

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei

INFOKOMMUNIKÁCIÓS HÁLÓZATOK QOS ANALÍZISE

Gál Zoltán

Témavezető: Prof. Dr. Terdik György



DEBRECENI EGYETEM
Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2010

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 gimnáziumi matematika tanáromra, hogy időben megmutatta a reáltudományok fontosságát és időtállóságát.

Debrecen, 2010. február 15.

Tartalomjegyzék

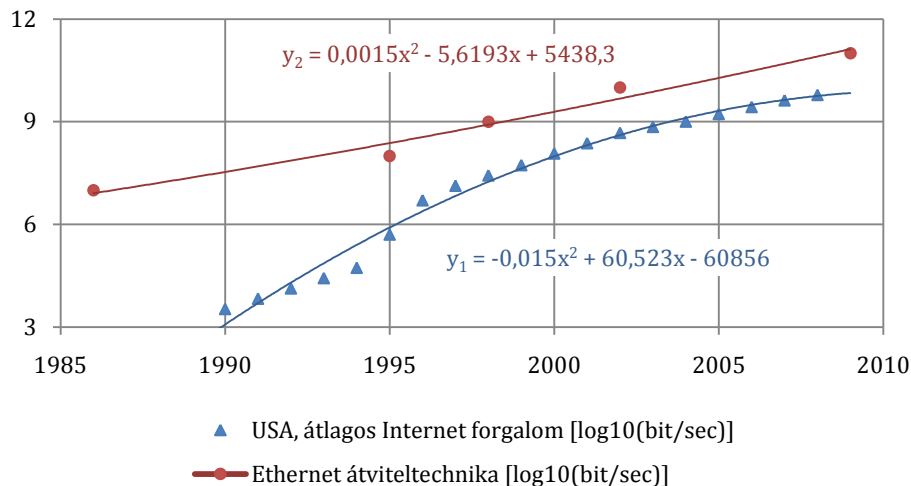
Köszönetnyilvánítás	1
1. A kutatás témaválasztásának indoklása	1
2. A doktori értekezés előzményei és célkitűzései	3
3. A kutatási módszerek rövid bemutatása	4
3.1. Forgalom idősorok önhasznosság és stacionaritás tulajdonságának elemzési módszerei	4
3.2. Forgalom idősorok elemzése bispektrummal és magasabb rendű momentumokkal	5
3.3. Forgalom idősorok elemzése wavelet módszerrel	7
4. Az értekezés új tudományos eredményei	9
Tézis_1: Bispektrum alkalmazása ATM WAN forgalomnál	9
Tézis_2: A bispektrum Ethernet, LANE és CLIP ATM forgalmaknál	11
Tézis_3: Az ON/(ON+OFF) forgalomelemzési módszer és tulajdonságai	14
Tézis_4: A QoS hatása az IP streaming típusú videó forgalomra	18
Tézis_5: A QoS hatása az IP hangforgalomra	22

Content

1. Research motivation	26
2. Premises and scope of the research	28
3. Short overview of the research methods	28
3.1. Self similarity and long range dependence analysis methods of traffic time series	28
3.2. Traffic time series analysis with bispectrum and higher order spectra	30
3.3. Traffic time series analysis with wavelet method	31
4. Theses and new results	33
Thesis No. 1: Application of the bispectrum at ATM WAN traffic	33
Thesis No. 2: Bispectrum at the Ethernet, LANE and CLIP ATM traffic	35
Thesis No. 3: Traffic modeling with method ON/(ON+OFF)	38
Thesis No. 4: Impact of the QoS on the IP streaming video	42
Thesis No. 5: Impact of the QoS on the IP voice	45
5. A jelöltnek az értekezés témájában készült publikációinak listája / List of publications	50
5.1. Referált folyóiratcikkek / Refereed papers	50
5.2. Referált konferencia-kiadványok, könyvfejezetek / Refereed conference papers, book chapters	50
5.3. Egyéb konferencia-kiadványok / Other publications	51
5.4. Konferencia előadások / Conference presentations	53
6. Irodalomjegyzék / Bibliography	57

1. A kutatás témaválasztásának indoklása

Az Internet által forgalmazott éves adatmennyiség, hasonlóan a félvezetőgyártásban ismert 2-es szorzó, kapacitás faktorral nő [13]. 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.).



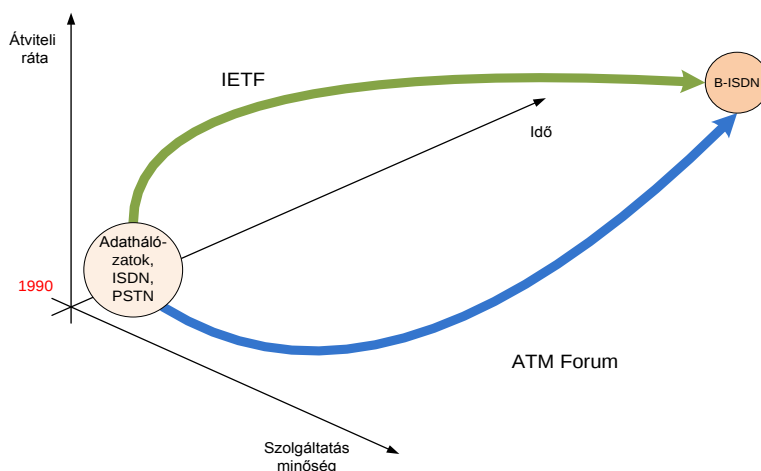
1.1. ábra. Átviteli rátaigény és a technológiai kínálat

A fenti adatokból ([20], [41]) 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 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 börsztös 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 börsztösség 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 e 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.

2. A doktori értekezés előzményei és célkitűzései

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 [47].

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, Cable TV, 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 [16], [17], [30], [44], [46].

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. Ennek okát kutatjuk a továbbiakban.

3. A kutatási módszerek rövid bemutatása

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 [5], [6], [14], [18], [26], [45], [46]. A továbbiakban X_t jelenti a $[0, t]$ időtartamban mért összforgalmat.

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 [32]:

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

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:

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

Az X_t folyamat autókovariancia függvénye, $\gamma(r, s) = E[(X_t - \mu)(X_t - \mu)]$, invariáns az eltolásra, azaz:

$$\gamma_X(r, s) = \gamma_X(r + k, s + k), \quad \forall r, s, k \in \mathbb{Z} \text{ esetén.} \quad (3.03)$$

Legyen σ X_t szórása. Az $r_X(k)$ -t az X_t , autókorrelációs függvényének nevezzük, ahol:

$$r_X(k) = \frac{1}{\sigma^2} \gamma(k), \quad \forall k \in \mathbb{Z} \text{ esetén, ahol } \sigma \text{ az } X_t \text{ szórása.} \quad (3.04)$$

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

$$Y(at) =_d a^H Y(t), \quad \forall a > 0, t \geq 0 \text{ esetén.} \quad (3.05)$$

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 $a > 1$ 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 önhasonló folyamatoknál az a változó módosulása ellenére a H exponens változatlan marad.

Az X_t m hosszúságú, egymást nem átfedő blokkjaiból létrehozott $X^{(m)}$ folyamatot m -ed rangú aggregátnak nevezzük, ha:

$$X_i^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{t=m(i-1)+1}^{mi} X_t, \quad \forall t \in \mathbb{Z} \text{ esetén.} \quad (3.06)$$

A másodrendű önhasonlóság 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 önhasonló és stacionárius növekményű. Ha $Y(t)$ H -sssi véges szórású, akkor $0 < H < 1$ [32]. 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 önhasonlósága és az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ diszkrét idősor másodrendű önhasonlóság közötti kapcsolatot az $X^{(m)}$ aggregált idősor teremti meg. Az X_t folyamat m -ed rangú aggregáltja és az X_t között fennáll az alábbi összefüggés [38]:

$$X =_d m^{1-H} X^{(m)}, \quad (3.07)$$

ami a H paraméter segítségével az X_t és az $X^{(m)}$ közötti skála függőséget mutatja a véges dimenziós eloszlások értelmében. Így a (3.06) és (3.07) összefüggések azt mutatják, hogy X_t és $m^{1-H} X^{(m)}$ folyamatoknak azonos vagy aszimptotikusan azonos másodrendű struktúrája kell, hogy legyen.

Az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ másodrendű önhasonló, H - Hurst paraméterű $0 < H < 1, H \neq 1/2$ folyamat $r_X(k), k \geq 1$ autókorrelációs függvénye becsülhető az alábbi módon [38]:

$$r_X(k) \sim H(2H - 1)k^{2H-2}, \quad \text{ha } k \rightarrow \infty. \quad (3.08)$$

A (3.08) összefüggés alapján, 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 [40], [42], [43], [44].

3.2. Forgalom idősorok elemzése bispektrummal és magasabb rendű momentumokkal

Az $X_t, t \in \mathbb{Z}$, és $\mu = E[X_t]$ várható értékű, 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 [19], [23], [39]:

$$E[(X_{t_1} - \mu)(X_{t_2} - \mu)(X_{t_3} - \mu)] = E[(X_{t_1+k} - \mu)(X_{t_2+k} - \mu)(X_{t_3+k} - \mu)] \quad (3.09)$$

Adott eloszlás kumulánsa szoros kapcsolatban áll az eloszlás momentumával. Általános esetben, az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ sztochasztikus folyamatnál csak az első három kumuláns egyezik meg a neki megfelelő centrális momentumokkal [39]. 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:

$$Cum(X_{t+t_1}, X_{t+t_2}, \dots, X_{t+t_l}) = Cum(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_l}). \quad (3.10)$$

Ha X_t rendelkezik harmadrendű momentumokkal, akkor nem csak az autókovariancia invariáns az időbeni eltolásra, hanem a harmadrendű kumuláns is csak két változótól függ. Az $X_t, t \in \mathbb{Z}$, k -rendű stacionárius folyamat kumulánsainak Fourier transzformáltját S_k , k -ad rendű spektrumnak nevezzük, azaz [33]:

$$S_k(\omega_{(1:k-1)}) = \sum_{t_j=-\infty, j=1,2,\dots,k-1}^{\infty} \text{Cum}(X_0, X_{t_{(1:k-1)}}) z_{(1:k-1)}^{-t_{(1:k-1)}}, \quad (3.11)$$

ahol ω a szögsebesség és $\omega = 2\pi f$, míg f a frekvencia. Az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ sztochasztikus folyamat másodrendű spektrumát egyszerűen spektrumnak, a harmadrendű spektrumot pedig bispektrumnak nevezzük [39]. Figyelembe véve a kumulánsok alap tulajdonságait, a bispektrum egyszerűbb alakjai az alábbiak [33]:

$$S_{3,Y} = \mathcal{F}(\text{Cum}(X_0, X_{t_1}, X_{t_2})) = \mathcal{F}(C_3(t_1, t_2)), \quad \forall t_1, t_2 \in \mathbb{Z}. \quad (3.12)$$

A gyakorlatban a bispektrum a jel energiájának fáziscsatoltságát méri [24], [27], [29], [31]. Szimmetria okokból 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 tekintjük a továbbiakban.

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:

$$B(z_1, z_2) = \frac{|S_{3,Y}(z_1, z_2)|^2}{S_{2,Y}(z_1)S_{2,Y}(z_2)S_{2,Y}(z_3)}. \quad (3.13)$$

Lineáris folyamat esetén a bikoherencia konstans értéket ad [36]. Az $X_t, t \in \mathbb{Z}$ másodrendű önhasonló, H -Hurst paraméterű folyamat multifraktál, ha $\forall m \in \mathbb{Z}_+$ aggregációs szintre igaz, hogy [34]:

$$\log(|\text{Cum}_m(X^{(n)}(t))|) = mH(m) \log(n) + c(m), \quad (3.14)$$

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

A Hurst paraméter becslésének ötletét Brillinger közölte a [8] cikkében, amit a négyzetes relatív hibák módszerére építve Terdik a [34], valamint Leonenko, Sikorskii és Terdik a [25] cikkekben dolgoztak ki részletességgel. A modell paramétere θ , míg a minimalizálni kívánt célfüggvény $Q_T(\theta)$ az alábbi formájú:

$$Q_T(\theta) = \frac{1}{|\Lambda|} \sum_{\omega \in \Lambda} \left(\frac{S_2(\omega; \theta) - S_2^T(\omega)}{S_2(\omega; \theta)} \right)^2 + \frac{1}{|\Delta|} \sum_{(\omega_1, \omega_2) \in \Delta} \frac{|S_3(\omega_1, \omega_2; \theta) - S_3^T(\omega_1, \omega_2)|^2}{S_2(\omega_1; \theta)S_2(\omega_2; \theta)S_2(\omega_1 + \omega_2; \theta)}, \quad (3.15)$$

ahol a T hosszúságú adatsor v 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 $\langle (0,0), (\pi,0), (\frac{2\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}) \rangle$ koordinátájú csúcspontokkal rendelkező három-szöget és $|\Delta|$ annak területét (ld. 3.1. ábra). Továbbá $S_2(\omega; \theta)$ az elméleti spektrum, $S_2^T(\omega)$ a becsült simított spektrum, $S_3(\omega_1, \omega_2; \theta)$ az elméleti bispektrum és $S_3^T(\omega_1, \omega_2)$ pedig a becsült simított bispektrum. A $Q_T(\theta)$ célfüggvény a $\theta = H$ esetén adja a minimális értéket, ami alapján iterációs megoldással megtalálható a becsült Hurst paraméter.

3.3. Forgalom idősorok elemzése wavelet módszerrel

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

$$\{T_Y(a, t) = \langle X, \psi_{a,t} \rangle, a \in \mathbb{R}^+, t \in \mathbb{R}\} \quad (3.16)$$

együtthatókat a jelet elemző függvényhalmaz és az $Y(t), t \in \mathbb{R}$ jel belső szorzataként állítja elő [1], [2], [3], [4]. A $\psi_{a,t}$ függvény elemeket tartalmazó halmaz a ψ_0 , referencia minta (anya wavelet) függvényében képződik az alábbi módon:

$$\{\psi_{a,t}(u) \equiv \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_0\left(\frac{u-t}{a}\right), a \in \mathbb{R}^+, t \in \mathbb{R}\}. \quad (3.17)$$

Bármely $\psi_{a,t}(u)$ függvényelem előállítható a ψ_0 anya wavelet $\mathcal{D}_a$ -dilatáció (skálázás) majd $\mathcal{T}_t$ -időcsúsztatás operátorok alapján, ahol:

$$\begin{aligned} (\mathcal{T}_\tau \psi_0) &\equiv \psi_0(t - \tau) \\ (\mathcal{D}_a \psi_0) &\equiv 1/\sqrt{a} \psi_0(t/a) \end{aligned} \quad (3.18)$$

A ψ_0 anya wavelet (pl. DaubechiesN, CoifletN, HaarN, SymmletN, stb.) egy olyan függvény, amely úgy az idő-, mint a frekvenciatérben szűk tartományban terül el, vagyis időben korlátos és a képviselt energiája is korlátos frekvencia (skála) tartományban helyezkedik el [15]. Ugyanakkor ki kell elégítenie az alábbi feltételt:

$$\int u^k \psi_0(u) du = 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (3.19)$$

vagyis sáváteresztő vagy oszcilláló függvénynek kell lennie. Innen származik a wavelet elnevezése is. 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.

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. Az MRA alapötlete, hogy az Y jelet egyre durvább approximációval elemezzük azáltal, hogy egyre több magas frekvenciájú összetevőt, részletet hagyunk ki az adatból. A wavelet transzformáció un. részletes $d_Y(j, k)$ együtthatói a $\{T_Y(a, t)\}$ halmaznak egy olyan mintavétele, amely diadikus rácspontokban helyezi el az együtthatókat, úgy hogy:

$$d_Y(j, k) = T_Y(2^j, 2^j t), \quad (3.20)$$

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

A másodrendű sztochasztikus folyamatok elemzéséhez használt 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 önhasználó folyamat $d_Y(j, k)$, wavelet együtthatói kimutatják az önhasználóságot. Ebből a másodrendű folyamatokra az alábbi következik:

$$E[d_Y(j, k)^2] = 2^{j(2H+1)} E[d_Y(0, k)^2]. \quad (3.21)$$

Ha az $Y(t), t \in \mathbb{R}$ folyamat még stacionárius növekményű is, azaz $Y(t)$ H-sssi, akkor a $\{d_Y(j, k), k \in \mathbb{Z}\}$, rögzített skála indexű wavelet együtthatók időszora egy stacionárius folyamat. Ez alapján a (3.21) összefüggés $\forall k \in \mathbb{Z}$ esetén leegyszerűsödik az alábbira:

$$E[d_Y(j, k)^2] = 2^{j(2H+1)} C(H, \psi_0) \sigma^2, \quad (3.22)$$

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

A wavelet együtthatók fenti tulajdonságai nem feltételezik a Gauss eloszlást és felhasználhatók az LRD folyamat skála-, illetve frekvencia-függő tulajdonságának tanulmányozásához. A wavelet tartományban csak a j -oktávhoz tartozó $d_Y(j, \cdot)$, stacionárius és SRD tulajdonságú folyamattal van dolgunk. A ψ_0 , anya wavelet (3.19) szerinti alapfeltétele miatt a wavelet együtthatók 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.

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:

$$\text{Energia}_j = \mu_j \triangleq \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} |d_Y(j, k)|^2, \quad (3.23)$$

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

Az Y folyamat másodrendű függőségének elemzése a μ_j energia, j -oktávától való függőségének tanulmányozására redukálódik. A skála exponens kinyerhető a $\log_2(\mu_j)$ görbének a j -oktáv függvényében ábrázolt iránytényezőjéből.

$$y_j = \log_2(\mu_j) = \log_2(\text{Energia}_j) \approx (2H - 1)j + c \quad (3.24)$$

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

$$\hat{H}(j_1, j_2) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{j=j_1}^{j_2} S_j j y_j - \sum_{j=j_1}^{j_2} S_j j \sum_{j=j_1}^{j_2} S_j y_j}{\sum_{j=j_1}^{j_2} S_j \sum_{j=j_1}^{j_2} S_j j^2 - \left(\sum_{j=j_1}^{j_2} S_j j \right)^2} + 1 \right], \quad (3.25)$$

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

$$[j_1, j_2] \rightarrow [2^{j_1} T, 2^{j_2} T]. \quad (3.26)$$

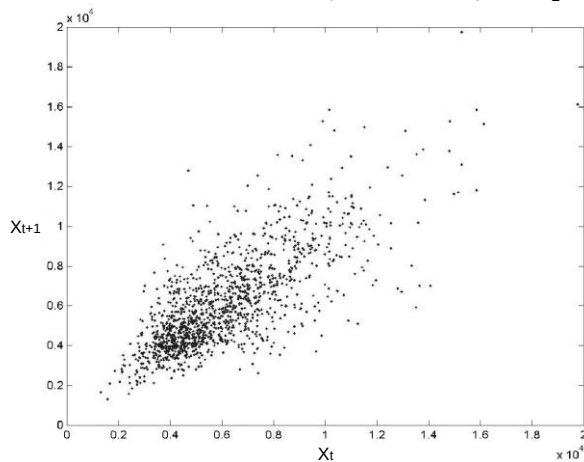
4. Az értekezés új tudományos eredményei

Tézis 1: Bispektrum alkalmazása ATM WAN forgalomnál

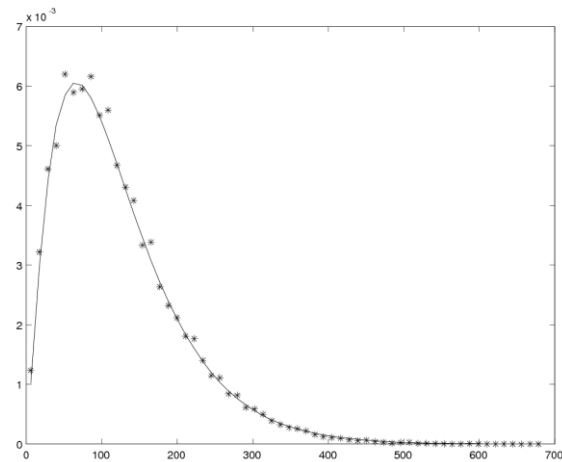
A svéd egyetemi országos hálózat (SUNET – Swedish University Network) 1996-ban létező STM-1 (155,52 Mbps) ATM hálózata és az Internet közötti WAN kapcsolaton CBR (Constant Bit Rate) torlódásmentes forgalmat analizáltunk [9.1.6]. Az 1996-ban létező produkciós hálózatban a mai értelemben vett QoS szolgáltatásokról (pl. DiffServ) nem beszélhetünk. Minden mérésnél a HTTP, FTP, telnet, chat, IPphone és más protokollok, illetve szolgáltatások aggregált forgalmát analizáltuk. A mintavételezés $T = 20 \text{ msec}$ időközönként történt, és hat idősor elemzését végeztük el: $\text{Set}_1, \text{Set}_2, \dots, \text{Set}_6$. 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) ábra alapján (ld. 4.1. ábra a Set_3 esetén) állítható, 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 folyamatoknál a jelenséget pszeudó trendnek nevezik és a hosszú memóriájúság jelenlétére utal.

A Hurst paraméter becsléséhez a Whittle, a Geweke-Porter-Hudak (G-P-H) és a bispektrum módszereket alkalmaztuk, ami alapján a 4.1 Táblázat szerinti értékeket kaptuk. Mint ismeretes, az alkalmazott két becslési módszer csak a másodrendű momentumok struktúráját használja fel [28].



4.1. ábra. „Phase Plot” diagram (Set_3)



4.2. ábra. Hisztogram és Gamma sűrűség függv. becsült par., (Set_3)

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 alkalmaztuk a harmadrendű statisztikákat és a bispektrumot. Az elemzett hat adatsor mindegyike esetén azt találtuk, hogy a becsült bispektrum különbözik nullától. Így a bispektrum a hosszúmemória paraméterre vonatkozóan további részleteket képes nyújtani. Ennek magyarázata az, hogy a becsült spektrum és a bispektrum aszimptotikusan mindig függetlenek [9].

Azt tapasztaltuk, hogy az aggregáció foka, illetve az időskála növelésével egy bizonyos konvergencia figyelhető meg a frakcionált Brown mozgás eloszlásához. 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. Azt kaptuk, hogy az ATM WAN cellaforgalom nem Gauss folyamat és határozottan pozitív ferdeségű. Ezt grafikusan is megfigyelhetjük a 4.1. ábra és a 4.2. ábra alapján is. Megállapítottuk, hogy mind a hat idősor esetén a becslt és az elméleti sűrűség függvény, valamint a határeloszlások karakterisztikus függvénye aszimptotikus illeszkedést mutat a Gamma folyamatra.

4.1. Táblázat: ATM WAN forgalmak klasszikusan becslt Hurst paramétere

Adatsor neve	Becslt Hurst paraméter ($\hat{H}$)		
	Whittle módszer	G-P-H módszer	Bispektrum módszer
Set ₁	0,82	0,88	0,88
Set ₂	0,89	0,86	0,82
Set ₃	0,89	0,91	0,89
Set ₄	0,80	0,79	0,81
Set ₅	0,88	0,94	0,84
Set ₆	0,82	0,81	0,89

A bispektrumon alapuló, Brillinger-től származó Hurst paraméterbecslési módszert alkalmaztuk anélkül, hogy a (3.15) modellnél a θ paramétert egyértelműen ismernénk. Így a Fourier frekvenciák számára a $\Lambda = (0, \frac{1}{2})$, illetve a $\Delta = \langle (0,0), (\frac{1}{2}, 0), (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}) \rangle$ tartományokban a nulla környezetét vizsgáltuk, mivel ebben a környezetben a bispektrum nagyságát alapvetően a hosszú memória effektus határozza meg. A fenti módszerrel becslt $\theta = H$ paraméter értékek stabilabbak voltak, mint ha a (3.15) összefüggés által adott összeg első tagját minimalizáltuk volna. Itt a stabilitást úgy az eljárás technikai paramétereinek, mint az aggregációs szint szórására értjük. Mind a hat adatsor esetén a becslt 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 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 konvergencia hálózati megoldások még csak ötletszinten léteztek, így a TCP protokoll befolyásolhatta a szállítási rétegben lezajló folyamatok nagy részét.

Tézis_1 összefoglalása, megállapítások

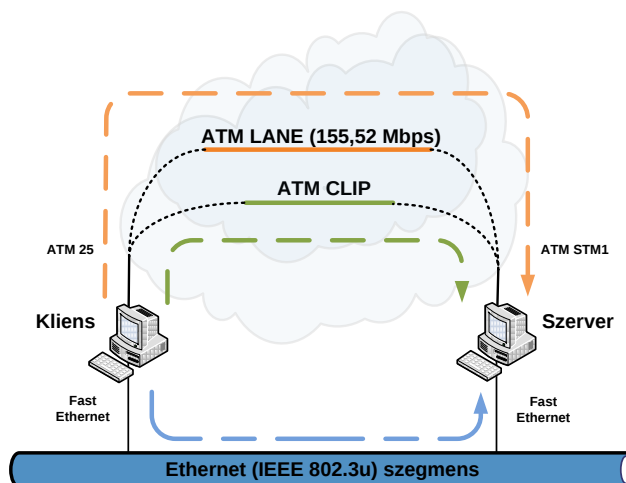
- i.) A QoS nélküli torlódásmentes ATM WAN forgalom beérkezési időközeinek folyamata hosszú memóriájú, nemlineáris és aszimptotikusan Gamma eloszlású.
- ii.) QoS nélküli torlódásmentes ATM WAN környezetben a cellaforgalom beérkezési időközei hosszú memóriájú paraméterének ($\hat{H}$) becsléséhez a bispektrumon 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

[9.1.6. (2002)], [9.1.7. (1999)], [9.1.8. (1996)], [9.2.2. (2001)]

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 [7] jellemzőit.



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

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 (ld. 4.3. ábra). A multimédia forgalom a szállítási rétegben UDP protokollt alkalmaz. A szerver gépen 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). A generált négy multimédia forgalmat mindhárom technológia segítségével külön-külön továbbítottuk (ld. 4.3. Táblázat). A mérések időtartama mind a tizenkét esetben 30 sec volt. Mérés minden esetben alacsonyan terhelt csatornákon történt, így csak a magasabb rétegek hatása jelent meg. 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 $\tau = 1$ ms.

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

A mennyiségi jellemzés céljából bevezettük az $MRB(\text{tech}_{\text{forg}})$, illetve $MIB(\text{tech}_{\text{forg}})$ az adott technológiával továbbított forgalom bispektruma valós, illetve képzetes részének maximumát, azaz a jel energiájának fáziscsatoltságát:

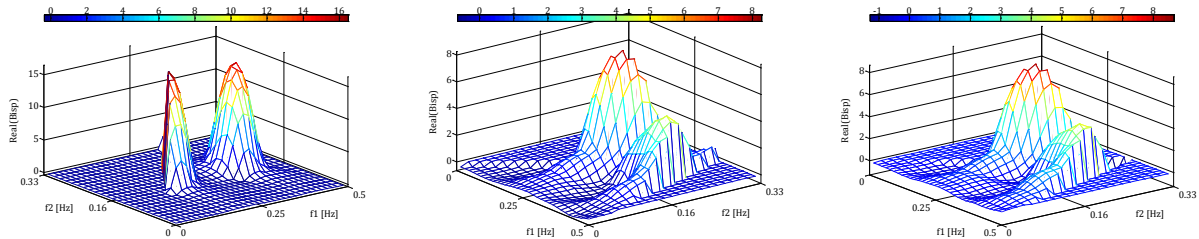
$$\begin{aligned} MRB(\text{tech}_{\text{forg}}) &= \max\{\text{Real}[\text{Bisp}(\text{tech}_{\text{forg}})]\} \\ MIB(\text{tech}_{\text{forg}}) &= \max\{\text{Imag}[\text{Bisp}(\text{tech}_{\text{forg}})]\} \end{aligned} \quad (4.02)$$

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 fáziscsatoltsági közötti arányt technológiai aránynak (TR- Technology Rate) neveztük el. Így beszélhetünk adott forgalom valós technológiai arányáról (TR), és képzetes technológiai arányáról (TI) az alábbiak szerint:

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

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

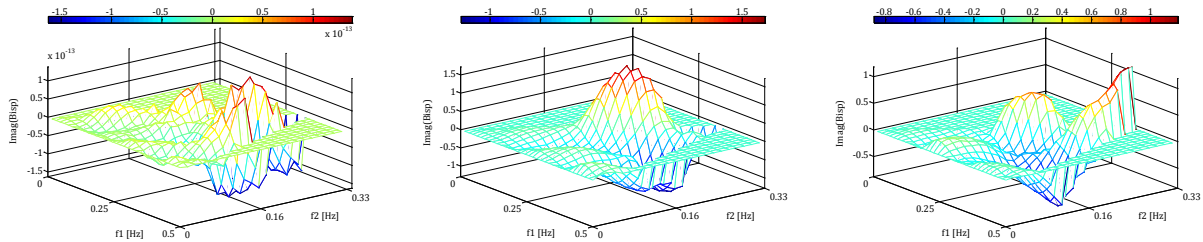
A magasabb rendű momentumok további részleteket mutatnak meg (ld. 4.4. és 4.5. ábrák). A LANE és a CLIP bispektrumának valós része hasonlít egymásra, de eltér az Ethernetétől.



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

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 a Tézis_1 állításával. 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:

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

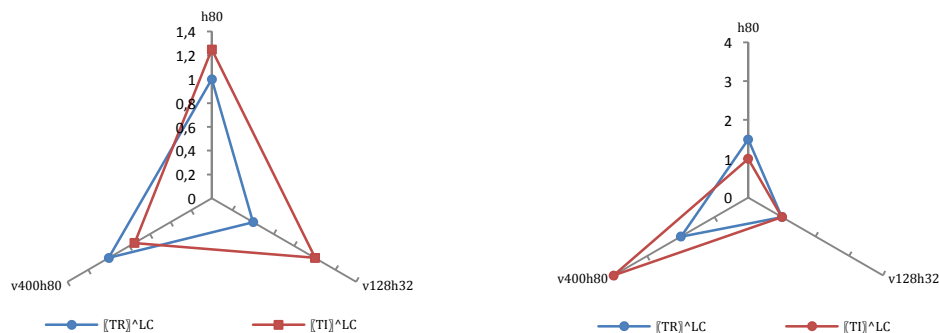


4.5. ábra. A T_i bispektrumának képzetes része (Eh80, Lh80, Ch80)

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:

A LANE és a CLIP-nél a beérkezési időközök bispektrumának valós része hasonlít egymásra, de eltér az Ethernettől és a valós technológiai arány, $TR_{v400h80}^{ELC} = 2/1/1$. 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 $TI_{v400h80}^{ELC} = 1/3/4$. A három átviteli technológia egyikénél sem nulla a bispektrum képzetes része, így az IP csomagméretek folyamatára is érvényes, hogy a harmadrendű momentumai nem reverzibilisek.



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

Ugyanakkor, eltérő jelleg mellett $TI_{h32}^{ELC} = 1/1/40$ 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.

A beérkezési időközök, valamint a keretméret idősorok bispektrumának tapasztalt viselkedését a különböző forgalmi rátáknál a 4.6. ábra mutatja szemléletesen. 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 [35]. 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

[9.2.6. (2000)], [9.2.4. (1999)], [9.2.9. (1996)]

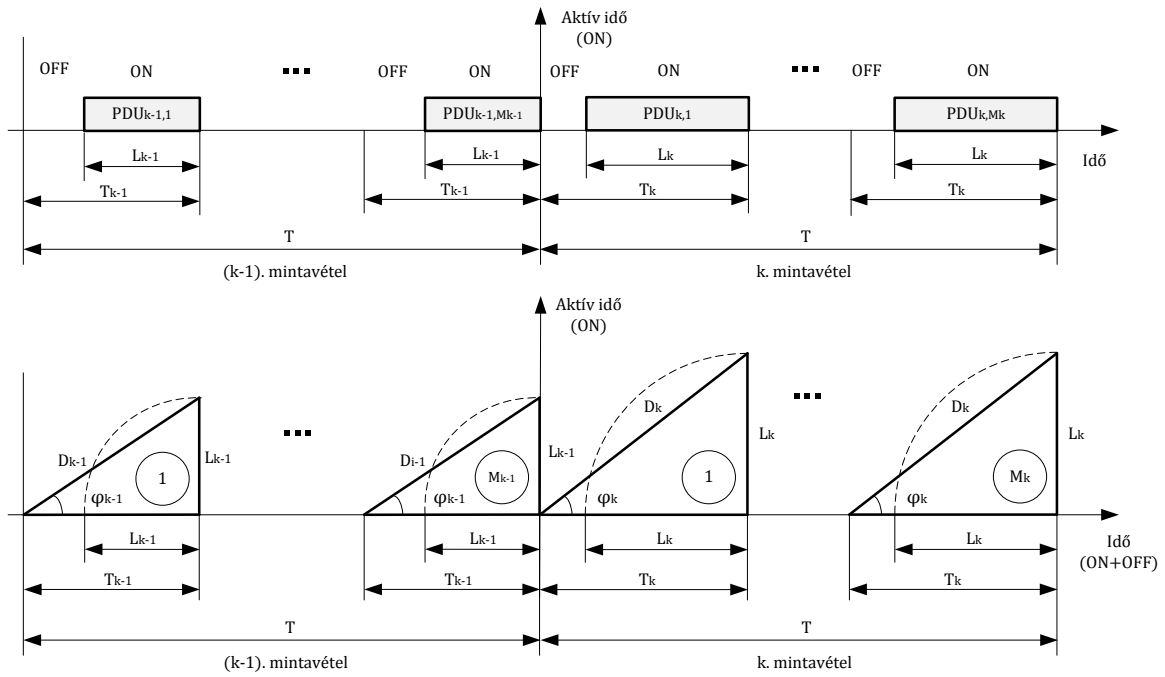
Tézis 3: Az ON/(ON+OFF) forgalomelemzési módszer és tulajdonságai

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

A fogadott keret bájtszámban kifejezett mérete egy lineáris leképezéssel könnyen az idő dimenzióba konvertálható. 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. A $Bw[\text{bit/sec}]$ 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. Minden mintavételezési időtartamban az (OFF, ON) párok ismétlődnek. 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. 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. 4.7. ábra.).



4.7. ábra. Az ON/(ON + OFF) transzformáció paramétere

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:

$$\left. \begin{aligned} T_k &= T_{\text{OFF},k} + L_k \\ T &= M_k T_k \end{aligned} \right\}, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor \quad (4.06)$$

A k -adik mintavételezési periódusban a csatorna fázisszöget (φ_k), illetve a komplex forgalmat (Z_k) az alábbi összefüggésekkel definiáljuk:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k &= \tan^{-1} \left(\frac{L_k}{T_k} \right) \\ Z_k &= M_k + i \cdot \tan \varphi_k \end{aligned} \right\}, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor \quad (4.07)$$

ahol i a komplex egységgyök ($i^2 = -1$). A k -adik mintavételezési periódusban az átlagos csatornaterhelést az alábbi arány adja:

$$\text{Átlagos csatornaterhelés}_k = \frac{L_k}{T_k} = \tan \varphi_k \quad (4.08)$$

Az ON/(ON + OFF) transzformációval egy idősor-párunk keletkezett:

$$\left\{ \begin{aligned} &\{\tan \varphi_k, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}, \text{csatorna terhelés} \\ &\{M_k \in \mathbb{Z}, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}, \text{csatorna intenzitás} \end{aligned} \right\} \quad (4.09)$$

Ezek mértékegység nélküli, fizikai jelentéssel bíró mennyiségek, amelyek a (4.07) szerint a $\{Z_k, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}$, komplex idősortként 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:

$$W_k = M_k e^{i\varphi_k}, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor, \text{ ahol } i^2 = -1. \quad (4.10)$$

A csatorna fizikai paramétere (átviteli ráta, közeg-hozzáférési algoritmus, stb.), valamint a T -mintavételezési periódus ismert értékek, amelyek alapján a hagyományos

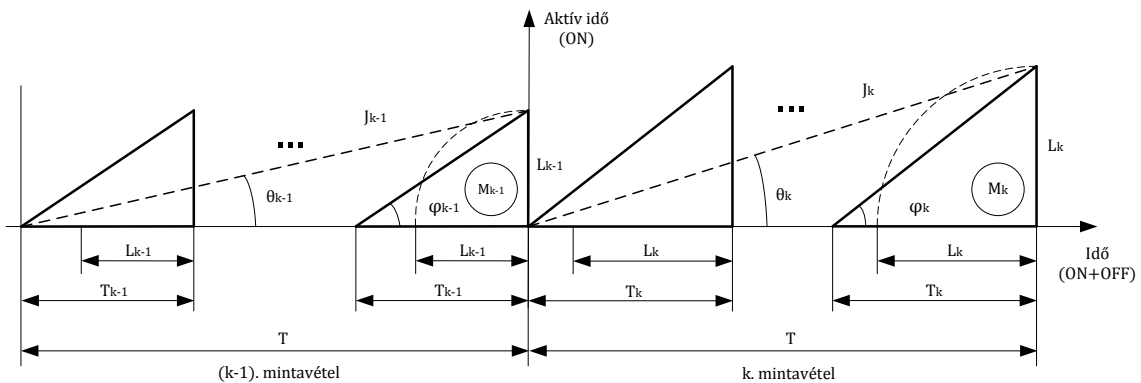
jellemzők (beérkezési időköz, beérkezett bájtmennyiség, stb.) a Z_k , vagy a W_k komplex idősorokból egyaránt könnyen kiszámolhatók. A $\{W_k, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}$ ponthalmaz az (M, φ) komplex tér első nyolcadának zárt területén helyezkedik el és a tengelyeket csak az origóban érintheti. A Z_k , komplex folyamat J_k , amplitúdóját a csatorna *négyzetes átlagintenzitásának*, míg a θ_k , fázisát a *csatorna fajlagos fázisának* nevezzük (ld. 4.8. ábra.), ahol:

$$\left. \begin{aligned} Z_k &= J_k e^{i\theta_k} \\ J_k &= \sqrt{M_k^2 + (\tan \varphi_k)^2} = \frac{M_k}{\cos \varphi_k} \\ \tan \theta_k &= \frac{\tan \varphi_k}{M_k} \end{aligned} \right\}, \quad k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor. \quad (4.11)$$

A csatorna fajlagos fázisának tangense a csatorna fajlagos terhelése, vagyis időegységre jutó átlagos aktivitási idő. Úgy a fázisszög, mint az intenzitás felfogható egy-egy növekmény idősortként az alábbi módon:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k &= (\Phi_k - \Phi_{k-1}) - 2\pi, \Phi_0 = 0 \\ M_k &= F_k - F_{k-1}, F_0 = 0 \end{aligned} \right\}, \quad k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor, \quad (4.12)$$

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



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

Az ON/(ON + OFF) módszerrel 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. A BC-pAug89, valamint az F200903311500 adatsorokból ON/(ON + OFF) módszerrel két darab $Z(t)$ komplex folyamatot kaptunk, aminek valós és képzetes részét vizsgáltunk és jellemzőiket határoztuk meg.

Mindkét adatsorra a $Z(t)$, komplex folyamat valós és képzetes LRD tulajdonságú összetevő idősorainak skálafüggőségét vizsgáltuk wavelet módszerrel és meghatározzuk azok Hurst paraméterét. Mindkét adatfolyam esetén az erős korreláció miatt a csatornaintenzitás és a csatornaterhelés idősorok "scalogram"-ja nagyon hasonlít egymásra, míg a wavelet módszerrel becsül Hurst paraméterek eltérnek egymástól (ld.

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

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

4.8 Táblázat). A nagyobb energiát szállító komponens kevésbé LRD tulajdonságú (ld. 4.30. ábra.).

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 %

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 terhelte 10 Mbps-os Ethernet csatornán "Best-effort", QoS nélküli módon rövid PDU-kban leveleket és adatokat továbbított, emiatt az összeforgalom egy meghatározó részét a jelzésrendszer forgalma okozta.

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

Tézis_3 összefoglalása, megállapítások

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

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

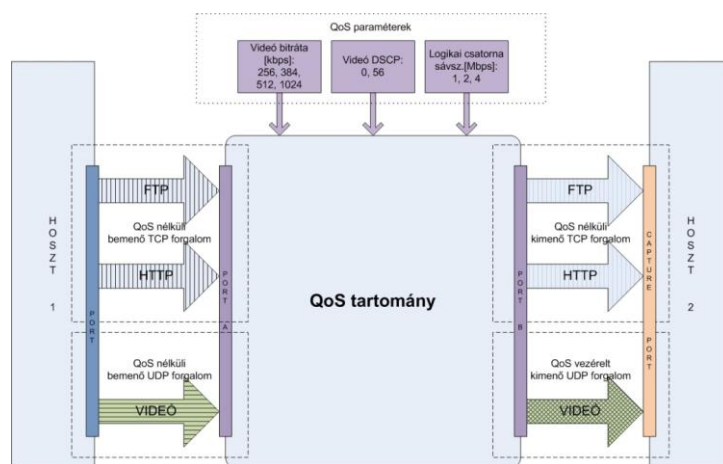
ahol az T -mintavételezési periódusidő, M_k -csatornaintenzitás és a $\tan \varphi_k$ -csatornaterheltség komponensek szemléletes, fizikai jelentéssel bíró mennyiségek.

- 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 korreláció 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.

[9.1.1. (2009)], [9.1.2. (2008)]

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 egyidőben TCP, illetve UDP forgalmat generáltunk. A TCP FTP és HTTP letöltéseket, míg az UDP interaktív videó átvitelt végzett (ld. 4.9. ábra.). A köztes hálózati eszközökben a TCP forgalom „Best-effort” ($DSCP = 0$) szerinti mechanizmus mellett zajlott. A videokonferencia UDP forgalom minden csomagja elfér 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.



4.9. ábra. A QoS tartomány és mérési környezete

A Hoszt1 a lehető legnagyobb rátával küldi a videót a QoS tartományba, ami esetünkben legfeljebb 1024 kbps volt. A Hoszt2 csomópontnál külön a TCP, és külön az UDP hálózati forgalom mérése történt.

4.9. Táblázat: A QoS mérési adatsorok paramétere

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)

QoS tartományon belüli 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.

4.10. Táblázat: Adatsorok QoS mérési feltételei

Codec típusa	a-index
H.261	1
H.264	4

a.)

DSCP érték	b-index
0	0
56	5

b.)

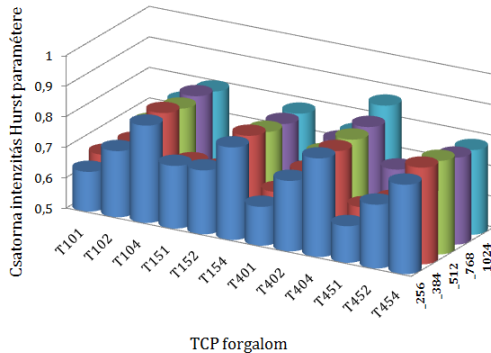
Csatorna ráta	c-index
1 Mbps	1
2 Mbps	2
4 Mbps	4

c.)

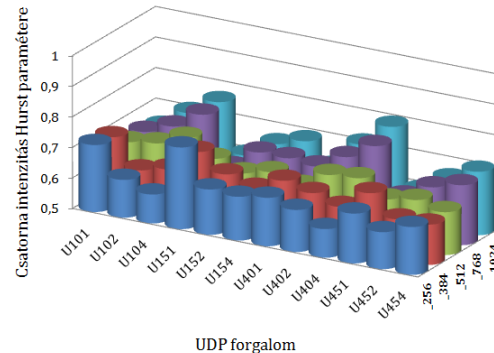
Minden egyes mérésnél ugyanazt a műsort forgalmaztuk a két hoszt között. A VRB (Variable Bit Rate) videó streaming-hez az első harminc mérés esetén a forrásnál H.261, a továbbiaknál H.264 codec-et használtunk. A mintavételező szoftver segítségével a TCP és az UDP részfolyamokat szétválasztottuk, amit $\{T_{abc}\}$, illetve $\{U_{abc}\}$ jelölünk. QoS paramétertől függően az abc indexek ($abc \in \{101, 102, 104, \dots, 454\}$) a 4.3. Táblázat szerinti mérési feltételeket jelentik. 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 $T = 100 \text{ msec}$ volt, a mérés pontossága pedig $\tau = 10 \mu\text{sec}$. 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.

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

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

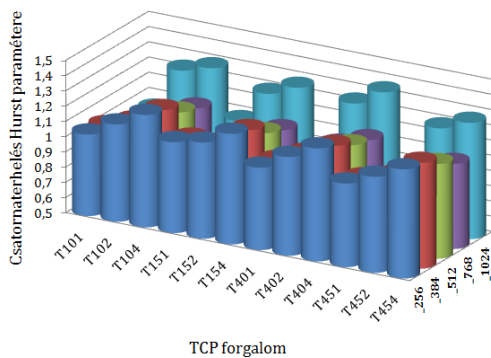


TCP forgalom

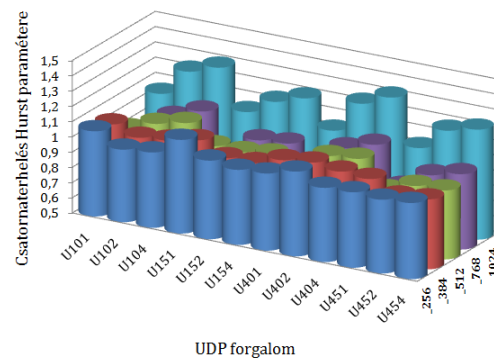


UDP forgalom

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



TCP forgalom

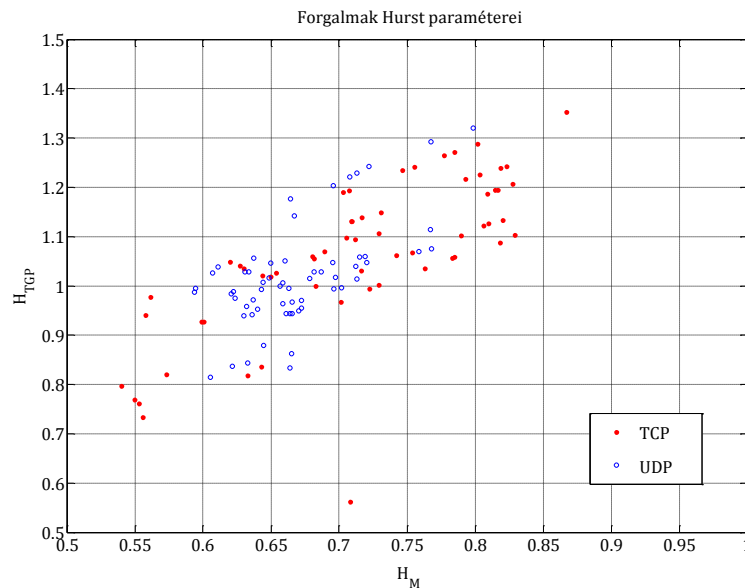


UDP forgalom

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

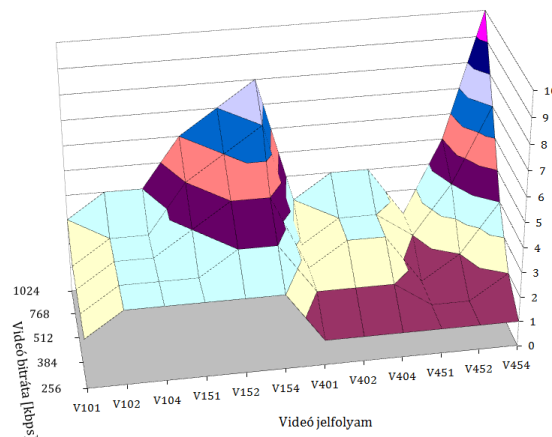
Azt kaptuk, hogy az csatorna intenzitás becsült Hurst paramétere úgy a TCP, mint az UDP esetében, $\widehat{H}_M \in (0,55; 0,90)$, vagyis LRD tulajdonságú (ld. 4.10. ábra, 4.11. ábra.). TCP adatforgalomnál az 1 Mbps-os csatorna ráta $\widehat{H}_M \in (0,55; 0,65)$ paramétert ad, míg 4 Mbps-os csatorna rátánál $\widehat{H}_M \in (0,8; 0,88)$, és a 2 Mbps-csatorna rátánál a $\widehat{H}_M$ is köztes értékeket vesz fel.

Megállapítottuk, 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. 4.10. ábra.). Mindezt a TCP protokoll „Windowing” és „Slow start” mechanizmusa okozza.



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

Az UDP forgalom csatorna intenzitásának $\widehat{H}_M$ paramétere alacsonyabb értékeket ad, mint az azzal egyidőben továbbított TCP forgalomra (ld. 4.10. ábra.). Megfigyelhető, hogy a videó codec típusa gyakorlatilag nem befolyásolja a $\widehat{H}_M$ értékét sem a TCP, sem az UDP forgalmaknál. A csatornaterhelés Hurst paramétere úgy a TCP, mint az UDP esetén bizonyos esetekben értelmezhetetlen, azaz $\widehat{H}_{\tan \varphi} > 1$ értéket ad. Ez azt jelenti, hogy a csatornaterhelés nem stacionárius folyamat ilyenkor.



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

Megállapítottuk, hogy torlódás esetén a QoS megszünteti a csomakapcsolt hálózat 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.

A 4.12. 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, azaz kevésbé LRD.

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. 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.

A különböző ráták mellett QoS paraméterekkel szabályozott videó jelfolyamok ($\{V_{abc}\}, abc \in \{101, 102, 104, \dots, 454\}$) egymáshoz viszonyított véleményértéke (OS) alapján (ld. 4.13. ábra) a TCP és UDP szegmenseket szállító vegyes terhelésű hálózaton a videó átvitel erőteljesen függ a QoS beállításoktól. 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.

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 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.

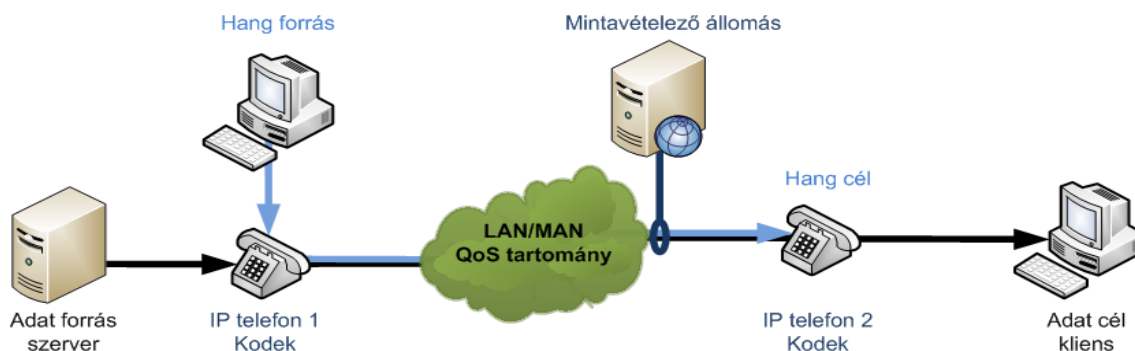
Tézis_4 témájában készült saját és társszerzős publikációk

[9.1.3 (2007), 9.2.1 (2007)]

Tézis 5: A QoS hatása az IP hangforgalomra

Valószerű, interaktív hang, amely továbbításának statisztikai jellemzőit ON/(ON+OFF) módszerrel elemezzük és meghatároztuk a minőséget befolyásoló tényezőket. Ehhez két scenárió-t vizsgálunk: a.) torlódásos környezetben továbbított hang, illetve b.) torlódásmentes VoIP gerinc kapcsolat. 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 adatcél gépek között mesterségesen (T) TCP, illetve (U) UDP adatforgalmat generáltunk, amellyel a 10 Mbps Ethernet csatorna rendelkezésre álló kapacitását töltöttük ki.



4.14. ábra. Torlódásos VoIP kapcsolatok mérési környezete

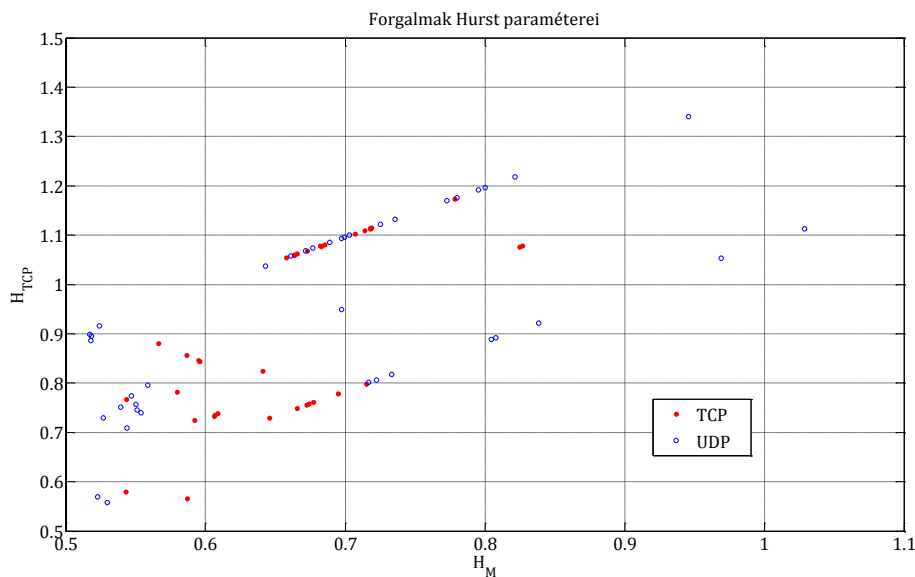
A készülékben lévő három portos Ethernet switch miatt az IP telefonok LAN kapcsolatán a hangforgalom és az adatforgalom egyaránt továbbított (ld. 4.14. ábra). Egyenként egy perces (H) hard rock, illetve (P) zongora zeneszámokat játszottunk le a hangforráson, amit az 1-es IP telefonról a 2-es IP telefonra 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.

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 hatását elemeztük. A mintavételezést $\tau = 10$ 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 gerinc kapcsolat számára rendelkezésre álló 100 Mbps-os Ethernet csatornán a mintavételezés egy órán át tartott és $\tau = 10$ μ sec mérési pontossággal készült. Itt nem használtunk speciális QoS mechanizmust, mivel a dedikált csatorna terheltsége 1% alatti volt, így a hangot szállító L2 keretek DSCP = 0 értékkel (“Best-Effort”) továbbítottak.

Mindkét mérési környezetben 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 elérték. A mintavételezés periódusa az összes mérés esetén $T = 100$ ms volt.

VoIP torlódásos környezetben megállapítottuk, hogy 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. $DSCP = 0$ ("Best-Effort"), és TCP adatforgalom esetén a G.711 codec-vel 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.



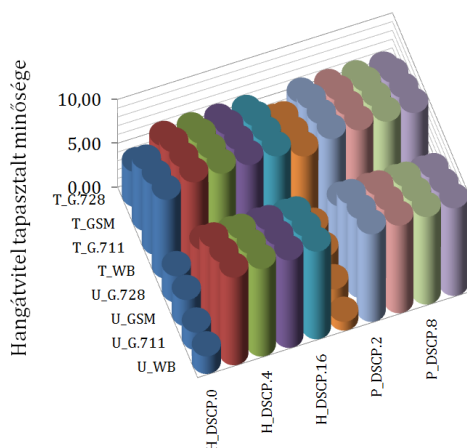
4.15. ábra. Egyidejű adat (TCP/UDP) és az hang (UDP) forgalmak becsült Hurst paramétereinek viszonya

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

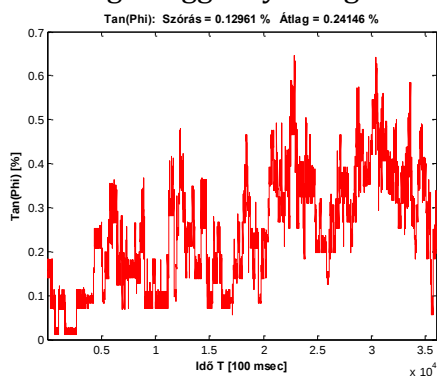
hangforgalmak közül, vagyis ahol $\widehat{H}_M < 1$ és $\widehat{H}_{\tan \varphi} < 1$, az UDP típusú adattal torlódott esetek kisebb Hurst paraméter koordinátákkal rendelkező állapotokat generálnak, mint a hang TCP típusú adattal történő torlódásból származó állapotok (ld. 4.15. ábra.).

A hangátvitel tapasztalt minőségének számszerűsítéséhez egy osztályozási szempontrendszer állítottunk fel, ahol a minőség arányos az értékkel. Ennek segítségével elkészült a nyolcvan méréshez tartozó tapasztalt hangminőség diagramja (ld. 4.16. 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 nélkül továbbított, UDP adattal torlódott hangforgalom a nagyobb rátájú codec-ek esetén egyre gyengébb minőséget ad.

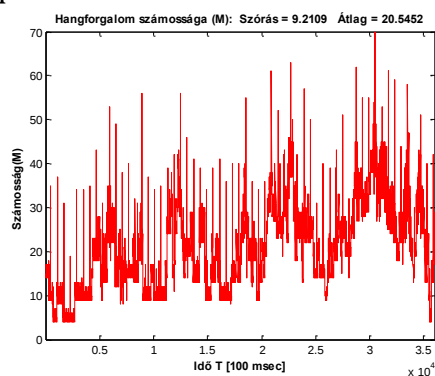


4.16. ábra. Hangátvitel tapasztalt minősége

VoIP trónk kapcsolat torlódásmentes környezet számára a 4.17-4.18. ábrák az aggregált IP hangforgalmak által generált csatornaterhelést, illetve csatornaintenzitását, míg a 4.19-4.20. ábrák ezeknek a (3.24) 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. 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 gerinc kapcsolaton fraktál tulajdonságot mutat, amit az energia függvények logaritmusának aszimptotikus szakaszaiból láthatunk.

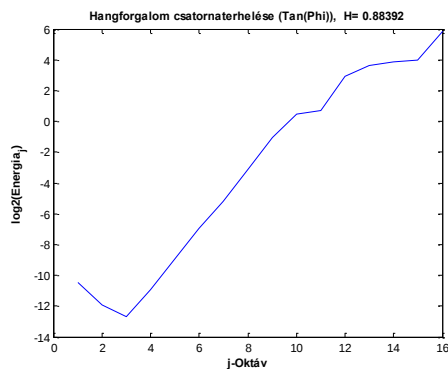


4.17. ábra. VoIP gerincforgalom csatornaterhelése

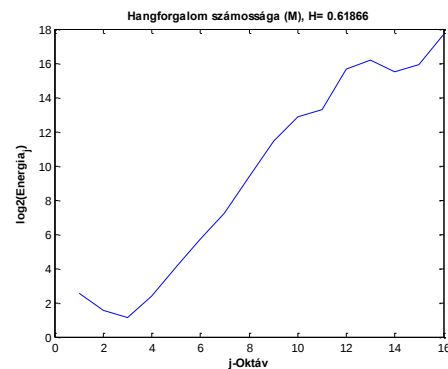


4.18. ábra. VoIP gerincforgalom intenzitása

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. 4.19-4.20. ábrák).



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



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

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:

[9.1.1 (2009), [9.1.3. (2007)]

1. Research motivation

The amount of data transferred by the Internet doubles every year similarly to the increase factor of the semiconductor industry [13], making it necessary to introduce and implement faster and faster transfer rate technologies in user networks. The most popular technology in LAN/MAN environment, IEEE 802.3 (10 Mbps Ethernet) appeared in 1986 and the magnitude of level jumps in speed were achieved by 1995, 1998, 2002 and 2009 (see Fig. 1.1.).

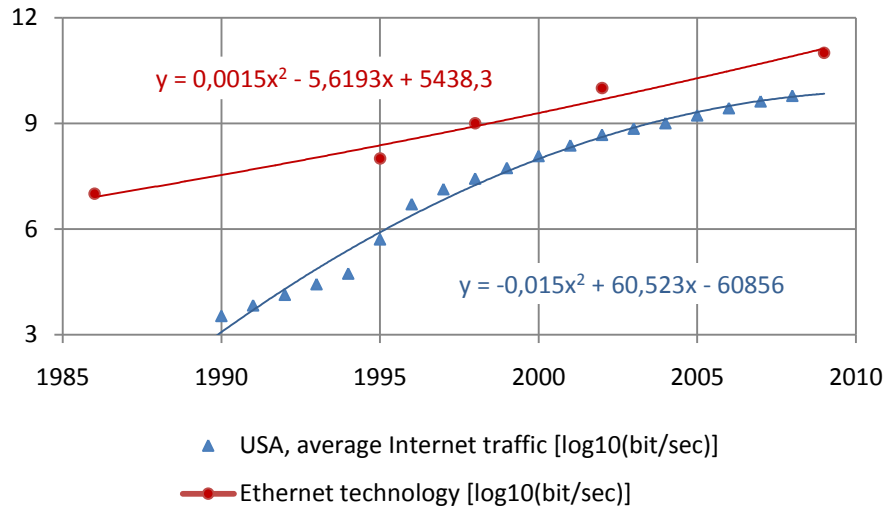


Fig. 1.1. Transfer rate demand and technology offer

As depicted above, the traffic rate demands in access network systems for the average user in the USA are handled by bandwidths several orders of magnitude higher than the demand. The convergence of the (y_1, y_2) trend curves shows an increase in demand higher than what the Ethernet technology offers. At the same time, we can also observe the slowing increase rate of the demand in the USA, where we have the most intensive Internet usage at the currently available network services. This statement implies that the current one year doubling period of the Internet traffic comes from the developing countries and from other international traffics (like voice and video over IP). The capability of the technology to deliver 2-3 orders of magnitude higher throughput is motivated by the fact that the bursty nature of the traffic in the access and distribution networks can be compensated by the increase of channel bandwidth. The maximum of the normalized traffic can reach the 10^3 level. The spread of the graphical variant of the World Wide Web network service in 1994 accelerated the increase of the data traffic of the Internet significantly. Perceptible increase and acceleration was observable during the two-year life period of the Napster file sharing application around 2000. The above cases show that certain newly introduced network applications produce serious surplus in traffic, and the implied burstiness may lead to a pile-up effect in the local area networks of institutions and companies.

Service providers may rightfully consider the right proportion of the following technological solutions in LAN/MAN communication infrastructure for the maintenance or development of the quality of the network services (which have increasing resource claims): i) increase of traffic rate, and ii) prioritized processing of various traffic types.

The first option reflects the development view of the Internet Engineering Task Force (IETF), while the second constitutes the basic idea of the ATM Forum which aims to develop the B-ISDN service (see. Fig. 1.2.).

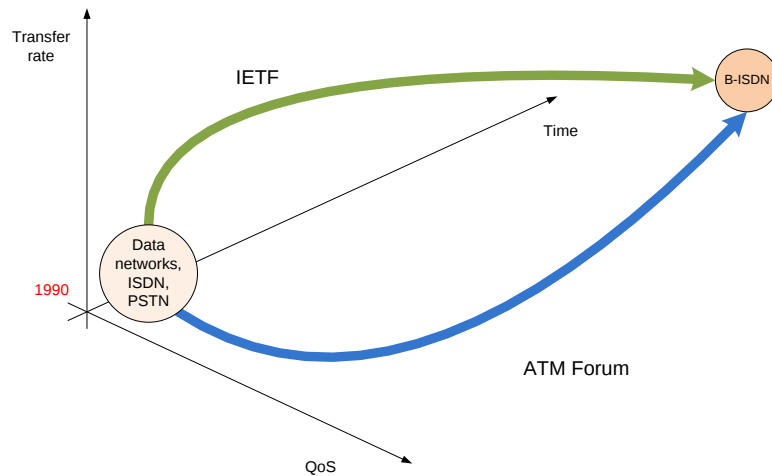


Fig. 1.2. Increase of transfer rate and QoS

As an employee of the Service Center for Informatics of Lajos Kossuth University and that of the University of Debrecen since 1991, I have been continuously confronting this problem. Similarly to the operators of foreign big network systems, I had to make wide-ranging technological surveys to find the optimal solution of network resource quality/price proportion for each acquisition.

From the beginning of the new millennium, the development of converged packet switched access and distribution networks is in progress for facilitating the transfer of data, sound and video traffic. This happens according to the concept of IETF, and – although with a small modification of the OSI model the importance of control plane becomes accentuated –, with the introduction of Quality of Service (QoS) mechanisms, networks based on the universal IP platform prove to be the optimal solution.

Since the QoS properties and demands of different traffic types also differ, the technical literature intensively discusses the problem of transmitting these traffics on the same platform. The convergent platform under the IP protocol assures QoS guarantees based on intensive analysis of the statistical features of the traffics. The intelligent backbone network devices offer more and more QoS mechanisms. For determining the correct configuration settings, the basic knowledge of the classical Internet protocols is not enough anymore, but a conscious application of the statistical features of the data traffics is also necessary.

The management of the university backbone network, which includes nearly two hundred intermediate nodes and several thousand of endpoints made it necessary for me to carry out this everyday work on a scientific basis. To this end, in response to these practical questions, a need for intensive applied research was formulated in me. For this task the university production computer network system raised to a professional level for nearly two decades provided the practical background.

2. Premises and scope of the research

Despite its enormous and increasing popularity, the Internet is not able to provide services with guaranteed quality. A considerable effort happened in the last years to develop IP networks that are able to ensure the demanded QoS [47].

Guaranteeing satisfactory QoS of the telecommunication systems for the users is not a trivial task, because factors assigned into three groups change in the course of time as a result of technology development:

- a.) The first factor is the doubling of byte quantity distributed on the Internet in each year, which is in fact a direct consequence of Moore's law. According to Moore, the number of circuit elements integrated onto the unit of area doubles annually, which means the byte quantity stored with identical expense at the users is growing at the same rate.
- b.) The other factor making the modeling of traffics harder is the appearance of bandwidth-hungry applications, such as music and file sharing.
- c.) The third factor is the rapid spread of not yet standardized QoS service classes caused by the difference between old and new, real-time communication services on the Internet. This is generated primarily by the convergent network services effect of the integration of traditional telephone system onto VoIP (Voice over IP) technology and the price reduction of telephone service. The same effect is detected at the IPTV, VoD (Video on Demand) and traditional data traffics transferred simultaneously on the same LAN/WAN access networks (DSL, Cable TV, WiFi, etc.).

It is possible to detect the effect of the first factor on the provider side, and intervention is possible by configuring the intermediate nodes correspondingly. Based on the quantitative characteristics of the traffics and the knowledge of the routing paths, the development of production network (topology, transfer rate, switching capacity) is feasible. The continuous changes of traffic characteristics in the service provider network are also manageable with special control mechanisms (access lists, service regulations, etc.). Mechanisms appropriate for the efficient treatment of ad hoc traffics generated by the second factor and traffics influenced by the third factor are not yet obvious on the service provider side. Therefore, it is necessary to analyze the various packet switched data traffics in more depth, using statistical methods [16], [17], [30], [44], [46].

I applied my own method named ON/(ON + OFF) transformation for analysis of the network traffic time series and I studied the utilization of network resources (channel, queue, CPU, etc.). The effective bandwidth, called CB-Corvil Bandwidth shows a fractal concentration level. The traffic exceeding this level becomes bursty and the effect cannot be reduced, but traffic below this level can be congested.

3. Short overview of the research methods

3.1. Self similarity and long range dependence analysis methods of traffic time series

The $X_t, t \in \mathbb{Z}$, discrete time stochastic process stands for network traffic having values like packet number, bit or byte number at time moment t [5], [6], [14], [18], [26],

[45], [46]. In the following sections, X_t means the traffic quantity in the time interval $[0, t]$.

Let $X_t, t \in \mathbb{Z}$ be a discrete time stochastic process. The continuous time series $Y(t), t \in \mathbb{R}$ with stationary increment is called a cumulative (background) process of X_t and $X_t - t$ is the increment process of $Y(t)$, if the following relation holds [32]:

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

In the case of network traffic modeling, X_t is stationary in the sense that the behavior or structure is invariant to the time offset. In a different sense, the time interval $[0, t]$ has an absolute frame reference feature.

The discrete time stochastic process $X_t, t \in \mathbb{Z}$ is strongly stationary, if $(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n})$ and $(X_{t_1+k}, X_{t_2+k}, \dots, X_{t_n+k})$ have similar distribution, provided that $\forall n \in \mathbb{Z}_+, t_1, \dots, t_n, k \in \mathbb{Z}$:

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

The autocovariance function of X_t is $\gamma(r, s) = E[(X_t - \mu)(X_t - \mu)]$ and is invariant of the lag:

$$\gamma_X(r, s) = \gamma_X(r + k, s + k), \forall r, s, k \in \mathbb{Z}. \quad (3.03)$$

Let σ be the deviation of X_t . Function $r_X(k)$ is called the autocorrelation function of X_t , where:

$$r_X(k) = \frac{1}{\sigma^2} \gamma(k), \forall k \in \mathbb{Z}. \quad (3.04)$$

The real value, continuous process $Y(t), t \in \mathbb{R}$ is H -ss (H -self similar with Hurst parameter), if the following holds:

$$Y(at) =_d a^H Y(t), \forall a > 0, t \geq 0, \text{ and } (0 < H < 1). \quad (3.05)$$

This relation means that processes $Y(t), t \in \mathbb{R}$ and $Y(at), t \in \mathbb{R}$ are the same in the sense of finite dimensional distribution. In traffic modeling $Y(t)$ represents the quantity of data transferred in time interval $[0, t]$. When $a > 1$ we talk about time dilatation and the order of magnitude of $Y(at)$ and that of $Y(t)$ become comparable by compression factor a^{-H} . When $a < 1$ we talk about time compression and the order of magnitude of $Y(at)$ and that of $Y(t)$ become comparable in a similar way. In the case of self similar processes, the Hurst exponent remains invariable, even if a is varying.

The time series generated from X_t by disjoint blocks of length m is named $X^{(m)}$, aggregated process of grade m , if holds:

$$X_i^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{t=m(i-1)+1}^{mi} X_t, \forall i \in \mathbb{Z}. \quad (3.06)$$

The second order self similarity implies the existence of correlated and asymptotically correlated structure during time aggregation.

If process $Y(t), t \in \mathbb{R}$ is H -sssi, then it is H -ss with stationary increment. If $Y(t)$ is H -sssi with finite variance, then $0 < H < 1$ [32]. Process $X_t, t \in \mathbb{Z}$ is H -sss (H -Self similar and stationar) is called SRD (Short Range Dependent) if $< H \leq 1/2$ and is LRD (Long Range Dependent) if $1/2 < H < 1$.

The relation between the distributional self similarity of $Y(t), t \in \mathbb{R}$ and the second order self similarity of $X_t, t \in \mathbb{Z}$ is given by process $X^{(m)}$:

$$X =_d m^{1-H} X^{(m)}, \quad (3.07)$$

which shows scale dependence in function of parameter H in finite dimensional sense between X_t és az $X^{(m)}$. Relations (3.06) and (3.07) point out that process X_t and $m^{1-H} X^{(m)}$ should have identical or asymptotically identical structure.

The autocorrelation function $r_X(k), k \geq 1$ of second order self similar process $X_t, t \in \mathbb{Z}$ with Hurst parameter $0 < H < 1, H \neq 1/2$ can be estimated by following relation [38]:

$$r_X(k) \sim H(2H-1)k^{2H-2}, \quad \text{if } k \rightarrow \infty. \quad (3.08)$$

On the basis of relation (3.08), if $H = \frac{1}{2}$, then $r_X(k) = 0$, and X_t is trivially SRD, because is absolutely uncorrelated. An SRD process with $\sum_{k=-\infty}^{\infty} r_X(k) = 0$ is rare in practice. The $H = 1$ case is uninteresting, because for $\forall k \geq 1$ we have a degenerated situation with $r_X(k) = 1$. The $H \geq 1$ case is prohibited if the increment process X_t is stationary [40], [42], [43], [44].

3.2. Traffic time series analysis with bispectrum and higher order spectra

Discrete time process $X_t, t \in \mathbb{Z}$ with $\mu = E[X_t]$ is third order stationary, if $(X_{t_1}, X_{t_2}, X_{t_3})$, and $(X_{t_1+k}, X_{t_2+k}, X_{t_3+k})$ have same joint moments for $\forall t_1, t_2, t_3, k \in \mathbb{Z}$ [19], [23], [39]:

$$E[(X_{t_1} - \mu)(X_{t_2} - \mu)(X_{t_3} - \mu)] = E[(X_{t_1+k} - \mu)(X_{t_2+k} - \mu)(X_{t_3+k} - \mu)] \quad (3.09)$$

The cumulant and moments of a given distribution are in strong relation. In general, only the first three cumulants of $X_t, t \in \mathbb{Z}$ are equal to the corresponding central moments [39]. Process $X_t, t \in \mathbb{Z}$, is stationary of order m , if all cumulants of order m exist and are invariant of the lag, so for $\forall t \in T, l = 1, 2, \dots, m$ the following holds:

$$\text{Cum}(X_{t+t_1}, X_{t+t_2}, \dots, X_{t+t_l}) = \text{Cum}(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_l}). \quad (3.10)$$

If process X_t has third order moments, then not only the autocovariance is invariant in time, but the third order cumulant depends on two variables only. The Fourier transform of k -order stationary process $X_t, t \in \mathbb{Z}$, is named S_k , spectrum of order k [33]:

$$S_k(\omega_{(1:k-1)}) = \sum_{t_j=-\infty, j=1,2,\dots,k-1}^{\infty} \text{Cum}(X_0, X_{t_{(1:k-1)}}) z_{(1:k-1)}^{-t_{(1:k-1)}}, \quad (3.11)$$

where ω is the angle velocity, f is the frequency and $\omega = 2\pi f$. The second order spectrum of process $X_t, t \in \mathbb{Z}$ is simply called spectrum, and the third order spectrum is called bispectrum [39]. Using the basic properties of cumulants, the bispectrum has the following form [33]:

$$S_{3,Y} = \mathcal{F}(\text{Cum}(X_0, X_{t_1}, X_{t_2})) = \mathcal{F}(C_3(t_1, t_2)), \quad \forall t_1, t_2 \in \mathbb{Z}. \quad (3.12)$$

Bispectrum in practice measures the phase coupling of signal energy [24], [27], [29], [31]. Because of symmetry, the (ω_1, ω_2) complex plane can be covered with triangles as shown in Fig. 7.1., i.e. it is sufficient to study the bispectrum inside one of these triangles. Triangle no. 1 will be considered the basic domain in the rest of the work.

The quantity $B(z_1, z_2)$, which is calculated from spectrum and bispectrum of $X_t, t \in \mathbb{Z}$ third order stationary process, is called bicoherence and is given by:

$$B(z_1, z_2) = \frac{|S_{3,Y}(z_1, z_2)|^2}{S_{2,Y}(z_1)S_{2,Y}(z_2)S_{2,Y}(z_3)}. \quad (3.13)$$

The bicoherence is constant for linear processes [36]. Second order self similar process $X_t, t \in \mathbb{Z}$ with Hurst parameter H is multifractal, if for $\forall m \in \mathbb{Z}_+$ aggregation level the following [34]:

$$\log \left(\left| \text{Cum}_m \left(X^{(n)}(t) \right) \right| \right) = mH(m) \log(n) + c(m), \quad (3.14)$$

that is the Hurst exponent is not constant, but dependent of the aggregation level, m .

The idea of Hurst parameter estimation was published by Brillinger in [8], and detailed elaboration based on squared relative errors method was given by Terdik in [34], and Leonenko, Sikorskii, Terdik in [25]. The parameter of the model is θ , and the minimized function, $Q_T(\theta)$ is given by:

$$\begin{aligned} Q_T(\theta) = & \frac{1}{|\Lambda|} \sum_{\omega \in \Lambda} \left(\frac{S_2(\omega; \theta) - S_2^T(\omega)}{S_2(\omega; \theta)} \right)^2 \\ & + \frac{1}{|\Delta|} \sum_{(\omega_1, \omega_2) \in \Delta} \frac{|S_3(\omega_1, \omega_2; \theta) - S_3^T(\omega_1, \omega_2)|^2}{S_2(\omega_1; \theta)S_2(\omega_2; \theta)S_2(\omega_1 + \omega_2; \theta)}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

where the data series of length T is decomposed in subsets of length v . Λ denotes the Fourier frequencies domain inside of interval $(0, \pi)$, $|\Lambda| = \pi$ is the area of Fourier frequencies domain, Δ is the frequency triangle given by $\langle (0, 0), (\pi, 0), (\frac{2\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}) \rangle$, and $|\Delta|$ is the area of Δ (see Fig. 7.1.). Furthermore $S_2(\omega; \theta)$ is the theoretical spectrum, $S_2^T(\omega)$ is the smoothed estimated spectrum, $S_3(\omega_1, \omega_2; \theta)$ is the theoretical bispectrum and $S_3^T(\omega_1, \omega_2)$ is the estimated smoothed bispectrum. Function $Q_T(\theta)$ has minimum value for $\theta = H$, and the Hurst parameter estimation is given by iteration.

3.3. Traffic time series analysis with wavelet method

Decomposition

$$\{T_Y(a, t) = \langle X, \psi_{a,t} \rangle, a \in \mathbb{R}^+, t \in \mathbb{R}\} \quad (3.16)$$

is called CWT (Continuous Wavelet Transform), where the coefficients are given by the inner products of analyzing function set and signal $Y(t), t \in \mathbb{R}$ [1], [2], [3], [4]. The set of functions $\psi_{a,t}$ is generated from the ψ_0 reference pattern, called mother wavelet, in the following manner:

$$\{\psi_{a,t}(u) \equiv \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_0 \left(\frac{u-t}{a} \right), a \in \mathbb{R}^+, t \in \mathbb{R}\}. \quad (3.17)$$

Any function element $\psi_{a,t}(u)$ can be constructed from ψ_0 mother wavelet by operator $\mathcal{D}_a$ -dilatation (scaling) and then $\mathcal{T}_t$ -time shifting:

$$\begin{aligned} (\mathcal{T}_t \psi_0) & \equiv \psi_0(t - \tau) \\ (\mathcal{D}_a \psi_0) & \equiv 1/\sqrt{a} \psi_0(t/a) \end{aligned} \quad (3.18)$$

The ψ_0 mother wavelet (e.g. DaubechiesN, CoifletN, HaarN, SymmletN, etc.) spread in a narrow space in time and frequency domains and has most of its energy within a limited frequency (scale) band [15]. It satisfies the admissibility condition:

$$\int u^k \psi_0(u) du = 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (3.19)$$

that is it should be a bandpass or oscillating function, hence the name “wavelet”. Quantity $|T_Y(a, t)|^2$ is called scalogram and gives the energy level of signal Y controlled by dilatation parameter a around time moment t .

The MRA (Multi Resolution Analysis) proves that there exists a special sampling of the time-frequency plane, which contains all the information of signal Y as a subset of $\{T_Y(a, t), a \in \mathbb{R}^+, t \in \mathbb{R}\}$. The construction method of this discrete subset is called DWT (Discrete Wavelet Transform). The basic idea of MRA is that signal Y is analyzed sequentially with rougher and rougher approximations. In this way, higher and higher frequency components are being left out from consideration. Detailed coefficients $d_Y(j, k)$ of the wavelet transformation are samples of set $\{T_Y(a, t)\}$ that place these elements in dyadic grid points:

$$d_Y(j, k) = T_Y(2^j, 2^j t), \quad (3.20)$$

where the base 2 logarithm of scale $\log_2(a = 2^j) = j$, is called octave _{j} .

The ψ_0 , mother wavelet utilized for analyzing second order processes decays at least exponentially in the time space, ensuring in this way second order statistical characteristics of the wavelet decomposition.

Wavelet coefficients $d_Y(j, k)$ of process $Y(t)$, $t \in \mathbb{R}$, with H – ss feature demonstrate self similarity. For second order processes, this aspect implies following relation:

$$E[d_Y(j, k)^2] = 2^{j(2H+1)} E[d_Y(0, k)^2]. \quad (3.21)$$

If process $Y(t)$, $t \in \mathbb{R}$ is H -sssi, then the process of fixed scale index wavelet coefficients $\{d_Y(j, k), k \in \mathbb{Z}\}$ is a stationary process. In this way for $\forall k \in \mathbb{Z}$ relation (3.21) simplifies:

$$E[d_Y(j, k)^2] = 2^{j(2H+1)} C(H, \psi_0) \sigma^2, \quad (3.22)$$

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

This relation of the wavelet coefficients does not assume the Gauss distribution, and can be utilized in the analysis of scale and frequency dependence of LRD processes. In the wavelet domain, we only operate with $d_Y(j, \cdot)$ belonging to octave _{j} and we manipulate SRD processes during the transformation. Based on (3.19) the wavelet coefficients of mother wavelet ψ_0 all average at zero. The stationary character makes averaging possible to process $d_Y(j, \cdot)$, decreasing the variance in this way. The average statistics have low variance because of the SRD effect.

The random variable μ_j obtained from the $d_Y(j, k)$, wavelet coefficients of second order stationary process Y , is called energy function of process $d_Y(j, \cdot)$, which is the estimation of the standard deviation, too:

$$\text{Energy}_j = \mu_j \triangleq \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} |d_Y(j, k)|^2, \quad (3.23)$$

where n_j , is the number of existing coefficients of octave _{j} ($n_j = \lfloor 2^{-j} n \rfloor$) and n is the number of elements of signal Y .

The analysis of second order dependence of signal Y is reduced in this way to the analysis of dependence of the energy μ_j of octave _{j} . The scale exponent can be obtained from the bias of the $\log_2(\mu_j)$ curve represented in function of octave _{j} .

$$y_j = \log_2(\mu_j) = \log_2(\text{Energy}_j) \approx (2H - 1)j + c \quad (3.24)$$

The graph of quantity y_j in function of octave _{j} inside the confidence interval is called second order log-scale diagram (2-LD). A linear segment or segments can be utilized for estimating the Hurst parameter or parameters. If more than one linear segment can be detected, then the process is monofractal, otherwise it is multifractal. Based on the weighted-least-square (WLS) method, the estimated Hurst parameter inside of confidence interval $[j_1, j_2]$ of the octaves is given by:

$$\hat{H}(j_1, j_2) = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{j=j_1}^{j_2} S_j j y_j - \sum_{j=j_1}^{j_2} S_j j \sum_{j=j_1}^{j_2} S_j y_j}{\sum_{j=j_1}^{j_2} S_j \sum_{j=j_1}^{j_2} S_j j^2 - \left(\sum_{j=j_1}^{j_2} S_j j \right)^2} + 1 \right], \quad (3.25)$$

where $S_j = \frac{n \ln^2 2}{2^{j+1}}$ is weight. The scale independent time domain for the time series with sampling interval T can be calculated from interval $[j_1, j_2]$ of the octaves with the following formula:

$$[j_1, j_2] \rightarrow [2^{j_1} T, 2^{j_2} T]. \quad (3.26)$$

4. Theses and new results

Thesis No. 1: Application of the bispectrum at ATM WAN traffic

We analyzed the Swedish national university ATM WAN (SUNET - Swedish University Network) STM-1 (155.52 Mbps) traces captured in 1996. The data was transferred on CBR (Constant Bit Rate), in congestion free environment [9.1.6]. In 1996 there were no QoS services, like Diffserv, as understood today. We analyzed aggregated traffic of HTTP, FTP, telnet, chat, IPphone and other protocols and network services. The sampling period was $T = 20$ msec and six traces were studied: $Set_1, Set_2, \dots, Set_6$. The data sets contain $4 \times 10^4 \dots 6 \times 10^6$ pieces of observations. Observation X_t means the number of non empty ATM cells during the time period T .

On the basis of the phase plot diagram for Set_3 (see Fig. 4.1.), we see that in the majority cases, a large X_t observation is followed by a large X_{t+1} observation, and small X_t observation is followed by a small X_{t+1} observation. In the case of stationary processes this phenomenon is called pseudo trend, which denotes the presence of long range dependence.

For the estimation of the Hurst parameter we utilized Whittle, a Geweke-Porter-Hudak (G-P-H) and bispectrum methods, obtaining results given in Table 4.1. It is well known that the first two methods are based exclusively on the structure of second order moments [28].

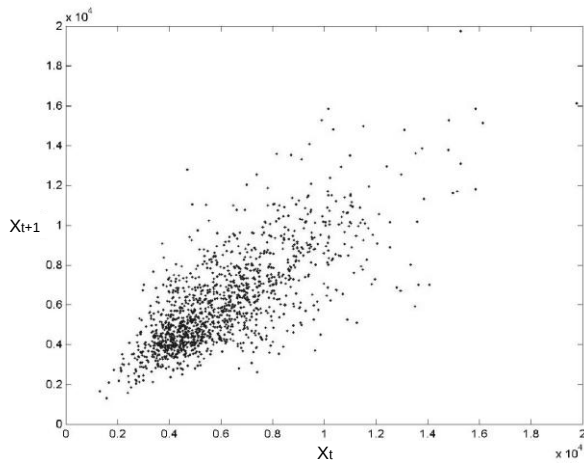


Fig. 4.1. Phase Plot diagram (Set_3)

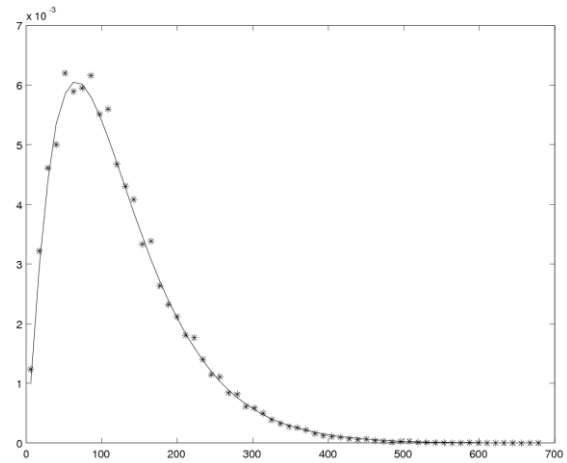


Fig. 4.2. Histogram and estimated Gamma density function (Set_3)

The stationary Gauss process can be characterized exclusively by the average and the second order moments, namely with the spectrum. The spectrums of non-Gauss processes in general do not contain the necessary characteristics. This causes our

utilization of third order statistics and bispectrum. For each of the analyzed six traces we found that the bispectrum is different from zero. In this way the bispectrum can give more details in connection with the long range parameter. The explanation is the asymptotical independence of the estimated spectrum and bispectrum [9].

We found that there is a recognizable convergence to the fractional Brownian motion as the aggregation level or time scale increases but the speed of the convergence is very slow. This is a consequence of the strong dependence structure since the Berry-Esséen limit is not necessarily applicable to long memory processes. It turns out that the ATM WAN cell traffic is not a Gauss process and has strictly positive skewness. This feature can be observed in Fig. 4.1. and Fig. 4.2. as well. We found for each of the six traces that the estimated and the theoretical density functions, as well as the characteristic function of the limit distribution, asymptotically fits the Gamma process.

Table 4.1. Estimated Hurst parameters of ATM WAN traffics

<i>Trace name</i>	<i>Estimated Hurst parameter ($\hat{H}$)</i>		
	<i>Whittle method</i>	<i>G-P-H method</i>	<i>Bispectrum method</i>
Set ₁	0,82	0,88	0,88
Set ₂	0,89	0,86	0,82
Set ₃	0,89	0,91	0,89
Set ₄	0,80	0,79	0,81
Set ₅	0,88	0,94	0,84
Set ₆	0,82	0,81	0,89

We utilized the estimation method of Hurst parameter based on bispectrum, proposed by Brillinger, without having the initial value θ for model (3.15). We analyzed the neighborhoods of zero for the Fourier frequencies in domains $\Lambda = (0, \frac{1}{2})$, and $\Delta = \langle (0,0), (\frac{1}{2}, 0), (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}) \rangle$, because near zero the behavior of the bispectrum is determined mostly by the long memory effect. The values of parameter $\theta = H$ estimated by this method were more stable than the ones estimated by minimizing the first term of (3.15) only. The stability is meant with respect to variations of both the technical parameters of the procedure and the aggregation level of the data. For each of the six data trace we obtained imaginary part of the bispectrum equal to zero. This is equivalent to the following:

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

This refers to certain reversibility of the third order moments. The physical explication of the reversibility phenomenon is given by the symmetric congestion control mechanism of the TCP and the fixed size of ATM cells. The amount of UDP-based IPphone traffic was relatively small in 1996; therefore, the majority of the processes detected in the transport layer were influenced by TCP.

Thesis No. 1 summary, conclusions

- i.) The interarrival time process of ATM WAN traffic without QoS and without congestion is long range dependent, non-linear and asymptotically Gamma distributed.
- ii.) The estimation method of the Hurst parameter based on the bispectrum method for the interarrival time process of ATM WAN traffic without QoS and without congestion is much more stable than the classical methods based on second order moments.

- iii.) The imaginary part of the bispectrum is zero for the interarrival time process in ATM WAN traffic without QoS and without congestion. This implies stronger traffic activity of TCP than UDP in the transport layer.

Papers in the subject of Thesis No. 1

[9.1.6. (2002)], [9.1.7. (1999)], [9.1.8. (1996)], [9.2.2. (2001)]

Thesis No. 2: Bispectrum at the Ethernet, LANE and CLIP ATM traffic

We analyzed the higher order moments of the UDNet (Universitas of Debrecen Network) MAN production network real life traffic and we compared the characteristics of IEEE 802.3 and ATM LAN/MAN technologies [7].

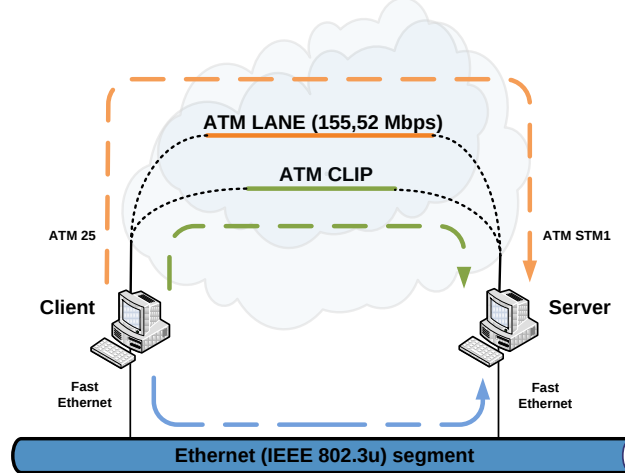


Fig. 4.3. Ethernet, ATM LANE, ATM CLIP measurement scenario

Both computers had IEEE 802.3 and ATM (25.6 Mbps and 155.52 Mbps) interface cards (see Fig. 4.3.). The multimedia traffic in the transport layer is based on the UDP protocol. We captured different IP traffic at the server with three transmission technologies: Fast Ethernet (E), ATM LAN emulation (L: LANE), Classical IP over ATM (C: CLIP). The generated four multimedia traffics were transmitted by each of the three technologies in one after the other (see Table 4.2.). The measurement time interval in each case was 30 sec. For the lack of congestion on the data link channel in all of the 12 measurements, only the higher layers had an effect on the traces. For any of the measurement scenarios there was no QoS mechanism such as Diffserv. The captured time series are the PDU interarrival time (T_i) and the PDU size (L_i). The accuracy of the measurement was $\tau = 1$ ms.

Table 4.2. Measurement characteristics for Ethernet, ATM LANE, ATM CLIP

Data traffic characteristic		Name of trace		
Video transfer rate [kbps]	Voice transfer rate [kbps]	IEEE 802.3u (E)	LANE (ATM) (L)	CLIP (ATM) (C)
0	32	Eh32	Lh32	Ch32
0	80	Eh80	Lh80	Ch80
128	32	Ev128h32	Lv128h32	Cv128h32
400	80	Ev400h80	Lv400h80	Cv400h80

We introduced measures $\text{MRB}(\text{tech}_{\text{traffic}})$, $\text{MIB}(\text{tech}_{\text{traffic}})$ to quantify the maximum of the real and the imaginary part of the bispectrum, namely the phase coupling of the signal energy:

$$\begin{aligned} \text{MRB}(\text{tech}_{\text{traffic}}) &= \max\{\text{Real}[\text{Bisp}(\text{tech}_{\text{traffic}})]\} \\ \text{MIB}(\text{tech}_{\text{traffic}}) &= \max\{\text{Imag}[\text{Bisp}(\text{tech}_{\text{traffic}})]\} \end{aligned} \quad (4.02)$$

where tech is the technology (E, L, C) and traffic is the multimedia traffic shown in Table 8.2. We call the proportion of these technologies technology rate. The technology rate gives an indication about phase coupling of different technologies for a given multimedia traffic. The real technology rate (TR) and imaginary technology rate (TI) are given by the following relations:

$$\begin{aligned} \text{TR}_{\text{forg}}^{\text{ELC}} &= \text{MRB}(\text{E}_{\text{forg}})/\text{MRB}(\text{L}_{\text{forg}})/\text{MRB}(\text{C}_{\text{forg}}) \\ \text{TI}_{\text{forg}}^{\text{ELC}} &= \text{MIB}(\text{E}_{\text{forg}})/\text{MIB}(\text{L}_{\text{forg}})/\text{MIB}(\text{C}_{\text{forg}}) \end{aligned} \quad (4.03)$$

a.) For low transfer rate multimedia traffic (only voice: 80 kbps, PCM channel) we obtained important characteristics:

Higher order moments give more details of the traffic (see Fig. 4.4. and Fig. 4.5.). The real part of bispectrum for LANE and CLIP are similar, but differs from the Ethernet.

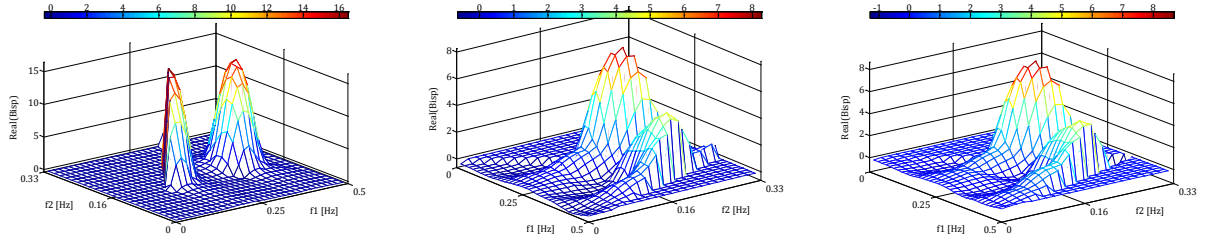


Fig. 4.4. Real part of T_i , interarrival time bispectrum (Eh80, Lh80, Ch80)

The same observation applies to the imaginary part as well. The imaginary part for Ethernet is practically zero, because the maximum value of the surface is 10^{-13} . This aspect is in correlation with Thesis No. 1. The imaginary part of the bispectrum for LANE and CLIP is not zero. It means the third order moments of the interarrival time series are not reversible for LANE and CLIP, namely:

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

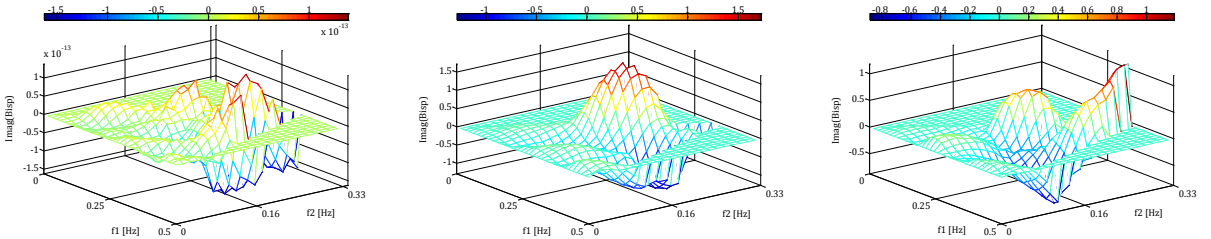


Fig. 4.5. Imaginary part of T_i , interarrival time bispectrum (Eh80, Lh80, Ch80)

The real technology rate for the L_i , frame size is $\text{TR}_{\text{h80}}^{\text{LC}} = 3/2$. For each technology the imaginary part of the IP packet size bispectrum has the same character, but for Ethernet this is three times higher than for LANE and for CLIP.

b.) For medium transfer rate multimedia traffic (voice: 80 kbps, streaming video: 400 kbps) we obtained other important characteristics:

The real part of the interarrival time bispectrum are comparable for LANE and CLIP, but differs from Ethernet. The real technology rate $TR_{v400h80}^{ELC} = 2/1/1$. The imaginary part of the bispectrum for Ethernet is small ($\leq 0,4$), but for LANE and CLIP are comparable and are higher than for the Ethernet: $TI_{v400h80}^{ELC} = 1/3/4$. The imaginary part of the bispectrum is not equal to zero. This means that the third order moments of IP packet size processes are not reversible. At the same time, with different characterization, $TI_{h32}^{ELC} = 1/1/40$ gives an extreme rate. The cause of this phenomenon is the similarity of technology transmission mechanism for low voice rate in case of Ethernet and ATM LANE, because the Ethernet frame with low size voice segment should be fragmented into one or two ATM cells. These short trains of ATM cells are transmitted similarly to the Ethernet frames on a physical Ethernet channel.

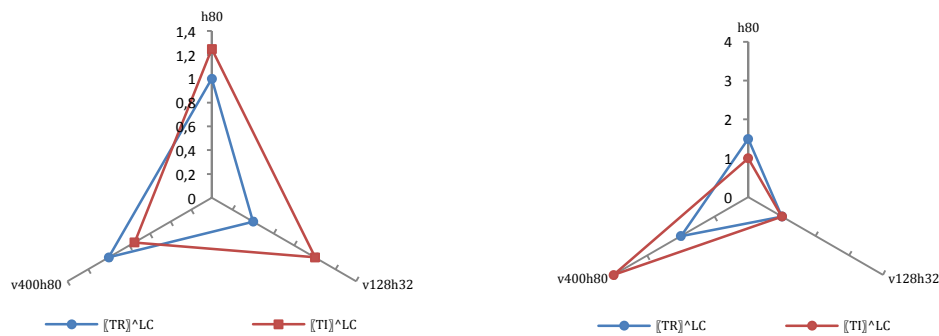


Fig. 4.6. Technology rates of T_i and L_i for LANE and CLIP

The bispectrum of the interarrival time and of the frame size for different multimedia traffic are depicted by Fig. 4.6. We focus only on the LANE and CLIP differences. It is quoted that the real technology rate and the imaginary technology rate depend on the traffic and shows a different character.

We must consider both the real and the imaginary part of the bispectrum to be able to characterize the technology differences between LANE and CLIP numerically.

Thesis No. 2 summary, conclusions

- i.) The physical process of multimedia content transmission with LANE and CLIP in ATM LAN/MAN environment without QoS and without congestion should be characterized with both, the interarrival time and the IP packet size time series. The difference between LANE and CLIP technologies are presented by both, the real part and the imaginary part of the traffic bispectrum.
- ii.) In ATM LAN/MAN environment without QoS and without congestion, UDP traffic analysis based on bispectrum demonstrates that the third order moments of the interarrival time and of the IP packet size time series are not reversible. This implies non-Gauss distribution.
- iii.) In ATM LAN/MAN environment without QoS and without congestion, UDP-based multimedia traffic has the special characteristics that the real part of the interarrival time and the IP packet size time series bispectrum is higher for LANE than for CLIP. This statement is given by the technology rate: $TR^{LC} \geq 1$. This feature differentiates between LANE and CLIP technologies.

- iv.) In ATM LAN/MAN environment without QoS and without congestion, UDP-based multimedia traffic has the special characteristics that the imaginary part of the interarrival time and the IP packet size time series bispectrum is strongly dependent of the voice and video aggregated traffic compound. The TI^{LC} is directly proportional to the video rate. In case of only PCM voice transmission $TI^{LC} \sim 1$, which means that LANE and CLIP have a similar functional character.

Papers in the subject of Thesis No. 2

[9.2.6. (2000)], [9.2.4. (1999)], [9.2.9. (1996)]

Thesis No. 3: Traffic modeling with method ON/(ON+OFF)

We developed our own analysis method based on two simultaneous time series of the network traffic. Using this method, we evaluate the behavior of packet switched network traffic more deeply.

The received frame size (in number of bytes) can easily be transferred to the time domain. The transmission delay of impulses increases linearly with the physical size of the medium, which is $\sim 1 \mu s$ for each 300 meters. Because our method analyses the frames time series only at the receiving point of the channel, we do not deal with the effect of the finite spread character of electromagnetic signals. The time interval between the ending moment of actual frame reception and starting moment of the next frame reception is not only dependent on the waiting traffic, but also on the MAC (Medium Access Control) mechanism, too.

On the channel with $Bw[\text{bit/sec}]$ transfer rate, the actual frame transmission time interval is called $L = T_{ON}$, and the inactivity time caused by an absence of frame and other technology dependent timing (MAC algorithm, etc.) is called T_{OFF} . There are (OFF, ON) states pairs repeating during the sampling time period.

The number of frames captured during the actual time period T is called receiving rate (M) or channel intensity:

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

where $L_j, j = 1, 2, \dots, M$ is the transmission time of frame, and L is the actual average transmission time interval.

Because of the methods of the time series analysis, we sample at regular time intervals ($T = \text{constant}$). In contrast with time series analysis where events during time period T are supposed to be very short, in the case of the ON/(ON + OFF) method these events are considered to have non-zero length and be uniformly distributed event series during time interval T . We take that in the k -th sampling period, in uniformly distributed time period L_k , average length frames are received with $M_k \in \mathbb{Z}_+$ intensity (see Fig. 4.7.). There is a clear relation among these variables:

$$\left. \begin{aligned} T_k &= T_{OFF,k} + L_k \\ T &= M_k T_k \end{aligned} \right\}, k = 1, 2, \dots, [t/T] \quad (4.06)$$

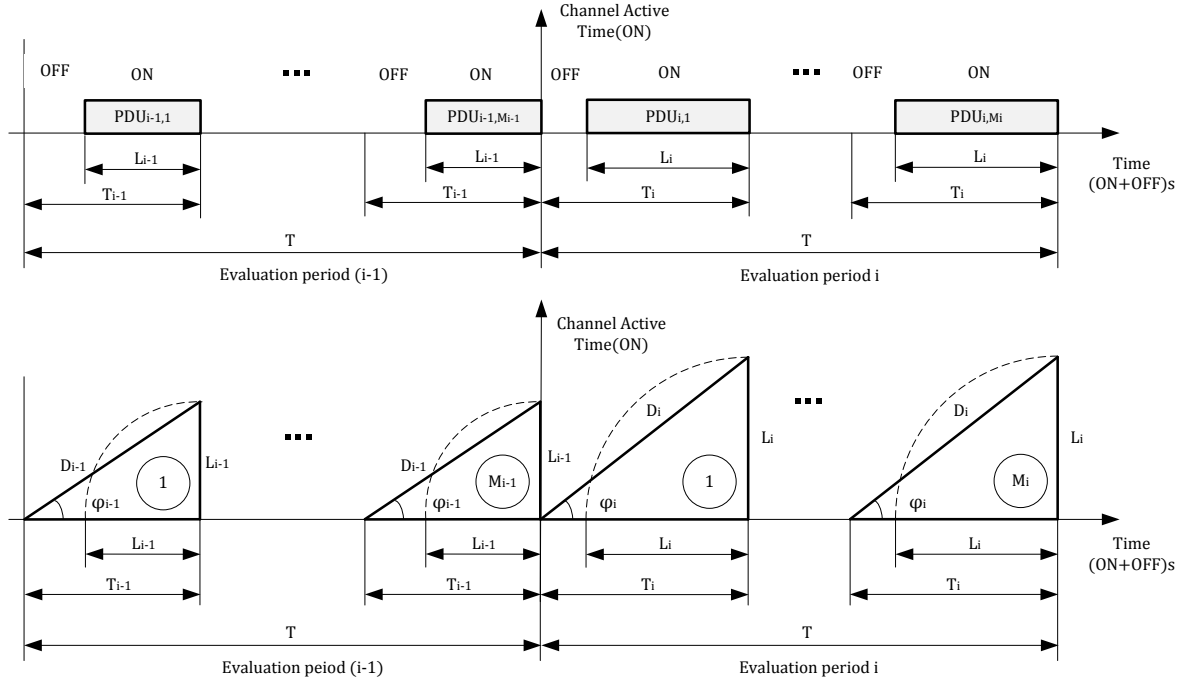


Fig. 4.7. Parameters of ON/(ON + OFF) transformation

We introduce the terms channel phase angle (φ_k), and complex traffic (Z_k) during the k -th sampling period by following ways, respectively:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k &= \tan^{-1} \left(\frac{L_k}{T_k} \right) \\ Z_k &= M_k + i \cdot \tan \varphi_k \end{aligned} \right\}, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor \quad (4.07)$$

where i is the complex unity root ($i^2 = -1$).

The average channel load during the k -th sampling period is given by:

$$\text{Average channel load}_k = \frac{L_k}{T_k} = \tan \varphi_k \quad (4.08)$$

We generate one time series pair with the ON/(ON + OFF) transformation:

$$\left\{ \begin{aligned} &\{\tan \varphi_k, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}, \text{channel load} \\ &\{M_k \in \mathbb{Z}, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}, \text{channel intensity} \end{aligned} \right\} \quad (4.09)$$

These series are well interpretable measures with physical meaning, and based on relations (4.07), the complex time series $\{Z_k, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}$ is capable of describing all characteristics of traffics transferred on the point-to-point channel. For special cases, the intensity time series $\{M_k \in \mathbb{Z}, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}$ can be coupled with channel phase time series $\{\varphi_k, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}$. In this way we get another complex series:

$$W_k = M_k e^{i\varphi_k}, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor, \text{ where } i^2 = -1. \quad (4.10)$$

The physical parameters of the channel (transfer rate, MAC algorithm, etc.) and the sampling period T are well known parameters and the complex time series Z_k , or W_k can be used to calculate any conventional characteristics (interarrival time, received bytes,

etc.). The complex time series $\{W_k, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor\}$ occupy a closed area of the first $1/8$ sector of the (M, φ) complex plane and touch the axes only in the origin.

The J_k amplitude of the Z_k complex process is called squared average intensity of the channel, and the phase of the Z_k is called specific channel phase (see Fig. 4.8.):

$$\left. \begin{aligned} Z_k &= J_k e^{i\theta_k} \\ J_k &= \sqrt{M_k^2 + (\tan \varphi_k)^2} = \frac{M_k}{\cos \varphi_k}, \quad k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor. \\ \tan \theta_k &= \frac{\tan \varphi_k}{M_k} \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

The tangent of the specific channel phase is the specific channel load, namely average active time interval on unit of time. The phase and the intensity can be understood as increment processes given by the following formula:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_k &= (\Phi_k - \Phi_{k-1}) - 2\pi, \Phi_0 = 0 \\ M_k &= F_k - F_{k-1}, F_0 = 0 \end{aligned} \right\}, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor, \quad (4.12)$$

where $\{\Phi_k = \sum_{j=1}^k (\varphi_j + 2\pi), k = 1, 2, \dots\}$ is strictly increasing series, called global channel phase, and $\{F_k = \sum_{j=1}^k M_k \in \mathbb{Z}, k = 1, 2, \dots\}$ increasing series, called arrived PDU number.

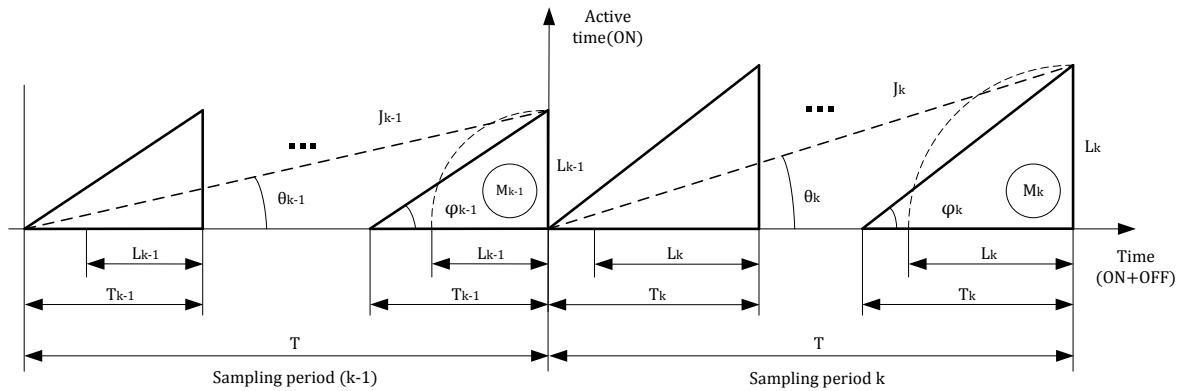


Fig. 4.8. Squared average intensity J_k and specific phase θ_k of the channel

Characteristics of processes generated by *ON/(ON + OFF) method*

We analyzed parts of the well known, LRD Bellcore (BC-pAug893) data traffic (300 sec long) and MAWI Wide-Transit (F2009033115004) data traffic (30 sec long). Basic characteristics of these traces are presented in Table 4.3. Utilizing the ON/(ON + OFF) method, we generated $Z(t)$ complex process for each trace, we analyzed its real and imaginary parts and we determined their basic characteristics.

We analyzed the scale dependence of the real and imaginary LRD parts of $Z(t)$ complex series with wavelet method, and we estimated the Hurst parameters. Because of the strong correlation between the channel intensity and channel load, the scalograms are similar, but the Hurst parameters are different (see Table 4.4.). The time series component transmitting higher energy shows less LRD.

³ <http://ita.ee.lbl.gov/html/contrib/BC.html>

⁴ <http://mawi.wide.ad.jp/mawi/samplepoint-F/20090330/200903311500.html>

Table 4.3. Basic characteristics of the analyzed traffics

Name of the stream	BC-pAug89	F200903311500
Sampling place	Bellcore Morristown Research and Engineering Laboratory, USA	Samplepoint-F, WIDE-TRANSIT link, Tokyo, Japan
Sampling date	1989.08.29. 11:25-11:30	2009.03.31. 15:00:00-15:00:30
No. of sampled frames	115.888	622.944
Type of data stream	IP, LAN and WAN (0% HTTP)	IP, WAN (94% TCP, 6% UDP, 73% HTTP)
Type of the channel	IEEE 802.3, 10 Mbps	IEEE 802.3, 1000 Mbps
Type of QoS	"Best-effort"	"Best-effort"
Sampling period (T)	10 ms	1 ms
Sampling accuracy (τ)	10 μ s	10 μ s
Average of channel intensity ($\bar{M}$)	3,86	20,76
Variation of channel intensity	1,67	10,72
Average channel load ($\tan(\varphi)$)	14,44 %	12,31 %
Variation of channel load	4,43 %	10,43 %

The explanation of this phenomenon is that remarkable part of Bellcore LAN/WAN traffic was generated by TCP-based SMTP and FTP protocols in short packets on lightly loaded 10 Mbps Ethernet channel with Best-effort (without QoS) method, and an important part of the channel was occupied by control signaling.

Table 4.4. Estimated Hurst parameters with wavelet method ($\hat{H}$)

	BC-pAug89	F200903311500
Channel intensity, $M(t)$	0.5342	0.7367
Channel load, $\tan \varphi(t)$	0.7686	0.7375

Thesis No. 3 summary, conclusions

- i.) The Z_k complex process generated with $ON/(ON + OFF)$ method can be applied for network traffic analysis:

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

where T is the sampling period, M_k is the channel intensity, and $\tan \varphi_k$ is the channel load components. All of these are expressive quantities with physical meanings.

- ii.) If the basic traffic process in QoS free network environment is LRD, then the real and imaginary parts of Z_k complex process generated with $ON/(ON + OFF)$ transformation are LRD and there exists a strong correlation between them.
- iii.) Both components generated with the $ON/(ON + OFF)$ method are necessary for network traffic analysis, because both time series contain information for describing the physical process of content transmission. The $ON/(ON + OFF)$ method is useful not only for Best-effort processes, but for other QoS processes, as well.
- iv.) The $ON/(ON + OFF)$ method based on wavelet transformation is able to estimate Hurst parameter using relatively short traces. This aspect is advantageous in practice, where detection of fractal characteristics of the actual traffic should be estimated asymptotically in real time.

Papers in the subject of Thesis No. 3

[9.1.1. (2009)], [9.1.2. (2008)]

Thesis No. 4: Impact of the QoS on the IP streaming video

We analysed the impact of QoS mechanisms on OSI L2 and L3 layers in a single QoS domain with controlled parameters and two different video codecs (H.261, H.264). We generated TCP and UDP traffics simultaneously from Host1 to Host2. The TCP transported FTP and HTTP, and UDP transported interactive video (see Fig. 4.9.).

The TCP traffic was transferred with Best-effort (DSCP = 0) mechanism in the QoS domain. The packet of the UDP based video conference fits the Ethernet frame and in this way the priority of the IP packets transmitting UDP video segments could be increased to upper layer by setting DSCP = 56 for these packets.

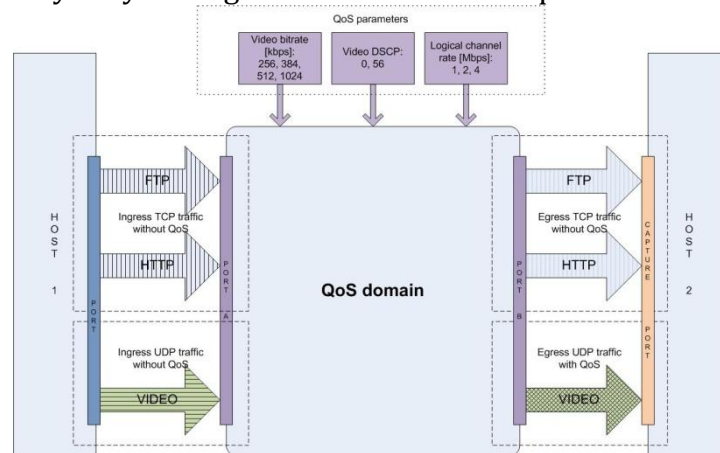


Fig. 4.9. Measurement scenario of QoS video domain

Host1 sent video packets with maximum rate into the QoS domain, which was at most 1024 kbps. Host2 sampled separately the incoming TCP from the incoming UDP stream.

Table 4.5. Parameters of the QoS data streams

Parameter	Value
Video bit rate [kbps]	256, 384, 512, 768, 1024
Video codec	H.261, H.264
Video stream DSCP value	0, 56
Channel rate [Mbps]	1, 2, 4
Data link type	IEEE 802.3 10 Mbps (Full Duplex)

The video bit rate and its priority for the QoS domain was controlled on Port_A, and the common bandwidth for the UDP and TCP traffics was controlled on egress Port_B. The bandwidth of Port_B was set with interface level global parameter. We captured the L2 PDU size and the interarrival time separately for TCP and for UDP traffics. One measurement took 60 seconds and we stored 60 traces in total.

Table 4.6. Measurement conditions of QoS traffics

Codec type	index-a
H.261	1
H.264	4

a.)

DSCP value	index-b
0	0
56	5

b.)

Channel rate	index-c
1 Mbps	1
2 Mbps	2
4 Mbps	4

c.)

For each measurement we utilized the same multimedia content between hosts. In the first 30 VRB (Variable Bit Rate) cases the H.261 codec was used, and in the next 30 cases we utilized the H.264 codec. The separated TCP and UDP are denoted as $\{T_{abc}\}$ and $\{U_{abc}\}$, respectively. Depending of the QoS parameter, indexes abc show ($abc \in \{101, 102, 104, \dots, 454\}$) measurement conditions indicated in Table 4.6.

Elements of a given set were stored at Bw[kbps] video rate ($Bw \in \{256, 384, 512, 768, 1024\}$). Each element is a time series, where the sampling period was $T = 100$ msec and the measurement accuracy was $\tau = 10$ μ sec. We analyzed the basic characteristics (average bit rate, bit rate variance, bit rate skewness), then with ON/(ON + OFF) method the LRD and fractal properties of the 120 complex processes. The complex processes generated by the ON/(ON + OFF) method were the following:

$$\left. \begin{array}{l} (Z_k^{T,p}), \text{ for TCP traces} \\ (Z_k^{U,p}), \text{ for UDP traces} \end{array} \right\}, p = 1, 2, \dots, 60, k = 1, 2, \dots, \lfloor t/T \rfloor$$

We found that the estimated Hurst parameter of the channel intensity $\widehat{H}_M \in (0,55; 0,90)$ for both TCP and UDP, denoting LRD property for these processes (see Fig. 4.10., Fig. 4.11.). For TCP traffic the 1 Mbps channel rate we obtained $\widehat{H}_M \in (0,55; 0,65)$. For 4 Mbps channel rate we got $\widehat{H}_M \in (0,8; 0,88)$, and for 2 Mbps channel rate the estimated Hurst parameters were between the values presented above.

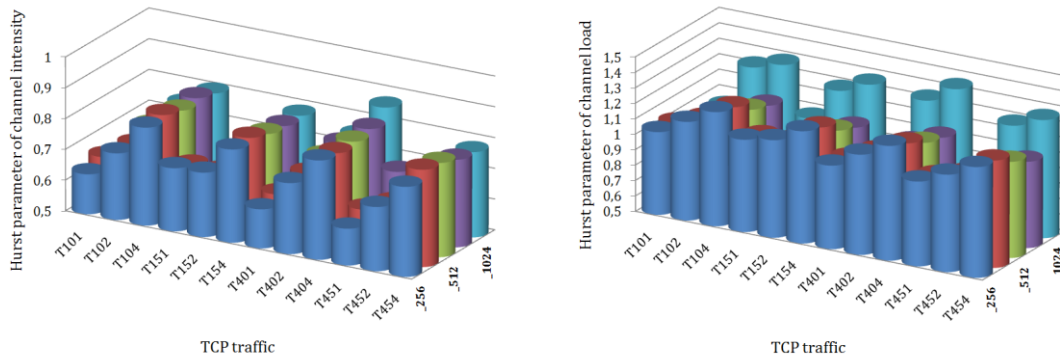


Fig. 4.10. Estimated Hurst parameter of channel intensity, $\widehat{H}_M$

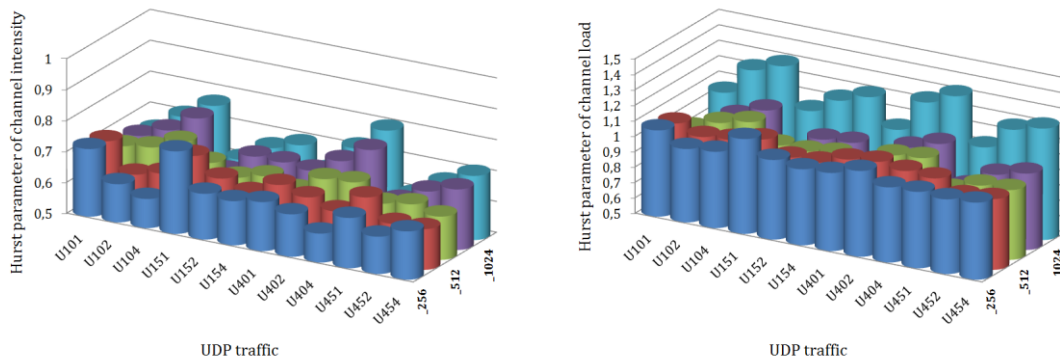


Fig. 4.11. Estimated Hurst parameter of channel load, $\widehat{H}_{\tan \varphi}$

We established that for TCP traffic the channel intensity Hurst parameter, $\widehat{H}_M$ is directly proportional to the channel rate. $\widehat{H}_M$ is inversely proportional to the video rate. TCP traffic transmission with Best-Effort mechanism is less dependent on the video

traffic QoS mechanism (see Fig. 4.10.). This effect is caused by the windowing and slow-start mechanisms of TCP.

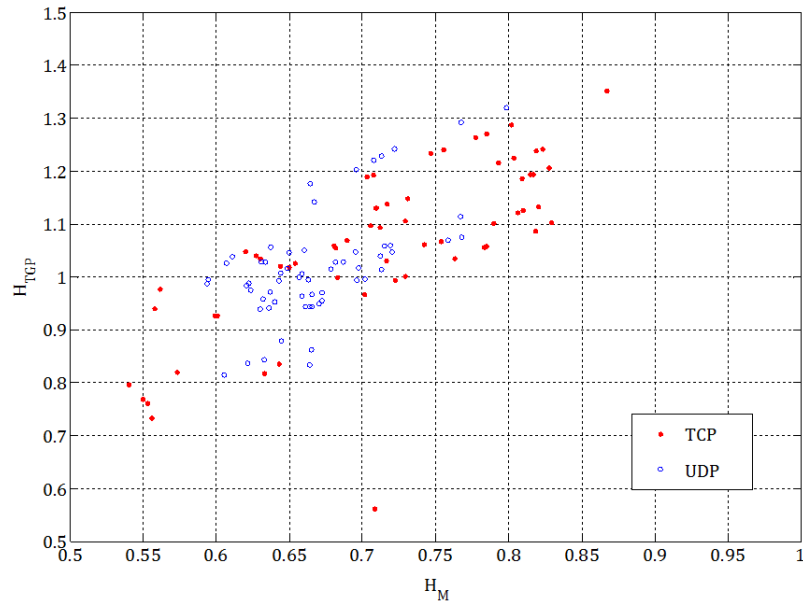


Fig. 4.12. Relation between Hurst parameters of simultaneous TCP (data) and UDP (voice) traffics

The $\widehat{H}_M$ parameter for UDP traffic has lower value than the simultaneously transferred TCP traffic (see Fig. 4.10.). The type of codec has no influence on $\widehat{H}_M$ neither for TCP nor for UDP traffic. In special cases, the Hurst parameter of the channel load is not interpretable, because $\widehat{H}_{\tan \varphi} > 1$. It means that the channel load is not a stationary process in such cases.

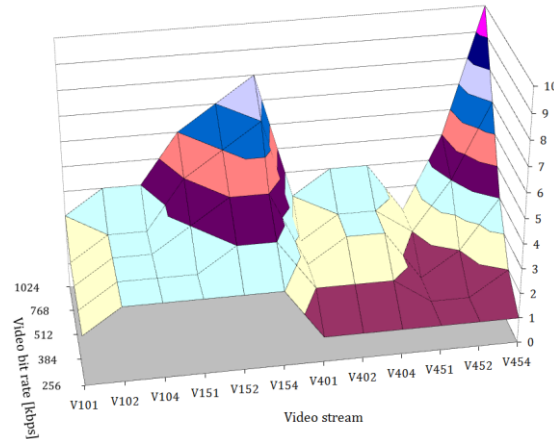


Fig. 4.13. Opinion Score (OS) of the captured video streams

We established that the QoS mechanism suspends the stationary character of the packet switched network, and therefore no self-similar and no LRD effects can predominate. Parameter $\widehat{H}_{\tan \varphi}$ is smaller for UDP in general than for TCP traffic. For 384...768 kbps video rates the channel load of TCP traffic is not stationary, but for UDP traffic $\widehat{H}_{\tan \varphi}$ is high and less than the unity, namely is LRD. In these cases, the video codec type has no influence on the Hurst parameter of the channel load.

On the basis of Fig. 4.12. we declare that in case of simultaneous UDP and TCP traffics, the UDP protocol places points with coordinates $(\widehat{H}_M, \widehat{H}_{\tan \varphi})$ nearer to the origin than TCP protocol, in the space of channel load – channel intensity Hurst parameters, that is less LRD.

Similar to the MOS (Mean Opinion Score) that has a [1...5] scale, we established our own OS (Opinion Score) measure with scale [1...10] to assess the satisfaction level of the received video quality at the users. In this way we classified the different video measurement cases. Low value of OS means low quality and high value means high quality.

Based on the OS values (see Fig 4.13) we perceived that in mixed TCP and UDP traffic environment the quality of video depends heavily on the QoS parameters. Relation between the Hurst parameters of channel intensity and channel load for mixed TCP and UDP traffics and the OS values is hard to detect. Correlation between $\widehat{H}_M$ and OS exists only for the 1024 kbps video rate.

Thesis No. 4 summary, conclusions

- i.) The presence of Diffserv QoS mechanism in service provider network radically influences the traffic behavior of classical network applications. This changes can be detected and measured with the complex time series generated by the ON/(ON + OFF) method. The Hurst parameters of the channel intensity and channel load for different QoS conditions are uncorrelated.
- ii.) Mixed Best-Effort TCP traffic with Diffserv based QoS controlled UDP traffic is LRD at the channel intensity time series, and the stationary character of the channel load is cancelled out for both transport layer protocols.
- iii.) The VBR streaming video traffic controlled by the Diffserv QoS mechanism produces more smooth traffic in congested environment. The congested Best-effort based TCP traffic is able to use only a part of the remaining network resources. If the video stream is not treated by QoS and is congested, the video service becomes inoperable.

Papers in the subject of Thesis No. 4

[9.1.3 (2007), 9.2.1 (2007)]

Thesis No. 5: Impact of the QoS on the IP voice

We analyzed statistical characteristics of real time interactive voice traffic with ON/(ON+OFF) method and we established the influencing factors of the voice quality. Two scenarios were studied: a.) voice transmission in congested environment; b.) congestion free VoIP trunk traffic. The type of voice codec is taken into consideration for both scenarios.

a.) Voice over IP traffic in congested environment was analyzed firstly. We generated TCP (T) and UDP (U) data flows between the source and the destination data nodes and fill up the capacity of a 10 Mbps Ethernet channel.

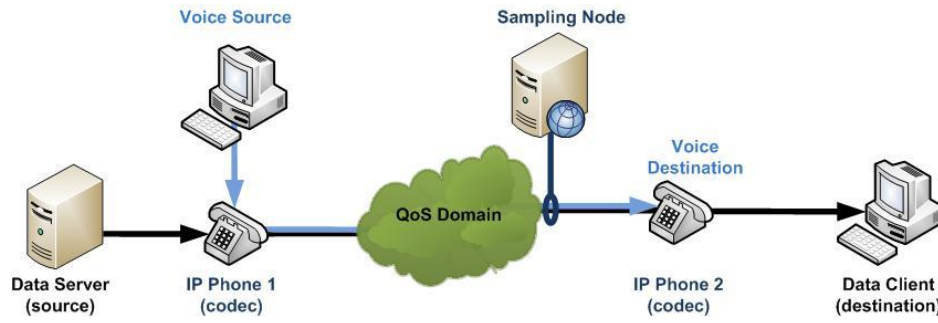


Fig. 4.14. Measurement scenario of congested VoIP traffic

On the uplink interface of the IP phones both traffics, voice and data were transferred because of the three port switch included inside of the IP phone (see Fig. 4.14.). One minute long songs, (H) hard rock, and (P) piano were repeated on the source and transmitted from the IP Phone₁ to IP Phone₂. Different types of codec (G.728, GSM, G.711, WideBand-G.722) were utilized at the IP phones, while the voice traffic inside the QoS LAN/MAN domain was regulated by DSCP values set for 0x00-“best-effort”, 0x02-low price, 0x04-reliable, 0x08-performance, 0x10-low latency. The eighty different traffic traces were created by varying the transport protocol, the song type, the codec type, and the DSCP value: $[(T,U) \times (H,P) \times (G.728,GSM,G.711,WB) \times (0,2,4,8,16)] = 2 \times 2 \times 4 \times 5 = 80$ traces. These traces were captured by the program Wireshark with $\tau = 10$ msec accuracy.

b.) VoIP trunk traffic in congestionless environment was analyzed secondly. The aggregated voice traffic of IP/PBX gateway was captured for a population of 1500 IP phones. The voice trunk link was 100 Mbps Ethernet and the capturing task was effectuated with $\tau = 10 \mu\text{sec}$ accuracy in University of Debrecen environment on a working day for a one hour time interval. We did not use special QoS mechanism because the trunk link load was less than 1%. The aggregated voice streams were transmitted with DSCP = 0.

For both measurement scenarios the channel intensity and channel load time series were generated by ON/(ON + OFF) method. In case of voice transmission the Ethernet MTU (1500 B) is at least two times higher than the VoIP packet size, so there were no packet fragmentations. The sampling interval for both scenarios was $T = 100$ ms.

For congested VoIP environment we assess that the relative deviance of channel load corresponds to the relative deviance of channel intensity. Because the size of the voice and data packets was constant, there is a linear relation between the channel load and the channel intensity. In case of TCP data stream with DSCP = 0, the relative average deviance of the intensity for G.711 codec-based voice traffic is slow, but for other codecs it is higher and can achieve up to 20% (GSM codec). This high value is the effect of special compression mechanism included in the GSM codec. When DSCP $\neq 0$, that is when we prioritize the voice with QoS, we cause low relative deviance of M for each codec.

Depending on the voice dynamics, but independent of the transfer protocol type (UDP/TCP), in cases without QoS the channel load of the voice traffic is self similar and LRD with $\widehat{H}_M \in [0.56, 0.91]$. The transfer rate of voice codec and the estimated Hurst parameter of the voice channel load are inversely proportional. At the receiving side the voice quality detected was higher for high bandwidth codecs and the congestion effect of voice with QoS was not practically perceptible. For G.711 codec and the dynamic voice with DSCP = 8 (throughput optimization) QoS value caused high value for $\widehat{H}_M$. The $\widehat{H}_M$ value of the dynamic voice traffic is higher than for voice without dynamics. The reason

of this effect is the burstiness of the voice traffic, because voice with greater dynamics generates more bursty PDU traffic.

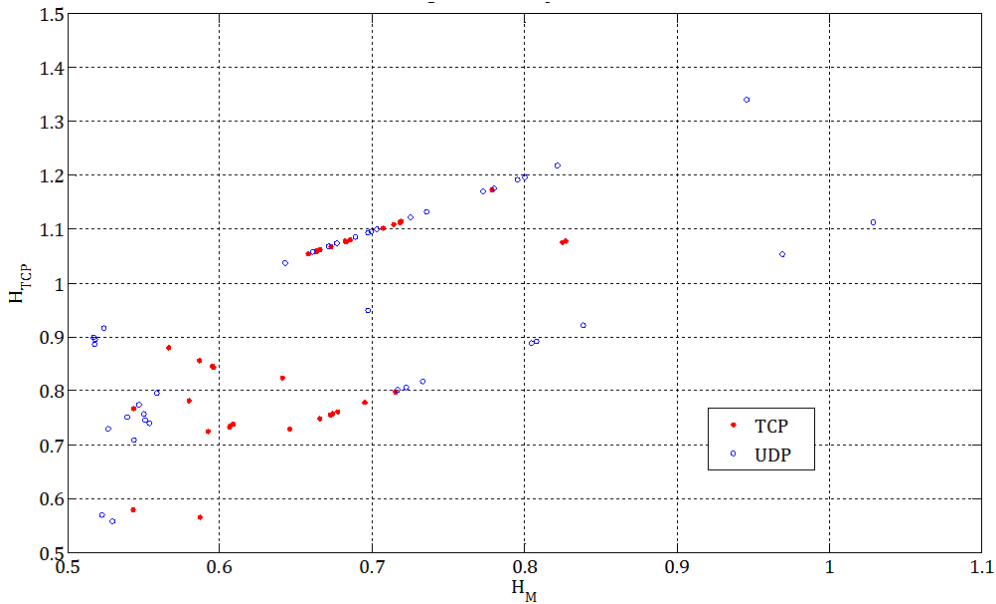


Fig. 4.15. Relation between Hurst parameters of simultaneous data (TCP/UDP) and voice (UDP) traffics

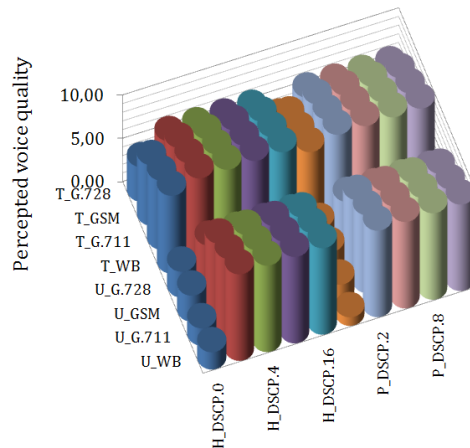


Fig. 4.16. Perceived quality of the congested voice

As shown in Fig. 4.15., the voice processes where $\widehat{H}_M < 1$ and $\widehat{H}_{\tan \varphi} < 1$, in the $(\widehat{H}_M, \widehat{H}_{\tan \varphi})$ space, the dots representing voice traffic are closer to the origin when the voice is congested with UDP data, than when congested with TCP data.

We created a classification method of the detected voice quality at the receiver side. Higher values mean higher quality. The 80 dots in the $(\widehat{H}_M, \widehat{H}_{\tan \varphi})$ space (see Fig. 4.15.) show that the voice traffic transmitted with QoS in congested environment gives better quality than the Best-Effort transmission mode. The quality of congested voice and transmitted with or without QoS is proportional with the transfer rate of the codec. Voice traffic transferred with high rate codecs, but without QoS and congested with UDP data has very poor quality.

For congestion free VoIP trunk link the channel load and the channel intensity time series are presented in Fig. 4.17., Fig. 4.18., and the 2-LD graphs conform relation (3.24)

are represented in Fig. 4.19. and Fig. 4.20., respectively. Even the moving average of these two time series are similar because of the local maximums of the channel intensity, their statistical characters are very different.

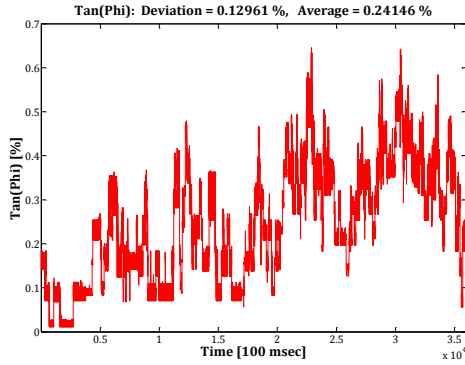


Fig. 4.17. Channel load of VoIP trunk

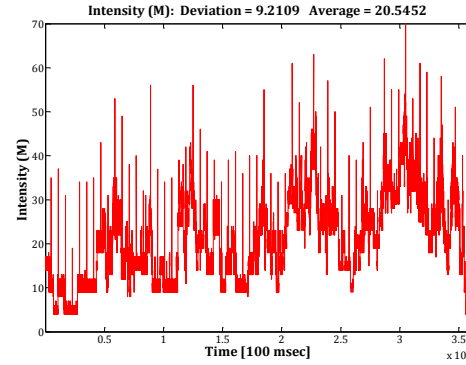


Fig. 4.18. Channel intensity of VoIP trunk

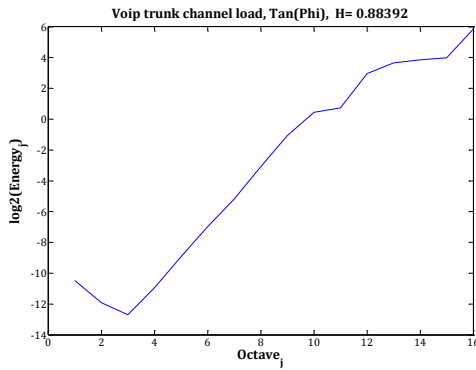


Fig. 4.19. Wavelet estimation of $H_{\tan \varphi}$ for VoIP trunk

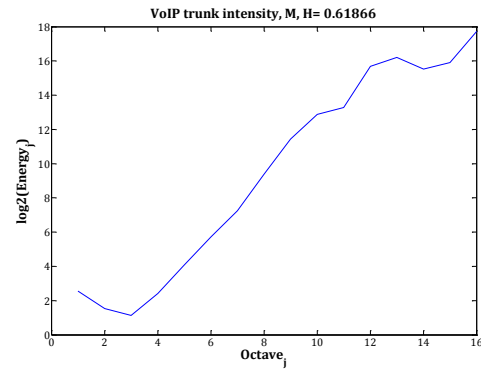


Fig. 4.20. Wavelet estimation of $\widehat{H}_M$ for VoIP trunk

The 1 second moving average of the channel load shows well the simultaneous number of voice conversations, which can be derived from the staged character of the graph. The relative deviation of the channel load is 53%, but for the channel intensity is only 44%. This lower value is caused by the local maximums of the channel intensity. The traffic generated by simultaneous voice sessions on VoIP trunk has fractal properties, which can be detected by linear segments of the 2-LD diagram.

The estimated Hurst parameter $\widehat{H}_{TGP} = 0.88$ and the channel load is less scale dependent. The estimated Hurst parameter $\widehat{H}_M = 0.61$ and the channel intensity is scale independent at lower octaves and is varying significantly at higher octaves (see Fig. 4.19., Fig. 4.20.).

Thesis No. 5 summary, conclusions

- i.) The behavior of voice traffic congested with data traffic on Ethernet channel strongly depends on the TCP and UDP compound of the aggregated flow. The quality of voice congested with TCP data is better than the quality of voice congested with UDP data. This effect is produced by the data flow control of TCP protocol. The imaginary part (M-channel load) of the complex process generated with ON/(ON+OFF) method is not stationary, but the real part ($\tan \varphi$ -channel intensity) remains LRD.

- ii.) When data and voice traffic without QoS is congested on the Ethernet channel, the Hurst parameter of voice channel intensity is linear with the bit rate of voice codec, and the Hurst parameter of the channel load is independent on the voice dynamics. Based on the quality of voice detected, in such cases the higher bit rate voice codec produces lower voice quality because these codecs are more sensitive to the UDP bursts.
- iii.) Voice traffic transferred with Diffserv QoS mechanism and congested with Best-Effort data traffic has no perceptible effect on the quality of voice. The type of voice codec determines the voice quality. The increasing quality order of analyzed codecs is: G.728, GSM, G.711, WB (G.722).
- iv.) The aggregated traffic of several voice sessions running on the same Ethernet channel without congestion are LRD processes and have estimated Hurst parameters of channel load and channel intensity: $\widehat{H_{\tan \varphi}} = 0.88$, $\widehat{H_M} = 0.61$.

Papers in the subject of Thesis No. 5

[9.1.1 (2009), [9.1.3. (2007)]

5. A jelöltnek az értekezés témájában készült publikációinak listája / List of publications

5.1. Referált folyóiratcikkek / Refereed papers

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.

5.2. Referált konferencia-kiadványok, könyvfejezetek / Refereed conference papers, book chapters

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 (KLNET, UDNET, ..., INTERNET)'96, *KLTE ISZK kiadvány, Debrecen*, pp. 105-154 (in Hungarian)

5.3. Egyéb konferencia-kiadványok / Other publications

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).

Publikációk / Publications

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 Zsolt (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 Zsolt, Gál Zoltán, Herdon Miklós, Korcsolay Zsolt, 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).

5.4. Konferencia előadások / Conference presentations

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).

Publikációk / Publications

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-Nosztvay*, 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, *Workshop'99 konferencia*, Nyíregyháza, **1999**. március 30. - április 1 (in Hungarian).
38. **Gál Zoltán**, Ecsedi Kornél: Bérletvonalak használatának elemzése, *Workshop'98 konferencia*, Győr, **1998**. április 14-17 (in Hungarian).
39. **Gál Zoltán**: Mobil kapcsolatok ATM és IPng felett, *Workshop'97 konferencia*, Keszthely, **1997**. május 27-29 (in Hungarian).
40. **Gál Zoltán**: Alkalmazások hatása az informatikai hálózatok fejlődésére, *Workshop'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, *Workshop'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, *Workshop'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**, Bötkös László: A KLTEnet korszerű adminisztrációs megoldásai, *Workshop'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, *Workshop'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, Informatika a felsőoktatásban 1992 konferencia*, Debrecen, **1992**. június 21-24 (in Hungarian).
54. **Gál Zoltán**: A Kossuth Lajos Tudományegyetem informatikai rendszere, *NJSZT V. Országos Kongresszusa, Informatika a felsőoktatásban 1992 konferencia*, Debrecen, **1992**. június 21-24, (in Hungarian).

6. Irodalomjegyzék / Bibliography

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] D. R. Brillinger: Fourier interference: Some methods for the analysis of array and nongaussian series data, *Water Resources Bull.* 21, pp. 743-756, 1985.
- [9] D. R. Brillinger: Time Series: Data Analysis and Theory, Expanded edition, McGraw-Hill, New York, 1981.

CD

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] I. Daubechies: Ten Lectures on Wavelets (S.I.A.M., Philadelphia, 1992).
- [16] 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.

EF

- [17] 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.

GH

- [18] M. Garret and W. Willinger: Analysis, modeling and generation of self-similar VBR video traffic. In *Proc. ACM SIGCOMM'94*, pp. 269-280, 1994.
- [19] Anders Hald: The early history of the cumulants and the Gram-Charlier series. *International Statistical Review*, Vol. 68, No. 2, pp. 137-153, 2000.

IJ

- [20] IEEE Standards Association, <http://standards.ieee.org/>
- [21] E. Igloi, Gy. Terdik: Superposition of Diffusion with Linear Generator and its Multifractal Limit Process, *ESAIM Prob. Stat.* 7, pp. 23-88, 2003.
- [22] E. Iglói, Gy. Terdik: Superposition of diffusions with linear generator and its multifractal limit process, *ESAIM Probab. Stat.* 7, pp. 23-88, 2003.

KL

- [23] Kendall, M.G., Stuart, A.: *The Advanced Theory of Statistics, Vol. 1 (3rd Edition)*. Griffin, London. (Section 3.12), 1969.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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

- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] T. Mori, R. Kawahara, S. Naito: Analysis of Non-Gaussian Nature of Network Traffic, in *Proc. IEICE General Conference*, Tokyo, 2002.

OP

- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Kihong Park, Walter Willinger: Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation. *John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA*, 2000.

QR

Publikációk / Publications

- [33] M. Rosenblatt: Cumulants and cumulant spectra, in *Handbook of Statistics, Vol 3, (ed. P.R. Krishnaiah)*, North-Holland, Amsterdam, 1981.

ST

- [34] 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.
- [35] Gy. Terdik, T. Gyires: Internet Traffic Modeling with Lévy Flights. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 17, No. 1, pp. 120-129, February 2009.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] G. Samorodnitsky, M. Taqqu: Stable Non-Gaussian Random Processes: Stochastic Models with Infinite Variance. *Chapman and Hall, New York*, 1994.
- [39] 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.
- [40] 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.

U-Z

- [41] University of Minnesota: Minnesota Internet Traffic Studies (MINTS). <http://www.dtc.umn.edu/mints/igrowth.html>
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] X. Xiao, L. M. Ni: Internet QoS: A Big Picture. *IEEE Network Magazine*, March 1999.