbbítási sebessége; lappangási idő: az a késleltetés, amit egy alkalmazás a csomag kézbesítésénél képes elviselni; jitter: a lappangási idő szórása; adatvesztés: az elvesztett adatok százalékos aránya [47]. Ha végtelen méretű hálózati erőforrásainak lennének, akkor az alkalmazások forgalma a szükséges sávszélességen, nulla lappangási idővel, nulla jitterrel és nulla adatvesztéssel lenne jellemezhető. Mivel azonban a hálózati erőforrások korlátosak, a rendszer bizonyos részein időtől függően az igények nem teljesíthetők. A QoS mechanizmusok az alkalmazások szolgálatigényének függvényében a hálózati erőforrások foglалását szabályozzák.

A hálózati végpontok közötti kapcsolatokhoz különböző hálózati eszközök szükségesek. Mindezek hálózati interfészekkel rendelkeznek, amelyek véges rátával képesek forgalmazni. Ha az adatforgalom olyan irányba halad, ahol az interfész továbbítási rátája kisebb, ott torlódás lép fel. Ezen jelenség kezelésére a köztes eszközök várakozási sorokat alkalmaznak, ezáltal lehetőség nyílik a forgalom eldobására, illetve a torlódás enyhítésére. Emiatt az alkalmazások változó lappangási időt, illetve adatvesztést tapasztalnak. Az interfészek adattovábbítási képessége, valamint a várakozási sor ideiglenes tárolási tulajdonsága az a két alapvető erőforrás, amely az alkalmazások forgalma számára biztosítani tudja QoS-t. A köztes eszközök működési mechanizmusa az egyes forgalmak számára tulajdonképpen meghatározza ezen erőforrásokhoz való hozzáférés sorrendjét, azaz a szolgáltatás minőségét.

Torlódás esetén az erőforrás-kritikus kapcsolatokhoz tartozó csomagok prioritást élveznek az egyéb csomagokhoz képest. Ehhez a köztes hálózati eszközöknek intelligens módon kell az erőforrásokat kezelniük. A különböző prioritások kialakításához az eszköz memóriája meghatározó szerepet játszik. Az erőforrások allokációjához szükséges a különböző típusú forgalmak beazonosítása. A forgalom hálózati eszközhez érkezésekor megtörténik a csomagok osztályozása és különböző adatfolyamokhoz való rendelése. Eszközön belül minden egyes típusú adatfolyam a kimenő interfész egy-egy várakozási sorába kerül. Ezen várakozási sorok kezelését speciális mechanizmusok végzik, amelyek meghatározzák, hogy az egyes várakozási sorokból külön-külön milyen legyen az interfészen továbbított adatrátája. A forgalmak típusának meghatározását és a várakozási sorok kezelését együtt az adatforgalom kezelési mechanizmusok végzik. Fontos megjegyezni, hogy az adatfolyam több módon is definiálható. Egyik lehetséges mód a forrás-, és a cél logikai cím, a forrás- és a cél-socket szám, valamint a viszony-azonosító kombinációja. Másik lehetséges mód az adott alkalmazástól érkező adatok vagy adott interfészről érkező adatok beazonosítása. A gyakorlatban bármely típusú azonosítást alkalmazhatónak tekintik. A klasszikus hálózati alkalmazások jellemzőit, illetve ezek erőforrás igényének összefoglalóját a 2.1. Táblázat tartalmazza [85].

A legfontosabb forgalomkezelő mechanizmusok az IEEE 802.1p, a Diffserv (Differentiated Service per-hop-behaviors), az Intserv (Integrated Services), az ATM/ISSLOW és mások. Ezek mindegyike speciális környezetben képes kifejteni hatását optimálisan. Az hálózati rétegben működő IP protokoll különböző típusú adatkapcsolati rétegek (pl. Ethernet, ATM, Frame Relay, Token Ring, FDDI, PPP, HDLC, LAPB, stb.) szolgáltatásait képes felhasználni. Az IP protokoll kapcsolatmentes, de nem nyújt megbízható harmadik rétegbeli szolgáltatást. Már az IPv4 csomag fejrészének felépítésében is biztosítottak mezőt QoS célokra. Ez a ToS (Type of Service), amit évtizedekig nem használtak ki.

2. Irodalmi előzmények, a témakör kutatási háttérmunkája

Az IEEE 802.1p forgalomkezelő mechanizmus: A legtöbb LAN az IEEE 802 (Ethernet, FDDI, Token-Ring, stb.) vagy más osztott közeget használó technológiára épül. Az IEEE 802.1p az L2 protokoll adatelem fejrészében egy mezőt alkalmaz, amelyben nyolc prioritás szint fér el. A végfelhasználói csomópontok és a router-ek a LAN-ba küldött forgalom kereteiben megadják a prioritás értékét. Az adatkapcsolati eszközök (switch, bridge) a kereteket a prioritásnak megfelelő várakozási sorok segítségével kezelik. A mechanizmus csak alhálózaton belül működik, különböző hálózatok között nem érvényesül.

2.1. Táblázat: A hálózati forgalmak jellemzői

Forgalom típus	Jellemző	Hálózati erőforrás igény	Alkalmazás igény
Hang	Párbeszédes, borsztös. Kézbessítési késleltetés <100 msec. Minden csomag sorrendben, jitter nélkül, de csomagvesztés lehetséges.	Csomagok routolása minimális késleltetéssel. Prioritást igényel. L4 szintű kezelhetőség.	Csomagok visszaállítása sorrendben, jitter mérő puffer igény, későn érkező csomagok eldobása.
Adat	Borsztös, nagyon hosszú, folyamatos küldés. Késleltetés elviselhető, de adatvesztés nem.	Csomagok routolása hibaellenőrzéssel L4 szinten. Hangsúlyozottan hibamentes késleltetés.	Csomagok visszaállítása hibaellenőrzéssel, hiba vagy túl sok késés esetén újraküldés.
Videó	Folyamatos. Csomagvesztés kevésbé tolerálható. Kismértékű késleltetés elfogadható, kivéve a videokonferencia, ahol az igények a hangéval azonosak.	Csomagok routolása hibamentesen.	Csomagok visszaállítása jitter mérő pufferrel. Videokonferencia esetén csomagok pufferelése és késleltetés csökkentése kései csomagok törlésével.
Játék	Borsztös adat, hang és folyamatos videó. Valós idejű kézbessítés, csak alacsony mértékű csomagvesztéssel.	Csomagok routolása minimális késleltetéssel. Prioritást igényel. L4 szinten támogatás szükséges.	Csomagok visszaállítása sorrendben, jitter mérő puffer, csökkentett késleltetés. Hiba vagy túl sok késés esetén újraküldés.

A Diffserv forgalomkezelő mechanizmus: Ez egy OSI 3 szintű QoS mechanizmus, amelyet annak ellenére, hogy több éve létezik, csak az utóbbi időben kezdtek el alkalmazni. A Diffserv az L3 protokoll adatelem fejrészében DSCP (Diffserv CodePoint) nevű mezőt helyez el. A végfelhasználói csomópontok és a router-ek a diffserv hálózatba küldött forgalom minden egyes csomagját a megfelelő DSCP értékkel látják el. A diffserv hálózatban lévő router-ek minden csomagra a DSCP érték alapján történő osztályozás szerint specifikus PHB (Per-Hop Behavior) várakozási sor-kezelő algoritmust vagy ütemezőt alkalmaznak. Például az EF (Expedited-Forwarding) PHB limitált adatráta esetén a bemeneti és kimeneti pontok között nagyon alacsony lappangási időt biztosít. Más PHB rögzítheti bizonyos csomagok más csomagokhoz viszonyított relatív prioritását. Ez a prioritás vonatkozhat az átlagos átviteli sebességre, az eldobási sorrendre anélkül, hogy a lappangási időre megkötés létezne. A PHB-k a router-ek önálló viselkedési

2. Irodalmi előzmények, a témakör kutatási háttérmunkája

szabályai. Kizárólagosan PHB-k segítségével nem lehetséges végponttól-végpontig típusú QoS garanciát nyújtani. Előfordulhat olyan eset is, amelynél a végponttól-végpontig QoS szolgáltatást az útvonal menti összes útválasztóban azonos PHB beállításokkal biztosítjuk. Ilyenkor a logikai kapcsolat bérelt vonal jellegű összeköttetést ad, amely képes megfelelni akár interaktív hangkapcsolat vagy videó lejátszás számára is. A Diffserv által biztosított továbbító PHB számára négy osztályt (ld. 2.2. Táblázat) definiáltak [16].

Az Intserv forgalomkezelő mechanizmus: Ez két modulból álló szolgálat halmaz, részei a garantált, illetve az ellenőrzött terhelés szolgálatok. A garantált szolgálat a forgalom számára kvantálható mértéket és korlátos lappangási időt biztosít. Az ellenőrzött terhelés szolgálat megadott mértékű forgalom számára terheletlen hálózati környezetet emulál. Ezek a szolgálatok kvantálhatók abban az értelemben, hogy bizonyos forgalom mennyiség számára szabályozható a QoS. Az Intserv szolgálatok többsége az RSVP jelzésrendszerre épül. Mindegyik Intserv szolgálat befogadás vezérlési algoritmusokat definiál, amelyek az adott eszköznél befogadott forgalom mennyiséget határozzák meg anélkül, hogy romolna a szolgálat minősége. Az Intserv szolgálatok nem használnak várakozási sor algoritmusokat.

2.2. Táblázat: A Diffserv AFC (Assured Forwarding Codepoint) táblája

Eldobási preferencia	Class #1	Class #2	Class #3	Class #4
Alacsony	AF11 (001010)	AF21 (010010)	AF31 (011010)	AF41 (100010)
Közepes	AF12 (001100)	AF22 (010100)	AF32 (011100)	AF42 (100100)
Magas	AF13 (001110)	AF23 (010110)	AF33 (011110)	AF43 (100110)

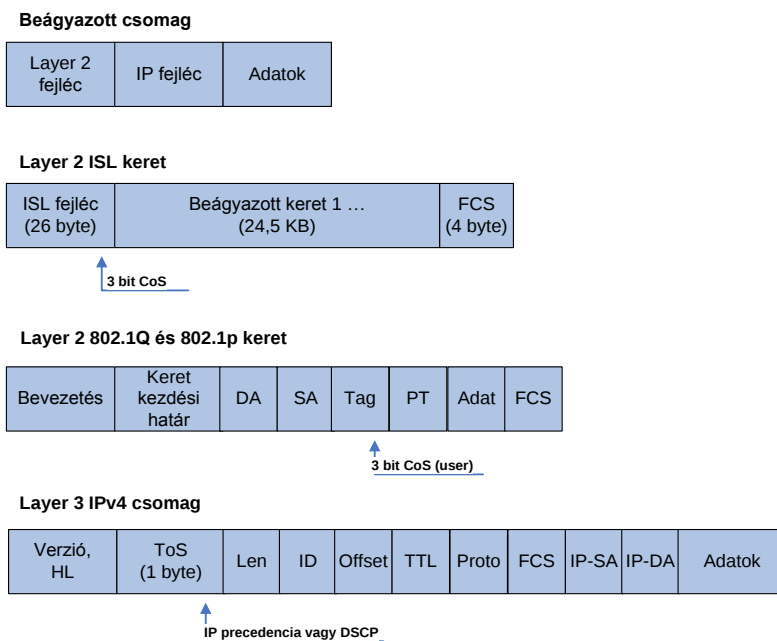
Az IETF szabványai szerint a QoS alkalmazása leggyakrabban a Diffserv architektúrán alapul [13]. Ez előírja minden csomag osztályba sorolását a hálózaton belül. Az osztályozást az IP csomag fejlécében fenntartott hat-bites szolgálat típus (TOS - Type of Service) mező értéke teszi lehetővé. Lehetséges azonban az osztályozás az L2 rétegben szállított minőségi jellemzők alapján is. Ezen speciális biteket az L2 és L3 protokoll adatelemek esetén a 2.4. ábra mutatja be.

Az L2 Inter-Switch Link (ISL) mechanizmus esetében a kereteknek létezik egy 1 bájtos felhasználó (User) mezője, ami az utolsó három biten magában hordozza az IEEE 802.1p CoS (Class of Service) értéket. Az L2 ISL trónk interfészek ISL kereteket továbbítanak.

Az IEEE 802.1Q keret egy 2 bájtos TCI (Tag Control Information) mező segítségével szállítja a CoS értéket az utolsó három, User Priority biten. Az ilyen L2-es trónkon minden forgalom 802.1Q kereteket tartalmaz, kivéve a Native VLAN esetében. Más fajta kerettípusok nem tudják szállítani a második rétegbeli CoS értékeket. A CoS értékei 0-7 tartományból vehetnek növekvő prioritású értéket.

2. Irodalmi előzmények, a témakör kutatási háttérmunkája

Az L3 IP csomagok vagy az IP precedencia, vagy a DSCP (Differentiated Services Code Point) értéket továbbítják. A QoS támogatja mindkét fajta érték használatát, mert a DSCP értékek kompatibilisek az IP precedencia értékekkel. Az IP precedencia értékek 0-7, míg a DSCP értékek 0-63 tartományban léteznek. Minden switch és router amely az Interneten forgalmaz, a csomagokat osztály információval látja el, amely segítségével az azonos osztályhoz tartozó csomagok azonos kezelésben, a különböző osztályhoz tartozó csomagok pedig különböző kezelésben részesülnek.



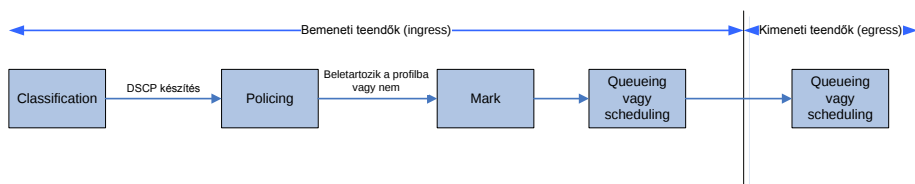
2.4. ábra. A QoS mechanizmusok által használt PDU mezők

Az osztály információt a csomagokban végfelhasználói csomópontok, vagy switch, illetve router köztes csomópontok is meghatározhatják, függően, a helyi policy-tól, a részletes csomagvizsgálattól vagy mindkettőtől. A részletes csomagvizsgálat tipikusan a hálózat hozzáférési pontban történik, annak érdekében, hogy a meghatározó switch-ek és routerek ne legyenek túlterhelve. Ezek a köztes eszközök az útvonalon használhatják az osztály információt, hogy meghatározzák a rendelkezésre álló erőforrás készletet a forgalmi osztályok számára. Egy egyedülálló eszköz DiffServ architektúra szerinti forgalom-kezelő viselkedését PHB-nak (Per-Hop Behavior) nevezik. Ha a továbbítási útvonal mentén az összes

2. Irodalmi előzmények, a témakör kutatási háttérmunkája

eszköz konzisztens per-hop módszerrel működik, akkor végponttól-végpontig típusú QoS megoldás érvényesül.

Az osztályozás a forgalmak típus szerinti szétválasztását biztosítja. A bemeneti (ingress) eszköz működése magába foglalja a forgalomosztályozás (classification), a szabályozás (policing), a jelölés (mark), a sorba helyezés (queuing) és az ütemezés (scheduling) feladatokat. A QoS alapmodellt a 2.5. ábra mutatja be. Egy L2/L3 kapcsoló esetén két bemenő interfésztől érkező forgalom egyetlen kimenő interfészen való továbbítási mechanizmusainak sorrendjét a 2.6. ábra mutatja.



2.5. ábra. A Diffserv QoS modell elemei

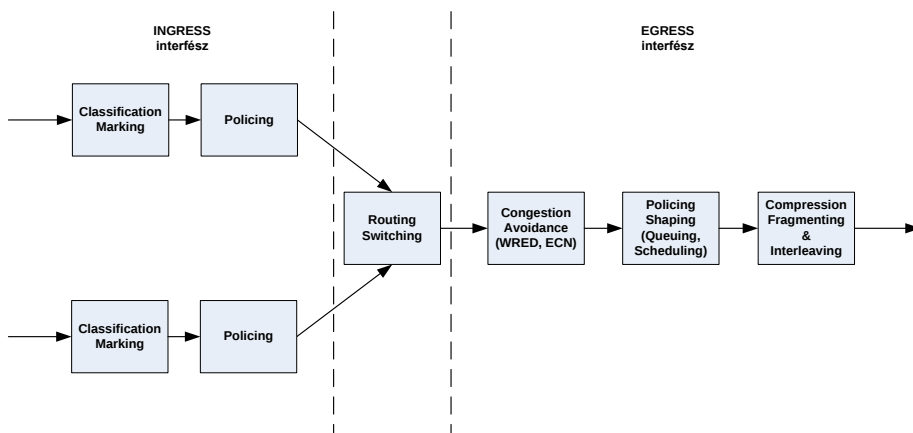
Bemeneti interfészekén az osztályozás szétválogatja a különböző típusú forgalmakat [14]. A folyamat készít egy belső DSCP-t csomagonként, ami meghatározza a továbbítás közben végrehajtandó QoS tevékenységeket. A szabályozás meghatározza, hogy a csomag szerepel-e a bekonfigurált profilban összehasonlítva a belső DSCP-t a beállított szabályozókkal (policer), amelyek az adatfolyam által felhasznált sávszélességet korlátozzák. A jelölő (marker) kiértékeli a szabályozót és az interfész szintű konfigurációs információt, majd megvizsgálja azt az előírást, ami szerint kell eljárnia. Ha a csomag a profilon kívül esik, átengedi a csomagot módosított DSCP értékkel vagy eldobja. A sorba helyezés (queuing) megvizsgálja a DSCP vagy a CoS értéket, és ez alapján eldönti, hogy a csomag melyik bemeneti várakozási sorba kerüljön a kettő közül.

Kimeneti interfészekén a sorba helyezés (queuing) kiértékeli a belső DSCP-t és meghatározza, hogy a 4 kijárat sor közül melyikbe tegye a csomagot. Erre azért van szükség, mert torlódás alakulhat ki eszközön belül, ha a két bemeneti várakozási sor egyszerre küldi az adatot a kimeneti interfész felé. Gyakran torlódás megelőző technológiákat alkalmaznak (WRED-Weighted Random Early Detection, és tail drop) a gigabit képes ethernet portok, illetve egy küszöbértékes „tail drop” mechanizmust a 10/100 Mbps-os ethernet portok. Ütemezés (scheduling) a négy kimeneti sor közül egy maximális előnyben (expedite) részesül, így ebbe a sorba kerülő csomagok mindegyike továbbításra kerül, mielőtt bármely másik sor tartalmának kiszolgálása megtörténne.

IP-től különböző forgalom esetén, ha a beérkező csomag nem rendelkezik CoS értékkel, akkor a bemeneti interfészen érvényes helyi fix beállítás érvényesül. Ha a

2. Irodalmi előzmények, a témakör kutatási háttérmunkája

beérkező keret rendelkezik CoS értékkel, akkor a meneti interfész alkalmazza a CoS-DSCP térképet, ami alapján a kerethez rendeli a belső DSCP értéket. Ha a beállítások MAC szűrő listát (ACL-Access Control List) tartalmaznak, a forrás-, a célcím, illetve a keret típusa alapján történik a DSCP értékének beállítása. Ha nincs ACL, akkor a csomag DSCP=0 értéket kap, azaz „best-effort” alapján továbbítódik.



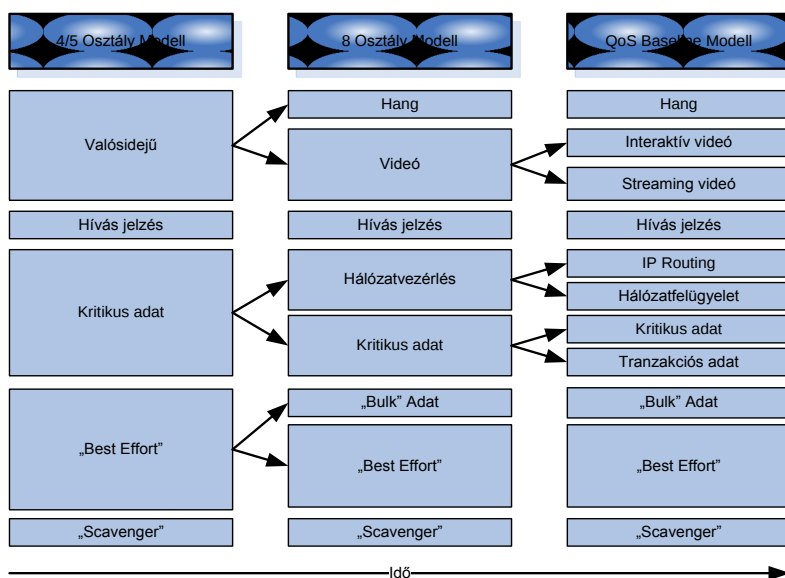
2.6. ábra. Az L2/L3 kapcsoló Diffserv QoS modellje

IP forgalom esetén az eszközön belül a beérkező csomagban lévő DSCP használható. Az IETF a ToS mező hat legfontosabb bitjét a DSCP-ként értelmezi. A prioritást a 0-63 intervallumban lévő DSCP érték fejezi ki. Különböző QoS zónák közötti fizikai kapcsolatot biztosító interfészek a DSCP-DSCP mutációs összerendelés alapján megváltoztathatják a két zóna között továbbított csomag DSCP értékét. Lehetőség van a beérkező csomag IP precedencia mezőjének kiértékelésére is, ami alapján a DSCP érték hozzárendelése az IP precedencia-DSCP táblázat alapján történik. Az IPv4 a ToS mező három legnagyobb helyi értékű bitjét használja a precedencia tárolására (ld. 2.2. Táblázat). Ha a csomagban jelen van a CoS (Class of Service) érték, akkor a DSCP érték a CoS-DSCP táblázatból áll elő. Konfigurált szabványos vagy kiterjesztett IP szűrőlista (ACL – Access Control List) esetén az IP csomag fejrészében lévő különböző mezők értékei azonosíthatók be. Szűrési találat esetén a szűrőhöz előírt DSCP érték hozzárendelődik az adott csomaghoz. Ha nem létezik ACL, akkor a csomag DSCP=0 értékkel halad tovább.

Az osztályozás-összerendelés (class map) mechanizmus arra használható, hogy egy speciális adatfolyam beazonosítható és megkülönböztethető legyen más adatfolyamoktól. Ez a mechanizmus az adatfolyam további kategóriákba sorolását teszi lehetővé, amihez a döntést az ACL szerinti illeszkedés, DSCP listához vagy IP precedencia listához való tartozás biztosítja. További adatfolyam osztályozásához egy-egy további eltérő nevű osztály-összerendelést lehet készíteni. Ha a csomag egyezik az osztály-összerendelés szabállyal, akkor a policy-összerendelés

2. Irodalmi előzmények, a témakör kutatási háttérmunkája

segítségével megtörténik a kategóriába sorolása. A policy-összerendelés interfészen történő aktivizálása következményeként az alábbi tevékenységek történhetnek: a CoS, DSCP, IP precedencia értékek kiértékelése; a DSCP vagy az IP precedencia érték beállítása; az adatfolyam sávszélességének korlátozása; olyan tevékenység elvégzése, amely a forgalom profile illesztése esetén szükséges. A szolgálat osztályok felsorolását, illetve kialakulásukat a 2.7. ábra mutatja [54]. A „Bulk” adat a háttérben futó nagyméretű adatletöltések jellemzője. A „Scavenger” adattípus az IPv6 esetén kerül előtérbe, amely még a „best-effort” adatnál is könnyebben eldobható. A QoS Baseline modell részletes jellemzőit a 2.3. Táblázat tartalmazza [75]. 2004-ben az Internet gerinc kapcsolatokon mért, a fenti modell szerinti forgalom típusok eloszlását a 2.8. ábra mutatja [75].



2.7. ábra. A QoS szerinti hálózat-szolgálat osztályok fejlődése

A csomag eszközön belüli DSCP értékének meghatározása után a policing és jelölés események következnek. A policing a forgalom sávszélességének szabályozását lehetővé teszi policer-ek segítségével. A policer-ek minden egyes csomagot megvizsgálnak és eldöntik, hogy megfelel-e a profilnak vagy sem. A profilnak megfelelő szabályozásokat a jelölő végzi, amely dönt a csomag kézbesítése vagy eldobása felől. A policer lehet egyedi vagy aggregált. Az egyedi QoS policer a sávszélesség korlátokat a megfelelő forgalom osztályok alapján alkalmazza.

2. Irodalmi előzmények, a témakör kutatási háttérmunkája

Az aggregált QoS policer a beállításokat globálisan kezeli, minden forgalmat megvizsgál. A policer zsetonos vödör (token-bucket) algoritmust alkalmaz. Ez hasonlít az ATM átviteltechnikánál alkalmazott megoldásra, de itt csak egy edény és csak egy szivárgó lyuk létezik. Minden beérkező keret esetén a vödörbe egy zsetont helyez el. A beállított sávszélességnek megfelelő ritmusban a vödörből a zsetonok kiszivárognak.

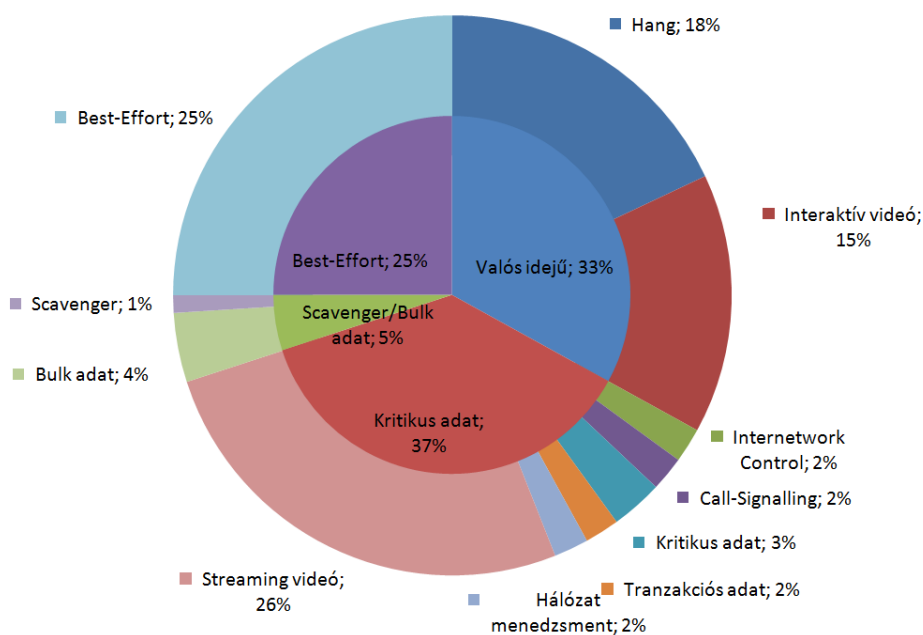
2.3. Táblázat: QoS Baseline osztályok

PHB	DSCP	DSCP kód	Ajánlás	Tervezett protokollok	Konfiguráció
EF (Expedited Forwarding)	EF	101110	RFC 3246	Interaktív hang	Engedélyezés: RSVP; Queueing: prioritás alapú
AF1 (Assured Forwarding)	AF11 AF12 AF13	001010 001100 001110	RFC 2597	Bulk forgalom, web, általános adatszolgáltat	Queueing: ráta alapú; Aktív queue kezelés: DSCP alapú WRED
AF2 (Assured Forwarding)	AF21 AF22 AF23	010010 010100 010110	RFC 2597	Adatbázis hozzáférés, tranzakció szolgálat, interaktív forgalom, preferált adatszolgáltat	Queueing: ráta alapú; Aktív queue kezelés: DSCP alapú WRED
AF3 (Assured Forwarding)	AF31 AF32 AF33	011010 011100 011110	RFC 2597	Lokálisan definiált; Kritikus alkalmazás	Queueing: ráta alapú; Aktív queue kezelés: DSCP alapú WRED
AF4 (Assured Forwarding)	AF41 AF42 AF43	100010 100100 100110	RFC 2597	Interaktív videó és hangja	Engedélyezés: RSVP; Queueing: ráta alapú; Aktív queue kezelés: DSCP alapú WRED
IP routing	Class Selector 6	110000	RFC 2474	BGP, OSPF, IS-IS, stb.	Queueing: ráta alapú (kis garancia, minimum ráta); Aktív queue kezelés: WRED
Streaming videó	Class Selector 4	100000	RFC 2474	Tulajdonos által definiált	Engedélyezés: RSVP; Queueing: ráta alapú; Aktív queue kezelés: WRED
Telefon jelzés (hang és videó)	Class Selector 3	011000	RFC 2474	SIP, H.323, stb.	Queueing: ráta alapú (kis garancia, minimum ráta); Aktív queue kezelés: WRED
Network menedzsment	Class Selector 2	010000	RFC 2474	SNMP	Queueing: ráta alapú (kis garancia, minimum ráta); Aktív queue kezelés: WRED
Scavenger	I2SS vagy Class Selector 1	001000	Internet 2 usage	Felhasználó által választott szolgáltatás	Queueing: ráta alapú (sávszélesség gar. nélkül); Aktív queue kezelés: WRED
Más BE (Best-Effort)	Default vagy Class Selector 0	000000	RFC 2474	Nem specifikált forgalom	Queueing: ráta alapú (minimum sávszélesség garancia); Aktív queue kezelés vagy Per-flow fair queueing: WRED

Amikor a zseton a vödörbe kerül, a kapcsoló eszköz előzetesen ellenőrzi a vödörben lévő üres helyet. Ha nincs elegendő hely a zseton számára, akkor a csomag nem megfelelő jelölést kap és az annak megfelelő policer intézkedés következik be. Ez lehet a csomag eldobása vagy a DSCP értékének lecsökkentése is. A vödör telítődésének gyorsaságát a vödör mérete (bőrszt [bájt]) a vödör

2. Irodalmi előzmények, a témakör kutatási háttérmunkája

szívárgásának mértéke (bitráta [bps]) és az átlagos bitráta feletti börszt időtartama befolyásolja. A vödör mérete a börszt hosszát korlátozza, és meghatározza az eszközben a bementi pont és a kimeneti pont között továbbítható keretek darabszámát. Alacsony forgalom esetén az adatfolyam nem befolyásolódik. Ha a börszt hosszú és magas bitrátájú, a vödör túlsordulása miatt a kerettel szemben policer intézkedés lép érvénybe.



2.8. ábra. A forgalomtípusok megoszlása az Interneten

A kapcsoló a sorba állítás és az ütemezés folyamat során torlódás menedzsment célból kimeneti várakozási sorokat, valamint WRR (Weighted Round Robin) mechanizmust használ. A jelenlegi gyakorlati implementációk esetében a QoS intelligenciával rendelkező Gigabit Ethernet portok 4 darab várakozási sorral rendelkeznek, amelyek közül egyik kiemelt prioritásúként működhet [55]. A várakozási soroknak két-két küszöbértéke van. A DSCP-küszöbérték táblázat alapján történik a csomag „tail-drop” vagy WRED algoritmus szerinti kezelése. A várakozási sor mérete, a küszöbérték, a „tail-drop” vagy WRED algoritmus és a DSCP-küszöbérték táblázat együtt befolyásolja, hogy a küszöbérték meghaladásakor mikor és melyik csomag eldobása következik be. A kimenő interfész fizikai sávszélessége együttesen képezi a négy várakozási sor számára rendelkezésre álló sávszélességet.

A „tail-drop” a Gigabit Ethernet interfészek alapértelmezett torlódást megelőző mechanizmusa. A csomagok addig kerülnek a várakozási sorokba, amíg a küszöbértéket el nem érik. Ilyen esetben az első küszöbértékhez rendelt csomagok eldobása mindaddig ismétlődik, amíg a forgalom a küszöbérték alá nem csökken. Az elsőnél nagyobb második küszöbértékhez rendelt csomagok ilyenkor is továbbítódnak mindaddig, amíg a forgalom második küszöb-értéket el nem éri. A küszöbértékek százalékosan a sorok lefoglaltságát mutatják. A „tail-drop” és a WRED két olyan mechanizmus, amely közül csak az egyik működhet egyidőben az interfészen.

A WRED (Weighted Random Early Detection) abban különbözik más torlódás feloldó mechanizmustól, hogy a torlódás kezelése helyett megpróbálja megelőzni annak kialakulását. A WRED felhasználja a TCP azon torlódásvezérlési tulajdonságát, hogy a TCP a várakozási sora méretének szabályozásával képes ideiglenesen leállítani az üzenetek küldését. A WRED véletlenszerűen eldob csomagokat azelőtt, hogy erős torlódás lépne fel, így a forrás TCP protokoll entitás csökkenti a küldési sebességét, és az L3 rétegben megelőzhető a torlódás. A véletlenszerű csomageldobás lehetővé teszi, hogy a „tail-drop” algoritmussal ellentétben ne kelljen sok csomagot eldobni, ugyanakkor a fizikai csatorna jobb kihasználására nyílik lehetőség. A WRED a nagyobb rátájú forgalmakból többet dob el, mint az alacsony rátájúakból. A kimenő interfész mind a négy várakozási sora itt is rendelkezik egy-egy küszöbértékkel. Ennek meghaladása esetén kezdődik véletlenszerűen a forgalom csomagjainak eldobása. Minél jobban meghaladja a küszöbértéket a forgalom, annál több csomagot dob el. A csomagok kezelése a DSCP-küszöbérték táblázat alapján történik.

A csomag QoS miatti módosítása különböző esetekben következik be. a.) IP csomagnál az osztályozás alapján DSCP érték rendelődik a csomaghoz. Előfordulhat, hogy ilyenkor a csomag nem módosul, de a DSCP hozzárendelés megtörténik. Ennek azzal magyarázható, hogy mivel a QoS osztályozás és az ACL szűrőlista illesztése egyidőben történik, az ACL miatt szükség lehet a csomag különválasztására. Ilyenkor a csomag az eredeti DSCP értékével a kapcsoló CPU-jához kerül, ahol a routing miatt újból ACL illesztés következhet. Az útvonal elemzése az osztályozott DSCP-re épül. b.) IP-től különböző csomag esetén nem létezik DSCP, így az osztályozás a csomaghoz egy belső DSCP-t rendel. A belső DSCP alapján a csomagot CoS osztályba sorolja és annak megfelelő módon processzálja. iii) „Policing” fázisban az IP és a nem IP csomagok DSCP értéke módosulhat, ha az előírt profil nem illeszthető. Ilyenkor a módosítást a lejelölés (mark down) funkció végzi el.

Az L4-L7 rétegek esetén is van lehetőség a QoS szabályozására [55]. Ebben az esetben megfelelő mechanizmusok segítségével figyelni lehet statikusan és

dinamikusan a TCP és az UDP portok használatának statisztikáját; az UDP, illetve a TCP-től eltérő protokollok alkalmazásának arányát; lehetséges továbbá alport szerinti osztályozás, amely a csomag mélyebb szintű elemzésére épít. A HTTP forgalmak osztályozását URL, gép, illetve MIME alapján végzik. A valós idejű multimédiás hálózati alkalmazások által használt RTP (Real Time Protocol) kontroll modulja páratlan szám azonosítójú portot, az adat modulja pedig páros szám azonosítójú portot alkalmaz [67]. Az RTP időzítés szabályozást, adatvesztés érzékelést, adatvédelem és tartalomazonosítást biztosít. A hasznos teher osztályozása során a hang, a videó, a sűrített vagy sűrítetlen videó, a codec beazonosítására nyílik lehetőség. A felhasználói egyéb alkalmazások statikus port-hozzárendelés alapján azonosíthatók be. A peer-to-peer fájlmegosztó protokollok (Gnutella, FastTrack, stb.) erőteljes erőforrás igénye miatt egyrészt a statikus port értéke, másrészt a generált forgalom dinamikája alapján történhet a szabályozás.

3. Alkalmazott módszerek és eszközök

3.1. Forgalom idősorok önhasonlóság és stacionaritás tulajdonságának elemzési módszerei

Az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ diszkrét idejű sztochasztikus folyamat olyan hálózati forgalom mennyiséget képvisel, amit a t időpillanatban csomagszámban, bájtban vagy bitben mérünk. A továbbiakban X_t jelenti a $[0, t]$ időtartamban mért összforalmat.

Legyen $X_t, t \in \mathbb{Z}$ diszkrét idejű sztochasztikus folyamat. Az $Y(t), t \in \mathbb{R}$ folytonos idejű, stacionárius növekményű folyamatot az X_t *kumulatív (vagy háttér) folyamatának*, míg X_t -t az $Y(t)$ *növekmény folyamatának* nevezzük, ha érvényesül az alábbi összefüggés [62]:

$$X_t = Y(t) - Y(t - 1), \quad \forall t \in \mathbb{Z} \quad (3.01)$$

Hálózati forgalom modellezés esetén X_t stacionárius abban az értelemben, hogy a viselkedése vagy struktúrája invariáns az időeltolásra vonatkozóan. Más megközelítésben állítható, hogy a t időtartamnak abszolút keret-referencia tulajdonsága van.

Az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ diszkrét idejű sztochasztikus folyamat *erősen stacionárius*, ha az $(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n})$ és az $(X_{t_1+k}, X_{t_2+k}, \dots, X_{t_n+k})$ n -esek $\forall n \in \mathbb{Z}_+, t_1, \dots, t_n, k \in \mathbb{Z}$ esetén azonos együttes eloszlásúak, ezért:

$$E[X_{t_1} X_{t_2} \dots X_{t_n}] = E[X_{t_1+k} X_{t_2+k} \dots X_{t_n+k}] \quad (3.02)$$

Jelölje X^k az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ folyamat k -eltolású ($k \in \mathbb{Z}$) folyamatát. Az X^k és X_t a véges dimenziós eloszlás értelemben ekvivalensek, amit az alábbi módon jelölünk:

$$X =_d X^k \quad (3.03)$$

Az erős stacionaritás feltételezése túl szigorú megszorítás, ezért bevezetésre került a másodrendű – gyenge – stacionaritás fogalma. Tételezzük fel, hogy az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ diszkrét idejű stacionárius sztochasztikus folyamat első két momentuma létezik és véges, ahol a várható értéket $\mu = E[X_t]$, valamint a szórásnégyzet $\sigma^2 = E[(X_t - \mu)^2]$ jelöli $\forall t \in \mathbb{Z}$ esetén. Ebben az esetben az X_t folyamat autókovariancia függvénye, $\gamma(r, s) = E[(X_t - \mu)(X_t - \mu)]$, *invariáns az eltolásra*, ha:

$$\gamma_X(r, s) = \gamma_X(r + k, s + k), \quad \forall r, s, k \in \mathbb{Z} \text{ esetén.} \quad (3.04)$$

3. Alkalmazott módszerek és eszközök

Továbbá a (3.04) összefüggésben $k = -s$ egyszerű helyettesítés segítségével kapjuk, hogy $\gamma_X(r, s) = \gamma_X(|r - s|, 0) = \gamma_X(|r - s|)$, $\forall r, s \in \mathbb{Z}$ esetén. Ez alapján állíthajuk, hogy ha az autokovariancia függvény invariáns az eltolásra, akkor egyváltozós alakra egyszerűsödik.

Legyen σ az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ diszkrét idejű sztochasztikus folyamat szórása. Az $r_X(k)$ -t az X_t , stacionárius idősor *autókorrelációs függvényének* nevezzük, ahol:

$$r_X(k) = \frac{1}{\sigma^2} \gamma(k), \quad \forall k \in \mathbb{Z} \text{ esetén.} \quad (3.05)$$

Az autókorrelációs függvény használata egyszerűsíti az összefüggéseket, ezért a továbbiakban azt alkalmazzuk.

Definíció 3.1. A valós értékű $Y(t), t \in \mathbb{R}$ háttér folyamat H , Hurst paraméterű ($0 < H < 1$) önhasználó (H -ss, H -self similar), ha:

$$Y(at) =_d a^H Y(t), \quad \forall a > 0, t \geq 0 \text{ esetén.} \quad (3.06)$$

Ez azt jelenti, hogy $Y(t), t \in \mathbb{R}$, és $Y(at), t \in \mathbb{R}$, folyamatok a véges dimenziós eloszlás értelemben azonosak. A hálózati forgalom modellezésénél $Y(t)$ a $[0, t]$ időtartamban forgalmazott adatmennyiséget jelenti. Az $a > 0$ az idő nyújtását jelenti és a^{-H} tömörítési faktor alkalmazásával az $Y(at)$ és az $Y(t)$ nagyságrendje összemérhetővé válik. Az $a < 1$ az idő zsugorítását jelenti, miközben $Y(at)$ és $Y(t)$ nagyságrendje ugyanúgy összemérhető. Az önhasználó folyamatoknál az a változó módosulása ellenére a H exponens változatlan marad.

Lemma 3.1. Legyen $Y(t), t \in \mathbb{R}$ H -sssi véges szórású idősor. A várható értékekre és $Y(t)$ autókorrelációs függvényére érvényesek az alábbi összefüggések $\forall t \in \mathbb{R}$ és $\forall k \in \mathbb{Z}$ esetén [8]:

$$\begin{aligned} \text{a.) } E[Y(t)] &= 0, \\ \text{b.) } E[Y^2(t)] &= \sigma^2 |t|^{2H}, \end{aligned} \quad (3.07)$$

$$\text{c.) } r_Y(t, t+k) = \frac{1}{2} (|t|^{2H} - |k|^{2H} + |t+k|^{2H}). \quad (3.08)$$

Bizonyítás: Mivel $Y(t), t \in \mathbb{R}$ H -sssi folyamat, ezért $Y(t) - Y(t-1) = X_t, \forall t \in \mathbb{Z}$ szerint az X_t folyamat stacionárius. A (3.09) alapján, $t = 1$ és $a = t$ egyszerű behelyettesítésekkel kapjuk, hogy:

$$Y(t) =_d t^H Y(1). \quad (3.09)$$

Ebből könnyen belátható, hogy $E[Y(t)] = 0$, és $E[Y^2(t)] = \sigma^2 |t|^{2H}$. A harmadik összefüggéshez felhasználjuk a binom négyzetének alapképletét és ezt alkalmazzuk a várható érték számításánál:

$$\begin{aligned}
 r_Y(t, t+k) &= \frac{1}{\sigma^2} E[Y(t)Y(t+k)] \\
 &= \frac{1}{2\sigma^2} E[Y^2(t) - (Y(t+k) - Y(t))^2 + Y^2(t+k)] \\
 &= \frac{1}{2\sigma^2} \{E[Y^2(t)] - E[(Y(t+k) - Y(t))^2] + E[Y^2(t+k)]\}
 \end{aligned}$$

Az $Y(t)$ háttér folyamat egész értékű eltolása esetén érvényesül az alábbi kapcsolat:

$$E[(Y(t+k) - Y(t))^2] = E[Y^2(k)],$$

amihez felhasználva a (3.07) összefüggést, kapjuk:

$$\begin{aligned}
 r_Y(t, t+k) &= \frac{1}{2\sigma^2} \{E[Y^2(t)] - E[Y^2(k)] + E[Y^2(t+k)]\} \\
 &= \frac{1}{2} (|t|^{2H} - |k|^{2H} + |t+k|^{2H}). \quad \blacksquare
 \end{aligned}$$

Lemma 3.2. Az X_t , $t \in \mathbb{Z}$ idősor önhasznló, H -Hurst paraméterű ($0 < H < 1$) folyamat (H -ss: self similar), ha $\forall k \geq 1, k \in \mathbb{Z}$ esetén az autókorrelációs függvény alakja az alábbi:

$$r_X(k) = \frac{1}{2} [(k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}]. \quad (3.10)$$

Bizonyítás: Felhasználjuk a autókorrelációs függvény definícióját, valamint az X_t és $Y(t)$ folyamatok közötti alap összefüggést.

$$\begin{aligned}
 r_X(k) &= \frac{1}{\sigma^2} E[X_t X_{t+k}] \\
 &= \frac{1}{\sigma^2} E[(Y(t) - Y(t-1))(Y(t+k) - Y(t+k-1))] \\
 &= \frac{1}{\sigma^2} E[Y(t)Y(t+k)] - \frac{1}{\sigma^2} E[Y(t)Y(t+k-1)] \\
 &\quad - \frac{1}{\sigma^2} E[Y(t-1)Y(t+k)] + \frac{1}{\sigma^2} E[Y(t-1)Y(t+k-1)] \\
 &= r_Y(t, t+k) - r_Y(t, t+k-1) \\
 &\quad - r_Y(t-1, t+k) + r_Y(t-1, t+k-1)
 \end{aligned}$$

Az utóbbi, négy tagból álló összeg minden tagjára alkalmazzuk a (3.08) összefüggést a megfelelő helyettesítésekkel, és kapjuk:

$$\begin{aligned}
 r_X(k) &= \frac{1}{2}(|t|^{2H} - |k|^{2H} + |t+k|^{2H}) \\
 &\quad - \frac{1}{2}(|t|^{2H} - |k-1|^{2H} + |t+k-1|^{2H}) \\
 &\quad - \frac{1}{2}(|t-1|^{2H} - |k+1|^{2H} + |t+k|^{2H}) \\
 &\quad + \frac{1}{2}(|t-1|^{2H} - |k|^{2H} + |t+k-1|^{2H}) \\
 &= \frac{1}{2}(|k+1|^{2H} - 2|k|^{2H} + |k-1|^{2H})
 \end{aligned}$$

Mivel $k \geq 1$, ezért az abszolút érték operátorok értelemszerűen módosulnak, és kapjuk a (3.10) összefüggést. ■

A skálafüggetlenség leírásához be kellett vezetni az X folyamat m -ed fokú aggregált folyamatát. Az X_t m hosszúságú, egymást nem átfedő blokkjaiból létrehozott $X^{(m)}$ folyamatot *m -ed rangú aggregálnak* nevezzük, ha:

$$X_i^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{t=m(i-1)+1}^{mi} X_t, \quad \forall i \in \mathbb{Z} \text{ esetén.} \quad (3.11)$$

Ha $r_X^{(m)}(k)$ jelöli az $X^{(m)}$ autókorrelációs függvényét, akkor az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ aszimptotikusan önhasznó, H -Hurst paraméterű ($0 < H < 1$) folyamat, ha $\forall k \geq 1$ esetén az autókorrelációs függvény határértéke az alábbi:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} r_X^{(m)}(k) = \frac{1}{2}[(k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}] = r_X(k). \quad (3.12)$$

A (3.10) és (3.11) alapján belátható, hogy $\forall m \geq 1$ esetén, $r_X(k) = r_X^{(m)}(k)$. Ebből következik, hogy a másodrendű önhasznóság magába foglalja az idő aggregálása során jelentkező korrelált, illetve aszimptotikusan korrelált struktúra létezését.

Az $Y(t), t \in \mathbb{R}$ folyamat H -sssi (H -ss with stationar increment) tulajdonságú, akkor H -paraméterű önhasznó és stacionárius növekményű. Ha $Y(t)$ H -sssi véges szórású, akkor $0 < H < 1$ [62].

Az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ H -sss (H -Self similar and stationar) idősort $0 < H \leq 1/2$ esetén a rövid memóriájú (SRD-Short Range Dependent) folyamatnak, $1/2 < H < 1$ esetén pedig hosszú memóriájú (LRD- Long Range Dependent) folyamatnak nevezzük.

Az $Y(t), t \in \mathbb{R}$ folyamatos idősor disztribúciós önhasznósága és az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ diszkrét idősor másodrendű önhasznóság közötti kapcsolatot az $X^{(m)}$ aggregált idősor teremti meg.

3. Alkalmazott módszerek és eszközök

Az $X^{(m)}$, aggregált növekmény sor tekinthető egy átlagnak is, és a (3.09) alapján $t = m$ helyettesítéssel, valamint $Y(0) = 0$ figyelembe vételével kapjuk:

$$\begin{aligned} X^{(m)} &= \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m X(t) = m^{-1} (Y(m) - Y(0)) \\ &= {}_d m^{-1} m^H (Y(1) - Y(0)) = m^{H-1} X \end{aligned}$$

Ez alapján állítható, hogy az X_t folyamat m -ed rangú aggregáltja és az X_t között fennáll az alábbi összefüggés [76]:

$$X = {}_d m^{1-H} X^{(m)} \quad (3.13)$$

A (3.13) összefüggés H paraméter segítségével az X_t és az $X^{(m)}$ közötti skála függőséget mutatja a véges dimenziós eloszlások értelmében. Így a (3.10) és (3.12) összefüggések azt mutatják, hogy X_t és $m^{1-H} X^{(m)}$ folyamatoknak azonos vagy aszimptotikusan azonos másodrendű struktúrája kell, hogy legyen.

Az X_t , $t \in \mathbb{Z}$ pontosan másodrendű önhasonló, H - Hurst paraméterű folyamat, ha:

$$m^{1-H} X^{(m)} = {}_d X, \quad \forall m \in \mathbb{Z}_+ \text{ esetén.} \quad (3.14)$$

Az X_t , $t \in \mathbb{Z}$ aszimptotikusan másodrendű önhasonló, H - Hurst paraméterű folyamat, ha:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} m^{1-H} X^{(m)} = {}_d X. \quad (3.15)$$

Meg kell jegyezni, hogy Gauss esetben ez a definíció egybeesik a másodrendű önhasonlósággal. A H paraméter jelentőségét az fontos tulajdonság emeli ki. Mivel tetszőleges Z , véletlen változó $\bar{Z}$ átlagára igaz, hogy $\text{var}(\bar{Z}) = \sigma_Z^2/m$, ahol m a mintavételek száma, ezért a (3.14) összefüggésből következik:

$$\text{var}(X^{(m)}) = \sigma_X^2 m^{2(1-H)}, \quad \forall m \in \mathbb{Z}_+ \text{ esetén.}$$

Ha a mintavételek függetlenek, a $H = 1/2$ esetben az m -ed rangú aggregált folyamat szórásnégyzete leegyszerűsödik, és az alábbi alakot kapjuk:

$$\text{var}(X^{(m)}) = \sigma_X^2 m^{-1}, \quad \forall m \in \mathbb{Z}_+ \text{ esetén.}$$

Ezek alapján állítható, hogy az X_t , $t \in \mathbb{Z}$ másodrendű önhasonló, H - Hurst paraméterű folyamat szórásnégyzetére és az X_t m -ed rangú aggregált folyamat szórásnégyzetére $\forall m \in \mathbb{Z}_+$ esetén fennállnak az alábbi összefüggések:

$$\text{var}(X^{(m)}) = \begin{cases} \text{var}(X) m^{-2(1-H)}, & \text{ha } 1/2 < H < 1 \\ \text{var}(X) m^{-1}, & \text{ha } H = 1/2 \end{cases} \quad (3.16)$$

3. Alkalmazott módszerek és eszközök

Ha a Hurst exponens lehetséges értékeit alkalmazzuk az $f: (0,1) \rightarrow \mathbb{R}, f(x) = m^{-x}, m > 1, m \in \mathbb{Z}$ monoton csökkenő segédfüggvényre, akkor az X_t alapfolyamat és az $X^{(m)}$, aggregáltja szórása között teljesülnek az alábbiak:

$$\text{var}(X^{(m)}) > m^{-1} \text{var}(X_t), \text{ ha } X_t \text{ LRD folyamat} \quad (3.17)$$

$$\text{var}(X^{(m)}) \leq m^{-1} \text{var}(X_t), \text{ ha } X_t \text{ SRD folyamat} \quad (3.18)$$

A fenti összefüggésekből is megfigyelhető, hogy LDR típusú folyamatnál a $\text{var}(X^{(m)})$ függvény az m aggregációs szint reciprokanál lassabban konvergál a nullához, ha $m \rightarrow \infty$. SRD esetén ennek fordítottja igaz.

Lemma 3.3. Legyen $X_t, t \in \mathbb{Z}$ másodrendű önhasonló, H - Hurst paraméterű $0 < H < 1, H \neq 1/2$ folyamat. Az $r_X(k), k \geq 1$ autókorrelációs függvény becsülhető az alábbi módon:

$$r_X(k) \sim H(2H - 1)k^{2H-2}, \quad \text{ha } k \rightarrow \infty. \quad (3.19)$$

Bizonyítás: Felhasználva az autókorrelációs függvény (3.10) alakját, $0 < H < 1$ esetén egyszerű átrendezéssel teljesül az alábbi összefüggés:

$$r_X(k) = \frac{1}{2} \frac{[(k+1)^{2H} - k^{2H}]}{k^{2H-2}} k^{2H-2} - \frac{1}{2} \frac{[k^{2H} - (k-1)^{2H}]}{k^{2H-2}} k^{2H-2}$$

Alkalmazzuk kétszer a Lagrange-féle középértéktételt az $f: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+, f(x) = x^{2H}$ folytonos, növekvő segédfüggvényre a $[k, k+1]$ illetve $[k-1, k]$ intervallumokon és kapjuk:

$$\begin{aligned} r_X(k) &= \frac{1}{2} \frac{2H c_k^{2H-1}}{k^{2H-2}} k^{2H-2} - \frac{1}{2} \frac{2H c_{k-1}^{2H-1}}{k^{2H-2}} k^{2H-2} \\ &= \frac{H(c_k^{2H-1} - c_{k-1}^{2H-1})}{k^{2H-2}} k^{2H-2}, \end{aligned}$$

ahol $c_{k-1} \in (k-1, k)$ és $c_k \in (k, k+1)$. Ugyanezt a tételt alkalmazva egy másik, $g: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}_+, g(x) = x^{2H-1}, H \neq \frac{1}{2}, 0 < H < 1$ folytonos segédfüggvényre a $[c_{k-1}, c_k]$ intervallumon, kapjuk:

$$\begin{aligned} r_X(k) &= \frac{H(2H-1)d_k^{2H-2}}{k^{2H-2}} k^{2H-2} \\ &= H(2H-1) \binom{d_k}{k}^{2H-2} k^{2H-2}, \end{aligned}$$

ahol $d_k \in (c_{k-1}, c_k)$. Mivel a $[c_{k-1}, c_k] \subset (k-1, k+1)$, ezért $k-1 < d_k < k+1$ és így:

$$\left(\frac{d_k}{k}\right)^{2H-2} \rightarrow 1, \quad \text{ha } k \rightarrow \infty. \quad \blacksquare$$

A (3.19) összefüggés alapján könnyen belátható, hogy $r_X(k)$ egyszerűbb alakra hozható:

$$r_X(k) \sim ck^{-2(1-H)}, \quad \text{ha } k \rightarrow \infty,$$

ahol $c > 0$ konstans. Mivel LRD esetén $1/2 < H < 1$, ezért $-2(1-H) \in (-1, 0)$. Ilyen feltételek mellett $\forall k \in \mathbb{Z}_+$ $k > 1$ esetén $k^{-2(1-H)} > k^{-1}$, ezért:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} r_X(k) > \sum_{k=-\infty}^{\infty} ck^{-1} \rightarrow \infty,$$

vagyis, mivel az autókorrelációs függvény csak lassan (hiperbolikusan) cseng le, ezért nem összegezzhető. SRD esetén $0 < H < 1/2$, ezért $-2(1-H) \in (-2, -1)$.

Ilyen feltételek mellett $\forall k \in \mathbb{Z}_+$ esetén $k^{-2(1-H)} < k^{-1}$, és $\frac{k^{-2(1-H)}}{k^{-1}} \rightarrow 0$, így:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} r_X(k) = r < \infty,$$

vagyis az autókorrelációs függvény összege véges és a függvény konvergens. $\blacksquare$

E tulajdonságok képezték az X_t folyamat memóriafüggőség alapján történő jellemzésének alapját is.

A (3.19) összefüggés lehetővé teszi, hogy a Hurst paraméter speciális értékeit is megvizsgáljuk. Ha $H = \frac{1}{2}$, akkor $r_X(k) = 0$, és X_t triviálisan SRD, annak folytán, hogy teljesen korrelálatlan. Olyan SRD folyamat, amelynél $\sum_{k=-\infty}^{\infty} r_X(k) = 0$ ritkán fordul elő a gyakorlati alkalmazásokban. A $H = 1$ eset érdektelen, mivel $\forall k \geq 1$ esetén az $r_X(k) = 1$ degenerált helyzet áll elő. A $H \geq 1$ esetnek tilos előfordulnia, ha az X_t növekmény folyamat stacionárius.

Megfigyelhető, hogy ha az X_t , $t \in \mathbb{Z}$ másodrendű önhasonló, H -Hurst paraméterű folyamat LRD tulajdonságú, akkor a $S(\nu) = (2\pi)^{-1} \sum_{k=-\infty}^{\infty} r(k)e^{ik\nu}$ összefüggés által definiált spektrális sűrűségfüggvény teljesíti az alábbi követelményt:

$$S(\omega) \sim c|\omega|^{1-2H} = c|\omega|^{1-2H}, \quad \text{ha } \omega \rightarrow 0, \quad (3.20)$$

ahol $c > 0$ konstans és $-1 < 1-2H < 0$. Ez azt jelenti, hogy $S(\omega)$ az origó körül divergál, vagyis a folyamat alacsony frekvenciájú komponensei erőteljesebben fejtik ki hatásukat, mint a többi komponens.

3.2. Forgalom idősorok elemzése bispektrum és a magasabb rendű momentumokkal

Definíció 3.2. Az X_t , $t \in \mathbb{Z}$ diszkrét idejű sztochasztikus folyamat harmadrendű stacionárius, ha az $(X_{t_1}, X_{t_2}, X_{t_3})$, és az $(X_{t_1+k}, X_{t_2+k}, X_{t_3+k})$, n -esek $\forall t_1, t_2, t_3, k \in \mathbb{Z}$ esetén azonos együttes momentummal rendelkeznek, azaz [79]:

$$\begin{aligned} E[(X_{t_1} - \mu)(X_{t_2} - \mu)(X_{t_3} - \mu)] \\ = E[(X_{t_1+k} - \mu)(X_{t_2+k} - \mu)(X_{t_3+k} - \mu)], \end{aligned} \quad (3.21)$$

ahol $\mu = E[X_t]$.

Definíció 3.3. Az X változó $Cum_m(X)$ m -ed rendű kumulánsának nevezzük a $g_X(u)$, kumuláns függvény m -edik együtthatóját, ahol [79]:

$$g_Y(u) = \ln(E[e^{itX}]) = \sum_{m=1}^{\infty} Cum_m(X_u) \frac{(iu)^m}{m!}$$

A kumulánsokat a $g_X(u)$ függvény deriváltjai adják az origóban [40], [30]:

$$\left. \begin{aligned} Cum_1(X) &= \mu_Y = g'(0)i^{-1}, \\ Cum_2(X) &= \sigma_Y^2 = g''(0)i^{-2}, \\ Cum_m(X) &= g_Y^{(m)}(0)i^{-m}. \end{aligned} \right\} \text{ ahol } i^2 = -1. \quad (3.22)$$

A fenti összefüggések alapján látható, hogy adott eloszlás kumulánsa szoros kapcsolatban áll az eloszlás momentumával. A kumuláns definiálható a karakterisztikus függvény segítségével is az alábbi módon:

Definíció 3.4. Az X_t , $t \in \mathbb{Z}$ folyamat m -ed rendű kumulánsa, $Cum(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_m})$, $t_1, \dots, t_m \in \mathbb{Z}$ nem más, mint az $(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_m})$ karakterisztikus függvénye logaritmusának Taylor sorba fejtése alapján az origóban a $\prod_{j=1}^m t_j$ által meghatározott együttható [79].

Általános esetben, az X_t , $t \in \mathbb{Z}$ sztochasztikus folyamatnál csak az első három kumuláns egyezik meg a neki megfelelő centrális momentumokkal [79]. Ennek bizonyításához két esetet vizsgálunk meg. Ha $\mu_Y = 0$, akkor a (3.22) összefüggésből az első két kumulánsra az azonosság evidens. A harmadrendű kumulánsra $\forall t_1, t_2, t_3 \in \mathbb{Z}$ esetén kapjuk:

$$\begin{aligned} Cum_3(X_t) &= Cum(X_{t_1}, X_{t_2}, X_{t_3}) \\ &= E[X_{t_1} X_{t_2} X_{t_3}] - E[X_{t_1}]E[X_{t_2} X_{t_3}] - E[X_{t_2}]E[X_{t_1} X_{t_3}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -E[X_{t_3}]E[X_{t_1}X_{t_2}] + 2E[X_{t_1}]E[X_{t_2}]E[X_{t_3}] \\
 & = E[\prod_{i=1}^3 (X_{t_i} - E[X_{t_i}])], \text{ azaz } M_3(X_t).
 \end{aligned}$$

A negyedrendű kumulánsra, viszont $\forall t_1, t_2, t_3, t_4 \in \mathbb{Z}$ esetén az alábbiakat kapjuk:

$$\begin{aligned}
 Cum_4(X_t) &= Cum(X_{t_1}, X_{t_2}, X_{t_3}, X_{t_4}) \\
 &= Cum(X_{t_1} - E[X_{t_1}], X_{t_2} - E[X_{t_2}], X_{t_3} - E[X_{t_3}], X_{t_4} - E[X_{t_4}]) \\
 &= E[\prod_{i=1}^4 (X_{t_i} - E[X_{t_i}])] - Cov(X_{t_1}, X_{t_2})Cov(X_{t_3}, X_{t_4}) \\
 &\quad - Cov(X_{t_1}, X_{t_3})Cov(X_{t_2}, X_{t_4}) - Cov(X_{t_1}, X_{t_4})Cov(X_{t_2}, X_{t_3}) \\
 &\neq E[\prod_{i=1}^4 (X_{t_i} - E[X_{t_i}])], \text{ azaz } M_4(X_t).
 \end{aligned}$$

Ha $\mu_Y \neq 0$, akkor $X_t := X_t - E[X_t]$ helyettesítést alkalmazunk, és az összefüggések ennek megfelelően módosulnak.

A továbbiakban bevezetjük az alábbi komplex jelöléseket: $z = e^{i2\pi f}$, $z_k = e^{i2\pi f_k}$, így $z_{(1:k-1)} = (z_1, z_2, \dots, z_{k-1})$ és $z_{(1:k-1)}^{-t(1:k-1)} = \prod_j z_j^{t_j} = e^{-i2\pi \sum t_j f_j}$, ahol f -frekvencia.

A fentiek alapján megadható a k -rendű stacionaritás definíciójának egy másik megfogalmazása is [79].

Definíció 3.5. Az $X_t, t \in \mathbb{Z}$, folyamat m -rendű stacionárius, ha mind az összes m -rendű kumuláns létezik és invariáns az időbeni csúsztatásra, azaz $\forall t \in T, l = 1, 2, \dots, m$ esetén igaz az alábbi összefüggés:

$$Cum(X_{t+t_1}, X_{t+t_2}, \dots, X_{t+t_l}) = Cum(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_l}). \quad (3.23)$$

Jelölje $Cum(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_m}), t_1, \dots, t_m \in \mathbb{Z}$ az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ folyamat m -ed rendű kumulánsát. Akkor igazak az alábbi alap összefüggések, amelyeknek bizonyítását lásd a [70] könyvben:

a.) A kumuláns az argumentumaira szimmetrikus, azaz:

$$Cum(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_m}) = Cum(X_{t_{i_1}}, X_{t_{i_2}}, \dots, X_{t_{i_m}}), \quad (3.24)$$

ahol $(i_1, i_2, \dots, i_m)$ az $(1, 2, \dots, m)$ tetszőleges permutációja.

b.) A kumuláns multilineáris, azaz $(a, b) = konst.$ esetén:

$$\begin{aligned}
 Cum(aX_{t'} + bX_{t''}, X_{t_2}, \dots, X_{t_m}) &= \\
 aCum(X_{t'}, X_{t_2}, \dots, X_{t_m}) &+ bCum(X_{t''}, X_{t_2}, \dots, X_{t_m}) \quad (3.25)
 \end{aligned}$$

c.) Ha $\{X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_l}\}$ két, egymástól független részhalmazra bontható, akkor:

$$\text{Cum}(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_l}) = 0.$$

d.) Ha $(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_m})$ és $(Z_{t_1}, Z_{t_2}, \dots, Z_{t_m})$ egymástól függetlenek, akkor:

$$\begin{aligned} \text{Cum}(X_{t_1} + Z_{t_1}, X_{t_2} + Z_{t_2}, \dots, X_{t_m} + Z_{t_m}) = \\ \text{Cum}(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_m}) + \text{Cum}(Z_{t_1}, Z_{t_2}, \dots, Z_{t_m}). \end{aligned} \quad (3.26)$$

e.) $\forall a = \text{konst.}, m \geq 2$ esetén:

$$\text{Cum}(a + X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_m}) = \text{Cum}(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_m}). \quad (3.27)$$

A fenti tulajdonságok alapján az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ folyamat akkor és csak akkor Gauss eloszlású, ha $\text{Cum}(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_m}) = 0, m \geq 2$.

Ha alkalmazzuk a (3.23) összefüggésben a $t = -t_1$ helyettesítést, akkor az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ k -rendű stacionárius folyamat esetén az m -ed rendű kumuláns csak $m - 1$ darab változótól függ, azaz [79]:

$$\text{Cum}(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_m}) = \text{Cum}(X_0, X_{t_2-t_1}, \dots, X_{t_m-t_1}). \quad (3.28)$$

Ezek alapján kijelenthető, hogy ha X_t rendelkezik harmadrendű momentumokkal, akkor nem csak az autókovariancia invariáns az időbeni eltolásra, azaz $\text{Cov}(X_{t_1}, X_{t_2}) = C_2(t)$, hanem a harmadrendű kumuláns is csak két változótól függ, azaz:

$$\text{Cum}(X_{t_1}, X_{t_2}, X_{t_3}) = C_3(t_2 - t_1, t_3 - t_1), \quad \forall t_1, t_2, t_3 \in \mathbb{Z}. \quad (3.29)$$

Definíció 3.6. Az $X_t, t \in \mathbb{Z}$, k -rendű stacionárius folyamat kumulánsainak Fourier transzformáltját S_k , k -ad rendű spektrumnak nevezzük, azaz [70]:

$$S_k(\omega_{(1:k-1)}) = \sum_{t_j=-\infty, j=1,2,\dots,k-1}^{\infty} \text{Cum}(X_0, X_{t_{(1:k-1)}}) z_{(1:k-1)}^{-t_{(1:k-1)}}, \quad (3.30)$$

ahol ω a szögsebesség és $\omega = 2\pi f$.

Az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ sztochasztikus folyamat másodrendű spektrumát egyszerűen spektrumnak, a harmadrendű spektrumot pedig bispektrumnak nevezzük [79]. Figyelembe véve a kumulánsok alap tulajdonságait, a bispektrum egyszerűbb alakjai az alábbiak [70]:

$$S_{3,Y} = \mathcal{F}(\text{Cum}(X_0, X_{t_1}, X_{t_2})) = \mathcal{F}(C_3(t_1, t_2)), \quad \forall t_1, t_2 \in \mathbb{Z}. \quad (3.31)$$

A gyakorlatban a bispektrum a jel energiájának fáziscsatoltóságát méri.

Lemma 3.4. Legyen $X_t, t \in \mathbb{Z}$ sztochasztikus folyamat. Akkor az S_2 , spektrum értéke valós és nem negatív, míg az S_3 , bispektrum komplex mennyiség és az alábbi szimmetria tulajdonságai vannak [73]:

$$\begin{aligned} S_{3,Y}(z_{(1:2)}) &= S_{3,Y}(z_2, z_1) = S_{3,Y}(z_1, z_3) = S_{3,Y}(z_3, z_1) \\ &= S_{3,Y}(z_3, z_2) = S_{3,Y}(z_2, z_3) = \overline{S_{3,Y}(z_{(1:2)}^{-1})}, \end{aligned} \quad (3.32)$$

ahol a felülvonás jel a komplex konjugáltat jelöli, és $z_3 = (z_1 z_2)^{-1}$.

Bizonyítás: Mivel a harmadrendű kumuláns és a harmadrendű momentum azonos, ezért:

$$\begin{aligned} \text{Cum}(X_{t_1}, X_{t_2}, X_{t_3}) &= \\ &= E[(X_{t_1} - E[X_t])(X_{t_2} - E[X_t])(X_{t_3} - E[X_t])] \\ &= E[(X_0 - E[X_t])(X_{t_2-t_1} - E[X_t])(X_{t_3-t_1} - E[X_t])] \\ &= C_3(t_2 - t_1, t_3 - t_1) = C_3(t_1, t_2) \end{aligned}$$

Mivel az X_t folyamat valós értékű, így szimmetria okok miatt érvényesülnek az alábbi egyenlőségek:

$$C_3(t_1, t_2) = C_3(t_2, t_1) = C_3(-t_1, t_2 - t_1) = C_3(t_1 - t_2, -t_2) \quad (3.33)$$

Mivel $S_{3,Y}(\omega_1, \omega_2) = \mathcal{F}(C_3(t_1, t_2))$, ezért $C_3(t_1, t_2) = \mathcal{F}^{-1}(S_{3,Y})$ és így:

$$C_3(t_1, t_2) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{it_1 \omega_1 + it_2 \omega_2} S_{3,Y}(\omega_1, \omega_2) d\omega_1 d\omega_2 \quad (3.34)$$

Ha $t_1 = t_2 = 0$, akkor:

$$C_3(0,0) = E[(X_t - E[X_t])^3] = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S_{3,Y}(\omega_1, \omega_2) d\omega_1 d\omega_2,$$

ami nem más, mint éppen a harmadrendű centrális momentumok szögsebesség felbontása (Fourier transzformáltja). Mivel $C_3(t_1, t_2)$ -re érvényesek a (3.33) összefüggések, felhasználva a (3.34) összefüggést, kapjuk:

$$\begin{aligned} S_{3,Y}(\omega_1, \omega_2) &= S_{3,Y}(\omega_2, \omega_1) = S_{3,Y}(\omega_1, -\omega_1 - \omega_2) \\ &= S_{3,Y}(-\omega_1 - \omega_2, \omega_2) = \overline{S_{3,Y}(-\omega_1, -\omega_2)} \end{aligned} \quad (3.35)$$

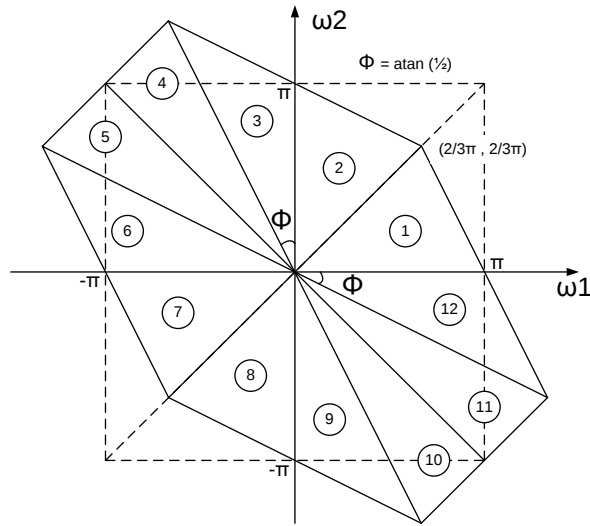
A z_1, z_2 különböző komplex egységgyökök, ezért $z_3 = (z_1 z_2)^{-1}$ definíciója alapján $z_3 = e^{i(-\omega_1 - \omega_2)}$, vagyis $\omega_3 = -\omega_1 - \omega_2$. ■

3. Alkalmazott módszerek és eszközök

A fenti összefüggések azt jelentik, hogy az (ω_1, ω_2) síkban tizenkét háromszög létezik, amelyek tekinthetők a bispektrum alap tartományainak, mivel egyetlen ilyen háromszög a teljes síkot jellemezni tudja [79]. Ennek belátása egyszerű, ha figyelembe vesszük, hogy:

$$S_{3,Y}(\omega_1, \omega_2) = S_{3,Y}(\omega_1 + k, \omega_2 + j), \quad \forall k, j = 1, 2, \dots \quad (3.36)$$

Ezek alapján az (ω_1, ω_2) komplex sík lefedhető a 3.1 ábrán látható háromszögekkel, azaz elegendő egyetlen háromszög területén vizsgálni a bispektrumot. Az 1-essel jelölt háromszöget referencia tartománynak (pricipal domain) tekintjük a továbbiakban.



3.1. ábra. A bispektrum frekvencia háromszögei

Definíció 3.7. Az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ harmadrendű stacionárius folyamat bikoherenciájának nevezzük a bispektrum és a spektrumból számolt $B(z_1, z_2)$ mennyiséget az alábbiak alapján:

$$B(z_1, z_2) = \frac{|S_{3,Y}(z_1, z_2)|^2}{S_{2,Y}(z_1)S_{2,Y}(z_2)S_{2,Y}(z_3)}. \quad (3.37)$$

Fontos észrevenni, hogy lineáris folyamat esetén a bikoherencia konstans értéket ad [73].

Lemma 3.5. Legyen $X_t, t \in \mathbb{Z}$ másodrendű önazonos, H -Hurst paraméterű folyamat és $X^{(n)}$ az n -ed rangú aggregáltja. Ekkor fennáll az alábbi összefüggés [71]:

$$Cum_m(X^{(n)}(t)) = n^{mH} Cum_m(X(t)). \quad (3.38)$$

3. Alkalmazott módszerek és eszközök

Bizonyítás: Az n -ed rendű aggregált, $X^{(n)}(t)$ és az $X(t)$ alapfolyamat között a 3.3 Lemma szerint fennáll az $X^{(n)}(t) =_d n^{H-1}X(t)$ összefüggés, ezért:

$$Cum_m \left(X^{(n)}(t) \right) = Cum_m \left(n^{H-1}X(t) \right) = n^{mH} Cum_m \left(X(t) \right) \quad \blacksquare$$

Definíció 3.8. Az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ másodrendű önhasznó, H -Hurst paraméterű folyamat multifraktál, ha $\forall m \in \mathbb{Z}_+$ aggregációs szintre igaz, hogy [71]:

$$\log \left(\left| Cum_m \left(X^{(n)}(t) \right) \right| \right) = mH(m) \log(n) + c(m), \quad (3.39)$$

vagyis a Hurst exponens továbbá nem konstans, hanem változik az m , aggregációs szint függvényében.

A bispektrum becslésének módszere

Ha az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ folyamat becsült bispektrumát $S_{3,X}^T(z_1, z_2)$ jelöli, ahol T az elemzett idősor hossza, akkor a simított biperiodogram segítségével kiszámolható az $S_{3,X}^T(z_1, z_2)$ [11]. Az X_t folyamat biperiodogramját az alábbi képlettel számoljuk:

$$I_{YY}^T(z_1, z_2) = \frac{1}{T} d_T(z_1) d_T(z_2) d_T(z_3), \quad (3.40)$$

ahol $z_3 = (z_1 z_2)^{-1}$ és $d_T(z) = \sum_{t=0}^{T-1} X_t z^{-t}$ az X_t folyamat diszkrét Fourier transzformáltja.

Legyen $W(\omega_1, \omega_2)$ egy folytonos nemnegatív súlyfüggvény, amelyre:

$$\iint_{-\infty}^{\infty} W(\omega_1, \omega_2) d\omega_1 d\omega_2 = 1. \quad (3.41)$$

A súlyfüggvényt úgy választjuk meg, hogy $W(\omega_1, \omega_2) = 0$, ha $|\omega_j| > \pi, j = 1, 2$ és teljesüljenek az alábbi szimmetria feltételek:

$$W(\omega_1, \omega_2) = W(\omega_2, \omega_1) = W(\omega_1, \omega_3),$$

ahol $\omega_3 = -\omega_1 - \omega_2 \bmod(2\pi)$, vagyis $\omega_3 \in [-\pi, \pi]$. Ezek alapján a simított biperiodogramot az alábbi összefüggés adja:

$$S_{3,X}^T(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{1}{T^2 b_T^2} \sum_{s_1, s_2=1}^{T-1} W_1(s_1, s_2) I_{eee}^T \left(\frac{s_1}{T}, \frac{s_2}{T} \right), \quad (3.42)$$

ahol b_T egy skála paraméter szekvencia úgy, hogy $b_T > 0, b_T \rightarrow 0, b_T^2 \rightarrow \infty$, ha $T \rightarrow \infty$ és $W_1(s_1, s_2) = W(b_T^{-1}(\lambda_1 - s_1/T), b_T^{-1}(\lambda_2 - s_2/T))$. Az $S_{3,X}^T(z_1, z_2)$, becsült

bispektrum magában hordoz egy $(2Tb_T + 1)^2$ súlytényezőt a (λ_1, λ_2) környezetében számolt biperiodogram értékére vonatkozóan [7.2.1-7].

A Hurst paraméter bispektrumon alapuló becslésének módszere

A Hurst paraméter becslésének ötletét Brillinger közölte a [11] cikkében, amit a négyzetes relatív hibák módszerére építve Terdik a [71], valamint Leonenko, Sikorskii és Terdik a [42] cikkekben dolgoztak ki részletességgel. A modell paramétere θ , míg a minimalizálni kívánt célfüggvény $Q_T(\theta)$ az alábbi formájú:

$$Q_T(\theta) = \frac{1}{|\Lambda|} \sum_{\omega \in \Lambda} \left(\frac{S_2(\omega; \theta) - S_2^T(\omega)}{S_2(\omega; \theta)} \right)^2 + \frac{1}{|\Delta|} \sum_{(\omega_1, \omega_2) \in \Delta} \frac{|S_3(\omega_1, \omega_2; \theta) - S_3^T(\omega_1, \omega_2)|^2}{S_2(\omega_1; \theta) S_2(\omega_2; \theta) S_2(\omega_1 + \omega_2; \theta)}, \quad (3.43)$$

ahol a T hosszúságú adatsor ν hosszúságú részhalmazokra van bontva. Λ jelöli a $(0, \pi)$ intervallumon belüli Fourier frekvenciák tartományát, $|\Lambda| = \pi$ a Fourier frekvenciák tartományának területét, míg Δ jelöli a Fourier frekvencia párok számára, a $\langle (0,0), (\pi,0), \left(\frac{2\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}\right) \rangle$ koordinátájú csúcspontokkal rendelkező háromszöget és $|\Delta|$ annak területét (ld. 3.1. ábra). Továbbá $S_2(\omega; \theta)$ az elméleti spektrum, $S_2^T(\omega)$ a becslt simított spektrum, $S_3(\omega_1, \omega_2; \theta)$ az elméleti bispektrum és $S_3^T(\omega_1, \omega_2)$ pedig a becslt simított bispektrum. A $Q_T(\theta)$ célfüggvény a $\theta = H$ esetén adja a minimális értéket, ami alapján iterációs megoldással megtalálható a becslt Hurst paraméter.

Az idősor linearitásának ellenőrzése bispektrum módszerrel

Legyen az alábbi lineáris szűrő:

$$X_t = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_m e_{t-m}, \quad (3.44)$$

ahol az X_t , együttesen az e_t folyamattal, harmadrendű stacionárius folyamat. Legyen a lineáris operátor transzfer függvénye az alábbi:

$$\alpha(z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_m z^{-m}, \quad (3.45)$$

Lineáris folyamat esetén az n -ed rendű ($n = 2, 3$) spektrális sűrűség függvényt az alábbi módon definiáljuk:

$$S_{n,X}(z_{(1:n-1)}) = \prod_{k=1}^n a(z_k^{-1}) S_{n,e}(z_{(1:n-1)}), \quad (3.46)$$

ahol $\prod_{k=1}^n z_k = 1$. Egyedi esetben, amikor az e_t független és azonos eloszlású (i.i.d.) folyamat, akkor az e_t összes spektruma konstans. Ebben az esetben nevezzük az X_t folyamatot lineárisnak. A simított biperiodogram alávethető ennek a tesztnek [77], [33], [73]. A (3.46) összefüggésben látható, hogy a lineáris folyamat bikoherenciája konstans. Nem Gauss eloszlású idősor esetén Subba Rao és Gabr [77], Hinich [33], valamint Terdik és Máth [73] linearitási tesztet alkottak, amely leellenőrzi az $\{e_t\}$ megújulási szekvencia függetlenségét azáltal, hogy az X_t bikoherenciájának állandóságát vizsgálják meg.

3.3. Forgalom idősorok elemzése wavelet módszerrel

A továbbiakban a másodrendű, hosszú memóriájú és/vagy önhasznó (együtt skálázó) folyamatok wavelet elemzési módszerét P. Abry, P. Flandrin, M. S. Taqqu és D. Veitch szerzőknek a [4] és [1], a témában meghatározó cikkei alapján ismertetjük.

Definíció 3.9. Folytonos wavelet transzformációnak (CWT-Continuous Wavelet Transform) nevezzük azt a felbontást, amely a

$$\{T_Y(a, t) = \langle X, \psi_{a,t} \rangle, a \in \mathbb{R}^+, t \in \mathbb{R}\} \quad (3.47)$$

együtthatókat a jelet elemző függvényhalmaz és az $Y(t), t \in \mathbb{R}$ jel belső szorzataként állítja elő. A ψ , függvény elemeket tartalmazó halmaz a ψ_0 , referencia minta (anya wavelet) függvényében képződik az alábbi módon:

$$\{\psi_{a,t}(u) \equiv \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_0\left(\frac{u-t}{a}\right), a \in \mathbb{R}^+, t \in \mathbb{R}\}. \quad (3.48)$$

Definíció 3.10. $\mathcal{T}_\tau$ időcsúsztatásnak, illetve $\mathcal{D}_a$ dilatációnak (skálázásnak) nevezzük a ψ_0 , anya wavelet-et transzformáló operátorokat, ahol:

$$\begin{aligned} (\mathcal{T}_\tau \psi_0) &\equiv \psi_0(t - \tau) \\ (\mathcal{D}_a \psi_0) &\equiv 1/\sqrt{a} \psi_0(t/a) \end{aligned} \quad (3.49)$$

Fontos megjegyeznünk, hogy a (3.48) összefüggésben szereplő bármely $\psi_{a,t}(u)$ függvényelem előállítható a ψ_0 anya wavelet $\mathcal{D}_a$ dilatációjával, majd $\mathcal{T}_t$ időcsúsztatása alapján.

A ψ_0 anya wavelet egy olyan függvény, amely úgy az idő-, mint a frekvenciatérben (skálátérben), szűk tartományban terül el, vagyis időben korlátos és a képviselt

energiája is korlátos frekvencia (skála) tartományban helyezkedik el, és ki kell elégítenie az alábbi feltételt:

$$\int \psi_0(u) du = 0, \quad (3.50)$$

vagyis sáváteresztő vagy oszcilláló függvénynek kell lennie. Innen származik a wavelet elnevezése is. A $\mathcal{T}_t$ időcsúsztatás, illetve a $\mathcal{D}_a$ dilatáció operátorok lehetővé teszik adott időpont, illetve frekvencia (skála) érték kiválasztását ahol az Y jelet vizsgálni akarjuk.

A 3.3-3.6 ábrák néhány klasszikus anya wavelet-et mutatnak. A wavelet neve utáni szám egyben a nullaértékű momentumok számát, N jelenti (ld. a (3.61)). Ha az alkalmazott wavelet esetén minél nagyobb az N értéke, annál inkább képes kiszűrni a nagyobb frekvenciás zajokat [1].

A $|T_Y(a, t)|^2$ mennyiséget "scalogram"-nak nevezzük és az elemzett, Y jelnek a t időpillanat körüli és az a , dilatációs (skála) paraméterrel ellenőrzött frekvenciákon képviselt energiaszintjét jelenti.

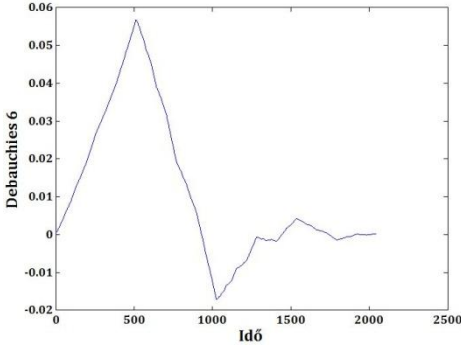
Definíció 3.11. A CWT inverz transzformációja az alábbi módon definiált:

$$Y(t) = C_\psi \iint T_Y(a, \tau) \psi_{a,\tau}(t) \frac{da d\tau}{a^2}, \quad (3.51)$$

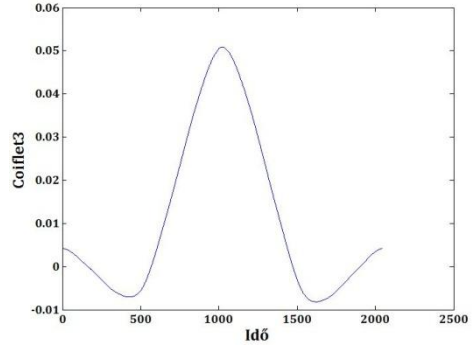
ahol C_ψ a ψ_0 , anya wavelet-től függő konstans.

Ez a visszaállítási formula az Y jelet adott időpontok és frekvenciák körül létező, atomokként működő wavelet-ek súlyozott integráljaként adja meg, ezáltal méri az Y jel információ mennyiségét az idő-frekvencia síkban.

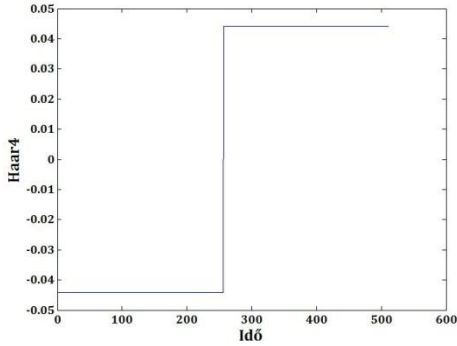
Mivel a CWT az időfüggő Y jelet az idő-frekvencia síkba képezi le, ezért ez egy redundáns transzformáció, vagyis az idő-frekvencia sík szomszédos pontjait meghatározó wavelet együtthatók az X jel bizonyos mennyiségű információján osztoznak. Az MRA (Multi Resolution Analysis) elmélet bizonyítja, hogy lehetséges az idő-frekvencia síknak olyan kritikus mintavételezése, amely a $\{T_Y(a, t), a \in \mathbb{R}^+, t \in \mathbb{R}\}$ halmaznak egy diszkrét részhalmazaként magába foglalja az Y jel teljes információját. Ennek a diszkrét részhalmaznak a kialakítási eljárását DWT (Discrete Wavelet Transform), *diszkrét wavelet transzformációnak* nevezzük.



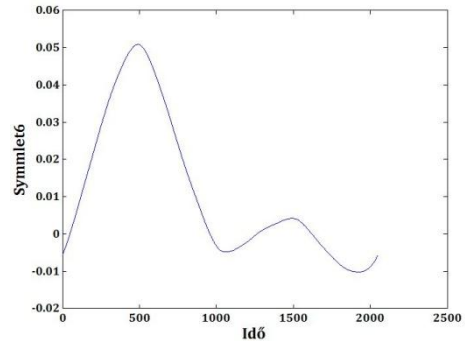
3.2. ábra. A Daubechies6 anya wavelet



3.3. ábra. A Coiflet3 anya wavelet



3.4. ábra. A Haar4 anya wavelet



3.5. ábra. A Symmlet6 anya wavelet

Definíció 3.12. Az egymásba ágyazott $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ alterek halmazát MRA, multi rezolúciós analízisnek nevezzük, ha kielégíti az alábbi feltételeket:

1. $\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V_j = \{0\}$, és $\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V_j$ sűrű az $L^2(\mathbb{R})$ halmazon.
2. $V_j \subset V_{j-1}$.
3. $Y(t) \in V_j \Leftrightarrow X(2^j t) \in V_0$.
4. Létezik skálafüggvénynek nevezett, $\phi_0(t)$ a V_0 -ban úgy, hogy a $\{\phi_0(t - k), k \in \mathbb{Z}\}$ halmaz a V_0 feltétel nélküli Riesz bázisa.

A definíció 4. feltétele azt jelenti, hogy az elcsúsztatott skálafüggvények halmaza, $\{\phi_0(t - k), k \in \mathbb{Z}\}$ lineárisan független, és úgy feszíti ki a V_0 teret, hogy az elemek nem szükségszerűen ortogonálisak és nem kell egységnyi hosszúságúaknak lenniük. A 3. és 4. feltétel együttesen azt implikálja, hogy a skálázott és elcsúsztatott függvények egy speciális halmaza a V_j térben Riesz bázist képez. Ez a halmaz teljesíti az alábbi tulajdonságot:

$$\{\phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \phi_0(2^j t - k), k \in \mathbb{Z}\}. \quad (3.52)$$

Az MRA egymás után vetíti a tanulmányozott Y jelet a V_j , approximációs alterekben a következő módon:

$$\text{approx}_j(t) = \left(\text{Proj}_{V_j} Y \right)(t) = \sum_k a_Y(j, k) \phi_{j,k}(t). \quad (3.53)$$

A 3.12. definíció 2. feltételéből az Y jel j -edik approximációja durvább megközelítés, mint a $(j - 1)$ -edik. Az 1. feltételből az következik, hogy $j \rightarrow \infty$ határesetben az Y jel minden információja ki van nyerve.

Az MRA alapötlete, hogy az Y jelet egyre durvább approximációval elemezzük azáltal, hogy egyre több magas frekvenciájú összetevőt, részletet hagyunk ki az adatból.

Definíció 3.13. Az egymás utáni approximációk közötti különbséget *részletnek* nevezzük:

$$\text{detail}_j(t) = \text{approx}_{j-1}(t) - \text{approx}_j(t). \quad (3.54)$$

Az MRA szerint a j -edik részlet kinyerhető közvetlenül az Y jelnek a $W_j = V_j \ominus V_{j-1}$ altereiben kiszámolt vetületeiből. Ezeket wavelet altereknek nevezzük. Ugyanakkor, létezik a ϕ_0 függvényből származtatott ψ_0 , anya wavelet függvény, amelynek sablonja a W_j számára Reisz bázist képez:

$$\{\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi_0(2^j t - k), k \in \mathbb{Z}\}, \quad (3.55)$$

vagyis:

$$\text{detail}_j(t) = \left(\text{Proj}_{W_j} Y \right)(t) = \sum_k d_Y(j, k) \psi_{j,k}(t). \quad (3.56)$$

A vetítési eljárás $j \rightarrow -\infty$ és $j \rightarrow \infty$ között lehetséges, de a gyakorlatban $j = 0, \dots, J$ és $V_j \subset V_{j-1} \subset \dots \subset V_0$. Ez azt jelenti, hogy az Y jel elemzését korlátozzuk az $\text{approx}_0(t)$, approximáció ortogonális vetületére a V_0 referencia térben, és a részletes skála approximációt a különböző felbontási szintek részlet gyűjteményével és a V_j altérhez tartozó alacsony felbontású approximáció segítségével írjuk le:

$$\begin{aligned} \text{approx}_0(t) &= \text{approx}_J(t) + \sum_{j=1}^J \text{detail}_j(t) \\ &= \sum_k a_Y(J, k) \phi_{J,k}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_k d_Y(j, k) \psi_{j,k}(t) \end{aligned} \quad (3.57)$$

3. Alkalmazott módszerek és eszközök

Definíció 3.14. Adott ϕ_0 , skála függvény és a ψ_0 , anya wavelet mellett a diszkrét wavelet transzformáció (DWT – Discrete Wavelet Transform) azon együtthatók összessége, amelyeket az Y , megfigyelt jelből kapunk:

$$X(t) \rightarrow \{a_Y(j, k), k \in \mathbb{Z}, \{d_Y(j, k), j = 1, \dots, J, k \in \mathbb{Z}\}\}, \quad (3.58)$$

ahol az elemeket az X jel és két függvény halmaz közötti belső szorzat alapján állítjuk elő:

$$\begin{aligned} a_Y(j, k) &= \langle Y, \dot{\phi}_{j,k} \rangle, \\ d_Y(j, k) &= \langle Y, \dot{\psi}_{j,k} \rangle. \end{aligned} \quad (3.59)$$

A $\dot{\phi}_{j,k}$ (illetve $\dot{\psi}_{j,k}$) függvények a $\dot{\phi}_0$ (illetve a $\dot{\psi}_0$) függvény időcsúsztatás és dilatációs operátorokkal nyert változatai, amit duál anya wavelet-nek (illetve duál skála függvénynek) nevezünk.

A $d_Y(j, k)$ együtthatók a $\{T_Y(a, t) = \langle Y, \psi_{a,t} \rangle, a \in \mathbb{R}^+, t \in \mathbb{R}\}$ halmaznak egy olyan mintavétele, amely un. diadikus rácpontokban (ld. 2.2. ábra.) helyezi el az együtthatókat, úgy hogy:

$$d_Y(j, k) = T_Y(2^j, 2^j t), \quad (3.60)$$

ahol a skála kettes alapú logaritmusát, $\log_2(a = 2^j) = j$, a j -edik oktávnak nevezzük.

A DWT alapvetően két fontos tulajdonságra épít:

F1: A wavelet bázis a dilatációs operátor segítségével készül, ami miatt az elemző függvény család önmaga is skála invariáns tulajdonságú.

F2: A ψ_0 , anya waveletnek az első N -ed $N \geq 1$ rangú momentuma nulla:

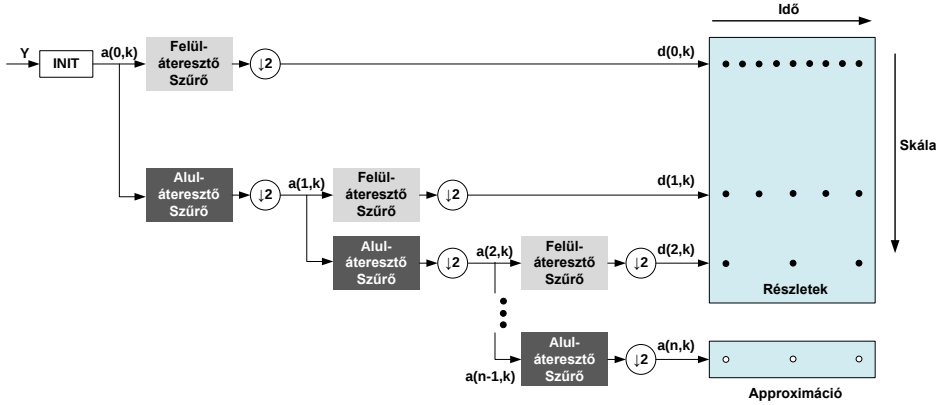
$$\int t^k \psi_0(t) dt \equiv 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1. \quad (3.61)$$

A ψ_0 , anya wavelet $\Psi_0(v)$, Fourier transzformáltja a nulla körül hatványfüggvény formájú, azaz: $|\Psi_0(v)| \approx |v|^N$, ha $|v| \rightarrow 0$.

Az MRA egymásba ágyazott struktúrája miatt a $d_Y(j, k)$ részletes, illetve $a_Y(j, k)$ approximációs együtthatók előállíthatók az $a_Y(j - 1, k)$ értékekből diszkrét idejű konvolúció útján, valamint egy aluláteresztő és egy felüláteresztő szűrő segítségével (ld. 3.3 ábra.). Ilyen alapon a DWT transzformáció elvégezhető szűrőkre épülő rekurzív piramis algoritmussal. Az INIT, modul az $a_Y(0, k) = \langle Y, \dot{\phi}_{0,k} \rangle$ belső szorzatot végzi el, amely nem más, mint az X jelnek a V_0 térben való vetítéséből nyert együtthatók kiszámolása. Minden esetben, miután az

3. Alkalmazott módszerek és eszközök

approximációs jelkomponens szűrőn halad át, bináris tizedelés (ld. ↓ 2, felezés a 3.6. ábrán) következik, azaz a mért mennyiség minden második eleme kimarad a további elemzésből.



3.6. ábra. A gyors, piramis alapú wavelet felbontási algoritmus

A DWT transzformáció algoritmusának komplexitása az n , adatsor hosszának lineáris függvénye ($O(n)$), ezért rugalmasan kiterjeszthető, ugyanakkor elég egyszerű ahhoz is, hogy a nagysebességű csomagkapcsolt hálózatok forgalmát valós időben elemezni tudja.

A H-ss és H-sssi folyamatok wavelet transzformáltja

A másodrendű sztochasztikus folyamatok elemzéséhez használt ϕ_0 , skálafüggvény, valamint ψ_0 , anya wavelet legkevesebb exponenciálisan gyorsan cseng le az időtartományban, ezért léteznek másodrendű statisztikai jellemzői a wavelet felbontásnak.

Az $Y(t)$, $t \in \mathbb{R}$, H paraméterű önhasonló folyamat $d_Y(j, k)$, wavelet együtthatói kimutatják az önhasonlóságot az alábbiak szerint:

P0_SS: DWT esetén az együtthatók belső szorzata $d_Y(j, k) = \langle Y, \psi_{j,k} \rangle$, így:

$$\begin{aligned} & \left(d_Y(j, 0), d_Y(j, 1), \dots, d_Y(j, N_j - 1) \right) \\ & \triangleq 2^{j(H+1/2)} \left(d_Y(0, 0), d_Y(0, 1), \dots, d_Y(0, N_j - 1) \right). \end{aligned} \quad (3.62)$$

CWT esetén $T_Y(a, t) = \langle Y, \psi_{a,t} \rangle$, így:

$$(T_Y(ca, ct), \dots, T_Y(ca, ct)) \triangleq c^{H+1/2} (T_Y(a, t), \dots, T_Y(a, t)), \forall c > 0. \quad (3.63)$$

Ezek az egyenletek azt igazolják, hogy az F1 tulajdonság alapján az együttthatók is önhasználóak. Ebből a másodrendű folyamatokra az alábbi következik:

$$E[d_Y(j, k)^2] = 2^{j(2H+1)} E[d_Y(0, k)^2]. \quad (3.64)$$

Ha az $Y(t)$, $t \in \mathbb{R}$ folyamat még stacionárius növekményű is, azaz $Y(t)$ H-sssi, akkor az F1 és F2 tulajdonságok alapján kapjuk:

P1_SS: A $\{d_Y(j, k), k \in \mathbb{Z}\}$, rögzített skála indexű wavelet együttthatók időszora egy stacionárius folyamat. Ez alapján a (3.318) összefüggés leegyszerűsödik:

$$E[d_Y(j, k)^2] = 2^{j(2H+1)} C(H, \psi_0) \sigma^2, \quad \forall k, \quad (3.65)$$

ahol $C(H, \psi_0) = \int |t|^{2H} (\int \psi_0(u) \psi_0(u-t) du) dt$, és $\sigma^2 = E[Y(1)^2]$.

P2_SS: A H-sssi folyamatok specifikus kovariancia struktúrájának ismeretében, ahol

$$E[Y(t)Y(s)] = \frac{\sigma^2}{2} (|t|^{2H} - |t-s|^{2H} + |s|^{2H}), \quad (3.66)$$

kimutatták, hogy a különböző pozíciókban lévő wavelet együttthatók közötti korreláció szélsőségesen kicsi, ha a ψ_0 , anya wavelet nullaértékű momentumainak számára teljesül a $N \geq H + 1/2$ összefüggés. A lecsengés limitálható, ha N nő:

$$E[d_Y(j, k) d_Y(j', k')] \approx |2^j k - 2^{j'} k'|^{2H-2N}, |2^j k - 2^{j'} k'| \rightarrow \infty. \quad (3.67)$$

Az LRD folyamatok wavelet transzformáltja

Az $Y(t)$, $t \in \mathbb{R}$, másodrendű stacionárius folyamat $d_Y(j, k)$, wavelet együttthatói az alábbi tulajdonságokkal rendelkeznek:

P0_LRD: Az együttthatók szórásnégyzete az alábbi alakot kapja:

$$E[d_Y(j, k)^2] = \int \Gamma_Y(v) 2^j |\Psi_0(2^j v)|^2 dv, \quad (3.68)$$

ahol $\Gamma_Y(v)$ az Y jel teljesítmény spektruma, míg $\Psi_0(v)$ a ψ_0 , anya wavelet Fourier transzformáltja.

P1_LRD: Használva a

$$\Gamma_Y(v) \sim c_f |v|^{-\alpha}, v \rightarrow 0 \quad (3.69)$$

megközelítést, kapjuk:

$$E[d_Y(j, k)^2] \sim 2^{j\alpha} c_f C(\alpha, \psi_0), j \rightarrow \infty, \quad (3.70)$$

ahol $C(\alpha, \psi_0) = \int |v|^{-\alpha} |\Psi_0(v)|^2 dv, \alpha \in (0, 1)$. Az $\alpha = 0$ a triviális skálázást jelenti, ami az alacsony skálaértéknél csak SRD-t enged meg.

P2_LRD: Bármely két wavelet együtttható kovariancia függvényét a ψ_0 , anya wavelet nullaértékű momentumainak száma (N) befolyásolja és gyorsabban lecseng, mint maga az LRD folyamat. Ugyanakkor, $N \geq \alpha/2$ esetén tovább már nem LRD. Mivel $\alpha \in [0, 1)$, ezért teljesül az alábbi összefüggés:

$$E[d_Y(j, k) d_Y(j', k')] \approx |2^j k - 2^{j'} k'|^{\alpha-1-2N}, |2^j k - 2^{j'} k'| \rightarrow \infty. \quad (3.71)$$

Az $Y(t)$ vagy H-sssi, vagy LRD, vagy $1/f$ típusú általánosított másodrendű stacionárius vagy fraktál folyamat esetén az F1, és F2 tulajdonságok együttesen az alábbi két újabb tulajdonságot implikálják, amelyek az α , skála kitevő becslésénél fontos szerepet töltenek be:

P1: Ha $N \geq (\alpha - 1)/2$, akkor a $\{d_Y(j, k), k \in \mathbb{Z}\}$ folyamat stacionárius, és a $d_Y(j, k)$ szórása tisztán megmutatja az Y jel skálázó viselkedését az oktávok bizonyos $j_1 \leq j \leq j_2$ tartományában:

$$E[d_Y(j, k)^2] = 2^{j\alpha} c_f C(\alpha, \psi_0). \quad (3.72)$$

i.) Ha $\alpha \geq 1$, akkor az Y folyamat H-sssi, és $\alpha = 2H + 1$, $C(\alpha, \psi_0)$ értékét a (3.65) egyenletből kell meghatározni, $j_1 = -\infty, j_2 = +\infty$.

ii.) Ha $\alpha \in (0, 1)$, akkor az Y folyamat LRD, és α értékét a (3.69) megközelítésből számoljuk: $\alpha = 2H - 1$, míg $C(\alpha, \psi_0)$ értékét a (3.70)

egyenlethől lehet meghatározni. $j_2 = +\infty$, és j_1 -t az adatokból kell megválasztani.

iii.) Ha az Y folyamat $1/f$ típusú általánosított másodrendű, akkor α értékét a $\Gamma_Y(v) = c_f |v|^{-\alpha}$, $v_1 \leq |v| \leq v_2$, $C(\alpha, \psi_0) = \int |v|^{-\alpha} |\Psi_0(v)|^2 dv$ képletekből, a (j_1, j_2) párost pedig a (v_1, v_2) párosból kell meghatározni.

iv.) Ha $\alpha \geq 2$, akkor az Y folyamat fraktál, és $\alpha = 2h + 1$, míg $C(\alpha, \psi_0)$ értékét Gonsales és Flandrin [27] írása alapján lehet meghatározni. $j_1 = 1$, a j_2 -t pedig az adatokból kell megválasztani. Ha X még pluszban Gauss folyamat is, akkor a Hausdorff dimenzió értéke, $D = \frac{5-\alpha}{2} = 2 - h$ lesz.

P2: Ha $N \geq \alpha/2$, akkor a $\{d_Y(j, k), k \in \mathbb{Z}\}$ folyamat stacionárius és SRD. Minél nagyobb N , a ψ_0 , anya wavelet nullaértékű momentumainak száma, a wavelet együttthatók korrelációja annál kisebb lesz, azaz:

$$E[d_Y(j, k)d_Y(j', k')] \approx |k - k'|^{\alpha-1-2N}, |k - k'| \rightarrow \infty. \quad (3.73)$$

A wavelet együttthatók P1 és P2 tulajdonságai nem feltételezik a Gauss eloszlást. A (3.73) összefüggés a P2_SS és a P2_LRD tulajdonságoknál ismertetett (3.66) és (3.71) összefüggések gyengítése a $j = j'$ feltétel esetén. Általánosságban (ha $j \neq j'$) a P2_SS és P2_LRD felhasználható a korrelálatlanság erősebb idealizálásához:

$$E[d_Y(j, k)d_Y(j', k')] = 0, \text{ ha } (j, k) \neq (j', k'). \quad (3.74)$$

A Hurst paraméter becslése wavelet módszerrel

A wavelet együttthatók felhasználhatók az LRD folyamat skála-, illetve frekvencia-függő tulajdonságának tanulmányozására.

Az időtartománnyal ellentétben, ahol az Y folyamat LRD tulajdonsága, stacionaritásának hiánya vagy fraktál jellege miatt viszonylag nehezen kezelhető statisztikai környezetünk van, a wavelet tartományban csak a j -oktávhoz tartozó $d_Y(j, \cdot)$, stacionárius és SRD tulajdonságú folyamattal van dolgunk. A ψ_0 , anya wavelet (3.50) szerinti alapfeltétele miatt a wavelet együttthatók mindegyikének átlaga nulla. A stacionaritás lehetővé teszi, hogy a $d_Y(j, \cdot)$ folyamatot időben átlagoljuk annak érdekében, hogy lecsökkentsük a szórását. Az SRD hatásaként ezeknek az átlagos statisztikáknak alacsony szórásuk van.

Definíció 3.15. Az Y másodrendű stacionárius folyamat $d_Y(j, k)$, wavelet együtthatóiból nyert μ_j véletlen változót a $d_Y(j, \cdot)$ folyamat *energia függvényének* nevezzük, amely egyben a szórásnégyzet becslése is:

$$Energia_j = \mu_j \triangleq \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} |d_Y(j, k)|^2, \quad (3.75)$$

ahol n_j , a j -oktáv rendelkezésre álló együtthatóinak száma ($n_j = \lfloor 2^{-j} n \rfloor$) és n az idősor elemeinek száma.

Az SRD tulajdonsága miatt μ_j , energia szórásnégyzete $1/n_j$ szerint csökken és aszimptotikusan hatékony. Ez alapján a μ_j , energia változó közel optimálisan magába koncentrálja a j -oktávnál az Y jel másodrendű, darabos viselkedését. A P2 tulajdonság alapján a μ_j , energia értékek csak enyhén függenek egymástól, így minden egyes skálán történő elemzés erőteljesen szeparálódik más skálákon végzett elemzéstől. Az Y folyamat másodrendű függőségének elemzése a μ_j energia, j -oktávtól való függőségének tanulmányozására redukálódik.

A P1 tulajdonság skálázás esetén, explicit módon megmutatja a $d_Y(j, \cdot)$ folyamatok j -oktávától való függőségét minden olyan skálán, amelyekre a μ_j -t becsültük. A P1 tulajdonság (3.72) összefüggése azt mutatja, hogy az α , skála exponens kinyerhető a $\log_2(\mu_j)$ görbének a j -oktáv függvényében ábrázolt iránytényezőjéből.

$$y_j = \log_2(\mu_j) = \log_2(Energia_j) \quad (3.76)$$

Definíció 3.16. Konfidencia intervallumon belül az y_j mennyiségnek a j -oktáv függvényében ábrázolt grafikonját *másodrendű logskála diagramnak* (LD – Logscale Diagram) nevezzük.

A P1 ii.) tulajdonság alapján ha az Y folyamat LRD, vagyis $\alpha \in (0, 1)$, akkor az α , skála exponens és a H , Hurst paraméter közötti $\alpha = 2H - 1$ összefüggés alapján, kapjuk:

$$\mu_j = \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} |d_{j,k}|^2 \approx 2^{j(2H-1)}, \text{ ahol } n_j = \lfloor 2^{-j} n \rfloor \quad (3.77)$$

$$y_j = \log_2(\mu_j) \approx (2H - 1)j + c \quad (3.78)$$

A Hurst paraméter becsléséhez a 2-LD lineáris szakaszát vagy szakaszait lehet felhasználni. Ha több lineáris szakasz különíthető el, akkor a folyamat multifraktál, egyébként monofraktál.

3. Alkalmazott módszerek és eszközök

A súlyozott legkisebb négyzetek módszerével (WLS) becsülhető az oktávok $[j_1, j_2]$ konfidencia intervallumán a görbe lineáris szakaszához tartozó Hurst paraméter az alábbi módon:

$$\hat{H}(j_1, j_2) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{j=j_1}^{j_2} S_j j y_j - \sum_{j=j_1}^{j_2} S_j j \sum_{j=j_1}^{j_2} S_j y_j}{\left(\sum_{j=j_1}^{j_2} S_j j^2 - \left(\sum_{j=j_1}^{j_2} S_j j \right)^2 \right)^{1/2}} + 1 \right], \quad (3.79)$$

ahol $S_j = \frac{n \ln 2}{2^{j+1}}$ súly. A T -periódusidvel mintavételezett adatsot $[j_1, j_2]$ oktáv intervallumából meghatározható a folyamat skálafüggetlen időtartománya, amely az alábbi leképezést jelenti:

$$[j_1, j_2] \rightarrow [2^{j_1} T, 2^{j_2} T]. \quad (3.80)$$

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

Az IP hálózatok tervezésénél, méretezésénél alapvető kérdés, hogy mekkora sávszélesség szükséges adott IP hálózatban az adott forgalomtípus esetén ahhoz, hogy a szükséges QoS követelmények biztosítottak legyenek. Továbbá, hogyan befolyásolja a csatorna kihasználtságát több különböző típusú forgalom multiplexálása? A multiplexálási nyereség mitől függ, és mekkora lehetséges ilyen esetben? Milyen forgalmi modellel lehetséges tervezni az adathálózatokat, ami csak kevés, de meghatározó forgalmi jellemzőt használ fel? Ezekre a kérdésekre adott válaszok nagyrészt a forgalom jellemzőitől és az alkalmazott infrastruktúrától függ. A forgalom-méretezési elveket két szabályozási mechanizmus befolyásolja [68]. Egyik a nyílt-, a másik a zárthurkú szabályozás.

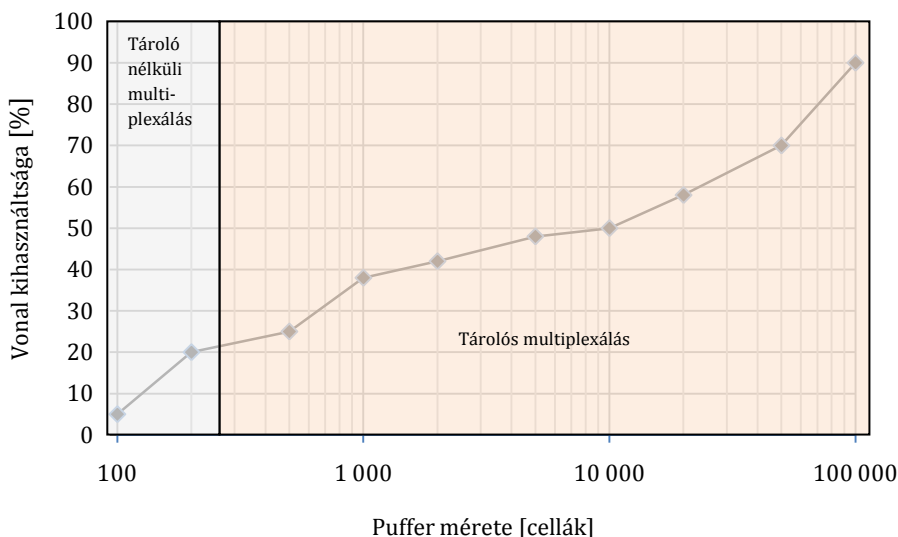
A nyíltthurkú szabályozást a valós idejű, interaktív beszéd és videó szolgáltatásoknál alkalmazzák. Ez egy torlódás megelőző forgalmi szabályozás, ami az ATM esetében már alkalmazott forgalmi szerződés elvén alapul. A felhasználó protokoll entitás által leírt forgalmi igényekre a szolgáltató hálózat elfogadhatja a kapcsolatot és biztosítja a szükséges QoS jellemzőket. Erőforrás hiány esetében a szolgáltató hálózat elutasítja a kapcsolat kérelmet. A felhasználó által előzetesen megadott forgalomjellemzők valódisága erőteljesen befolyásolja az eljárás hatékonyságát. A forgalmi jellemzők szabályozása megköveteli a forgalomformázási mechanizmusokat. E simító algoritmusok működésének alapját a zsetonos vödör képezi. A szolgáltató hálózat ellenőrzi a szerződésben deklarált forgalomjellemzők betartását. A szerződésben rögzített erőforrás fogyasztást túllépő csomagokat a szolgáltató eldobhatja, vagy alacsonyabb prioritásra helyezi.

Ha a forgalom méretezésénél multiplexálási nyereség optimalizálása nem cél, akkor legegyszerűbb megoldás az egyes kapcsolatok számára a maximális sávszélesség biztosítása. Annak ellenre, hogy ez pazarló, a forgalmak statisztikáinak nem ismerete miatt a gyakorlatban a hálózatok méretezésénél ezt a megoldást alkalmazzák. A forgalom véletlenszerű ingadozásaiból adódó statisztikus multiplexálás nyereségének előnyeit két módon lehet felhasználni: tároló nélküli-, illetve tárolós statisztikus multiplexálás alkalmazása [68], [69]. Az első esetben, a csomagforgalom folyadékmmodelljében a cellatorlódás kiküszöbölését végző rövid tárolók kivételével nincs szükség további tárolóra. Itt feltételezzük, hogy az aggregált forgalom a rendelkezésre álló átviteli kapacitást csak egy adott küszöbérték alatti valószínűséggel lépi túl. Így a vonal túlcordulásának valószínűsége nem függ a forgalom összefüggőségi struktúrájától, hanem csak a forgalmi intenzitás stacioner eloszlásától. Ezáltal a forgalom fraktál struktúrájának mivolta nem tervezési szempont, és a sávszélesség tervezése jóval egyszerűbb

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

feladat lesz. A módszer hiánya azonban, hogy ezzel csak alacsony vonal kihasználtság érhető el.

A második, tárolós statisztikus multiplexálásnál a vonal kihasználtsága jobb lesz, mint az előző módszernél (ld. 4.1. ábra) [69]. Itt feltételezzük, hogy a tároló túlszordulásának valószínűsége kisebb egy adott küszöbértéknél.

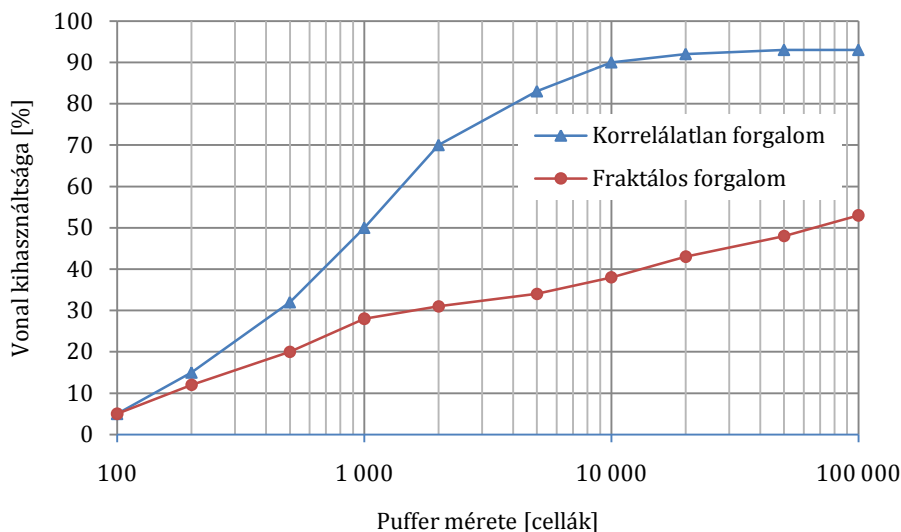


4.1. ábra. Statisztikus multiplexálási mechanizmusok

A nagyobb multiplexálási nyereség ára az, hogy a csomagvesztési és a továbbítás késleltetési paraméterek viszonylag sok forgalmi jellemzőtől, így a forgalom korrelációs struktúrájától is függenek. Fraktális forgalomnál a tervezési módszerek megadása nehéz, valamint a vonal elérhető kihasználtsága is alacsonyabb (ld. 4.2. ábra.) [69]. Mindemelllett a tárolók hosszának nagyobbnak kell lennie, és adott tároló méret túlszordulása valószínűségének becslése is jóval komplexebb feladattá válik. Erre magyarázatot az a tény ad, hogy a nem-fraktális forgalmaknál az idősor farok-eloszlásának aszimptotikus becslése lehetséges, de a fraktális forgalmaknál ez nem egyértelmű. A determinisztikus multiplexálás egy alternatív megoldást nyújt a tárolós statisztikus multiplexálás számára. Ez kisebb multiplexálási nyereséggel, de megfelelő forgalomformázás esetén az átvitel számára veszteségmentességet és garantált késleltetést biztosít.

A zárt hurkú szabályozás a forgalomméretezési elveket befolyásoló második mechanizmus, amelyet a forgalom intenzitásának szabályozhatósága esetén ajánlják [68], [69]. A TCP, szállítási réteg-protokoll és az ATM ABR (Available Bit Rate) ezt az alapelvet alkalmazza. Mindkét protokoll arra törekszik, hogy a

kapcsolatok között pártatlan sávszélesség megosztás biztosítása mellett a vonal teljes kapacitását kihasználja. Erre a célra több centralizált és elosztott algoritmus létezik, ahol cél a kihasználtság és a késleltetési paraméterek optimális értékének meghatározása.



4.2. ábra. A forgalom belső korrelációjának hatása

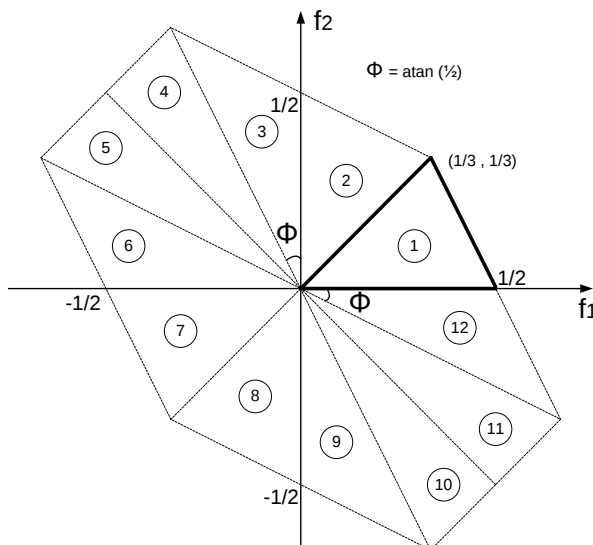
A szabályozó mechanizmusok minőségének javítására több megoldást is kifejlesztettek (pl. RED – Random Early Detection, WRED – Weighted Random Early Detection, stb.), de ezek kutatása továbbra is a forgalomszabályozás egyik központi témája marad. A konvergens infó-kommunikációs rendszerek kidolgozásánál továbbra is eldöntetlen kérdés, hogy a zárt hurkú szabályozó mechanizmusok (főként a TCP) a nyílt hurkúakhoz hasonlóan alkalmazzanak-e minőségi-kapcsolat felépítési mechanizmust, és ha igen milyent.

4.1. Az Ethernet és az ATM forgalmak magasabb rendű momentumainak jellemzői

Felhasználva az $\omega = 2\pi f$ összefüggést, a 3.32 összefüggés szerinti szimmetria okokból a bispektrum elemzéséhez a 3.1. ábrán látható tizenkét háromszög közül rögzíthető az 1-es számmal jelölt, $\Delta = \langle (0,0), (\frac{1}{2}, 0), (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}) \rangle$ csúcspontokkal

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

rendelkező háromszög (ld. 4.3. ábra). Emiatt a továbbiakban ezt a frekvencia (referencia) tartományt alkalmazzuk a bispektrumon alapuló elemzésekhez.



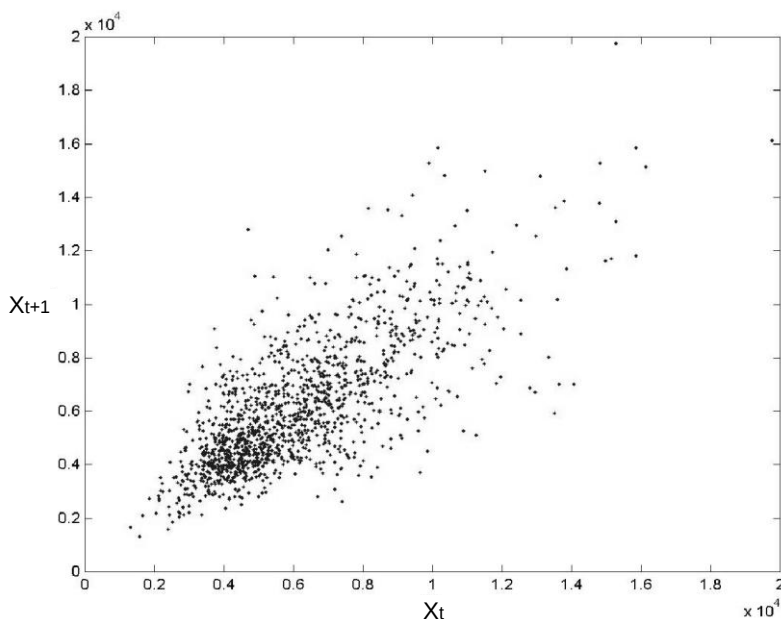
4.3. ábra. A bispektrum elemzési tartománya

Tézis 1: Bispektrum alkalmazása ATM WAN forgalomnál

A svéd egyetemi országos hálózat (SUNET – Swedish University Network) 1996-ban létező STM-1 (155,52 Mbps) ATM hálózata és az Internet közötti WAN kapcsolatot analizáltuk [7.2.1-6]. Két WAN router (Uppsala és Göteborg) közötti, a kísérlet céljára létrehozott 38,16 Mbps-os konstans bitrátájú (CBR- Constant Bit Rate) SDH kapcsolat torlódásmentes adatfolyamát elemeztük. Az 1996-ban létező produkciós hálózatban a mai értelemben vett QoS szolgáltatásokról (pl. DiffServ) nem beszélhetünk. Optikai splitter-ek segítségével történt az adatok begyűjtése annak érdekében, hogy a mérési mechanizmus ne befolyásolhassa az ATM cellaforgalmat. A kísérlet során több mint száz adatsor letárolására került sor, ahol mindegyik mérés több mint 8 millió ATM cella jellemzőit tartalmazta. Minden mérésnél a HTTP, FTP, telnet, chat, IPphone és más protokollok, illetve szolgáltatások aggregált forgalmát analizáltuk. A 155 Mbps-os átviteli rátájú SUNET ATM WAN forgalom mintavételezése 20 ms időközönként történt, és hat idősor elemzését végeztük el: $Set_1, Set_2, \dots, Set_6$. Az adathalmazok 4×10^4 darab és 6×10^6 darab közötti megfigyelést tartalmaztak. X_t megfigyelés alatt ebben az esetben az STM-1 link-en 20 ms alatti nem üres ATM cellák darabszámát értjük. Az (X_t, X_{t+1}) koordinátájú megfigyeléseket tartalmazó „Phase Plot” (szóródás) ábrán

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

(ld. 4.4. ábra a Set_3 esetén) látható, hogy a pontok nagy része az első negyed szögfelezője mentén helyezkedik el. Ez azt jelenti, hogy az esetek többségében nagy értékű X_t megfigyelés után nagy értékű X_{t+1} megfigyelés következik, és kis értékű X_t megfigyelés után kis értékű X_{t+1} megfigyelés következik. Stacionárius folyamatok esetén ezt a jellemzőt pszeudó trendnek nevezik és a hosszú memóriájúság jelenlétére utal.



4.4. ábra. "Phase Plot" diagram Set_3 esetén

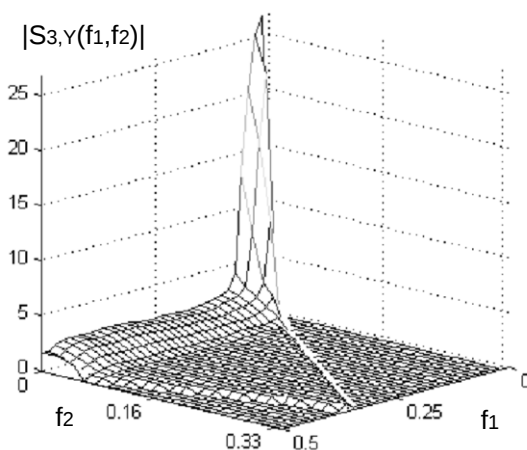
A Hurst paraméter becsléséhez a Whittle és a Geweke-Porter-Hudak (G-P-H) módszereket alkalmaztuk, ami alapján a 4.1 Táblázat szerinti értékeket kaptuk. A becsléshez az f -frekvencia tartomány első ötödét használtuk, ahol a spektrum jellegét többnyire a hosszúmemória befolyásolja, azaz $S_2(f) \cong cf^{1-2H}$, ahol f a nulla közelében veszi fel értékeit.

4.1 Táblázat: ATM WAN forgalmak klasszikusan becsült Hurst paramétere

Adatsor neve	Becsült Hurst paraméter ($\hat{H}$)	
	Whittle módszer	G-P-H módszer
Set_1	0,82	0,88
Set_2	0,89	0,86
Set_3	0,89	0,91
Set_4	0,80	0,79
Set_5	0,88	0,94
Set_6	0,82	0,81

Mint ismeretes, az alkalmazott két becslési módszer csak a másodrendű momentumok struktúráját használja fel [51]. A stacionárius Gauss folyamat teljes mértékben jellemezhető az átlag és a másodrendű momentumokkal, azaz a spektrummal. Nem-Gauss folyamat spektruma általában véve nem tartalmazza a szükséges jellemzőket, ezért a folyamat mélyebb megértéséhez alkalmazni kell a harmad, esetleg magasabb rendű statisztikákat, mint a bispektrum vagy polispektrum.

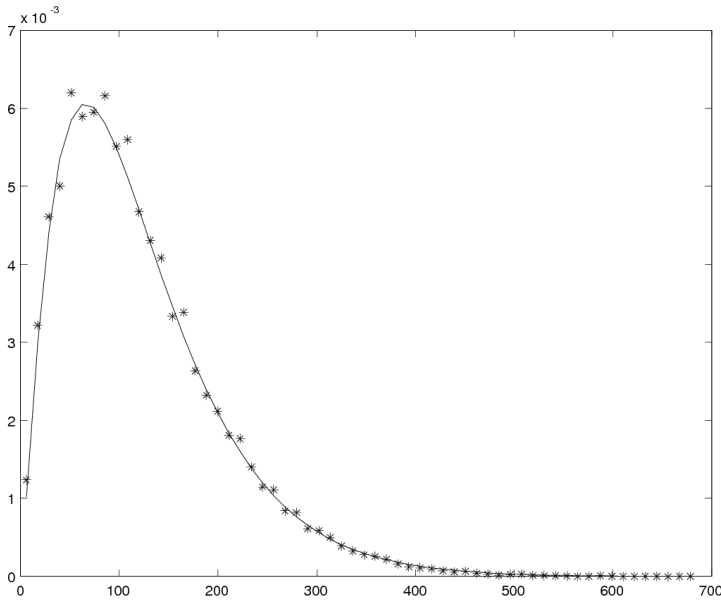
Az elemzett hat adatsor mindegyike esetén azt találtuk, hogy a becslött bispektrum különbözik nullától (ld. 4.5. ábra a Set_3 esetén). Ez alapján megállapítható, hogy a bispektrum a hosszúmemória paraméterre vonatkozóan további részleteket képes nyújtani. Ennek magyarázata az, hogy a becslött spektrum és a bispektrum aszimptotikusan mindig függetlenek [12].



4.5. ábra. Becslött bispektrum abszolút értéke f_1, f_2 függvényében Set_3 esetén

Két esetben nem alkalmazható a bispektrum a Hurst paraméter becsléséhez: a.) amikor a bispektrum nulla, b.) amikor az idősor eloszlásának hatod rendű momentuma végtelen [12]. Ha a bispektrum nulla, akkor a becslött ferdeség és a hisztogram erőteljesen mutatja, hogy az elemzett adatsor eloszlása messze nem Gauss. A $\text{Set}_1, \text{Set}_2, \dots, \text{Set}_6$ adatsorok esetében azt tapasztaltuk, hogy az aggregáció foka, illetve az időskála növelésével egy bizonyos konvergencia figyelhető meg a frakcionált Brown mozgás eloszlásához. Ez a konvergencia viszont nagyon lassú. Az adatsorok határeloszlás konvergenciája a Gauss eloszláshoz lassúbb, mint a független megfigyelések esetében. Ez ATM WAN forgalom erős struktúra függőségéből származik, mivel a Berry-Esséen korlát nem szükségszerűen alkalmazható a hosszú memóriájú folyamatoknál. A 20 ms időközökkel megfigyelt forgalom azt igazolja, hogy az ATM WAN cellaforgalom nem Gauss folyamat és

határozottan pozitív ferdeségű. Ezt grafikusan is megfigyelhetjük a 4.4. ábra és a 4.6. ábra alapján is.



4.6. ábra. Hisztogram és Gamma sűrűség függv. becsült paraméterekkel, Set_3

Mivel a $Set_1, Set_2, \dots, Set_6$ adatsorokra azt kaptuk, hogy az eloszlások nem hosszú farkúak, ezért a bispektrum alkalmazhatóságának b.) kivétele ebben az esetben nem áll fenn. Megállapítottuk, hogy mind a hat adatsor esetén minden aggregációs szinten a gamma eloszlás nagyon jól illeszkedik. Mind a hat idősor esetén a becsült és az elméleti sűrűség függvény, valamint a határeloszlások karakterisztikus függvénye pontos illeszkedést mutat a Gamma folyamatra (ld. 4.7. ábra.). A 3.2 fejezetben ismertetett, a bispektrumon alapuló, Brillinger-től származó Hurst paraméterbecslési módszert alkalmaztuk anélkül, hogy a (3.42) modellnél a θ paramétert egyértelműen ismernénk. Így a Fourier frekvenciák számára a $\Lambda = \left(0, \frac{1}{2}\right)$ intervallumban, illetve $\Delta = \left\langle (0,0), \left(\frac{1}{2}, 0\right), \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}\right) \right\rangle$ síkrészben a nulla környezetét vizsgáltuk, mivel ebben a környezetben a bispektrum nagyságát alapvetően a hosszú memória effektus határozza meg.

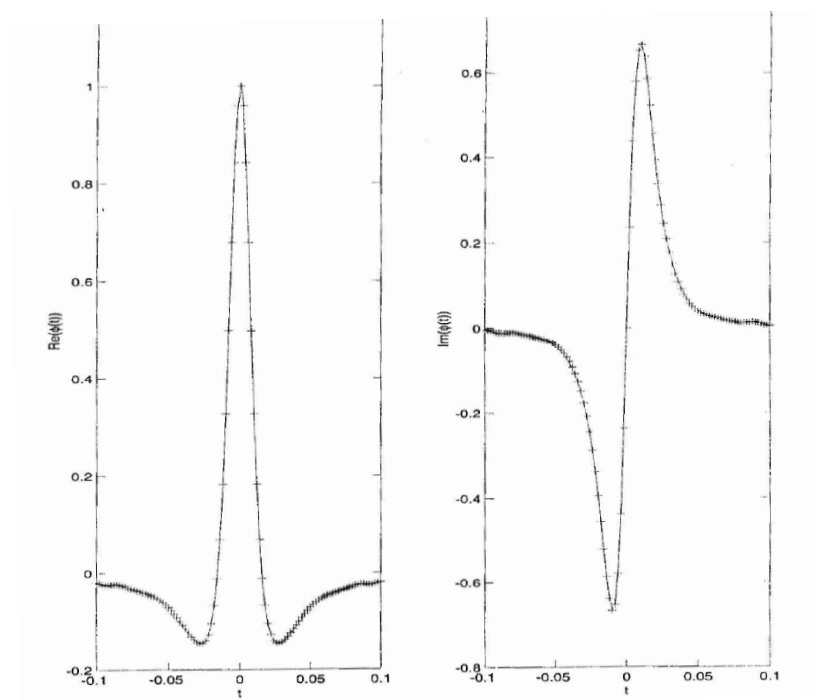
A fenti módszerrel becsült $\theta = H$ paraméter értékek stabilabbak voltak, mint ha a (3.43) összefüggés által adott összeg első tagját minimalizáltuk volna. Itt a stabilitást úgy az eljárás technikai paramétereinek, mint az aggregációs szint szórására értjük. Ezzel a módszerrel a becsült Hurst paramétereket a 4.2. Táblázat tartalmazza.

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

4.2. Táblázat: ATM WAN forgalmak bispektrummal becsült Hurst paramétere

Adatsor neve	Set ₁	Set ₂	Set ₃	Set ₄	Set ₅	Set ₆
Becsült Hurst paraméter ($\hat{H}$)	0,88	0,82	0,89	0,81	0,84	0,89

Az ATM adatsorok mindegyikére a 3.2 fejezetben ismertetett bispektrumon alapuló linearitás tesztek elvégzése alapján negatív eredményt kaptunk, ami igazolja, hogy az ATM WAN cellaforgalom nem lineáris. Ez azt jelenti, hogy egy ilyen esetben kaotikus-rendszer modellezésre szükség lehet.



4.7. ábra. A bispektrum elméleti és becsült karakterisztikus függvények valós, illetve képzetes része, Set₃

Mind a hat adatsor esetén a becsült bispektrum képzetes részére nulla értéket kaptunk. Ez ekvivalens azzal az állítással, hogy:

$$\text{Cum}(Y_t, Y_{t+r}, Y_{t+s}) = \text{Cum}(Y_t, Y_{t-r}, Y_{t-s}), \forall r, s \in \mathbb{Z}. \quad (4.01)$$

A (4.01) összefüggés jelentése a harmadrendű momentumok bizonyos reverzibilitására utal. A fehér zaj szekvenciáknak nem feltétlenül létezik ilyen tulajdonsága, de a független stacionárius szekvenciáknak ilyen tulajdonsága van és a stacionárius szekvencia Gauss jellege ugyancsak a harmadrendű momentumok e

reverzibilitását implikálja. A reverzibilitás jelenség lehetséges fizikai magyarázatát a TCP protokoll szimmetrikus torlódás vezérlési mechanizmusa, valamint az ATM cella rögzített mérete adhatja. A forgalom összetételében lévő UDP forgalom az IPphone szolgáltatás miatt elenyésző mértékű lehetett, mivel 1996-ban a konvergens hálózati megoldások még csak ötletszinten léteztek, így a TCP protokoll befolyásolhatta a szállítási rétegben lezajló folyamatok nagy részét.

Tézis_1 összefoglalása, megállapítások

- i.) A QoS nélküli torlódásmentes ATM WAN forgalom beérkezési időközeinek folyomata hosszú memóriájú, nemlineáris és asszimptotikusan Gamma eloszlású.
- ii.) QoS nélküli torlódásmentes ATM WAN környezetben a cellaforgalom beérkezési időközei hosszú memóriájú paraméterének ($\hat{H}$) becsléséhez a bispektrumon alapuló módszer stabilabb eredményt ad, mint a klasszikus, másodrendű momentumokon alapuló becslési módszerek.
- iii.) A QoS nélküli torlódásmentes ATM WAN forgalom beérkezési időközei bispektrumának képzetes része nulla, ami az adatforgalom összességére nézve a szállítási rétegben a TCP protokollnak az UDP protokollal szembeni lényegesen nagyobb aktivitására utal.

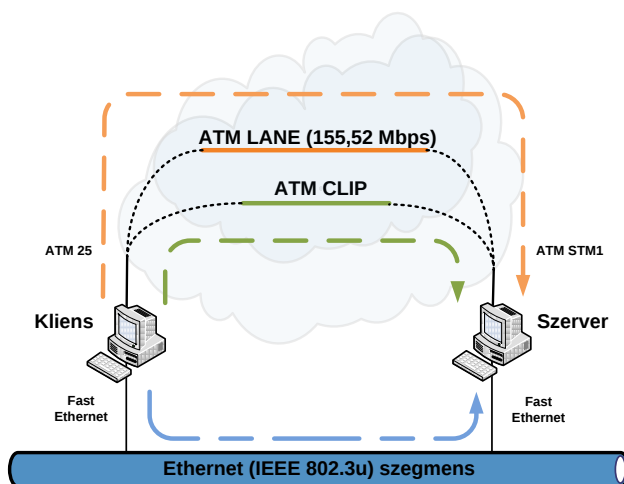
Tézis_1 témájában készült saját és társszerzős publikációk

- 1. György Terdik, Zoltán Gál, Endre Iglói, Sándor Molnár (2002): Bispectral Analysis of Traffic in High-Speed Networks, *Computers and Mathematics with Applications* 43, Elsevier Science, pp. 1575-1583 [DOI: 10.1016/S0898-1221(02)00120-7].
- 2. Zoltán Gál, Endre Iglói, György Terdik (2001): Multifractal Model of High Speed IP over Ethernet Traffic, 5th International Conference on Applied Informatics – Conference Proceedings, Eger, Hungary, 28 January-3 February 2001. CD-ROM
- 3. Gál Zoltán, Iglói Endre, Terdik György (1999): Nagysebességű informatikai hálózat adatforgalmának matematikai statisztikai jellemzése, *Alkalmazott Matematikai Lapok*, Volume 19, pp. 29-38 (Journ. of Appl. Math. of Hung. Acad. of Sci.) [Zentralblatt Math. Review 0959.68002.] (in Hungarian).
- 4. Viktória Elek, Zoltán Gál, H. L. Phan, Csaba Szabó (1996): ATM LAN network design, *Journal on Communications*, Volume XLVII, pp. 17-23.

Tézis 2: A bispektrum Ethernet, LANE és CLIP ATM forgalmaknál

A Debreceni Universitas Egyesülés produkciós MAN hálózata (UDNet) valós forgalmának magasabb rendű momentumait elemeztük és ennek segítségével összehasonlítottuk az IEEE 802.3 és az ATM LAN/MAN átviteltechnikák jellemzőit.

A mérési környezetet a 4.8. ábra mutatja. A két végfelhasználói számítógép mindegyike egy-egy IEEE 802.3u, illetve egy ATM 25,6 Mbps-os valamint egy ATM 155,51 Mbps-os interfész kártyával rendelkezik. A multimédia forgalom előállítása érdekében a kliens gépen RealEncoder, míg a szerver gépen RealServer célszoftver futott, amely a szállítási rétegben UDP protokollt alkalmaz.



4.8. ábra. Ethernet, ATM LANE, ATM CLIP forgalom mérése

A szerver gépen futó TCP Dump szoftver segítségével különböző IP adatfolyamokat mintavételeztünk három különböző átviteltechnika esetén: Fast Ethernet (E), ATM LAN emuláció (L: LANE), illetve ATM feletti klasszikus IP (C: Classical IP over ATM, CLIP). Az ATM felett emulált LAN-hoz csak két kliens és a szerver egy-egy logikai alinterfésze tartozott, amelyek egyetlen IP alhálózatban helyezkedtek el. Az ATM feletti CLIP esetén a két kliens és a szerver egyetlen IP alhálózatba volt konfigurálva, amely különbözött a LANE szegmens IP alhálózatától. Az adatforgalmat alacsony, illetve magas minőségű valósídejű csak hangkapcsolat, valamint alacsony és közepes minőségű hang és streaming videó kapcsolat jelentette (ld. 4.3. Táblázat). A kinyert idősor nevét az átviteltechnika, a videó ráta, valamint a hang ráta értékekből generáltuk (pl. Lv128h32 jelentése: LANE, videó 128 kbps, hang 32 kbps). A mérések időtartama mind a tizenkét esetben $T = 30 \text{ sec}$

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

volt. Mérés közben a három átviteltechnika alacsonyan terhelt csatornákon továbbította a forgalmat. Az ATM-re épülő kísérletek (L, C) esetén a fogadó oldalon a szerver gép interfészének átviteli rátája 155,52 Mbps jóval nagyobb, mint a küldő gép 25,6 Mbps-os sebessége, így a mérési pontban a mintavételezett adatsor csak a forrás codec és a köztes hálózat jellemzőit hordozza magában.

4.3. Táblázat: Mérési jellemzők Ethernet, ATM LANE, illetve ATM CLIP esetben

Adatforgalom jellemzője		Idősor átviteltechnika szerinti elnevezése		
Videó átviteli ráta [kbps]	Hangátviteli ráta [kbps]	IEEE 802.3u (E)	Emulált Ethernet ATM felett (L)	Klasszikus IP ATM felett (C)
0	32	Eh32	Lh32	Ch32
0	80	Eh80	Lh80	Ch80
128	32	Ev128h32	Lv128h32	Cv128h32
400	80	Ev400h80	Lv400h80	Cv400h80

Az Ethernet szegmensén végzett kísérlet (E) során egyéb forgalom nem volt jelen a csatornán, így itt is a forrás codec és a hálózat jellemzőit mértük. A kiszolgáló hálózaton a három átviteltechnika közül egyiknél sem működött a mai értelemben vett QoS mechanizmus (pl. DiffServ). A mintavételezett idősorok a PDU beérkezési időközök (T_i), illetve a PDU méretek (L_i). Az időbélyeg pontossága 1 ms, az IP csomag méretét bájtban kaptuk.

Definíció 4.1. Jelölje $MRB(tech_{forg})$, illetve $MIB(tech_{forg})$ az adott technológiával továbbított forgalom bispektruma valós, illetve képzetes részének maximumát, azaz a jel energiájának fáziscsatoltságát:

$$\begin{aligned} MRB(tech_{forg}) &= \max\{Real[Bisp(tech_{forg})]\} \\ MIB(tech_{forg}) &= \max\{Imag[Bisp(tech_{forg})]\} \end{aligned} \quad (4.02)$$

ahol *tech*-technológia (E, L, C), és *forg*-multimédia adatforgalom a 4.3. Táblázat szerint. Adott multimédiás tartalom különböző technológiákkal továbbított forgalma bispektrumának maximumai, azaz fáziscsatoltságai közötti arányt *technológiai arálynak* (TR- Technology Rate) nevezzük. Így beszélhetünk adott forgalom *valós technológiai arányáról*, és *képzetes technológiai arányáról* az alábbiak szerint:

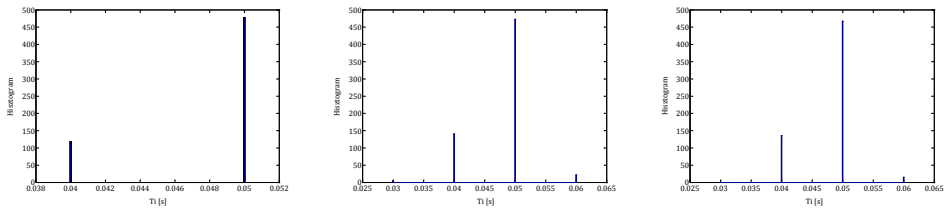
$$\begin{aligned} TR_{forg}^{ELC} &= MRB(E_{forg})/MRB(L_{forg})/MRB(C_{forg}) \\ TI_{forg}^{ELC} &= MIB(E_{forg})/MIB(L_{forg})/MIB(C_{forg}) \end{aligned} \quad (4.03)$$

A továbbiakban a technológiai arányt felhasználjuk a különböző technológiák összehasonlításának számszerű mérésére úgy a T_i , beérkezési időközök, mint az L_i , keretméretek idősorai tekintetében.

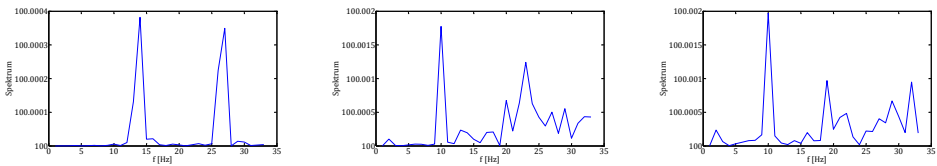
4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

a.) A három átviteltechnikára vonatkozóan alacsony átviteli rátájú forgalomnál (csak hang: 80 kbps, PCM csatorna) az alábbiakat tapasztaltuk:

A beérkezési időközöknél az első és másodrendű momentumok segítségével történő összehasonlítás azt mutatta, hogy a hisztogram és a spektrum grafikonok LANE és CLIP esetén hasonlóak, de lényegesen eltérnek az Ethernettől (ld. 4.9. és 4.10. ábrák). Ebben az esetben azt Ethernet csatorna forgalma determinisztikusnak tűnik, mivel a szegmensen csak nagyon alacsony rátával forgalmaz a két csomópont.

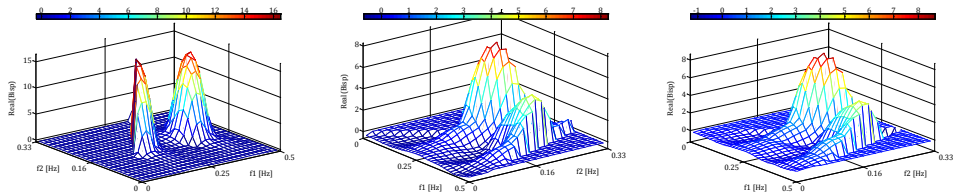


4.9. ábra. A T_i hisztogramja (Eh80, Lh80, Ch80)



4.10. ábra. A T_i spektruma (Eh80, Lh80, Ch80)

A két reprezentáns frekvencia a kliens és szerver közötti, két egymástól eltérő irányú hangcsatorna forgalmának felel meg. A LANE és a CLIP kettőnél több, jól beazonosítható időközönként küldi a csomagokat.



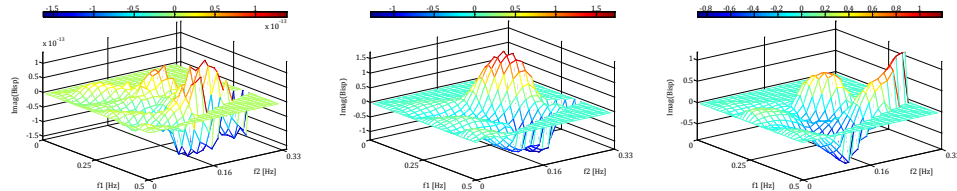
4.11. ábra. A T_i bispektrumának valós része (Eh80, Lh80, Ch80)

Ez ezért van, mert az ATM szolgáltatói hálózatban az AAL5 adaptációs réteg szolgálata nem garantál QoS-t, így az IP csomagok továbbítási folyamata zajos. A magasabb rendű momentumok további részleteket mutatnak meg (ld. 4.11. és 4.12.

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

ábrák). A LANE és a CLIP bispektrumának valós része hasonlít egymásra, de eltér az Ethernetétől.

Hasonló megállapítás tehető a bispektrumok képzetes részére is. Ethernet esetén a képzetes rész gyakorlatilag nulla, mivel a felület nagyságrendje 10^{-13} , gyakorlatilag nulla. Ez összhangban van jelen dolgozat Tézis_1 állításával.



4.12. ábra. A T_i bispektrumának képzetes része (Eh80, Lh80, Ch80)

A LANE, illetve a CLIP bispektrumának képzetes részére nem nulla. Ez azt jelenti, hogy LANE és CLIP esetén a beérkezési időközök harmadrendű momentumai nem reverzibilisek, azaz:

$$Cum(T_t, T_{t+r}, T_{t+s}) \neq Cum(T_t, T_{t-r}, T_{t-s}), \forall r, s \in \mathbb{Z}. \quad (4.04)$$

Az IP csomagméretnél is az első és másodrendű momentumok azt mutatják, hogy a hisztogram és a spektrum grafikonok LANE és CLIP esetén hasonlóak, de lényegesen eltérnek az Ethernettől (ld. 4.9. és 4.10. ábrák). Ebben az esetben az Ethernet csatorna forgalma determinisztikus. Az IP csomagméret hisztogramja Ethernet technológiánál közel konstans értéket ad, ami a csatorna nagyon alacsony terheléséből adódó determinisztikus továbbítási képességgel magyarázható (ld. 4.4. Táblázat). Ennek fizikai jelentése az, hogy a PCM (Pulse Code Modulation) hangkódolás konstans rátával állítja elő a rögzített méretű hangszegmenseket.

4.4. Táblázat: E, L, C összehasonlítása alacsony (h80) átviteli rátánál

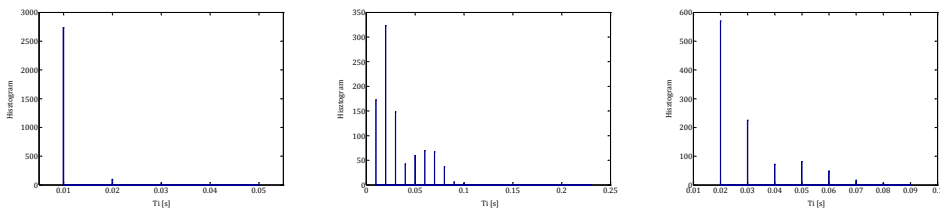
	Beérkezési időközök (T_i)	IP csomagméret (L_i)
Hisztogram	E: determinisztikus folyamat L: sztochasztikus hatás ATM miatt C: sztochasztikus hatás ATM miatt	E: determinisztikus folyamat L: sztochasztikus hatás ATM miatt C: sztochasztikus hatás ATM miatt
Spektrum	E: determinisztikus folyamat L: ATM megnöveli a maximumot C: ATM megnöveli a maximumot	E: determinisztikus folyamat L: ATM megnöveli a maximumot C: ATM megnöveli a maximumot
Real(Bisp)	E: eltérő jelleg L-től és C-től L: $TR^{ELC} = 2/1/1$ C: azonos jelleg L-lel	E: eltérő jelleg L-től és C-től L: $\max(L)/\max(C)=3/2$ C: azonos jelleg L-lel
Imag(Bisp)	E: ≈ 0 L: $\neq 0, TR^{LC} = 5/4$ C: $\neq 0$, eltérő jelleg L-től	E: $\neq 0$, azonos jelleg L-lel és C-vel L: $\neq 0, TR^{ELC} = 3/1/1$ C: $\neq 0$, azonos jelleg L-lel

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

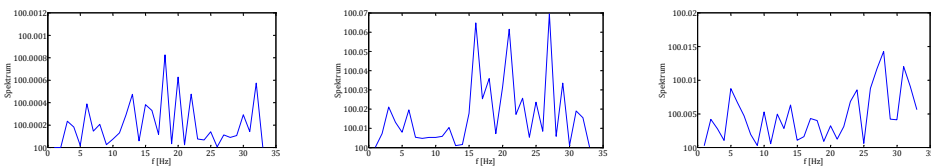
A LANE és a CLIP itt is sztochasztikus jelleget mutat, amit az ATM AAL5 adaptációs réteg "Best Effort" szolgálata okoz. Az L_i keretméret valós technológiai aránya, $TR_{h80}^{LC} = 3/2$. Mindhárom technológia esetén az IP csomagméret bispektrumának képzetes része azonos jellegű, de az Ethernetnél ez háromszor nagyobb, mint a LANE és a CLIP-nél.

b.) A három átviteltechnikára vonatkozóan magasabb átviteli rátájú forgalomnál (hang: 80 kbps és streaming videó: 400 kbps) az alábbiakat tapasztaltuk:

Az ATM finomabban szóródó beérkezési időközöket okoz. A LANE és a CLIP hisztogramokon már több időköz is megfigyelhető (ld. 4.13. és 4.14. ábrák) és a spektrumok is hasonló jellegűek, de a LANE spektrumának tartománya kétszer nagyobb, mint a CLIP-nél. Ez az eltérés abból adódhat, hogy míg a LANE az IP csomagokat először Ethernet keretekbe teszi, majd AAL5 szolgálattal ATM cellasorozatba helyezi bele, addig a CLIP közvetlenül az ATM cellákba végzi az IP csomag szegmentálását. Az Ethernet link-en a forgalom nagy része egyetlen rátával továbbítódik, habár ez még mindig alacsonyan terheli a 100 Mbps-os csatornát. Ez a videó streaming, illetve a hangot szállító IP csomag folyamatok rátája közötti szignifikáns arányból adódik. A magasabb rendű momentumok további részleteket mutatnak meg (ld. 4.15. és 4.16. ábrák). Megfigyelhető, hogy mindhárom átviteltechnika esetén a beérkezési időközök folyamatának harmadrendű momentumai nem reverzibilisek, azaz itt is érvényes a (4.02) összefüggés.



4.13. ábra. A T_i hisztogramja (Ev400h80, Lv400h80, Cv400h80)



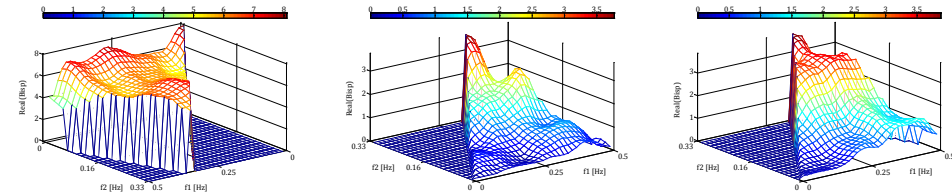
4.14. ábra. A T_i spektruma (Ev400h80, Lv400h80, Cv400h80)

A LANE és a CLIP-nél a beérkezési időközök bispektrumának valós része hasonlít egymásra, de eltér az Ethernetétől és a valós technológiai arány,

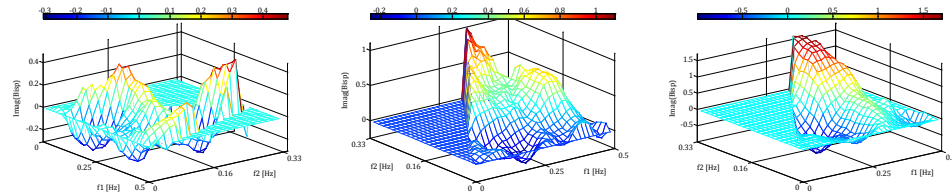
4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

$TR_{v400h80}^{ELC} = 2/1/1$. A bispektrum képzetes része viszont az Ethernetnél viszonylag kis értékű ($\leq 0,4$), de a LANE és a CLIP-nél azonos jelleg mellett nagyobbak, és képzetes technológiai arány $TI_{v400h80}^{ELC} = 1/3/4$. Fontos észrevenni, hogy a három átviteli technológia egyikénél sem nulla a bispektrum képzetes része, így az IP csomagméretek folyamatára érvényes, hogy a harmadrendű momentumai nem reverzibilisek, azaz:

$$Cum(L_t, L_{t+r}, L_{t+s}) \neq Cum(L_t, L_{t-r}, L_{t-s}), \forall r, s \in \mathbb{Z}. \quad (4.03)$$



4.15. ábra. A T_i bispektrumának valós része (Ev400h80, Lv400h80, Cv400h80)



4.16. ábra. A T_i bispektrumának képzetes része (Ev400h80, Lv400h80, Cv400h80)

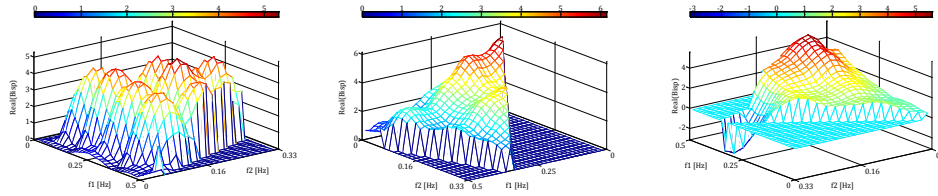
4.5. Táblázat: E, L, C összehasonlítása magasabb (v400h80) átviteli rátánál

	Beérkezési időközök (T_i)	IP csomagméret (L_i)
Hisztogram	E: sztochasztikus folyamat L: finomabb szóródás az ATM miatt C: finomabb szóródás az ATM miatt	E: sztochasztikus folyamat L: tartomány(L)/tartomány(E)=40% C: tartomány(C)/tartomány(E)=25%
Spektrum	E: sztochasztikus folyamat L: azonos jelleg C-vel C: azonos jelleg L-lel	E: sztochasztikus folyamat L: azonos jelleg C-vel C: azonos jelleg L-lel
Real(Bisp)	E: eltérő jelleg L-től és C-től L: $TR^{ELC} = 3/1/1$ C: azonos jelleg L-lel	E: eltérő jelleg L-től és C-től L: $TR^{LC} = 2/1$ C: eltérő jelleg L-től
Imag(Bisp)	E: $\neq 0$, eltérő jelleg L-től és C-től L: $\neq 0$, $TR^{ELC} = 1/3/4$ C: $\neq 0$, azonos jelleg L-lel	E: $\neq 0$, eltérő jelleg L-től és C-től L: $\neq 0$, $TR^{ELC} = 3/4/1$ C: $\neq 0$, azonos jelleg L-lel

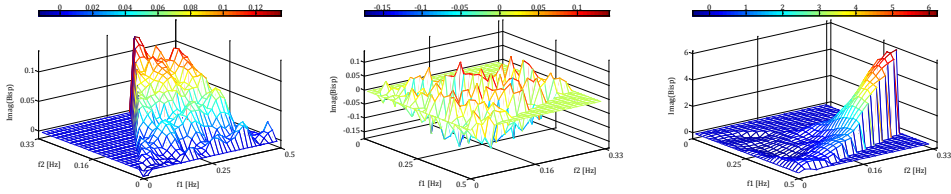
A 4.17-4.18. ábrák az alacsony (32 kbps-os) átviteli rátájú hangcsatorna beérkezési időközeinek bispektrumát mutatják. Itt a hangcsatorna már forrás szinten kódolt és a hangszegmensek előállítás nem konstans rátával történik.

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

Habár a beérkezési időközöknél $MIB_L(h32) < 0,1$ de ez még nem tekinthető gyakorlatilag nullának, mivel jelentős szórást mutat (ld. 4.18. ábra.). Ugyanakkor, eltérő jelleg mellett, de $TI_{h32}^{ELC} = 1/1/40$ extrém értéket ad. Ennek oka az lehet, hogy az alacsony átviteli hangrátán az Ethernet és az ATM LANE technológiák hasonlóan működnek, mivel a rövid hang szegmenst szállító Ethernet keretet csak kevés részre kell fragmentálni, hogy beleférjen az ATM cellák adatmezőjébe. Ezek rövid "vonatok" lesznek, amelyek hasonlóan továbbítódnak, mint egy fizikai Ethernet csatornán.

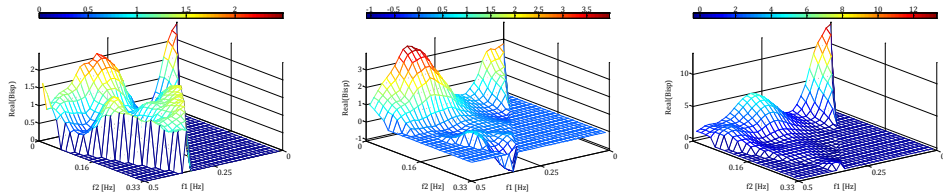


4.17. ábra. A T_i bispektrumának valós része (Eh32, Lh32, Ch32)



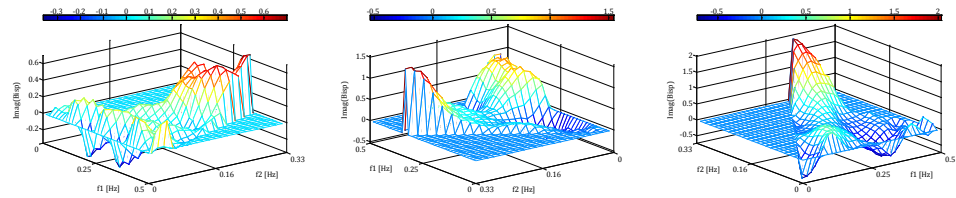
4.18. ábra. A T_i bispektrumának képzetes része (Eh32, Lh32, Ch32)

A közepes (128 kbps-os videó és 32 kbps-os hang) átviteli rátájú forgalmak beérkezési időközzeinek bispektrumát a 4.19-4.20 ábrákon láthatjuk.



4.19. ábra. A T_i bispektrumának valós része (Ev128h80, Lv128h80, Cv128h80)

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek



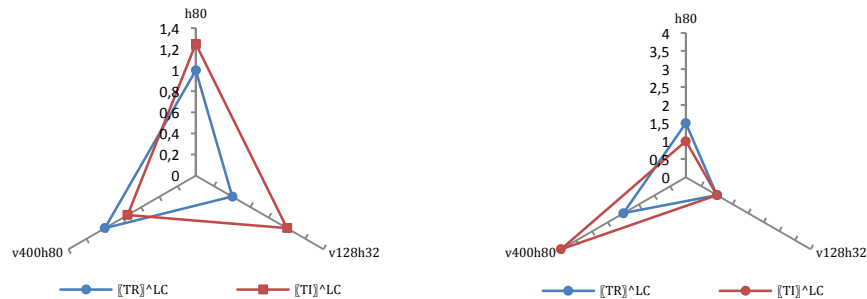
4.20. ábra. A T_i bispektrumának képzetes része (Ev128h32, Lv128h32, Cv128h32)

Ezek alapján közepes átviteli rátájú forgalomnál (hang: 128 kbps és streaming videó: 32 kbps) a három átviteli technológia összehasonlítását a 4.6. táblázat tartalmazza.

4.6. Táblázat: E, L, C összehasonlítása közepes (v128h32) átviteli rátánál

	Beérkezési időközök (T_i)	IP csomagméret (L_i)
Hisztogram	E: sztochasztikus folyamat L: finomabb szóródás az ATM miatt C: finomabb szóródás az ATM miatt	E: sztochasztikus folyamat L: tartomány(L)/tartomány(E)=50% C: tartomány(C)/tartomány(E)=50%
Spektrum	E: zajos L, C: azonos jelleg Két maximum: egyik az alacsony, másik a magas frekvenciák miatt	E: zajos L, C: azonos jelleg Két maximum: egyik az alacsony, másik a magas frekvenciák miatt
Real(Bisp)	E: hasonló jelleg L-lel és C-vel L, C: azonos jelleg $TR^{ELC} = 1/2/5$	E: hasonló jelleg L-lel és C-vel L, C: azonos jelleg $TR^{ELC} = 3/1/1$
Imag(Bisp)	E: $\neq 0$, eltérő jelleg L-től és C-től (L, C): $\neq (0,0)$ $TR^{ELC} = 1/3/3$	E: $\neq 0$, eltérő jelleg L-től és C-től (L, C): $\neq (0,0)$ $TR^{ELC} = 3/1/1$

A beérkezési időközök, valamint a keretméret idősorok bispektrumának tapasztalt viselkedését a különböző forgalmi rátáknál a 4.21. ábra mutatja szemléletesen, ahol a bal oldali ábra a beérkezési időközök, míg a jobb oldalon a keretméretek technológia arányát láthatjuk.



4.21. ábra. A T_i , illetve L_i technológiai arányai a különböző forgalmaknál

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

Itt csak a LANE és a CLIP technológiákat hasonlítjuk össze, mivel ezek közötti statisztikai különbséget kutatjuk. Megállapítható, hogy a különböző forgalmaknál a valós, illetve a képzetes technológiai arány a forgalomtól függően eltérő jelleget mutat. A bispektrumnak mind a valós, mind a képzetes részét figyelembe kell vennünk ahhoz, hogy a LANE és a CLIP technológiák közötti különbséget mennyiségileg is jellemezni tudjuk.

Tézis_2 összefoglalása, megállapítások

- i.) ATM LAN/MAN környezetben QoS nélküli, torlódásmentes a LANE, illetve a CLIP technológiákkal továbbított multimédia forgalom a beérkezési időköz és az IP csomagméret idősorokkal együttesen jellemezhető. A forgalmak közötti különbségtételhez szükséges a bispektrum valós és a képzetes részének figyelembe vétele is.
- ii.) ATM LAN/MAN környezetben QoS nélküli, torlódásmentes hálózatban a bispektrumon alapuló UDP forgalom elemzése kimutatja, hogy a beérkezési időköz, illetve az IP csomagméret idősorok mindegyikénél a harmadrendű momentumok irreverzibilisek, ezért nem Gauss eloszlásúak.
- iii.) ATM LAN/MAN környezetben QoS nélküli, torlódásmentes UDP forgalomnál a beérkezési időközök, illetve az IP csomagméret idősorok bispektrumának valós része LANE esetén nagyobb, mint a CLIP technológiánál, mivel a valós technológiai arány értéke egység feletti, azaz $TR^{LC} \geq 1$. Ezáltal beazonosítható az UDP forgalom LANE, illetve CLIP technológiák segítségével történő továbbítása közötti különbség.
- iv.) ATM LAN/MAN környezetben QoS nélküli, torlódásmentes UDP forgalomnál a beérkezési időközök, illetve az IP csomagméret idősorok képzetes technológiai aránya erőteljesen függ a hang és a videó forgalom egymáshoz viszonyított arányától. A videó forgalommal egyenesen arányosan nő a TI^{LC} , képzetes technológiai arány, míg ha csak PCM hangot forgalmazunk, akkor $TI^{LC} \sim 1$ értéket ad, vagyis a LANE és a CLIP hasonlóan viselkedik.

Tézis_2 témájában készült saját és társszerzős publikációk

1. Zoltán Gál (2000): Statistical Aspects of the ATM Migration Solutions: LANE vs. CLIP, *International Symposium on Telemedicine and Teleeducation in Practice, ISTEP'2000 – Conference Proceedings*, Kosice, Slovak Republic, 22-24 March, 2000, ISBN 80-88964-38-5, pp. 129-134.

2. Zoltán Gál (1999): Statistical Aspects of Migration to ATM in Multimedia Network Environment, *Proceedings of the 4th International Conference on Applied Informatics, Eger-Noszvaj, Hungary, 30 August - 3 September 1999*, pp. 275-283 (2001). [Zentralblatt Math. Review 0999.68618]
3. Zoltán Gál, Csaba Szabó (1996): Migration to ATM in an Academic MAN Environment - Network Design Considerations and a Case Study, *8th IEEE LAN/MAN Workshop Proceedings, Berlin, 25-28 August, 1996*.

4.2. Forgatomelemzés ON/(ON+OFF) módszerrel

A csomagkapcsolt adatátvitel modellezésére általában jellemző, hogy csak a keretek beérkezési időpillanatainak idősorát, mint sztochasztikus folyamatot vizsgálják. Jóval kevesebb azon tudományos írások száma, amelyek figyelik a keret bájtban mért hosszát is, és e két folyamat együttes elemzésével magyarázzák a PDU-k továbbításának mechanizmusait. Az adatforgalom két jellemzőjének párhuzamos elemzésére még viszonylag kevés javaslat létezik, de az utóbbi időben egyre többen foglalkoznak ezzel a komplex megközelítési elvvel [39], [72].

Saját elemzési módszert dolgoztam ki, amely adott hálózati forgalomnak egyszerre két, egymástól független jellemzőjét veszi figyelembe. Ezzel mélyrehatóbban értelmezni lehet adott csomagkapcsolt adatforgalom viselkedését.

Tézis 3: Az ON/(ON+OFF) forgatomelemzési módszer és tulajdonságai

A módszer kidolgozása során az alábbi szempontokat vettem figyelembe:

- a.) A csomagkapcsolt adathálózatok forgalmának kimerítő elemzéséhez nem elégséges csak egyetlen idősor (beérkezési időközök, vagy sávszélesség használat, vagy csomagméret, stb.) figyelembe vétele és izolált tanulmányozása.
- b.) A csomagkapcsolt adathálózat mintavételezett forgalma az adott csatorna technológiai tulajdonságainak, a csatornát meghajtó eszköz hatékonyságának és a csatorna felé küldött egyéb forgalmak összességének függvénye. Emiatt adott csatornán a *csatorna terheltség*, illetve a *keretintenzitás* idősorok segítségével elemezzük a forgalmakat. E két idősor az együttes vizsgálata lehetővé teszi a csatorna szintű lokális forgalom mélyrehatóbb jellemzését.

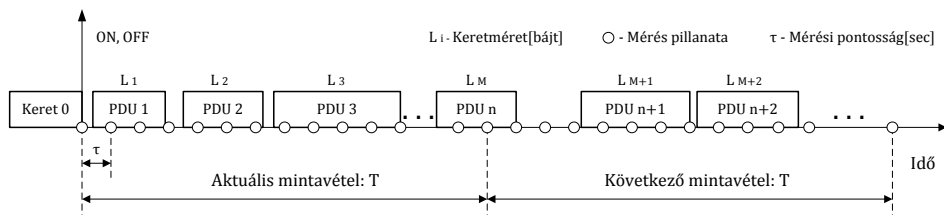
c.) Az adatforgalomból nyert idősor függ a mintavételezés fizikai helyétől. Mivel csomagkapcsolt hálózaton a köztes csomópontok mindegyike a saját queue menedzsment mechanizmusa és az egyéb forgalmak lokális erőforrás igénye miatt a beérkező, megfigyelt csomag-sorozat időzítését módosítja, ezért különbség van egyrészt a szolgáltatói hálózatban az adott forgalom útvonala mentén elhelyezkedő csomópontok közötti pont-pont csatornákon mintavételezett, másrészt a végfelhasználói meghajtó csatornán mintavételezett idősorok között is.

Az $ON/(ON + OFF)$ transzformáció bemutatása

Mivel két szomszédos hálózati eszköz közötti (nem csak pont-pont típusú) csatorna a megkezdett küldésnél a keret bitjeit az adott technológiától függő rátával továbbítja, ezért a fogadott keret bájt-számban kifejezett mérete egy lineáris leképezéssel könnyen az idő dimenzióba konvertálható. Megjegyezzük, hogy az impulzusok terjedési késleltetése a közeg hosszával lineárisan nő és 300 méterenként $\sim 1 \mu s$, de mivel a módszer a csatorna vételezési pontjába beérkező keretek idősorát vizsgálja, ezért a jel terjedésének véges mivoltából adódó hatással nem foglalkozunk. Az aktuális keret küldésének befejezése és a soron következő keret küldésének megkezdése közötti időtartam nem csak a várakozó forgalomtól, de a csatorna hozzáférési mechanizmusától (MAC- Medium Access Control) is függ.

Definíció 4.2. A $Bw[bit/sec]$ átviteli rátájú csatornán az aktuális keretküldési (fogadási) időtartamát $L = T_{ON}$ -nak, míg a forgalomhiányból és a technológiai időzítésekből (MAC algoritmus, stb.) származó holt időközöt T_{OFF} -nak nevezzük.

Így például Ethernet átviteltechnika esetén a T_{OFF} idő az „interframe spacing” (96 bitidő) és a „backoff” időtartamoktól is függ. Mintavételezéskor az adatforgalom aktuális keretének érzékelése és az időbélyeg hozzárendelése, az adatkapcsolati réteg CRC kódjának leellenőrzése után, a hardver megszakítás aktivizálásakor, azaz a keret utolsó bitjének megérkezése pillanatában történik. Fontos észrevennünk, hogy a minden mintavételezési időtartamban az (OFF, ON) párok ismétlődnek.



4.22. ábra. Adatforgalom mintavételezése

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

Definíció 4.3. Az aktuális T -periódusidőben mintavételezett keretek számát (M) beérkezési rátának, *intenzitásnak* nevezzük:

$$T = \sum_{j=1}^M (T_{OFF,j} + L_j) = \sum_{j=1}^M T_{OFF,j} + M \cdot L \quad (4.05)$$

ahol $L_j, j = 1, 2, \dots, M$ az egyes keretek küldési ideje, és L az aktuális átlagos keretküldési idő.

Lemma 4.1: Legyen $T[sec]$ a keretfolyam mintavételezésének periódus ideje, $L_j[sec]$ a j -edik ($j = 1, 2, \dots, M$) keret küldési ideje, $Bw[bit/sec]$ a csatorna átviteli rátája, míg $mtu'[bájt]$, illetve $MTU'[bájt]$ az adott átviteltechnika által engedélyezett minimális, illetve maximális keret (mtu – Minimum Transfer Unit, MTU – Maximum Transfer Unit) és az előtagok méretének az összege. Az intenzitás mintavételezési hibaarányra (ξ_M), a bájt szám mintavételezési hibaarányra (ξ_B), valamint a csatornaterhelés hibaarányra ($\xi_{\tan \varphi}$), igazak az alábbiak:

$$\left. \begin{aligned} \xi_M(Bw, T) &\geq \frac{8 \cdot mtu'}{BwT} \\ \xi_B(Bw, T) &\geq \xi_{\tan \varphi}(Bw, T) \geq \frac{8 \cdot mtu'}{BwT} \end{aligned} \right\} \quad (4.06)$$

Bizonyítás: Mivel az időbélyeg csak a keret utolsó bájtjának beérkezése után rendelődik a kerethez, ezért az aktuális mintavételezési periódusban az intenzitás mérési hibaaránya a (4.05) alapján:

$$\xi_M(Bw, T) = \frac{\Delta M}{M} = \frac{1}{M} = \frac{L}{T - \sum_{j=1}^M T_{OFF,j}} \geq \frac{L}{T} \geq \frac{\min(L_j)}{T} \geq \frac{8 \cdot mtu'}{BwT}$$

A bájt szám mérési hibaaránya az alábbi:

$$\xi_B(Bw, T) = \frac{\Delta B}{B} = \frac{Bw \cdot L_M}{\sum_{j=1}^M (Bw \cdot L_j)} = \frac{Bw \cdot L_M}{Bw (T - \sum_{j=1}^M T_{OFF,j})} \geq \frac{Bw \cdot L_M}{Bw \cdot T}$$

A csatornaterhelés mérési hibaarányát az egyetlen keret mérési hibájából származó bithiba és a T periódusidő alatt szállítható bitek számának aránya adja a következő módon:

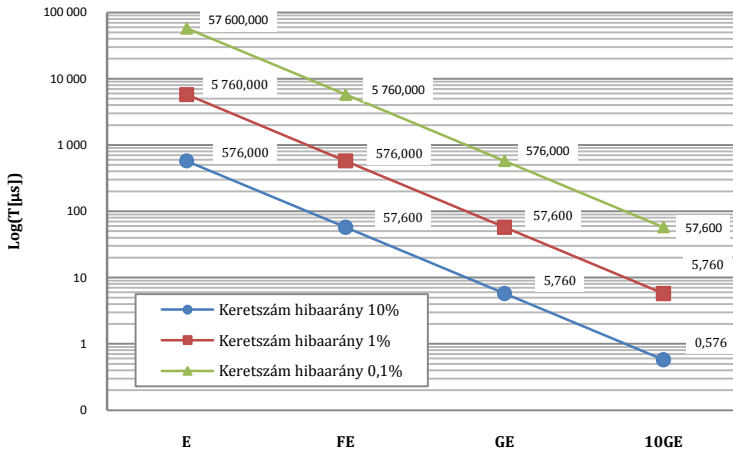
$$\xi_{\tan \varphi}(Bw, T) = \frac{Bw \cdot L_M}{Bw \cdot T} \geq \frac{Bw \cdot \min(L_j)}{Bw \cdot T} \geq \frac{8 \cdot mtu'}{Bw \cdot T} \quad \blacksquare$$

Ethernet átviteltechnika esetén $MTU' = MTU + |PA| + |SD| + |DA| + |L/T| + |CRC|$, és $mtu' = mtu + |PA| + |SD| + |DA| + |L/T| + |CRC|$, ahol PA (Preamble: 7 bájt), SD (Starting Delimiter: 1 bájt), DA (Destination Address, 6 bájt), SA (Source Address, 6 bájt), L/T (Length/Type, 2 bájt), CRC (Cyclic Redundancy Code, 4 bájt) mezők, így $MTU' = MTU + 26$ és $mtu' = mtu + 26 = 72$. Tehát az OSI

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

L2 enkapszuláció típusa erőteljesen befolyásolja közvetlenül az elküldött keret méretét, és közvetve a keretküldési időközt.

A 4.1. lemma a mérés komoly hibaforrására hívja fel a figyelmet. Ha az intenzitás mintavételezési hibaaránya megkövetelt szintű, akkor az átviteli ráta és mérési periódus szorzata is korlátos alulról. Ethernet átviteltechnikák esetén, rögzített ξ_M , intenzitás (keretszám) mérési hibaarányánál a mintavételezési periódus minimális értékét a 4.23. ábra szemlélteti.



4.23. ábra. A T_{min} , minimális mintavételezési periódus függése a ξ_M , mérési hibaaránytól és az átviteltechnikától

Ha a csatornán az adatfolyam minimális méretű keretei (TU - Transfer Unit) nagyobbak, mint a technológiafüggő minimális keretméret (mtu'), akkor az előírt ξ_M , intenzitásmérési hibaarányhoz a mintavételezési periódust tovább kell növelni $\left(T_{min} \geq \frac{8 \cdot TU}{\xi_M Bw} > \frac{8 \cdot mtu'}{\xi_M Bw}\right)$.

Lemma 4.2: Rögzített ξ_M , intenzitásmérési hibaarányánál, adott átviteltechnika segítségével továbbított keretfolyam szükséges mérési pontossága (τ) az alábbi:

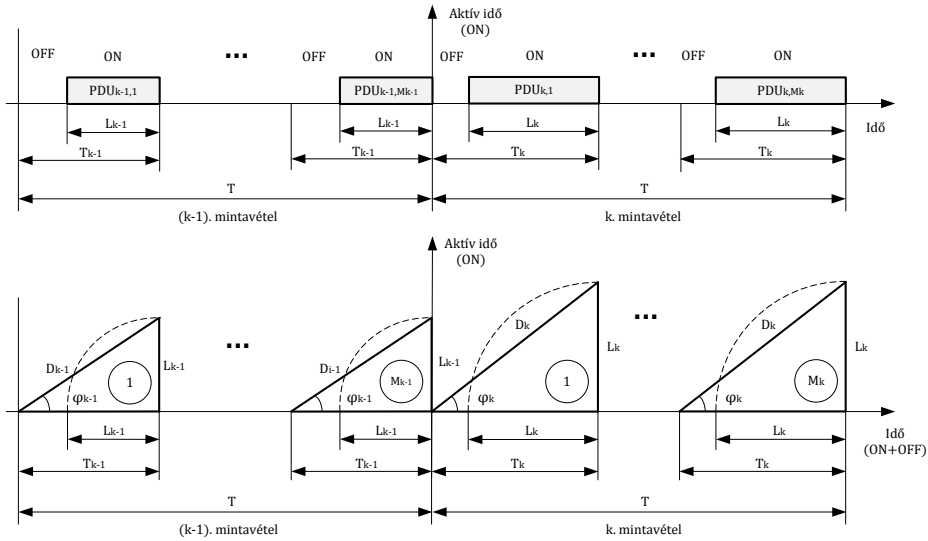
$$\tau = \xi_M T \quad (4.07)$$

Bizonyítás: Mivel a mintavételezési idő hibaaránya legtöbb a keretszám mintavételezési hibaaránya lehet, ezért $\frac{\Delta T}{T} \leq \xi_M$. A mintavételezési idő hibája éppen a mérési pontosság, így: $\frac{\tau}{T} \leq \xi_M$. A szükséges mérési pontosság az egyenlőség esetén valósul meg. ■

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

A jelenlegi mérőeszközök mérési pontossága $1 \mu\text{sec}$ nagyságrendű, így a 4.2 lemma szerint 1%-os intenzitásmérési hibaaránynál a mintavételezési periódus $T = \frac{\tau}{\xi_M} = 100 \mu\text{sec}$ minimális értéket ad.

Az idősor analízis megközelítési módszere miatt periodikus időközönként mintavételezünk ($T = \text{konstans}$). Addig, amíg a hagyományos idősor analízis esetén a T periódusidőben lejátszódó eseményeket pillanatszerűeknek idealizálják, addig az $ON/(ON + OFF)$ módszernél ezeket a T időtartamokban egyenletes eloszlású esemény sorozatoknak tekintjük. Az $ON/(ON + OFF)$ elemzési módszer keretében úgy tekintjük, hogy a k -adik mintavételezési periódusidőben egyenletes időközönként L_k , átlagos időtartamú keretek $M_k \in \mathbb{Z}$ intenzitással érkeznek (ld. 4.24. ábra.).



4.24. ábra. Az $ON/(ON + OFF)$ transzformáció paraméterei

Lemma 4.3. A k -adik mintavételezésnél a periódus idő (T), a keret intenzitás (M_k), az átlagos beérkezési időköz (T_k) és az átlagos keretküldési idő (L_k) között léteznek az alábbi összefüggések:

$$\left. \begin{aligned} T_k &= T_{OFF,k} + L_k \\ T &= M_k T_k \end{aligned} \right\}, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor \quad (4.08)$$

Bizonyítás: Mivel az (OFF, ON) állapot-párok ismétlődnek a mintavételezési periódusban, ezért az intenzitásnak megfelelő mennyiségű (OFF, ON) időtartam-pár adja a T periódusidőt. ■

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

Felhasználva a 4.24. ábra grafikus jelentését, újabb mennyiségeket definiálhatunk.

Definíció 4.3. A k -adik mintavételezési periódusban a csatorna fázisszöget (φ_k), illetve a komplex forgalmat (Z_k) az alábbi összefüggések definiálják:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k &= \tan^{-1} \left(\frac{L_k}{T_k} \right) \\ Z_k &= M_k + i \cdot \tan \varphi_k \end{aligned} \right\}, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor \quad (4.09)$$

ahol i a komplex egységgyök ($i^2 = -1$).

Lemma 4.4: A k -adik mintavételezési periódusban az *átlagos csatornaterhelést* az alábbi arány adja:

$$\text{Átlagos csatornaterhelés}_k = \frac{L_k}{T_k} = \tan \varphi_k \quad (4.10)$$

Bizonyítás: A k -adik T mintavételezési periódusidő alatt továbbított bájtok száma $\sum_{j=1}^{M_k} BwL_{k,j}$, míg az átvihető bájtmennyiség BwT . Felhasználva az átlagos keretküldési idő definícióját, valamint a (4.08) összefüggést, kapjuk:

$$\text{Átlagos csatornaterhelés}_k = \frac{\sum_{j=1}^{M_k} BwL_{k,j}}{BwT} = \frac{\sum_{j=1}^{M_k} L_{k,j}}{T} = \frac{M_k L_k}{T} = \frac{L_k}{T_k}$$

A (4.09) összefüggés alapján kapjuk, hogy az átlagos csatornaterhelés nem más, mint $\tan \varphi_k$. ■

Az $ON/(ON + OFF)$ transzformációval a

$$\left. \begin{aligned} \{\tan \varphi_k, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}, \text{ csatorna terhelés} \\ \{M_k \in \mathbb{Z}, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}, \text{ csatorna intenzitás} \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

idősor-párunk keletkezett. Ezek mértékegység nélküli, fizikai jelentéssel bíró mennyiségek, amelyek a (4.09) szerint a $\{Z_k, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}$, komplex idősorként egyben képesek leírni a pont-pont csatornán átfolyó adatforgalom minden jellemzőjét. Az $\{M_k \in \mathbb{Z}, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}$, csatorna intenzitás idősor párosítható bizonyos esetekben a $\{\varphi_k, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}$, csatorna fázisszög idősorral is. Ilyenkor egy másik komplex idősort kaphatunk:

$$W_k = M_k e^{i\varphi_k}, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor, \text{ ahol } i^2 = -1. \quad (4.12)$$

Fontos megjegyezni, hogy a csatorna fizikai paraméterei (átviteli ráta, közeg-hozzáférési algoritmus, stb.), valamint a T -mintavételezési periódus ismert értékek, amik alapján a hagyományos jellemzők (beérkezési időköz, beérkezett bájtmennyiség, stb.) a Z_k , vagy a W_k idősorokból egyaránt könnyen kiszámolhatók.

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

Lemma 4.5: A Z_k , komplex időmetrikára érvényesek az alábbi összefüggések:

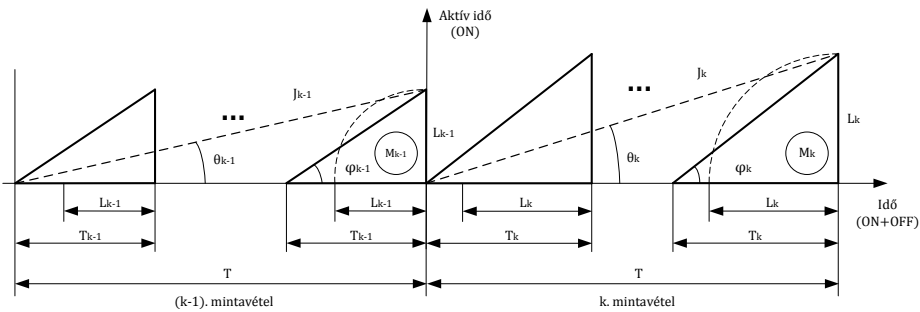
- a.) A φ_k fázisszög véges és a $\left[0, \frac{\pi}{4}\right)$ intervallumban veszi fel értékeit.
- b.) Az M_k intenzitás véges és a $\left[0, \frac{BwT}{8mtu}\right)$ intervallumban veszi fel értékeit.
- c.) Bármely k esetén $\varphi_k = 0$ akkor és csak akkor, ha $M_k = 0$.

Bizonyítás: a.) A (4.08) szerint $T_k = T_{OFF,k} + L_k$, ahol a csatorna átviteltechnikától függő holtidő mindig létezik és szigorúan pozitív, vagyis $T_{OFF,k} > 0, \forall k = 1, 2, \dots$. Így $0 \leq \frac{L_k}{T_k} < 1$, és ezért $\varphi_k \in \left[0, \frac{\pi}{4}\right), \forall k = 1, 2, \dots$ (ld. 4.24. ábra). b.) A (4.08) alapján $M_k = \frac{T}{T_k} = \frac{T}{T_{OFF,k} + L_k} < \frac{T}{L_k} \leq \frac{T}{\min_{j=1, \dots, M_k}(L_j)} \leq \frac{T}{\frac{8mtu}{Bw}}$. c.) Ha a k -adik mintavételezési periódusban $L_k > 0$, akkor $\varphi_k > 0$ és $M_k > 0$. Ha az átlagos keretküldési idő nulla, azaz $L_k = 0$, akkor $\varphi_k = 0$ és $M_k = 0$. Ha $\varphi_k = 0$, akkor az átlagos keretküldési idő nulla ($L_k = 0$), ezért $M_k = 0$. Ha $M_k = 0$, akkor az átlagos keretküldési idő nulla, ezért $\varphi_k = 0$. ■

A fenti tulajdonság azt is jelenti, hogy a $\{W_k, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}$ ponthalmaz az (M, φ) komplex tér első nyolcadának zárt területén helyezkedik el és a tengelyeket csak az origóban érintheti.

Definíció 4.4: A Z_k , komplex folyamat J_k , amplitúdóját a csatorna négyzetes átlagintenzitásának, míg a θ_k , fázisát a csatorna fajlagos fázisának nevezzük, ahol:

$$\left. \begin{aligned} Z_k &= J_k e^{i\theta_k} \\ J_k &= \sqrt{M_k^2 + (\tan \varphi_k)^2} = \frac{M_k}{\cos \varphi_k}, \quad k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor. \\ \tan \theta_k &= \frac{\tan \varphi_k}{M_k} \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$



4.25. ábra. A csatorna J_k , négyzetes átlagintenzitása és θ_k , fajlagos fázisa

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

Lemma 4.6: A csatorna fajlagos fázisának tangense a csatorna fajlagos terhelése, vagyis időegységre jutó átlagos aktivitási idő.

Bizonyítás: A (4.08) alapján $\frac{\tan \varphi_k}{M_k} = \frac{L_k}{T_k} \frac{1}{M_k} = \frac{L_k}{T}$, vagyis a $Z(t)$ valós és képzetes részének aránya nem más, mint az aktuális mintavételezési időtartamban számított átlagos aktív időtartam és a mintavételezési periódus idejének aránya (ld. 4.25. ábra.). ■

Megjegyzés: Úgy a fázisszög, mint az intenzitás felfogható egy-egy növekmény időszorként az alábbi módon:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k &= (\Phi_k - \Phi_{k-1}) - 2\pi, \Phi_0 = 0 \\ M_k &= F_k - F_{k-1}, F_0 = 0 \end{aligned} \right\}, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor, \quad (4.14)$$

ahol $\{\Phi_k = \sum_{j=1}^k (\varphi_j + 2\pi), k = 1, 2, \dots\}$, szigorúan növekvő, globális csatorna-fázisszög (lépcsős) idősor, illetve $\{F_k = \sum_{j=1}^k M_k \in \mathbb{Z}, k = 1, 2, \dots\}$ növekvő, PDU-darabszám idősor.

ON/(ON + OFF) transzformációval előállított folyamatok tulajdonságai

Elemezzük a jól ismert, hosszú memóriájú Bellcore (BC-pAug89¹) adatforgalom 300 másodperces, valamint a MAWI Wide-Transit (F200903311500²) adat-forgalom 30 másodperces részletét. Ezek alap jellemzőit a 4.7. Táblázat tartalmazza.

4.7. Táblázat: Elemzett klasszikus forgalmak alap jellemzői

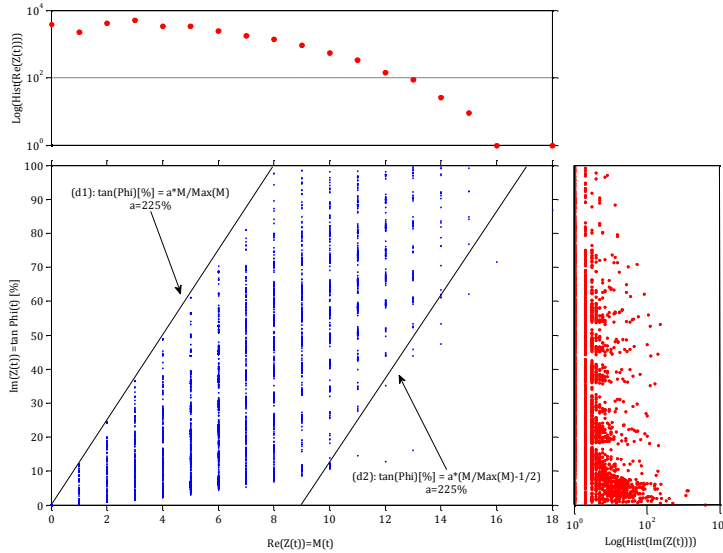
Adatsor neve	BC-pAug89	F200903311500
Mintavételezés helye	Bellcore Morristown Research and Engineering Laboratory, USA	Samplepoint-F, WIDE-TRANSIT link, Tokyo, Japan
Mintavételezés ideje	1989.08.29. 11:25-11:30	2009.03.31. 15:00:00-15:00:30
Mintavételezett keretek száma	115.888	622.944
Adatforgalom típusa	IP, LAN és WAN környezetben (0% HTTP)	IP, WAN környezetben (94% TCP, 6% UDP, 73% HTTP)
Kommunikációs csatorna típusa	IEEE 802.3, 10 Mbps	IEEE 802.3, 1000 Mbps
QoS típusa	"Best-effort"	"Best-effort"
Mintavételezési periódusidő (T)	10 ms	1 ms
Mérési pontosság (τ)	10 μ s	10 μ s
Csatornaintenzitás átlaga ($\bar{M}$)	3,86	20,76
Csatornaintenzitás szórása	1,67	10,72
Csatornaterhelés átlaga ($\tan(\varphi)$)	14,44 %	12,31 %
Csatornaterhelés szórása	4,43 %	10,43 %

¹ <http://ita.ee.lbl.gov/html/contrib/BC.html>

² <http://mawi.wide.ad.jp/mawi/samplepoint-F/20090330/200903311500.html>

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

A BC-pAug89 adatsorra $ON/(ON + OFF)$ módszerrel nyert $Z(t)$ komplex folyamatot, valamint a valós és képzetes részének hisztogramjait a 4.26. ábra mutatja.



4.26. ábra. A BC-pAug89 adatsor Z_k , komplex folyamata és annak hisztogramjai

A $Z(t)$ csatornaterhelésének hisztogramja csoportosulásokat mutat, ami azt jelenti, hogy bizonyos terhelés értékek nem, vagy csak nagyon ritkán jelennek meg. Ezt a jelleget az adatsor börsztössége okozza. Ugyanakkor a csatornaintenzitás hisztogramjának logaritmusra konkv parabola alakú, ami a csatornaintenzitás Gauss eloszlás eredetére utal. A BC-pAug89 adatsornál a $Z(t)$, komplex idősor egy jól beazonosítható tartományban helyezkedik el, amit az értékkészleten belül a (d_1) és (d_2) egyenesek határolnak be, azaz:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tan \varphi_k}{M_k} &\leq \frac{2,25}{\text{Max}\{M_k\}}, & \text{ha } M_k &\in \left[0, \frac{\text{Max}\{M_k\}}{2}\right] \\ \frac{\tan \varphi_k}{M_k} &\geq \frac{2,25}{\text{Max}\{M_k\}} \left(1 - \frac{\text{Max}\{M_k\}}{2M_k}\right), & \text{ha } M_k &\in \left(\frac{\text{Max}\{M_k\}}{2}, \text{Max}\{M_k\}\right] \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

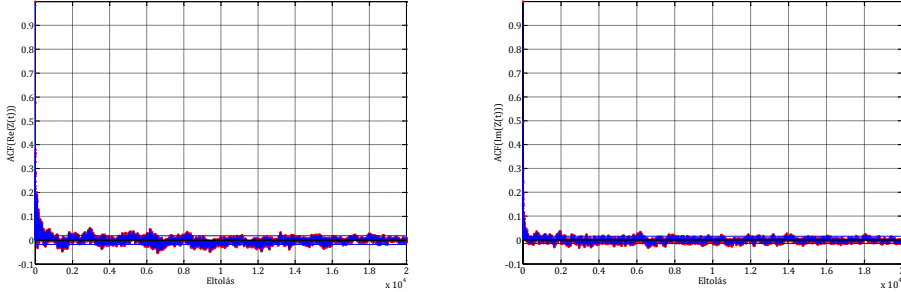
Felhasználva a (4.08) és a (4.10) összefüggéseket, kapjuk: $\frac{\tan \varphi_k}{M_k} = \frac{L_k}{T}$, vagyis a (4.15) alapján a BC-pAug89 adatsornál a csatorna fajlagos terhése korlátos, azaz:

$$a \left(\frac{1}{\text{Max}\{M_k\}} - \frac{1}{2M_k} \right) \leq \tan \theta_k \leq a \frac{1}{\text{Max}\{M_k\}} \quad (4.16)$$

ahol ebben az esetben $a = 2,25$ (ld. 4.26. ábra).

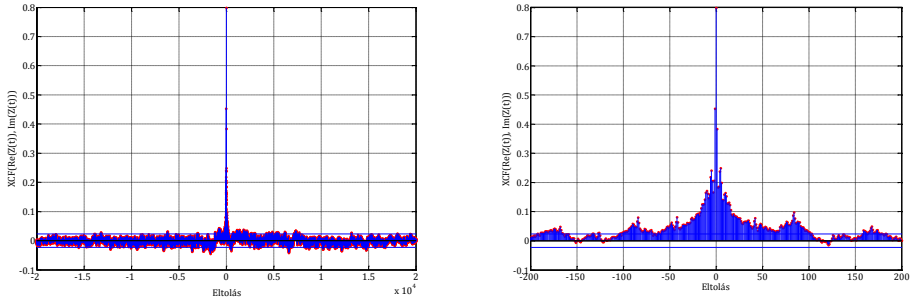
4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

A $Z(t)$, komplex folyamat valós ($M(t)$), illetve képzetes ($\tan \varphi(t)$) részének autókorrelációs függvényét a 4.27. ábra, míg a keresztkorrelációs függvényét a 4.28. ábra mutatja. A konfidencia intervallum esetünkben a szórás négyzerese.



4.27. ábra. A BC-pAug89 adatsor Z_k , komplex folyamata valós és képzetes részének autókorrelációs függvénye

Közímesrt, hogy a BC-pAug89 adatsor LRD tulajdonságú. Megfigyelhető, hogy a belőle előállított $Z(t)$, komplex folyamat valós és a képzetes részei is LRD tulajdonságúak, mivel az autókorrelációs függvény csak lassan (hiperbolikusan) cseng le, vagyis mindkét komponensnél $\sum_{k=0}^{\infty} r(k) \rightarrow \infty$.

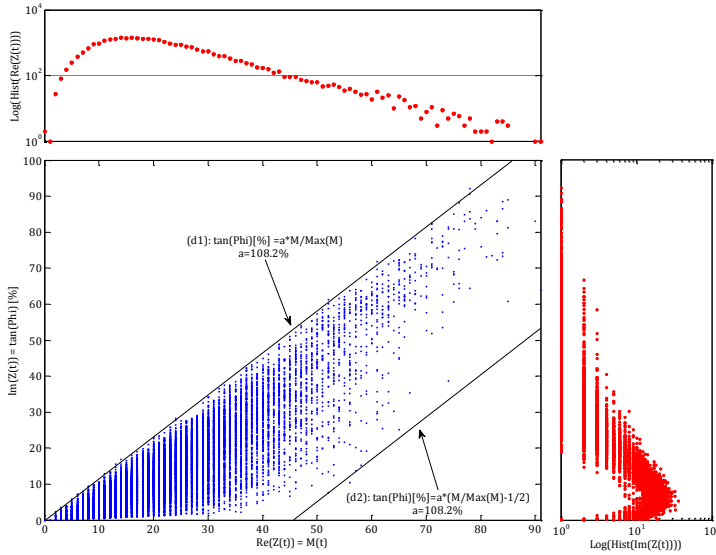


4.28. ábra. A BC-pAug89 adatsor Z_k , komplex folyamatának keresztkorrelációs függvénye $[-20.000, 20.000]$, illetve $[-200, 200]$ eltolás tartományokban

A keresztkorrelációs függvény alapján látható, hogy a valós és a képzetes rész erőteljesen korrelált 100-nál kisebb eltolás esetén, ami az 1 másodperces időkülönbségnek felel meg. Ugyanakkor, 1 másodpercnél nagyobb időköz esetén a két idősor korrelálatlan.

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

Az F200903311500 nevű adatsorból nyert $Z(t)$, komplex folyamat a 4.29. ábrán látható.



4.29. ábra. Az F200903311500 adatsor Z_k , komplex folyamata és annak hisztogramjai

Ebben az esetben is a $Z(t)$, komplex idősor az értékészleten belül egy jól beazonosítható tartományban helyezkedik el, amit a (d_1) és (d_2) egyenesek határolnak be:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tan \varphi_k}{M_k} &\leq \frac{1,082}{\text{Max}\{M_k\}}, & \text{ha } M_k \in [0, \text{Max}\{M_k\}] \\ \frac{\tan \varphi_k}{M_k} &\geq \frac{1,082}{\text{Max}\{M_k\}} \left(1 - \frac{\text{Max}\{M_k\}}{2M_k}\right), & \text{ha } M_k \in \left(\frac{\text{Max}\{M_k\}}{2}, \text{Max}\{M_k\}\right] \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

Hasonlóan a (4.16) összefüggéshez, az F200903311500 adatsor esetén is a csatorna fajlagos terhése korlátos, azaz:

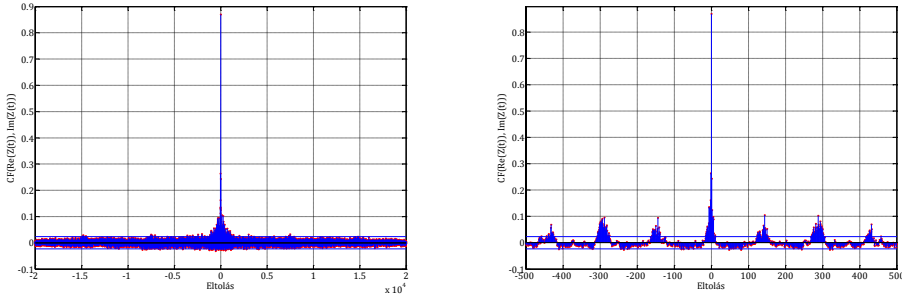
$$a \left(\frac{1}{\text{Max}\{M_k\}} - \frac{1}{2M_k} \right) \leq \tan \theta_k \leq a \frac{1}{\text{Max}\{M_k\}}, \quad (4.18)$$

ahol ebben az esetben $a = 1,082$ (ld. 4.29. ábra).

A F200903311500 adatsor $Z(t)$, komplex folyamatának kereszt korrelációs függvénye (ld. 4.30. ábra.) alapján megfigyelhető, hogy a valós és a képzetes rész erőteljesen korrelált, ha az eltolás 20-nál kisebb (20 msec), valamint a 145 (145 msec) egész számú többszöröseinél. Mivel több ezer párhuzamos kapcsolat

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

működött a japán WAN link-en, ezért a 145 msec-os periodicitást a meghajtó router queue menedzsmentje okozta. Nagyobb időköz esetén (1 sec), a két összetevő idősor korrelálatlan, ami azt jelenti, hogy a WAN router kevesebb, mint 1 másodperc alatt tudta processzálni a több ezer átmenő forgalom mindegyikének csomagjait. A Bellcore adatokkal való összehasonlíthatóság miatt a konfidencia intervallum jelen esetben is a szórás négyszerese.



4.30. ábra. A BC-pAug89 adatsor Z_k , komplex folyamatának keresztkorrelációs függvénye $[-20.000, 20.000]$, illetve $[-200, 200]$ eltolás tartományokban

A továbbiakban a $Z(t)$, komplex folyamat valós és képzetes LRD tulajdonságú összetevő idősorainak skálafüggőségét vizsgáljuk wavelet módszerrel és meghatározzuk azok Hurst paraméterét. Minden esetben a Daubechies3 any wavelet-et alkalmazzuk, amely a (3.315) alapján rendelkezik az alábbi tulajdonsággal:

$$\int t^k \psi_0(t) dt = 0, \quad k = 0, 1, 2.$$

Az $X(t)$, $t \in \mathbb{Z}$ idősor részletes (detailed) wavelet együtthatóit az alábbi összefüggés segítségével számoljuk ki a j -skála és a $2^j k$ -időpillanatban:

$$d_{j,k} = \int X(s) \psi_{j,k}(s) ds, \quad j \in \mathbb{Z}, k \in \mathbb{Z},$$

ahol $\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi_0(2^{-j}t - k)$. Ezáltal az $X(t)$ idősor wavelet felbontása az $X(t) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{j,k} \psi_{j,k}(t)$ alakú lesz. LRD folyamatnál a (3.76) és (3.77) összefüggések szerint az energia függvény a j -oktáv exponenciális függvénye:

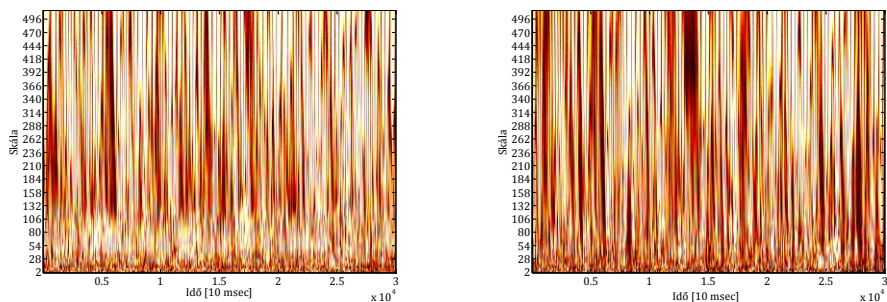
$$Energia_j = \mu_j \triangleq \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} |d_X(j, k)|^2 \approx 2^{j(2H-1)},$$

ahol $n_j = \lfloor 2^{-j}n \rfloor$, n az idősor hossza ($n = \lfloor t/T \rfloor$) és H a Hurst kitevő. A 2-LD diagram lineáris szakaszának dőléséből számoljuk ki a $\hat{H}$, becsült Hurst paramétert. A 2-LD diagram lineáris szakaszának végén lévő $[j_1, j_2]$, oktáv értékek adják az $X(t)$

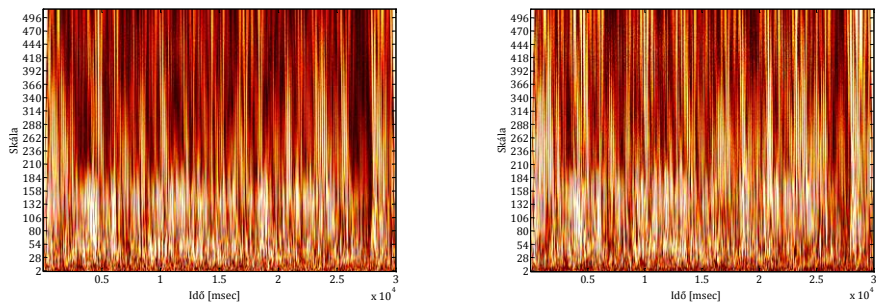
4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

folyamat $[2^{j_1}T, 2^{j_2}T]$, skálafüggetlen időintervallumát is, ahol T a mintavételezési periódusidő.

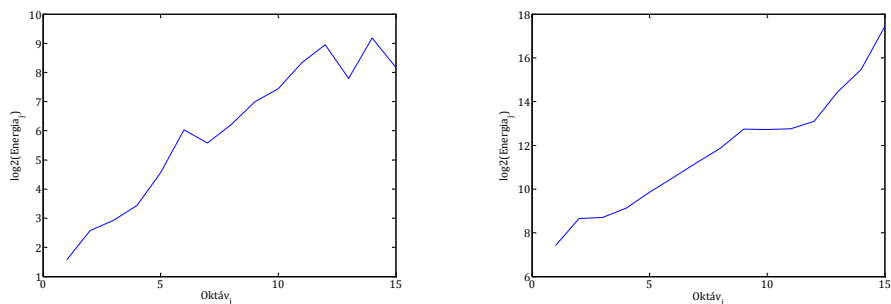
A BC-pAug89, illetve F200903311500 folyamat komponenseinek „scalogram”-ját a 4.31. és a 4.32. ábrák, míg a 2-LD diagramokat a 4.33. és a 4.34. ábrák mutatják.



4.31. ábra. A BC-pAug89 adatsor $M(t)$ -csatornaintenzitás, illetve $\tan \varphi(t)$ -csatornaterhelés idősorainak „scalogram”-ja



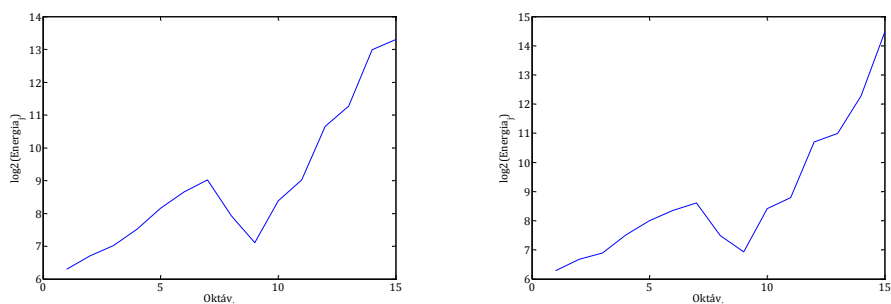
4.32. ábra. Az F200903311500 adatsor $M(t)$ -csatornaintenzitás, illetve $\tan \varphi(t)$ -csatornaterhelés idősorainak „scalogram”-ja



4.33. ábra. A BC-pAug89 adatsor $M(t)$ -csatornaintenzitás, illetve $\tan \varphi(t)$ -csatornaterhelés idősorainak 2-LD diagramja

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

Mindkét adatfolyam esetén az erős koreláció miatt a csatornaintenzitás és a csatornaterhelés idősorok “scalogram”-ja nagyon hasonlít egymásra.



4.34. ábra. Az F200903311500 adatsor $M(t)$ -csatornaintenzitás, illetve $\tan \varphi(t)$ -csatornaterhelés idősorainak 2-LD diagramja

A tanulmányozott két adatsor becsült Hurst paramétereit a 4.8. Táblázat tartalmazza, amit az energia logaritmusa görbéjének iránytényezőjéből a legkisebb négyzetek módszerével határoztunk meg. A BC-pAug89 adatsor két komponensének 2-LD diagramja szignifikánsan eltér egymástól, ezért a becsült Hurst kitevő is különbözik. A nagyobb energiát szállító komponens kevésbé LRD tulajdonságú (ld. 4.30. ábra.). Ezt azzal lehet magyarázni, hogy 1989-ben a Bellcore cég LAN/WAN forgalmának jelentős részét a TCP-n alapuló SMTP protokoll jelenthette, ami az alacsonyan terhelt 10 Mbps-os Ethernet csatornán “Best-effort”, QoS nélküli módon rövid PDU-kban leveleket és adatokat továbbított, emiatt az összforgalom egy meghatározó részét a jelzésrendszer forgalma okozta.

Az F200903311500 folyamat két komponensének becsült Hurst kitevője csak a harmadik tizedjegynél különbözik. Ennél a WAN kapcsolaton 2009-ben mintavételezett adatfolyamnál a forgalom 73%-a TCP-n alapuló HTTP volt, ami meghatározta az adatfolyam jellegét. Mivel a HTTP a hatékonyság miatt a web oldalak objektumait nagyméretű üzenetekben küldi, ezért az adatkapcsolati szinten mintavételezett Ethernet keretek jelentős része is az MTU-val azonos méretű volt. A kiértékelés alapján a rendelkezésre álló 1000 Mbps-os Ethernet csatorna még így is alacsony terhelésnek volt kitéve, ami a “Best-effort”, QoS nélküli üzemmódot feltételezi. A 2-LD ábrák multifraktál tulajdonságot mutatnak mindkét komponens esetén. A (3.80) leképezés alapján a skálafüggetlen intervallumok a [1 msec, 128 msec], illetve a [256 msec, 30 sec] lesznek.

4.8. Táblázat: Wavelet módszerrel becsült Hurst paraméterek ($\hat{H}$)

	BC-pAug89	F200903311500
Csatornaintenzitás, $M(t)$	0,5342	0,7367
Csatornaterhelés, $\tan \varphi(t)$	0,7686	0,7375

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

A fentiek alapján az adatfolyam jellemzéséhez az $ON/(ON + OFF)$ elemzési módszer alkalmas, és mennyiségi mutatók segítségével képes az LRD és a fraktál tulajdonságokat kimutatni.

Tézis_3 összefoglalása, megállapítások

- i.) A hálózati adatforgalom elemzéséhez alkalmazható az $ON/(ON + OFF)$ módszerrel előállított Z_k -komplex folyamat:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k &= \tan^{-1} \left(\frac{L_k}{T_k} \right) \\ Z_k &= M_k + i \cdot \tan \varphi_k \end{aligned} \right\}, k = 1, 2, \dots, [t/T], i^2 = -1,$$

ahol az T -mintavételezési periódusidő, M_k -csatornaintenzitás és a $\tan \varphi_k$ -csatornaterheltség komponensek szemléletes, fizikai jelentéssel bíró mennyiségek.

- ii.) QoS nélküli hálózati környezetben, ha az alapfolyamat LRD, akkor $ON/(ON + OFF)$ módszerrel előállított Z_k -komplex folyamat valós és képzetes komponensei is LRD tulajdonsággal rendelkeznek, miközben közöttük erős koreláció létezik.
- iii.) A hálózati forgalmak jellemzéséhez az $ON/(ON + OFF)$ módszerrel előállított mindkét komponens szükséges, mivel csak ezek együttesen képesek megfelelő részletességgel információt szolgáltatni a fizikai folyamatról. A módszer a "Best-effort" üzemmódtól eltérő, QoS mechanizmusok elemzésére is alkalmas.
- iv.) Az $ON/(ON + OFF)$ módszer a wavelet transzformáció miatt rövid idősorokból is meg tudja határozni a Hurst exponenst. Ez előnyt jelent a gyakorlatban a produkciós forgalom fraktál jellegű jellemzőinek valós időben történő meghatározásánál.

Tézis_3 témájában készült saját és társszerzős publikációk

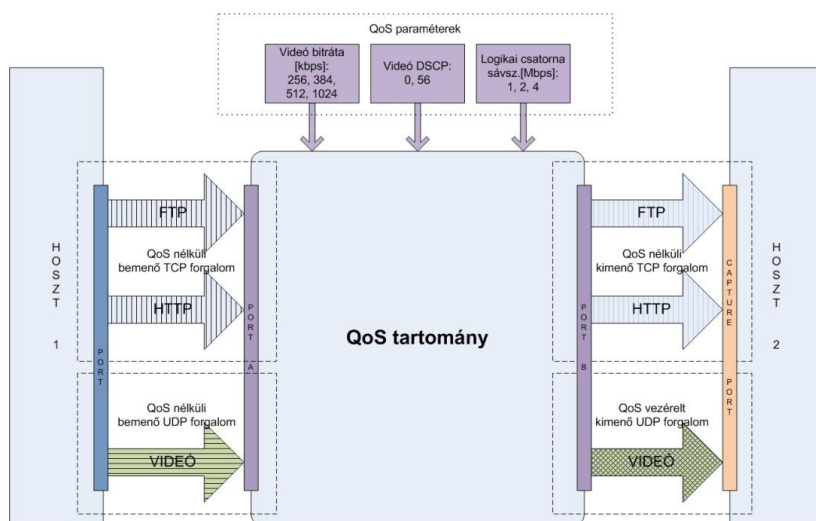
1. Zoltán Gál (2009): VoIP LAN/MAN traffic analysis for NGN QoS management, *Infocommunications Journal*, Volume LXIV, ISSN:0866-5583, pp. 22-29.
2. Gál Zoltán (2008): NGN szolgáltatások sávszélesség-menedzsmentje LAN/MAN környezetben, *Híradástechnika*, Volume LXIII., ISSN:0018-2028, pp. 29-36 (in Hungarian).

4.3. A QoS mechanizmusok hatása a valós idejű és egyéb forgalmakra

Torlódás nélküli, illetve torlódásos környezetben, QoS-sel vezérelt mechanizmusok hatását elemeztem $ON/(ON + OFF)$ módszerrel és ezáltal az egyes forgalmak és hálózati környezetek viselkedésének jellemzőit mutattam meg.

Tézis 4: A QoS hatása az IP streaming típusú videó forgalomra

A DiffServ QoS mechanizmusoknak az OSI L2 és L3 rétegekben kifejtett hatását vizsgáltuk meg egyetlen QoS tartományon belül, szabályozott paraméterek segítségével, H.261 és H.264 videó codec alkalmazása mellett. A Hoszt1 géptől a Hoszt2 gép felé egy időben TCP, illetve UDP forgalmat generáltunk. A TCP FTP és HTTP letöltéseket, míg az UDP interaktív videó átvitelt végeztünk. A mérési környezetet a 4.35. ábra mutatja.



4.35. ábra. A QoS tartomány és mérési környezete

Mivel az FTP és a HTTP protokollok az Ethernet $MTU = 1500$ bájt méretnél hosszabb IP csomagokkal forgalmaztak, ezeknél a hálózati rétegbeli PDU-knál fragmentáció lépett fel.

A mérésnél alkalmazott paramétereket a 4.9. Táblázat tartalmazza. A köztes hálózati eszközökben a DSCP értékét fragmentum csomagoknál nem lehetséges

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

kezeln, ezért a TCP forgalom „Best-effort” ($DSCP = 0$) szerinti mechanizmus mellett zajlott. A videokonferencia UDP forgalom minden csomagja elér egy-egy Ethernet keretben, így ennek prioritását a TCP forgalom prioritása fölé lehetett emelni az UDP szegmenseket szállító IP csomagoknál azáltal, hogy $DSCP = 56$ értéket kapott. A Hoszt1 a lehető legnagyobb rátával küldi a videót a QoS tartományba, ez azonban a forrásnál alkalmazott szoftver (Marratech) konfigurálhatósága miatt esetünkben legfeljebb 1024 kbps lehetett.

4.9. Táblázat: A QoS mérési adatsorok paraméterei

Paraméter	Értékek
Videó bitráta [kbps]	256, 384, 512, 768, 1024
Videó kódolási algoritmus	H.261, H.264
Videó adatfolyam DSCP értéke	0, 56
Csatorna sávszélessége [Mbps]	1, 2, 4
Adatkapcsolat	IEEE 802.3 10 Mbps (Full Duplex)

A Hoszt2 csomópontnál külön a TCP, és külön az UDP hálózati forgalom mérése TCPDump program segítségével történt. QoS tartományon belül a videó bitrátát és annak prioritását a Port_A, míg az UDP és a TCP forgalom számára közösen rendelkezésre álló csatorna kimeneti sávszélességét a Port_B pontokban szabályoztuk. A Port_B sávszélességét interfész szintű globális QoS paraméterrel befolyásoltuk. Külön a TCP és külön az UDP forgalmakra az L2 keretek méretét és beérkezési időpontját rögzítettük. Egy mérés 60 sec ideig tartott, összesen 60 darab különböző mérés készült. Minden egyes mérésnél ugyanazt a műsort forgalmaztuk a két hoszt között. A VRB (Variable Bit Rate) videó streaming-hez az első harminc mérés esetén a forrásnál H.261, a továbbiaknál H.264 codec-et használtunk. A mintavételező szoftver segítségével a TCP és az UDP részfolyamokat szétválasztottuk, amit $\{T_{abc}\}$, illetve $\{U_{abc}\}$ jelölünk. QoS paramétertől függően az abc indexek ($abc \in \{101, 102, 104, \dots, 454\}$) a 4.10. Táblázat szerinti mérési feltételeket jelentik. Így például az $abc=454$ index a H.264 codec, $DSCP=56$ érték és Port_B csatorna bitráta=4 Mbps feltételek melletti mérést azonosítja.

4.10. Táblázat: Adatsorok QoS mérési feltételei

Codec típusa	a-index	DSCP érték	b-index	Csatorna ráta	c-index
H.261	1	0	0	1 Mbps	1
H.264	4	56	5	2 Mbps	2
				4 Mbps	4

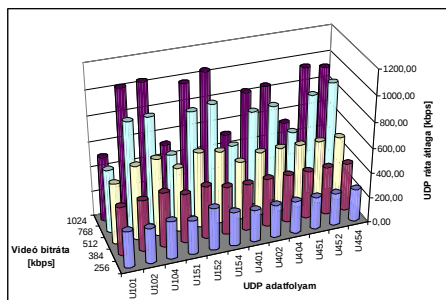
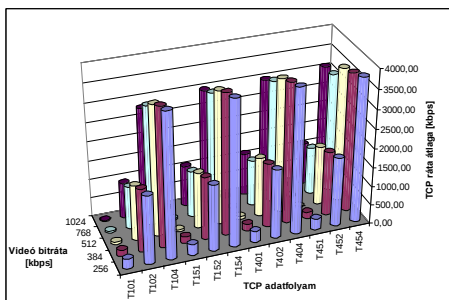
a.)

b.)

c.)

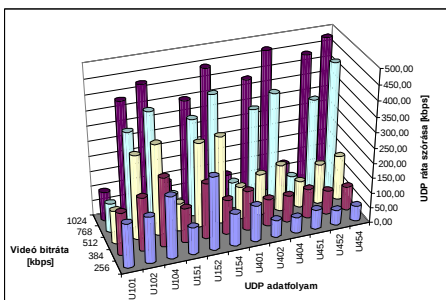
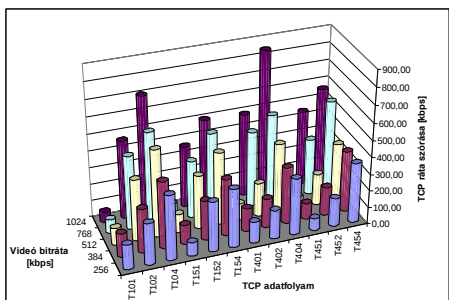
Adott halmaz elemeit Bw kbps videó bitráta ($Bw \in \{256, 384, 512, 768, 1024\}$) értékek mellett mértük. A halmaz minden eleme egy-egy idősor, ahol a mintavételezési periódus $T = 100$ msec volt, a mérés pontossága pedig $\tau = 10$ μ sec. A fenti 120 darab idősor alap jellemzőit elemeztük (bitráta átlaga, bitráta szórása, bitráta ferdesége), valamint $ON/(ON + OFF)$ módszer segítségével a komplex adatfolyamok LRD és fraktál tulajdonságait.

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek



4.36. ábra. A TCP és az UDP részfolyamok bitrátájának átlaga

A TCP és az UDP “best-effort” feltételű forgalmak (b=0 indexű halmazok) továbbítása esetén a különböző adatfolyamok átlagosan kitöltik a rendelkezésre álló sávszélességet, és mindegyik alkalmazás működik. QoS segítségével történő videó bitráta növelése miatt az FTP és a HTTP forgalmak átlagát a TCP protokoll automatikusan visszaszabályozta.



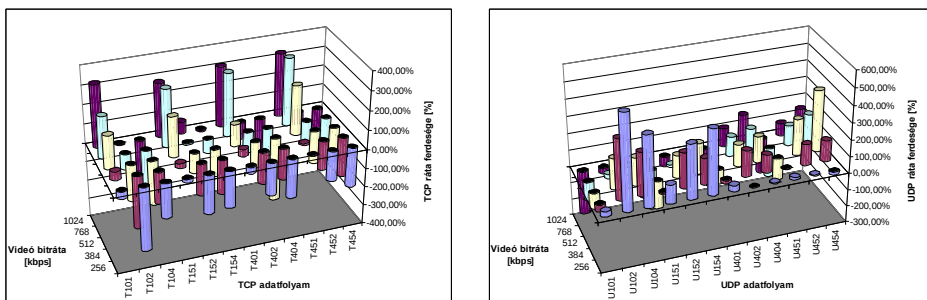
4.37. ábra. A TCP és az UDP részfolyamok bitrátájának szórása

A H.261 codec a H.264-hez képest átlagosan több UDP adatot képes továbbítani annak ellenére, hogy régebbi algoritmus. Ennek oka, hogy a rendelkezésre álló videó bitráta nem haladja meg az 1024 kbps értéket, ami alatt a H.264 nem működik optimálisan. A forgalmak bitrátájának szórása azt mutatja, hogy nagyobb rátánál növekszik a szórás is, viszont alacsony videó bitráta esetén a H.264 codec kevesebbet szór, mint a H.261. 4 Mbps csatorna esetén a T104 és T404 erőteljesen szór, ha a videó bitrátája 1 Mbps értékű. Ez azt jelenti, hogy a videó legjobb minősége esetén a TCP a maradék 3 Mbps sávszélességen egyre inkább borsztösíti az adatátvitelét.

A bitráta ferdesége azt mutatja, hogy a periodogram a súlyvonalához képest balra (negatív) vagy jobbra (pozitív) ferdül el. Negatív ferdeség azt jelenti, hogy az átlagos bitrátánál sokszor kisebb a forgalom, viszont a forgalomban ritkábban borsztös jelenségek léteznek. A pozitív ferdeség azt mutatja, hogy az átlagos bitrátánál gyakran nagyobb a forgalom, de csak kis mértékben, és léteznek hosszabb időszakok, amikor az átvitel szünetel. A TCP bitrátája csak 768 kbps-nál

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

nagyobb videó bitráta beállítás esetén pozitív ferdeségű, a többi esetben negatív (ld. 4.38 ábra.). Az UDP bitrátája ezzel ellentétben csak a H.261 codec és magas videó bitráta esetén negatív ferdeségű, a többi esetben pozitív, sőt alacsony videó bitráta esetén képes megközelíteni az 500%-ot is.



4.38. ábra. A TCP és az UDP részfolyamok bitrátájának ferdesége

A mérési környezetben a TCP “Best-effort” és az UDP QoS vezérlése ($b=5$ idősorok) esetén a bitráták átlagának grafikonja (ld. 4.36 ábra.) nem teszi lehetővé a homogén “Best-effort” jellegű forgalmaktól való különbségtételt annak ellenére, hogy a tapasztalt videó minősége lényegesen eltér egymástól a QoS jelenléte, illetve hiánya esetekben. A TCP a saját forgalomszabályozása (“Slow start”, illetve “Windowing” algoritmusok) miatt mindig a maradék rendelkezésre álló sávszélességet használja ki. Az UDP a TCP-hez viszonyítva csak 50%-os bitráta szórását okoz, azonban az 1 Mbps-os ($c=1$ síkok) UDP, a 2 Mbps és 4 Mbps UDP csatornákkal ellentétben a videó bitráta növelésével csökkenti a szórását. Erre az a magyarázat, hogy nagyon alacsony csatorna sávszélességnél a TCP radikálisan csökkenti a forgalmát, így a videó továbbítása kevésbé borsztösen valósul meg. A H.264 relatív szórása független a QoS-tól és növekszik a videó bitrátával, ami a H.264 codec dinamikusabb működését igazolja. A TCP bitráta ferdeségére nincs hatással a videó QoS beállítása, mivel a TCP mindig a maradék sávszélességet használta fel. Az UDP bitráta ferdeségét a QoS beállítások kis mértékben csökkentik, de még mindig a pozitív tartományban tartják.

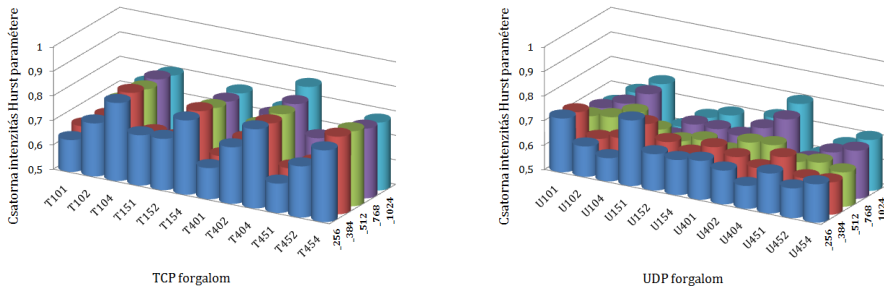
Az $ON/(ON + OFF)$ módszerrel előállított komplex folyamatok az alábbiak:

$$\left. \begin{array}{l} (Z_k^{T,p}), \text{ a TCP részforgalmakra} \\ (Z_k^{U,p}), \text{ az UDP részforgalmakra} \end{array} \right\}, p = 1, 2, \dots, 60, k = 1, 2, \dots, [t/T]$$

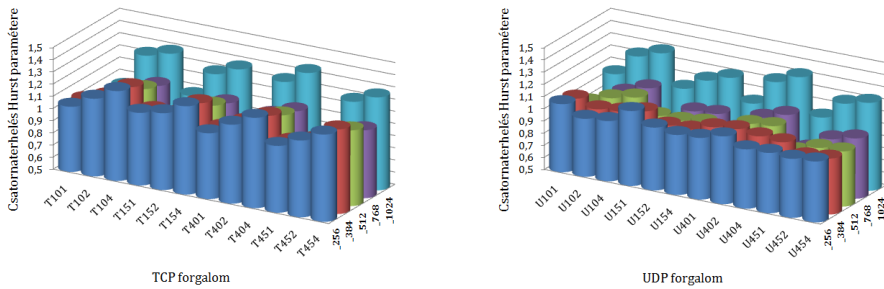
Az $ON/(ON+OFF)$ módszerrel becsült Hurst paramétereket ($\widehat{H}_M, \widehat{H}_{\tan \varphi}$) a 4.39-4.40. ábrák mutatják. Keressük a választ, hogy a Hurst paraméter értékét milyen tényezők befolyásolják. Megfigyelhetjük, hogy az csatorna intenzitás becsült Hurst paramétere úgy a TCP, mint az UDP esetében, $\widehat{H}_M \in (0,55; 0,90)$, vagyis LRD

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

tulajdonságú. TCP adatforgalomnál az 1 Mbps-os csatorna ráta $\widehat{H}_M \in (0,55; 0,65)$, Hurst paramétert ad, míg 4 Mbps-os csatorna rátánál $\widehat{H}_M \in (0,8; 0,88)$, és a 2 Mbps-csatorna rátánál a $\widehat{H}_M$ is köztes értékeket vesz fel. Ez alapján kijelenthető, hogy a TCP forgalom csatorna intenzitásának Hurst paramétere egyenesen arányos a csatorna rátával. Az is megfigyelhető, hogy a videó forgalom rátája függvényében fordítottan arányos a $\widehat{H}_M$. A TCP forgalom „Best Effort” mechanizmus mellett történő továbbítása kevésbé függ a videó forgalom QoS mechanizmusától (ld. 4.39. ábra.). Mindezt a TCP „Windowing” és „Slow start” mechanizmusa okozza. Az UDP forgalom csatorna intenzitásának $\widehat{H}_M$ paramétere alacsonyabb értékeket ad, mint az azzal egyidőben továbbított TCP forgalomra (ld. 4.39 ábra.). Megfigyelhető, hogy a videó codec típusa gyakorlatilag nem befolyásolja a $\widehat{H}_M$ értékét sem a TCP, sem az UDP forgalmaknál.



4.39. ábra. A csatornaintenzitás becsült Hurst paraméterei, $\widehat{H}_M$

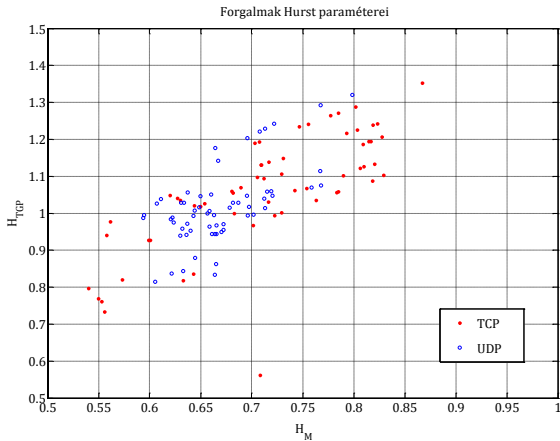


4.40. ábra. A csatornaterhelés becsült Hurst paraméterei, $\widehat{H}_{\tan \varphi}$

A csatornaterhelés úgy a TCP, mint az UDP esetén bizonyos esetekben értelmezhetelen, azaz $\widehat{H}_{\tan \varphi} > 1$ értéket ad. Ez azt jelenti, hogy a csatornaterhelés nem stacionárius folyamat ilyenkor. Ezt a nemstacionaritást a 4.40 ábra alapján a nagyon alacsony (256 kbps) és a magas (1024 kbps) rátájú videó forgalmak esetén mindenhol megfigyelhetjük, kivéve az 1024 kbps-os videó és 1 Mbps-os csatorna ráta feltételeknél. Ezekben az esetekben a csatornaterhelés LRD tulajdonságú. Ez azt jelenti, hogy torlódás esetén a QoS megszűnteti a csomakapcsolt hálózat

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

forgalmának stacionarius jellegét, így SS és LRD hatások nem érvényesülhetnek. Láthatjuk, hogy $\widehat{H_{\tan \varphi}}$ UDP forgalomra általában kisebb, mint a TCP forgalomra. Addig, amíg 384...768 kbps-os videó rátánál a TCP forgalom csatornaterhelése nem stacionárius, addig az UDP forgalomnál $\widehat{H_{\tan \varphi}}$ nagy, de még egység alatti értéket ad, azaz LRD tulajdonságú. A videó codec típusára itt is érvényes, hogy nem befolyásolja a csatornaterhelés Hurst paraméterét.



4.41. ábra. Egyidejű TCP (adat) és az UDP (hang) forgalmak becsült Hurst paramétereinek viszonya

A 4.41. ábra alapján kijelenthető, hogy egyidejű UDP és TCP forgalmak továbbításánál az UDP protokoll a csatornaintenzitás-csatornaterhelés Hurst paraméterek terében kisebb ($\widehat{H_M}, \widehat{H_{\tan \varphi}}$) koordinátákkal rendelkező pontokat generál, mint a TCP.

4.11. Táblázat: A videó minőségének véleményérték (OS) metrikája

Dinamika	Darabosság	Átlapoltság	Színhűség	Értelmezhetőség	Véleményérték (OS)
Álló	Nagyon	Igen	Nem	Nem	1
Akadozó	Nagyon	Igen	Nem	Nem	2
Akadozó	Közepes	Igen	Nem	Kevésbé	3
Akadozó	Közepes	Igen	Nem	Közepes	4
Akadozó	Közepes	Igen	Nem	Közepes	5
Mozgó	Kevésbé	Nem	Nem	Közepes	6
Mozgó	Nem	Nem	Nem	Közepes	7
Mozgó	Nem	Nem	Nem	Elfogadható	8
Mozgó	Nem	Nem	Nem	Jó	9
Mozgó	Nem	Nem	Igen	Nagyon jó	10

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

A felhasználók elégedettségi szintjét az [1-5] skálán mérő, MOS (Mean Opinion Score) mennyiséghez hasonlóan, az [1-10] tartományban értelmezett komplex véleményérték (OS–Opinion Score), saját mennyiséget vezettünk be annak érdekében, hogy a videó műsor minőségét globálisan számszerűsítsük. Öt alapvető minőségi szempontot javasolunk a komplex metrika kialakításához, amelyeket a 4.11. Táblázat tartalmazza.

Az OS-globális véleményértéket és a hozzá tartozó videóműsor összerendelést a 4.12. Táblázat mutatja. Az így összeállított megfeleltetés lehetővé teszi a videó műsor minőségének számszerű értékelését és kategóriákba sorolását is. Alacsony OS értékek alacsony minőséget, nagy OS értékek magas minőséget képviselnek.

4.12. Táblázat: Az OS-véleményérték és a videó minőségének összerendelése

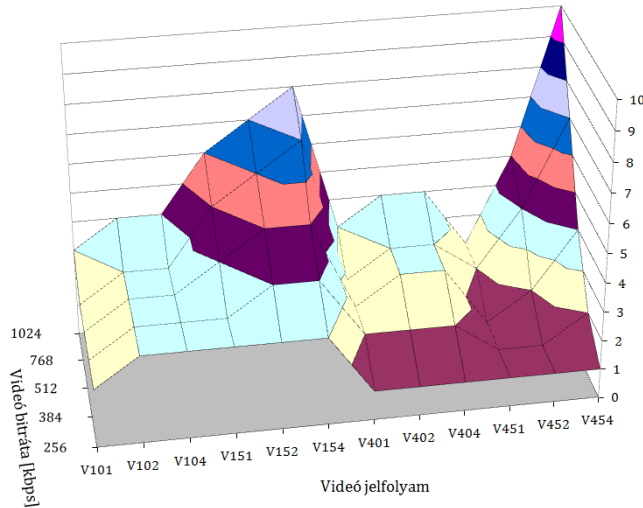
				
OS = 01	OS = 02	OS = 03	OS = 04	OS = 05
				
OS = 06	OS = 07	OS = 08	OS = 09	OS = 10

A különböző ráták mellett QoS paraméterekkel szabályozott videó jelfolyamok ($\{V_{abc}\}$, $abc \in \{101, 102, 104, \dots, 454\}$) egymáshoz viszonyított véleményértékét (OS) a 4.39. ábra mutatja be. Megfigyelhető, hogy TCP és UDP szegmenseket szállító vegyes terhelésű hálózaton a videó átvitel erőteljesen függ a QoS beállításoktól.

A homogén “Best-effort” módszer szerinti forgalom-továbbítás megosztja az erőforrásokat a különböző adatfolyamok között, míg a QoS mechanizmus alacsony csatorna sávszélességnél a valós idejű alkalmazásokat megszakítja, mivel az erőforrás mennyiség nem elégséges a garantált időzítéskehez. A valós idejű jelfolyam sávszélesség igényét meghaladó rátájú csatorna esetén a QoS erőteljesebb különbséget tesz az eltérő típusú adatfolyamok között. A videó kapcsolat kielégítően jó minőségű átviteléhez végponttól-végpontig minimum 1 Mbps-ra van szükség. Alacsony sávszélességen a H.261 codec jobb minőséget ad, mint a H.264, viszont utóbbi képes akár HDTV minőségű műsor továbbítására is 2 Mbps-nál nagyobb sebességű összeköttetés esetén. QoS mechanizmus működtetése mellett

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

jelentős minőségi ugrást az 500 kbps-nál nagyobb sebességű adatkapcsolat esetén tapasztalhatunk, amit a felhasználók véleményének az OS skála felső tartományban való elhelyezkedése tükröz.



4.42. ábra. A mért videóforgalmak véleményértéke (Opinion Score)

A csatornaintenzitás, illetve csatornaterhelés folyamatok egyidejű TCP, illetve UDP forgalmainak Hurst paramétere, valamint az OS értékek között kapcsolat csak nehezen fedezhető fel. Csak az 1024 kbps-os videó rátánál továbbított videó (ld. 4.39. és 4.42. ábrák.) esetben figyelhető meg korreláció a $\widehat{H}_M$ és az OS között. Ez azt jelenti, hogy csak

Tézis_4 összefoglalása, megállapítások

- i.) A Diffserv QoS mechanizmus jelenléte a szolgáltatói hálózatban jelentősen megváltoztatja az Interneten hagyományosan működő hálózati alkalmazások viselkedését, amelyet az $ON/(ON + OFF)$ módszerrel előállított komplex folyamat érzékelni is mérni tud. Az egyidejű TCP és UDP forgalmak csatornaintenzitás és csatornaterhelés idősorainak a Hurst paraméterei a különböző QoS feltételek mellett korrelálatlanok.
- ii.) Azonos csatornán egyidőben Diffserv QoS mechanizmussal szabályozott UDP forgalom, valamint QoS nélküli, "Best Effort" módon továbbított TCP forgalom csatornaintenzitás idősorai LRD tulajdonságúak, míg a

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

csatornaterhelés idősor stacionaritása megszűnik mindkét szállítási rétegbeli protokoll számára.

- iii.) Torlódásos környezetben a Diffserv QoS mechanizmus által prioritással kezelt VBR streaming videóforgalom (UDP) egyenletesebb adatfolyamot okoz, míg a "Best-effort" módon továbbított TCP forgalom a maradék hálózati erőforráskészlet csak egy részének kihasználására képes. QoS nélküli torlódásos környezetben az UDP alapú VBR streaming videó működésképtelenné válik.

Tézis_4 témájában készült saját és társszerzős publikációk

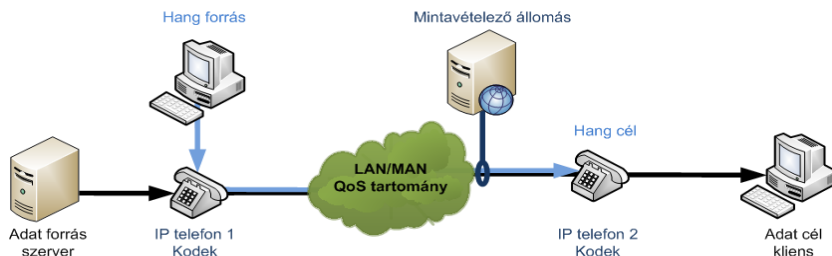
1. Gál Zoltán, Balla Tamás (2007): A QoS hatása az infokommunikációs alkalmazásokra, *Híradástechnika*, Volume LXII., ISSN:0018-2028, pp. 7-16 (in Hungarian).
2. Zoltán Gál, Tamás Balla (2007): Statistical Aspects of Network Based Real-time Group Communication and Collaboration Services, *7th International Conference on Applied Informatics, Eger-Noszvaj - Conference Proceedings*, Volume 2, Hungary, 28-31 January, 2007, pp. 343-351.

Tézis 5: A QoS hatása az IP hangforgalomra

A QoS Baseline modell (ld. 2.4 ábra.) legkritikusabb forgalom a valós idejű, interaktív hang, amely továbbításának statisztikai jellemzőit ON/(ON+OFF) módszerrel elemezzük és meghatározzuk a minőséget befolyásoló tényezőket. Ehhez két scenáriót vizsgálunk: a.) torlódásos környezetben továbbított hang, illetve b.) torlódásmentes VoIP gerinckapcsolat. Mindekét esetben figyelembe vesszük a hang kódolását és dekódolását végző codec típusát is.

a.) *VoIP kapcsolatok forgalom elemzését elsőként torlódásos környezetben végeztük.* Az adatforrás és adathelyek gépei között mesterségesen (T) TCP, illetve (U) UDP adatforgalmat generáltunk, amellyel a 10 Mbps Ethernet csatorna rendelkezésre álló kapacitását töltöttük ki. A készülékben lévő három portos Ethernet switch miatt az IP telefonok LAN kapcsolatán a hangforgalom és az adatforgalom egyaránt továbbított (ld. 4.43. ábra). Egyenként egy perces (H) hard rock (Limp Bizkit - Eat You Alive), illetve (P) zongora (Wolfgang Amadeus Mozart - Concert for horn and orchestra KV KV 285d C major Adagio non troppo) zeneszámokat játszottunk le a hangforráson, amit az 1-es IP telefonról a 2-es IP

telefonra küldtük át. Különböző hang codec-eket (G.728, GSM, G.711, WideBand-G.722) alkalmaztunk, miközben a LAN QoS tartományon belül csak a hangforgalom QoS paramétereit szabályoztuk DSCP=(0x00-“best-effort”, 0x02-alacsony ár, 0x04-megbízható, 0x08-teljesítmény, 0x10-kis késleltetés) szempontok alapján. Az adatforgalmat generáló szerver a mérések felénél TCP, míg a mérések másik felénél UDP protokoll segítségével továbbította a szegmenseket a cél adatgép felé.



4.43. ábra. Torlódásos VoIP kapcsolatok mérési környezete

A nyolcvan darab idősort a torlódást okozó, adatot generáló szállítási rétegbeli protokoll típusa, a hangműsor dinamikája, a codec típusa és a hangforgalom DSCP változtatásával állítottuk elő: $[(T,U) \times (H,P) \times (G.728,GSM,G.711,WB) \times (0,2,4,8,16)] = 2 \times 2 \times 4 \times 5 = 80$. Mind a 80 mérésnél csak a hangforgalmat szállító idősort figyeltük, mivel a környezetnek a hangtovábbításra kifejtett hatására vagyunk kíváncsiak. A mintavételezést Wireshark program segítségével, $\tau = 10 \text{ msec}$ mérési pontossággal végeztük.

b.) *VoIP gerinc torlódásmentes környezetben* mért forgalmát elemeztük másod sorban. Ehhez mintavételeztük a Debreceni Egyetem produkciós környezetében munkanapon, délelőtti időszakban 1500 darab IP telefon populációnak az IP/PBX gateway felé haladó aggregált hangforgalmát. A hang gerinckapcsolat számára rendelkezésre álló 100 Mbps-os Ethernet csatornán a mintavételezés egy órán át tartott és $\tau = 10 \mu\text{sec}$ mérési pontossággal készült. Ebben az esetben nem használtunk speciális QoS mechanizmust, mivel a dedikált csatorna terheltsége 1% alatti volt, így a hangot szállító L2 keretek DSCP = 0 értékkel (“Best-Effort”) továbbították.

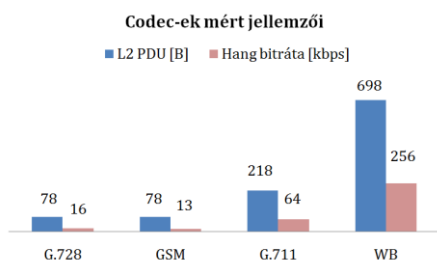
Mindkét mérési környezetben a mintavételezés során a hangot szállító Ethernet PDU-k beérkezési időközét, valamint bájtkban kifejezett méretét használtuk fel, amiből ON/(ON+OFF) módszerrel állítottuk elő a csatornaintenzitás és a csatornaterhelés idősorokat. A hangforgalomnál az IP csomagok sohasem fragmentálódtak, mivel az Ethernet MTU = 1500 bájtos keretében a rövid hangcsomagok bőven elfértek. A mintavételezés periódusa az összes mérés esetén $T = 100 \text{ ms}$ volt.

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

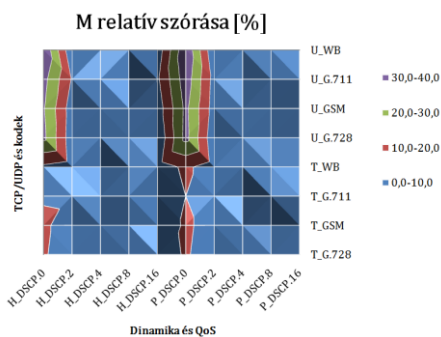
VoIP torlódásos környezet számára a nyolcvan különböző esetben mintavételezett hangforgalom ON/(ON+OFF) módszerrel előállított komplex idősorából a valós és képzetes rész idősorok az alábbiak:

$$(Z_k^p = M_k^p + i \cdot \tan \varphi_k^p), p = 1, 2, \dots, 80, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor$$

A négy fajta codec mért jellemzőit a 4.44. ábra, a nyolcvan darab M , csatornaintenzitás idősor relatív szórását pedig a 4.45. ábra szemlélteti. A hang csatornaterhelésének relatív szórása gyakorlatilag megegyezik a csatornaintenzitás relatív szórásával. Ez azzal magyarázható, hogy a hangcsomagok és az adatcsomagok mérete konstans volt, ezért a csatornaterhelés és az intenzitás között lineáris kapcsolat létezik.



4.44. ábra – Codec-ek mért jellemzői



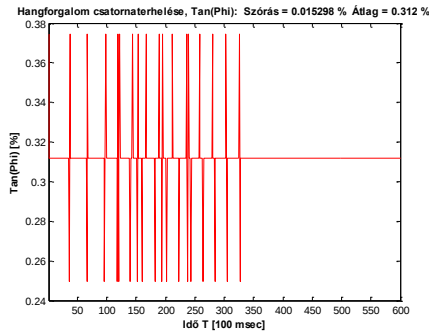
4.45. ábra – Csatornaintenzitás (M)

Megfigyelhető, hogy $DSCP = 0$ ("Best-Effort"), és TCP adatforgalom esetén a G.711 codec-kel meghajtott hangforgalom intenzitásának relatív átlagos szórása alacsony, míg a többi kódolónál ez jelentősebb és elérheti akár a 20%-ot is (GSM). Ezt a GSM codec tömörítő mechanizmusa okozza. Ugyanakkor QoS esetén ($DSCP \neq 0$), azaz a hangforgalom prioritással való kezelésénél az M relatív szórása mindegyik codec-nél alacsony marad. Az UDP adatforgalom esetén nagyobbak a csatornaintenzitás relatív szórásai, míg TCP adatforgalom esetén ezek kisebb értéket mutatnak. Ezt a TCP folyamszabályozó mechanizmusa okozza, amely torlódott csatornán a TCP adatforgalmat az UDP hangforgalom javára kisebbre és egyenletesebbre simítja. Az UDP adatforgalom esetén nincs adatfolyam szabályozás, így a QoS nélküli hangforgalom számára nagyobb szórások tapasztalhatók. A hangforrás dinamikája csak az alacsony bitrátájú codec-eknél okoz észrevehető csatorna-terhelés különbséget.

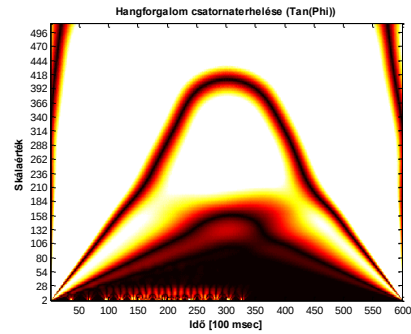
A 4.46-4.49 ábrák a csatornaterhelés idősorokat, valamint ezek wavelet transzformáltját mutatják UDP adatforgalom, G.728 codec, "Best-Effort"/QoS, és hard rock/piano zene feltételek mellett. Annak ellenére, hogy a két idősor jellege hasonlít egymásra, a lényeges különbséget a wavelet transzformált érzékelteti szemléletesen. Megfigyelhető, hogy a második esetben, $DSCP \neq 0$ mellett az 1..20

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

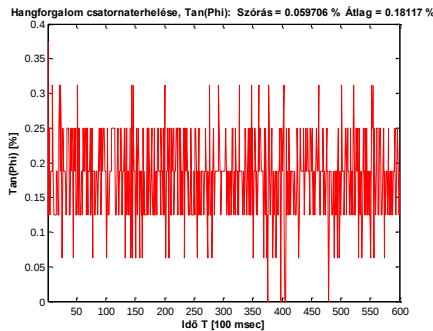
tartományban skálafüggetlenség jelentkezik. Ugyanez $DSCP = 0$ mellett nem következik be, mivel az adat UDP és a hang UDP ugyanazon a csatornán bizonyos mértékben torlódik, így a tanulmányozott hang idősor nem marad stacionárius.



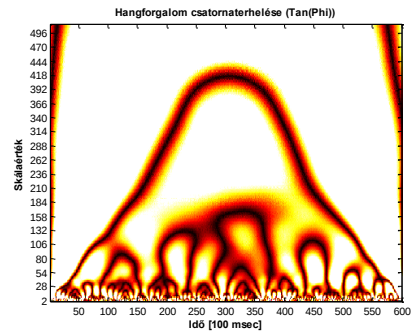
4.46. ábra. Csatornaterhelés
(UDP, G.728, QoS nincs, Hard R.)



4.47. ábra. Wavelet transzf, Tan(Phi)
(UDP, G.728, QoS nincs, Hard R.)



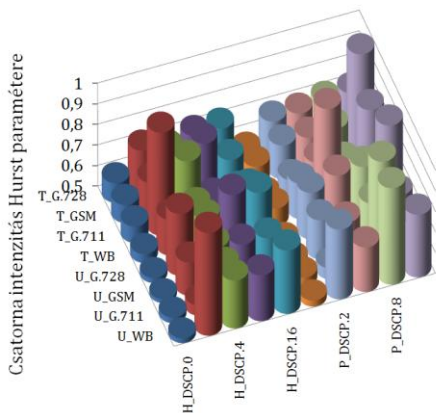
4.48. ábra – Csatornaterhelés
(UDP, G.728, DSCP=8, Piano)



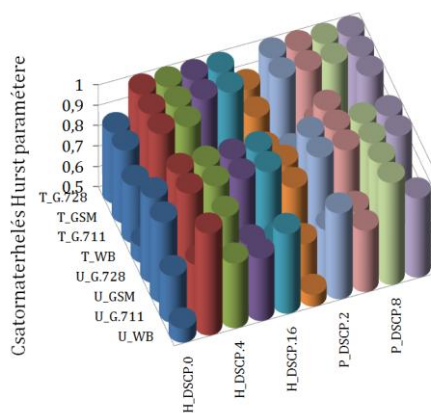
4.49. ábra – Wavelet transzf, Tan(Phi)
(UDP, G.728, DSCP=8, Piano)

A komplex idősorok wavelet módszerrel becsült Hurst paraméterét vizsgálva (ld. 4.50 és 4.51. ábrák) megállapítható, hogy torlódásos környezetben a hangforgalom csatornaterhelésének stacionaritása bizonyos hang codec-eknél megszűnik, ezért a becsült Hurst paramétere egységnél nagyobb lesz. A 4.51. ábrán az egységnél nagyobb értékeket 1,2-re limitáltuk annak érdekében, hogy az egység alatti értékek is láthatók legyenek. A WideBand (G.722) codec alkalmazása esetén még ilyen környezetben is $\widehat{H}_{\tan \varphi} < 1$ értéket ad. Ez azzal magyarázható, hogy a nagyobb átviteli rátájú, fejlettebb hang codec jobban adaptálódik a környezethez. Természetesen itt is látható, hogy a TCP adatforgalom mellett a WideBand hang codec $0,5 < \widehat{H}_{\tan \varphi} < 0,7$ értékeket ad, azaz LRD tulajdonságú.

A csatornaintenzitás Hurst paramétere csak ritkán haladja meg az egységet, azaz csak ritkán nem stacionárius (ld. 4.50. ábra). Látható, hogy a különböző hang codec-ek különböző képen befolyásolják a hangforgalom $\widehat{H}_M$ paraméterét. Fontos észrevennünk, hogy a *DSCP* értéke is befolyásolja $\widehat{H}_M$ -t. Ez azzal magyarázható, hogy az L2 PDU hangforgalom továbbítása QoS tartományon belül a *DSCP* értékének függvényében különböző queue-menedzsment mechanizmussal történik. Ugyanakkor az is megfigyelhetjük, hogy a hang codec típusa is erőteljesen befolyásolja $\widehat{H}_M$ értékét.



4.50. ábra. Hang $\widehat{H}_M$ paramétere



4.51. ábra. Hang $\widehat{H}_{\tan \varphi}$ paramétere

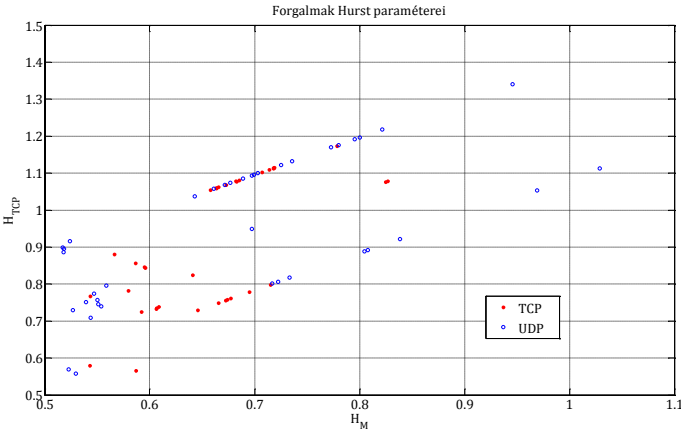
A hangforrás dinamikájától, és a torlódást okozó adatforgalom szállítási réteg protokolljától (UDP/TCP) függetlenül a QoS nélküli ("Best-Effort") esetekben a hangforgalom csatornaterhelése önhasznós (H-SS) és hosszú memóriájú (LRD), a becsült Hurst paraméter $\widehat{H}_M \in [0,56,0,91]$. Megfigyelhető, hogy a codec sávszélességével ellentétes irányban változik a torlódott hangforgalom csatornaterhelésének becsült Hurst paramétere (ld. 4.51. ábra).

A mérések során a fogadó oldalon tapasztalt hang minősége a nagyobb sávszélességű codec-ek esetén jobb volt, ugyanakkor a QoS mechanizmusok alkalmazása, azaz $DSCP \neq 0$ esetén a hang torlódása kevésbé volt érzékelhető. G.711 codec esetén csak a dinamikus hang és $DSCP = 8$, teljesítmény-optimalizálási QoS mechanizmus ad az intenzitás $\widehat{H}_M$ paramétere számára magas értéket. A dinamikus hangforgalom intenzitásának $\widehat{H}_M$ értéke nagyobb, mint a dinamika nélküli hang esetén (ld. 4.51. ábra.). Ennek oka a hang borsztösségének mértéke, mivel dinamikusabb hang borsztösebb PDU forgalmat okoz.

Az UDP-re épülő hangtovábbítási mechanizmus által forgalmazott jelfolyam csatornaintenzitás-csatornaterhelés ($\widehat{H}_M, \widehat{H}_{\tan \varphi}$) terében azt láthatjuk,

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

hogy az LRD hangforgalmak közül, vagyis ahol $\widehat{H}_M < 1$ és $\widehat{H}_{\tan \varphi} < 1$, az UDP típusú adattal torlódott esetek kisebb Hurst paraméter koordinátákkal rendelkező állapotokat generálnak, mint a hang TCP típusú adattal történő torlódásból származó állapotok (ld. 4.52. ábra.).



4.52. ábra. Egyidejű TCP (adat) és az UDP (hang) forgalmak becsült Hurst paramétereinek viszonya

A hangátvitel tapasztalt minőségének számszerűsítéséhez egy osztályozási szempontrendszert állítottunk fel (ld. 4.13. Táblázat).

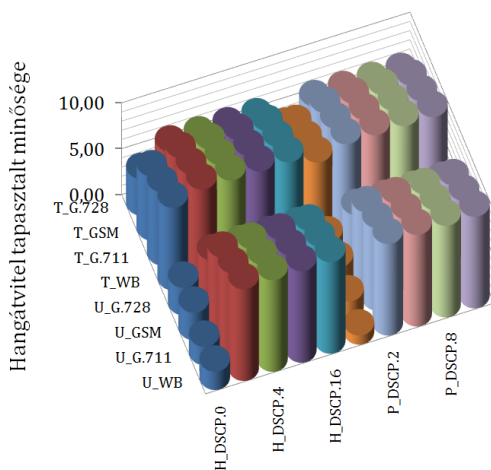
4.13. Táblázat: Hang minőségének számszerűsítése

<i>Tapasztalt jellemző</i>	<i>Osztály</i>
Sűrűn kis időközökre akadozik	1
Változó időtartamokon akadozik	2
Hosszasan akadozó, nagyon halk	3
Nagyon rossz (recsegő), nagyon halk	4
Rossz (recsegő), nagyon halk	5
Rossz (recsegő), halk	6
Rossz (recsegő)	7
Megfelelő	8
Jó	9
Nagyon jó	10

Ennek segítségével elkészült a nyolcvan méréshez tartozó tapasztalt hangminőség diagramja (ld. 4.53. ábra.), ami alapján megállapítható, hogy torlódásos környezetben QoS mechanizmussal továbbított hang forgalom jobb minőséget nyújt, mint a “Best-Effort” típusú továbbítás. QoS mellett, vagy QoS nélkül, de TCP adattal torlódott hang minősége a codec átviteli rátájával egyenesen arányos. QoS

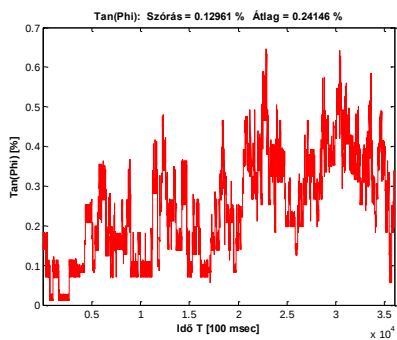
4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

nélkül továbbított, UDP adattal torlódott hangforgalom a nagyobb rátájú codek-ek esetén egyre gyengébb minőséget ad.

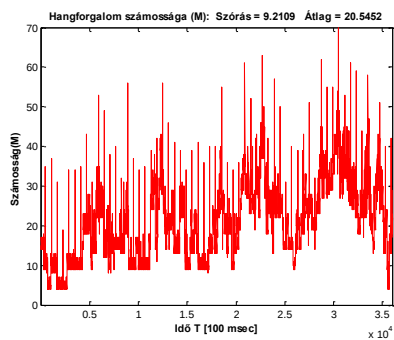


4.53. ábra. Hangátvitel tapasztalt minősége

VoIP trónk kapcsolat torlódásmentes környezet számára a 4.54-4.55. ábrák az aggregált IP hangforgalmak által generált csatornaterhelést, illetve csatorna-intenzitását, míg a 4.56-4.57. ábrák ezeknek a (3.38) összefüggés szerinti 2-LD grafikonját mutatja be. Habár a két idősor csúszó átlagai korrelációt mutatnak, az intenzitás idősor helyi maximumai miatt a két idősor jellege lényegesen különbözik egymástól.



4.54. ábra. VoIP gerincforgalom csatornaterhelése



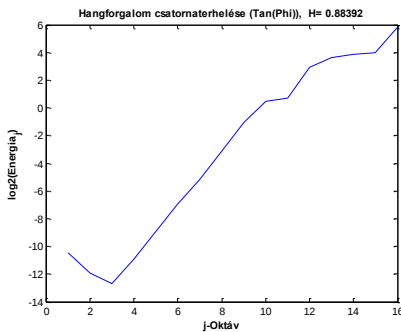
4.55. ábra. VoIP gerincforgalom intenzitása

A csatornaterhelés 1 másodperces csúszó átlagai nagyon jól mutatják az egyidejű beszélgetések darabszámát, ami a grafikonok lépcsőzetességéből származtatható. A csatornaterhelés relatív szórása 53%, a csatornaintenzitásé pedig annál kisebb, csupán 44%. A kisebb értéket az intenzitás helyi maximumai okozzák. Több VoIP hangforgalom torlódásmentes gerinckapcsolaton fraktál

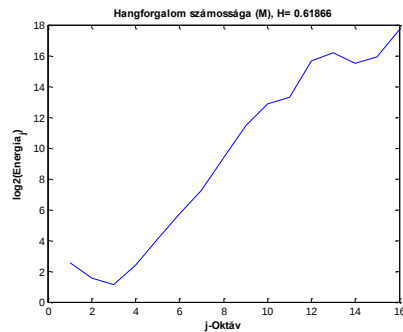
4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

tulajdonságot mutat, amit az energia függvények logaritmusának aszimptotikus szakaszaiból láthatunk.

Addig, amíg a wavelet módszerrel becsült Hurst paraméter, $\widehat{H}_{TGP} = 0,88$ és a csatornaterhelés kevésbé skálafüggő, addig az $\widehat{H}_M = 0,61$ és a csatornaintenzitás kisebb tartományban skála független, és nagyobb oktávoknál szignifikánsan változik (ld. 4.56-4.57. ábrák).



4.56. ábra. VoIP gerincforgalom $\widehat{H}_{\tan \varphi}$ paraméterének wavelet becslése



4.57. ábra. VoIP gerincforgalom $\widehat{H}_M$ paraméterének wavelet becslése

Ezek alapján kijelenthető, hogy torlódásmentes Ethernet csatornán több egyidejű hangcsatorna aggregált forgalma önhasonló és hosszúmemóriájú (LRD).

Tézis_5 összefoglalása, megállapítások

- i.) Ethernet csatornán adatforgalommal torlódott hangforgalom viselkedése erőteljesen függ az adatforgalom TCP, illetve UDP összetételének mértékétől. TCP adatforgalommal torlódott hangforgalom minősége jobb, mint az UDP adatforgalommal való torlódás esetén, amit a TCP folyamszabályozó mechanizmusa miatt felszabaduló erőforrások okoznak. Az ON/(ON+OFF) módszerrel előállított komplex folyamat képzetes része ($\tan \varphi$ -csatornaterhelés) nem marad stacionárius, míg a valós része (M -csatornaintenzitás) LRD tulajdonságú marad.
- ii.) QoS nélküli adatforgalom és QoS nélküli hangforgalom Ethernet csatornán való torlódása esetén a csatornaintenzitás Hurst paramétere egyenesen arányos a hang codec továbbítási rátájával, miközben a csatornaterhelés Hurst paramétere független a hang dinamikájától. A hang tapasztalt minősége alapján, ilyen esetben a nagyobb átviteli rátájú

hang codec alacsonyabb minőséget nyújt, mivel érzékenyebb az UDP hang-szegmensek borsztösségére.

- iii.) Diffserv QoS mechanizmussal szabályozott hangforgalom a "Best-Effort" típusú adatforgalommal való torlódása esetén gyakorlatilag elhanyagolható mértékben szenved minőségi romlást. A hang codec típusa meghatározza a hangcsatorna minőségét. A vizsgált hang codec-ek növekvő minőségi sorrendje: G.728, GSM, G.711, WB (G.722).
- iv.) Több hangkapcsolat torlódásmentes Ethernet csatornán QoS nélküli továbbítása esetén a csatornaterhelés és csatornaintenzitás idősorok LRD tulajdonságúak, ahol $\widehat{H_{\tan \varphi}} = 0,88$ és $\widehat{H_M} = 0,61$.

Tézis_5 témájában készült saját és társszerzős publikációk

1. Zoltán Gál (2009): VoIP LAN/MAN traffic analysis for NGN QoS management, *Infocommunications Journal*, Volume LXIV, ISSN:0866-5583, pp. 22-29.
2. Gál Zoltán, Balla Tamás (2007): A QoS hatása az infokommunikációs alkalmazásokra, *Híradástechnika*, Volume LXII., ISSN:0018-2028, pp. 7-16 (in Hungarian).

4.4. A kutatási eredmények gyakorlati alkalmazhatósága

A bispektrum alkalmazása az ATM forgalomelemzésnél lehetővé teszi, hogy a LANE, illetve CLIP technológiák segítségével továbbított adatforgalmak statisztikai jellemzői közötti különbségek kiemelhetők legyenek. A bispektrum valós, valamint képzetes részének grafikus megjelenítése útján lehetővé válik a technológiai ráta meghatározásához szükséges maximális értékek aránya.

Az ON/(ON+OFF) módszer alkalmazhatósága minden forgalomtípus elemzésénél lehetséges. A Hurst paraméterek becslése wavelet módszerrel rövid idősorokra is alkalmazható, ami lehetővé teszi az LRD mértékét érzékelteő paraméterek figyelembe vételét és alkalmazását a DiffServ QoS mechanizmusok vezérléséhez. Ez a szolgáltatói infrastruktúra üzemmódját gyorsan adaptálhatóvá teszi az aktuális hálózati forgalomhoz, így a hálózati erőforrás készlet hatékonyabb kihasználása mellett jobb minőségű hálózati szolgáltatások fejleszthetők ki.

4. Az értekezés új tudományos eredményei, tézisek

A DiffServ QoS mechanizmusok segítségével hatékonyan differenciálni lehet a különböző típusú adatforgalmak között, így a valós idejű hálózati alkalmazások (VoIP, videó, játék, stb.) kielégítő minőségben képesek együttműködni a hagyományos adatátviteli szolgáltatásokkal. Ez jelentős beruházási megtakarításokat jelent a jövőben, hiszen a meglévő infrastruktúra teljes lecserélése nélkül a QoS mechanizmusokkal lehetőség van a hang-, videó-, adatátvitel integrációjának folytatására.

Az integrált hálózati szolgáltatásokra való migráció során a videó forgalom számára alkalmazott codec típusát erőteljesen befolyásolja QoS teljes körű, vagy csak részleges használata. A hálózati infrastruktúra azon régióiban, ahol az átmenő forgalom a szűkös erőforrások miatt torlódhat, a QoS bevezetése elkerülhetetlen. Ilyen esetben a videó forgalmak számára szükséges kapacitás-jellemzők biztosítása a köztes hálózati eszközök intelligenciája alapján rendelkezésre álló QoS mechanizmusok közül csak az optimális kiválasztásával érhetők el jól működő integrált hálózati szolgáltatások.

A legkritikusabb hálózati szolgáltatás, a hang IP csomagkapcsolt hálózat feletti forgalmazása szükségessé teszi a különböző hang codec-ek viselkedésének ismeretét nem csak a "Best-Effort" típusú környezetben, hanem a QoS-sel vezérelt tartományban is. A hangforgalom statisztikai jellemzőinek segítségével meghatározható a hálózati infrastruktúra működésének azon állapota, ahol a szűk hálózati kapacitások, vagy a megnőtt egyéb hálózati forgalmak miatt bekövetkezett torlódás a hangcsomagok stacionárius továbbításának megszűnéséhez vezet. Ezt a hang minőségének romlása, de a működőképesség korlátozott színvonala jellemzi.

LAN/MAN környezetben az L2/L3 hangforgalmak csatornaintenzitásának, illetve csatornaterheltségének statisztikai szempontból történő módosulása a valós idejű hálózati szolgáltatások minőségének változását implicálják. A csomagkapcsolt adat- és hangforgalom fraktál és skálafüggő tulajdonságának elemzéséhez kényelmes statisztikai eszközt biztosít a wavelet analízis.

A QoS egy másik síkban, szolgáltatásként jelenik meg az OSI rétegprotokollok számára és erőteljesen megváltoztatja a csomagkapcsolt protokollelemek továbbításának hagyományos értelemben vett önhasonló tulajdonságát. QoS segítségével mesterségesen szabályozott hangforgalmak továbbításánál az önhasonló, illetve LRD tulajdonságok érzékenyen befolyásolhatók.

Mindezen ismeretek, tapasztalatok a Debreceni Egyetem informatikai rendszerének hatékony továbbfejlesztéséhez használhatók.

4.5. További kutatási irányok, elképzelések

Hasonlóan a hagyományos telefonhálózatok (POTS) tervezésénél alkalmazott Erlang formulához, az Internet esetében eddig még nem sikerült általánosan használatos tervezési módszert találni. Ennek egyik fő oka, hogy az Interneten működő IP alkalmazások típusainak száma nagy és tovább növekszik. Ezek forgalma sokkal összetettebb, mint a hagyományos beszédforgalom, így általános forgalmi modell megalkotása nehéz feladat. Ugyanakkor az IP alapú különböző szolgáltatások QoS jellemzői nagyon eltérőek, ami miatt ezek kezelésmódja is eltérő. A különböző IP architektúrák egymástól eltérő módon formázzák a forgalmakat.

Nem szabad megfeledkezni arról a tényről sem, hogy az IP hálózatok szolgáltatói részéről adott útvonal-irányítási és számlázási stratégia bevezetésének eredményeként a felhasználók viselkedésének megváltozása hatással lesz az aggregált forgalmak összetételére is. Mindezek mellett az IP forgalmak természetének és az IP feletti QoS mechanizmusok forgalomszabályozó hatásának egyre mélyebb megismerése közelebb visz az optimális forgalomméretező eljárások, módszerek kidolgozásához.

Ennek következtében az IP alapú infó-kommunikációs hálózatok infrastruktúrájának tervezése és méretezése Minőség/Ár szempontból is optimálisabbá válik.

Ha egy véletlen folyamat eloszlása szimmetrikus, akkor a harmadrendű kumulánsok értéke nulla, ezért ilyen esetben szükség lehet a negyedrendű kumulánsok és a trispektrum elemzésére is [46]. Így az olyan nevezetes szimmetrikus eloszlásoknál, mint a Laplace, az Egyenletes, a Gauss, a Bernoulli-Gauss szükséges a trispektrum alkalmazása, míg az Exponenciális, a Rayleigh és a k-eloszlás nem szimmetrikusak, ezért a bispektrumon alapuló elemzés elegendő lehet. A nagyon kis bispektrum értékekkel rendelkező folyamatok elemzése a negyedfokú kumulánsokkal hatásosabbnak tűnik.

Az Internet forgalom leírásához születtek olyan javaslatok is, amelyeknél a modell paraméterei időben változnak [53]. Ezeket lassan változó folyamatokként kezelik. Iglói és Terdik [37], Terdik és Molnár [74], Molnár és Terdik [50] olyan új, nem-fraktál modelleket javasoltak, amelyek nem önazonosak és a skála paraméter a HOS becslési módszerekkel kiszámolható. Basu és társai [9] olyan nem-Gauss, nem-stacionárius modelleket javasolt az Internet forgalom leírásához, amelyek differenciálódás után stacionáriussá válnak.

Az $ON/(ON + OFF)$ transzformáció bemutatásánál tárgyaltak szerint a végfelhasználói csomópontok közötti forgalom elemzését célszerű lehet az útvonal mentén több ponton is mintavételezni. Az így kapott idősorok statisztikai jellemzőinek egymáshoz viszonyítása alapján kiértékelhető a szolgáltatói köztes csomópontoknak a csomagforgalomra befolyásoló hatása.

További vizsgálatok szükségesek egyéb QoS paraméterek, egyetlen, illetve több QoS tartományon átívelő multimédiás kapcsolatok viselkedése, valamint az L4-L7 rétegek működésének minőségi befolyásolhatósága témakörökben. További kutatás szükséges a Hurst paraméterek, a QoS mechanizmusok és a felhasználók által érzékelt komplex minőségi jellemzők viszonyának meghatározása tekintetében.

Mivel a QoS-sel érzékenyen szabályozza a csomagkapcsolt forgalmak statisztikai jellemzőit, új irányok nyílnak meg a QoS-sel történő forgalomszabályozás és a statisztikai modellezés területén. További elemzések szükségesek a csomagkapcsolt protokoll adatalemek csatornaterhelés, illetve intenzitás jellemzőinek együttes alkalmazására vonatkozóan annak érdekében, hogy a gerinchálózati eszközökben a rendelkezésre álló véges hálózati erőforrások használatához a leghatékosabb QoS konfigurációs beállításokat meg lehessen határozni. Ehhez a 10...100 μ s-os tartományban lezajló folyamatok statisztikai elemzésére van szükség, ahonnan kinyert entrópia jellemzőinek és makro-hatásának meghatározó fontossága van.

5. Összefoglaló

A dolgozatban analitikus és konkrét mérési módszerek segítségével történik a QoS mechanizmusok IP csomagkapcsolt forgalmak jellemzőire gyakorolt hatásának elemzése. Kísérletekre alapozva a QoS mechanizmusokkal vezérelt csomagkapcsolt hálózati folyamatokra vonatkozóan tettem konkrét megállapításokat. Az önhasonlóság adaptálható a hálózati forgalmaknál, amit sok tényező befolyásol. Itt az önhasonlóság nem kizárólag a fájlok méretének hosszúmemóriájú eloszlási tulajdonságából adódik.

A sávszélesség, a TCP ablak értéke és a csomag mérete hatással van a memóriafüggőségre. Nagy időskála tartományban, több szimultán kapcsolat együttes hatása a forgalom kisimítását okozza a gerinckapcsolatokon, ami a hálózat hatékonyságának növekedését jelenti. Kis időskála tartományban a forgalom borsztössége változó. Ilyen esetben a hálózat hatékonysága érdekében a sávszélesség használatot és a hálózat késleltetését kontrollálni kell a borszt alacsony értéken tartásához. QoS mechanizmustól függően a hálózati forgalom folyamatok statisztikája szignifikánsan különbözik a Poisson folyamatokétól.

Öt tézisben foglaltam össze a több mint tizenöt éves alkalmazott kutatási munkám eredményeit. Az informatikai hálózatok üzemeltetése, fejlesztése és minőségének elemzése során szerzett mérnöki gyakorlati tapasztalataimat statisztikai módszerekkel ötvöztem. A konvergens hálózati infrastruktúra feletti korszerű, aktuális elektronikus szolgáltatások számára szükséges kommunikációs igények ismeretében statisztikai modellezési módszert javasoltam.

Így bispektrális analízis segítségével torlódásmentes ATM WAN hálózat natív cellafolyamának elemzését végeztem el csoportmunkában és állapítottuk meg, hogy a beérkezési időközök folyamata hosszú memóriájú és a bispektrumának képzetes része nulla. Az önhasonlóság paraméterének bispektrumon alapuló becslése alapján pontosabban meghatározuk a Hurst paraméter mint más becslési módszerekkel.

QoS nélküli hálózati környezetben az Ethernet, az ATM feletti LANE, valamint az ATM feletti CLIP technológiák által továbbított forgalmak bispektrumának valós, illetve képzetes része segítségével megállapítottam e három mechanizmus közötti viszonyt. A LANE és a CLIP technológiák segítségével továbbított forgalmak az alap statisztikai módszerekkel nem különböztethetők meg. Szükséges a bispektrumnak úgy a valós, mint a képzetes részét figyelembe venni. Az idősor quadratikusan fáziscsatolttságának mértékét kiszámolva, a bispektrum valós és képzetes részének maximumát használó technológiai ráta

bevezetése lehetővé tette a LANE és a CLIP technológiák közötti statisztikai különbség kiemelését.

Saját módszert dolgoztam ki a hálózati forgalmak fizikai folyamatának jobb megértése céljából. Az $ON/(ON+OF)$ transzformáció segítségével származtatott komplex idősort állítok elő, amelynek valós és kézetes összetevői a gyakorlatban jól értelmezhető mennyiségekhez, a csatornaintenzitás és a csatornaterheltség fogalmak kényelmes használatát tették lehetővé. A módszer a QoS-sel szabályozott idősorok vizsgálatára is használható. Wavelet transzformáción alapuló Hurst paraméterbecslést alkalmaztam, ami a rövid idősorok LRD és fraktál tulajdonságának detektálását segítik.

Megvizsgáltam az adatot és változó bitrátájú videót azonos Ethernet csatornán továbbító, torlódó forgalmak statisztikai jellemzőit $ON/(ON+OFF)$ módszerrel és megállapításokat tettem a video streaming minőségét befolyásoló hálózati paramétereket "Best-Effort" és QoS-sel vezérelt vegyes forgalmak viselkedésére, valamint a felhasználók által érzékelt minőség közötti viszonyra vonatkozóan.

A legkritikusabb valósidejű hálózati alkalmazás, az IP csomagkapcsolt hálózat feletti interaktív hangtovábbítás minőségét befolyásoló hálózati paraméterekt vizsgáltam meg $ON/(ON+OFF)$ módszerrel. A TCP, illetve UDP adat, IP hanggal történő torlódása különböző QoS feltételek mellett a gyakorlatban gyakran bekövetkező állapot, aminek viselkedésével kapcsolatosan statisztikai és gyakorlatias megállapításokat tettem.

6. Summary

The effect of QoS mechanism on the IP packet switched traffics are based on analytical and concrete measurement methods in this thesis. Statements regarding network traffic processes controlled by QoS (Quality of Service) mechanisms utilize real experiments. The self similarity is adaptable at the network traffics and is influenced by several factors. In our case self similarity is not exclusively determined by the long range dependent characteristic of the files transmitted.

The bandwidth, the TCP window size and the packet size have all influence on the memory dependence. The effect of a set of simultaneous sessions in large time scale is smoothing of the traffic on the trunk link, which increases the network efficiency. In small time scale the burstiness of the traffic is varying. In this case the transmission delay should be controlled to keep the burst at low values, causing in this way higher network performance. Depending on the QoS mechanism applied the statistics of the network traffics differs significantly of the Poisson processes.

Five thesis conclude my results of applied research during fifteen years. I merged my engineering practical experience based on my network management and development with mathematical statics modeling methods. My knowledge of necessary communication resources to provide sophisticated electronic services on the converged network infrastructure helped me to create new statistical modeling scheme.

In this way we analyzed native cell flow of ATM WAN network environment without congestion. We fixed that the interarrival time process is long range dependent and their bispectrum has the real part equal to zero. The utilized estimation method of the Hurst parameter based on bispectrum gave more precise value than other estimation methods.

I fixed the statistical relation of the Ethernet, LANE (LAN Emulation over ATM) and CLIP (Classical IP over ATM) technologies utilizing both, real and imaginary part of the bispectrum of the Best-Effort traffic. The statistical characteristics of data flows transmitted by LANE and CLIP technologies can not be distinguished. Need to be taken in consideration the real and the imaginary part of the bispectrum. Computing the quadratic phase coupling measure of the time series, the introduction of the technology rate based on the maximum value of the real and imaginary parts made possible to emphasize the statistical difference between LANE and CLIP technologies.

I elaborated a new modeling method to perceive more deeply the physical processes of network traffic transmission. The method named $ON/(ON+OFF)$ derives a complex time serie. The real and the imaginary part are well known terms in practice: channel load and channel intensity. This method can be utilized to analyze traffics controlled by QoS mechanisms, as well. I utilized wavelet transformation to compute the estimated Hurst parameter. The wavelet method helps to detect the LRD and fractal characteristics of relatively short traces.

I analyzed with $ON/(ON+OFF)$ method the statistical characteristics of mixed data and variable bit rate video traffic on congested Ethernet channel. I fixed statements in connection with the network parameters, which influence the Best-Effort and QoS controlled mixed traffic behavior. I revealed the relation between statistical characteristics of the congested traffic and the quality of the video sesized by the user.

The most critical network application, the voice traffic over packet switched IP network was analysed with $ON/(ON+OFF)$ method, as well. I revealed the factors tha influence the quality of voice transmission. In practice TCP or UDP data traffics are often congested with voice over IP traffic. Based on the analysis of these traffics behavior usefull practical statements are presented.

7. Irodalomjegyzék

7.1. Hivatkozások

AB

- [1] Patrice Abry, Lois D'échelle: Multirésolutions et Ondelettes. *Habilitation Travaux de Recherche, Université Claude Bernard Lyon*, Mars 2001.
- [2] Patrice Abry, Darryl Veitch: Wavelet Analysis of Long-Range-Dependent Traffic, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 44, No. 1, pp. 2-15, January 1998.
- [3] Patrice Abry, Patrick Flandrin, Murad S. Taqqu, Darryl Veitch: Self-similarity and long-range dependence through the wavelet lens, *Long-range Dependence: Theory and Applications* (P. Doukhan, G. Oppenheim and M. S. Taqqu, eds.), Birkhauser, pp. 527-556, 2003.
- [4] Patrice Abry, Patrick Flandrin, Murad S. Taqqu, Darryl Veitch: Wavelets for the analysis, estimation and synthesis of scaling data, in *Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation*, K. Park and W. Willinger, Eds. Wiley, 2000.
- [5] A. Adas and A. Mukherjee: On resource management and QoS guarantees for long range dependent traffic. In *Proc. IEEE INFOCOM'95*, pp. 779-787, 1995.
- [6] R. Addie, M. Zukerman, and T. Neame: Fractal traffic measurement, modeling and performance evaluation. In *Proc. IEEE INFOCOM'95*. pp. 977-984, 1995.
- [7] ATM Forum Specification: LAN Emulation Over ATM Specification - Version 1, February 1995.
- [8] J. Beran: Statistics for Long-Memory Processes. *Monographs on Statistics and Applied Probability, Chapman and Hall, New York*, 1994.
- [9] S. Basu, A. Mukherjee, S. Klivansky: Time series models for internet traffic, *Technical Report GIT-CC-95-27*, Georgia Institute of Technology, 1996.

- [10] J. Beran, R. Sherman, M.S. Taqqu, W. Willinger: Long range dependence in variable bit rate traffic. *IEEE Transactions on Communications* 43, No 2/3/4, pp. 1566-1579, 1995.
- [11] D. R. Brillinger: Fourier interference: Some methods for the analysis of array and nongaussian series data, *Water Resources Bull.* 21, pp. 743-756, 1985.
- [12] D. R. Brillinger: Time Series: Data Analysis and Theory, Expanded edition, McGraw-Hill, New York, 1981.

CD

- [13] Catalyst 3550 Multilayer Switch Software Configuration Guide: Configuring QoS. *Cisco Systems, Co.*, <http://www.cisco.com>
- [14] Catalyst 3750 Multilayer Switch Software Configuration Guide: Configuring QoS. *Cisco Systems, Co.*, <http://www.cisco.com>
- [15] C. S. Cheang, J. A. Thomas, Effective bandwidth in high-speed digital networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 13, pp. 1091-1100, 1995.
- [16] Cisco Diffserv: The Scalable End-to-End QoS Model, *Cisco Systems, Co.*, <http://www.cisco.com>, 2001.
- [17] K. G. Coffman and A. M. Odlyzko. Internet growth: Is there a "Moore's Law" for data traffic. In J. Abello, P. M. Pardalos, and M. G. C. Resende, editors, *Handbook of Massive Data Sets*, pp. 47-73. Kluwer Academic Publishing, 2002.
- [18] M. Crovella and A. Bestavros: Self-similarity in world wide web traffic: Evidence and possible causes. In *Proceedings of the 1996 ACM SIGMETRICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, May 1996.
- [19] I. Daubechies: Ten Lectures on Wavelets (S.I.A.M., Philadelphia, 1992).
- [20] Darryl Veitch, Nicolas Hohn, Patrice Abry: Multifractality in TCP/IP traffic: the case against, *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, Vol. 48, Issue 3 (June 2005).
- [21] Diane Duffy, Allen A. Mcintosh, Mark Rosenstein, W. Willinger: Statistical Analysis of CCSN/SS7 Traffic Data from Working CCS Subnetworks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, No. 12, pp. 544-551, 1994.

- [22] N. G. Duffield, J. T. Lewis, N. O'Connel, R. Russell, F. Toomey: Entropy of ATM traffic streams: a tool forestimating QoS parameters. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 13, pp. 981-990, 1995.

EF

- [23] A. Elwaid, D. P. Hezman, T. V. Laksman, D. Mitra, A. Weiss: Fundamental bounds and approximations for ATM multiplexers with applications to video teleconferencing. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 13, pp. 1004-1016, 1995.
- [24] A. Erramilli, W. Willinger: Fractal properties in packet traffic measurements. *Proceedings of the St. Petersburg Regional ITC Seminar, St. Petersburg, Russia*, pp. 144-158, 1993.
- [25] A. Feldmann, A. C. Gilbert, W. Willinger: Data networks as cascades: Investigating the multifractal nature of Internet WAN traffic, *ACM Computer Communication Review*. Vol. 28, pp. 42-55, September 1998.

GH

- [26] M. Garret and W. Willinger: Analysis, modeling and generation of self-similar VBR video traffic. In *Proc. ACM SIGCOMM'94*, pp. 269-280, 1994.
- [27] P. Gonsales, P. Flandrin: Scaling exponents estimation from time-scale energy distributions, *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, ICASSP-92, Vol 5., 1992.
- [28] Amara Graps: An Introduction to Wavelets, *IEEE Computational Science and Engineering*, Vol 2, No 2, 1995.
- [29] M. Grossglauser and J-C. Bolot: Ont he relevance of long-range dependence in network traffic. In *Proc. ACM SIGCOMM'96*, pp. 15-24, 1996.
- [30] Anders Hald: The early history of the cumulants and the Gram-Charlier series. *International Statistical Review*, Vol. 68, No. 2, pp. 137-153, 2000.
- [31] Heinanen: RFC 1483: Multiprotocol Encapsulation over ATM Adaptation Layer 5, July 1993.
- [32] D. Heyman and T. Lakshman: What are the implications of long-range dependence for VBR-video traffic engineering? *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 4(3), pp. 301-317, June 1996.

- [33] M. J. Hinich: Testing for Gaussianity and linearity of a stationary time series, *Journal of Time Series Analysis* 3, pp. 169-176, 1982.
- [34] C. L. Hwang, S. Q. Li: On input state space reduction and buffer noneffective region. *Proceedings of IEEE Infocom'94*, pp. 1018-1028, 1994.

IJ

- [35] IEEE Standards Association, <http://standards.ieee.org/>
- [36] E. Igloi, Gy. Terdik: Superposition of Diffusion with Linear Generator and its Multifractal Limit Process, *ESAIM Prob. Stat.* 7, pp. 23-88., 2003.
- [37] E. Iglói, Gy. Terdik: Superposition of diffusions with linear generator and its multifractal limit process, *ESAIM Probab. Stat.* 7, pp. 23-88, 2003.
- [38] Philippe Jacquet: Queueing with aggregated up/down arrivals, 1996. Preprint.

KL

- [39] T. Karagiannis, M. Molle, M. Faloutsos, A. Broido: A Nonstationary Poisson View of Internet Traffic, *Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Vol. 3*, pp. 1558-1569, 2004.
- [40] Kendall, M.G., Stuart, A.: *The Advanced Theory of Statistics, Vol. 1 (3rd Edition)*. Griffin, London. (Section 3.12), 1969.
- [41] N. Larrieu, P. Owezarski: Non-Gaussian and Long Memory Statistical Characterizations for Internet Traffic with Anomalies, *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, Volume 4 , Issue 1*, pp. 56-70, January 2007.
- [42] N. Leonenko, A. Sikorskii, G. Terdik: On spectral and bispectral estimator of the parameter of non-Gaussian data. *Random Oper. and Stoch. Equ. (ROSE)* 6 2, pp. 159-182., 1998.
- [43] N. Likhanov and B. Tsybakov: Analysis of an ATM buffer with self-similar ("fractal") input traffic. In *Proc. IEEE INFOCOM'95*, pages 985-992, 1995.

MN

- [44] Benoît Mandelbrot: How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. *Science, New Series, Vol. 156, No. 3775*. (May 5, 1967), pp. 636-638.

- [45] P. Mannersalo and I. Norros: Multifractal analysis of real ATM traffic: a first look, *COST257TD(97)19 version 1, VTT Information Technology*, 21 Jan. 1997.
- [46] J. M. Mendel: Tutorial on Higher-Order Statistics (Spectra) in Signal Processing and System Theory: Theoretical Results and Some Applications, *Proceedings of the IEEE In Proceedings of the IEEE, Vol. 79, No. 3.*, pp. 278-305, 1991.
- [47] Technical White Paper: Quality of Service. *Microsoft, Co.*
<http://www.microsoft.com/technet/prodtechnol/windows2000serv/pla n/qosover.msp>
- [48] S. Molnár, T. D. Dang: Scaling Analysis of IP Traffic Components. *ITC Specialist Seminar on IP Traffic Measurement, Modeling and Management*, Montorey, CA, USA, September 18-20, 2000.
- [49] S. Molnár, T. D. Dang, A. Vidács: Heavy-Tailedness, Long-Range Dependence and Self-Similarity in Data Traffic. *7th International Conference on Telecommunication Systems Modeling and Analysis, Nashville, Tennessee, USA*, March 18-21. 1999.
- [50] S. Molnar, Gy. Terdik: A Monofractal Model for Network Traffic. *Technical Report, COST 279TD(02)04*, Leidschendam, The Netherlands, February 7-8, 2002.
- [51] S. Molnár and A. Vidács: On Modeling and Shaping Self-Similar ATM Traffic. *Proceedings of the 15th International Teletraffic Congress*, Washington, D.C., USA, June 1997.
- [52] T. Mori, R. Kawahara, S. Naito: Analysis of Non-Gaussian Nature of Network Traffic, in *Proc. IEICE General Conference*, Tokyo, 2002.
- [53] A. Mukherjee: On the dynamics and significance of low frequency components of internet load, Technical Report MS-CIS-92-83/DSL-12, Computer and Information Science Department, University of Pennsylvania, 1992.
- [54] Network Design Guide: Enterprise QoS Solution Reference. *Cisco Systems, Co.*, *<http://www.cisco.com>*
- [55] Network Design Guide: Network-Based Application Recognition and Distributed Network-Based Application Recognition. *Cisco Systems, Co.*, *<http://www.cisco.com>*

- [56] C. L. Nikias, M. Raghuveer: Bispectrum estimation: A digital signal processing framework, *Proc. IEEE, Vol. 75.*, pp. 869-891, 1987.

OP

- [57] Luis F. Ortiz: Solving QoS in VoIP: A Formula for Explosive Growth?, *Brooktrout Technology*
- [58] V. Paxson and S. Floyd: Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling. *IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 3 No. 3*, pp. 226-244, June 1995.
- [59] Kihong Park, Gitae Kim, Mark Crovella: On the Effect of Traffic Self-Similarity on Network Performance. In *Proc. of the SPIE International Conference on Performance and Control of Network Systems*, 1997.
- [60] K. Park, G. Kim, and M. Crovella: On the relationship between file sizes, transport protocols, and self-similar network traffic. In *Proc. IEEE International Conference on Network Protocols*, pp. 171-180, October 1996.
- [61] K. Park and W. Willinger: Self-Similar Network Traffic: An Overview, *Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation*, K. Park and W. Willinger, eds., pp. 1-38, Wiley (Interscience Division), 2000.
- [62] Kihong Park, Walter Willinger: Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation. *John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA*, 2000.
- [63] M. B. Priestley: Evolutionary spectra and non-stationary processes, *J. R. Stat. Soc. Ser. B* 27, pp. 204-237, 1965.
- [64] M. B. Priestley, M. M. Gabr: Bispectral analysis of non-stationary processes, *Multivariate Analysis: Future Directions. C.R. Rao (Ed.), Elsevier Science Publishers*, pp. 295-317, 1993.

QR

- [65] B. Ryu and A. Alwalid: The importance of long-range dependence of VBR video traffic in ATM traffic engineering: myths and realities. in *Proc. ACM SIGCOMM'96*, pp. 3-14, 1996.
- [66] *Request for Comments (RFC 1577)*: Classical IP and ARP over ATM, January 1994.

- [67] *Request for Comments (RFC 3550)*: RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications., July 2003.
- [68] J. W. Roberts: Engineering for Quality of Service, chapter in the book on *Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation*, edited by K. Park and W. Willinger, John Wiley & Sons, 2000.
- [69] J. Roberts, U. Mocci, J. Virtamo: Broadband network teletraffic. *Final Report of Action COST 242*, Springer Verlag, 1996.
- [70] M. Rosenblatt: Cumulants and cumulant spectra, in *Handbook of Statistics, Vol 3.*, (ed. P.R. Krishnaiah), North-Holland, Amsterdam, 1981.
- ST**
- [71] G. Terdik: Bilinear Stochastic Models and Related Problems of Nonlinear Time Series Analysis; A Frequency Domain Approach, *Lecture Notes in Statistics, Springer-Verlag, New York*, Vol. 142, 1999.
- [72] Gy. Terdik, T. Gyires: Internet Traffic Modeling with Lévy Flights. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 17, No. 1, pp. 120-129, February 2009.
- [73] G. Terdik, J. Máth: A new test of linearity for time series based in its bispectrum, *Journal of Time Series* 19 (6), pp. 737-749, 1998.
- [74] Gy. Terdik, S. Molnar: A General Fractal Model of Internet Traffic. *Proceedings of the 26th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*, IEEE Computer Society, 2001.
- [75] Tim Szigeti, Christina Hattingh: End-to-End QoS Network Design. *Cisco Press*, ISBN: 1-58705-176-1, 2004.
- [76] G. Samorodnitsky, M. Taqqu: Stable Non-Gaussian Random Processes: Stochastic Models with Infinite Variance. *Chapman and Hall, New York*, 1994.
- [77] T. Subba Rao, M. M. Gabr: A test for linearity of stationary time series, *Journal of Time Series Analysis, J TSA*, pp. 145-158, 1980.
- [78] T. Subba Rao, E. Tsolak: Testing Nonstationary Time Series for Gaussianity and Linearity using the Evolutionary Bispectrum: An application to Internet Traffic Data. *MIMS EPrint: 2006.43*, pp. 1-34, 2006.

- [79] T. Subba Rao, M. M. Gabr: Lecture Notes An Introduction to Bispectra Analysis and Bilinear Time Series Models. *Lecture notes in statistics, Vol. 24*, Springer-Verlag, 1984.
- [80] M. Taqqu, W. Willinger, R. Sherman, Proof of a fundamental result in self-similar traffic modeling. *Computer Communication Review, Vol. 27*, pp. 5-23, 1997.
- [81] Eleni P. Tsolaki: Testing nonstationary time series for Gaussianity and linearity using the evolutionary bispectrum: An application to internet traffic data, *Signal Processing, Vol. 88, Issue 6*, pp. 1355-1367, June 2008.

U-Z

- [82] University of Minnesota: *Minnesota Internet Traffic Studies (MINTS)*. <http://www.dtc.umn.edu/mints/igrowth.html>
- [83] G. de Veciana, G. Kesidis, J. Walrand: Resource management in wide-area ATM networks using effective bandwidths. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 13*, pp. 1081-1090, 1995.
- [84] White Paper: Advanced QoS. *Allied Telesis*, <http://www.alliedtelesis.com>
- [85] White Paper: QoS. *Allied Telesis*, <http://www.alliedtelesis.com>
- [86] Walter Willinger, Murad S. Taqqu, Ashok Erramilli: A Bibliographical Guide to Self-Similar Traffic and Performance Modeling for Modern High-Speed Networks. In *Stochastic Networks: Theory and Applications*, ed. F. P. Kelly, S. Zachary, and I. Ziedins, 339-366. Oxford, UK: Clarendon Press, 1996.
- [87] W. Willinger, M. S. Taqqu, W. E. Leland, V. Wilson: Self-similarity in high-speed packet traffic: analysis and modeling of Ethernet traffic measurements. *Statistical Science, Vol. 10*, pp. 67-85, 1995.
- [88] W. Willinger, M. Taqqu, R. Sherman, and D. Wilson: Self-similarity through high-variability: statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source level. In *Proc. ACM SIGCOMM'95*, pp. 100-113, 1995.
- [89] W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, and D.V. Wilson: On the self-similar nature of ethernet traffic (extended version). *IEEE/ACM Transactions on Networking, 2*, pp. 1-15, 1994.

- [90] W. Willinger, M. S. Taqqu, W. E. Leland, V. Wilson: Self-similarity through high-variability: statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source Level. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 5, pp. 71-86, February 1997.
- [91] X. Xiao, L. M. Ni: Internet QoS: A Big Picture. *IEEE Network Magazine*, March 1999.

7.2. A jelöltnek az értekezés témájához kapcsolódó publikációi

7.2.1. Referált folyóiratcikkek

1. **Zoltán Gál (2009)**: VoIP LAN/MAN traffic analysis for NGN QoS management, *Infocommunications Journal*, Volume LXIV, ISSN:0866-5583, pp. 22-29.
2. **Gál Zoltán (2008)**: NGN szolgáltatások sávszélesség-menedzsmentje LAN/MAN környezetben, *Híradástechnika*, Volume LXIII., ISSN:0018-2028, pp. 29-36 (in Hungarian).
3. **Gál Zoltán, Balla Tamás (2007)**: A QoS hatása az infokommunikációs alkalmazásokra, *Híradástechnika*, Volume LXII., ISSN:0018-2028, pp. 7-16 (in Hungarian).
4. **Zoltán Gál, Andrea Karsai, Peter Orosz (2007)**: Effect of WiFi systems on multimedia applications, *Info-Communication-Technology - Selected Papers*, Volume LXII., ISSN:0866-5583, pp. 8-14.
5. **Zoltán Gál, Andrea Karsai, Peter Orosz (2005)**: Evaluation of IPv6 services in mobile WiFi environment, *Info-Communication-Technology - Selected Papers*, Volume LX., ISSN:0866-5583, pp. 47-54.
6. György Terdik, **Zoltán Gál**, Endre Iglói, Sándor Molnár (2002): Bispectral Analysis of Traffic in High-Speed Networks, *Computers and Mathematics with Applications 43, Elsevier Science*, pp. 1575-1583 [DOI: 10.1016/S0898-1221(02)00120-7].
7. **Gál Zoltán**, Iglói Endre, Terdik György (1999): Nagysebességű informatikai hálózat adatforgalmának matematikai statisztikai jellemzése, *Alkalmazott Matematikai Lapok*, Volume 19, pp. 29-38 (Journ. of Appl. Math. of Hung. Acad. of Sci.) [Zentralblatt Math. Review 0959.68002.] (in Hungarian).
8. Viktória Elek, **Zoltán Gál**, H. L. Phan, Csaba Szabó (1996): ATM LAN network design, *Journal on Communications*, Volume XLVII, pp. 17-23.

7.2.2. Referált konferencia-kiadványok, könyvfejezetek

1. **Zoltán Gál, Tamás Balla (2007)**: Statistical Aspects of Network Based Real-time Group Communication and Collaboration Services, *7th International Conference on Applied Informatics, Eger-Noszvaj - Conference Proceedings*, Volume 2, Hungary, 28-31 January, 2007, pp 343-351.

2. **Zoltán Gál**, György Terdik (2001): Multifractal Study of Wireless and Wireline Datanetworks, *Proceedings of COMCON 8th: International Conference on Advances in Communications and Control, Telecommunications/Signal Processing*, Crete, Greece, 25-29 June 2001, Ed. W. Wells, Optimization Softw., INC., New York Los Angeles, ISBN 0-911575-78-2, pp. 773-784.
3. **Zoltán Gál**, Endre Iglói, György Terdik (2001): Multifractal Model of High Speed IP over Ethernet Traffic, *5th International Conference on Applied Informatics – Conference Proceedings*, Eger, Hungary, 28 January-3 February 2001. CD-ROM
4. **Zoltán Gál** (1999): Statistical Aspects of Migration to ATM in Multimedia Network Environment, *Proceedings of the 4th International Conference on Applied Informatics, Eger-Noszvaj*, Hungary, 30 August - 3 September 1999, pp. 275-283 (2001). [Zentralblatt Math. Review 0999.68618]
5. **Z. Gál**, Gy. Terdik, E. Iglói (2000): Multifractal Study of Internet Traffic, *2000 WSES International Conference on Applied and Theoretical Mathematics*, Edited by N.E.Mastorakis mastor@ieee.org Copyright © 2000, by World Scientific and Engineering Society, Computer Science Bibliography Collection review, ISBN: 960-8052-20-3, pp. 2371-2376.
6. **Zoltán Gál** (2000): Statistical Aspects of the ATM Migration Solutions: LANE vs. CLIP, *International Symposium on Telemedicine and Teleeducation in Practice, ISTEP'2000 – Conference Proceedings*, Kosice, Slovak Republic, 22-24 March, 2000, ISBN 80-88964-38-5, pp. 129-134.
7. **Zoltán Gál**, Ida Rápolti, Katalin Rutkovszky, György Terdik (1999): How Does Internet Change Our Life - A Case Study at Lajos Kossuth University of Debrecen, *First IEEE/POPOV Workshop on Internet Technologies and Services – Conference Proceedings*, Moscow, Russia, 25-28 October 1999., ISBN: 0-7803-5985-2, pp 113-125.
8. **Zoltán Gál**, György Terdik, Endre Iglói (1999): An Analysis of ATM Traffic Generated by Local Network, *7th International Conference on Advances in Communications and Control, TELECOMMUNICATIONS/SIGNAL PROCESSING – Conference Proceedings*, Athens, Greece, 28 June - 2 July 1999., ISBN: 0-911575-75-8, pp. 329-342.
9. **Zoltán Gál**, Csaba Szabó (1996): Migration to ATM in an Academic MAN Environment - Network Design Considerations and a Case Study, *8th IEEE LAN/MAN Workshop Proceedings*, Berlin, 25-28 August, 1996.
10. Böttkös László, Csukás Levente, **Gál Zoltán**, Erdősi Péter, Kiss Zoltán, Krausz Tamás, Rápolti Ida, Rutkovszki Edéné (1996): Informatikai Hálózati Ismeretek (KLTENET, UDNET, ..., INTERNET)'96, *KLTE ISZK kiadvány, Debrecen*, pp. 105-154 (in Hungarian)

7.2.3. Egyéb konferencia-kiadványok

1. **Gál Zoltán**, Sztrik János: IP telefonok QoS LAN-tartományon belüli adatforgalmának wavelet elemzése (2008): *Informatika a Felsőoktatásban konferencia*, Debreceni Egyetem, Debrecen, 2008. augusztus 27-29 (in Hungarian).
2. **Gál Zoltán**, Karsai Andrea, Orosz Péter (2006): Adatbiztonság elemzése mobil WiFi környezetben, *NetworkShop'2006 konferencia-kiadvány*, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2006. április 19-21 (in Hungarian).
3. **Gál Zoltán**, Karsai Andrea, Orosz Péter (2006): A WiFi rendszerek multimédiás alkalmazásokra gyakorolt hatása, *NetworkShop'2006 konferencia-kiadvány*, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2006. április 19-21 (in Hungarian).
4. **Gál Zoltán**, Pethő Attila, Tóth István (2005): Debreceni Egyetem Informatikai Tudásközpont (DEITK) koncepció, *Informatika a Felsőoktatásban konferencia*, Debreceni Egyetem, Debrecen, 2005. augusztus 24-26 (in Hungarian).
5. **Gál Zoltán**, Karsai Andrea, Orosz Péter (2005): IPv6 kapcsolatok elemzése mobil WiFi környezetben, *NetworkShop'2005 konferencia-kiadvány*, Szegedi Tudományegyetem, Szeged, 2005. március 30-április 1 (in Hungarian).
6. Andrea Huszti, Attila Nagy, Attila Pethő, **Zoltán Gál** (2004): Life at the Eastern part of EU, *Megaconference VI – videoconference presentation*, Ohio, USA, 9 December 2004, http://commonsvcg.oar.net/call_viewer/index.php
7. Molnár Gergely, Emri Miklós, Molnár József, Balkay László, Ecsedi Kornél, Trón Lajos, **Gál Zoltán** (2004): KLASZTER alapú, nagysebességű adatgyűjtés és real-time feldolgozás (IKTA5-153/2002), *NetworkShop'2004 konferencia*, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2004. április 5-7 (in Hungarian).
8. **Gál Zoltán**, Karsai Andrea (2004): Videokonferencia rendszerek minőségi garancia jellemzőinek elemzése, *NetworkShop'2004 konferencia-kiadvány*, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2004. április 5-7 (in Hungarian).
9. Ecsedi Kornél, **Gál Zoltán**, Emri Miklós, Molnár József, Farkas Attila (2003): Multiprocesszoros és Grid technológia alkalmazása az orvosi képfeldolgozásban (IKTA5-153/2002), *NetworkShop'2003 konferencia-kiadvány*, Pécsi Tudományegyetem, Pécs, 2003. április 14 – 17 (in Hungarian).
10. **Gál Zoltán**, Karsai Andrea (2003): A Debreceni Egyetem elosztott tűzfalrendszere, *NetworkShop'2003 konferencia-kiadvány*, Pécsi Tudományegyetem, Pécs, 2003. április 14 – 17 (in Hungarian).
11. **Gál Zoltán**, Agócs László, Ecsedi Kornél, Vass Tamás (2002): Integrált Informatikai Szolgáltatások a Debreceni Egyetemen, *Informatika a*

- Felsőoktatásban 2002 konferencia-kiadvány*, Debrecen, 2002. augusztus 28-30 (in Hungarian).
12. Almási Béla, **Gál Zoltán (2002)**: Cisco Hálózati Akadémiai képzés a Debreceni Egyetemen, *Informatika a Felsőoktatásban 2002 konferencia-kiadvány*, Debrecen, 2002. augusztus 28-30 (in Hungarian).
 13. **Gál Zoltán**, Karsai Andrea (2002): Migráció Gigabit Ethernetre és ennek hatásai, *NetworkShop'2002 konferencia-kiadvány*, Eszterházy Károly Főiskola, Eger, 2002. március 26-28 (in Hungarian).
 14. Guthy Zsolt, Herdon Miklós, Kovács György, **Gál Zoltán (2001)**: Wireless technológiák kísérleti alkalmazásának tapasztalatai, *NetworkShop'2001 konferencia-kiadvány*, Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron, 2001. április 18-20 (in Hungarian).
 15. **Gál Zoltán (2000)**: A Debreceni Egyetem ATM hálózata, *NJSZT VII. Országos Kongresszusa konferencia*, Eger, 2000. június 21-23 (in Hungarian).
 16. **Gál Zoltán**, Terdik György (2000): A Debreceni Egyetem ATM és Gigabit hálózata, *NetworkShop'2000 konferencia-kiadvány*, Szent István Egyetem, Gödöllő, 2000. április 18-20 (in Hungarian).
 17. Terdik György, **Gál Zoltán**, Iglói Endre (1999): Nagysebességű informatikai hálózatok és a zene, *Informatika a felsőoktatásban konferencia-kiadvány*, Debrecen, 1999. augusztus 27-29 (in Hungarian).
 18. **Gál Zoltán**, Ecsedi Kornél (1999): Multimédia VLAN-ok ATM felett, *Informatika a felsőoktatásban konferencia-kiadvány*, Debrecen, 1999. augusztus 27-29 (in Hungarian).
 19. Almási Béla, **Gál Zoltán (1999)**: Operációs- és hálózati rendszerek adminisztrációjának oktatása a KLTE-n, *Informatika a felsőoktatásban konferencia-kiadvány* Debrecen, 1999. augusztus 27-29 (in Hungarian).
 20. A Debreceni Egyetem Informatikai Konceptiója v1.3 (1999): *Debreceni Egyetem belső jelentése*, 1999. május 4., pp. 19-28 and 41-51 (in Hungarian).
 21. Terdik György, **Gál Zoltán**, Iglói Endre (1999): A KLTENET hangjai, avagy a hálózati forgalom jellemzése, *Networkshop'99 konferencia-kiadvány*, Nyíregyháza, abstr. 9. old. és teljes szöveg CD-n, (in Hungarian).
 22. **Gál Zoltán**, Terdik György (1999): A Kossuth Lajos Tudományegyetem második generációs ATM hálózata, *Networkshop'99 konferencia-kiadvány*, Nyíregyháza, 1999. március 30. - április 1 (in Hungarian).
 23. **Z. Gál**, I. Rápolti, K. Rutkovszky, G. Terdik, Hungary (1997): Role of the computer center in migration to Information Society: A case study at Kossuth University

- of Debrecen, *EUNIS Congress 97, European Cooperation in Higher Education Information Systems – Conference Proceedings*, (<http://www.eunis.org/events/congresses/EUNIS97/papers/030103.html>) Grenoble, France, 9-11 September 1997, pp. 274-281.
24. Terdik György, **Gál Zoltán** et. al (1997): A KLTE számítógépes hálózatának fejlődése (1997), Az Odrától az Internetig, *A KLTE Informatikai és Számítóközpont jubileumi kiadványa*, 1967-1997, pp. 21-24 (in Hungarian).
25. **Gál Zoltán** (1997): Mobil kapcsolatok ATM és IPng felett, *Networkshop'97 konferencia-kiadvány*, Keszthely, 1997. május 27-29 (in Hungarian).
26. **Gál Zoltán** (1996): Alkalmazások hatása az informatikai hálózatok fejlődésére, *Networkshop'96 konferencia-kiadvány*, Debrecen, 1996. augusztus 27-30 (in Hungarian).
27. **Gál Zoltán**, Iglói Endre, Terdik György (1996): Nagysebességű informatikai hálózat adatforgalmának matematikai statisztikai jellemzése, *Informatika a felsőoktatásban 1996 konferencia-kiadvány*, Debrecen, 1996. augusztus 27-30, pp 709-716 (in Hungarian).
28. **Zoltán Gál**, Csaba Szabó (1996): Migration to ATM in an Academic MAN Environment - Network Design Considerations and a Case Study, *8th IEEE LAN/MAN Workshop Proceedings*, Berlin, 25-28 August, 1996.
29. **Zoltán Gál**, Zsolt Korcsolay, György Terdik (1995): UDNET: An Informatics network at Universitas of Debrecen, *Trends in Academic Information Systems in Europe*, Dusseldorf, November 1995.
30. **Gál Zoltán**, Korcsolay Zsolt, Terdik György (1995): UDNET: Informatikai hálózat a Debreceni Universitason, *NJSZT VI. Országos Kongresszusa konferencia-kiadvány*, Siófok, 1995. május 28-31, pp 529-532 (in Hungarian).
31. **Gál Zoltán** (1995): A Debreceni Universitas hálózatának ATM alapú B-ISDN fejlesztési koncepciója, *Networkshop'95 konferencia-kiadvány*, Gödöllő, 1995. április 19-21 (in Hungarian).
32. Terdik György, **Gál Zoltán**, Tajti Tibor (1995): A Debreceni Universitas lokális hálózatainak adatvédelmi és biztonsági bővítése, *Networkshop'95 konferencia-kiadvány*, Gödöllő, 1995. április 19-21 (in Hungarian).
33. **Gál Zoltán**, Korcsolay Zsolt, Terdik György (1994): Informatikai hálózat a debreceni Universitason, *Ricomnet 1994 – konferencia kiadvány*, pp. 109-115. (in Hungarian).
34. **Gál Zoltán**, Böttkös László (1994): A KLTEnet korszerű adminisztrációs megoldásai, *Networkshop'94 konferencia-kiadvány*, Keszthely, 1994. április 6-8 (in Hungarian).

35. **Gál Zoltán (1993):** A Kossuth Lajos Tudományegyetem elektronikus levelező rendszere, *Informatika a felsőoktatásban 1993 konferencia-kiadvány*, Debrecen, 1993. szeptember 1-3 (in Hungarian).
36. **Gál Zoltán, Korcsolay Zolt (1993):** EARN hálózati szolgáltatások használata VAX/VMS környezetben, *Networkshop'93 konferencia-kiadvány*, Pécs, 1993. április 14-16 (in Hungarian)
37. Terdik György, Agócs László, Dombrádi Zolt, **Gál Zoltán**, Herdon Miklós, Korcsolay Zolt, Kovács György, Krausz Tamás, Sági György, Székely Géza (1992): Debreceni Universitas Adatátviteli Hálózata, *NJSZT V. Országos Kongresszusa, Információtechnológia'92 konferencia-kiadvány*, Debrecen, 1992. június 21-24 (in Hungarian).
38. **Gál Zoltán (1992):** A Kossuth Lajos Tudományegyetem informatikai rendszere, *NJSZT V. Országos Kongresszusa, Információtechnológia'92 konferencia-kiadvány*, Debrecen, 1992. június 21-24, (in Hungarian).

7.2.4. Konferencia előadások

1. **Zoltán Gál**, György Terdik: Wavelet analysis of QoS based network traffic, *8th International Conference on Applied Informatics*, Eger, Hungary, 27-30 January, **2010**.
2. **Zoltán Gál**, György Terdik: Sound synthesis of the QoS mechanisms upon the fully congested IP streams, *Probability and Statistics with Applications, International Conference*, University of Debrecen, Debrecen, 8-12 June **2009**.
3. **Gál Zoltán**, Balla Tamás, Karsai Andrea: Konvergens hálózati erőforrások terheltségének elemzése, *NetworkShop'2009 konferencia*, Szegedi Tudományegyetem, Szeged, **2009**. április 15-17. (in Hungarian).
4. **Gál Zoltán**, Sztrik János: IP telefonok QoS LAN-tartományon belüli adatforgalmának wavelet elemzése, *Informatika a Felsőoktatásban konferencia*, Debreceni Egyetem, Debrecen, **2008**. augusztus 27-29 (in Hungarian).
5. **Gál Zoltán**, Karsai Andrea, Balla Tamás: LAN/MAN sávszélesség menedzsment VoIP és IP telefon környezetben, *NetworkShop'2008 konferencia*, Dunaújvárosi Főiskola, Dunaújváros, **2008**. március 17. - március 19. (in Hungarian).
6. **Gál Zoltán**: Adatátviteli hálózatok QoS jellemzése, 9. Gyires Béla Informatikai Nap, Debreceni Egyetem Informatikai Kar, **2007**. november 23. (in Hungarian).

7. **Gál Zoltán**, Balla Tamás: Valós idejű csoport-kommunikációs és kollaborációs szolgáltatások hálózati forgalmának elemzése, *NetworkShop'2007 konferencia*, Eszterházy Károly Főiskola, Eger **2007**. április 11-13. (in Hungarian).
8. **Zoltán Gál**, Tamás Balla: Statistical Aspects of Network Based Real-time Group Communication and Collaboration Services, *7th International Conference on Applied Informatics, Eger-Noszvaj*, Hungary, 28-31 January, **2007**.
9. **Gál Zoltán**, Karsai Andrea, Orosz Péter: Adatbiztonság elemzése mobil WiFi környezetben, *NetworkShop'2006 konferencia*, Miskolci Egyetem, Miskolc, **2006**. április 19-21 (in Hungarian).
10. **Gál Zoltán**, Karsai Andrea, Orosz Péter: A WiFi rendszerek multimédiás alkalmazásokra gyakorolt hatása, *NetworkShop'2006 konferencia*, Miskolci Egyetem, Miskolc, **2006**. április 19-21 (in Hungarian).
11. **Gál Zoltán**, Pethő Attila, Tóth István: Debreceni Egyetem Informatikai Tudásközpont (DEITK) koncepció, *Informatika a Felsőoktatásban konferencia*, Debreceni Egyetem, Debrecen, **2005**. augusztus 24-26 (in Hungarian).
12. **Gál Zoltán**, Karsai Andrea, Orosz Péter: IPv6 kapcsolatok elemzése mobil WiFi környezetben, *NetworkShop'2005 konferencia*, Szegedi Tudomány-egyetem, Szeged, **2005**. március 30-április 1 (in Hungarian).
13. Andrea Huszti, Attila Nagy, **Zoltán Gál**: Life at the Eastern part of EU, *Megaconference VI – videoconference presentation*, Ohio, USA, 9 December **2004**, (http://commonsvcg.oar.net/call_viewer/index.php).
14. Orosz Péter, **Gál Zoltán**: Vastag kliensek menedzsmentje Tivoli környezetben, *NetworkShop'2004 konferencia*, Széchenyi István Egyetem, Győr, **2004**. április 5-7 (in Hungarian).
15. Faragó Zsuzsa, **Gál Zoltán**: A Neptun rendszer erőforrás használatának elemzése, *NetworkShop'2004 konferencia*, Széchenyi István Egyetem, Győr, **2004**. április 5-7 (in Hungarian).
16. Molnár Gergely, Emri Miklós, Molnár József, Balkay László, Ecsedi Kornél, Trón Lajos, **Gál Zoltán**: Klaszter alapú, nagysebességű adatgyűjtés és real-time feldolgozás (IKTA5-153/2002), *NetworkShop'2004 konferencia*, Széchenyi István Egyetem, Győr, **2004**. április 5-7 (in Hungarian).
17. **Gál Zoltán**, Karsai Andrea: Videokonferencia rendszerek minőségi garancia jellemzőinek elemzése, *NetworkShop'2004 konferencia*, Széchenyi István Egyetem, Győr, **2004**. április 5-7 (in Hungarian).
18. Ecsedi Kornél, **Gál Zoltán**, Emri Miklós, Molnár József, Farkas Attila: Multiprocesszoros és Grid technológia alkalmazása az orvosi

- képfeldolgozásban (IKTA5-153/2002), *NetworkShop'2003 konferencia*, Pécsi Tudományegyetem, Pécs, **2003.** április 14 – 17 (in Hungarian).
19. **Gál Zoltán**, Karsai Andrea: A Debreceni Egyetem elosztott tűzfalrendszere, *NetworkShop'2003 konferencia*, Pécsi Tudományegyetem, Pécs, **2003.** április 14 – 17 (in Hungarian).
 20. **Gál Zoltán**, Agócs László, Ecsedi Kornél, Vass Tamás: Integrált Informatikai Szolgáltatások a Debreceni Egyetemen, *Informatika a Felsőoktatásban 2002 konferencia*, Debrecen, **2002.** augusztus 28-30. (in Hungarian).
 21. Almási Béla, **Gál Zoltán**: Cisco Hálózati Akadémiai képzés a Debreceni Egyetemen, *Informatika a Felsőoktatásban 2002 konferencia*, Debrecen, **2002.** augusztus 28-30 (in Hungarian).
 22. **Gál Zoltán**, Karsai Andrea: Migráció Gigabit Ethernetre és ennek hatásai, *NetworkShop'2002 konferencia*, Eszterházy Károly Főiskola, Eger, **2002.** március 26-28 (in Hungarian).
 23. **Zoltán Gál**, György Terdik: Multifractal Study of Wireless and Wireline Datanetworks, *COMCON 8th: International Conference on Advances in Communications and Control, Telecommunication/ Signal Processing*, Crete, Greece, 25-29 June **2001.**
 24. Guthy Zsolt, Herdon Miklós, Kovács György, **Gál Zoltán**: Wireless technológiák kísérleti alkalmazásának tapasztalatai, *NetworkShop'2001 konferencia*, Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron, **2001.** április 18-20 (in Hungarian).
 25. **Gál Zoltán**, Karsai Andrea, Terdik György: Videokonferencia ATM-Ethernet heterogén környezetben, *NetworkShop'2001 konferencia*, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, **2001.** április 18-20 (in Hungarian).
 26. **Zoltán Gál**, Endre Iglói, György Terdik: Model of High Speed IP over Ethernet Traffic, *5th International Conference on Applied Informatics*, Eger, Hungary, 28 January-3 February **2001.**
 27. **Zoltán Gál**, György Terdik, Endre Iglói: Multifractal Study of Internet Traffic, *2000 WSES International Conference on Applied and Theoretical Mathematics*, Vravrona, Greece, December 1-3, **2000.**
 28. **Gál Zoltán**: A Debreceni Egyetem ATM hálózata, *NJSZT VII. Országos Kongresszusa konferencia*, Eger, **2000.** június 21-23 (in Hungarian).
 29. **Gál Zoltán**, Terdik György: A Debreceni Egyetem ATM és Gigabit hálózata, *NetworkShop'2000 konferencia*, Szent István Egyetem, Gödöllő, **2000.** április 18-20 (in Hungarian).

30. **Zoltán Gál**: Statistical Aspects of the ATM Migration Solutions: LANE vs. CLIP, *International Symposium on Telemedicine and Teleeducation in Practice, ISTEP'2000*, Kosice, Slovak Republic, 22-24 March, **2000**.
31. **Zoltán Gál**, Ida Rápolti, Katalin Rutkovszky, György Terdik: How Does Internet Change Our Life - A Case Study at Lajos Kossuth University of Debrecen, *First IEEE/POPOV Workshop on Internet Technologies and Services*, Moscow, Russia, 25-28 October **1999**.
32. **Zoltán Gál**: Statistical Aspects of Migration to ATM in Multimedia Network Environment, *Proceedings of the 4th International Conference on Applied Informatics, Eger-Noszvaj*, Hungary, 30 August - 3 September **1999**.
33. Terdik György, **Gál Zoltán**, Iglói Endre: Nagysebességű informatikai hálózatok és a zene, *Informatika a felsőoktatásban konferencia*, Debrecen, **1999**. augusztus 27-29 (in Hungarian).
34. **Gál Zoltán**, Ecsedi Kornél: Multimédia VLAN-ok ATM felett, *Informatika a felsőoktatásban konferencia*, Debrecen, **1999**. augusztus 27-29 (in Hungarian).
35. Almási Béla, **Gál Zoltán**: Operációs- és hálózati rendszerek adminisztrációjának oktatása a KLTE-n, *Informatika a felsőoktatásban konferencia*, Debrecen, **1999**. augusztus 27-29 (in Hungarian).
36. **Zoltán Gál**, György Terdik, Endre Iglói: An Analysis of ATM Traffic Generated by Local Network,, *7th International Conference on Advances in Communications and Control, TELECOMMUNICATIONS/SIGNAL PROCESSING*, Athens, Greece, 28 June - 2 July **1999**.
37. **Gál Zoltán**, Terdik György: A Kossuth Lajos Tudományegyetem második generációs ATM hálózata, *Networkshop'99 konferencia*, Nyíregyháza, **1999**. március 30. - április 1 (in Hungarian).
38. **Gál Zoltán**, Ecsedi Kornél: Béreltvonalak használatának elemzése, *Networkshop'98 konferencia*, Győr, **1998**. április 14-17 (in Hungarian).
39. **Gál Zoltán**: Mobil kapcsolatok ATM és IPng felett, *Networkshop'97 konferencia*, Keszthely, **1997**. május 27-29 (in Hungarian).
40. **Gál Zoltán**: Alkalmazások hatása az informatikai hálózatok fejlődésére, *Networkshop'96 konferencia*, Debrecen, **1996**. augusztus 27-30 (in Hungarian).
41. **Gál Zoltán**, Iglói Endre, Terdik György: Nagysebességű informatikai hálózat adatforgalmának matematikai statisztikai jellemzése, *Informatika a felsőoktatásban 1996 konferencia*, Debrecen, **1996**. augusztus 27-30 (in Hungarian).

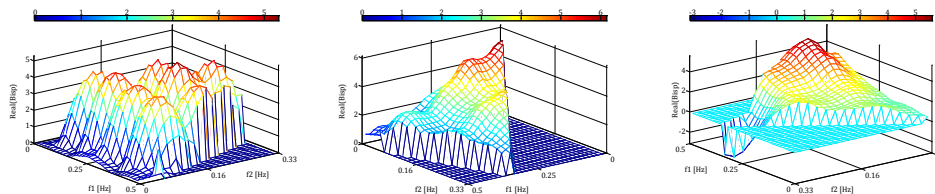
42. **Zoltán Gál**, Csaba Szabó: Migration to ATM in an Academic MAN Environment - Network Design Considerations and a Case Study, *8th IEEE LAN/MAN Workshop Proceedings*, Poster presentation, Berlin, 25-28 August, **1996**.
43. **Gál Zoltán**: Optikai alapú városi hálózat építése, *17. Szervezéstudományi Akadémia konferencia*, Nyíregyháza, **1996**. augusztus 21-23 (in Hungarian).
44. **Zoltán Gál**, Zsolt Korcsolay, György Terdik: UDNET: An Informatics network at Universitas of Debrecen, *Trends in Academic Information Systems in Europe Conference*, Dusseldorf, November **1995**.
45. **Gál Zoltán**: ATM alapú B-ISDN fejlesztések a debreceni MAN-on, *NJSZT VI. Országos Kongresszusa*, Siófok, **1995**. május 28-31 (in Hungarian).
46. **Gál Zoltán**, Korcsolay Zsolt, Terdik György: UDNET: Informatikai hálózat a Debreceni Universitason, *NJSZT VI. Országos Kongresszusa konferencia*, Siófok, **1995**. május 28-31 (in Hungarian).
47. **Gál Zoltán**: A Debreceni Universitas hálózatának ATM alapú B-ISDN fejlesztési koncepciója, *Networkshop'95 konferencia*, Gödöllő, **1995**. április 19-21 (in Hungarian).
48. Terdik György, **Gál Zoltán**, Tajti Tibor: A Debreceni Universitas lokális hálózatainak adatvédelmi és biztonsági bővítése, *Networkshop'95 konferencia*, Gödöllő, **1995**. április 19-21 (in Hungarian).
49. **Gál Zoltán**, Korcsolay Zsolt, Terdik György: Informatikai hálózat a debreceni Universitason, *Ricomnet 1994 – konferencia*, **1994**, pp. 109-115 (in Hungarian).
50. **Gál Zoltán**, Böttkös László: A KLTEnet korszerű adminisztrációs megoldásai, *Networkshop'94 konferencia*, Keszthely, **1994**. április 6-8 (in Hungarian).
51. **Gál Zoltán**: A Kossuth Lajos Tudományegyetem elektronikus levelező rendszere, *Informatika a felsőoktatásban 1993 konferencia*, Debrecen, **1993**. szeptember 1-3 (in Hungarian).
52. **Gál Zoltán**, Korcsolay Zsolt: EARN hálózati szolgáltatások használata VAX/VMS környezetben, *Networkshop'93 konferencia*, Pécs, **1993**. április 14-16 (in Hungarian).
53. Terdik György, Agócs László, Dombrádi Zsolt, **Gál Zoltán**, Herdon Miklós, Korcsolay Zsolt, Kovács György, Krausz Tamás, Sági György, Székely Géza: Debreceni Universitas Adatátviteli Hálózata, *NJSZT V.Országos Kongresszusa, Információtechnológia'92 konferencia*, Debrecen, **1992**. június 21-24 (in Hungarian).

54. **Gál Zoltán:** A Kossuth Lajos Tudományegyetem informatikai rendszere, *NJSZT V. Országos Kongresszusa, Információtechnológia'92*, Debrecen, **1992.** június 21-24, (in Hungarian).

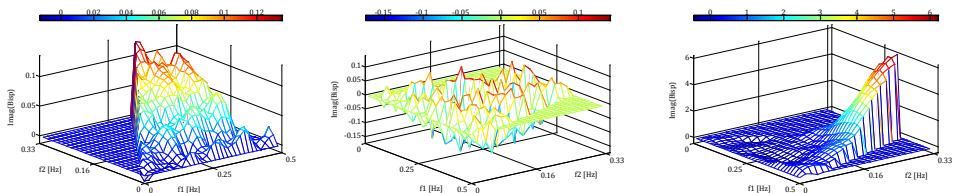
Appendix A: Felhasznált Matlab forráskódok listája

1. Ananthram Swami: HOSA - Higher Order Spectral Analysis Toolbox, 12-Feb-2003
(Updated 13-Feb-2003),
<http://www.mathworks.com.au/matlabcentral/fileexchange/3013>
2. David Donoho, Arian Maleki, Morteza Shahram: Wavelab850 (Wavelets Library, Stanford University),
<http://www-stat.stanford.edu/~wavelab>
3. Gál Zoltán: $ON/(ON + OFF)$ transzformáció wavelet elemzéssel.
<http://dragon.unideb.hu/~zgal/ononoff>
4. Computational Mathematics Laboratory, Rice University
<http://www-dsp.rice.edu/software/>
5. Mathematics Department, Yale University
<http://www.math.yale.edu/pub/wavelets/software/>

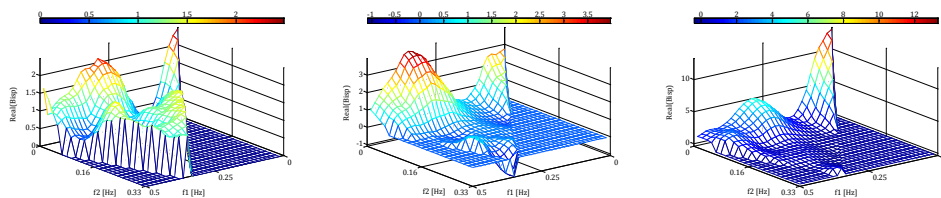
Appendix B: Bispektrum ábrák a Tézis_2-höz



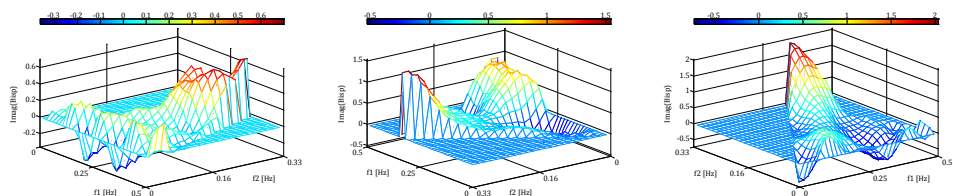
A T_i bispektrumának valós része (Eh32, Lh32, Ch32)



A T_i bispektrumának képzetes része (Eh32, Lh32, Ch32)



A T_i bispektrumának valós része (Ev128h80, Lv128h80, Cv128h80)



A T_i bispektrumának képzetes része (Ev128h32, Lv128h32, Cv128h32)

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék mondani a szakmai tanácsokért témavezetőmnek, Terdik Györgynek, a Debreceni Egyetem professzorának. Ezúton is szeretném kifejezni hálámat a hasznos és iránymutató ötletekért.

Jó érzéssel gondolok vissza arra, hogy az adathálózatok működésének mérnöki szemszögből történő megközelítését és hatékony vizsgálatának szemléletét Szabó Csabától, Papp Lászlótól és Harangozó Józseftől, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem professzoraitól tanulhattam meg.

Köszönöm a Debreceni Egyetem Informatikai Karának és azon belül az Informatikai Rendszerek és Hálózatok Tanszékének, valamint Sztrik János professzornak, hogy támogatta a kutató munkámat.

Örömmel tölt el, hogy a munka során édesanyám, családom mellett állt és a szeretetével támogatott.

Végül, de nem utolsó sorban, nagyrabecsüléssel gondolok vissza Kánya Gyula középiskolai tanáromra, hogy időben megmutatta a reáltudományok fontosságát és időtállóságát.

Debrecen, 2010. február 15.