



X M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék

Gombor István

**RÁDIÓS ERŐFORRÁSKEZELÉS
TÖBBSZINTŰ CELLÁS MOBIL
HÁLÓZATOKBAN**

KONZULENS

Dr. Mráz János Albert

BUDAPEST, 2013

Tartalomjegyzék

1 Bevezetés	4
2 OFDM átvitel és az LTE Rádiós Interfész.....	5
2.1 Az OFDM moduláció	5
2.2 Az OFDM többszörös hozzáférés	6
2.3 A rádiós csatorna	7
2.4 Az LTE fizikai rétege	8
3 Heterogén hálózatok	10
3.1 Cellás hálózati rendszerek	10
3.1.1 Makrocellás és Mikrocellás rendszerek.....	11
3.1.2 Pikocellák.....	12
3.1.3 Femtocellák.....	12
3.1.4 Radio Remote Head-ek.....	12
3.2 Interferencia	12
3.2.1 Problémák heterogén hálózatok esetén.....	13
3.2.2 Az interferencia forrásai	13
3.2.3 ICIC	14
3.3 A HetNet ICIC szabványosítása	14
3.3.1 Időszabályozás alapú technikák.....	15
3.3.2 Frekvenciaszabályozás alapú technika	15
3.3.3 Teljesítményszabályozás alapú technikák	15
4 Flexibilis Spektrumkiosztás és Interferencia Koordináció	17
4.1 Az FSUAH algoritmus.....	18
4.2 Működési Pontok	19
4.3 Algoritmus a makrocellában	19
4.4 Algoritmus a pikocellában	21
4.5 Paraméterek	21
5 Szimuláció.....	22
5.1 Szimulációs környezet.....	22
5.2 MATLAB.....	22
5.3 A MATLAB modulok	22
5.4 Mobilitás modell	23
5.5 Pathloss modell.....	24

6 Szimulációs eredmények	27
6.1 A rendszer paraméterei	27
6.2 Referencia algoritmus	28
6.3 QoS a pikocella felhasználói számára	34
6.3.1 Ütemező algoritmus a pikocellában.....	34
6.3.2 Teljesítmény-szabályozás alapú eICIC.....	35
6.3.3 Konklúzió	40
7 Összefoglalás.....	41
7.1 Összegzés.....	41
7.2 Tovább lépési lehetőségek	41
Ábrák jegyzéke.....	42
Irodalomjegyzék.....	44
Rövidítések jegyzéke.....	45

1 Bevezetés

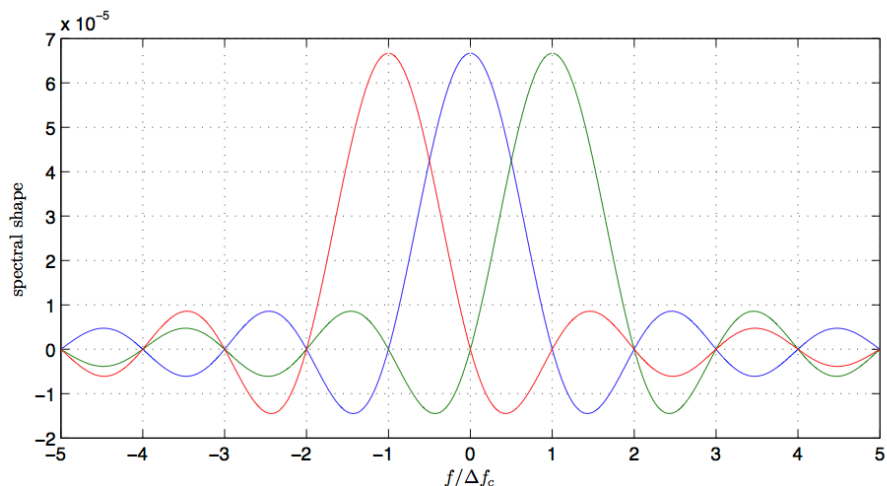
Az elmúlt évek tendenciája alapján bátran kijelenthetjük, hogy nagyfokú és egyre jobban fokozódó igény van a fix összeköttetésű megoldások mellett a mobil távközlési technológiákra. Hazánkban minden harmadik szélessávú internet előfizetés mobil adatsomagra vonatkozik, valamint világszerte dinamikus növekedés figyelhető meg. Napjainkban az előfizetők rohamosan növekvő száma, az új, fejlett felhasználói készülékek (User Equipments) és hálózati szolgáltatások révén a távközlési szolgáltatók már jó ideje szembesültek az exponenciálisan növekvő forgalomigények problémakörével. A technológia gyors fejlődésének következtében a készülékek közti adat- és jelzésforgalom olyan mértékben nőtt meg és alakult át, hogy a jelenleg alkalmazott és kiépített hálózati eszközök nem képesek azt kielégíteni, a 3G néven ismert WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) alapú UMTS/HSPA (Universal Mobile Telecommunication System / High Speed Packet Access) rendszerek elérték kapacitásuk maximumát, nem alkalmasak az Internet technológia minden lehetőségének (pl. szélessávú videó, IPTV) kiszolgálására. A további forgalomnövekedés ellátására nagyobb kapacitás és átviteli sebesség szükséges. Gyakorlati okok miatt (pl. nem lefedhető területek) a 3G hálózat "sűrítése" nem megoldható, ezért az alapvető cél egy új, korszerűbb rádiós technológia kifejlesztése volt. A rohamos fejlődéssel, sávszélesség- és szolgáltatásminőség (Quality-of-Service [QoS]) igényekkel való lépést tartás végett a 3GPP (Third Generation Partnership Project) LTE 8-as verziója (Rel.8) már több operátornál teszt, illetve éles használatban van, mely magasabb spektrális hatékonyságának, valamint a csomagkapcsolt „flat”, teljesen IP (all IP) alapú architektúra által biztosított alacsonyabb hálózati késleltetés révén több, szignifikáns előnnyel is kecsegtet elődjéhez a HSPA-hoz képest. Azonban a 8-as Release nem felel meg az International Mobile Telecommunications-Advanced (IMT-Advanced) által támasztott, a negyedik generációs mobil hálózatokra irányuló előírásainak, mint pl. lefelé irányuló előírásainak, mint pl. lefelé irányuló adatátvitelen a 100 Mbit/s, felfelé pedig 50 Mbit/s sebesség mobil felhasználók számára, azonban az LTE-Advanced (LTE-A, Rel.10) szabványosítása mára már befejeződött [5].

2 OFDM átvitel és az LTE Rádiós Interfész

A teljes hálózat teljesítményének javítására az LTE-A [6] alapján az [5] szerint több javaslatot is ad olyan technológiák alkalmazásával, mint pl. a vivő aggregáció (Carrier Aggregation, CA), mely lehetővé tesz több, eltérő frekvenciájú vivőjel egyidejű felhasználását, ezáltal hatékonyan növeli az egyes felhasználóknak kiosztható sávszélességet. Hasonlóan jellemző tendencia még a többantennás, többszörös hozzáférésű rendszerek (MIMO) alkalmazása. Ezek a konfigurációk koordinált, többszálú átvitelt (Coordinated Multipoint Transmission, CoMP) valósítanak meg, ahol több cella szinkronizáltan végzi az ütemezést és az átvitelt, ezáltal kedvezve a kedvezőtlen csatorna tulajdonsággal rendelkező felhasználóknak, illetve a cellahatáron történő kiesések ellen való törekvéseknek, azonban ezek a technikák nem mindig produkálnak kiugró javulást, különösen alacsony jel-interferencia-plusz-zaj viszonyok (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) mellett.

Ezen akadályok leküzdésére kezdte el alkalmazni az LTE-A a HetNet architektúrát [2]. Ez nagy lépést jelent a negyedik generációs technológia teljesítményének szignifikáns javítására.

2.1 Az OFDM moduláció



1. ábra - Egy három alvivős OFDM jel spektrális alakja

Az ortogonális frekvenciaosztásos multiplexálás (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM), mint modulációs eljárás habár nem új keletű elv [24], a multimédiás alkalmazások elterjedése és ezek helyfüggetlen elérésének igénye teremtette meg azt a követelményrendszert, melynek manapság csak az OFDM-alapú rendszerek képesek megfelelni. Az eljárást először a negyedik generációs mobil távközlő rendszerek szabványaiban definiálták a fizikai rétegben alapvető közeghozzáférési technikaként. Az OFDM egy többvivős digitális modulációs technológia, amely nagyszámú, egymásra ortogonális alvivőt alkalmaz nagy sebességű adatfolyamok párhuzamos átvitelére. Hasonlóan a frekvenciaosztásos multiplexáláshoz (FDM), az átvitelre szánt soros, akár különböző forrásból származó információt egy átviteli egységbe, a szimbólumba fogja össze, azaz multiplexálja. Sajátos felépítésének

alapjai az úgynevezett alvivők (subcarrier-ek), melyek frekvenciatartományban párhuzamos, alacsony átviteli sebességű csatornáknak tekinthetők. Rádiójelek közötti ortogonalitásról akkor beszélünk, amikor két párhuzamosan, de más frekvenciákon zajló adatfolyam nem „zavarja” egymást, vagyis nem interferálnak. Ez azzal magyarázható, hogy az adott vivő spektrumának maximumánál lévő frekvencián a környező jelek spektruma nulla, mely merőleges (ortogonális) jelek alkalmazásával érhető el. Ilyen tulajdonságú jeleket láthatunk az 1. ábrán.

Merőleges jelek definíciója: egy $f(t)$ és egy $g(t)$ jel merőlegesek egymásra, ha $f \neq g$ és fennáll közöttük az alábbi egyenlet, ahol $g^*(t)$ a $g(t)$ jel komplex konjugáltja:

$$\int_0^T f(t) \cdot g^*(t) dt = 0 \quad (2.1)$$

Jelen esetben a keskenysávú alvivő frekvenciák ortogonalitását azzal biztosítjuk, hogy azokat a szimbólumidő reciprokának megfelelő

$$\Delta f_c = \frac{1}{T_s} \quad (2.2)$$

távolságra helyezük el egymástól a frekvenciatartományban. A szomszédos alvivők spektrumai átlapolódhatnak. Egy OFDM szimbólum N db egymáshoz képest ortogonális alvivő szuperpozíciójának eredménye, melyek külön-külön rádiófrekvenciás vivőfrekvenciáknak tekinthetők, ennek megfelelően modulálhatók, azaz amplitúdójukba és fázisukba információ kódolható. Minden egyes alvivőt külön modulálunk hagyományos digitális modulációs eljárással (pl. BPSK, QPSK, QAM), valamint alacsony szimbólumsebessége, így hasonló átviteli sebességeket elérve, mint ugyanazon a frekvenciasávon egyvivős modulációt alkalmazásával.

A frekvenciában eltolt, modulált jeleket Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT), vagy Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) alkalmazásával képezzük le időtartománybeli OFDM szimbólummá.

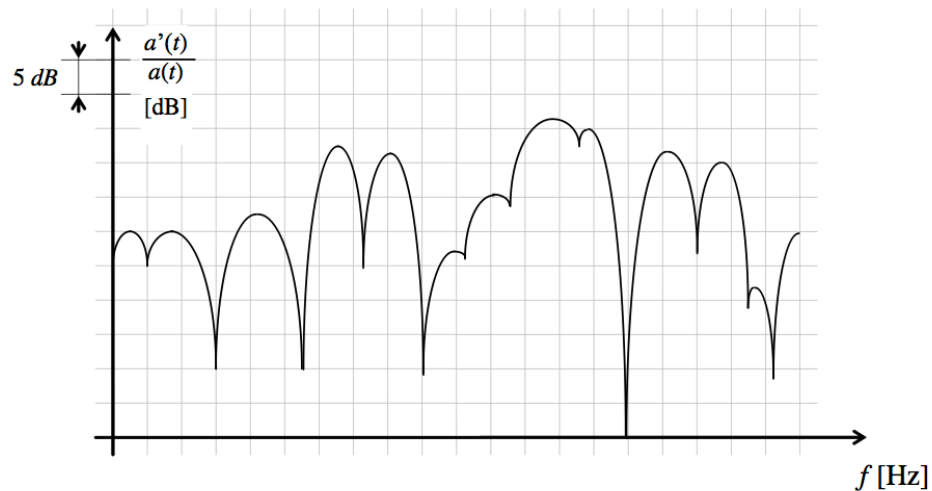
E technológia alkalmazásának legnagyobb előnye, hogy azáltal, hogy az egyes alvivőkön alacsony sebességű adatfolyamok haladnak, lehetővé teszi a csatorna késleltetés-szórása (delay spread) elleni védekezést. Alkalmazásának legnagyobb előnye, hogy bonyolult csatornaki egyenlítő szűrő alkalmazása nélkül ellenállóbbá teszi a többutas terjedéssel és a keskenysávú interferenciával szemben.

2.2 Az OFDM többszörös hozzáférés

Távközlő rendszerekben a rádiós közegre, mint erőforrásra egy időben többen is igényt tarthatnak, ezért szükség van a megosztására. Az OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) az OFDM többfelhasználós kiterjesztése, melyet úgy érjük el, hogy az átvitel során elérhető alvivők meghatározott részalvezéseit allokáljuk az egyes felhasználók között olyan módon, hogy nem lehet olyan alvivő, amelyen egyszerre több felhasználó fogad jeleket, azaz minden alvivő egyszerre csak egy felhasználóhoz tartozhat. A CDMA-hoz (Code Division Multiple Access) hasonlított egyszerűsége mellett a rendelkezésre álló frekvenciasáv kihasználásának hatékonyságát azzal a lehetőséggel képes növelni cellás elrendezés esetén, hogy a cella területének

különböző pontjain tartózkodó felhasználók által tapasztalt csatornaviszonyok különbözőképpen alakulnak. Egy a bázisállomástól távolra eső felhasználó vevőjébe DL irányban a legtöbb esetben a nagyobb terjedési csillapítás miatt alacsonyabb teljesítménnyel fog érkezni a bázisállomás jele. Az OFDMA egy szervezett hozzáférési mód, melyben a kommunikáció résztvevőinek alkalmazkodniuk kell egy szabályrendszerhez, amely mindenki számára biztosít forgalmazási lehetőséget frekvenciában és időben elosztva. Ezek a szervezési feladatok a MAC (Medium Access Control) rétegben vannak definiálva különböző ütemező algoritmusok formájában.

2.3 A rádiós csatorna



2. ábra - A frekvenciaszelektív rádiós csatorna átviteli függvényének abszolútértéke [3]

A mobil eszköz és a bázisállomás között értelmezett rádiós csatorna explicit leírását a $H(f)$ átviteli függvény adja meg. A többutas terjedés miatt a csatorna jelentősen ingadozik, „mintázatot” a frekvenciatartományban az egyes jelutak késleltetései határozzák meg. Tehát nagy késleltetésszórás erősen frekvenciaszelektív csatornát eredményez. Az átviteli függvény $|H(f)|$ abszolút értéke a feszültség erősítés, melyet a 2. ábra illusztrál dB-ben kifejezve, $|H(f)|^2$ pedig a teljesítményerősítés. Rádiós modellezések, mérések során általában az utóbbi használatos. Értéke dB-ben az

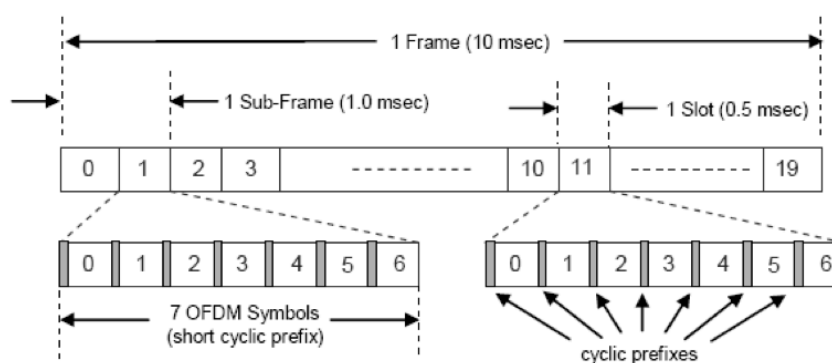
$$L_{PL} = 10 \log_{10} \left(|H(f)|^2 \right) \quad (2.3)$$

összefüggéssel számolható.

A rádiós csatorna idővariáns tulajdonságú is, tehát időben is változhat, még akkor is, ha a végberendezés viszonylag közel helyezkedik el az adóhoz képest. Ennek oka, hogy a közelben mozgó tereptárgyak folyamatosan változtatják a többutas terjedésben résztvevő jelutak csillapítását és késleltetését [3].

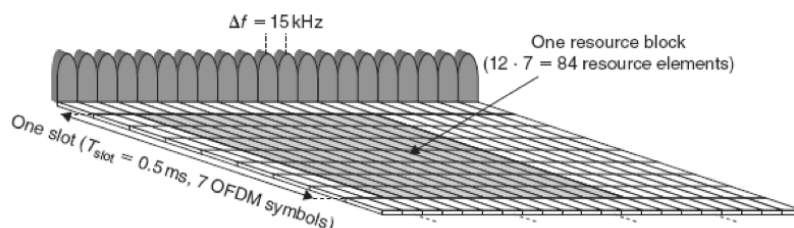
2.4 Az LTE fizikai rétege

Az LTE átvitel időtartománybeli szerkezetét a 3. ábrán láthatjuk. Egy rádiós keret 10 ms hosszúságú és 10 db 1 ms hosszúságú alkeretre (subframe) van felosztva, melyek egyenként 2 db 0,5 ms-os időrésre (timeslot) vannak felosztva, azonban az ütemező mind downlink, mind uplink irányban 1 ms-onként hoz döntéseket, tehát kijelenthető az, hogy valójában alkereteket oszt ki a felhasználók között az adatküldés, vagy az adatfogadás biztosítása érdekében. Minden időrés bizonyos számú OFDM szimbólumból áll, a ciklikus prefixet (CP) is magába foglalva, amelynek hosszát tekintve – különböző forgalmi viszonyok, szolgáltatások (pl. multicast/broadcast üzenetek), cellaméreték figyelembevételével – 6, illetve 7 szimbólum vihető át minden időrésben.



3. ábra - Az LTE keret időtartománybeli felépítése [4]

A PRB (Physical Resource Block), vagyis fizikai erőforrásblokk, az LTE technológia frekvenciában és időtartományban is megosztott erőforrásbeli alapegységei. Az ütemezés kérdése tehát abban áll, hogy melyik PRB-t, mikor, melyik felhasználó kapja meg. Egy ilyen blokk 180 kHz sávszélességű. Egyetlen erőforrásblokk tehát 12 db 15 kHz sávszélességű alvívöt tartalmaz. A mintavételi frekvencia $f_s = 15000 N_{FFT}$, ahol N_{FFT} az FFT blokk mérete, ez pl. 5 MHz-es csatorna sávszélességnél 512 méretű blokkot jelent, 7,68 MHz mintavételi frekvenciával.



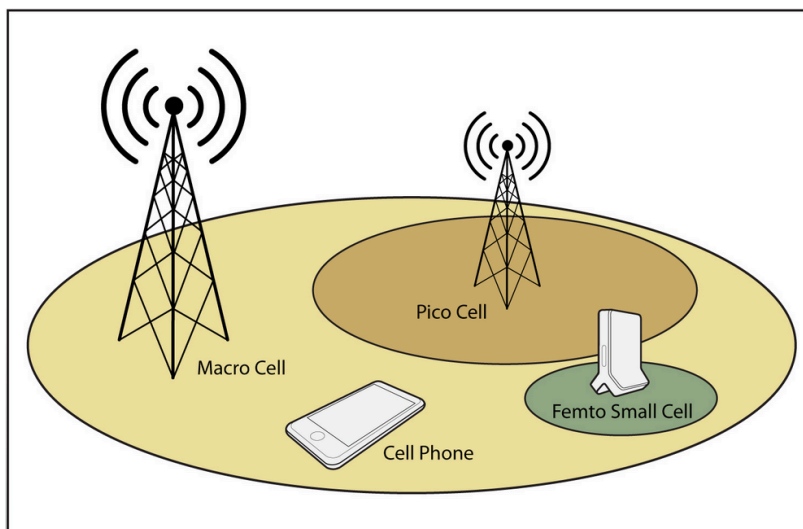
4. ábra – Az LTE PRB struktúrája

Egy vivőn a kereteken belül elhelyezkedő alkeretek Uplink (UL) és Downlink (DL) irányú átvitelre egyaránt használhatók. Frequency-Division Duplexing (FDD, páros spektrum) egy vivőnek vagy minden alkerete DL, vagy mindegyik DL irányú átvitelre használatos. Míg Time-Division Duplexing (TDD, páratlan spektrum) esetén

mindegyik keret nulladik és ötödik alkerete (ezek tartalmazzák a szinkronizációs jeleket) mindig Downlink átvitelre vannak kijelölve, míg a fennmaradó alkeretek tetszőleges irányú átvitelre kijelölhetőek. A 0. és 5. alkereten DL irányban kisugárzott szinkronizációs jelek kezdeti cellakeresésre és szomszédos cellakeresésre használatosak minden cellában. Ahogyan az a TDD mód alkeret felosztását illusztráló ábrán látható, az alkeretek flexibilis kiosztása különböző elrendezéseket tesz lehetővé attól függően, hogy mekkora mennyiségű rádiós erőforrást rendelünk az Uplink (UL) ill. Downlink (DL) átvitelhez. Az alkeret kiosztásnak azonosnak kell lennie a szomszédos cellákban az UL-DL interferenciát elkerülendő. Ezért az UL-DL aszimmetria nem változhat dinamikusan (pl. keretenként), de lassabb ütemű átrendezés lehetséges, figyelembe véve az UL-DL forgalom aszimmetriájának a változását.

3 Heterogén hálózatok

A 3GPP LTE-A szabvány a közelmúltban egyre többet foglalkozott ún. heterogén hálózatok kiépítésével [2], fejlesztésével az egyre növekvő forgalmi igények költség-hatékony kielégítésére. Ezek az összetett architektúrák különböző rádiós hozzáférési pontokat tartalmaznak: makrocellák, rádiós erősítők (RRH-k), alacsony teljesítményű pikocellák, femtocellák és ismétlők (Relay-ek) segítségével olyan topológiát alkotnak, mely lehetővé teszi a vezeték nélküli hálózatok nagymértékű teljesítménybeli fejlesztését, a spektrum újrafelhasználását, a beltéri lefedettség növelését és a rádiós összeköttetések minőségének javítását, azáltal, hogy a sűrűbben telepített bázisállomások (Base Station, BS) révén csökken az adó és a vevő közti távolság. Természetesen ezek különböző problémákat, akadályokat generálnak.



5. ábra - Példa egy HetNet struktúrára egy makrocellával, pikocellával és femtocellával

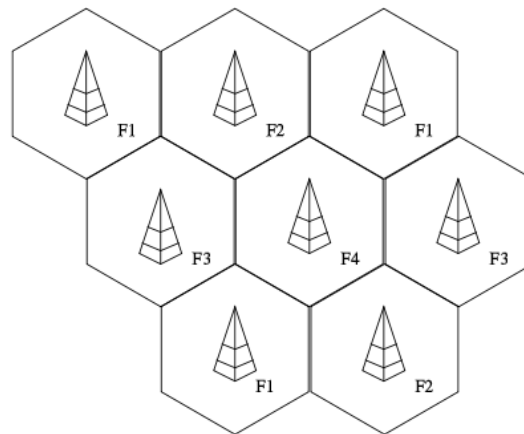
A heterogén hálózatok olyan hálózati architektúrák, melyek infrastrukturális pontjai több, különböző vezeték nélküli hozzáférési technológiát használnak eltérő korlátok, képességekkel és funkcióval. LTE-A esetében ez azt jelenti, hogy a meglévő, a távközlési szolgáltató által telepített makrocellás elrendezést bővítik ki kisebb lefedettséget biztosító pikocellákkal, illetve femtocellákkal, ezáltal egy többrétegű hálózati struktúrát hozva létre, ahol nagy eséllyel ugyanazon földrajzi területen helyezkednek el ugyanazt a spektrumot használva. Ezek a kisebb teljesítményű és hatótávolságú BS integrálása első sorban azért előnyösek, mert nagymértékben tehermentesítik a makrocellákat, javítják a beltéri lefedettséget, a spektrális hatékonyságot és a cellahatáron lévő felhasználók teljesítmény viszonyait, mindezt úgy, hogy telepítésük nem eredményez különösebb hálózati pluszterhelést, valamint lehetőséget rejt energiagazdálkodás szempontjából.

3.1 Cellás hálózati rendszerek

Mi is egy cella valójában? Hogyan kell értelmezni ezt a kifejezést egy vezeték nélküli távközlő hálózat esetén? Amikor az ember mobilhálózatokat tanulmányoz, gyakran találkozik a cellás rendszer kifejezéssel. Ez azt jelenti, hogy a lefedni kívánt területet nem egyetlen antennával fedik le, hanem ún. cellákra osztják. Így lényegesen

több antennára van szükség, de több szempontból is kedvező tulajdonságú lesz az így kapott hálózat.

A rendelkezésre álló rádiós spektrum egy véges erőforrás, ezért az országok megfelelő hatóságai csak véges méretű sávokat osztanak ki a mobil szolgáltatók között. Emiatt a frekvenciát nem lehet pazarolni, nem lehet megoldani azt, hogy minden – az adott terület kiszolgálásában részt vevő – cella különböző sávokat használjon. Ezt a problémát hivatott áthidalni a frekvencia újrafelhasználás, amelynek lényege, hogy az egymástól megfelelő távolságra lévő – nem szomszédos – cellák használhatják ugyanazokat a frekvenciasávokat, hiszen a köztük lévő távolság miatt nem fognak a vevőegységekben interferenciát okozni [11]. A frekvencia újrafelhasználás elve cellás hálózatok esetén az alábbi ábrán látható:



6. ábra - A frekvencia újrafelhasználás elve cellás hálózatokban

A cellás hálózatok csoportosításának legegyszerűbb és egyben legelterjedtebb módja, lefedettség mérete alapján történő csoportosítás, ezek alapján négy csoportot különböztetünk meg.

3.1.1 Makrocellás és Mikrocellás rendszerek

Konvencionális, szolgáltató által telepített bázisállomások nyílt, publikus hozzáféréssel, rádiós terjedést befolyásoló paraméterektől függően 2-35 km sugarú lefedettséggel, illetve garantált QoS előírásokkal (minimális adatsebesség, maximális késleltetés). Ezen BS-ek tipikusan 46 dBm-es adóteljesítménnyel (kb. 40 W) üzemelnek, előfizetők ezreit szolgálják ki és dedikált felhordó hálózattal (Backhaul) rendelkeznek. LTE környezetben eNodeB-knek (evolved NodeB) nevezzük őket. Egy eNodeB egy, vagy több cellát szolgál ki, közvetlen összeköttetésben van a maghálózattal (S1 interfész) és a környező eNodeB-vel (X2 interfész). Ezen kapcsolatok miatt lehetségessé vált a teljes hozzáférési hálózatbeli (Access Network, AN) funkcionalitás áttétele a bázisállomásokba. Szabadtéri terjedést feltételezve az adóoldali teljesítmény az alábbi összefüggés alapján

$$P_A = P_V \sqrt{\frac{4\pi\Delta f}{c}} \quad (3.1)$$

ahol P_A az adó oldali kisugárzott teljesítmény, P_V a vevő oldali vett teljesítmény, Δf az alvivő sávszélesség, valamint c a fénysebesség.

3.1.2 Pikocellák

Amennyiben a makrocelláknál kisebb lefedettségre van szükség, akkor kerül sor a szintén szolgáltató által tervezett és telepített, kisebb, maximum néhányszor 100 m-es lefedettséggel és 23-30 dBm-es adóteljesítménnyel (néhány ezer mW) üzemelő pikocellák alkalmazására. Elsősorban központi, forgalmas helyeken, útszakaszokon, illetve makrocellák által gyengén lefedett beltérekben használatosak. A cellaméret csökkenése magában hordozza a maximálisan kiszolgálható felhasználók számának csökkenését is.

3.1.3 Femtocellák

Az LTE környezetben Home eNodeB-ként is nevezett kis költségű, alacsony teljesítményű hozzáférési pontok otthoni és beltéri, irodai lefedtség biztosítására használatosak körülbelül 5-15 felhasználó számára 50 m-nél kisebb lefedettséggel és 23 dBm-nél kisebb (néhányszor 10 mW) adóteljesítménnyel. Nem rendelkeznek dedikált felhordó hálózattal, az előfizető saját internet hozzáférésehez csatlakozik. Ránézésre nem sokban különbözik egy otthon használt IEEE 802.11 (WLAN) szabványú routertől. Működhetnek nyílt (Open Subscriber Group [OSG]) és zárt (Closed Subscriber Group [CSG]) hozzáféréssel, utóbbi esetben IMSI alapján korlátozzák a csatlakoztatható végberendezéseket.

3.1.4 Radio Remote Head-ek

Kisméretű, könnyű, nagy teljesítményű, kültéri berendezések, melyek optikai kábellel csatlakoznak az eNodeB beltéri, alapsávi egységéhez. Azáltal, hogy az RRH-ba kerülnek át a rádiófrekvenciás áramkörök, jelentősen csökkenthető az antenna tápellátását biztosító kábelek okozta csillapítás.

Cella típusa	Adóteljesítmény	Lefedettség	Backhaul
Makrocella	46 dBm	néhány km	S1 interface
Pikocella	23-30 dBm	< 300 m	X2 interface
Femtocella	< 23 dBm	< 50 m	Internet IP
Relay	30 dBm	300 m	wireless
RRH	46 dBm	néhány km	optika

1. Táblázat - A különböző cellatechnológiák tipikus paraméterei

3.2 Interferencia

A hagyományos egyszintű hálózatokkal ellentétben a többrétegű HetNet-ek interferencia problémái kihívást jelentő feladatok az alábbiak miatt:

- Az eltérő backhaul hálózatok miatt különbözőek az egyes cellák sávszélesség és késleltetés korlátai.
- Korlátozott hozzáférésű (CSG) pikocellák és femtocellák okozhatnak erős interferencia jelenségeket mind DL, mind UL esetén, mivel nem megoldható a handover a szomszédos szektorok között.
- Önszervező celláknál megkövetelt a folyamatos érzékelés és monitorozás az interferencia dinamikus és adaptív redukálására, illetve megszüntetésére.

3.2.1 Problémák heterogén hálózatok esetén

Szolgáltató által telepített makrocellák és Relay-ek használatakor a zavartatás mérsékelhető megfelelő frekvencia újrahhasználási sémák révén, azonban ez csökkenti a térbeli újrafelhasználás lehetőségét azáltal, hogy egy cellán használt csatornák tiltva vannak a szomszédosok. A cél ennek a kiküszöbölése olyan módon, hogy a szektorok szabadon felhasználhassák a rendelkezésre álló erőforrásokat forgalmi terhelés és csatorna kondíciók alapján. Felhasználó által beüzemelt, makrohálózatba ültetett femtocellák új cellahatárokat hoznak létre, ahol a végfelhasználók cellák közti interferenciával szembesülnek. Ezeket az eseteket az LTE szabvány ún. cellák közti interferencia koordinációval (Inter-cell Interference Coordination [ICIC]) kezeli.

3.2.2 Az interferencia forrásai

- Nem tervezett telepítések:

A kis teljesítményű femtocellákat az előfizetők kedvük szerint mozgathatják, ki/bekapcsolhatják ad-hoc módon. Ez ahhoz vezet, hogy a szolgáltatók nem tudják kontrollálni sem a számukat, sem a földrajzi elhelyezkedésüket ezeknek a node-oknak, ezért új, decentralizált zavarvédelmi rendszerre van szükség, ami függetlenül működik minden cellán csak lokális információkat figyelembe véve.

- CSG hozzáférés:

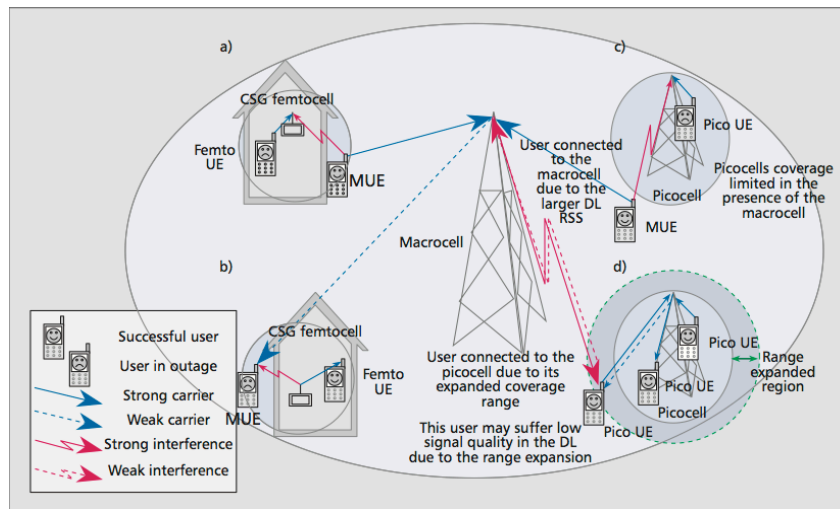
Korlátozott hozzáférésű HeNodeB-k oly módon okoznak interferenciát, hogy csak meghatározott végberendezéseket engedélyeznek felcsatlakozni, ezáltal a kiterjesztett cellahatáron a tiltott felhasználók a távoli makrocella miatt történő nagy teljesítményű UL esetén zavarják a femto Uplink-jét. Fordított esetben, DL-nél a tiltott felhasználó szenved interferenciát a HeNodeB nagyobb DL jel-szintje következtében.

- eNodeB-k közti adóteljesítménykülönbség:

A makro- és pikohálózatok nyitott működése révén a felhasználók mindig az érzékelt legnagyobb teljesítménnyel adó cellához csatlakoznak, ezzel kiküszöbölve a CSG okozta interferenciát, azonban ez HetNet-ek esetén nem járható út, ugyanis nem veszi figyelembe a terjedési csillapítást (Pathloss), ezáltal nyilvánvalóan elsődlegesen minden végberendezés a makrocellával fog forgalmazni a HeNodeB helyett. Ez a makrohálózat túlterheléséhez vezet, valamint DL esetén a túl nagy vett jelszint (received signal strength [RSS]) révén interferál a kisebb teljesítményű pikocella Uplink-jével.

- Kiterjesztett tartományú felhasználás:

A DL lefedettség növelésére a pikocellák egy ofszettel növelik RSS-üket, ezáltal rétegek közti interferenciát okozva UL esetén a kiterjesztett cellahatáron tartózkodó felhasználóknál. Ez ahhoz vezet, hogy ezen felhasználók DL SINR-je 0 dB alá eshet, mert nem a legjobb jelszinttel adó cellára vannak csatlakozva.



7. ábra - Egy tipikus HetNet topológia interferencia forrásai [8]

3.2.3 ICIC

A fent vázolt problémák szignifikánsan csökkentik a heterogén hálózatok általános teljesítőképességét, ezért szükség van a vezérlő csatornák (control channel [CCH]) megfelelő interferencia koordinációjára. Ezen felül, alapvető dolog, hogy az UE-k folyamatosan figyelnek, detektálnak és információkat jelentenek az őket kiszolgáló eNodeB-knek a környezetükben lévő potenciális interferáló cellákról, ezért azok ez alapján szervezik meg erőforrás allokációjukat mind teljesítményben, frekvenciában és időben a hálózati kapacitás növelésére és a felhasználók eldobódásának csökkentésére. Ennek megvalósítására a szektorok információs üzeneteket cserélnek egymás közt:

- makrocella és pikocella az X2 interfészen keresztül: Relative narrowband transmit power (RNTP) indikátor DL átvitel, Overload indicator (OI) UL átvitel, valamint High interference indicator (HII) a potenciális interferáló cellahatáron tartózkodó UE-k esetén.

Ilyen jellegű információcsere a makro- és a femtohálózat között már nem ilyen triviális. A backhaul hálózaton keresztül történő adatközvetítés késleltetési problémához vezet, ezért vannak feltevések olyan megoldásokra, mint pl. a broadcast channel-ön történő információ csere, vagy éppenséggel szomszédos cellák esetén a végberendezés is felhasználható ilyen célra Relay-ként.

3.3 A HetNet ICIC szabványosítása

A 3GPP Rel.8 és 9 szabványok ICIC módszereivel szemben a Rel.10 továbbfejlesztett ICIC (enhanced ICIC [eICIC]) megoldása már figyelembe veszi a HetNet-okozat interferencia-helyzeteket.

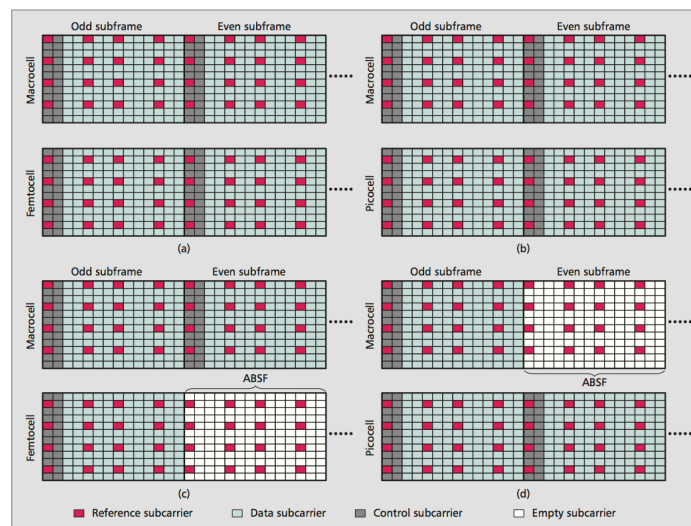
3.3.1 Időszabályozás alapú technikák

- Subframe összehangolás:

A makro eNodeB és a HeNodeB alkeretei átfedésben vannak oly módon, hogy a CCH-k és a DCH (Data Channel) átfedésben vannak. Ennek megvalósítására az eICIC-t implementálni kell a femtocellában ún. Almost Blank Subframe-ek (ABSF) használatával. Ez a megoldás alkalmazható pikocellák esetén is azzal a különbséggel, hogy abban az esetben a Makro eNB alkalmaz ABSF-t.

- OFDM szimbólum eltolódás:

A HeNodeB subframe határa OFDM szimbólumok számszorosával van eltolva, figyelembe véve a makro eNB subframe határát, nehogy átfedés legyen a femto control channel-je és a makro cella jelzés csatornája között, bár ekkor még mindig fellép interferencia a HeNodeB CCH-je és a makro eNodeB DCH-je között. Erre a megoldás a megosztott csatorna szimbólum némítás (shared-channel symbol muting), vagy a folyamatos subframe kioltás (subframe blanking).



8. ábra – ortogonális OFDM szimbólum-eltolódás és ABSF alapú ICIC szabványok [8]

3.3.2 Frekvenciaszabályozás alapú technika

A CCH-k és a fizikai jelzések csökkentett sávszélességgel vannak ütemezve a teljes mértékű ortogonális átvitel céljából [6]. Ennek implementációja a Makro eNB-ban megoldható statikusan, illetve dinamikusan a végberendezés riportja alapján és ezt továbbküldheti a backhaul-on keresztül a HeNodeB-nak is.

3.3.3 Teljesítményszabályozás alapú technikák

Ezen megközelítés kapcsán már többféle lehetőség van definiálva a 3GPP szabványban. A HeNodeB-k adóteljesítményének dinamikusan csökkentésével jelentősen növelhető a cell-edge UE-k teljesítménye, habár ez értelemszerűen a femto felhasználók, illetve a rendszer összsebességének redukálódásával jár.

Egyezményesnek tekintjük a P_{\max} és P_{\min} értékeket, mint a HeNodeB maximális és minimális kisugárzott teljesítménye. P_M jelölje azt a legmagasabb vett jelszintet, melyet a legnagyobb teljesítményű, közös csatornán sugárzó makro eNodeB-től veszünk a HeNodeB-nél, valamint α és β legyen két teljesítményszabályozó változó, P_{tx} pedig a femtocella adóteljesítménye. Így a különböző teljesítményszabályzás alapú megközelítések az alábbiak lehetnek [12]:

- A Home eNodeB-nél tapasztalt legmagasabb makro eNodeB teljesítményszint szerint:

$$P_{tx} = \max(\min(\alpha P_M + \beta, P_{\max}), P_{\min}) \quad (3.2)$$

- A Home eNodeB és a makro UE közötti pathloss szerint:

$$P_{tx} = \text{med}(P_M + P_{\text{ofst}}, P_{\max}, P_{\min}) \quad (3.3)$$

ahol

$$P_{\text{ofst}} = \text{med}(P_{\text{ipl}}, P_{\text{ofst-max}}, P_{\text{ofst-min}}) \quad (3.4)$$

Az utóbbi összefüggésben P_{ipl} a teljesítmény ofszet, mely a beltéri terjedési csillapítást hivatott reprezentálni a HeNodeB és a legközelebbi makro UE között, melynek $P_{\text{ofst-max}}$ és $P_{\text{ofst-min}}$ a szélsőértékei.

- A Home eNodeB UE objektív SINR-je alapján:

$$P_{tx} = \max(P_{\min}, \min(\widehat{PL} + P_{\text{rec,HUE}}, P_{\max})) \quad (3.5)$$

ahol

$$P_{\text{rec,HUE}} = 10 \log_{10} \left(10^{I/10} + 10^{N_0 B_{ch}/10} \right) + \text{SINR}_{\text{tar}} \quad (3.6)$$

ahol SINR_{tar} az elérendő cél jel-interferencia-plusz-zaj viszony értéke, I a kiszolgált UE által detektált interferencia W-ban, $N_0 \cdot B_{ch}$ a zajenergia szintén W-ban, \widehat{PL} pedig a becsült Pathloss a HeNodeB és a user között.

- A makro UE objektív SINR-je alapján:

$$P_{tx} = \max(\min(\alpha P_{\text{SINR}} + \beta, P_{\max}), P_{\min}) \quad (3.7)$$

ahol P_{SINR} a makro UE SINR értéke, csak a legközelebbi interferáló femtocellát figyelembe véve.

4 Flexibilis Spektrumkiosztás és Interferencia

Koordináció

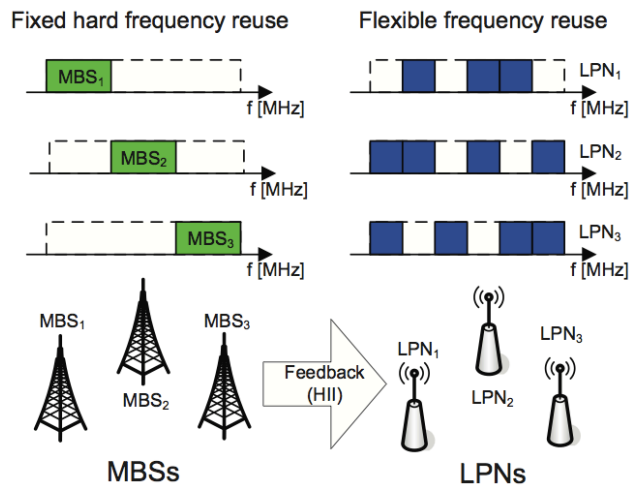
A heterogén hálózatok kialakításának fő célja a területi lefedettség növelése olyan térségekben, ahol a felhasználók rossz csatornaviszonyokat, alacsony vételi jelszintet tapasztalnak. Azáltal, hogy a már meglévő makrohálózatba kerülnek beillesztésre ezek az alacsonyabb teljesítményű Node-ok, a cellák közti interferencia szignifikáns nehézséggé válik, amit ha nem megfelelően kezelnek, nem csak cella határon lévő felhasználók (cell-edge UE) helyzetét rontja, hanem a teljes hálózat átviteli sebességét is nagyban csökkenti.

Dolgozatom keretein belül a makrocellát használó végberendezések által letöltés irányban elszenvedett, a pikocellák okozta zavartatásra helyezem a hangsúlyt. [7] alapján javaslatot adok egy olyan algoritmusra, mely rugalmasan spektrumkiosztást valósít meg a pikocella felhasználók körében a makro-felhasználók átviteli sebességének gyarapítása érdekében. A módszer alapja a frekvencia erőforrások dinamikus szétosztása a makro-, és pikocellák között, ezáltal csökkentve a káros interferenciát, növelve a spektrális hatékonyságot, amely azonban csak limitált mértékben lehetséges a HetNet környezetben alkalmazott zavartatás-koordináció mellékhatásaként. Ez felfogható járulékos költségként annak a kiküszöbölése céljából, hogy nem marad egy felhasználó sem rádiós erőforrás nélkül. A szimuláció kimutatta, hogy a teljes frekvencia újrahhasználással összehasonlítva az algoritmus spektrálisan effektív megoldást jelent az interferencia problémákra, valamint a legalacsonyabb SNR-t tapasztaló cella határon lévő felhasználók helyzetének javítására. Egy PRB-re a W -ban kifejezett jel-zaj viszony számítása interferáló cellák esetén az alábbi összefüggés alapján történik:

$$\gamma_{PRB} = \frac{PL_M \cdot |H_M(f)|^2 \cdot P_{I_{x_M}}}{N_0 \cdot B_{ch_{PRB}} + PL_P \cdot |H_P(f)|^2 \cdot P_{I_{x_P}}} \quad (3.8)$$

ahol PL_M , $|H_M(f)|^2$ a makrocellától mért Pathloss, teljesítményerősítés, $P_{I_{x_M}}$ a kisugárzott teljesítménye W -ban, N_0 a csatornára ültetett AWGN (Additive White Gaussian Noise) spektrális teljesítménysűrűsége, $B_{ch_{PRB}}$ az erőforrásblokk sáv szélessége, PL_P , $|H_P(f)|^2$ a pikocellától számított Pathloss, illetve teljesítményerősítés, valamint $P_{I_{x_P}}$ a pikocella adóteljesítménye.

Makrohálózatokban a cellák közti interferencia koordináció (Inter-Cell Interference Coordination [ICIC]) célját szolgáló frekvenciatervezési eljárások (Hard Frequency reuse, Soft frequency reuse) már jól bevált eszközök, azonban e műveletek komplexitása egy pikocellákkal, femtocellákkal bővített többretegű (multi-layer/multi-tier) hálózati topológia kapcsán már rendkívül magas lenne, ezért HeNodeB-knél nehezen alkalmazható, így HetNet környezetben egy jóval rugalmasabb megközelítés szükségeltetik erőforrás elosztás terén.



9. ábra - Fix és Flexible Frequency Reuse módszerek makro- és pikocellák esetén [9]

Az utóbbi években több megoldás is született heterogén hálózati ICIC célján, többek közt egy femto/pikocellában alkalmazott Q-learning alapú spektrum allokációs algoritmus [7], valamint különböző ortogonális frekvencia kiosztásos eljárások a szomszédos állomások közt, melyek valóban hatékonyak a cell-edge user-ek átviteli sebességét tekintve, azonban jelentősen degradálják a hálózat spektrális hatékonyságát az adóteljesítmények limitálása, illetve a közös frekvenciasávok újrakiosztása révén.

Dolgozatom keretein belül, [7] nyomán egy újszerű megközelítést alkalmazok. Célom egy flexibilis spektrum felhasználási algoritmus (Flexible Spectrum Usage Algorithm for HetNets [FSUAH]) implementálása HetNet-ek részére egyesített ICIC és felhasználó ütemező működtetésével. Ez az FSUAH először egy Proportion Fair (PF) alapú ütemező alkalmazásával tesz kísérletet egy tervezett átviteli sebesség szolgáltatására a cell-edge user-ek számára. Ha ez az eljárás önmagában nem elégséges, az ICI-t csökkenti azért, hogy dinamikusan redukálja a femto/piko user-eknek kiosztható PRB-k számát.

4.1 Az FSUAH algoritmus

Az FSUAH módszer dedikáltan OFDMA alapú hálózatokhoz fejlesztve, amelyekben az időben és frekvenciában is osztott erőforrás egységek a már korábban ismert fizikai erőforrás blokkok. Habár az algoritmus a makro-, és pikocellákban egyaránt fut, a spektrum szétosztását kizárólag a piko user-ek számára szabályozza, ezért a makrohálózatban az általánosan használt Hard Frequency Reuse sémát feltételezünk.

Valahányszor egy eNodeB felhasználói magas interferenciát tapasztalnak egy adott PRB-n, az állomás visszacsatolást küld a környező Home NodeB-knek erről, melyet egy High Interference Indicator (HII) [9] jelzés reprezentál, mely tartalmazza az interferáló erőforrás blokkok indexét, hogy azokat a piko/femto user-ek közt egy adott időintervallumig ne lehessen kiosztani. Ezt az indikátort leszámítva, más kooperációra nincs szükség az eNodeB-k és Home eNodeB-k között.

4.2 Működési Pontok

Az ún. működési pontok (operating points) koncepciójának lényege az, hogy egyfajta triggereseményként funkcionálnak az FSUAH állapotátmenetei számára. E pontokat két metrika (cell-edge user throughput [R_{ce}], average user throughput [R_{av}]) alapján definiálunk és ábrázolunk 2 dimenziós koordináta-rendszerben, ezáltal grafikusán reprezentálva a cell-edge user-ek által tapasztalt átviteli sebességeket, valamint az erőforrás elosztás fairness-t köztük. A fairness fokát az R_{ce}/R_{av} arányszámmal deklaráljuk; minél magasabb fokú a fairness, annál jobban konvergál ez az arány az 1-hez.

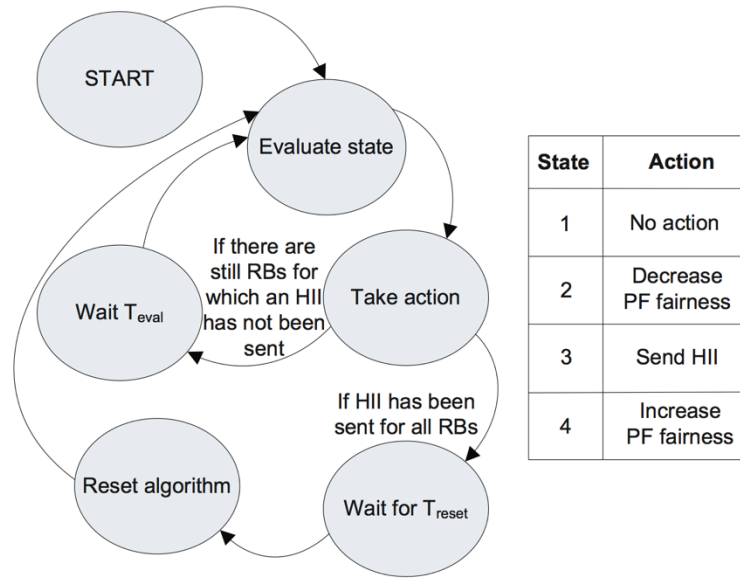
A referencia-cikk alapján implementált alvívő-allokációs algoritmus tervezése során különös figyelmet fordítottak a fairness előírások teljesítésére. A rendszerben az elvárt fairness a felhasználói sebességekre (R_{ce}) vonatkozik, vagyis minden felhasználóhoz tartozik egy szám, aminek az arányában szeretne részesülni a rendszer sávszélességéből. A Proportional Fair (PF) algoritmus, mely az erőforrás allokációt végzi a felhasználók számára, a

$$M_j = \frac{R_{ce_j}^\alpha}{R_{av_j}^\beta} \quad (4.1)$$

metrika felhasználásával üzemel, ahol d a j -dik cell-edge user által tapasztalt jelenlegi átviteli sebesség az adott PRB-n, r pedig egy korábbi időintervallumra átlagolt átviteli sebessége. Az α és β paraméterek pedig a fairness-t határozzák meg. Ha α -t konstansként rögzítjük amellet, hogy β értékét növeljük, emelkedik a PF fairness, fordított esetben pedig csökken. Az éppen vizsgált erőforrásblokk a legmagasabb M értékkel rendelkező felhasználó számára kerül allokálásra. Az α és β változókat módosítva kapjuk a már említett operating point-okat, ezek pontok alkotják az ún. működési görbéket (operating curves). Minden ilyen görbét állandó interferencia körülmények mellett kapunk meg, ha azonban változnak (pl. módosítjuk a makrocella és a pikocella által felhasznált azonos frekvenciasávok mennyiségét), újabb görbét kapunk (lásd 11. ábra).

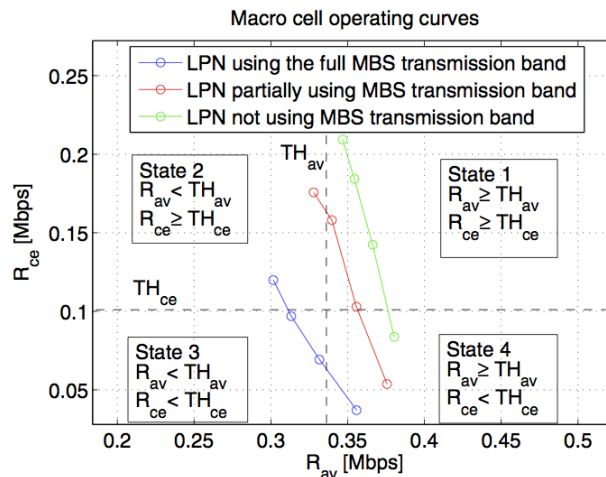
4.3 Algoritmus a makrocellában

A cél az, hogy teljesüljön két követelmény, melyeket a TH_{ce} (Cell-Edge User Throughput Threshold) és TH_{av} (Average User Throughput Threshold) küszöbszintek reprezentálnak. Az FSUAH elsődlegesen a PF paraméterek módosításával próbálja meg a szükséges kondíciókat produkálni, csak az esetben küld HII-t és redukálja le a pikocella felhasználók számára kiosztható PRB-k számát, ha ez sikertelen. Belátható, hogy ez implicit módon meghatározza, hogy melyik görbén járunk éppen. A makrocella minden R_{ce} és R_{av} értékre elvégzi a feltétel vizsgálatokat ezáltal meghatározva négy operating state-et, melyek a makrocellában futó FSUAH vázát adják.



10. ábra - A makrocella FSUAH folyamatábráját [8]

A kezdeti inicializálás után az algoritmus periodikusan megállapítja az cell-edge userek számára az operating state-et egy T_{eval} idő alatt. Erre azért van szükség, hogy pontosan megfigyelhető legyen művelet hatása az operating point-on. Ha egy t időpillanatban 2-es, illetve 4-es Operating State-ben vagyunk, akkor a $t+1$ időpillanatra az algoritmus a fairness fokának megfelelően elmozdítja az operating point-ot ugyanazon a görbe mentén. Más esetben, ha 3-as állapotot konstatál a művelet, a makrocella HII jelet küld a vizsgált PRB-n interferáló pikocellának. Ezáltal a $t+1$ időpillanatban az Operating Point átkerül az egyel jobbra lévő üzemeltetési görbére, az ideális 1-es State-be jutva.



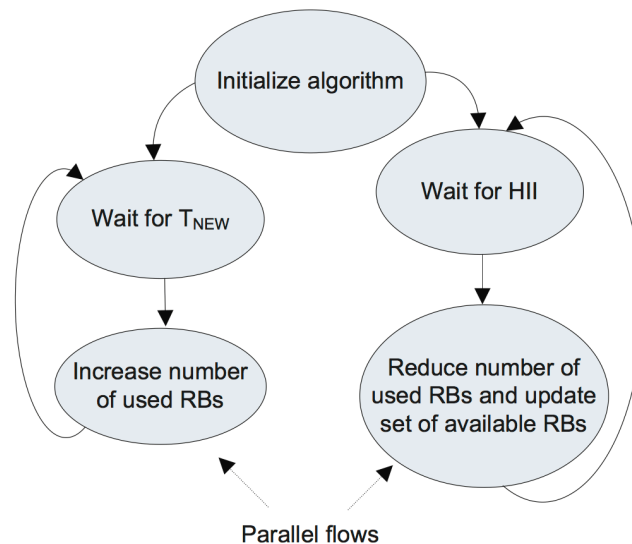
11. ábra - A makrocella FSUAH szerinti működési görbék [9]

A makrocella állandó jelleggel nyilvántartja azokat a PRB-eket, melyekre HII parancsot küldött. Ha az általa használt összes blokk tiltásra került a pikocellában, egy T_{reset} intervallum alatt újrainicializálódik, ugyanis ezalatt végbemehetnek bizonyos

hálózati változások (pl. felhasználó eloszlás, hálózati terhelés változás, illetve az UE-k számának módosulása).

4.4 Algoritmus a pikocellában

Miután végbement a kezdeti inicializálás, az algoritmus két, párhuzamos folyamaton fut végig, melyből az egyik funkciója, hogy egy T_{NEW} periódusidőnként ciklikusan növeli a kiosztott PRB-k számát. A másik pedig limitálja azok számát a makrocellától beérkezett HII jelzések alapján, melyek a maszkolandó K db PRB indexét tartalmazzák. A pikocella ezeket a blokkokat egy adott T_L periódusig nem elérhetőnek tekint és figyelmen kívül hagy. Ez azt eredményezi, hogy ha az FSUAH-nek gyarapítania kell a piko user-ek által használt spectrum tartományát, csak a maszkolatlan, elérhető PRB-k tudja allokálni. Ekkor a pikocella kiválasztja azt az L db blokkot, amin a felhasználók a legmagasabb SINR-t tapasztalják. Egy bizonyos időintervallum eltelte után a letiltott PRB-eket a pikocella felszabadítja és ismét kiosztható státuszba helyezi.



12. ábra - A pikocella FSUAH folyamatábrája [8]

4.5 Paraméterek

Ahogy azt már említettem, a makrocellában két paramétert kell elsődlegesen rögzíteni peremfeltételként: TH_{ce} és TH_{av} , melyek azokat az átviteli sebesség értékeket jelölik meg, melyek már kielégítőnek tekinthetők a makrocellahatáron lévő felhasználók számára. Belátható, hogy ezen paraméterek növelésével az FSUAH kísérletet tesz a cell-edge és az average user throughput értékek növelésére.

Mivel egy az optimális TH_{ce} és TH_{av} tényezők megválasztására irányuló maximalizálási probléma megoldása túlmutat a dolgozat keretein, ezért a [7]-ben megadott ezakt értékeket alkalmaztam.

5 Szimuláció

5.1 Szimulációs környezet

A következőekben rátérek az előző fejezetben vázolt erőforrás elosztó algoritmus megvalósításának környezetére, implementációjára és néhány sarkalatos pontjára.

5.2 MATLAB

A szimulációs környezet implementálásához a MATLAB® programcsomag R2012a jelű kiadását használtam, az ütemező forráskódja annak szkriptnyelvén íródott. Hogy miért a MATLAB® keretrendszerére esett a választásom, azt több előnyös tulajdonsága is indokolta.

- Elsősorban numerikus és mátrixalgebrai feladatokra dolgozták ki, ezért koncepciójánál fogva egyszerűen és hatékonyan képes vektorokon és sokdimenziós mátrixokon műveleteket végezni. Figyelembe véve, hogy a szimulációm során alkalmazott algoritmusok legfőképpen nagy, több dimenziós mátrixokon történő műveleteket végeznek, a software e tulajdonsága sarkalatos pontja volt döntésemnek.
- A szkriptnyelv sajátosságai miatt – mátrix struktúrák egyszerű definíciója és kezelése – az implementáció is leegyszerűsíthető, átláthatóbbá tehető. A mátrixokkal kapcsolatos műveletek elvégzésére jelentős számú beépített függvény áll rendelkezésre, ezzel is elősegítve, hogy a forráskód megírásakor csak a fő funkcionalitással kell foglalkozni, nem kell például a mátrixaritmetikát külön leprogramozni.
- Rendelkezésre állnak úgynevezett Toolbox-ok, vagyis beépített függvénytárak, melyekben különböző műszaki és gazdasági területek legelterjedtebben használt műveleteinek, algoritmusainak implementációja található.
- Az adatok kiterjedt megjelenítési és ábrázolási lehetőségei állnak rendelkezésre: számos különböző fajta plot nagyfokú testreszabhatósággal, tehát erre a feladatra sem kell külön eszközt igénybe venni.

5.3 A MATLAB modulok

FSUAH.m: az ütemező törzsét alkotó „main” MATLAB® szkript, elején a szimulált rendszer fizikai és egyéb alapvető paramétereinek definícióival:

- a rádiós vivőjel frekvenciája [Hz],
- a rendszer sávszélessége [Hz],
- az OFDM alvivők sávszélessége (subcarrier spacing) [Hz],
- A fizikai erőforrásblokkok (PRB-k) száma,
- A szimulált, négyszög alakú terület oldalhosszai [m],
- A makro- és pikocellák koordinátái, illetve adóteljesítménye [dBm],

- AWGN teljesítménysűrűség [W/Hz],
- A felhasználók száma, kiindulási pozíciója és sebességvektora,
- A csatorna generálásához szükséges paraméterek (bázisállomás, felhasználói készülék magassága, távolsága, útszélesség méterben)
- A felhasználók számára meghatározott Fairness változók
- A fentiekből számított további paraméterek (pl. alvivő frekvencia-kiosztás, PRB adóteljesítmény-kiosztás, szimulációs periódus hossza)

A szkript további felelőssége az ütemezés vezérlése a megfelelő függvények sorrendhelyes meghívásán keresztül, illetve a többi komponens közötti információcserét biztosító változók tárolása és átadása.

Ez a modul látja el a 4. fejezetben bemutatott PRB-allokáció és interferencia-koordináció (ICIC) feladatát is, miután a csatornageneráló komponens az álvéletlen módszerrel előállított felhasználói mozgáspályák, a terjedési csillapítások és az ezek alapján számolt jel-zaj viszony (SNR) értékek felhasználásával átviteli sebességeket kalkulál. Majd miután az összes algoritmus lefutott, megvizsgálja az erőforrás-allokáció és az interferenciaszabályzás eredményességét.

wrap_around.m: a pseudo-random mobilitás modellt alkalmazó felhasználói mozgáspályák generálására szolgáló függvény. A rendszerben definiált felhasználók számára bázisállomástól mért véletlen távolságokat állít elő.

pathloss.m: A rádiós csatorna terjedési csillapítását határozza meg a megadott bemeneti paraméterek alapján az ITU-R M.2315 szabvány szerint (lásd 5.5 fejezet).

A bázisállomás magassága, a mobilkészülék távolsága, felszíntől mért magassága, az átlagos utcaszélesség, valamint az átvitelre felhasznált frekvenciasáv függvényében rögzített képletek alapján kiszámolja a felhasználónál jelentkező csatornacillapítás értékét dB-ben megadva.

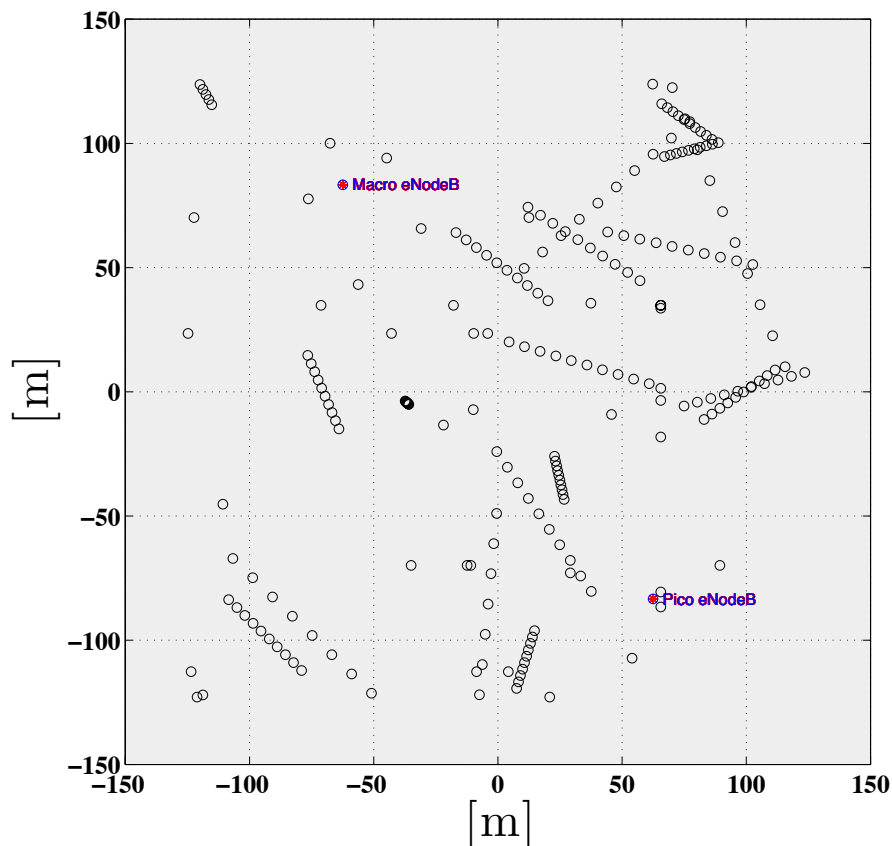
snrmapping.mat: Nem a dolgozat keretein belül készült állomány, mely a csatornageneráló függvényekhez használatos LTE-specifikus kapacitás és Bitrate mátrixokat tartalmaz. A file-t konzulensem bocsájtotta rendelkezésemre.

Bitrate_PRB.m: Az adott felhasználó OFDMA átviteli sebességét kiszámító függvény, mely az snrmapping.mat file-t hívja meg bemeneti állományként, majd a korábban, dB-ben számolt SNR értékek alapján Bitrate értékeket határoz meg a bemeneti mátrixok alapján interpolációs közelítő módszer segítségével.

5.4 Mobilitás modell

Mobil vezeték nélküli technológiáról lévén szó, általánosítható, hogy a felhasználók készülékhasználat, adatátvitel közben nem feltétlen rögzített pozícióban vannak, hanem nagy valószínűséggel mozognak, sétálnak, esetlegesen autóban ülve viszonylag nagy sebességgel változtatják helyzetüket. Ezért a szimuláció egyik legalapvetőbb mozgatórugója az, hogy a vizsgált területen belül a user-eket felruházunk egy bizonyos elven működő álvéletlen (pseudo-random) mozgási modellel, ez lehetővé teszi, hogy jó közelítéssel realiztikus felhasználói környezetet teremtsünk. Az általunk

felhasznált modell az egyik legelterjedtebb, és a 3GPP TR 36.839 V11.0.0-ban szabványosított ún. wrap-around mobilitás séma. Ezen modell érdemi része az, hogy szimulációs környezetnek egy legalább kétszintű hálózati topológiát kell tartalmaznia, ahol a felhasználók ICI-t tapasztalhatnak emiatt. A kezdeti elhelyezés után a user-ekhez véletlenszerű irányú és nagyságú sebességvektorokat társítunk, így egy véletlenszerű irányba indulnak el 0-360 fok között egyenletes eloszlással egy egyenes vonal mentén konstans sebességgel, amíg el nem érik a szimulációs terület határát (wrap-around contour), ahol eltűnnek, majd egy újabb véletlenszerű helyen egyenletes síkbeli eloszlással az adott területen, új sebességvektorral ismét belépnek a területre. Esetünkben ez a négyzet alakú vizsgált terület oldaléleit jelenti.



13. ábra - Wrap-around modell szerinti UE mozgáspályák és az eNodeB-k pozíciója

5.5 Pathloss modell

A mobil rádiós rendszerek alapvető kérdése a rádiócsatorna megfelelő leírása. Nyilvánvalóan az adó és a vevő között a jel a különféle tereptárgyakon és a talajon való reflexiók következményeképpen egyszerre több úton is terjed. Sűrűn lakott, beépített, forgalmas városi (urban) környezetben ez különösen igaz. A terjedési csillapítás (Path loss) a vevő mozgása, illetve a rádiócsatornában mozgó tárgyak miatt létrejövő, abban fellépő hatása [3]. A szimuláció elkészítését nagyban elősegítette, hogy ezeknek a csillapítási modelleknek elérhetőek a nagyon jó közelítést adó numerikus leírásuk. Dolgozatom során a [8] –ban is felhasznált, a [11]-ben leírt *3GPP HetNet Spec.: Urban*

Macro + outdoor RRH/Hotzone case 1 konfigurációt használom városi makro és pikocellák felhasználásával, melyre a [10] alapján hivatkozik. Valós környezetben legtöbbször nincs közvetlen átlátás a felhasználói készülék és a bázisállomás antennái között, tehát nincs a két végpont között közvetlen rádiós jelút, ezért az ilyen eseteket is kitüntetetten kell kezelni. Ez alapján megkülönböztetünk Line-of-Sight (LoS) és Non-Line-of-Sight (NLoS) leírásokat. Dolgozatomban a legvalóságosabb szimulációs eredmények elérése érdekében első sorban a NLoS eseteket vizsgáltam. A [11] által deklarált Pathloss formulák az alábbiak:

- Urban Micro (UMi):

LoS:

$$PL = 22.0 \log_{10}(d) + 28.0 + 20 \log_{10}(f_c) \quad (5.1)$$

NLoS:

$$PL = 36.7 \log_{10}(d) + 22.7 + 26 \log_{10}(f_c) \quad (5.2)$$

- Urban Macro (UMa):

LoS:

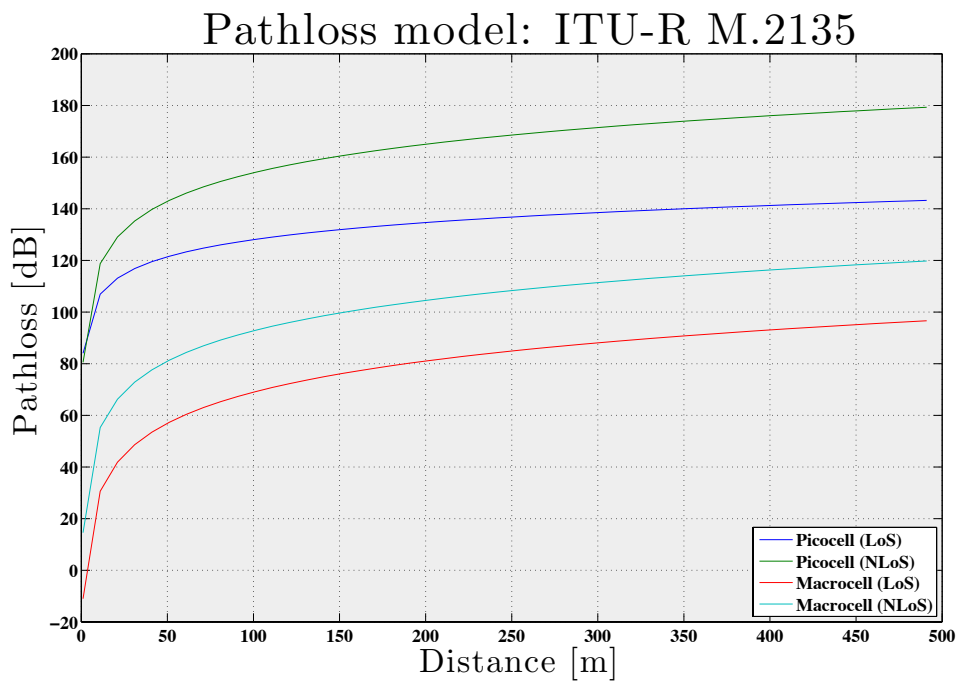
$$PL = 40.0 \log_{10}(d) + 7.8 - 18.0 \log_{10}(h'_{BS}) - 18.0 \log_{10}(h'_{UT}) + 2.0 \log_{10}(f_c) \quad (5.3)$$

NLoS:

$$PL = 161.04 - 7.1 \log_{10}(W) + 7.5 \log_{10}(h) - \left(24.37 - 3.7(h/h_{BS})^2\right) \log_{10}(h_{BS}) + (43.42 - 3.1 \log_{10}(h_{BS}))(\log_{10}(d) - 3) + 20 \log_{10}(f_c) - \left(3.2(\log_{10}(11.75h_{UT}))\right) \quad (5.4)$$

ahol

- d : a felhasználói készülék bázisállomástól mért távolsága [m],
- f_c : a rádiós vivőjel frekvenciája [Hz],
- h_{BS} : a makro bázisállomás tényleges magassága [m],
- $h'_{BS} = h_{BS} - 1,0$ [m],
- h_{UT} : a felhasználói készülék tényleges antenna magassága [m],
- $h'_{UT} = h_{UT} - 1,0$ [m],
- W : utca szélesség [m]



14. ábra - Az ITU-R M-2135 Pathloss modell

6 Szimulációs eredmények

E fejezet célkitűzése a szimuláció és az azzal kapcsolatos beállítások bemutatása, valamint eredmények, tapasztalatok kiértékelése, elemzése. A referencia-algoritmus hibáinak, gyenge pontjainak feltárása, valamint az egyéni megoldással való összevetése és a továbbfejleszthetőség irányvonalának kitűzése. Mint ahogyan azt az előző, 5. Fejezetben említettem, a szimulációs környezetet a MATLAB® program szolgáltatta.

6.1 A rendszer paraméterei

Az erőforrás allokáló algoritmus teljesítőképességének vizsgálatához a többvívős alrendszer paramétereit [7] alapján, a rádiós csatorna fizikai jellemzőit az [11] alapján határoztam meg, beleértve a terjedési csillapítást is, melynek modellje nagyvárosi (Urban) környezetre értendő. A teszt elvégzése előtt definiáljuk a konstans bemeneti értékeket. Ezek jellemzően technikai paraméterek, amelyek a teljes szimuláció alatt ugyanazok lesznek, illetve tetszőlegesen állíthatók.

A teszt konstansok, illetve felhasznált értékük:

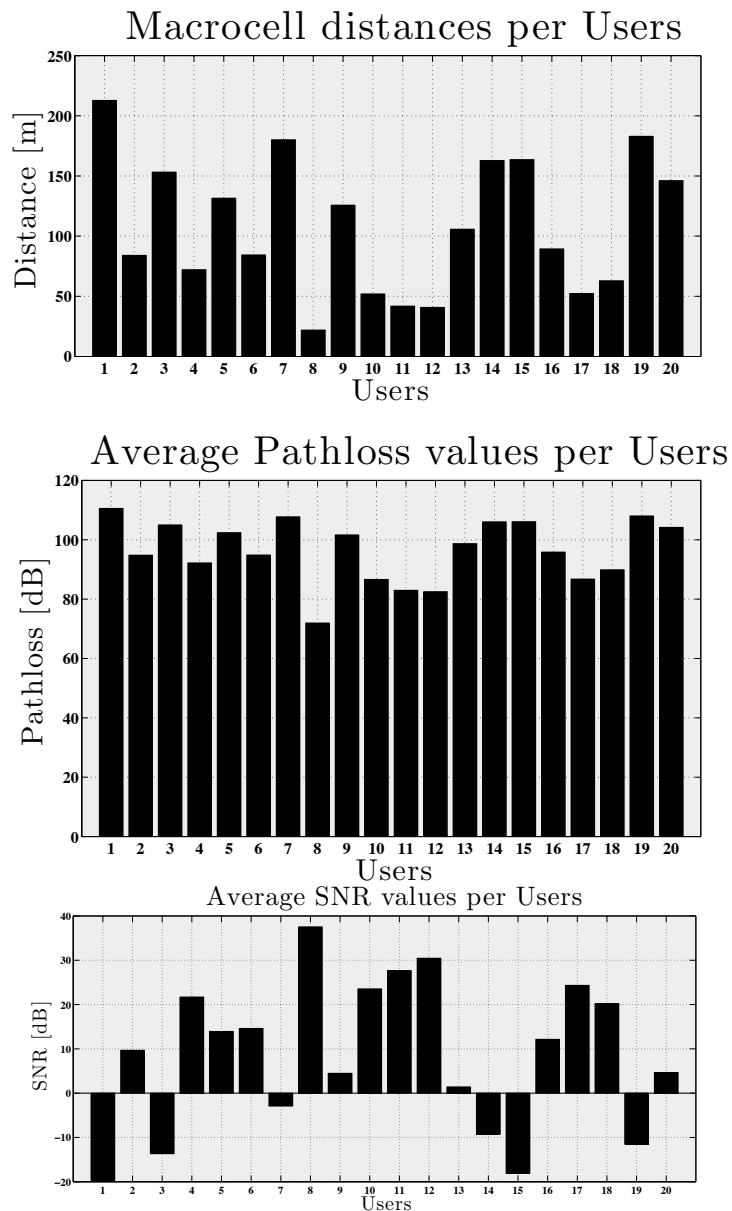
- Rendszer sáv szélessége: $B_{ch} = 10$ Mhz
- Rádiós vivőjel frekvenciája: $f_c = 2$ GHz
- Erőforrásblokkok sáv szélessége: $B_{ch_{PRB}} = 180$ kHz
- Erőforrásblokkok száma: $N_{PRB} = 50$ db
- AWGN teljesítménysűrűség: $N_0 = -174$ dBm/Hz
- makrocella és pikocella adóteljesítményei (P_{Tx_M}/P_{Tx_P}): 46 dBm/30dBm
- Bázisállomás és mobil állomás magasságok (H_{BS}/H_{UE}): 25 m/1,5 m
- Utca szélesség: $W_{str} = 20$ m
- A szimulált, négyszög alakú terület oldalhosszai: $L_{area} = 300$ m
- Átlagos épület magasság: $h = 20$ m
- Felhasználók száma: $N_{UE} = 20$
- Az algoritmus futásához szükséges szimulációs periódus: $N_{sim} = 10$
- A felhasználókhöz rendelhető (α, β) Fairness együtthatók: (1; 2), (1; 1,2), (1; 1), (1,2; 1), (1,4; 1), (1,6; 1), (1,8; 1), (2; 1), (4; 1)
- Az algoritmus alapjául szolgáló küszöbértékek (TH_{ce}, TH_{av}): Set 1: (250, 60), Set 2: (300, 80), Set 3: (350, 100) [kbps]
-

6.2 Referencia algoritmus

Az előző fejezetben megadott paraméterekkel a kezdeti inicializálásnál egy makrocellával lefedett $300 \cdot 300$ m-es területen elhelyezünk egy kisebb adóteljesítményű pikocellát. Mivel lefedettségi területük átfedésben van, és ugyanazt spektrumot használják, implicit következik, hogy interferencia jelenségek fognak fellépni.

Ahogy azt már korábban említettem, a szimuláció elsődlegesen a Makro cell-edge user-ek alvivő-allokációs mechanizmusát, valamint a pikocellától DL irányban elszenvedett interferencia-helyzetét hivatott kontrollálni, ezért a Proportional Fairness algoritmus csak a makrocellában van megvalósítva, a pikocella felhasználók erőforrás elosztásának megvalósításától most eltekintünk.

A megvalósított mobilitás és Pathloss modell alapján az algoritmus a futás elején legenerált véletlenszerű felhasználói pozíciók és a csatnageneráláshoz szükséges bemeneti paraméterek alapján (5.2) és (5.4) összefüggések felhasználásával kiszámolja a terjedési csillapítást mind a makrocellától, mind a pikocellától számított távolságok alapján, majd (3.8) szerint SNR értékeket kalkulál. A felhasználókra lebontott eredmények figyelhetők meg a 15. ábrán. Felülről lefelé haladva láthatók a user-ek makrocellától mért távolsága, valamint az alvivő kiosztás alapját képező csatnacsillapítások és jel-zaj viszonyok.



16. ábra - A csatornahasználat a felhasználók szemszögéből

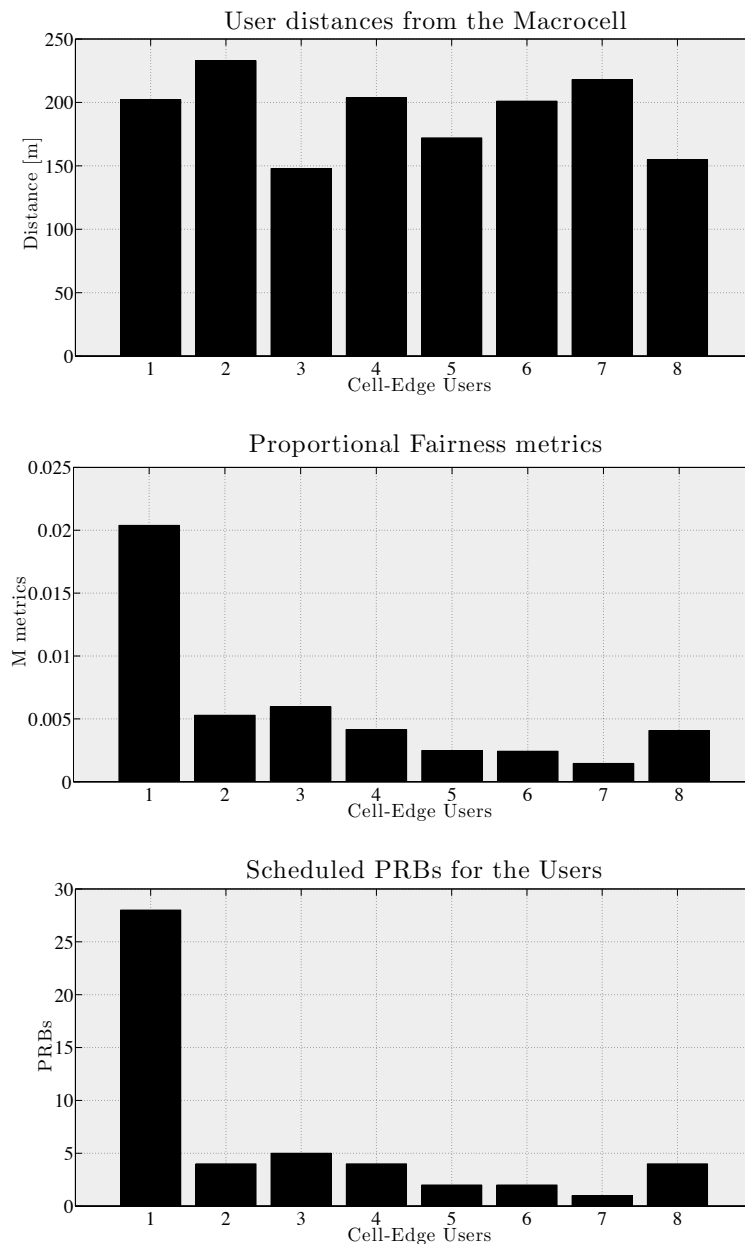
Megfigyelhető, hogy a véletlenszerű távolságeloszlás és csatornacillapítások nyomán számolt SNR értékek is jól követik az előző két mennyiség oszlopainak mintázatát. A 1. és 15. user viszonylag nagyobb, 213, illetve 163 m-es távolsága és magas Pathloss értékeik következtében jel-zaj viszonyuk nagymértékben leromlik, ezért az interferáló pikocellától számított kedvezőbb csatornatulajdonság következtében (3.8) alapján az SNR-ek már a -19, illetve -17 dB-es tartományba esnek. Megjegyzendő, hogy az ábrán reprezentált értékek PRB-kre átlagolt eredmények.

A szimuláció következő lépéseként az algoritmus a pikocellától való távolság alapján kiválasztja a makrocella határán mozgó felhasználókat. Ezt a távolságot egyezményesen úgy állapítottam meg az SNR szintek figyelembevételével, hogy elég távol legyen a makrocellától ahhoz, hogy a legtöbb PRB-n elegendően rossz csatornaviszonyokkal rendelkezzen. Empirikus módszerrel ezt a távolságot egy

$d_p = [80, 20]$ m-es intervallumban határoztam meg, ahol d_p a felhasználók pikocellától számított távolsága m-ben.

Amint megtörtént a cell-edge user kiválasztás, az előnyösebb csatornaátvitellel rendelkező UE-k irrelevanciája miatt az ő ütemezésüktől eltekintek, a Proportional Fairness ütemező és az ICIC mechanizmus tehát elsődlegesen az alacsony jel-zaj viszonytal rendelkező user-ekre lesz alkalmazva. A 17. ábra alapján esetünkben a 20 véletlenszerűen elhelyezett felhasználóból 8 „felelt meg” a cell-edge user-ek kiválasztásához szükséges peremfeltételnek.

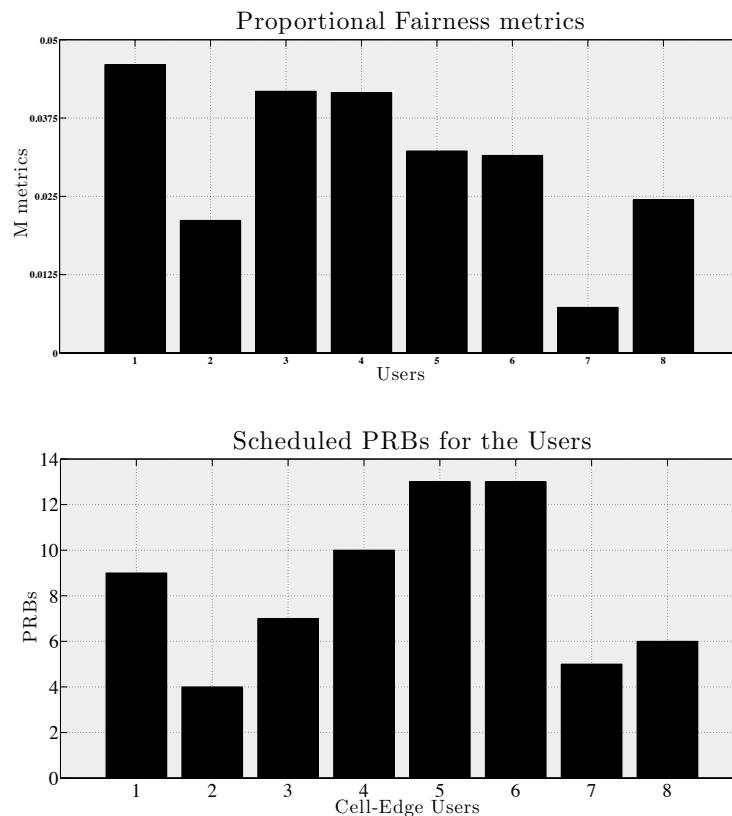
$N_{sim} = 10$ szimulációs periódus után az algoritmus kiszámolja a PF-hez szükséges jelenleg tapasztalt R_{ce} és az eltelt időre átlagolt R_{av} változókat, valamint (4.1) alapján M fairness értékeket kalkulál, majd megtörténik a PRB-k kiosztása ez által. A kezdeti inicializálásnál a fairness együtthatókat (1, 2)-re választottam.



15. ábra - A kezdeti ütemezés kimenetele

Megfigyelhető, hogy a véletlenszerű távolságeloszlás és ez által a csatornacsillapítások ellenére az allokált alvivők száma közelíti a fairness metrikák arányait, tehát az algoritmus biztosítja a viszonylagos fairnessst már a kezdeti ütemezésnél. Az 1-es számú felhasználó ugyan magasan több PRB-hez jutott, ez valószínűleg annak köszönhető, hogy nagy sebességgel közeledett a makro eNodeB felé és ezáltal javult a jel-zaj viszonya, ezért a szimulációs periódus végén mért átviteli sebessége nagyobb lett a legtöbb PRB-n, ez okozhatta, hogy az egyezményesen rögzített fairness együtthatók mellett magasabb lett az M hányadosa pedig nem maradt erőforrás nélküli UE.

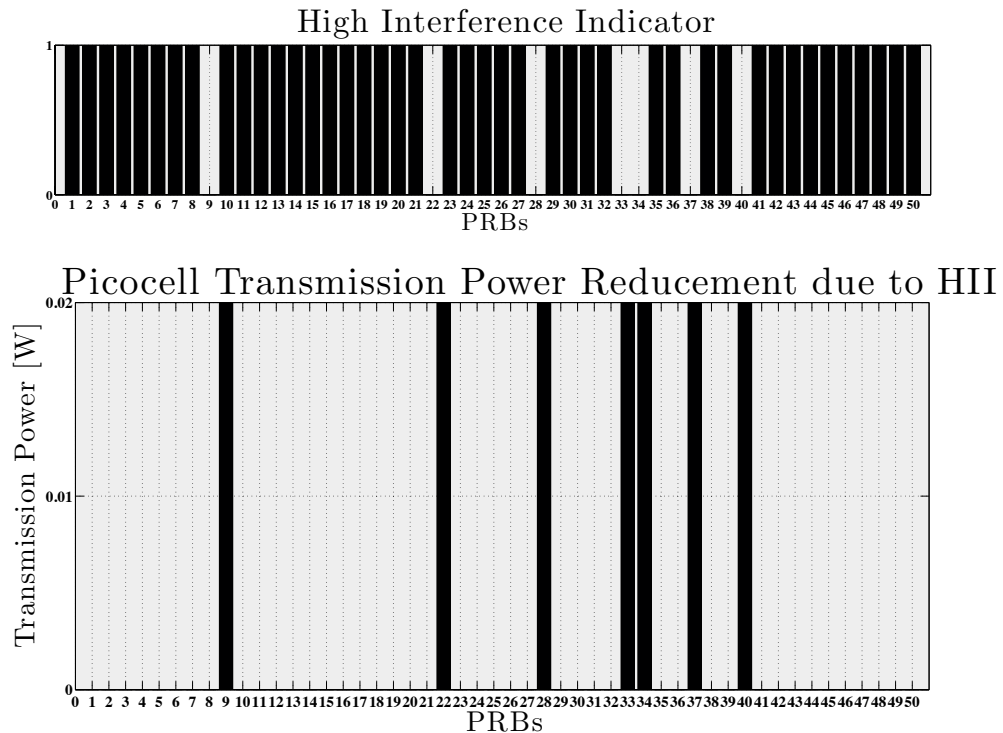
A letelt N_{sim} periódus végén, miután lezajlott az erőforrás-allokáció, a 4.3 fejezetben kifejtett módon TH_{ce} és TH_{av} küszöbértékek megválasztásával az FSUAH minden felhasználóra PRB-nként megállapítja az Operating State-ket. Ez a 11. ábrán szemléltetett relációk vizsgálatával történik. Az algoritmus ez alapján emeli, vagy csökkenti a fairnessst, esetleg HII üzenetet küld az interferáló pikocellának, mely a kimaszkolandó PRB-k indexét tartalmazza. A fairness arányokat a 6.1 alfejezetben deklarált α és β értékek módosításával változtatja. A HII kimaszkolást a pikocella úgy oldja meg, hogy az adott erőforrásblokkra kiosztott adóteljesítményt nullára állítja, ezzel eliminálva PRB-n okozott interferenciát.



16. ábra - A második ütemezés kimenetele

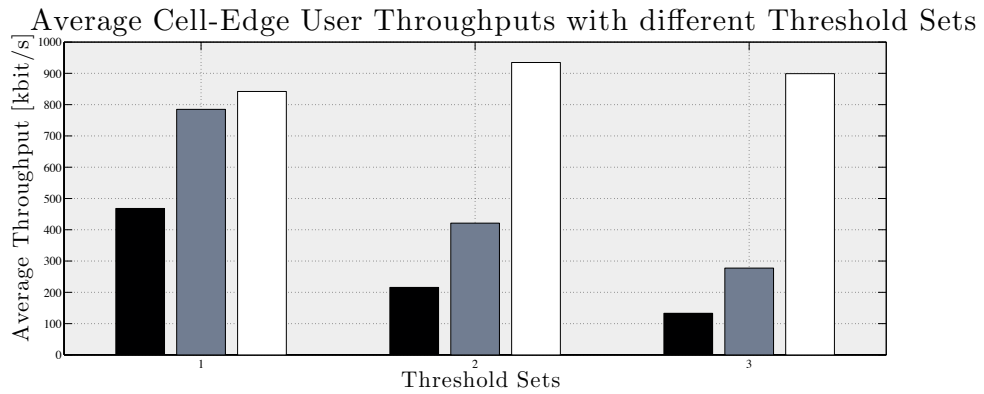
Miután az Operating State vizsgálat lefutott minden erőforrásblokkra, ismét elindul egy szimulációs periódus, hogy a paramétermódosítások sikeressége vizsgálható legyen, valamint ismételen kalkulálásra kerüljenek többek között a szükséges időátlagolt értékek. Ez valósítja meg lényegében az T_{eval} időzítőt, mely alatt

kiértékelhető az algoritmus eddigi lépéseinek eredményessége, vagy esetlegesen T_{reset} időzítőként alapállapotba állítsa a rendszerváltozókat. A 17. ábra jól reprezentálja, hogy már első lefutása után jól teljesített az FSUAH a PF algoritmussal karöltve. Az Operating State vizsgálatnak köszönhetően módosított fairness együtthatók következtében a PRB-k allokálása szemmel láthatóan igazságosabb módon történt, az eddig mohó módon túlzottan erőforrás-igényes 1-es UE-nek kiosztott kapacitást jóval egyenletesebben allokálta az eddig erőforrásban szűkölködő felhasználók között, ezáltal egy sokkal igazságosabb erőforrásblokk-kiosztást eszközölve.



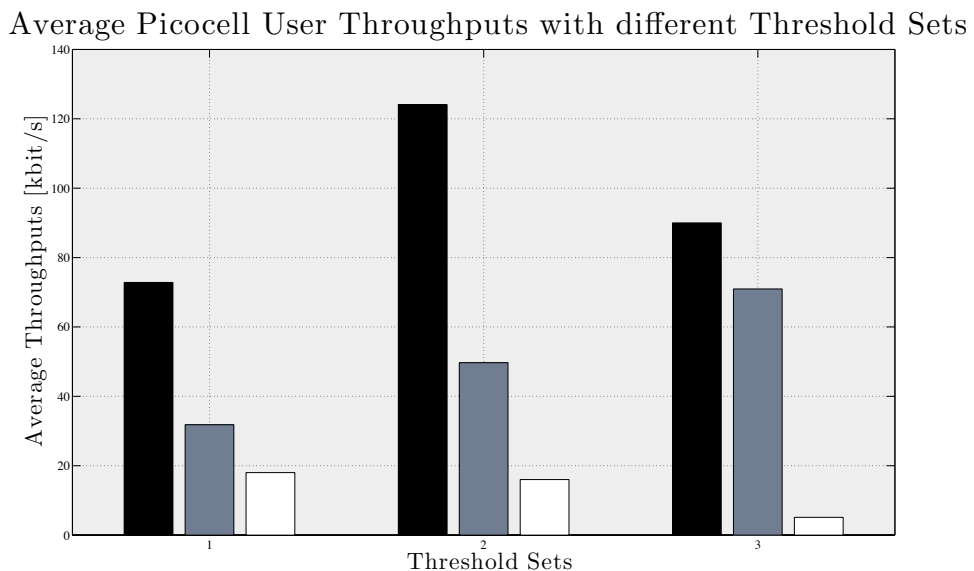
17. ábra - A HII üzenet és a statikus teljesítményszabályozás

A HII üzenet minden egyes FSUAH ciklus után elküldésre kerül a pikocellának, mely felhasználásával az pontosan meg tudja állapítani, mely PRB-k adóteljesítményét kell lekapcsolnia ahhoz, hogy az azon interferenciát elszenvedő felhasználó jel-zaj viszonyát javítsa ez által. Ez úgy valósul, meg hogy az algoritmus az indikátor vektor adott elemét 1-es értékre állítja. A bázisállomások a rendelkezésre álló 46 dBm/30 dBm-es adóteljesítményeket egyenletesen osztják szét a PRB-k között, mely a pikocellák esetén 0,02 W-t jelent. A HII üzenet hatására a megegyező indexszel rendelkező erőforrásblokkon ezt az értéket csökkenti nullára. A 19. diagram alapján konstatálható, hogy ez egy nem túl elegáns megoldás, hiszen elég egy felhasználó, aki annyira kedvezőtlen csatornatulajdonságokkal rendelkezen a legtöbb PRB-n, hogy Operating State 3-ba kerüljön (10. ábra) és HII-t küldjön valamennyire, ezáltal a pikocella adóteljesítményét úgy leredukálva, hogy az arra csatlakozó felhasználók nem marad kiosztható kapacitás.



18. ábra - Az átlagos cell-edge átviteli sebességek a különböző Threshold Set-ek alapján

A 18. diagramon a hármféle Threshold Set beállítás mellett elérhető, PRB-re átlagolt cellahatári felhasználói adatsebességeket láthatjuk. Az ábra szerint levonva a konzekvenciákat, a referencia algoritmus egy nagyon hatásos megoldás a makro user-ek szemszögét tekintve, ugyanis bármelyik Threshold Set-et tekintve rendkívül hatékony megoldás az elérhető átviteli sebességek növelésére, csupán a rendszer „beállási ideje” eltérő a három esetben. Az interferáló PRB-k kiiktatásával jól láthatóan könnyedén biztosíthatók a 850-900 kbit/s körüli throughput értékek, melyek *TH Set 2*, illetve *TH Set 3*-as esetekben kb. 300%, illetve 500%-os növekedést eredményezett. Azonban a piko user-ek átviteli sebességének alakulását figyelmen kívül hagyja. A 12. ábra alapján belátható, hogy az FSUAH a pikocellában csupán a PRB-k maszkolását végzi a beérkező HII üzenetek alapján. Ha az összes erőforrásblokk adóteljesítménye lekapcsolásra került, egy T_{reset} intervallum leteltével az algoritmus valóban újból elérhetővé teszi az összes PRB-t, de a szimulációs periódusok lefutása alatt akár hosszabb ideig is kielégítő erőforrás-mennyiség nélkül maradnak a piko user-ek.



19. ábra - A pikocella user-ek PRB-nkénti átlagsebessége a különböző Threshold Set-ek szerint

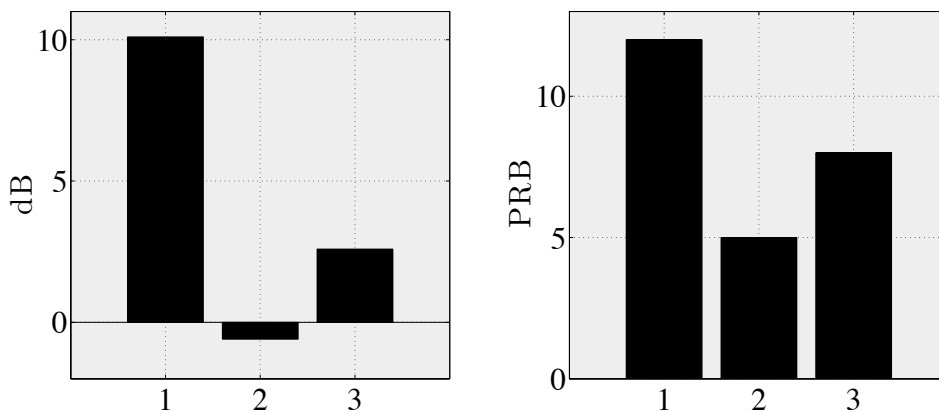
A 20. diagram a pikocella felhasználók átviteli sebességének alakulása látható 3 szimulációs alatt a háromféle Threshold Set beállítás mellett. A 3. periódus végén láthatóan már szinte az összes PRB-re HII érkezett, ugyanis az adóteljesítmények annyira leredukálódtak, hogy a felhasználók által tapasztalt hasznos jelet szinte teljesen elnyomja a makrocella okozta interferáló zajteljesítmény.

6.3 QoS a pikocella felhasználói számára

Az előző alfejezetben tapasztaltak alapján felmerül a kérdés, milyen megoldás lenne alkalmas annak érdekében, hogy bizonyos szintű QoS előírásokat alkalmazva a pikocella user-ek sem szenvedjenek hiányt spektrális kapacitásban annak révén, hogy az FSUAH algoritmus a HII üzenetek alapján teljesen lekapcsolja az egyes PRB-k adóteljesítmény. Ezen a ponton jönnek segítségünkre a 3.4 alfejezetben ismertetett eICIC technikák. Különösen a teljesítményszabályzás alapú metódusokat érdemes szemügyre venni, mert a pikocella adóteljesítményének dinamikus vezérlése talán legjárhatóbb út az FSUAH még hatékonyabbá tételéhez.

6.3.1 Ütemező algoritmus a pikocellában

A [7] alapján megvalósított FSUAH algoritmus nem tárgyal semmiféle intelligensebb ütemező mechanizmust. A mi szemszögünkből a legfontosabb célkitűzés a pikocella user-ek helyzetének javítása. Ennek elsődleges szempontja egy olyan erőforrás-allokációs algoritmus megvalósítása, amely elegendő rádiós kapacitást tud biztosítani a felhasználóknak, igazságosan elosztva. A 4.2-es alfejezetben ismertetettekhez hasonlóan egy fairness előírások alapján működő ütemezőt valósítottam meg a 4.1-es összefüggés alkalmazásával a pikocella user-ek aktuális és időátlagolt throughput értékei felhasználásával.



20. ábra – Három pikocella felhasználó SNR-je, valamint a kiosztott PRB-k

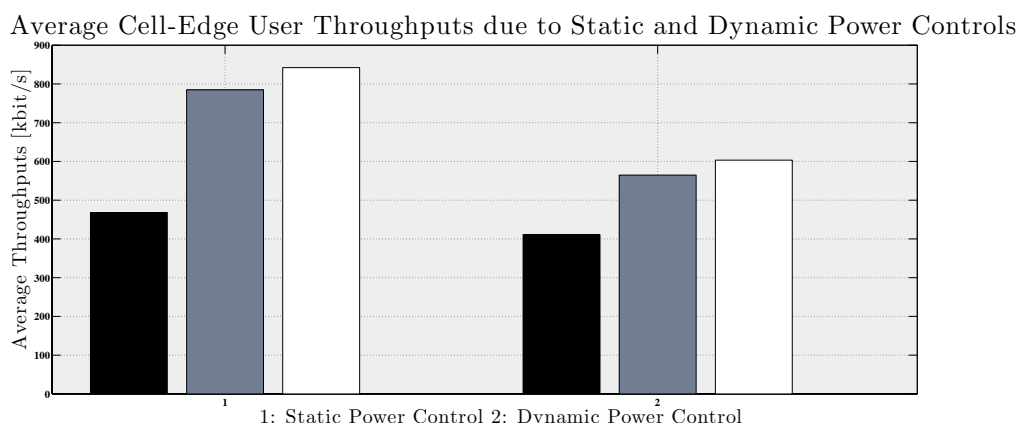
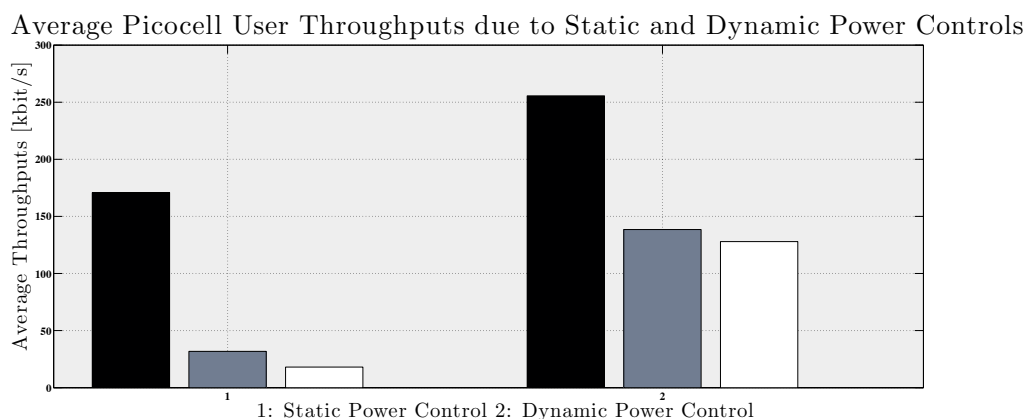
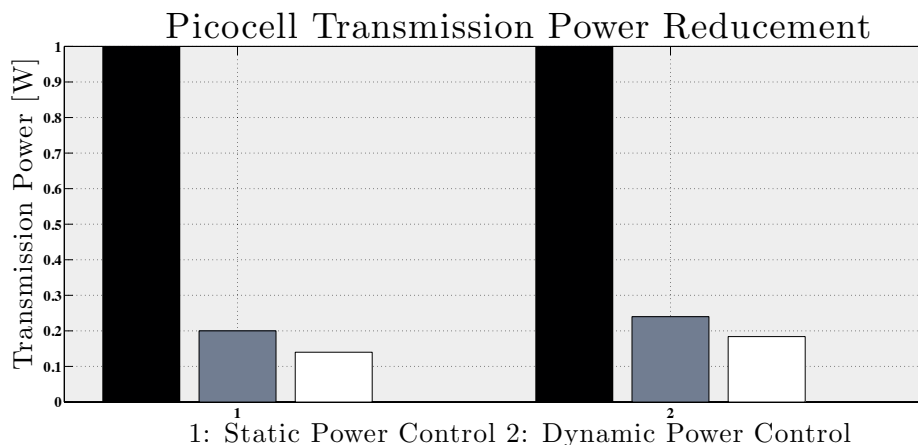
$N_{sim} = 10$ szimulációs ciklus lefutása során lezajlott ütemezést láthatunk a 20. ábrán három pikocella felhasználó esetén. Ahogyan azt már korábban a 15. ábra is szemléltette, az algoritmus a 4.1-es összefüggés alapján az összes felhasználónak M hányadost számol minden elérhető erőforrásblokkon. Jól mutatja a Proportional Fairness hatékonyságát, hogy a kedvezőtlen jel-zaj viszonyal (-0,6 dB) rendelkező 2-es user sem maradt erőforrásblokk nélkül, így biztosítható volt számára egy elfogadható, minimális sáv szélesség kiosztott 5 db PRB-vel még a számottevően előnyösebb (10,1 dB) csatornatulajdonságokkal rendelkező 1-es felhasználó mellett is.

6.3.2 Teljesítmény-szabályozás alapú eICIC

A 3.3.3-as alfejezetben ismertetett interferencia-szabályozó összefüggések szintén effektív megoldást jelenthetnek a pikocella user-ek hátrányos helyzetének kiküszöbölésére. A megvalósításukhoz szükséges változók, mért értékek (terjedési csillapít, adóteljesítmény, interferáló jel teljesítménye) nagy része már így rendelkezésünkre áll az FSUAH algoritmus implementációja során, ezért beillesztésük relatíve egyszerűbb az eltérő, idő-, és frekvencia-szabályozás alapú eICIC mechanizmusokhoz képest.

6.3.2.1 A Home eNodeB UE objektív SINR-je alapján

Az (3.5) és (3.6) összefüggések alapján megvalósított teljesítményszabályzási technika előnyös lehet olyan megfontolásból, hogy ha a pikocella felhasználói számára deklarálnunk egy elérni kívánt minimum SINR értéket, ezáltal egy explicit előírást adunk QoS szempontból. Empirikus módszer mentén haladva $SINR_{tar} = -10$ dB, valamint $P_{min} = 10$ dBm értékek választásával már elfogadható átviteli sebesség értékek érhetőek el. A többi szükséges mennyiség pedig már adott a szimuláció során, hiszen I által jelölt interferencia a makrocella kisugárzott teljesítményéből ered, valamint \widehat{PL} Pathloss is rendelkezésre áll, ezáltal nagymértékben megkönnyítve a technika implementálását az FSUAH megfelelő szakaszába.



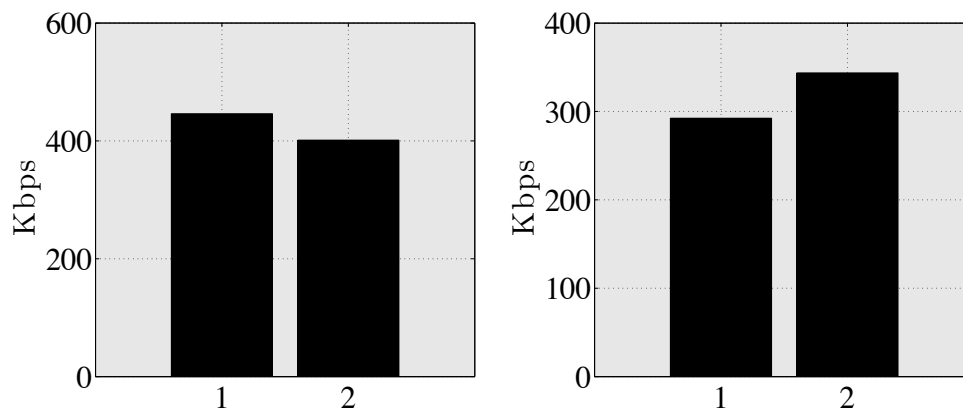
21. ábra - A statikus és dinamikus teljesítményszabályozás összehasonlítása adóteljesítmény és átviteli sebességek alapján

A referencia cikk által alkalmazott statikus, és az általam alkalmazott dinamikus teljesítményszabályozó eICIC metódus 3 szimulációs periódus eredményeit a 21. diagram szemlélteti. Megfigyelhető, hogy statikus lekapcsolás esetén a W-ban számított adóteljesítmény csökkenésével közel lineárisan esett a piko felhasználóknak biztosítható átlagos throughput, ami azt jelentette, hogy a harmadik periódus végén 150 mW-ra lecsökkentett adóteljesítmény mellett tizedére redukálódott throughput, ezzel szemben a másik technika esetén, közel azonos, kb. 180 mW-os kisugárzott teljesítmény mellett csupán a felére csökkent az elérhető átviteli sebesség. A dinamikus teljesítményszabályozás hatékonyságát jól mutatja, hogy a makro felhasználók

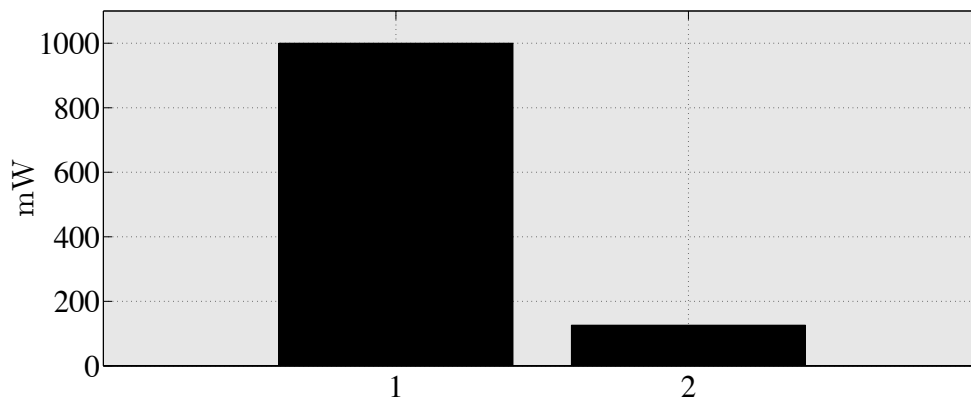
szempontjából csupán kb. 250 kbit/s-os, azaz 30%-os PRB-nkénti throughput növekedés feláldozása mellett a 3. periódus végére csupán 50%-os csökkenést eredményezett piko user-ek részéről, ami számszerűsítve kb. 125 kbit/s-os elérhető throughput-ot jelentett. Ezzel szemben statikus teljesítménykapcsolás esetében a túl sok kiiktatott PRB és az az által okozott adóteljesítmény csökkenés következtében a szimuláció során a 170-ről 20 kbit/s-re csökkent a pikocella user-ek átlagsebessége, ami 89%-os csökkenést jelent. Ez azt jelenti, hogy fejlesztési javaslatunk nagyon is sikeresnek mondható, a két megoldást összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy átlagosan kb. hatszoros throughput növekedést sikerült elérnünk.

6.3.2.2 A Home eNodeB-nél tapasztalt legmagasabb makro eNodeB teljesítményszint szerint

A 3.2-es összefüggés alapján megvalósított dinamikus teljesítményredukció alapja az, hogy PRB-nként megvizsgálja a HeNodeB-nél tapasztalható makrocella jelszinteket és a jelelnyomás mértéke szerint szabályozza adaptívan pikocella kisugárzott teljesítményét P_{\max} és P_{\min} szélsőértékek között. Az egyenletben szereplő α és β változók értékeinek megválasztására nincs egyezményes, explicit meghatározás, ezért a szimulációk során viszonylag hosszadalmas finomhangolást igényeltek. Előbbi multiplikatív, dimenzió nélküli, utóbbi dBm-ben megadott additív konstansként játszik szerepet az összefüggésben.



22. ábra - A makrocella és pikocella user-ek átviteli sebességének alakulása

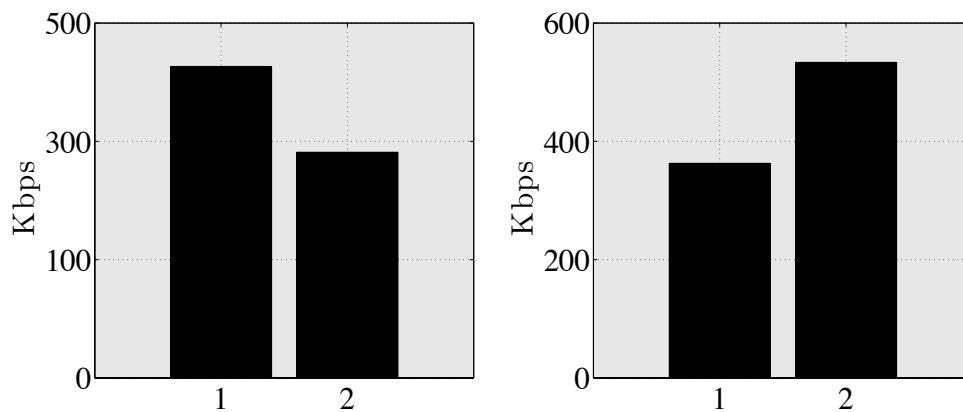


23. ábra – A pikocella adóteljesítményének alakulása

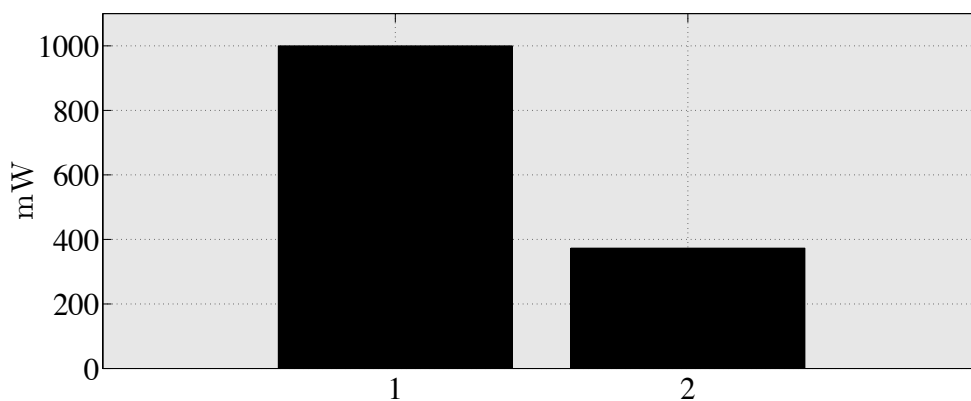
A tesztek során $\alpha = 1$ és $\beta = 20dB$ értékek bizonyultak a legjobb választásnak. Ezekkel a paraméterekkel átlagosan 50 Kbps-os sebességnövekedést sikerült elérni átlagosan egy PRB-n. Mindemellett a makrocella felhasználók kb. 10 %-os veszteséget könyvelhettek el. Ez közel sem nevezhető tetemes javulásnak az összhálózatra vett átvitel szempontjából, ha azt vesszük figyelembe, hogy a pikocella összesített adóteljesítménye 1 W-ról 126 mW-ra, azaz 12,6 %-ra csökkent.

6.3.2.3 A makrocella UE objektív SINR-je alapján

Az ebben a pontban tárgyalt metódus nagymértékben hasonló az előző két alpontban tárgyaltakkal. A 3.7-es összefüggés alapján megvalósított technika 6.3.2.2-höz hasonlóan egy elért kívánt minimum SINR értéket deklarál, de ez esetben a makrocella UE-k számára, így nem is veszi figyelembe az általa okozott interferáló zajteljesítményt, hanem a már a 6.3.2.3-as alpont által ismert α és β teljesítményszabályozó változók felhasználásával vesz vissza a pikocella adóteljesítményéből az interferenciát tapasztaló erőforrásblokkon P_{\max} és P_{\min} szélsőértékek között.



24. ábra - A makrocella és pikocella user-ek átviteli sebességének alakulása



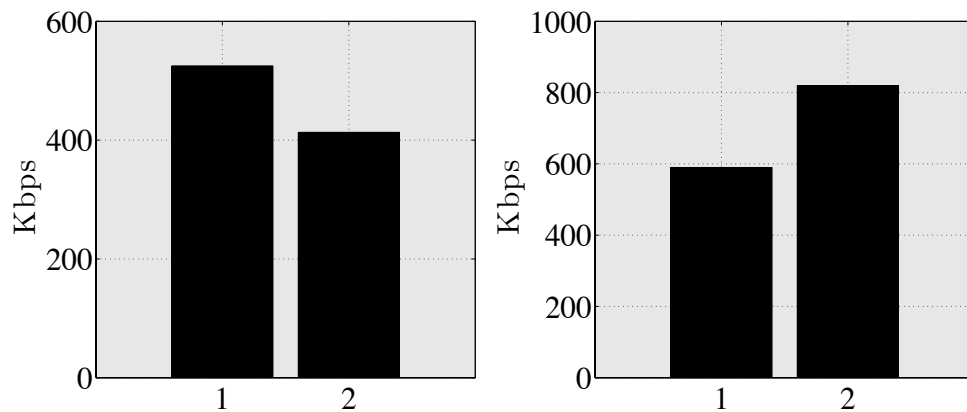
25. ábra - A pikocella adóteljesítményének alakulása

Empirikus módszer mentén haladva $SINR = -10dB$, valamint $\alpha = 1$ és $\beta = 20dB$ értékek választásával már kellően reprezentatív és számottevő javulást sikerült elérni összhálózati throughput terén. Az algoritmus segítségével 363-ról 534

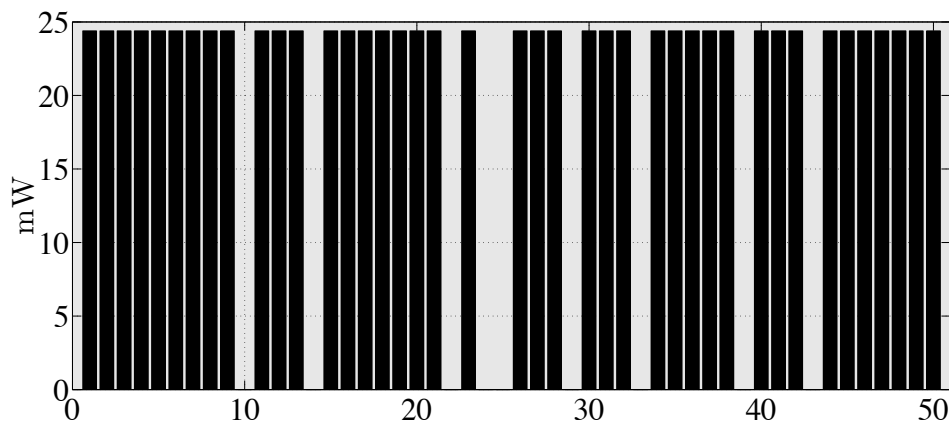
Kbps-re sikerült növelni a pikocella user-ek átlagos, egy PRB-re vetített átviteli sebességet az adóteljesítmény kb. 60%-os redukálása mellett. Kiváltképp ígéretesnek tűnik az eredmény, ha azt is figyelembe vesszük, hogy a makro felhasználóknak kb. 30 %-nyi kapacitást kellett beáldozniuk ennek érdekében.

6.3.2.4 Dinamikus teljesítményelosztás

Ezen alfejezetben egy saját elgondolás alapján megvalósított adóteljesítmény-elosztás segítségével teszek kísérletet a pikocella felhasználók helyzetének javítására. A HII indikátor feldolgozása után lekapcsolt PRB adóteljesítmények erőforrást szabadítanak fel. Ez alapozta meg egy gazdaságosabb energiagazdálkodás gondolatát. Az elv lényege az, hogy a lekapcsolt PRB-ktől megvont kapacitást úgy használnánk ki, hogy a megmaradó blokkok által hordozott hasznos jelteljesítményt a felszabaduló erőforrással egyenletesen megnöveljük, ezáltal javítva a pikocella user-ek SNR-jét és a vett rádiós jelek spektrális hatékonyságát.



26. ábra – A makrocella és pikocella user-ek átviteli sebességének alakulása



27. ábra – Teljesítményelosztás a PRB-ken

Mint ahogy azt a 27. ábra is mutatja, saját metódusom lényege, hogy a HII üzenet hatására lekapcsolt PRB-k adóteljesítményt „újrahasznosítjuk” és a rendelkezésre álló blokkok között egyenletesen szétosztjuk. Ahogy azt az 6.1-es fejezetben már említve volt, a pikocella maximális adóteljesítménye 30 dBm, ami W -ban kifejezve, PRB-re elosztva 20 mW-ot jelent. $N_{sim} = 10$ szimulációs ciklus lefutása során az algoritmus 9 blokkot kapcsolt le, majd a felszabaduló erőforrás 1.44 W-os többletteljesítményt eredményezett az elérhető PRB-ken. Ennek köszönhetően a 25 %-os adatsebességbeli növekedés volt tapasztalható átlagosan egy blokkon a piko user-ek szempontjából, ami az eddigi technikákat tekintve nem kiemelkedő eredmény. Azonban ha azt vesszük figyelembe, hogy ezt úgy értük el, hogy közben pikocella összteljesítményét nem kellett csökkentenünk, valamint a makrocella felhasználók kb. 20 % átlagos throughput-ot kellett, hogy beáldozzanak ennek jegyében, igen kiegyensúlyozott, kompromisszumos megoldásnak bizonyult.

6.3.3 Konklúzió

Belátható, hogy a makrocella felhasználóknál az előbbieken vizsgált metódusokkal valóban nem érünk akkora kapacitásbeli növekedést, mint a statikus teljesítménylekapcsolás esetén, azonban elegendően reprezentatív, hogy amellet, hogy a pikocella adóteljesítményének adaptív csökkentésével jelentős mértékben csökkentjük a makro felhasználók számára káros, közös csatornás interferencia-tényezőt, meggátoljuk a piko user-ek szolgáltatásminőségének kritikusán alacsony szintre csökkenését, ezen felül a teljes hálózat összkapacitása is számottevően javítható az eICIC technikák alkalmazásával. Valamint saját elgondolás alapján megvalósított metódusommal rávilágítottam arra, hogy jelentős mértékben biztosítható ugyanez a javulás akkor is, ha nem lecsökkentjük, vagy lekapcsoljuk a pikocella adóteljesítményét, hanem a kialakult interferencia-helyzetekhez alkalmazkodva adaptívan erőforrásblokk szinten átcsoportosítjuk.

7 Összefoglalás

A lezáró fejezetben röviden összefoglalom a dolgozat elkészítése során végzett munkát, illetve ejtek pár szót a továbbfejlesztés lehetőségeiről.

7.1 Összegzés

Dolgozatomban először áttekintést adtam a negyedik generációs mobil távközlő rendszerekben alkalmazott főbb technológiákról, bemutattam az LTE alapvető modulációs technikáját, az OFDM-et, valamint annak többfelhasználós közeghozzáférést biztosító kiterjesztését, az OFDMA-t az információátviteli rádiós közeg jellemzőinek ismertetésével együtt.

A 3. Fejezetben betekintést adtam a mobil cellás rendszerek strukturális felépítésére és a HetNet-ek, mint új architektúrális szabványok sarkalatos pontjaira, technikai kihívásaira, mint pl. interferencia problémakörére, valamint a már rendelkezésre álló ICIC technikákra.

A dolgozatom alapját képező erőforrás ütemező és interferenciaszabályozó algoritmus elvi működésének bemutatása után szimulációs környezetben alkalmazva rávilágítottam annak előnyeire, hátrányaira és hiányosságaira. A Proportional Fairness ütemező és az alapszintű ICIC metódus együttes alkalmazásával nagymértékű javulás volt elérhető a cellahatáron mozgó makrocella felhasználók átviteli sebességét tekintve, azonban nem túl elegáns teljesítményszabályozás a pikocella oldalán ahhoz vezetett, hogy rövidebb-hosszabb ideig a user-eknek egyáltalán nem jutott erőforrás, ezért az FSUAH algoritmusnak ezen oldala továbbfejlesztést igényelt. A megvalósított teljesítményelosztás és eICIC technikák révén úgy sikerült a pikocella felhasználók átviteli sebességét több, mint háromszorosára növelni, hogy az összteljesítményt tekintve nem történt nagyobb mértékű redukció a statikus megoldáshoz képest, emellett a makro user-ek körében szintén elfogadható javulást elérve.

7.2 Továbblépési lehetőségek

A munka lezárásaképpen megfogalmazok néhány feladatot, melyek megvalósítása növelheti az FSUAH algoritmus hatékonyságát, vagy kiterjesztheti az alkalmazhatóság határait, nagyobb részt ölelve így át a gyakorlati problémák területén.

- Jelen dolgozat keretein belül a felhasználók egyszerre csak egy antennával kommunikálnak. Népszerű és elterjedt terület mind a gyakorlatban, mind a kutatási, fejlesztési szférában a hozzáférési hálózat többantennás (MIMO), illetve a többfelhasználós, többantennás (Multi-User MIMO) kiterjesztése, mely az LTE és a HetNet-ek nagy kapacitást növelő megoldása. Dolgozatom témáját, jellegét tekintve ez jelentené a továbbfejlesztés szempontjából a legideálisabb irányvonalat.

Ábrák jegyzéke

1. ábra - Egy három alvivős OFDM jel spektrális alakja.....	5
2. ábra - A frekvenciaszelektív rádiós csatorna átviteli függvényének abszolútértéke [3]	7
3. ábra - Az LTE keret időtartománybeli felépítése [4].....	8
4. ábra – Az LTE PRB struktúrája.....	8
5. ábra - Példa egy HetNet struktúrára egy makrocellával, pikocellával és femtocellával	10
6. ábra - A frekvencia újrafelhasználás elve cellás hálózatokban.....	11
7. ábra - Egy tipikus HetNet topológia interferencia forrásai [8].....	14
8. ábra – ortogonális OFDM szimbólum-eltolásos és ABSF alapú ICIC szabványok [8]	15
9. ábra - Fix és Flexible Frequency Reuse módszerek makro- és pikocellák esetén [9]	18
10. ábra - A makrocella FSUAH folyamatábráját [8].....	20
11. ábra - A makrocella FSUAH szerinti működési görbék [9].....	20
12. ábra - A pikocella FSUAH folyamatábrája [8].....	21
13. ábra - Wrap-around modell szerinti UE mozgáspályák és az eNodeB-k pozíciója..	24
14. ábra - Az ITU-R M-2135 Pathloss modell.....	26
15. ábra - A kezdeti ütemezés kimenetele	30
16. ábra - A második ütemezés kimenetele	31
17. ábra - A HII üzenet és a statikus teljesítményszabályozás	32
18. ábra - Az átlagos cell-edge átviteli sebességek a különböző Threshold Set-ek alapján	33
19. ábra - A pikocella user-ek PRB-nkénti átlagsebessége a különböző Threshold Set-ek szerint.....	33
20. ábra – Három pikocella felhasználó SNR-je, valamint a kiosztott PRB-k	34
21. ábra - A statikus és dinamikus teljesítményszabályozás összehasonlítása adóteljesítmény és átviteli sebességek alapján	36
22. ábra - A makrocella és pikocella user-ek átviteli sebességének alakulása	37
23. ábra – A pikocella adóteljesítményének alakulása	37
24. ábra - A makrocella és pikocella user-ek átviteli sebességének alakulása	38
25. ábra - A pikocella adóteljesítményének alakulása	38

26. ábra – A makrocella és pikocella user-ek átviteli sebességének alakulása.....	39
27. ábra – Teljesítményelosztás a PRB-ken.....	39

Irodalomjegyzék

- [1] Eric Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld: *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, 2011
- [2] V. Pauli, J. D. Naranjo, and E. Seidel, „Heterogeneous LTE Networks and Inter-Cell Interference Coordination,” *Nomor Research White Paper GmbH, Munich, Germany*, December 2010.
- [3] László Pap – Sándor Imre: *A mobil hírközlés alapjai*, 1999.
http://www.mcl.hu/oktatas/A_mobil_hirkozles_alapjai_1_.zip. egyetemi jegyzet.
- [4] Mráz Albert: “3GPP LTE (Long Term Evolution)”, In: *Híradástechnika*, 63. (2008) 10. p. 15-21.
- [5] M. Döttling, W. Mohr, and A. Osseiran, *Radio Technologies and Concepts for IMT-Advanced*, Wiley, Dec 2009.
- [6] V. Chandrasekhar and J. G. Andrews, „Spectrum Allocation in Tiered Cellular Networks,” *IEEE Transaction on Communications*, vol. 57, no, 10, pp. 3059 – 3068, October 2009
- [7] Galiotto, C., Marchetti, N., Doyle, L.: *Flexible Spectrum Sharing and Interference Coordination for Low Power Nodes in Heterogeneous Networks*, 10.1109/VTCFall.2012.6399308
- [8] D. Lopez, I. Guvenc, G. de la Roche, M. Kountouris, T. Q.S. Quek, J. Zhang, “*Enhanced Inter-Cell Interference Coordination Challenges in Heterogeneous Networks*”, *IEEE Wireless Communications*, June 2011.
- [9] „Winner+ Project – D1.6 Deliverable: *Intermediate Report on System Aspects of Flexible Spectrum Use*,” November 2009.
- [10] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), „*Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects (Release 11)*,” September 2012, 3GPP TR 36.814 V11.0.0 (2012-09).
- [11] Rep. ITU-R M.2135, available: http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2135-1-2009-PDF-E.pdf
- [12] R1-104968, *Summary of the Description of Candidate eICIC Solutions*, 3GPP Std., Madrid, Spain, Aug. 2010.
- [13] Andreas F. Molisch: „*Wireless Communications, 2nd Edition*”, November 2010, ISBN: 978-0-470-74186-3
- [14] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld: „*4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*”, May 2011, ISBN: 978-0123854896

Rövidítések jegyzéke

3GPP	3 rd Generation Partnership Project
AWGN	Additive White Gaussian Noise
AN	Access Network
BS	Base Station
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
CA	Carrier Aggregation
CCH	Control Channel
CDF	Cumulative Distributive Function
CoMP	Coordinated Multipoint Transmission
CP	Cyclic Prefix
CSG	Closed Subscriber Group
DCH	Data Channel
DFT	Discrete Fourier Transform
DFTS-ODFM	Discrete Fourier Transform Spread OFDM
DL	Downlink
eICIC	Enhanced Inter-Cell Interference Coordination
eNodeB	Evolved NodeB
FDD	Frequency-Division Duplex
FDM	Frequency-Division Multiplexing
FFT	Fast Fourier Transform
FSUAH	Flexible Spectrum Usage Algorithm for HetNets
HeNodeB	Home Evolved NodeB
HII	High Interference Indicator
HSPA	High-Speed Packet Access
ICI	Inter-Cell Interference
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IP	Internet Protocol
ITU-R	International Telecommunication Union-Radiocommunication
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution-Advanced

MAC	Medium Access Control
MIMO	Multiple Input Multiple Output
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OI	Overload Indicator
OSG	Open Subscriber Group
PF	Proportional Fairness
PRB	Physical Resource Block
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RNTP	Relative Narrowband Transmit Power
RRH	Remote Radio Head
RSS	Received Signal Strength
SC-FDMA	Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SISO	Single Input Single Output
SNR	Signal to Noise Ratio
TDD	Time Division Duplex
UE	User Equipment
UL	Uplink
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WLAN	Wireless Local Area Network