



Szélessávú vezeték nélküli hálózatok teljesítőkéességének vizsgálata

Fazekas Péter

Doktori tézisek gyűjteménye

Tudományos konzulensek:

Dr. Pap László

Dr. Imre Sándor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Híradástechnikai Tanszék

Budapest, 2012 szeptember

1. Bevezetés

Az utóbbi két évtized egyik legjelentősebb fejlődési iránya a digitális telekommunikáció területén a vezeték nélküli technológiák elterjedése. Az első analóg mobiltelefon rendszerek indulásától elkezdve tanúi lehettünk annak, hogy a mobil technológia megelőzi a vezetékes telefonhálózatokat előfizetői létszám és szállított beszédforgalom szempontjából. Közben a szabványosítás és a hálózati technológiák fejlesztése is abban az irányban haladt, hogy a nagy sebességű adatátviteli szolgáltatások közcélú cellás hálózatban is elérhetővé váljanak. Manapság – a hálózat fejlettségétől és a körülményektől függően – a 3G szolgáltatók hálózatán az előfizetők megtehetik, hogy lényegében ugyanazokat a szolgáltatásokat vegyék igénybe, mint vezetékes hozzáférés esetén. Az elérhető átviteli sebesség Mbps nagyságrendű, azaz összemérhető a népszerű kábeles hozzáférésekkel. Az iparági elvárás pedig egy olyan rádiós technológia szabványosítása és elterjedése, amely széles spektrumot rugalmasan kihasználva akár több tíz Mbps átviteli sebességet is nyújthat az előfizetők számára (ez az LTE – Long Term Evolution elnevezésű hálózat rádiós interfésze).

Mivel az új rádiós technológiák nagysebességű hozzáférést tesznek lehetővé, a hagyományos Erlang-féle veszteséges modell (amit a szükséges csatornák számának becslésére lehet alkalmazni abban az esetben, ha egy kapcsolat a teljes időtartama alatt egy csatornát foglal) nem elegendő. Ennek több oka is van: a multimédiás kapcsolatok borsztös, illetve változó átviteli sebességgel generálnak adatfolyamot, sőt, a csomagkapcsolt rádiós hálózatok általában nem jellemezhetőek explicit módon csatornák darabszámával, vagy egyértelmű átviteli kapacitással. Azonban a veszteséges modell mögötti alapvető háttérret érdemes használni, de új modellezési feltételekkel amelyek a generált forgalom változékonyságát is tartalmazzák, illetve a mobil előfizetők viselkedését írják le.

A gyakorlatban az analitikus teljesítőképesség-modellek a rádiós hálózat dimenzionálásánál, illetve kapacitás tervezésénél használhatók. Figyelembe véve, hogy egy országos mobil hálózat több ezer cellából áll, a tervezést segítő módszereknek meglehetősen gyorsnak kell lenniük (akár még a kisebb pontosság árán is). Ezért durva kapacitás-tervezési célra a részletes csomagszintű modellek, vagy hálózat szimulációk nem alkalmazhatók hatékonyan. A disszertáció első téziscsoportja egy analitikus modell részletes leírását tartalmazza, amely figyelembe veszi a mobil multimédiás kapcsolatok fő jellemzőit. A hálózat teljesítőképességét jellemző mennyiségek pedig egy gyors, rekurzív eljárás alapján határozhatók meg. A modell kidolgozásánál szükséges volt egy felhasználót jellemző idő, a *hátralévő kapcsolattartási idő* bevezetése. A második té-

ziscsoport foglalkozik azzal, hogy lehet ennek a véletlen időnek az eloszlását meghatározni. A harmadik téziscsoport a napjainkban közcélú adatátviteli szolgáltatás nyújtására legelterjedtebb 3G hálózatok elérhető átlagos hasznos kapacitásával foglalkozik. A 3G hálózatokban alkalmazott WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) hozzáférés interferencia limitált, ezért a lefedettség, a pillanatnyi forgalom és az átviteli kapacitás szoros összefüggésben van és függenek egymástól. Ezért egy cellára jellemző teljes átviteli sebesség meghatározása nem egyértelmű feladat. A téziscsoportban olyan számítási módszerek kerülnek bemutatásra, amelyekkel a 3G cella átlagos hasznos kapacitását meg lehet határozni, HSDPA használata esetén, vagy nélküle is.

2. Kutatási célok

A bemutatott kutatás egyik fő célja egy, a cellás hálózatok teljesítőképességének elemzésére alkalmas analitikus modell kifejlesztése volt. A célok között szerepelt, hogy a modellben új ötletek jelenjenek meg, vegye figyelembe a felhasználói mobilitást és tegye lehetővé a multimédiás és adatkapcsolatok borsztös jellegének leírását. Annak érdekében, hogy a modell általános érvényű, de tetszőlegesen pontos lehessen, a felhasználót leíró véletlen idők (kapcsolat hossza, cellában tartózkodási idő) modellezésére fázis típusú eloszlásokat választottam. Követelmény volt, hogy a modellként adódó sorbanállási rendszer egyensúlyi eloszlásának meghatározásához gyors módszer kerüljön alkalmazásra, ugyanis valóság-hű paraméterek esetén a rendszer állapotainak száma rendkívül nagy. A kitűzött célok teljesültek, a végeredmény pedig egy gyors, de mégis elegendően pontos teljesítőképesség modellező módszer. Egy másik célkitűzés volt a jelenlegi 3G hálózatok kapacitásának hatékony elemzése. Az irodalomban fellelhető kapacitás modellek általában nem kezelik az egyszerre jelen lévő többféle rádiós hordozó szolgáltatást, előfizetők térbeli eloszlását, többutas terjedést, illetve a külső interferencia pontos számítását. Ezért a cél az volt, hogy ezek a tényezők megjelenjenek a kidolgozandó kapacitás modellben. Az előállt számítási módszer nagyvonalú kapacitás dimenzionálási célokra használható. A módszer kidolgozásának közvetlen motivációja volt egy kutatási együttműködés az egyik magyarországi szolgáltatóval.

3. Kutatási módszertan

Az elsődleges kutatási cél analitikus vizsgálatok elvégzése volt. Az első téziscsoportban ismertett analitikus modell kidolgozásához és az eredmények számításához sorbanálláselméleti és valószínűségszámítási módszereket kellett alkalmazni. A számításokat C++-ban implementáltam. Mivel a bemutatott módszer közelítő jellegű, egy önálló eseményvezérelt szimulációs szoftvert is készítettem az analitikus számítások pontosságának ellenőrzésére. A hátralévő kapcsolattartási idő kiszámítása valószínűségelméleti módszereket igényelt. Önmagában ez a módszer nem igényel szimulációkat az ellenőrzéséhez, hiszen az alapját képező feltételek és egyenletek, levezetések függetlenül, önállóan ellenőrizhetők. Mégis, demonstrációs céllal egy önálló, Matlabban írt szimulációs programot készítettem, ami modellezi a felhasználók mozgását és kapcsolattartási idejüket és statisztikákat gyűjt a hívásátadással érkező előfizetők hátralévő kapcsolattartási idejéről. A 3G hálózatok kapacitás vizsgálata jól ismert jel-zaj viszony egyenleteken alapul és némi valószínűségelméleti módszertant igényel. A számítások ellenőrzése céljából egy pillanatkép szimulátort valósítottam meg Matlabban (ilyenkor a teljesítőképességet nagyszámú, a hálózati működés egy rövid időtartamát modellező független pillanatfelvételek statisztikáiból határozzuk meg). A két utóbbi témához tartozó numerikus számításokat szintén Matlabban implementáltam, míg a hátralévő kapcsolattartási idő kiszámításához szükséges gráfelméleti eljárást C-ben.

4. Új tudományos eredmények

4.1. 1. Téziscsoport: Szélessávú mobil hálózatok analitikus modellezése változó adatsebességű források jelenlétében [J1][J2][J4][C4][C5]

Az első téziscsoport a szélessávú mobil hálózatok gyors és pontos kapcsolat-szintű elemzését lehetővé tevő analitikus modellezési eljárás leírását tartalmazza.

1.1 Tézis

Kidolgoztam egy általános, kapcsolat szintű sztochasztikus modellt a szélessávú vezeték nélküli hálózatok rádiós cellájának vizsgálatára. A modellezési eljárás a következő újszerű képességekkel rendelkezik:

- *tetszőleges eloszlású kapcsolattartási idő modellelhető,*

- *tetszőleges eloszlású cellában tartózkodási idő modellezhető*
- *leírja az előfizetői forgalom időbeli változékonyságát és csomósodását (börstösség)*
- *leírja az azonnali blokkolás és a csökkentett átviteli sebesség alapú beengedési módszereket.*

A csatornatartási időt fázis típusú eloszlások írják le a modellben, amelyek leíróiról megmutattam, hogy

$$\underline{t}^{(N,k)} = \underline{d}^{(R,k)} \otimes \underline{l}^{(R,k)} \quad \mathbf{T}^{(N,k)} = \mathbf{D}^{(R,k)} \oplus \mathbf{L}^{(k)}, \quad (1)$$

ahol $\underline{d}^{(R,k)}$, $\mathbf{D}^{(R,k)}$ egy k típusú előfizető hátralévő cellaidejének leírói, valamint $\underline{l}^{(R,k)}$ és $\mathbf{L}^{(k)}$ a kapcsolat hosszának leírói. A rendszer kiszolgálási folyamatában a kiszolgálási időről beláttam, hogy fázis típusú, a következő leírókkal:

$$\underline{s}^{(N,k)} = \underline{t}^{(N,k)} \otimes \underline{q}^{(k)} \quad \mathbf{S}^{(N,k)} = \mathbf{T}^{(N,k)} \oplus \mathbf{Q}^{(k)}, \quad (2)$$

ahol $\mathbf{Q}^{(k)}$ a k típusú kapcsolat generált forgalmának időbeli változását jellemző Markov lánc infinitézimális generátora. A modellbeli kiszolgálási folyamat olyan, hogy egy kiszolgálás alatt álló igény által foglalt kapacitás a kiszolgálási folyamat fázisától függ. \diamond

A kifejlesztett modell egy, rádiós kapacitásával jellemzett cellára koncentrálna. Megengedi többféle felhasználói típus leírását, amelyek különbözhetnek mobilitásukban, adatátviteli viszonyuk hosszában, illetve a generált forgalom mintázatában. A handoverrel érkező, illetve a cellában újonnan kezdeményezett kapcsolatok a modellben Poisson folyamat szerint érkeznek, ami adatátviteli viszony szinten jó közelítés (pl. [17][5]). A felhasználók négy véletlen idővel jellemezhetők:

- Adatátviteli viszony hossza (kapcsolattartási idő): véletlen idő, amíg a kommunikációs viszony aktív, τ_{L}^k -vel jelölve egy k típusú előfizető esetén.
- Hátralévő kapcsolattartási idő: az az idő, ami egy, a vizsgált cellába irányuló hívásátadás kezdeményezésétől a kommunikációs viszony befejezéséig tart, függetlenül attól hogy a kapcsolat a cellában ér véget, vagy bárhol máshol a hálózatban. Jelölése $\tau_{\text{L,R}}^k$.
- Tartózkodási idő: az a véletlen idő, amennyit egy felhasználó a vizsgált cella lefedettségi területén tölt, a kommunikációjától függetlenül (cellaidő, τ_{D}^k).

- Hátralévő tartózkodási idő: az a véletlen idő, ami a vizsgált cellában történt új kapcsolat felépítése és az előfizetőnek a cella lefedettségi területéről történő távozása között eltelik, függetlenül attól, hogy a kapcsolat még tart-e. ($\tau_{D,R}^k$)

A csatorna foglalási idő azt jellemzi, milyen hosszan foglal az előfizető rádiós erőforrást a cellában (jelölése τ_{CH}^k). Ez az előzőekben definiált időkből származtatható, mint $\tau_{CH}^{k,N} = \min(\tau_{D,R}^k, \tau_L^k)$ olyan adatátviteli viszonyok esetén, melyeket a vizsgált cellában kezdeményeztek (innen származik az N index, az új angol megfelelője után) és $\tau_{CH}^{k,H} = \min(\tau_D^k, \tau_{L,R}^k)$ a cellába hívásátadással érkező kapcsolatok esetén.

A disszertációban a négy leíró véletlen idő fázis típusú eloszlással [16] rendelkezik, azaz a k típusú, újonnan kezdeményezett kapcsolat tartási ideje fázis típusú, melynek paraméterei $\underline{l}^{(k)}$, $\mathbf{L}^{(k)}$, a hívásátadással érkező kapcsolatok hátralévő tartási ideje $PH(\underline{l}^{(R,k)}, \mathbf{L}^{(R,k)})$. A hívásátadással érkező kapcsolatok tartózkodási ideje és az új kapcsolatok hátralévő tartózkodási ideje pedig $PH(\underline{d}^{(k)}, \mathbf{D}^{(k)})$ és $PH(\underline{d}^{(R,k)}, \mathbf{D}^{(R,k)})$, sorrendben. A $PH(\underline{t}, \mathbf{T})$ jelölés utal arra, hogy egy fázis típusú eloszlásról van szó, amelynek kezdeti valószínűség vektora \underline{t} és generátor mátrixa \mathbf{T} , amelynek eloszlásfüggvénye és sűrűségfüggvénye:

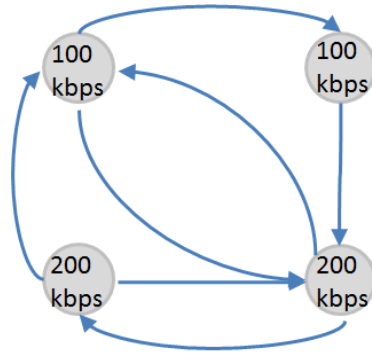
$$F(x) = 1 - \underline{t}e^{\mathbf{T}x}\underline{h}, \quad f(x) = \underline{t}e^{\mathbf{T}x}\underline{\mathbf{T}}^0. \quad (3)$$

Fázis típusú eloszlások, illetve ezeknek speciális változatai nem szokatlanok az irodalomban, mint a felhasználókat leíró idők modelljei [7][23][10][1]. A disszertációban bebizonyítom, hogy a csatorna foglalási idő ebben az esetben szintén fázis típusú eloszlással rendelkezik, amelynek kezdeti valószínűség vektora és generátor mátrixa:

$$\underline{t}^{(N,k)} = \underline{d}^{(R,k)} \otimes \underline{l}^{(R,k)} \quad \mathbf{T}^{(N,k)} = \mathbf{D}^{(R,k)} \oplus \mathbf{L}^{(k)}, \quad (4)$$

ahol \otimes és \oplus jelöli a Kronecker szorzás és Kronecker összeg műveleteket.

A felhasználói forgalom borsztössége általános markovi forrásokkal van leírva, amely szerint egy adott bitsebesség (ami nulla is lehet) van hozzárendelve egy Markov lánc minden állapotához és a kommunikációs viszony idején a forgalom ennek megfelelően generálódik: a Markov lánc minden állapot átmenete a felhasználói bitsebesség ugrását jelenti. Azonban a Markov lánc több állapotához is lehet azonos bitsebesség rendelve, valójában tehát a Markov lánc állapotváltozása nem szükségszerűen jár az adatátviteli sebesség megváltozásával; egy ilyen példát mutat a 1 ábra. A disszertációban megmutatom, hogyan lehet a pillanatnyi átviteli sebességet a modellbe



1. ábra. Example of traffic describing Markov chain

bevonni. Ugyanis, ha a forgalom leíró Markov lánc kezdeti valószínűség vektora és generátor mátrixa egy k típusú felhasználó esetén $\underline{q}^{(k)}$ és \mathbf{Q} , akkor az eredményül adódó sorbanállási modellben a kiszolgálási idő egy k típusú új kapcsolat esetén:

$$\underline{s}^{(N,k)} = \underline{t}^{(N,k)} \otimes \underline{q}^{(k)} \quad \mathbf{S}^{(N,k)} = \mathbf{T}^{(N,k)} \oplus \mathbf{Q}^{(k)}. \quad (5)$$

Összefoglalva, a rendszert leíró sorbanállási modell egy többosztályos $M/PH/C_0$ sor, fázisfüggő kapacitásigénnyel.

A modell két egyszerű beengedés szabályozási mechanizmust is képes leírni. Az első, az azonnali blokkolás módszere egyszerűen annyit jelent, hogy ha egy kapcsolat pillanatnyi átviteli sebessége az érkezéskor olyan nagy, hogy nem szolgálható ki a rádiós interfészen, beengedés nem történik, a kapcsolat vissza lesz utasítva. A másik módszer, a csökkentett átviteli sebesség módszere szerint a túl nagy pillanatnyi sebességgel érkező kapcsolat átviteli sebességét lecsökkenti egy, még kiszolgálható szintre ebben az esetben. Blokkolás csak akkor történik, ha a kapcsolat lehetséges átviteli sebességei közül a legkisebbet sem képes a rádiós interfész kiszolgálni.

1.2 Tézis

Kidolgoztam egy általános markovi forrásmodell, amely alkalmas a felhasználói forgalom változékonyságának leírására. A modell újszerűsége, hogy olyan aktív, tényleges forgalom generálásával járó szakaszokat ír le, amelyek során adatcsomókat (börst) generál a forrás; a börsztek között rövid szünetek lehetségesek és a börsztek időtartama alatt a generált bitsebesség különböző lehet. A modell leírja továbbá az aktív átviteli időszakok közötti inaktív periódusokat. A modell lehetővé teszi az aktív és inaktív időszakok, valamint a börsztek hosszának tetszőleges phase type eloszlással való leírását. A modell egy Markov lánc definícióján alapul, amelynek

infinitezimális generátora és kezdeti állapotvalószínűség vektora

$$Q = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{eff}} & \underline{A}_{\text{eff}}^0 \cdot \underline{i} \\ \underline{I}^0 \cdot \underline{a}_{\text{eff}} & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad \underline{q} = [\underline{a}_{\text{eff}}, \underline{i}]. \quad (6)$$

ahol \underline{i} és \mathbf{I} az inaktív periódusok leírói, továbbá

$$\mathbf{A}_{\text{eff}} = \mathbf{A} \oplus \mathbf{A}^*, \quad \underline{a}_{\text{eff}} = \underline{a} \otimes \underline{a}^*, \quad (7)$$

ahol \underline{a} és \mathbf{A} az aktív adási periódusok leírói, valamint

$$\mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{(1)} & P_{12} \cdot \underline{B}_{(1)}^0 \cdot \underline{b}_{(2)} & \dots & P_{1R} \cdot \underline{B}_{(1)}^0 \cdot \underline{b}_{(R)} \\ P_{21} \cdot \underline{B}_{(2)}^0 \cdot \underline{b}_{(1)} & \mathbf{B}_{(2)} & \dots & P_{2R} \cdot \underline{B}_{(2)}^0 \cdot \underline{b}_{(R)} \\ & \vdots & & \\ P_{R1} \cdot \underline{B}_{(R)}^0 \cdot \underline{b}_{(1)} & \dots & & \mathbf{B}_{(R)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\underline{a}^* = [p_1 \cdot \underline{b}_{(1)} \dots p_R \cdot \underline{b}_{(R)}], \quad (9)$$

ahol $\underline{b}_{(r)}$ és $\mathbf{B}_{(r)}$ az r ($r \in 1 \dots R$) átviteli sebességű börsztök hosszának leírói és $P_{r_1 r_2}$ annak valószínűsége, hogy egy r_1 átviteli sebességű börszt után egy r_2 sebességű következik. \diamond

A generált felhasználói forgalom részletes modellezése érdekében a disszertáció tartalmazza az általános markovi forrásmodell leírását. A javasolt modell az irodalomban megtalálható számos forrásmodell általánosításának is tekinthető (pl. [11][20][4]). A tényleges adatforgalmat a felhasználó aktív periódusok alatt generálja, amelyek között szünetek vannak. A bitfolyam azonban az aktív időszakban sem folyamatos, hanem rövid börsztök formájában érkezik, közöttük rövid szünetekkel. Ez az általános leírás számos adatátviteli szolgáltatásra alkalmazható, például a web böngészés leírható több letöltéssel (ami megfelel a börsztnek az előző leírásban), köztük rövid szünetekkel – ez az aktív periódus, amíg a felhasználó a kívánt oldalt keresi – és hosszabb gondolkodási idővel – szünet az aktív periódusok között – amíg a felhasználó az oldalt olvassa.

Egy ilyen típusú forrás markovi leírásához feltételezzük, hogy az aktív periódus hossza egy folytonos valószínűségi változó, $a(t)$ sűrűségfüggvénnyel, a köztük lévő szünetek sűrűségfüggvénye $i(t)$, a börsztök hossza az aktív periódusban $b(t)$, a börsztök közti rövid szünetek hossza pedig $g(t)$ sűrűségfüggvénnyel írható le. Feltételezzük, hogy mindegyik véletlen hossz egy megfelelően illesztett fázis típusú eloszlással van közelítve, melyek paraméterei sorrendben $(\underline{a}, \mathbf{A})$, $(\underline{i}, \mathbf{I})$, $(\underline{b}, \mathbf{B})$ és $(\underline{g}, \mathbf{G})$.

A disszertációban megmutatom, hogy az aktív periódus leírható egy Markov láncsal, ami tartalmazza az átviteli sebességeket, valamint a börszök és köztük lévő szünetek hosszát. A leíró Markov lánc generátor mátrixa \mathbf{A}^* és kezdeti valószínűség vektora \underline{a}^* , amelyek számítása a következő:

$$\mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \underline{B}^0 \cdot \underline{g} \\ \underline{G}^0 \cdot \underline{b} & \mathbf{G} \end{bmatrix}, \quad \underline{a}^* = [\underline{b}, \underline{g}]. \quad (10)$$

Annak érdekében, hogy az aktív periódus hossza a fentiekben leírtnak megfelelő legyen, azaz $\text{PH}(\underline{a}, \mathbf{A})$, az aktív periódus teljes leírása egy fázis típusú eloszlás, melynek paraméterei:

$$\mathbf{A}_{\text{eff}} = \mathbf{A} \oplus \mathbf{A}^*, \quad \underline{a}_{\text{eff}} = \underline{a} \otimes \underline{a}^*, \quad (11)$$

ahol \otimes és \oplus jelöli a Kronecker szorzás és Kronecker összegzés műveleteket. Ezt felhasználva, az eredő Markov forrásmodell generátor mátrixa és kezdeti valószínűség vektora:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{eff}} & \underline{A}_{\text{eff}}^0 \cdot \underline{i} \\ \underline{I}^0 \cdot \underline{a}_{\text{eff}} & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad \underline{q} = [\underline{a}_{\text{eff}}, \underline{i}]. \quad (12)$$

Az eddigiekben ez a forrásmodell általánosított ON-OFF modellként került bemutatásra, azonban a nem csak kettő, hanem tetszőleges R számú lehetséges átviteli sebességet tartalmazó általánosítási is kézenfekvő. Konkrétabban különféle átviteli sebességgel generált börszök is megadhatók, az ezek hosszát leíró fázis típusú eloszlásokkal. Az eddigiekkel összehasonlítva azt látjuk, hogy még egy paraméter szükséges, mégpedig annak valószínűsége, hogy egy adott átviteli sebességű börszt utáni következő börszt egy másik átviteli sebességgel generálódik. Megjegyzendő, hogy ez az eset tartalmazza a börszök közötti szünetek leírását, hiszen nulla átviteli sebességű börszt is definiálható. Feltételezzük, hogy ezek a valószínűségek a \mathbf{P} mátrixban adóttak, ahol P_{ij} annak valószínűsége, hogy i átviteli sebesség után j következik. Még egy paraméter vektor szükséges, \underline{p} tartalmazza az aktív periódus adott sebességű börszettel való kezdésének valószínűségét. Ha az i sebességű börsz leírói ($\underline{b}_{(i)}$ és $\mathbf{B}_{(i)}$), akkor az aktív periódust leíró egyesített fázis típusú eloszlás generátor mátrixa:

$$\mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{(1)} & P_{12} \cdot \underline{B}_{(1)}^0 \cdot \underline{b}_{(2)} & \dots & P_{1R} \cdot \underline{B}_{(1)}^0 \cdot \underline{b}_{(R)} \\ P_{21} \cdot \underline{B}_{(2)}^0 \cdot \underline{b}_{(1)} & \mathbf{B}_{(2)} & \dots & P_{2R} \cdot \underline{B}_{(2)}^0 \cdot \underline{b}_{(R)} \\ & \vdots & & \\ P_{R1} \cdot \underline{B}_{(R)}^0 \cdot \underline{b}_{(1)} & \dots & & \mathbf{B}_{(R)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

és kezdeti valószínűség vektora:

$$\underline{a}^* = [p_1 \cdot \underline{b}_{(1)} \dots p_R \cdot \underline{b}_{(R)}]. \quad (14)$$

1.3 Tézis

Definiáltam a szélessávú mobil hálózatokat leíró sorbanállási modell állapotterét és állapotátmeneteit. Leírtam az azonnali blokkolás alapú, illetve az átviteli sebesség csökkentés alapú beengedési eljárások esetére érvényes állapotátmeneti intenzitásokat. \diamond

Mivel az újonnan kezdeményezett és handoverrel érkező kapcsolatok érkezése Poisson folyamat, a kiszolgálási idő fázis típusú és a felhasználók által foglalt kapacitás a kiszolgálási idő fázisától függ, formálisan a rendszer leírható egy M/PH/ C_0 sorral, fázisfüggő kapacitás igényekkel.

Az adódó Markov lánc állapota a következő vektor:

$$\underline{n} = [\underline{n}^{(N,1)}, \dots, \underline{n}^{(N,K)}, \underline{n}^{(H,1)}, \dots, \underline{n}^{(H,K)}], \quad (15)$$

ahol a $\underline{n}^{(N,k)}$ vektor i -edik eleme, $n_i^{(N,k)}$ jelöli azon k típusú adatátviteli viszonyok számát, amelyek a cellában kezdeményeződtek és a k típusú kapcsolatok kiszolgálási idejének i -edik fázisában tartózkodnak, $\underline{n}^{(H,k)}$ ugyanezt jelenti handoverrel érkezett kapcsolatok esetére.

A rendszer érvényes állapotai azon az \underline{n} -ek, amelyekre:

$$\begin{aligned} \underline{n}^{(N,k)} \cdot \underline{r}^{(N,k)} &\leq C_{k,N}, & \underline{n}^{(H,k)} \cdot \underline{r}^{(H,k)} &\leq C_{k,H}, & k &= 1, \dots, K \\ \sum_{k=1}^K \underline{n}^{(N,k)} \cdot \underline{r}^{(N,k)} + \sum_{k=1}^K \underline{n}^{(H,k)} \cdot \underline{r}^{(H,k)} &\leq C_0 \end{aligned} \quad (16)$$

igaz.

A handoverrel érkező és a cellában újonnan generált kapcsolatok érkezési intenzitása sorrendben λ_H and λ_N , annak valószínűsége, hogy egy érkező kapcsolat k típusú α_k . Ha a k típusra az első beengedés szabályozási eljárást alkalmazzuk, akkor az állapotátmeneti intenzitások a következők:

- új kapcsolat érkezéséből eredő állapotátmenet: ez az esemény átmenetet eredményez $\underline{n}^{(N,k)}$ állapotból $\underline{n}^{(N,k)} + \underline{e}_i$ -ba, $\lambda_N \cdot \alpha_k \cdot s_i^{(N,k)}$ intenzitással, ahol \underline{e}_i a k típusú fázis típusú kiszolgálási idő fázisainak számával megegyező elemszámú vektor, csupa 0 elemekkel és az i -ik pozícióban 1;
- állapotátmenet handover kapcsolat érkezése miatt: ennek eredménye egy átmenet $\underline{n}^{(H,k)}$ állapotból $\underline{n}^{(H,k)} + \underline{e}_i$ -be $\lambda_H \cdot \alpha_k \cdot s_i^{(H,k)}$ intenzitással;
- állapotátmenet kapcsolat megszűnése miatt (eredhet a kapcsolat megszűnéséből vagy ki felé irányuló handoverből): ez az esemény átmenetet eredményez $\underline{n}^{(N,k)}$ állapotból $\underline{n}^{(N,k)} -$

\underline{e}_i -ba $n_i^{(N,k)} \cdot S_i^{(N,k,0)}$ intenzitással, ahol $\underline{S}^{(N,k,0)}$ vektor tartalmazza a k típusú kiszolgálási idő befolyezési;

- állapotátmenet a kiszolgálási idő fázisának változása miatt: ennek eredménye egy átmenet $\underline{n}^{(N,k)}$ állapotból $\underline{n}^{(N,k)} - \underline{e}_i + \underline{e}_j$ -ba $n_i^{(N,k)} \cdot S_{ij}^{(N,k)}$ intenzitással.

Amennyiben a második beengedés szabályozási eljárás működik, feltételezve hogy a kiszolgálási idő i fázisához tartozik a legnagyobb, még beengedhető átviteli sebesség, az érkezésekből adódó állapotátmenetek változnak, azaz:

- egy érkező újonnan generált, vagy handover kapcsolat az $\underline{n}^{(N,k)}$ or $\underline{n}^{(H,k)}$ állapotból $\underline{n}^{(N,k)} + \underline{e}_i$ or $\underline{n}^{(H,k)} + \underline{e}_i$ állapotba történő átmenetet eredményez, melynek intenzitása:

$$\lambda_N \cdot \alpha_k \cdot \sum_{l=0}^{N_Q^{(k)} - \left\lfloor \frac{j}{N_Q^{(k)}} \right\rfloor - 1} S_{i+l \cdot N_D^{(R,k)} \cdot N_L^{(k)}}^{(N,k)} \quad \text{and} \quad \lambda_H \cdot \alpha_k \cdot \sum_{l=0}^{N_Q^{(k)} - \left\lfloor \frac{j}{N_Q^{(k)}} \right\rfloor - 1} S_{i+l \cdot N_D^{(k)} \cdot N_L^{(R,k)}}^{(H,k)}$$

1.4 Tézis

Megmutattam, hogy az állapotér blokkolás mentes részében a következő lokális egyensúlyi egyenletek érvényesek:

$$\lambda_N \alpha_k s_i p(\underline{n}^*) + \sum_{j=1, j \neq i}^P (n_j^* + 1) S_{ji} \cdot p(\underline{n}^* + \underline{e}_j) = (n_i^* + 1) \cdot p(\underline{n}^* + \underline{e}_i) \left(S_i^0 + \sum_{j=1, j \neq i}^P S_{ij} \right). \quad (17)$$

Erre alapozva kidolgoztam a Kaufman-Roberts rekurzív eljárás módosított változatát a $p(m)$ csatornafoglalási valószínűségek kiszámítására. Ennek formája: $\tilde{p}(m) = 0$ ha $m < 0$, $\tilde{p}(0) = 1$, és $m > 0$ esetén

$$\tilde{p}(m) = \sum_{k=1}^K \sum_i \tilde{p}(m - r_i^{(k)}) \frac{r_i^{(k)}}{m} F_i^{(k),N}(m - r_i^{(k)}) + \tilde{p}(m - r_i^{(k)}) \frac{r_i^{(k)}}{m} F_i^{(k),H}(m - r_i^{(k)})$$

és

$$p(m) = \tilde{p}(m) \frac{1}{\sum_{m=0}^{C_0} \tilde{p}(m)}. \quad (18)$$

Ezt az algoritmust használtam a modellezett rendszer kapcsolat szintű teljesítményjellemzőinek kiszámításához. Az analízis eredményeit szimulációs eredményekkel összehasonlítva azt megmutattam, hogy a közelítő megoldás pontossága megfelelő. \diamond

A disszertációban megmutatom, hogy a blokkolás mentes állapottér részben a következő lokális egyensúlyi egyenletek érvényesek:

$$\begin{aligned} \lambda_N \alpha_k s_i p(\underline{n}^*) + \sum_{j=1, j \neq i}^P (n_j^* + 1) S_{ji} \cdot p(\underline{n}^* + \underline{e}_j) = \\ (n_i^* + 1) \cdot p(\underline{n}^* + \underline{e}_i) \left(S_i^0 + \sum_{j=1, j \neq i}^P S_{ij} \right). \end{aligned} \quad (19)$$

Ebből kiindulva az egymással szomszédos állapotok egyensúlyi valószínűségei közti összefüggés a következő vektorban írható fel:

$$\underline{F} = -\lambda_N \alpha_k \underline{s} \mathbf{S}^{-1}. \quad (20)$$

Ez azt jelenti, hogy az \underline{n}^* állapot egyensúlyi valószínűsége rekurzívan számítható a $\underline{0}$ állapotból, a következő szorzat alakú egyensúlyi valószínűséget eredményezve:

$$p(\underline{n}^*) = p(\underline{0}) \cdot \prod_{i=1}^P F_i^{n_i^*} \cdot \frac{1}{n_i^*!}. \quad (21)$$

A disszertációban bemutatásra került, hogy amennyiben a rendszer az állapottér blokkolós részében tartózkodik, ez úgy tekinthető, mintha megváltozna a kiszolgálási idő eloszlása (fázisainak száma), azaz egy k típusú újonnan generált kapcsolat kiszolgálási ideje, ha az első beengedés szabályozási módszert alkalmazzuk és összesen x kapacitás fogalt a következőképpen változik:

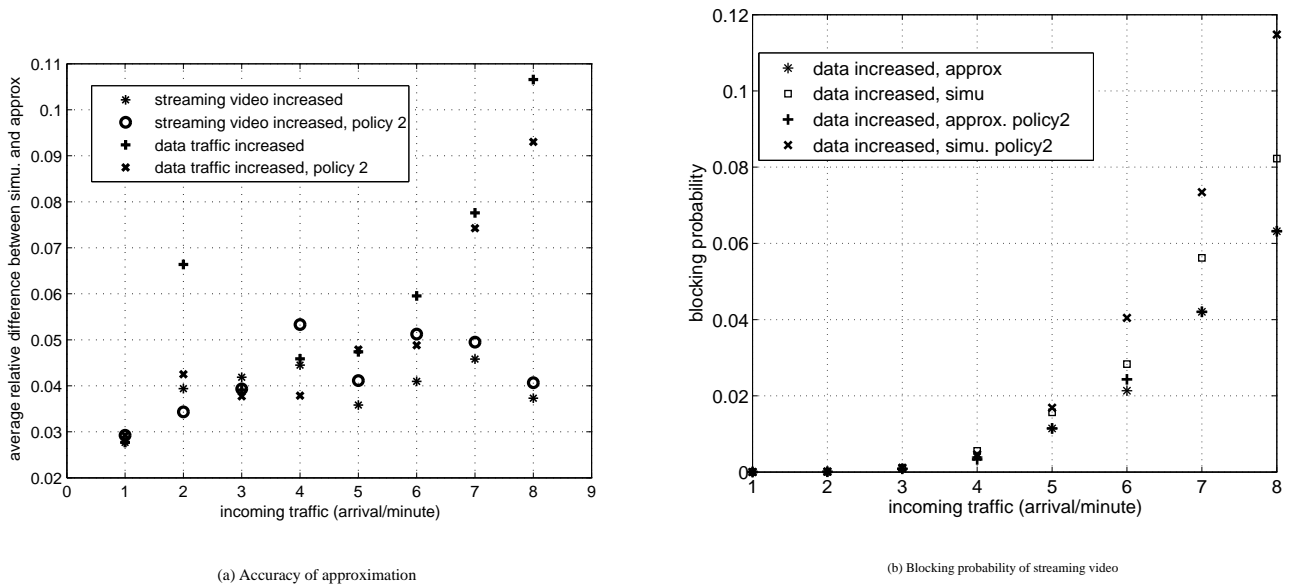
$$\mathbf{S}_{ij}^{(k)}(x) = 0, \quad s_j^{(k),N}(x) = 0, \quad \forall j : r_j^{(k)} > C_{k,N} - x. \quad (22)$$

Amennyiben a második beengedési szabályt alkalmazzuk, a kiszolgálási idő generátor mátrixa ugyanúgy változik, mint az előző esetben. Ha $r_i^{(k)}$ jelöli a legnagyobb olyan átviteli sebességet, amelyre $r_i^{(k)} \leq C_{k,N} - x$, a kezdeti valószínűség vektor változik:

$$s_i^{(k),N}(x) = \sum_{j: r_j^{(k)} > C_{k,N} - x} s_j^{(k),N} + s_i^{(k),N}, \quad (23)$$

ahol $s_j^{(k),N}$ jelenti az eredeti kezdeti valószínűség vektor j -edik elemét. Így a (20) szerinti, szorzófaktorokat tartalmazó vektor a következő, terheléstől függő formát kapja (ezúttal k típusú, újonnan generált kapcsolatokra):

$$\underline{F}^{(k),N}(x) = -\lambda_N \cdot \alpha_k \cdot \underline{s}^{(k),N}(x) (\mathbf{S}^{(k)}(x))^{-1}. \quad (24)$$



2. ábra. A közelítő módszer pontossága (bal oldal) és streaming video kapcsolatok blokkolási valószínűsége (jobbra)

Ezt használva, Kaufman [12] és Roberts [19] ötletéből kiindulva annak valószínűsége, hogy m egység kapacitás foglalt a rendszerben ($p(m)$), a következő rekurzióval számítható: először $\tilde{p}(m)$ számítandó, úgy, hogy $\tilde{p}(m) = 0$ $m < 0$ esetén, $\tilde{p}(0) = 1$, és $m > 0$ esetén:

$$\tilde{p}(m) = \sum_{k=1}^K \sum_i \tilde{p}(m - r_i^{(k)}) \frac{r_i^{(k)}}{m} F_i^{(k),N}(m - r_i^{(k)}) + \tilde{p}(m - r_i^{(k)}) \frac{r_i^{(k)}}{m} F_i^{(k),H}(m - r_i^{(k)})$$

és innen normalizálással

$$p(m) = \tilde{p}(m) \frac{1}{\sum_{m=0}^{C_0} \tilde{p}(m)}. \quad (25)$$

Az 2 ábra néhány numerikus eredményt mutat be, amelyek egyrészt a kidolgozott közelítő eljárással, másrészt szimulációval kerültek kiszámításra. A bal oldali diagramm a módszer pontosságát mutatja, amelynek mértéke a foglaltsági valószínűségek eltéréseinek (a szimulációs eredményekhez képest) a szimulációs eredményekhez viszonyított aránya átlagolva. Láthatóan az eltérések átlaga nagyrészt 5% alatt marad, csak a túlterhelést okozó nagy forgalom esetén csökken a pontosság. A jobboldali grafikon egy, a disszertációban részletesen bemutatott, többféle szolgáltatás jelenlétében vizsgált UMTS rádiós interfész vizsgálatának eredménye. Az ábrán a streaming video kapcsolatok blokkolási valószínűsége látható a rádiós interfész terheltségének függvényében.

4.2. 2. Téziscsoport: Cellaváltás során érkező kapcsolatok hátralévő kapcsolattartási ideje [C6][C7]

Ez a téziscsoport foglalkozik azzal a számítási módszerrel, amelynek segítségével meghatározható egy mobil rendszerben egy adott cellába cellaváltás (handover) után érkező kapcsolatok hátralévő élettartamának eloszlása.

2.1 Tézis

Kidolgoztam egy általános módszert, amellyel egy rádiós cellába hívásátadással érkező felhasználók adatátviteli viszonyának hátralévő tartási idő eloszlása meghatározható. Megmutattam, hogy a $g(t)$ sűrűségfüggvényű cellaidővel, $g_R(t)$ sűrűségfüggvényű maradék cellaidővel, valamint $F(t)$ eloszlásfüggvényű adatátviteli viszony tartási idővel jellemzett felhasználók hátralévő kapcsolattartási ideje a cellába érkezés után

$$F_R(t) = \sum_{i=1}^I p^{(i)} \cdot F_R^{(i)}(t), \quad (26)$$

ahol

$$F_R^{(i)}(t) = \frac{\int_0^\infty (F(t+x) - F(x))g^{(i)}(x)dx}{\int_0^\infty (1 - F(x))g^{(i)}(x)dx}, \quad (27)$$

és

$$g^{(i)}(x) = g_R(x) * g(x) * \dots * g(x). \quad (28)$$

és

$$p^{(i)} = \frac{N_{HO}^{(i)}}{N_{HO}} = \frac{\sum_{k:H(k,1) \leq i} B_k \cdot \Pr(\tau_S > \tau^{(i)}) \cdot \sum_{all \underline{r}^{(i)}(k)} Pr(\underline{r}^{(i)}(k))}{\sum_{j=1}^I \sum_{k:H(k,1) \leq j} B_k \cdot \Pr(\tau_S > \tau^{(j)}) \cdot \sum_{all \underline{r}^{(j)}(k)} Pr(\underline{r}^{(j)}(k))} = \frac{\hat{p}^{(i)}}{\sum_{j=1}^I \hat{p}^{(j)}}. \quad (29)$$

A számítási módszer érvényességét szimulációkkal igazoltam.◊

A probléma, amelyre ebben a tézisen választ adok ritkán vizsgált az irodalomban (pl. [14][15]). A módszer általánosan alkalmazható cellás rendszerekben. Feltételezzük, hogy annak a valószínűsége elhanyagolható, hogy egy előfizető több mint I handover-t kezdeményez egy átvitel alatt. A mobilok cellák közti mozgását egy cellaváltási valószínűség mátrix Π írja le, azaz egy előfizető Π_{kl} valószínűséggel az l cellába lép miután elhagyta k -t. Természetesen ebben a mátrixban

a nem szomszédos cellákhoz tartozó bejegyzések értéke 0. Még egy paraméter szükséges, a kapcsolat kezdeményezési valószínűség vektor (\underline{B}), ami a vizsgált területet jellemzi. A vektor B_i elemének jelentése az, hogy ha egy új kapcsolat felépítése történik a területen, ez ilyen valószínűséggel az i cellában keletkezik. Egy adott mobilitási és forgalmi osztályba tartozó előfizetők a kapcsolattartási idő, a cellában tartózkodási idő és a hátralévő cellában tartózkodási idő eloszlásokkal jellemeztek. Ezek eloszlás és sűrűségfüggvényei sorrendben $F(x)$, $f(x)$, $G(x)$, $g(x)$ és $G_R(x)$, $g_R(x)$. Jelöljük $i - 1$ cellában tartózkodási idő és egy hátralévő cellában tartózkodási idő összegét $\tau^{(i)}$ -val, sűrűségfüggvényét pedig $g^{(i)}(x)$ -vel. Ezután, a mobil hátralévő kapcsolattartási idejének eloszlásfüggvénye, feltéve hogy az érkezéskor az i -edik hívásátadás történt:

$$F_R^{(i)}(t) = \frac{\int_0^\infty (F(t+x) - F(x))g^{(i)}(x)dx}{\int_0^\infty (1 - F(x))g^{(i)}(x)dx}. \quad (30)$$

Ezután a hátralévő élettartam eloszlása

$$F_R(t) = \sum_{i=1}^I p^{(i)} \cdot F_R^{(i)}(t), \quad (31)$$

ahol $p^{(i)}$ jelöli annak valószínűségét, hogy az éppen történő handover az i -edik a kapcsolat élettartama alatt. Általános cellában tartózkodási időket feltételezve alapvetően két lehetőség van a (30)-ban szereplő $g^{(i)}(x)$ meghatározására. Az egyik lehetőség $i - 1$ cellában tartózkodási idő és egy hátralévő cellában tartózkodási idő sűrűségfüggvény konvolúciója, azaz

$$g^{(i)}(x) = g_R(x) * g(x) * \dots * g(x). \quad (32)$$

A másik lehetőség a kérdéses eloszlások sűrűségfüggvényének Laplace transzformációja ($G_R(s)$ és $G(s)$ meghatározása), majd ezek megfelelő számú szorzatából adódó eredmény inverz Laplace transzformációja:

$$g^{(i)}(x) = \mathcal{L}^{-1} \{G_R(s) \cdot G(s)^{i-1}\}. \quad (33)$$

A disszertációban megmutatom, hogy a (31)-ben szereplő $p^{(i)}$ a következőképpen számítható

$$p^{(i)} = \frac{N_{HO}^{(i)}}{N_{HO}} = \frac{\sum_{k:H(k,1) \leq i} B_k \cdot \Pr(\tau_S > \tau^{(i)}) \cdot \sum_{all \underline{r}^{(i)}(k)} Pr(\underline{r}^{(i)}(k))}{\sum_{j=1}^I \sum_{k:H(k,1) \leq j} B_k \cdot \Pr(\tau_S > \tau^{(j)}) \cdot \sum_{all \underline{r}^{(j)}(k)} Pr(\underline{r}^{(j)}(k))} = \frac{\hat{p}^{(i)}}{\sum_{j=1}^I \hat{p}^{(j)}}, \quad (34)$$

ahol $N_{HO}^{(i)}$ jelöli azon kapcsolatok számát amelyek az i -dik handover után érkeznek a vizsgált cellába az összes N_{HO} számú handoverből, $H(k, l)$ a minimális számú handover ami ahhoz szükséges, hogy egy mobil elérje l cellát k -ból, $\underline{r}^{(i)}(k)$ jelöl egy i hosszúságú (i cellaváltással járó) útvonalat k -ból a vizsgált cellába és $\Pr(\underline{r}^{(i)}(k))$ egy ilyen út valószínűsége.

2.2 Tézis

Kidolgoztam a hátralévő kapcsolattartási idő meghatározásának módszerét abban az esetben, ha a felhasznált leíró idők eloszlása fázis típusú, vagy ilyen eloszlással közelített. Megmutattam, hogy fázis típusú kapcsolattartási idő esetén a hátralévő idő eloszlása is fázis típusú ugyanolyan fázis struktúrával, csak az eloszlás kezdeti valószínűség vektora változik a következők szerint

$$\underline{l}_R^{(i)} = \frac{\int_0^\infty \underline{l} \cdot e^{Lx} \cdot g^{(i)}(x) dx}{\int_0^\infty \underline{l} \cdot e^{Lx} \cdot \underline{h} \cdot g^{(i)}(x) dx} \quad (35)$$

Szimulációk használatával megmutattam, hogy a fázis típusú közelítés megfelelő pontosságú a végeredmény szempontjából.◇

Jelöljük a fázis típusú eloszlással rendelkező kapcsolattartási idő paramétereit \underline{l} , L and \underline{l}^0 -val. A fázis típusú eloszlásfüggvény kifejezését (30)-be helyettesítve a következő összefüggés adódik:

$$F_R^{(i)}(t) = \frac{\int_0^\infty \underline{l} \cdot e^{Lx} \cdot \underline{h} \cdot g^{(i)}(x) dx - \int_0^\infty \underline{l} e^{L(t+x)} \cdot \underline{h} \cdot g^{(i)}(x) dx}{\int_0^\infty \underline{l} \cdot e^{Lx} \cdot \underline{h} \cdot g^{(i)}(x) dx} =$$

$$1 - \frac{\int_0^\infty \underline{l} \cdot e^{Lx} \cdot g^{(i)}(x) dx \cdot e^{Lt} \cdot \underline{h}}{\int_0^\infty \underline{l} \cdot e^{Lx} \cdot \underline{h} \cdot g^{(i)}(x) dx} \quad (36)$$

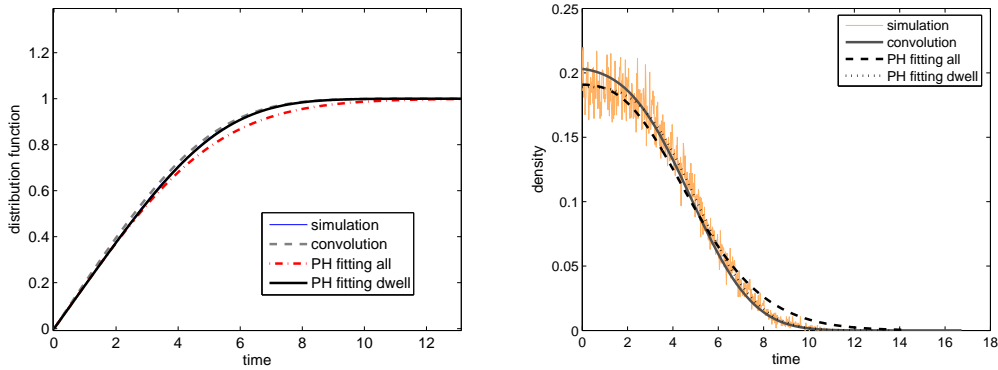
Összehasonlítva ezt a fázis típusú eloszlások jellemzőivel (3) alapján, látható, hogy az eredményül kapott eloszlás szintén fázis típusú, olyan fázis struktúrával, mint az eredeti kapcsolattartási idő eloszlás, de a kezdeti valószínűség vektor változik. Ha az i -dik handover után érkező csatlakozások hátralévő élettartam eloszlásának kezdeti valószínűség vektorát $\underline{l}_R^{(i)}$ -val jelöljük, ennek kifejezése

$$\underline{l}_R^{(i)} = \frac{\int_0^\infty \underline{l} \cdot e^{Lx} \cdot g^{(i)}(x) dx}{\int_0^\infty \underline{l} \cdot e^{Lx} \cdot \underline{h} \cdot g^{(i)}(x) dx} \quad (37)$$

Az 3 ábra egy numerikus eredményt mutat be a felvázolt számítási lehetőségek közül a többszörös konvolúcióval, minden véletlen idő eloszlásának fázis típusú közelítésével, illetve a cellában tartózkodási idő fázis típusú közelítésével számítva. Az ábrán szimulációból nyert tapasztalati eloszlás- és sűrűségfüggvény is látható, igazolva a módszer helyességét.

2.3 Tézis

Két speciális, de gyakorlati jelentőségű esetet vizsgáltam, a homogén cellastruktúra, illetve



3. ábra. A hátralévő kapcsolattartási idő eloszlásfüggvénye (bal oldalt) és sűrűségfüggvénye (jobb oldalt) különböző módszerekkel számítva

az autópályát lefedő cellastruktúra környezetet. Megmutattam, hogy a hátralévő kapcsolattartási idő eloszlása a két esetben azonos.◊

A disszertációban megmutatom, hogy mindkét esetben a (34)-ben szereplő $\hat{p}^{(i)}$ kifejezése:

$$\hat{p}^{(i)} = B \cdot P_0 \cdot Pr(\tau_S > \tau^{(i)}) + B \cdot (1 - P_0) \cdot Pr(\tau_S > \tau^{(i)}) = B \cdot Pr(\tau_S > \tau^{(i)}) \quad (38)$$

minden $i \leq I$ esetén, ahol $\hat{p}^{(i)}$ jelöli annak relatív valószínűségét, hogy a kapcsolat éppen az i -edik cellaváltását kezdeményezi a cellába érkezéskor. Behelyettesítve (34)-ba a következőt kapjuk:

$$p^{(i)} = \frac{Pr(\tau_S > \tau^{(i)})}{\sum_{j=1}^I Pr(\tau_S > \tau^{(j)})}. \quad (39)$$

4.3. 3. Téziscsoport: 3G rendszerek kapacitása és teljesítőképessége [C12][T1][T2][T3]

3.1 Tézis

Bevezetem az UMTS rádiós cella átlagos hasznos kapacitásának számítási módszerét, amely

$$\bar{R}_{\text{UMTS}} = N \cdot \sum_{k=1}^K n_k \cdot Rb_k, \quad (40)$$

ahol N az ütemezett rádiós kapcsolatok (hordozók) átlagos száma, n_k a k típusú kapcsolatok aránya, Rb_k a k típusú hordozó hasznos bitsebessége. A kapacitás kiszámításához meghatáro-

zandó

$$N = \frac{P_{\text{avg}}^0 - P_{\text{Pil}}^0}{\sum_{k=1}^K n_k \cdot \overline{P}_k^0}, \quad (41)$$

ahol P_{avg}^0 az átviteli célra sugárzott átlagos adóteljesítmény, P_{Pil}^0 a vezérlőcsatornák teljesítménye és \overline{P}_k^0 k típusú rádiós hordozószolgáltatás kiszolgálásához szükséges adóteljesítmény várható értéke. Ez utóbbi kiszámításának módja:

$$\overline{P}_k^0 = \varepsilon_k \cdot \frac{Rb_k}{Rc} \cdot \left((1 - \overline{\rho}_k) \cdot P_{\text{avg}}^0 + \sum_{b \neq 0} P_{\text{avg}}^b \cdot \overline{f}_k^b + \overline{\eta}_k \right), \quad (42)$$

ahol ε_k a hordozó által igényelt jel-interferencia-zaj viszony SINR (Signal to Interference Noise Ratio), R_c a rendszer chipsebessége, $\overline{\rho}_k$ az átlagos ortogonalitási faktor, P_{avg}^0 és P_{avg}^b a kiszolgáló és a b -ik szomszéd cella átlagos adóteljesítménye, \overline{f}_k^b és $\overline{\eta}_k$ a szakaszcsillapítások, illetve a relatív zajteljesítmény átlaga. Az adódó kapacitás eredményeket pillanatkép szimulációk eredményével összehasonlítva igazoltam a számítási módszer helyességét. \diamond

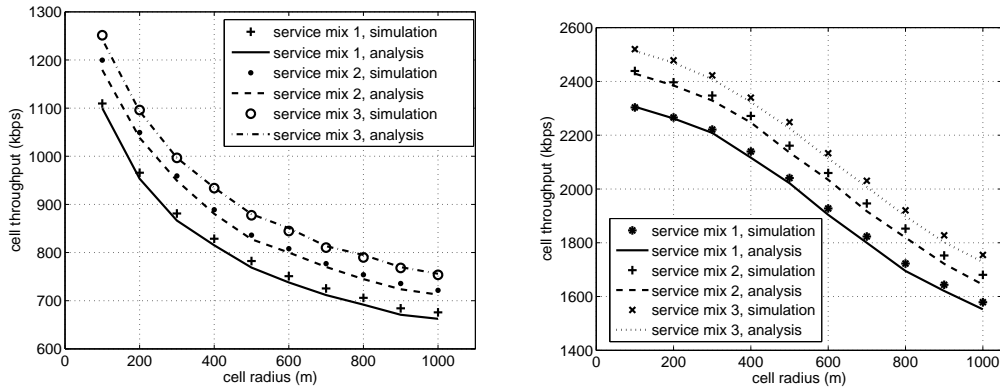
Az UMTS rádiós interfészét elemző korábbi munkák hátránya, hogy nem modellezzik a többféle rádiós hordozó szolgáltatás egyidejű jelenlétét (pl. [9][21]), vagy a feltöltési irány működésére fókuszálnak (pl. [8][22]) és a rendszert a túlterhelési valószínűség szempontjából vizsgálják (pl. [6][24]). Az én megközelitésem az volt, hogy az UMTS rendszer rádiós cellájának átlagos hasznos átvitelét (átlagos kapacitását) jellemezzem.

Az átlagos kapacitás meghatározásához az alapvető jel-interferencia viszony egyenletekből kell kiindulni (pl. [21]), amelyek formája az i -edik előfizetőre

$$P_i^0(r_i, \phi_i) = \varepsilon_i \cdot \frac{Rb_i}{Rc} \cdot \left((1 - \rho(r_i)) \cdot \left(P_{\text{Pil}}^0 + \sum_j P_j^0(r_j, \phi_j) \right) + \sum_{b \neq 0} P_{\text{inst}}^b \cdot \frac{L^b(r_i, \phi_i)}{L^0(r_i)} + \eta_i \right), \quad (43)$$

ahol $P_i^0(r_i, \phi_i)$ az (r_i, ϕ_i) pozícióban tartózkodó felhasználó számára sugárzott teljesítmény, ε_i az igényelt SINR (Signal to Interference Noise Ratio, jel-interferencia-zaj viszony), Rb_i a kapcsolat hasznos átviteli sebessége. R_c a rendszer chipsebessége, $\rho(r_i)$ a távolságfüggő ortogonalitási faktor, P_{Pil}^0 a közös vezérlőcsatornák teljesítménye, P_{inst}^b a b -edik szomszédos cella pillanatnyi teljesítménye, $L^b(r_i, \phi_i)$ a b -edik állomás és az előfizető közti csatornacsillapítás, $L^0(r_i)$ a kiszolgáló állomás és a felhasználó közti csatornacsillapítás és η_i a relatív zajteljesítmény.

A tézisben szereplő (42) egyenlet a (43) várható értékének képzésével, valamint tetszőleges k hordozószolgáltatásra való kifejezésével adódik.



4. ábra. Átlagos cellaátvitel egyenletes eloszlású előfizetők (bal oldal) és hotspot környezetben (jobb oldal)

Az $\overline{f_k^b}$ és az $\overline{\eta_k}$ kifejezések az átlagos csatornacillapítási arányokat és átlagos relatív zajteljesítményt jelölik, (43) alapján. A disszertációban ezen tényezőkre analitikus összefüggést adok meg, néhány speciális esetben. Megjegyzendő, hogy a cella kapacitását ezen átlagos jellemzőkön keresztül az előfizetők elhelyezkedésének síkbeli eloszlása nagyban befolyásolja.

Az 4 ábra betekintést nyújt a felhasználói eloszlás átlagos cellaátvitelre gyakorolt hatásába. A bal oldali görbén az átlagos cella kapacitás látható a cellaméret függvényében, egyenletes eloszlás szerint elhelyezkedő előfizetők esetére, míg a jobb oldali diagrammon ugyanez látható "hotspot" környezetben, amikor a terminálok a bázisállomás közelében, kétdimenziós normális eloszlásnak megfelelően helyezkednek el. Jól látható, hogy az utóbbi eset az átlagos cellaátvitel jelentős növekedését eredményezi. Leolvasható továbbá az ábráról, hogy a szimulációs eredmények a módszer érvényességét igazolják. A disszertációban numerikusan is megmutattam, hogy a számítási módszer eredményei megfelelő pontosságúak.

3.2 Tézis

Kidolgoztam egy módszert az UMTS bázisállomás által használt átlagos adóteljesítmény meghatározására, adott átlagos forgalom esetén. A módszer a következő:

$$N = \frac{\overline{R}_{UMTS}}{\sum_{k=1}^K n_k \cdot Rb_k}, \quad (44)$$

ahol \bar{R}_{UMTS} az átlagos hasznos forgalom adott értéke. Ezután a következő

$$\bar{P}_k^0 = \varepsilon_k \cdot \frac{Rb_k}{Rc} \cdot \left((1 - \bar{\rho}_k) \cdot (N \cdot \sum_{l=1}^K n_l \bar{P}_l^0 + P_{\text{Pil}}^0) + \sum_{b \neq 0} P_{\text{avg}}^b \cdot \bar{f}_k^b + \bar{\eta}_k \right). \quad (45)$$

lineáris egyenletrendszerrel kell megoldani minden \bar{P}_k -ra. Az átlagos felhasznált teljesítmény ezután

$$P_{\text{avg}}^0 = N \cdot \sum_{k=1}^K n_k \cdot \bar{P}_k^0 + P_{\text{Pil}}^0. \quad (46)$$

Kidolgoztam egy iteratív eljárást az átlagos teljesítményszint meghatározására abban az esetben, ha a szomszédos, interferáló bázisállomások a vizsgált állomással azonos mennyiségű forgalmat szállítanak. A módszer a következő lépésekből áll:

- 0. lépés: Tetszőleges, a lehetséges maximális teljesítménynél kisebb interferáló teljesítmény értékek feltételezése a kiinduláshoz.
- 1. lépés: Az adott interferáló teljesítmény értékekkel (45) megoldása. A vizsgált bázisállomás teljesítményének meghatározása (46) alapján.
- 3. lépés: Az adódó teljesítményérték használata az interferáló bázisállomások teljesítményeként. Az 1. és 2. lépés ismétlése a konvergencia eléréséig.

◇

Ezen tézisállítás leírja, hogy hogyan lehet kiszámolni az UMTS rádiós interfészen felhasznált adóteljesítmény nagyságát, amennyiben a szállított forgalom ismert. Ez a teljesítmény nagyon fontos, illetve a következő tézisben szükséges, mint bemenő paraméter: ugyanis amennyiben a HSDPA kapacitását akarjuk meghatározni úgy, hogy a hagyományos Release'99 UMTS forgalom mennyisége adott, ezen teljesítmény ismerete szükséges (a HSDPA csak a maradék teljesítményt használhatja). Emiatt az átlagos felhasznált adóteljesítmény mennyiségének nagy jelentősége van 3G cellás hálózatok tervezése, értékelése szempontjából.

A tézis első része azzal az esettel foglalkozik, amikor feltételezzük, hogy a szomszédos cellák kisugárzott teljesítménye ismert, így az interferencia meghatározható. Ilyenkor alapvetően az \bar{R}_{UMTS} átlagos forgalmat szállító bázisállomás felhasznált teljesítménye egy, a 3.1 tézisben megfogalmazottakhoz képest képest fordított irányú számítással meghatározható. Ugyanis ebben az esetben az átlagos ütemezett kapcsolatok (rádiós hordozók) száma, N használható (40)-ből. A

(45) egyenletrendszer a (42) egyenlet módosított változata, amely explicit módon tartalmazza minden l típusú rádiós hordozó igényelt adóteljesítményét. A szükséges átlagos teljesítmény végül (46)-ból adódik.

A tézis második része arra szolgáltat megoldást, ha a szomszédos cellák adóteljesítménye nem ismert. Fontos és valóságos szituáció azonban, amikor a szomszédos bázisállomásokról azt feltételezzük, hogy a vizsgált állomással azonos mértékű forgalmat bonyolítanak. Ha ebben az esetben szeretnénk kiszámolni a felhasznált teljesítményt, avval a problémával szembesülünk, hogy az interferáló Node B-k teljesítménye a (45) egyenletekben szerepel, de az értéke nem ismert, csak az egyenletek megoldása után. Egyszerűsítve, a teljesítmény meghatározásához a teljesítményt kellene ismerni, ez motiválta a tézisben megfogalmazott iteratív módszert.

Az iteráció konvergál, amikor a kiszámított teljesítményszint már nem változik (jelentősen) az egyes iterációk során. Kézenfekvő a módszer kiterjesztése arra az esetre, ha a szomszédos cellák nem azonos forgalmat szállítanak. ebben az esetben a felhasznált adóteljesítmény számítását egyesével az összes vizsgált cellára el kell végezni, a következő cellában pedig interferenciaként az előző cellára kapott értéket használni. Ez az iteráció folytatódik minden cellára, amíg minden teljesítményérték konvergálni nem kezd.

3.3 Tézis

Kidolgoztam egy módszert a HSDPA szolgáltatás hasznos átviteli sebességének és teljes cellára értelmezett átlagos kapacitásának meghatározására. A módszer a következő. Az SINRt meghatározza

$$\text{SIR}_{\text{HS}}(r, \phi) = 16 \cdot \frac{P_{\text{HS}}^0 \cdot L_i^0(r, \phi)}{(1 - \rho(r)) \cdot P_{\text{inst}}^0 \cdot L_i^0(r, \phi) + \sum_{b \neq 0} P_{\text{inst}}^b \cdot L_i^b(r, \phi) + P_{\text{noise}}}, \quad (47)$$

ahol P_{HS}^0 a HSDPA átvitel számára allokkált teljesítmény (a Release'99 UMTS szolgáltatások által fel nem használt teljesítmény), P_{noise} a zajteljesítmény, a további mennyiségek pedig megegyeznek a 3.1 és 3.2 tézisben ismertettekkel. Feltételezzük, hogy a SINR leképezhető az $R_i(r, \phi)$ hasznos átviteli sebességre. Ekkor egy i kategóriájú HSDPA terminál által elérhető átlagos sebesség:

$$R_i = \int_{r=0}^R \int_{\phi=0}^{2\pi} R_i(r, \phi) g_{\text{HS}}(r, \phi) d\phi dr, \quad (48)$$

ahol $g_{\text{HS}}(r, \phi)$ a HSDPA előfizetők síkbeli eloszlásának sűrűségfüggvénye. Az átlagos HSDPA kapacitás

$$R_{\text{HSDPA}} = \sum_{i=1}^{12} R_i \cdot \alpha_i, \quad (49)$$

ahol α_i az i kategóriájú HSDPA készülékek aránya az összes készülékek között.

A HSDPA teljesítőképességével foglalkozó munkák jelentős része szimulációkon alapul, amelyek jól leírt rendszeregyenletekből indulnak ki [3][18]. Ezen kívül néhány analitikus, vagy kombinált analitikus/szimulációs megközelítés is található az irodalomban, ezek azonban néhány fontos rendszerparamétert nem vesznek figyelembe (pl. [13][2]). A célom az volt, hogy egy valószínűségi, a fontos leírásokat is tartalmazó analitikus módszer születessen, amellyel a HSDPA átlagos átviteli képessége jól jellemezhető.

Egy olyan 3G vivő, amelyen HSDPA szolgáltatás működik, átlagos kapacitásának meghatározásához az alapvető, HSDPA csatornára felírt (47) szerinti jel-interferencia viszony egyenletet a kiindulási pont. A disszertációban bemutatásra kerül, hogyan lehet a tapasztalt jel-interferencia viszonyt leképezni használható transzport formátummá, ami meghatározza az elérhető átviteli sebességet:

$$\text{SIR}_i(r, \phi) \Rightarrow \text{CQI}_i(r, \phi) \Rightarrow R_i(r, \phi), \quad (50)$$

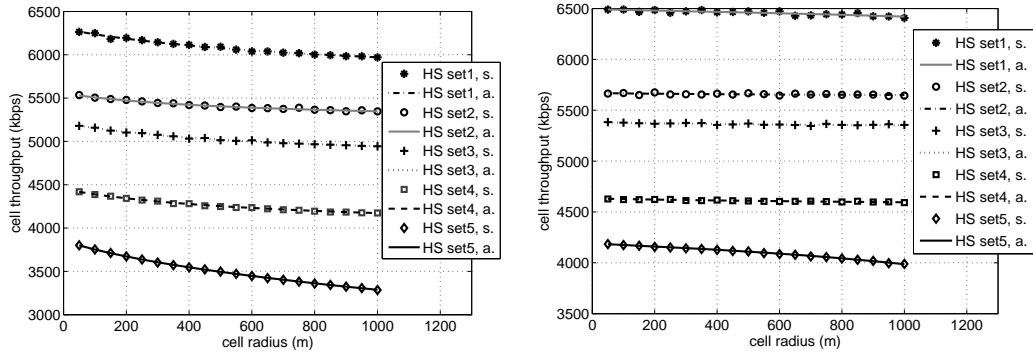
Feltételezzük, hogy a felhasználók térbeli eloszlása adott a cellát reprezentáló körön, ennek sűrűségfüggvényét $g_{\text{HS}}(r, \phi)$ -vel jelölöm. Az i kategóriájú HSDPA terminálokkal a cellában elérhető átlagos átvitel ekkor (48) szerint számítható.

Az eredeti HSDPA szabvány 12 készülékkategóriát ír le, melyek képességeikben és ezáltal az általuk elérhető legnagyobb bitsebességben különböznek. Feltételezhetjük, hogy a különböző kategóriák aránya ismert a HSDPA terminálok között, ennek jelölése α_i , $i \in [1..12]$ az i kategóriára. Ez az oka annak, hogy (49)-ben a készülék kategóriákra kell átlagolni.

A hagyományos UMTS és HSDPA szolgáltatások együttélése egy olyan probléma, amely ritkán jelenik meg a szakirodalomban. A két szolgáltatás azonos vivőfrekvencián való együttműködése a következőképpen írható le. Cél, hogy meghatározzuk a HSDPA átlagos kapacitását, adott Release'99 UMTS forgalom esetén. Feltételezzük, hogy az átlagos UMTS forgalom \bar{R}_{UMTS} ismert, ebből következik az ütemezett kapcsolatok átlagos száma N , (40)-nek megfelelően. A k típusú hordozók által használt átlagos teljesítmény a következő egyenletrendszer megoldásából adódik

$$\bar{P}_k^0 = \varepsilon_k \cdot \frac{Rb_k}{Rc} \cdot \left((1 - \bar{\rho}_k) \cdot (P_0^0) + \sum_{b \neq 0} P_{\text{avg}}^b \cdot \bar{f}_k^b + \bar{\eta}_k \right), \quad (51)$$

ahol P_0^0 a bázisállomás maximális kimenő teljesítménye (ez azért alkalmazható, mert a HSDPA kihasználja az állomás teljes maradék teljesítményét, így a rendszer mindig a teljes teljesítményt



5. ábra. Átlagos cellaátvitel egyenletes előfizetői eloszlás (bal oldal) és hotspot környezet (jobb oldal) esetén

használja). A HSDPA teljesítmény ezután az összteljesítmény felírásából következik:

$$\bar{P}_{HS}^0 = P_0^0 - N \cdot \sum_{k=1}^K n_k \cdot \bar{P}_k^0 - P_{Pil}^0. \quad (52)$$

Ennek használatával a HSDPA kapacitás (47), (48) és (49) alapján számítható.

Az 5 ábra a HSDPA szolgáltatás átlagos átvitelét mutatja a cellaméret függvényében, egyenletes, illetve kétdimenziós normális szerinti felhasználói eloszlás esetén, különböző mennyiségű HSDPA erőforrások esetén. Látható, hogy sem a cellaméret, sem a felhasználói eloszlás nem gyakorol nagyon radikális hatást az elérhető átlagos kapacitásra, ez azt jelenti, hogy a HSDPA szolgáltatás lehetővé teszi a hatékony és aktuális körülményektől többé-kevésbé független kapacitás tervezést.

A szerző publikációinak jegyzéke

Folyóiratban közölt publikációk

[J1] Fazekas P., Imre S., Telek M., "Performance evaluation of multimedia services in cellular networks", *Simulation-Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, Vol 78., Issue 4., pp 268-277, April 2002;

[J2] P. Fazekas, S. Imre and M. Telek, "Modeling and Analysis of Broadband Cellular Networks with Multimedia Connections", *Telecommunication Systems*, Vol 19., Issues 3-4, pp. 263-288, March-April 2002;

[J3] Fazekas Péter, "Mobicom '97 konferencia - az ATM és IP jegyében", *Magyar Távközlés*, VIII. évfolyam, 10. szám, 48-51. old., október, 1997;

[J4] P. Fazekas and S. Imre, "Traffic Analysis of Multimedia Services in Broadband Cellular Networks", *Lecture Notes in Computer Science 2093*, pp. 296-306, 2001, (Originally: *Proc. of Networking-ICN 2000*, Vol 1, Colmar, France, July 9-13, 2001)

[J5] Fazekas P., "Többvívős kódosztásos rendszerek", *Magyar Távközlés*, IX. évfolyam, 10. szám, 21-25. old., október, 1998;

[J6] Fazekas Péter, Imre Sándor, Pap László, Schulcz Róbert, Szabó Sándor, "3. generációs mobil rendszerek hívásengedélyezési módszerei", *Magyar Távközlés*, X. évfolyam, 1. szám, 18-21. old., január, 1999;

[J7] Fazekas Péter, Imre Sándor, Jeney Gábor, Pap László, Schulcz Róbert, Szabó Sándor, "Nagysebességű vezeték nélküli hálózatok - a közeljövő technológiái." *HÍRADÁSTECHNIKA LXIV: pp. 34-42. (2009)*

Könyvfejezetek

[B1] Péter Fazekas, "UMTS: 3rd Generation Cellular Mobile Radio System." *In: Katalin Tarnay, Gusztáv Adamis, Tibor Dulai (editors) Advanced Communication Protocol Technologies: Solutions, Methods, and Applications.* Hershey ; New York: IGI Global, Information Science Reference, 2011. pp. 134-154. (ISBN: ISBN 978-1-60960-732-6)

Nemzetközi és hazai konferencia publikációk

- [C1] P. Fazekas, L. Pap, S. Imre, "Joint Detection in Spread Spectrum Mobile Communication Systems", *Proc. of Poster '98 International Workshop on Scientific Electrical Engineering*, Prague, Czech Republic, May 27-29
- [C2] P. Fazekas, S. Imre, "Modeling a Virtual Connection Tree based mobile ATM network", *Proc. of the IEEE VTC'99 Fall*, pp. 539-544, Amsterdam, Netherlands, Sep 19-22, 1999
- [C3] P. Fazekas, "Support of Handover in Mobile ATM Networks", *Proc. of EUNICE'99 Fifth Open European Summer School*, pp. 107-112, Barcelona, Spain, Sep 1-3, 1999;
- [C4] P. Fazekas, S. Imre, M. Telek, "Analysis of broadband cellular networks with variable bit-rate connections", *Proc. of EUNICE 2000 Sixth Open European Summer School*, pp. 211-217, Enschede, The Netherlands, Sep. 13-15, 2000
- [C5] P. Fazekas, S. Imre: "Performance Evaluation of Cellular Networks with Multiple Multimedia Service Classes", *Proc of 6th International Conference on Telecommunications, CON-TEL2001*, pp. 159-167, Zagreb, Croatia, June 13-15, 2001
- [C6] P. Fazekas, L. Pap, "On the residual session length of multimedia connections in broadband cellular networks", *Proc. of IST Mobile & Wireless Telecommunications Summit*, pp. 217-221, Thessaloniki, Greece, June 17-19, 2002
- [C7] P. Fazekas, "Calculating the Session Length Distribution of Handover Customers in Multimedia Cellular Networks", *Proc. of IST 2005 International Symposium on Telecommunications*, vol. 2., pp. 767-772, Shiraz, Iran, September 10-12, 2005
- [C8] Lucio Ferreira, Jordi Perez-Romero, Velio Tralli, Peter Fazekas, Miquel Oliver, Stefan Lindskog, Ramón Agustí, "QoS Provision in Wireless Networks: Mobility, Security, and Radio Resource Management: An Overview.", Presented by Peter Fazekas, at *IEEE International Conference on Communications (ICC 2006)*, Istanbul, Turkey, June 11-15, 2006 (2006)
- [C9] Péter Fazekas, "Analysis of packet level QoS in wireless data networks." *3rd Symposium on Wireless Communication Systems, ISWCS 2006*, Valencia, Spain, 5-8 September, 2006
- [C10] Zoltán Faigl, Péter Fazekas, Stefan Lindskog, Anna Brunstrom, "Performance Analysis of IPsec in Mobile IPv6 Scenarios." *In: Proceedings of the 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit 2007*. Budapest, Magyarország, 2007.07.01-2007.07.05. pp. 1-5. Paper 4299278. (ISBN: 963-8111-66-6)
- [C11] Zoltán Faigl, Péter Fazekas, Stefan Lindskog, Anna Brunstrom, "Analytical Analysis of the Performance Overheads of IPsec in MIPv6 Scenarios." *In: Frigyes István, János Bitó, Péter*

- Bakki (editors.) Advances in Mobile and Wireless Communications: Views of the 16th IST Mobile and Wireless Communication Summit.* Berlin ; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. pp. 365-385. (Lecture Notes in Electrical Engineering; 16.) (ISBN: 978-3-540-79040-2)
- [C12] Fazekas Péter, "Achievable Cell throughput in 3G Systems." *In: Proc. of Eurosis ISC 2010 Conference.* Budapest, Magyarország, 2010.06.05-2010.06.07. pp. 203-208.
- [C13] Fazekas Péter, Jakab Tivadar, Sipos Attila, "Egyszerű modellszámítások országos kiterjedésű hálózatra FLEXPLANET alapokon." *In: HTE Infokom 2010: Intelligens infrastruktúrák és alkalmazások.* Siófok, Magyarország, 2010.10.27-2010.10.29. Budapest: pp. 1-6.
- [C14] G Auer, I Gódor, L Hévízi, M Imran, J Malmudin, P Fazekas, Gergely Biczók, H Holtkamp, D Zeller, O Blume, R Tafazolli, "Enablers for Energy Efficient Wireless Networks.", *In: Green Wireless Communications and Networks Workshop - GreeNet, Proc. IEEE VTC Fall 2010.* Ottawa, Canada, 2010.09.06-2010.09.08. (IEEE) IEEE Press, pp. 1-5. Paper 1.
- [C15] G Auer, I Godor, L Hevizi, M A Imran, J Malmudin, P Fazekas, G Biczok, D Zeller, O Blume, R Tafazolli, "The EARTH Project: Towards Energy Efficient Wireless Networks." *In: Paul Cunningham, Miriam Cunningham (editors) Future Network & Mobile Summit: Conference Proceedings.* Firenze, Italy, 2010.06.16-2010.06.18. Firenze: pp. 1-5. Paper 226. (ISBN: 978-1-905824-16-8)
- [C16] Törös István, Fazekas Péter, "An Algorithm for Automatic Base Station Placement in Cellular Network Deployment." *In: EUNICE 2010, LNCS 6164 Networked Services and Applications - Engineering, Control and Management.* Trondheim, Norway, 2010.06.28-2010.06.30. pp. 21-30. Paper 3.
- [C17] Törös István, Fazekas Péter, "Automatic Base Station Deployment Algorithm in Next Generation Cellular Networks." *In: AccessNets 2010: 5th International ICST Conference on Access Networks.* Budapest, Hungary, 2010.11.03-2010.11.05. Budapest: pp. 1-14. Paper 2. (ISBN: 978-963-9995-09-3)
- [C18] Albert Mráz, Péter Fazekas, "Effect of Imperfect Channel Estimation on LTE MU-MIMO Performance." *In: Paul Cunningham, Miriam Cunningham (editor) Future Network and Mobile Summit 2011 Conference Proceedings.* Warsaw, Poland, 2011.06.15-2011.06.17. pp. 1-8. Paper 72.
- [C19] Mráz Albert, Fazekas Péter, "Analysis of Channel Estimation Imperfections Within the 3GPP LTE Physical Layer." *In: Second International Conference on the Network of the Future: NOF'2011.* Paris, France, 2011.11.28-2011.11.30. (IEEE) IEEE
- [C20] Törös István, Fazekas Péter, "An energy efficient cellular mobile network planning algo-

rithm." In: *IEEE 73rd Vehicular Technology Conference: VTC2011-Spring*. Budapest, Hungary, 2011.05.15-2011.05.18. (IEEE, IEEE VTS)5 p. Paper 1.

[C21] Törős István, Fazekas Péter, "Planning and network management for energy efficiency in wireless systems.", In: *Future Network and Mobile Summit 2011*. Warsaw, Poland, 2011.06.15-2011.06.17. 8 p. Paper 54.

Műszaki beszámolók

[T1] Fazekas Péter, Imre Sándor, Iván Gábor, Fülöp Attila, Zsíros Attila, "Első rész: HSDPA teljesítőképesség", *Mobiltelefon hálózatok csomagkapcsolt forgalom-modellezése és méretezése a hozzáférési és az átviteli hálózatrészekben, HSDPA hálózatok minőségi kérdései*, BME Department of Telecommunications - Tmobile bilateral research project, report, October, 2006

[T2] Fazekas Péter, Imre Sándor, Pap László, Iván Gábor, Fülöp Attila, Zsíros Attila, Németh Zoltán, "Második rész: Hálózat optimalizálási és méretezési kérdések", *Mobiltelefon hálózatok csomagkapcsolt forgalom-modellezése és méretezése a hozzáférési és az átviteli hálózatrészekben, HSDPA hálózatok minőségi kérdései*, BME Department of Telecommunications - Tmobile bilateral research project, report, October, 2006

[T3] Fazekas Péter, Jeney Gábor, "Második rész: 2G-3G adatforgalommal kapcsolatos és kapacitás-méretezési feladatok" *Mobiltelefon hálózatok csomagkapcsolt forgalom-modellezése és méretezése a hozzáférési és az átviteli hálózatrészekben, Rádióhálózat tervezés kutatási és fejlesztési feladatok*, BME Department of Telecommunications - Tmobile bilateral research project, report, October, 2006

Hivatkozások

- [1] A. S. Alfa and W. Li. A homogeneous PCS network with markov call arrival process and phase type cell residence time. *Wireless Networks*, 8(6):597–605, November 2002.
- [2] E. Altman, T. Chahed, and S.E. Elayoubi. Joint uplink and downlink capacity considerations in admission control in multiservice CDMA/HSDPA systems. In *Proc. of ACM 2nd international conference on Performance evaluation methodologies and tools*, 2007.

- [3] M. Assaad and D. Zeghlache. On the Capacity of HSDPA. In *Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM'03*, volume 1, pages 60–64, 2003.
- [4] P. Barford and M. Crovella. Generating representative web workloads for network and server performance evaluation. In *Proceedings of ACM Sigmetrics'98 International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, pages 151–160, 1998.
- [5] E. Chlebus and W. Ludwin. Is handoff traffic really poissonian. In *Proc. of IEEE ICUPC'95*, pages 348–353, 1995.
- [6] W. Choi and J. Y. Kim. Forward-link capacity of a ds/cdma system with mixed multirate sources. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 50(3):737–749, May 2001.
- [7] Y. Fang. Hyper-erlang distribution model and its application in wireless mobile networks. *Wireless Networks*, 7(3):211–219, May 2001.
- [8] K. S. Gilhousen, I. M. Jakobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver, and C. E. Wheatley. On the Capacity of a Cellular CDMA System. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 40(2):303–397, May 1991.
- [9] Kimmo Hiltunen and Riccardo De Bernardi. WCDMA downlink capacity estimation. In *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2000 Spring*, volume 2, pages 992–996, May 2000.
- [10] A. Jayasuriya, D. Green, and J. Asenstorfer. Modelling service time distribution in cellular networks using phase type service distributions. In *Proceedings of IEEE ICC'01 International Conference on Communications*, pages 440–444, 2001.
- [11] Z. Jiang, L. Chang, and N. K. Shankaranarayanan. Providing multiple service classes for bursty data traffic in cellular networks. In *Proceedings of IEEE INFOCOM'2000, Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communication Societies*, 2000.
- [12] J. Kaufman. Blocking in a shared resource environment. *IEEE Transactions on Communications*, Com-29(10):1474–1481, October 1981.
- [13] R. Litjens L. van den Berg and J. Laverman. Hsdpa flow level performance: the impact of key system and traffic aspects. In *Proceedings of Seventh IEEE/ACM MSWiM*, October 2004.

- [14] Y-B. Lin and I. Chlamtac. A model with generalized holding and cell residence times for evaluating handoff rates and channel occupancy times in pcs networks. *International Journal of Wireless Information Networks*, 4(3):163–171, July 1997.
- [15] Yi-Bing Lin, Li-Fang Chang, and A. Noerpel. Modeling hierarchical microcell/macrocell PCS architecture. In *IEEE International Conference on Communications, ICC 1995, Seattle*, volume 1, pages 405–409, 1995.
- [16] M. Neuts. *Probability distributions of Phase Type*, volume Liber Amicorum Prof. Emeritus H. Florin, pages 173–206. University of Leuven, 1975.
- [17] V. Paxson and S. Floyd. Wide-area traffic: The failure of poisson modeling. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 3(3):226–244, june 1995.
- [18] K. I. Pedersen, T. F. Lootsma, M. Střttrup, F. Frederiksen, T. E. Kolding, and P. E. Mogenssen. Network performance of mixed traffic on high speed downlink packet access and dedicated channels in wcdma. In *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2004 Fall*, pages 4496–4500, September 2004.
- [19] J. W. Roberts. *A service system with heterogeneous user requirements*, volume Performance of Data Communication Systems and their Applications, pages 423–431. North-Holland-Elsevier Science Publishers, 1981.
- [20] N. K. Shankaranarayanan, A. Rastogi, and Z. Jiang. Performance of a wireless data network with mixed interactive user workloads. In *Proceedings of IEEE ICC'02 International Conference on Communications*, 2002.
- [21] K. Sipila, K. C. Honkasalo, J. Laiho-Steffens, and A. Wacker. Estimation of capacity and required transmission power of WCDMA downlink based on a downlink pole equation. In *Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000. VTC 2000-Spring Tokyo. 2000 IEEE 51st*, volume 2, pages 1002–1005, 2000.
- [22] A. M. Viterbi and A. J. Viterbi. Erlang capacity of a power controlled cdma system. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 11(6), August 1993.
- [23] K. Yeo and C-H. Jun. Modeling and analysis of hierarchical cellular networks with general distributions of call and cell residence times. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 51(6):1361–1374, November 2002.

- [24] Qinqing Zhang. UMTS air interface voice/data capacity-part 2: forward link analysis. In *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2001 Spring*, volume 4, pages 2730–2734, May 2001.