



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Ratkóczy Péter

**Kültéri heterogén mobil hozzáférési
hálózatok méretezése Monte Carlo
szimuláció segítségével**

Tudományos Diákköri Konferencia Dolgozat

Konzulens

Mitscenkov Attila (TMIT)

BUDAPEST, 2014

Kivonat

A mobil adatforgalom utóbbi években tapasztalt növekedése miatt a rádiós hozzáférési hálózatokat napjainkban sokszor már nem lefedettségre, hanem forgalmi kapacitásra kell méreteznünk. Ez a bázisállomások egyre sűrűbb elhelyezését igényli, ez azonban, különösen nagyvárosi környezetben korlátokba ütközik. A probléma egy lehetséges megoldása a heterogén mobil hálózat (HetNet) alkalmazása: ez esetben több különböző vezeték nélküli technológia együttesen kezeli a mobil adatforgalmat.

Dolgozatomban két vezeték nélküli technológiával foglalkoztam, amelyek képesek kiegészíteni a jelenlegi LTE mobil hálózatot. Az egyik a kiscellás LTE rendszer, a másik pedig a Wi-Fi technológia. A célom egy olyan kültéri számítási modell és szoftvermodul készítése volt, amely képes a heterogén hálózat, azaz a makrocellák és egy „kiegészítő” technológia együttes méretezésére, figyelembe véve a technológiára jellemző jelterjedési modelleket, a hálózatban keletkező interferenciát, és a földrajzi környezet jellemzőit (nagyváros, város, vidék). A méretezéshez alkalmazott forgalmi minta több paraméter segítségével állítható (felhasználók térbeli eloszlása, normál és „heavy” felhasználók forgalmi igényei). Kétféle heterogén hozzáférési hálózati modellt készítettem, amely során az egyik LTE és Wi-Fi, míg a másik LTE és kiscellás rendszerek együttes méretezését végzi el. Figyelembe vettem, hogy a valóságban a makro bázisállomások szektorsugárzó antennákból állnak, míg a Wi-Fi hozzáférési pontok, és a kis cellás bázisállomások gömbsugárzó karakterisztikát mutatnak.

A méretező modul célja az adott bemeneti konfiguráció mellett a szükséges LTE makro bázisállomások, és a kiegészítő Wi-Fi hozzáférési pontok vagy kiscellás bázisállomások számának meghatározása, tekintettel az adott forgalmi paraméterekkel jellemzett terület mobil adatforgalmára.

Ezt a modellt Matlab környezetben implementáltam, majd különböző forgalmi paraméterek mellett szimulációkat és méretezési számításokat végeztem. A szimulációk eredményeként összehasonlítottam a két különböző heterogén hálózatot (LTE makro + mikro illetve LTE makro + Wi-Fi). Megvizsgáltam továbbá, hogy milyen eltérésekhez vezet a hálózat méretezése során a forgalmi igények végeredményben azonos változása, amennyiben azt az előfizetők sűrűségének, illetve az egy felhasználóra eső forgalmi igények változása okozza.

Abstract

The experienced mobile traffic increase in the recent years caused significant changes in network dimensioning, as the traffic capacity became the bottleneck instead of the coverage constraints, calling for higher density of the base stations, even though there are practical bounds for network deployment density. One possible solution to this problem is the application of heterogeneous mobile networks (HetNet), which is a special combination of various wireless technologies.

In my study I analysed two wireless technologies capable to complement the current LTE (macrocell) mobile network. One of them is the small cell LTE system, the other one is the Wi-Fi technology. The aim of the present Thesis is to create an outdoor calculation model and a software module for joint dimensioning of the macro cells and the supplementary small cell or Wi-Fi technology. With the application of this methodology the model can take into consideration the technology specific radio propagation models, the interference in the network and the characteristics of the physical area (dense urban, urban, rural). The traffic capacity requirements to be met by the radio network are fine-tuned by several parameters (user's density, the active vs. heavy user ratio and their capacity demand). I prepared two heterogeneous access network models for the joint dimensioning of 1.) LTE (macrocell) and Wi-Fi, as well as 2.) LTE macro and small cell system. I took into consideration the fact that in current practice the macro base stations consist of sectorized antennas while the Wi-Fi access points and the small cell base stations show omnidirectional antenna characterization.

The primary outcome of the dimensioning calculations is the necessary amount of the LTE macro base stations and the supplementary Wi-Fi access points or the small cell base stations, with respect to the specific input configuration and mobile traffic requirements of the analysed area.

I have implemented this model in MATLAB environment, and I have performed a series of simulations and dimensioning calculations with respect to the different traffic parameters. Using the results of the simulations I have compared the two different heterogeneous technologies (LTE macro + micro and LTE macro + Wi-Fi). Finally, I have observed how network dimensioning is affected by changes in the traffic requirements, and I was able to separate the impact of various traffic parameters (i.e. increase of the user density or the individual data rates).

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés.....	5
1.1	LTE.....	6
1.2	Small cell.....	7
1.3	IEEE 802.11a.....	7
2	Rádiós sáv szélesség igény meghatározása.....	8
2.1	Gömb sugárzó antennák esetén az SINR meghatározása.....	8
2.2	Szektorsugárzó antennák esetén az SINR meghatározása.....	11
2.3	Jel terjedési modell.....	14
2.4	A spektrális hatékonyság kiszámítása.....	15
3	Heterogén hálózat méretezése.....	17
3.1	Forgalmi terhelés szimulációja.....	17
3.1.1	A modell alap koncepciója.....	17
3.1.2	Felhasználók térbeli eloszlása.....	17
3.1.3	Felhasználók forgalmi igényeinek eloszlása.....	17
3.2	A bázisállomások és az AP-k elhelyezése.....	18
3.3	Hálózati modellek, felhasználók bázisállomáshoz rendelése.....	20
3.3.1	LTE-Wi-Fi heterogén hálózati modell.....	20
3.3.2	LTE-kis cellás heterogén hálózati modell.....	23
3.4	Döntési mechanizmus.....	29
4	Implementáció.....	30
4.1	LTE makro – kis cellás heterogén hálózati modell folyamatábrája.....	32
5	Eredmények.....	33
5.1	LTE-Wi-Fi és LTE-pico heterogén hálózat összehasonlítása.....	36
5.2	Bemeneti kapacitás adatok hatása.....	38
6	Összegzés.....	40

6.1	Kitekintés.....	41
7	Irodalomjegyzék.....	42
8	Ábrajegyzék	44

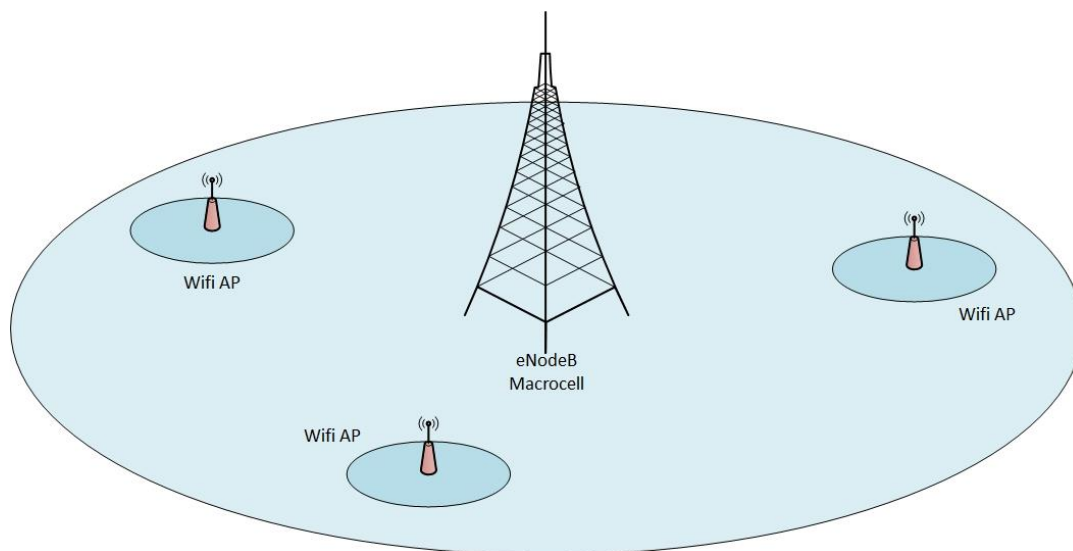
1 Bevezetés

A mobil sávszélességi igények exponenciálisan nőnek, és a szolgáltatók számára kihívást jelent ezen igények kielégítése. A Cisco felmérése szerint az okostelefonok által generált adatforgalom 2010-től 2011-ig megháromszorozódott (most 150 Mbit/hónap), és a teljes mobil-adat forgalom 2011 és 2016 között 18-szorosára fog nőni. [1]

A növekvő mobil sávszélességi igények kiszolgálásának egyik módja a mobil bázisállomások egyre sűrűbben való elhelyezése. Ez a módszer egy bizonyos sűrűség elérése után nem fog működni, hiszen sok helyen korlátokba ütközik a bázisállomások elhelyezése.

Egy másik megoldás, a már működő mobil hálózat olyan más technológiával való kiegészítése, amelyek elsődleges feladata a mobil adatforgalom kezelése, nem pedig a lefedettség biztosítása. Az ilyen típusú hálózatokat heterogén hálózatoknak (HetNet) nevezik [2] [3]. Két ilyen kiegészítő technológia, amelyet én is használtam a dolgozatomban, a kis cellás rendszerek (small cell) és a Wi-Fi technológia. Mivel többféle Wi-Fi hálózat létezik, választásom az IEEE 802.11a szabványra esett.

Az alábbi ábrán látható a heterogén hálózatok koncepciója:



1. ábra Heterogén mobil hozzáférési hálózat

Méretezési feladatoknál fontos a bemeneti paraméterek és a kimeneti értékek pontos meghatározása. Kutatásom során egy olyan kültéri méretező modult készítettem, amely technológiai, földrajzi és kapacitásra vonatkozó bemeneti adatok segítségével meghatározza, hogy egy adott területre hány LTE makro bázisállomás és hány Wi-Fi hozzáférési pont (AP) vagy LTE kis cella szükséges. Mivel a két „kiegészítő” technológia sok mindenben különbözik, a méretezésnél is figyelembe kellett venni ezeket a különbségeket.

Az elkészült méretezési modul segítségével összehasonlítottam a két „kiegészítő” technológiát, illetve megvizsgáltam, hogy hogyan változnak a méretezési eredmények, ha egy adott kapacitássűrűséget kétféleképpen érem el. Az egyik eset, ha a felhasználók számát, a másik pedig, ha a felhasználói kapacitás igényt változtatom meg.

A következő alfejezetekben röviden ismertetem a három vezeték nélküli technológiát, amelyeket használtam a méretezésnél. A 2. fejezetben az SINR fogalmát, fontosságát, illetve különböző antenna elrendezés mellett a kiszámítási módját ismertetem. Bemutatom, a rádiós jelterjedési modellt, amit használtam, illetve, hogy hogyan lehet kapcsolatot teremteni LTE hálózatoknál az SINR és a spektrális hatékonyság között. A 3. fejezetben a heterogén hálózati méretező modelletem ismertetem. Bemutatom az implementációban használt Monte Carlo szimuláció és a bázisállomások illetve a hozzáférési pontok elhelyezésének koncepcióját, majd a két heterogén mobil hozzáférési hálózati modell részleteit. A 4. fejezetben a modell implementációját mutatom be röviden, amit MATLAB környezetben készítettem el. Az 5. fejezetben az eredményeket ismertetem, illetve a két technológiát hasonlítom össze a méretezési eredmények alapján. Az utolsó két fejezet pedig egy összegzéssel, illetve a jövőbeli kutatási területet bemutatásával zárja be a dolgozatot.

1.1 LTE

Az LTE (Long Term Evolution) egy új, negyedik generációs mobil adatátviteli szabvány, amelyet a 3GPP Release 8 írt le. Az LTE számos követelménynek kell eleget tennie. Ilyen a sáv szélesség, amelynél lefelé 100 Mb/s-ot, felfelé 50 Mb/s-ot kell teljesítenie, továbbá FDD (Frequency-Division Duplexing) és TDD (Time-Division Duplexing) támogatást kell biztosítania, és a csomagkésleltetés a rádiós hozzáférési hálózatban nem haladhatja meg az 5 ms-ot. 5 MHz-en egyszerre legalább 200 előfizetőt kell kiszolgálnia egy cellában, és lehetővé kell tennie a korábbi hálózatokkal való együttműködést.

Jelentős változások jelentek meg a kódolásban is. Míg a letöltési ágban OFDMA-t (Orthogonal frequency-division multiplexing) használnak, a letöltés SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Acces), más néven DFTS-OFDM (Discrete Fourier Transform Spread OFDM). Ezek segítségével a sáv szélességet rugalmasan lehet használni és a megvalósítása is egyszerűbb. [4] [5]

1.2 Small cell

A kis cellás rendszereknek több típusa létezik. Beszélhetünk mikro-, piko-, és femtocelláról. A kis cellák alapkonceptiója, hogy az adóteljesítmény jóval kisebb, ezáltal maga a bázisállomás által lefedett terület is nagymértékben lecsökken. Kiegészítő technológiának használják olyan területeken, ahol vagy nagyon rossz a lefedettség vagy a kapacitás igények jóval nagyobbak, mint amit a makro bázisállomás ki tud szolgálni. A mikrocella ezek közül a legnagyobb területet fedi le. A picocella a második legkisebb kis cellás rendszer. Hatósugara nagyságrendileg 50 és 100 m között változik. A picocellák és a femtocellák között lényeges különbség, hogy a picocellákat a szolgáltatók telepítik és üzemeltetik. A picocellák a lefedettséget biztosító makrocellák mellett a forgalmi igények kiszolgálását lehetővé tevő kiegészítő megoldás.

A femtocellák sugara 10 és 20 m között változik. Ezeket a felhasználók saját maguk vásárolják meg, helyezik üzembe és üzemeltetik. Főként olyan helyekre szükséges a telepítésük, ahol nem megfelelő a jelszint (pl. pince) és a felhasználó szeretné, hogy ott is legyen megfelelő lefedettség. [6] [7]

1.3 IEEE 802.11a

A 802.11a szabvány egy vezeték nélküli adatátviteli protokoll. Az OSI modellben található két legalsó réteget definiálja: fizikai és adatkapcsolati réteg.

OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) modulációt használ, amely egy többvívős megoldás. 1999-ben definiálták az eredeti szabványt, amely az 5 GHz-es sávban működik, 52 alvívót használ és az elméleti legmagasabb adatsebesség 54 Mbit/s .

A 802.11a-ban 12 nem átlapolódó csatornát lehet létrehozni. Ez azért fontos, mert ebben az esetben ezeket a csatornákat el lehet úgy osztani, hogy a hozzáférési pontok ne interferáljanak egymással. [8] [9]

2 Rádiós sávzélesség igény meghatározása

A méretezés egyik alapfeladata a felhasználói adatsebesség-igények kiszolgálásához szükséges rádiós sávzélesség kiszámítása. A szükséges sávzélességet a spektrális hatékonyság ismeretében lehet meghatározni, ami az adott pontban érvényes „jelminőségtől”, azaz az SINR (signal-to-interference-plus-noise ratio/ jel-interferencia-plusz-zaj) viszonytól függ.

Ha ismerjük egy felhasználó SINR értékét, akkor kiszámolható, hogy a felhasználónak mekkora sávzélességre van szüksége adott adatsebesség eléréséhez. Az SINR érték és az adatsebesség közötti kapcsolat technológiafüggő.

Az SINR fogalom bevezetésével lehet az interferenciát megjeleníteni a számításaimban.

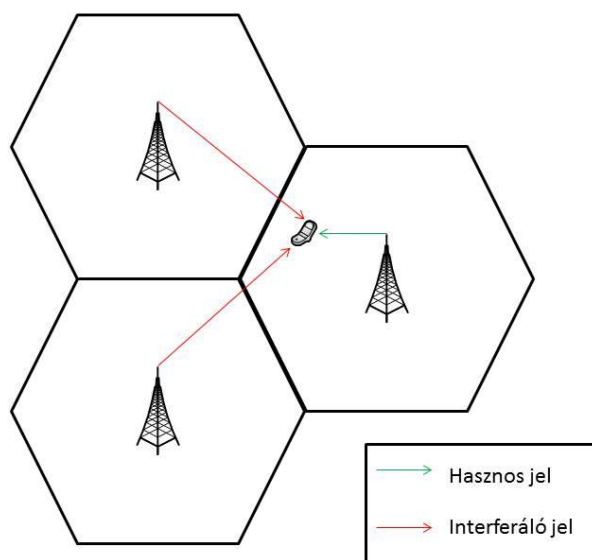
$$SINR = \frac{P}{N + I}$$

Ahhoz, hogy ki lehessen számolni egy cellában elhelyezkedő bármely pont SINR értékét, a kijelölt pontban meg kell határozni a jel teljesítményét (P), az interferencia értékét (I), valamint a zaj nagyságát (N). [10]

2.1 Gömbsugárzó antennák esetén az SINR meghatározása

Ebben az alfejezetben ismertetem az SINR értékének meghatározását abban az esetben, ha az antennát gömbsugárzónak feltételezem.

A következő ábra szemlélteti egy készülékre ható különböző bázisállomások jeleinek hatását egy mobil készülékre.



2. ábra Hasznos jel és interferencia ábrázolása

A jel teljesítménye:

$$P_{jel_{dB}} = P_{adó_{dB}} + G_{dB} - PL(x, y, d)_{dB}$$

Ahol $P_{adó_{dB}}$ az adótorony kisugárzott teljesítménye dB-ben, G_{dB} az antenna nyeresége dB-ben, $PL(x, y, d)_{dB}$ pedig a jel csillapítása (x, y) koordináta pontokon, ahol az origó a bázisállomás, amelynek sugara d .

Gömsugárzó antenna esetén a csillapítás a technológiai paraméterek mellett csak a felhasználó és az antenna közötti távolságtól függ.

Ugyanez az összefüggés Watra kifejtve:

$$P_{jel_W} = \frac{P_{adó_W} \cdot G_W}{PL(x, y, d)_W}$$

Az interferencia számításánál végig kell gondolni, hogy hány szomszédos bázisállomás zavaró jelét kell figyelembe venni. Ezen kívül meg kell határozni, hogy hány csatornát tudunk kiosztani, mert ez is befolyásolja, hogy hol helyezkedik el a legközelebbi adótorony, ami ugyanazt a frekvenciát használja, mint a vizsgált bázisállomás.

Dolgozatomban főleg LTE hálózatokra koncentráltam, azonban a gondolatmenetet kismértékű változtatásokkal bármely mobil technológiára lehet használni.

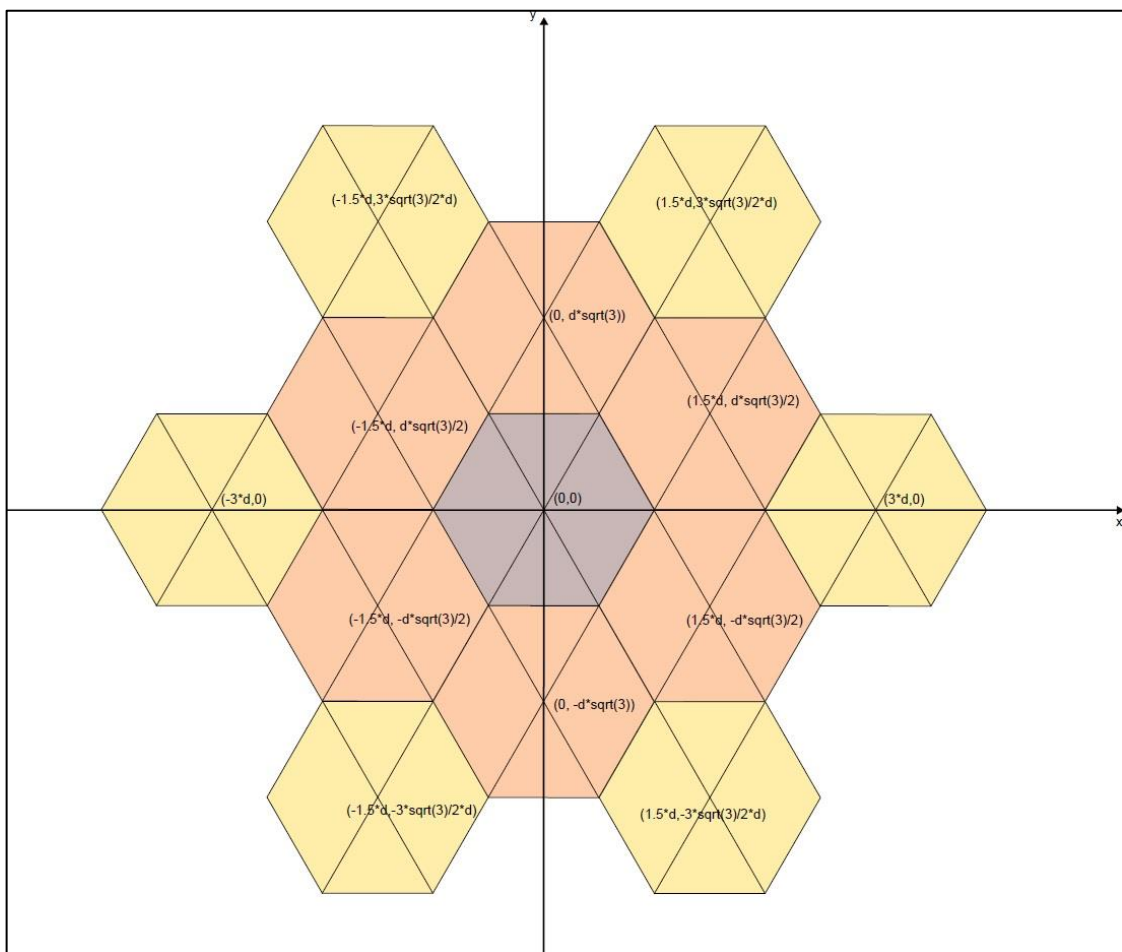
A csatorna sávszélességét 20 MHz-nek feltételeztem (a szabványban leírt maximális értéknek megfelelően), ami miatt egy csatornát használ az összes bázisállomás, így már a közvetlen szomszédos cellák bázisállomása is zavarani fogja a hasznos jelet. Miután kiszámítottam az SINR értékét, azt figyeltem meg, hogy már a második szintű bázisállomások is minimálisan szólnak bele az interferenciába, úgyhogy számításaimban csak az első szintű bázisállomások jelennek meg, mint zavaró tényezők.

A 3. ábra láthatóak a környező cellaközéppontok trigonometrikus azonosságokkal meghatározott koordinátái, amelyekből azok távolsága, és a jelterjedési modell segítségével a zavaró jelek teljesítménye számítható.

Ezek alapján az interferencia értéke:

$$P_{interferencia_W} = \sum \frac{P_{adó_W} \cdot G_W}{PL(x, y, d_i)_W}$$

Amely összefüggésnél az összes bázisállomásnak az interferenciáját figyelembe kell venni.



3. ábra LTE cellák elhelyezkedése

Az elektromos berendezések zajt keltenek, ami szükséges, hogy a számításaimban megjelenjen. A termikus zaj nagysága függ a hőmérséklettől és a sáv szélességtől. A hőmérsékletet szobahőmérsékletnek (24°C) vettem, a sáv szélesség pedig 20MHz-nek.

Így a termikus zaj kiszámítása [11]:

$$u = 4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot B ,$$

ahol k – Boltzmann-állandó ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)

T – hőmérséklet Kelvinben ($273 + \text{°C}$)

R – ellenállás ohmban (50Ω)

B – sáv szélesség Hz-ben

Miután az SINR értékek minden komponense meg lett határozva, az SINR összefüggése:

$$SINR(x, y, d) = \frac{\frac{P_{ad\acute{o}W} \cdot G_W}{PL(x, y, d)_W}}{\sum \frac{P_{ad\acute{o}W} \cdot G_W}{PL(x, y, d_i)_W} + u}$$

2.2 Szektorsugárzó antennák esetén az SINR meghatározása

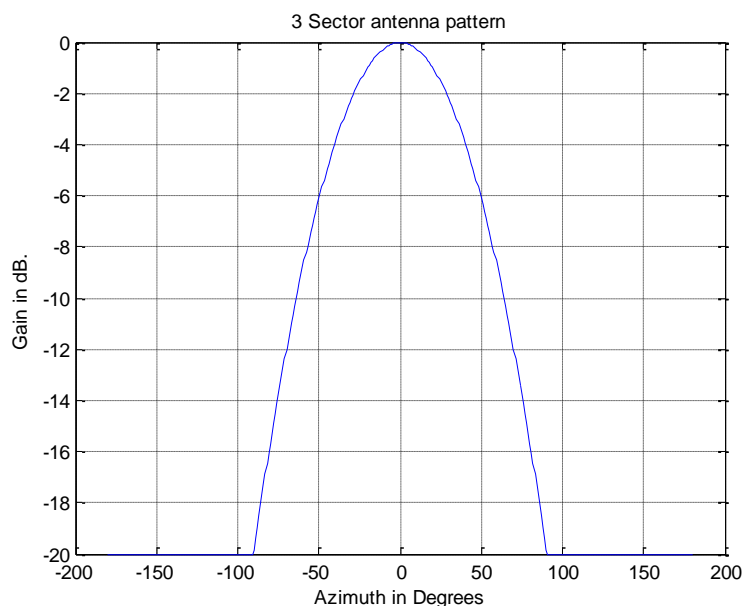
A gyakorlatban a mobil antennák nem gömbsugárzóak, hanem szektorsugárzó antennákat használnak. A leggyakoribb elrendezés 3 darab szektorsugárzó használata, amelyek egymással 120 fokos szöget zárnak be.

A szektorsugárzók karakterisztikáját a '3GPP antenna pattern' [12] definiálja. Az antennák iránykarakterisztikája:

$$A(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, A_m \right], \text{ ahol } -180 \leq \theta \leq 180$$

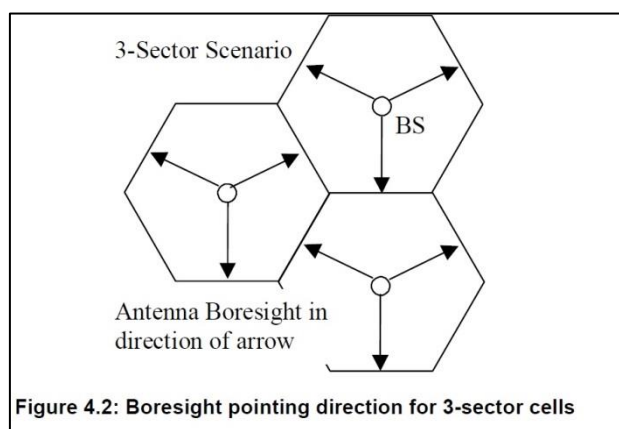
θ a szöget jelenti a vizsgált pont és az antenna főiránya között, θ_{3dB} a 3 dB-es sugárszélesség fokban, A_m pedig a maximális csillapítás. Ezek az értékek 3 szektoros elrendezésben: $\theta_{3dB} = 70$ fok, $A_m = 20$ dB.

A következő ábrán lehet látni a karakterisztika grafikus megjelenítését.



4. ábra 3 szektoros sugárzó karakterisztikája [12]

A szektorsugárzók elhelyezkedésére is ad javaslatot a 3GPP, amelyet a következő ábrán láthatunk:



5. ábra 3-szektorsugárzó antennák elhelyezkedése [12]

A szektorsugárzó antenna karakterisztikájának az ismeretében az SINR fogalmának a pontosítása is lehetséges. A szektorsugárzó antennák bevezetése a bázisállomások teljesítményét fogja megváltoztatni. Egy szektorsugárzó antenna teljesítményét a következő összefüggés adja meg:

$$P_{jel_szektor\ dB} = P_{ad\ dB} + G_{dB} - PL(x, y, d)_{dB} - A(\theta).$$

Minden egyes bázisállomáshoz három teljesítményértéket rendelünk, amely a három szektorsugárzó teljesítménye külön-külön.

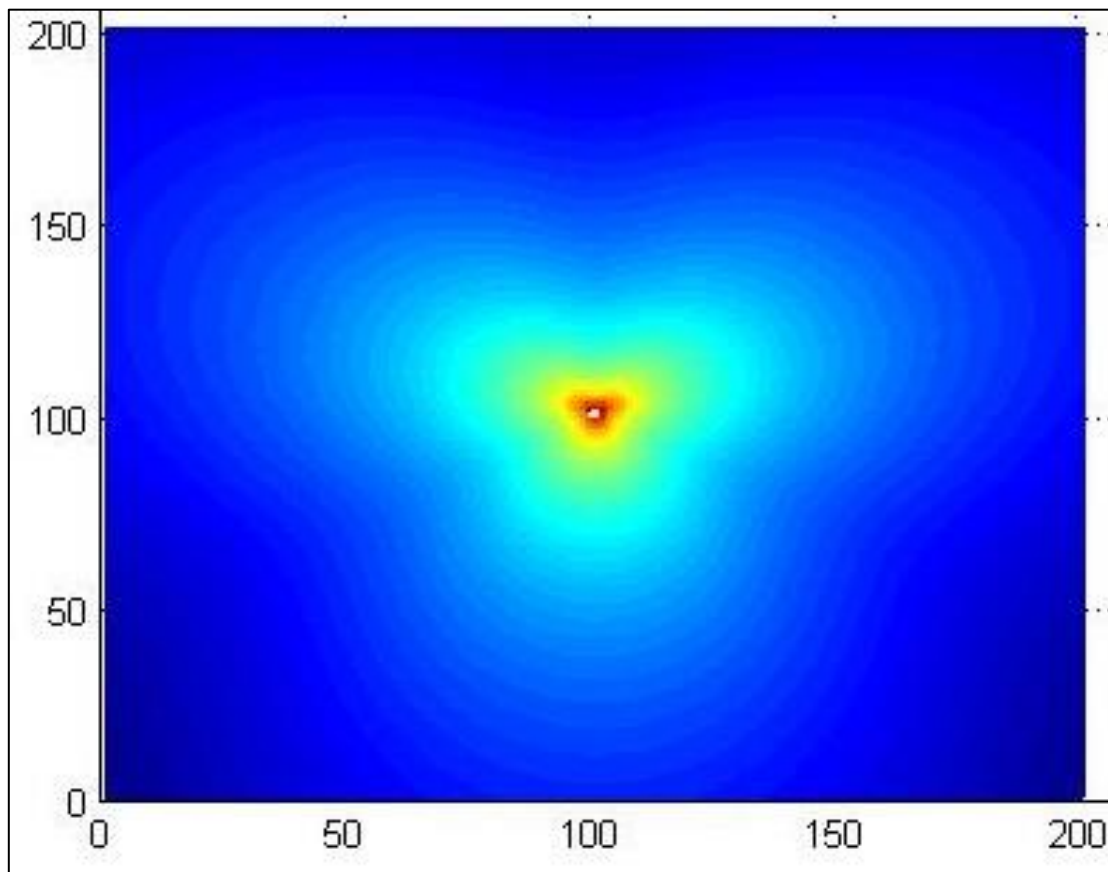
Ezeket a teljesítményeket Watt-ra átváltva, majd összeadva kapható meg, hogy egy bázisállomás mekkora teljesítményt tud szolgáltatni egy felhasználónak.

$$P_{jel_antenna_W} = P_{jel_szektor_1_W} + P_{jel_szektor_2_W} + P_{jel_szektor_3_W}$$

Ezek után már felírható az SINR kiegészített összefüggése szektorsugárzó antennákat használva:

$$SINR(x, y, d) = \frac{\frac{P_{adó_W} \cdot G_W}{PL(x, y, d)_W \cdot A(\theta)}}{\sum \frac{P_{adó_W} \cdot G_W}{PL(x, y, d_i)_W \cdot A(\theta_i)} + u}$$

A következő ábrán látható a három szektorsugárzó SINR leképezése:



6. ábra Szektorsugárzó SINR képe

2.3 Jelterjedési modell

Munkám során a legelterjedtebb, legszélesebb körben használt Okumura-Hata (és annak későbbi, magasabb frekvenciákra történő kiterjesztése, az ún. COST231 modell) [13] [14] [15] rádiófrekvenciás jelterjedési modellt alkalmaztam, amely alkalmas a bázisállomások lefedettségi területének kiszámítására. A modell összefüggéseket ad a mobil hálózatok különböző paramétereinek egymással való kapcsolatára. A frekvencia (f), a bázisállomások magassága (h_{base}), a mobil állomás magassága (h_{mobile}), az antennák közötti távolság (d) és a környezet (nagyvárosi, városi, vidéki) ismeretében meg tudja határozni a jel csillapítását (L) a bázisállomás és a mobil állomás között.

150-1000 MHz között:

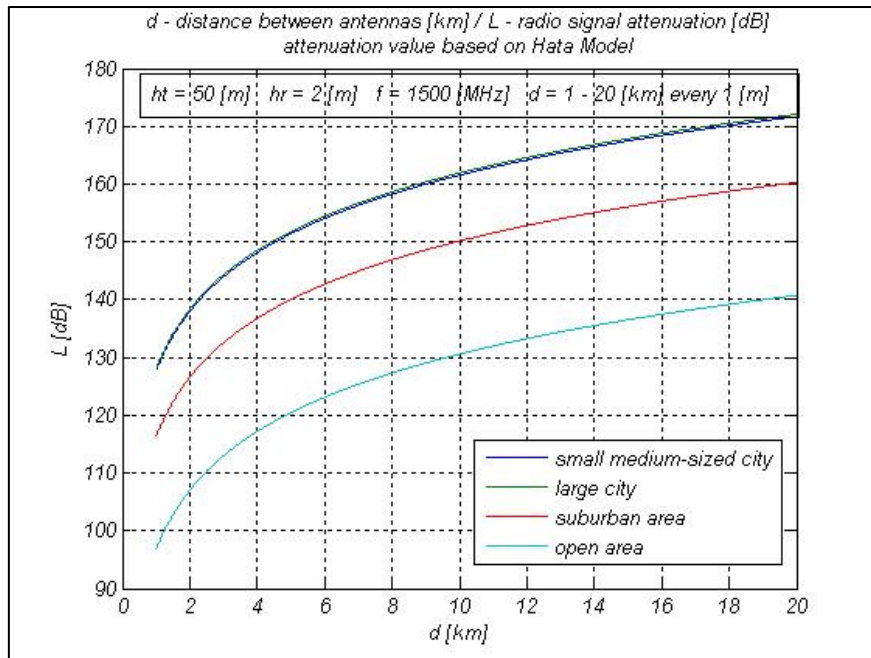
$$L = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_{base}) - a + [44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{base})] \log_{10}(d) + C,$$

ahol a és C két változó, amelyeknek az értéke a frekvenciától, a mobil állomás magasságától és a környezettől függ.

1500-2000Mhz között:

$$L = 46.3 + 33.9 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_{base}) - a + [44.9 - 6.55 \log_{10}(h_{base})] \log_{10}(d) + C.$$

A következő ábrán látható a fenti összefüggés adott paraméterek mellett:



7. ábra COST231-Okumura-Hata modell

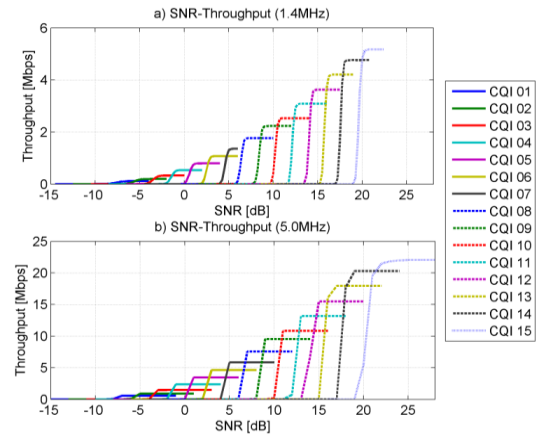
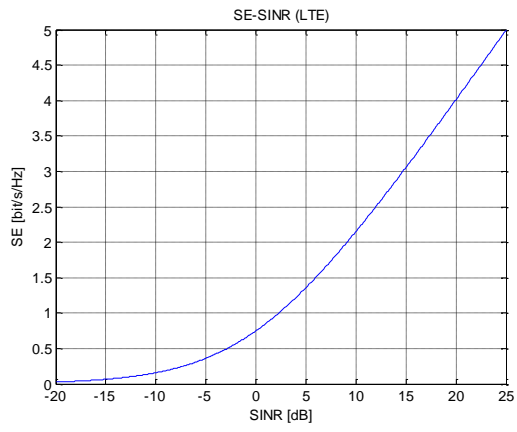
2.4 A spektrális hatékonyság kiszámítása

Az Alpha-Shannon Formula kapcsolatot teremt a spektrális hatékonyság ($bit/s/Hz$) és az SINR között LTE hálózatoknál. [16]

$$SE_h = \alpha \cdot \log_2 \left(1 + 10^{\frac{SINR_h}{10 \cdot IF}} \right)$$

Ahol SE_h a spektrális hatékonyság, $\alpha = 0,75$ és $IF = 1,25$ konstansok.

A 8. ábra bal oldali képén látható a formula kirajzolása. A jobb oldali ábrán megfigyelhető, hogy az adaptív kódolás és moduláció miatt eltérő SINR értékekhez más és más spektrális hatékonyság tartozik, ennek a görbeseregnek a közelítő burkolója az Alpha-Shannon Formula.



8. ábra Alpha-Shannon Formula [17]

3 Heterogén hálózat méretezése

3.1 Forgalmi terhelés szimulációja

3.1.1 A modell alapkonceptiója

A méretezéshez Monte Carlo szimulációt alkalmaztam [17] [18]. A Monte Carlo szimuláció egy széles körben elterjedt számítási eljárás, amelynek alapját egy algoritmus többszörös lefuttatása képezi. Az algoritmus lefutásához véletlen generált adatokat használ, amely eredményeként statisztikai következtetéseket lehet levonni.

A Monte Carlo szimuláció során különböző típusú felhasználókat adott valószínűségi eloszlás szerint helyezek el egy kijelölt területre és azt vizsgálom, hogy ezen felhasználók kiszolgálására elegendőek a területen adott koordinátákon elhelyezett makro bázisállomások, illetve a Wi-Fi hozzáférési pontok (AP-Access Point).

3.1.2 Felhasználók térbeli eloszlása

Modellemben a felhasználók pozícióját egyenletes elosztást követve sorsoltam ki. Ha a és b a vizsgált terület szélessége és hossza, a közepe pedig az origó, akkor ezen területen belül a felhasználók x és y koordinátájának egyenletes eloszlás szerinti véletlenszerű generálását a következő összefüggés végzi el:

```
x_active = b * rand(1,number_active)-b/2;
```

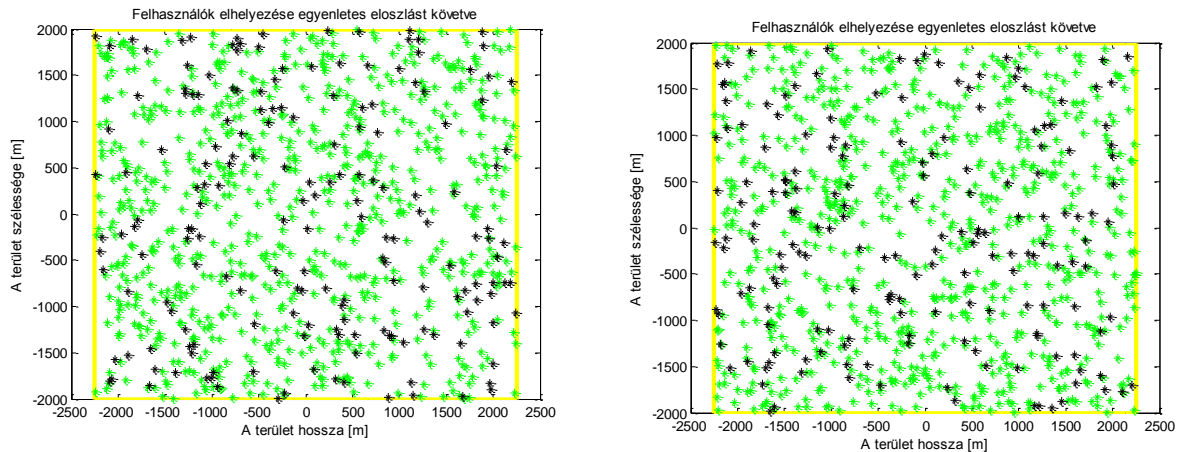
```
y_active = a * rand(1,number_active)-a/2;
```

Ahol a `rand` függvény egy nulla és egy egy közötti számot állít elő. Ha e szerint az összefüggés alapján sorsolom ki a koordinátákat, akkor a felhasználók elhelyezése egyenletes eloszlást fog követni.

3.1.3 Felhasználók forgalmi igényeinek eloszlása

Két féle felhasználót különböztettem meg. Az egyik a „normál” aktív felhasználó, a másik pedig egy úgynevezett „heavy” felhasználó. A különbség a két típus között, hogy a heavy felhasználó sokkal nagyobb adatsebességet igényel. Mindkét felhasználótípushoz fix adatsebesség igényeket rendeltem. Mind a normál és „heavy” felhasználók aránya, mind a hozzájuk tartozó adatsebességek értéke szabadon állítható, a szimulációk során használt értékeket az 5. fejezetben ismertetem.

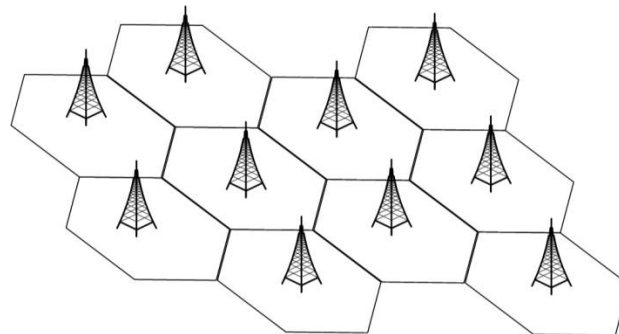
Az alábbi ábrán látható két olyan eset, amikor a felhasználókat egyenletes eloszlás szerint helyezem el a kijelölt területen. A zöld csillagok jelölik az aktív, míg a feketék a „heavy” felhasználókat.



9. ábra Felhasználók elhelyezése a területen egyenletes elosztás szerint

3.2 A bázisállomások és az AP-k elhelyezése

A modell első lépése, hogy az LTE makro bázisállomásokat szabályos hatszög struktúrában helyezem el a területen, ahogy látható a 10. ábra.



10. ábra Hexagonális cellák elhelyezése

A Wi-Fi AP-eket szintén egy hasonló szabályos struktúrában helyezem el. A makrocellák és az AP-k arányát a makro cellasugár és az AP-k közti távolság (avagy a cella- és AP-sűrűség) arányának változtatásával érem el. Ha a makro bázisállomások és az egy makro cellában lévő AP-ok aránya 1:Q, akkor az AP-k sűrűségét úgy kell beállítani, hogy egy bázisállomás területére Q darab AP jusson.

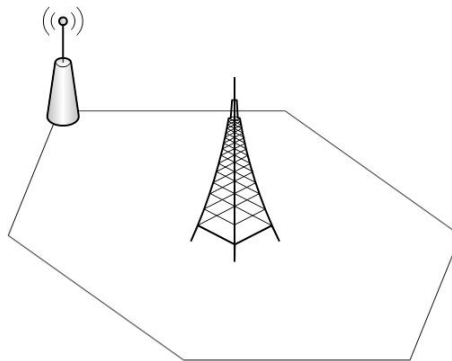
Egy hatszög területe: $A_{hatszög} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{3} \cdot d^2$, ahol d a hatszög sugara.

Így a területek között fennálló arányból kiszámolható, hogy mekkora legyen egy AP sugara:

$$\frac{A_{LTE}}{A_{AP}} = \frac{d_{LTE}^2}{d_{AP}^2} = Q$$

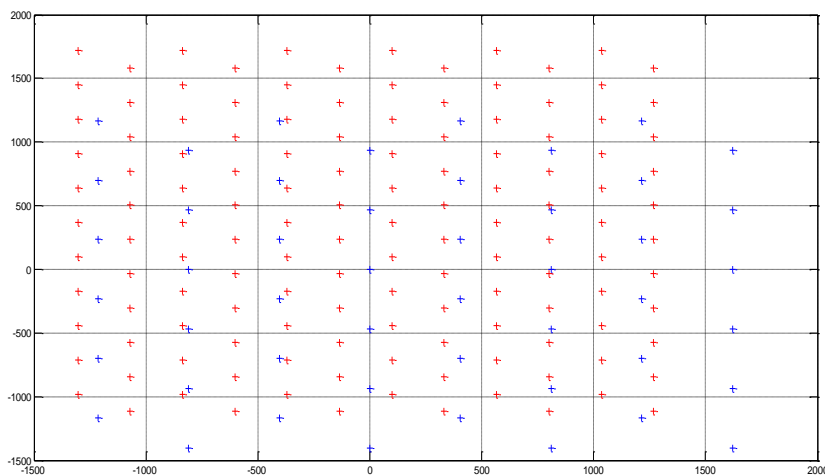
Ez alapján az AP sugara: $d_{AP} = d_{LTE}/\sqrt{Q}$, ahol Q azt a számot jelenti, hogy hány AP legyen egy bázisállomás területén.

Ha ugyanazt az elrendezést használnám, mint a bázisállomásoknál, akkor sok helyen a bázisállomás és az AP pozíciója egybe esni és az eredményeket meghamisítaná. Azért, hogy elkerüljem ezeket az ütközéseket, az AP-k hatszögrácsát eltolom úgy, hogy a referencia pont, amihez igazítom a rácsot, a (0,0) koordinátájú bázisállomás bal felső sarkába legyen. Ez látható a következő ábrán:



11. ábra Referencia Wi-Fi AP elhelyezése

Így tehát előállt két hatszögrács, amelyet egymásra lehet helyezni. Ha például $Q = 3$, tehát egy cellában három AP található, akkor a következő ábra mutatja, hogy a bázisállomások, illetve az AP-k hogyan fognak elhelyezkedni az adott területen. A kék keresztetek a bázisállomások, a piros keresztetek pedig az AP-k pozícióját jelölik.



12. ábra $Q=3$ esetén a bázisállomások és az AP-k elhelyezése

3.3 Hálózati modellek, felhasználók bázisállomáshoz rendelése

A szimuláció alapkoncepciójának az ismertetése, a felhasználók definiálása, és a bázisállomások illetve AP-ok/pico bázisállomások elhelyezési stratégiája után a következő lépés a felhasználók AP-khoz/pico bázisállomásokhoz és makro bázisállomásokhoz való hozzárendelésének a definiálása.

3.3.1 LTE-Wi-Fi heterogén hálózati modell

Az LTE-Wi-Fi heterogén mobil hozzáférési hálózatban az LTE makro cellák területére, a makro bázisállomásoknál sűrűbben helyezünk el Wi-Fi AP-kat, a hálózat kapacitásának növelése érdekében.

3.3.1.1 Felhasználók AP-khoz való hozzárendelése

A heterogén hálózat felhasználói elsőként a Wi-Fi AP-khez próbálnak kapcsolódni – amennyiben az adott AP szabad kapacitása ezt lehetővé teszi. Ha nincs a közelben elérhető Wi-Fi AP, akkor a terület lefedettségét biztosító LTE makro bázisállomás fogja kiszolgálni a felhasználót.

A Wi-Fi-ről korábban (1.3 fejezet) írottaknak megfelelően 802.11a technológiánál nem szükséges interferenciával számolni: 12 olyan csatornát lehet létrehozni, ami nem lapolódik át. Így megvalósítható a frekvencia kiosztása oly módon, hogy az interferencia elhanyagolható legyen. Ebben az esetben nem SINR, hanem SNR (jel-zaj viszony) értékről lehet beszélni.

Az AP-hoz képesti SNR érték kiszámításánál az AP-t gömbsugárzó antennának feltételezzük.

Első lépésként kiszámolom minden egyes felhasználóra az SNR értékét, az összes AP-hoz viszonyítva. A Wi-Fi AP-k és a felhasználók koordinátáinak az ismeretében ki tudom számolni a felhasználók és az AP-k közötti távolságot. A távolság, illetve egyéb technológiai paraméterek segítségével (frekvencia, AP magassága, felhasználó magassága) meg lehet határozható a jel teljesítményét abban az esetben, ha a felhasználó különböző AP-khoz kapcsolódik:

$$S = \frac{P_{tx_{AP}} \cdot G}{PL_W}$$

Ahol $P_{tx_{AP}}$ jelenti a Wi-Fi AP adóteljesítményét, G az adó nyereségét, PL_W pedig a csillapítási veszteséget. Mindegyik érték Watt-ban értendő.

A zaj kiszámítása után (ld. 2.1) meghatározható a felhasználó SNR értéke bármely AP-hoz viszonyítva.

A következő lépés a legnagyobb SNR érték és a hozzá tartozó AP megkeresése. Modellemben a felhasználókat kizárólag ezekhez a Wi-Fi AP-khoz lehet hozzárendelni.

A Cisco Wireless Mesh Access Points, Design and Deployment Guide [19] leírást ad az adatsebesség (throughput) és az SNR közötti kapcsolatra. A Deployment Guide segítségével meg lehet határozni, hogy a felhasználóknak mekkora sáv szélességre van szükségük, ha a legjobb SNR értékhez tartozó bázisállomáshoz csatlakoznának.

A következő lépések segítségével kaphatjuk meg az adott SNR érték mellett szükséges rádiós sáv szélességet. (B).

$$SNR \rightarrow throughput \rightarrow SE \rightarrow B$$

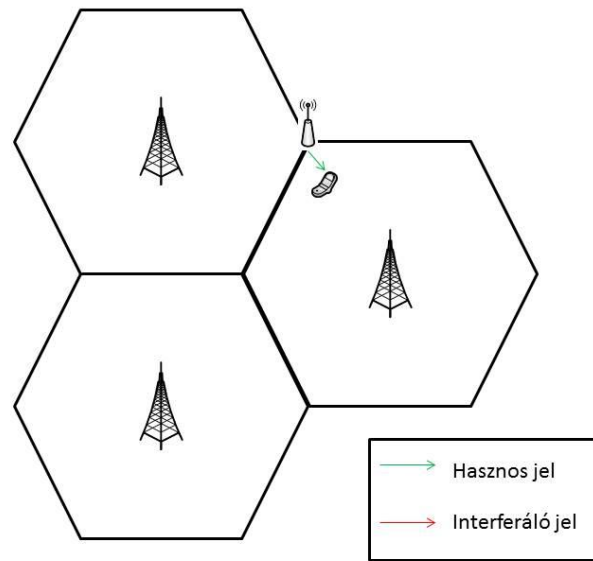
A throughput-ot elosztva a teljes sáv szélességgel (20 MHz) megkapjuk a spektrális hatékonyságot (SE), amit ha elosztunk a felhasználó kívánt adatsebességével, akkor megkapható, hogy mekkora sáv szélességet kell a felhasználónak biztosítani (B), hogy ezt az adatsebességet garantálni tudjuk.

Ekkor azonban előfordulhat, hogy egy AP-hez akár több mint 20 MHz sáv szélességet próbálnánk hozzárendelni, ami nem lehetséges.

Ennek a problémának a kiküszöböléséhez prioritási sort szükséges felállítani. Modellemben elsőként a legjobb SNR értékkel rendelkező felhasználók tudnak az AP-okhoz kapcsolódni, a rádiós spektrum minél hatékonyabb kihasználása érdekében.

A folyamat elvégzése után már látható, hogy mely felhasználók tudnak Wi-Fi AP-khoz kapcsolódni.

A következő ábra szemlélteti egy mobil készülék Wi-Fi AP-hoz való csatlakozását:



13. ábra Egy mobil készülék Wi-Fi AP-hoz való csatlakozása

3.3.1.2 Felhasználók LTE bázisállomásokhoz való hozzárendelése

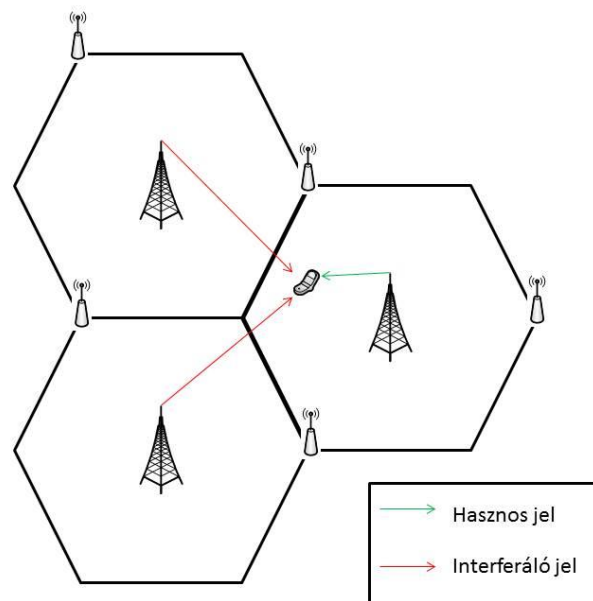
Első lépésként az előző pontban leírtakhoz hasonlóan kiszámítjuk minden egyes felhasználóra az egyes bázisállomásokhoz tartozó SINR értéket, és megkeressük ezek maximumát. Itt már figyelembe kell venni a bázisállomások közötti interferenciát, azonban a Wi-Fi AP-kkal nem léphet fel interferencia, hiszen más frekvenciasávban működik a két technológia.

Csak azokat a felhasználókat kell figyelembe venni, akiket nem lehetett Wi-Fi AP-khoz csatlakoztatni.

Az SINR érték kiszámításának a módja a 2.2. pontban részletesen megtalálható. A maximális SINR érték megkeresése után, az előző pontban ismertetett módszerhez hasonlóan kiszámolom, hogy mekkora rádiós sáv szélesség szükséges az egyes felhasználóknak ahhoz, hogy a kívánt adatsebességet el tudják érni. Egy lényeges különbség, hogy ebben az esetben az SINR és a spektrális hatékonyság (SE) közötti kapcsolatot az Alpha-Shannon Formula határozza meg, amelyet a 2.4 pontban ismertettem. Ezek információk ismeretében a számítás lépései:

$$SINR \rightarrow SE \rightarrow B$$

A modellemben azok a felhasználók, akik nem tudtak Wi-Fi AP-khoz kapcsolódni, azok LTE makro bázisállomáshoz fognak csatlakozni.



14. ábra Heterogén hálózatban a készülék LTE bázisállomáshoz való kapcsolódása

A következő lépésben össze kell számolni, hogy az egyes bázisállomásoknak mekkora sáv szélességre van szüksége, hogy a bázisállomáshoz csatlakozó felhasználókat ki tudja szolgálni. Ez azért fontos, mert a bázisállomás összesen 20 MHz sáv szélességgel gazdálkodhat, és ha a hozzá tartozó felhasználók szükséges sáv szélességének az összege meghaladja ezt a számot, akkor az azt jelenti, hogy a bázisállomás nem képes minden felhasználót kiszolgálni.

3.3.2 LTE makro- és kiscellás heterogén hálózati modell

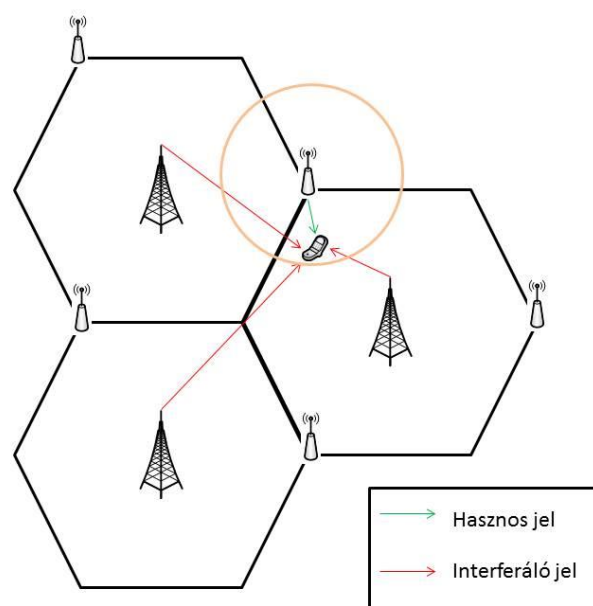
LTE makro- és kiscellás heterogén mobil hozzáférési hálózat esetén a kiscellákat a vizsgált területen sűrűbben helyezük el, mint az LTE makro bázisállomásokat, a hálózat kapacitásának a növelése érdekében.

3.3.2.1 Felhasználók pico bázisállomásokhoz való hozzárendelése

Hasonlóan, mint a LTE makro + Wi-Fi-s heterogén hálózati modellben a hálózat felhasználói elsőként a pico bázisállomásokhoz próbálnak kapcsolódni – amennyiben az adott pico bázisállomás szabad kapacitása ezt lehetővé teszi.

A legnagyobb különbség a picocellás heterogén rendszerek és a Wi-Fi-s heterogén rendszerek között, hogy a picocelláknál figyelembe kell venni az interferenciát. Ebben az esetben kétféle interferencia jelenik meg. Az egyik a makro bázisállomások által okozott interferencia, mivel a modellemben az LTE makro bázisállomások ugyanazt a frekvenciasávot használják, mint a pico bázisállomások, a másik pedig a pico bázisállomások egymásra ható interferenciája.

A következő ábrán látható egy felhasználó kapcsolódása egy pico bázisállomáshoz:



15. ábra Pico bázisállomáshoz való kapcsolódás

A 15. ábrán jól látható a pico cella által szolgáltatott hasznos jel, illetve a makro bázisállomások által okozott interferencia. Modellemben, a pico cellák akkor interferálnak egymással, ha a köztük lévő távolság kisebb, mint a pico bázisállomás hatósugara. A 15. ábra egy olyan eset látható, amikor nem esik bele a pico bázisállomás hatósugarába egy másik pico bázisállomás, így nem kell az interferenciájával számolni.

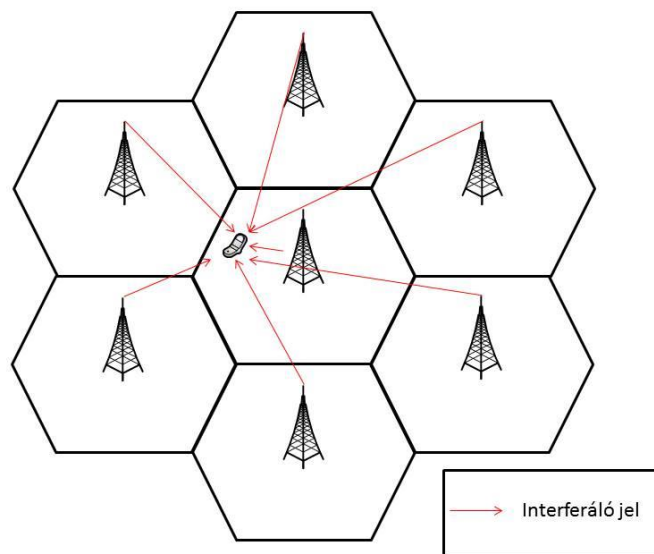
A pico bázisállomásokhoz képesti SINR érték kiszámításánál a pico bázisállomást gömbsugárzó antennának feltételezzük.

A hasznos jel kiszámításakor meg kell keresni, hogy melyik pico bázisállomás biztosítja a legnagyobb teljesítményt. Ehhez az alábbi összefüggést használtam. Ezt az értéket minden pico bázisállomásra kiszámítottam és megkerestem ezek maximumát:

$$P_{jel_W} = \frac{P_{adó_W} \cdot G_W}{PL(d)_W}$$

A makro bázisállomások interferenciájának meghatározásának első lépése annak a vizsgálata, hogy a felhasználó melyik LTE makro cella területén tartózkodik. Ezt az implementációban úgy valósítottam meg, hogy megkerestem, hogy melyik makro bázisállomás szolgáltatja a legnagyobb teljesítményt. Az interferencia számításánál ennek a bázisállomásnak, illetve a körülötte lévő bázisállomásoknak a jelét veszem figyelembe, mint interferencia.

Ez az elrendezés jól látható a következő ábrán:



16. ábra A makro bázisállomások interferenciája

A makro bázisállomások által okozott interferencia meghatározása után, a pico bázisállomások hasznos jelre vonatkozó káros interferenciájának a kiszámítása szükséges.

A legnagyobb teljesítményt szolgáltató pico bázisállomás hatósugarán belül meg kell határozni, hogy hol helyezkednek el a pico bázisállomások. Ezen bázisállomások teljesítményeinek az összege adja meg a pico cellák által okozott interferenciának a nagyságát.

A két interferenciának az összege adja meg a teljes interferencia értékét.

Ezeknek az összefüggéseknek a segítségével, minden felhasználóra kiszámolható egy maximális SINR érték, feltételezve, hogy a felhasználó pico bázisállomáshoz kapcsolódik.

A következő lépés a felhasználók szükséges sáv szélességeinek a meghatározása. Modellemben a pico cellás rendszerek LTE szabványt követnek, így az SINR és a spektrális

hatékonyság kapcsolatát az Alpha-Shannon Formula (ld. 2.4) adja meg. A spektrális hatékonyságot elosztva a felhasználói adatsebesség igényével, a szükséges sávszélesség határozható meg:

$$B = C_{igény} / SE$$

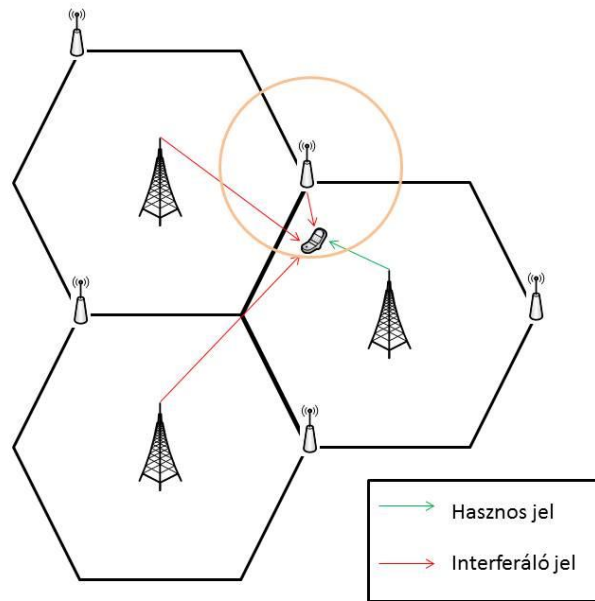
A pico bázisállomásokhoz való hozzárendelés ugyanazt a mechanizmust követi, mint a Wi-Fi-s heterogén hálózatoknál. A pico bázisállomáshoz tartozó felhasználók sávszélességeinek az összege nem haladhatja meg a 20 MHz-et.

3.3.2.2 Felhasználók LTE bázisállomásokhoz való hozzárendelése

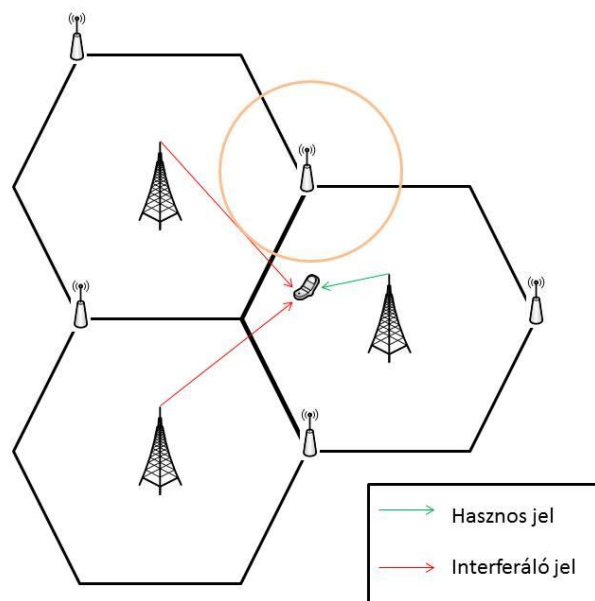
Azok a felhasználók, akiket nem lehet pico bázisállomásokhoz rendelni, LTE makro bázisállomásokhoz próbálnak kapcsolódni. Első lépésként meghatározzuk ezen felhasználók maximális SINR értékét. A jel hasznos teljesítményét a legnagyobb makro bázisállomás teljesítménye szolgáltatja.

Az interferencia ebben az esetben is két részből áll össze. Az egyik a környező makro bázisállomások, a másik pedig a felhasználó környezetében található pico bázisállomás zavaró jele. Csak abban az esetben van interferáló hatása a pico bázisállomásnak, ha a felhasználó a pico bázisállomás hatósugarában helyezkedik el.

A következő két ábra illusztrálja az LTE bázisállomáshoz való kapcsolódását, amikor egy pico bázisállomás jele is zavaró interferenciaként jelenik meg, illetve amikor a felhasználó nem esik a pico cella hatósugarába.



17. ábra Pico bázisállomás interferenciája LTE bázisállomáshoz való kapcsolódáskor



18. ábra A felhasználó a pico bázisállomás hatósugarán kívül helyezkedik el

Ezek alapján a maximális SINR érték kiszámítható. A további mechanizmus megegyezik az LTE makro + Wi-Fi heterogén hálózati modellben ismertetett eljárással (ld. 3.3.1.2). A maximális SINR érték ismeretében kiszámítható, hogy mekkora sáv szélesség szükséges azoknak a felhasználóknak, akiket nem lehetett pico bázisállomásokhoz rendelni.

A szimuláció utolsó lépéseként megvizsgáljuk, hány makro bázisállomás esetén lép fel 20 MHz-et meghaladó rádiós sávzélesség igény – és ezek arányát hasonlítjuk az adott hibahatárhoz.

3.4 Döntési mechanizmus

A méretezés egyik legfontosabb mozzanata annak ellenőrzése, hogy az adott méretezési paramétereknek (bázisállomás sugara, Wi-Fi AP sugara/pico bázisállomás sugara) megfelelő hálózat kielégíti-e a bemenetként adott forgalmi kapacitás igényeket.

A következő feladat annak a vizsgálata, hogy mekkora hiba történik adott bemeneti paraméterek mellett (makro bázisállomás sugár, Wi-Fi AP sugár/pico bázisállomás sugár, kapacitás feltételek, stb.).

A hiba meghatározásának első lépése, hogy összeszámoljuk, hogy hány bázisállomás területe esik teljesen mértékben a vizsgált területre. Csak ezeket a bázisállomásokat vizsgálom.

A következő feladat összeszámolni, hogy hány olyan bázisállomás van ezek között, amely a hozzá tartozó felhasználóinak a sáv szélességi igényeit nem tudja kielégíteni, tehát a szükséges sáv szélesség összegük túllépi a 20 MHz-et. Ezeknél a bázisállomásoknál történik hiba.

A hibás bázisállomások számának és a teljesen a vizsgált területbe eső bázisállomások számának a hányadosa jellemzi a hibát. A Monte Carlo szimuláció során az adott heterogén hálózati konfiguráció nem léphetett túl egy adott hiba-küszöböt (az alkalmazott hibahatár a számítási eredményeket bemutató fejezet tartalmazza).

4 Implementáció

A mobil heterogén hálózatméretező modult a MATLAB[®] programcsomaggal készítettem el. Hogy miért a MATLAB[®] keretrendszerét választottam, azt több előnyös tulajdonsága is indokolta:

- Számításaimban elsősorban numerikus és mátrixalgebrai feladatokat kellett elvégeznem, amelyeket hatékonyan tud elvégezni a program.
- A szkriptnyelv sajátosságai miatt az implementáció kényelmessé vált.
- Az adatok kiterjedt megjelenítési és ábrázolási lehetőségei állnak rendelkezésre.

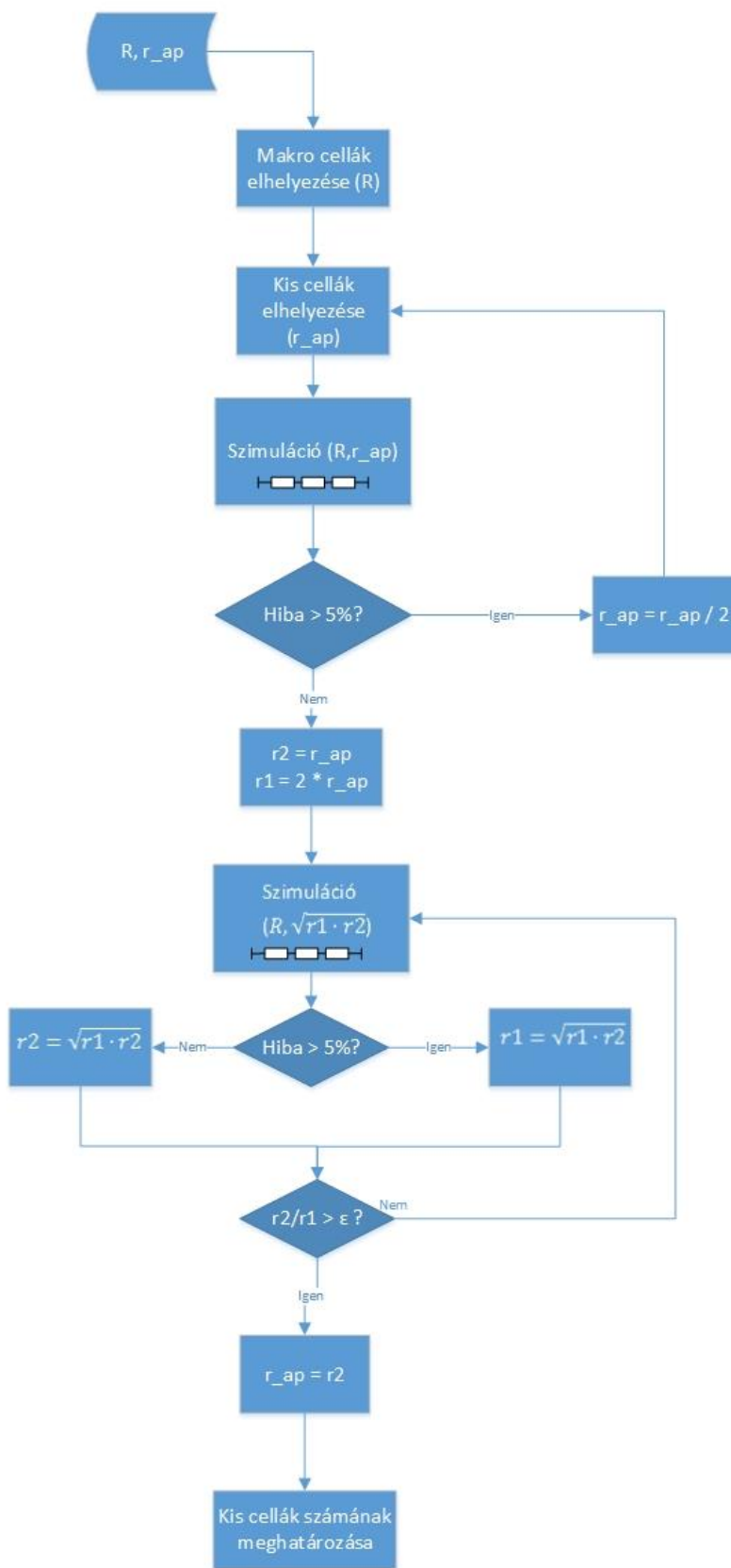
A két különböző heterogén hálózati modellt (LTE makro + mikro illetve LTE makro + Wi-Fi) külön modulban implementáltam.

A szimulációk bemeneti paramétere a forgalmi minta, a környezeti adottságok és a technológiai paraméterek mellett, a makro bázisállomás sugara és a kis cellás bázisállomás vagy a Wi-Fi AP sugara. A kimenete pedig egy hiba érték, ami megmondja, hogy adott bementi adatok mellett a makro bázisállomások hány százaléka lépi túl a 20 MHz-es sávszélességi határt.

A szimulációk elkészítése után egy olyan automatizált scriptet készítettem, amely a szimulációkat felhasználva különböző bázisállomás sugarakhoz megkeresi, hogy hány darab cellánkénti pico bázisállomást vagy Wi-Fi AP-t kell elhelyezni, hogy az adott forgalmi eloszlást a hibahatáron belül ki tudja szolgálni.

Ennek a modulnak a folyamatábrája látható a következő ábrán:

Folyamatábra



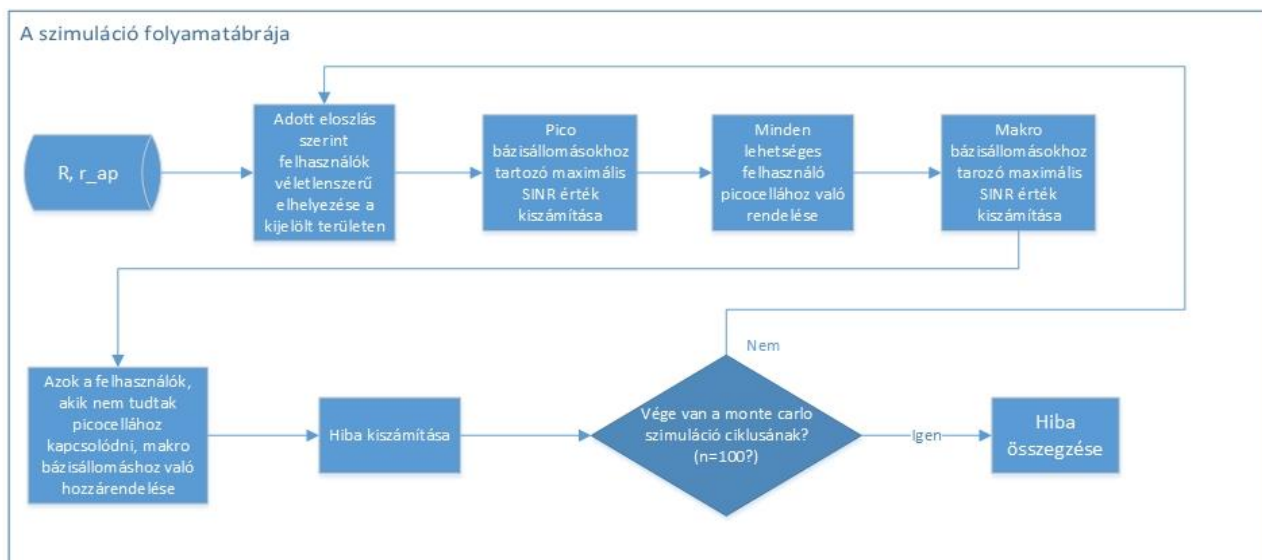
19. ábra A méretező szoftver folyamatábrája

A folyamatábrán látható, hogy a bemenet egy LTE makro bázisállomás sugár (R), illetve egy kis cella sugár (r_{ap}), ami kiindulásnál megegyezik a makro bázisállomás sugarával. A folyamatábra első ciklusában a kis cella sugarát folyamatosan megfelelve a script megkeresi, hogy melyik az a sugár, ami már nem lépi túl a megengedett 5%-os hibahatárt. A megtalált sugár (r_2) és az előzőleg vizsgált kis cella bázisállomásának a sugara (r_1) – ami r_2 kétszerese – között az ábrán látható második ciklus intervallumfelezési módszerrel pontosítja a kis cella sugarát. A ciklus kilép, ha r_2/r_1 relatív hiba egy adott epszilon érték alá csökken.

A ciklus kilépése után a makro bázisállomás sugár, és a megtalált kis cellás bázisállomás sugár hányadosának a négyzete adja meg, hogy makro cellánként átlagosan hány kis cellás bázisállomást kell elhelyezni, hogy a heterogén hálózat az adott forgalmi igényt ki tudja szolgálni.

4.1 LTE makro – kis cellás heterogén hálózati modell folyamatábrája

A kis cellás heterogén hálózat Monte Carlo szimulációjának a folyamatábrája a következő ábrán látható:



20. ábra A szimuláció folyamatábrája

A folyamatábrán megfigyelhetőek azok a lépések, amelyeket a modellemben leírtam. A szimuláció többszörös lefutása eredményezi, hogy statisztikailag helyes eredményt fogok kapni. A szimulációnak a lefutásának a számát előre definiált értékben tárolom. Mindkét heterogén mobil hálózat méretező modell folyamatábrája megegyezik.

5 Eredmények

Az előző fejezetekben ismertettem két különböző kiegészítő technológiát használó heterogén mobil hozzáférési modellt és azok implementációját. Ezeknek az eszközöknek az ismeretében bármilyen bemeneti paraméterek mellett méretezési eredményeket lehet meghatározni.

Ebben a fejezetben nagyvárosi környezetben végeztem el méretezési számításokat. Összehasonlítottam a két különböző típusú heterogén mobil hálózatot (LTE makro + pico és LTE makro + Wi-Fi) és a kapacitás minta változtatásának hatását vizsgáltam a kapott eredményeken.

A kiindulásnál használt bemeneti adatok:

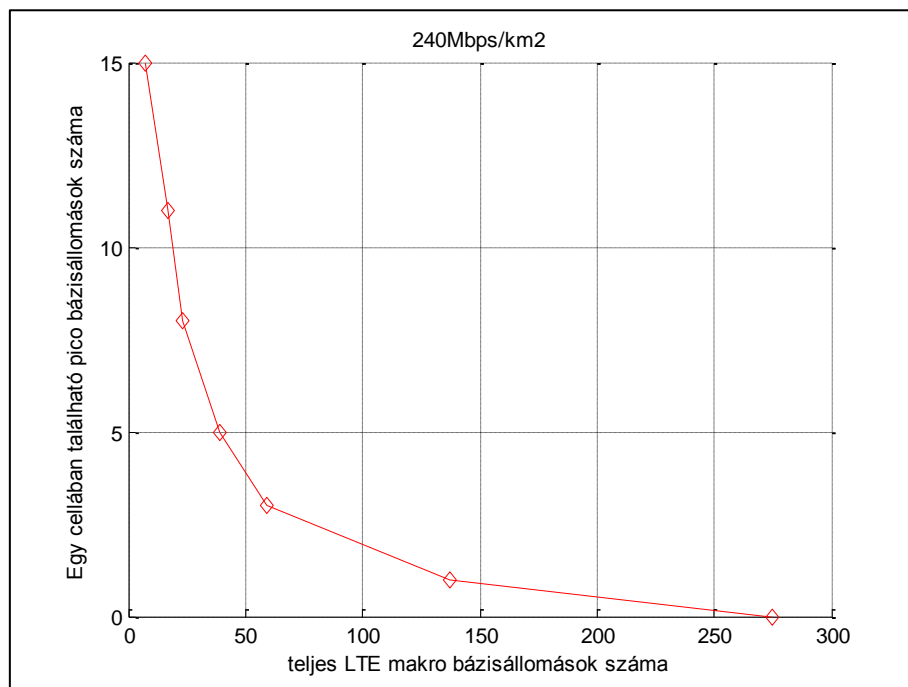
Terület típus:	nagyváros/dense urban
LTE frekvencia:	1800 MHz
Wi-Fi frekvencia:	5 GHz
LTE makro bázisállomás magassága:	50 m
Wi-Fi AP magassága:	5 m
LTE pico bázisállomás magassága:	5 m
Mobil készülék magassága:	2 m
LTE bázisállomás sávszélessége:	20 MHz
Wi-Fi AP sávszélessége:	20 MHz
LTE adó teljesítménye:	1W
Wi-Fi adó teljesítménye:	100 mW
LTE pico adó teljesítménye:	130 mW
Antenna nyereség:	12 dB
Vizsgált terület mérete:	4x4,5 km
Aktív felhasználó sűrűség (ρ_{aktiv}):	240 user/km ²
„Heavy” felhasználó sűrűség (ρ_{heavy}):	60 user/km ²
Aktív felhasználó adatsebesség igénye (C_{aktiv}):	0,5 Mbps
„Heavy” felhasználó adatsebesség igénye (C_{heavy}):	2 Mbps

Az alkalmazott forgalmi mintát négy paraméter határozza meg. A két különböző típusú felhasználó sűrűsége, és a felhasználók kapacitásigénye. Ezen paraméterek segítségével egy területre jellemző kapacitásértéket kapunk:

$$C_{terület} = \rho_{aktív} \cdot C_{aktív} + \rho_{heavy} \cdot C_{heavy} \left[\frac{Mbps}{km^2} \right]$$

A fenti táblázatban látható, EU FP7 Earth Project-ben definiált kapacitás adatokat használtam indulási/referencia paraméterekként. [20]

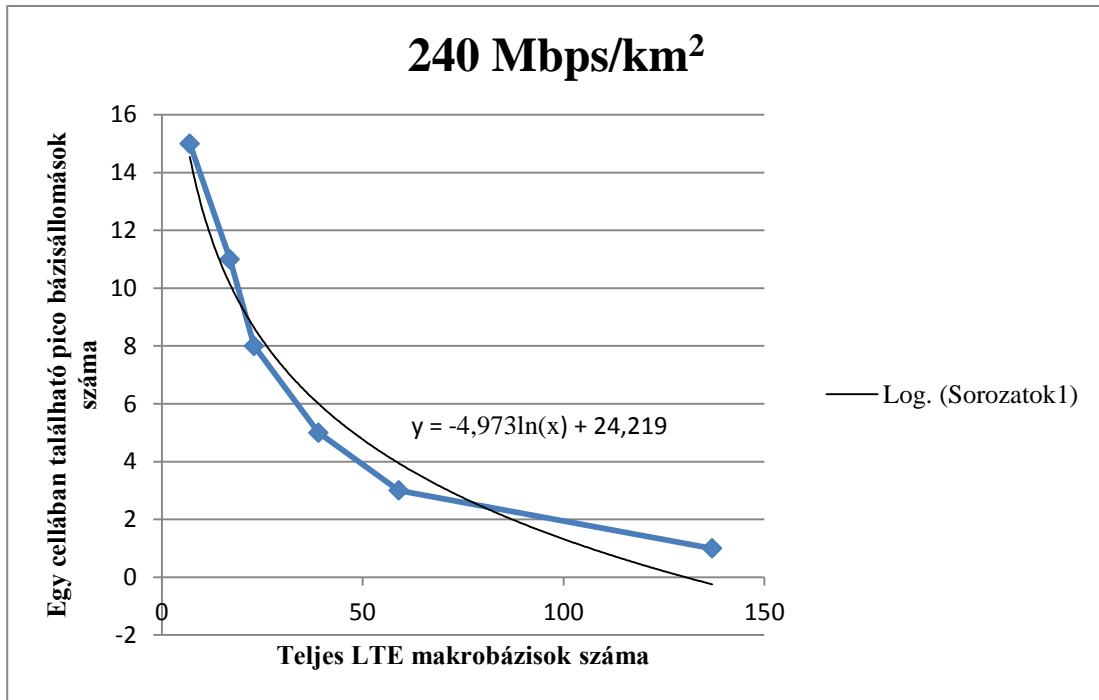
Az elkészült Matlab modul segítségével LTE makro + pico cellás heterogén hálózat esetén, a fenti paraméterek mellett az alábbi méretezési eredményeket kaptam:



21. ábra LTE-pico cella heterogén hálózat – 240 Mbps/km²

A diagramról leolvasható eredmények a trendet illetően megfelelnek várakozásainknak. Az LTE makro bázisállomások számának csökkentésével a makro cellákba egyre több pico bázisállomást kell elhelyezni, hogy az adott forgalmi igényt a heterogén hálózat ki tudja szolgálni.

A diagramra illeszthető egy logaritmusos függvény, amely megközelíti a kapott méretezési eredmények összekötésével kapott görbét. Ezt az illesztést mutatja a 22. ábra.



22. ábra Görbeillesztés a kapott méretezési eredményekre

A kapott görbe egyenlet felírható a következő alakban:

$$P/M = -\alpha \cdot \ln(M) + \beta$$

Ahol P jelenti a pico bázisállomások, M a makro bázisállomások számát, α és β pedig egy-egy konstans számot. Ennek az összefüggésnek az átrendezéséből megkapható a pico cellák és a makro cellák közötti összefüggés:

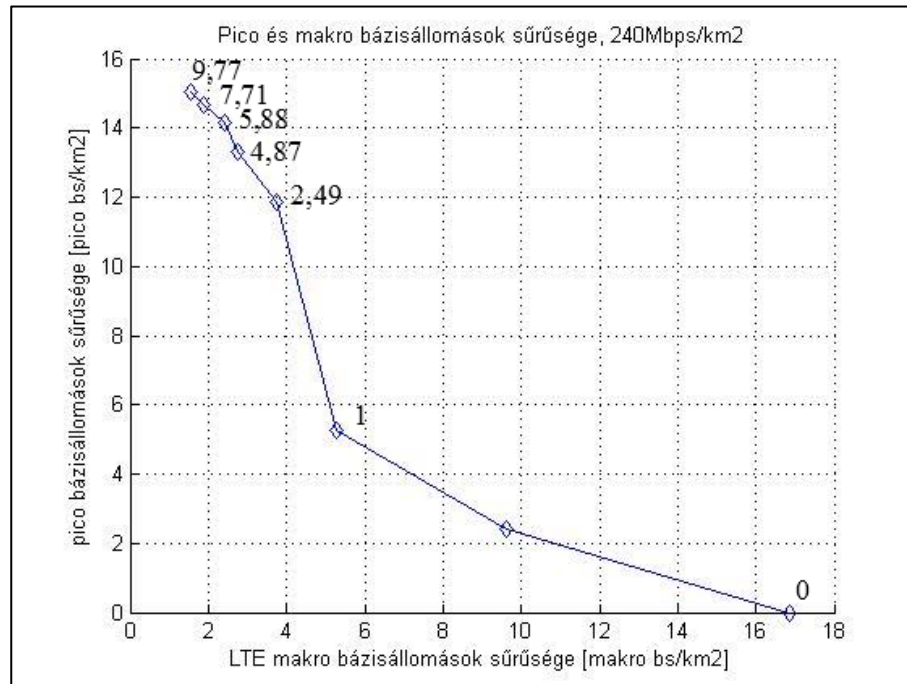
$$P = -\alpha \cdot M \cdot \ln(M) + \beta$$

Ennek a függvénynek a segítségével belátható, hogy a pico és a makro bázisállomások közötti kapcsolat a lineáris $P \approx M$ és a négyzetes $P \approx M^2$ összefüggések között található, jó közelítéssel $P \sim -M \cdot \log M$ arányhoz jutunk (még az illesztés esetleges bizonyos mértékű pontatlansága mellett is).

A 23. ábra a pico bázisállomások sűrűségét mutatja. A pontok melletti számok az egy makro cellába eső pico bázisállomások számát mutatják meg. Fontos megjegyezni, hogy amennyiben a makrocellánkénti pico bázisállomások száma 0 és 1 közötti, a Monte Carlo szimuláció nem ad releváns eredményt. Ez esetben ugyanis egyes cellák kapacitását kiegészíti egy picocella, másokét nem (hiszen valójában nem tudunk törtrész pico bázisállomásokat elhelyezni minden makrocellában). Így pedig csupán a véletlen szimuláció és a kapacitásigények szórásán múlik, hogy éppen a magasabb forgalmú cellák éppen egybe esnek-e a „támogatott” cellákkal. E miatt a jelenség miatt, csak a legalább egy pico

bázisállomás makro cellánkénti elhelyezésével kapható releváns információ a méretezési eredmények alapján.

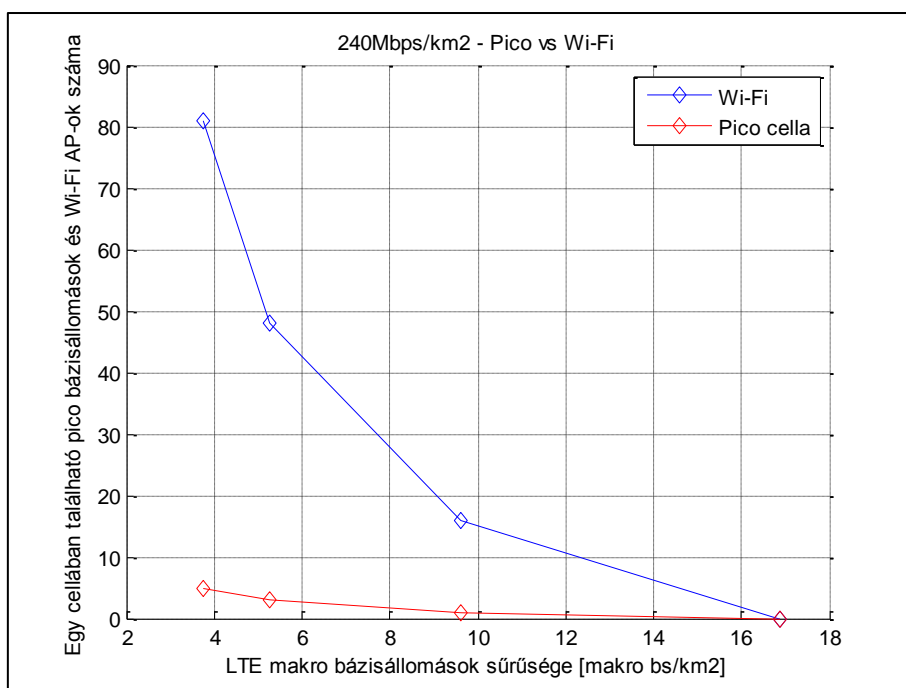
A görbe (releváns tartományon mutatott) karakterisztikája hasonlít az előző pontban ismertetett függvény jellegéhez, amivel az előbbi gondolatmenet helyességét lehet alátámasztani.



23. ábra Pico cellák sűrűsége

5.1 LTE-Wi-Fi és LTE-pico heterogén hálózat összehasonlítása

Ugyanezeket a kapacitás adatokat használva az LTE-Wi-Fi heterogén hálózati modellt alkalmazva is kaptam méretezési eredményeket. A két modell alapján kiszámolt eredmények együttes ábrázolása látható a következő diagramon:



24. ábra LTE pico - Wi-fi heterogén hálózat 240 Mbps/km²

Látható, hogy Wi-Fi AP-ból sokkal több kell, mint pico bázisállomásból, hogyha egy adott területet vizsgálunk, ahol ugyanazt a $240\text{Mbps}/\text{km}^2$ kapacitássűrűséget követeljük meg – sőt, a forgalmi igények növelésével a szükséges APk száma meredekebben növekszik, mint a picocelláké. Ennek a magyarázata a következő: A Cisco Wireless Mesh Access Points, Design and Deployment Guide [19], amely összefüggést ad a Wi-Fi hálózatok SNR és az adatsebesség értékei között, egy minimális SNR értéket határoz meg (14dB), amely alatt a készülék nem tud kapcsolódni az AP-hoz. Ezt az értéket lecsökkentettem egészen 6dB-re, figyelembe véve a technológia fejlődését. Mivel azonban a picocellás LTE hálózat ennél jóval gyengébb jelminőség mellett is működőképes (a pico celláknál használt Alpha-Shannon Formula nem ad ilyen fajta megkötést), így a pico cellák hatósugara kültéri területen nagyobbak adódik, mint a Wi-Fi celláké.

Pontosan ez a jelenség látható az ábrán is. Ahhoz, hogy egy kültéri területet le lehessen fedni Wi-Fi AP-okkal, sokkal többre van szükség, mint LTE pico bázisállomásokra – így a Wi-Fi APk számának növelését nem csupán a szükséges többlet-kapacitás „hajtja”, de a kiegészítő Wi-Fi hálózat lefedettségének növelése is szükségessé teszi. Éppen ezért kültéri területen a pico bázisállomások használata javasolt.

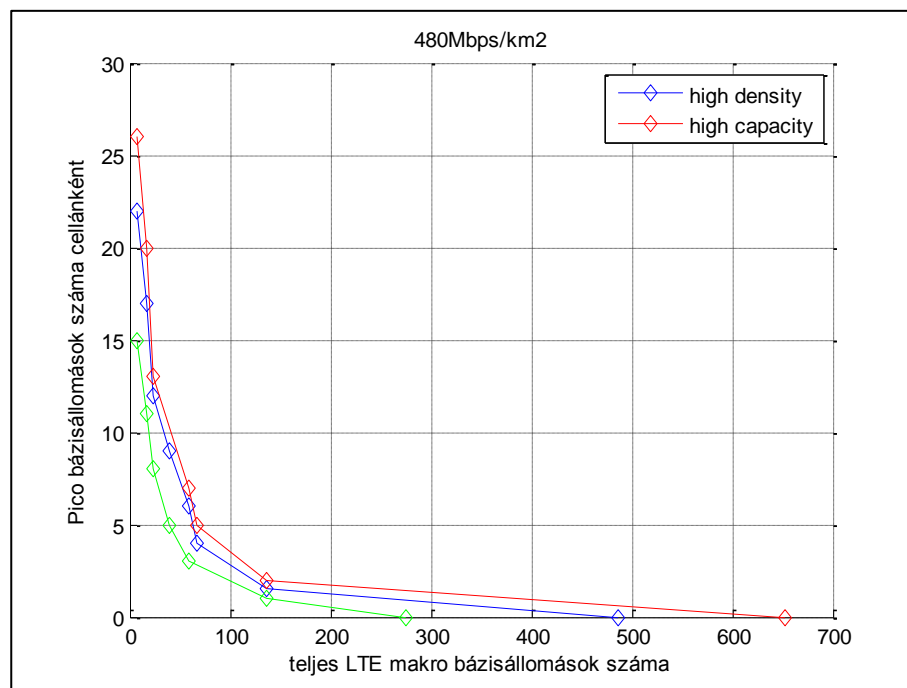
5.2 Bemeneti kapacitás adatok hatása

Ebben a fejezetben azt vizsgáltam, hogy mi történik, hogyha a referencia kapacitásmintát (240 Mbps/km^2) megváltoztatom.

Egy adott kapacitássűrűséget több féle képen lehet elérni. Először azt vizsgáltam, hogy a kapacitássűrűség megduplázásakor ($240 \text{ Mbps/km}^2 \rightarrow 480 \text{ Mbps/km}^2$) hogyan változnak a méretezési eredmények. Egyik esetben ezt a kapacitássűrűség növekedést úgy érem el, hogy a felhasználók sűrűségét, a másik esetben pedig a felhasználók adatsebesség igényét duplázom meg. Mindkét esetben az kapacitássűrűség a kiindulási érték kétszerese lesz.

A következő táblázatban foglaltam össze a kapacitás paraméterek számszerűsített értékeit, az alatta lévő ábra pedig ábrázolja a méretezési eredményeket.

Kapacitássűrűség (Mbps/km ²)	Aktív felhasználó sűrűsége (user/km ²)	„Heavy” felhasználó sűrűség (user/km ²)	Aktív felhasználó adatsebesség igénye (Mbps)	„Heavy” felhasználó adatsebesség igénye (Mbps)
240	240	60	0,5	2
480	480	120	0,5	2
480	240	60	1	4



25. ábra 480 Mbps/km² méretezési eredmények összefoglalása

A zöld görbe a 240 $Mbps/km^2$ -es referencia eredményeket ábrázolja, a piros azt a 480 $Mbps/km^2$ -est, amikor a felhasználó adatsebesség igényét növelve értük el a kívánt kapacitássűrűséget, míg a kék a felhasználók sűrűségének növelésével elért méretezési eredményeket jeleníti meg.

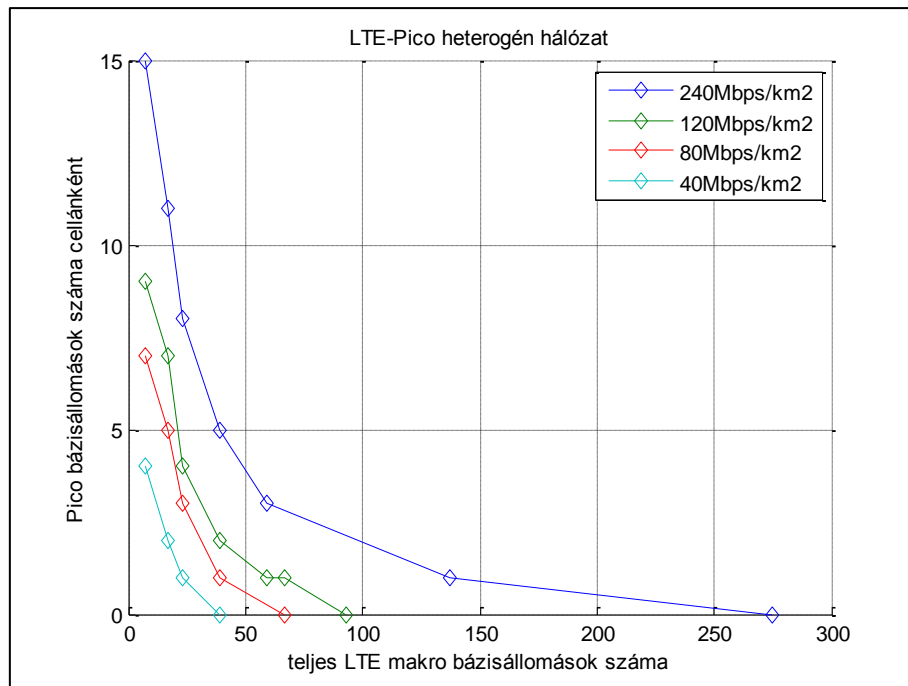
A kapott eredményekből látható, hogy a felhasználók adatsebesség igényének a növelésével kapott görbe mindig a „másik úton” elért görbe felett tartózkodik, ami azt jelenti, hogy egy adott LTE makro bázisállomás szám mellett, több pico bázisállomást kell elhelyezni a területre, hogy a kapacitás mintát ki tudja szolgálni a hálózat. Ebből látszik, hogy ha egy adott kapacitássűrűséget a felhasználók sűrűségének a növelésével érjük el, akkor kevesebb pico bázisállomásra van szükség.

E jelenség magyarázata a legegyszerűbben ládapakolási feladat alapproblémájával szemléltethető. Minél nagyobb adatsebesség-igényű felhasználókat kell a hálózatnak kiszolgálnia, annál több kihasználatlan maradék-sáv szélesség maradhat kihasználatlanul a pico bázisállomásoknál, amely már nem elegendő egy új felhasználó befogadására. Emiatt a picocellák kihasználtsága csökken, azonos kapacitás eléréséhez tehát a pico bázisállomások sűrűsége nagyobb lesz, mint ha a felhasználók sűrűségét növelnénk, változatlan egyedi kapacitás-igény mellett..

A következő részben azt vizsgáltam, hogy hogyan változnak a méretezési eredmények, ha a kapacitás sűrűséget nem növelem, hanem csökkentem. A következő táblázatban láthatóak a különböző kapacitás mintát befolyásoló paraméterek értékei. A csökkenést, a felhasználói adatsebesség igények csökkentésével értem el.

Kapacitássűrűség (Mbps/km²)	Aktív felhasználó sűrűsége (user/km²)	„Heavy” felhasználó sűrűség (user/km²)	Aktív felhasználó adatsebesség igénye (Mbps)	„Heavy” felhasználó adatsebesség igénye (Mbps)
240	240	60	0,5	2
120	240	60	0,25	1
80	240	60	0,17	0,6667
40	240	60	0,0833	0,3334

A különböző kapacitás sűrűség értékek mellett kapott méretezési eredmények láthatóak a következő ábrán. A kapott görbeseregen jól látszik, hogy a kapacitássűrűség csökkenésével egyre kevesebb LTE makro és pico bázisállomás szükséges ahhoz, hogy az adott terület kapacitás igényét ki tudja szolgálni a hálózat.



26. ábra Változó kapacitássűrűségek méretezési eredményei

6 Összegzés

Dolgozatomban bemutattam két különböző típusú kültéri heterogén mobil hozzáférési hálózati méretező modellt. Az LTE makro cellás hálózatot az egyik esetben kiscellás LTE hálózattal, a másik esetben Wi-Fi technológiával egészítettem ki. A bemutatott modellek mindkét esetben képesek meghatározni különböző bemeneti forgalmi kapacitás minták mellett méretezési eredményeket.

A modellek részletes ismertetése után folyamatábrák segítségével mutattam be a modellek implementációját MATLAB környezetben.

Különböző forgalmi kapacitás mintákra méretezési eredményeket számoltam ki. Ezek segítségével hasonlítottam össze a két különböző kiegészítő technológiát (LTE pico és Wi-Fi) és mutattam be ezek hatását a makro LTE hálózatban.

Az eredményekből megkaptam, hogy a pico bázisállomások és a makro bázisállomások számának kapcsolatát leíró függvény a lineáris és a négyzetes összefüggés között helyezkedik

el (a kültéri modellezési eredmények alapján jó közelítéssel $x \cdot \log x$ jellegű fordított összefüggés áll fenn köztük). A két különböző heterogén hálózatot összehasonlító eredmények arra engedtek következtetni, hogy kültéri alkalmazás esetén a területen a pico bázisállomások használata javasolt, a nagyobb hatósugaruk miatt – a Wi-Fi versenyhátránya az AP-k kisebb hatótávolságából fakad. Emellett megvizsgáltam, milyen hatással van a kapacitássűrűség növekedése a hálózat méretezésére: az egyedi forgalmi igények valamelyest sűrűbb antenna-kiosztást tesznek szükségessé, mint változatlan egyedi forgalmi igények mellett a felhasználók számának növelése. (a jelenség magyarázata a nagyobb sávszélesség-igények miatti kihasználatlan maradék-kapacitásban rejlik).

6.1 Kitekintés

Modelljeim jelenleg a kültéri hálózat méretezésére fókuszálnak. Következő lépésként tervezem a modellt olyam módon való kiegészítését, hogy az képes legyen figyelembe venni beltéri (indoor) felhasználókat is. A jövőben szeretném, hogy a méretező modul a jelenleg vizsgált homogén terület helyett egy olyan környezetet vizsgálja, amelyen épületek helyezkednek el és a felhasználók egy része ezekben az épületekben helyezkednének el, és ez esetben a különböző bázisállomások és AP-k elhelyezését is az épületek tetejére illetve bel térre korlátozni. Hosszú távú terveim között szerepel egy térkép alapú heterogén mobil hozzáférési hálózat méretező szoftver készítése, amely valós épület elrendezést tartalmaz, és szabályozza a bázisállomások telepítéseinek a helyeit.

7 Irodalomjegyzék

- [1] Cisco, „Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013–2018,” 2014. [Online]. Available: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html.
- [2] R. Ratasuk, M. A. Uusitalo, N. Mangalvedhe, A. Sorri, S. Iraji, C. Wijting és A. Ghosh, „License-Exempt LTE Deployment in Heterogeneous Network,” *IEEE*, 2012.
- [3] M. Bennis, M. Simsek, W. Saad, S. Walid, M. Debbah és A. Czylik, „When Cellular Meets WiFi in Wireless Small Cell,” 2013.
- [4] U. Barth, „3GPP Long-Term Evolution / System architecture Evolution Overview,” Alcatel, 2006.
- [5] Maradevis-Rethink, „Backhaul Research Service - Fronthaul Trends in the Small Cell Era,” 2012.
- [6] D. López-Pérez, I. Güvenc, Guillaume de la Roche, M. Kountouris, T. Q.S. Quek és J. Zhang, „Enhanced Intercell Interference Coordination Challenges in Heterogeneous Networks,” *IEEE Wireless Communications*, 2011.
- [7] V. Jungnickel, K. Manolakis, W. Zirwas, B. Panzner, V. Braun, M. Lossow, M. Sternad, R. Apelfröjd és T. Svensson, „The Role of Small Cells, Coordinated Multipoint, and Massive MIMO in 5G,” *IEEE Communications Magazine*, 2014.
- [8] A. Tehnology, „Wireless Standards - 802.11a, 802.11b/g/n, and 802.11ac,” [Online]. Available: <http://compnetworking.about.com/cs/wireless80211/a/aa80211standard.htm>. [Hozzáférés dátuma: 16 Október 2014].
- [9] I. Poole, „IEEE 802.11 standards tutorial,” [Online]. Available: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11-standards-tutorial.php>. [Hozzáférés dátuma: 16 október 2014].
- [10] D. Chafekar, V. Kumar, M. V. Marathe, S. Parthasarathy és A. Srinivasan, „Capacity of Wireless Networks under SINR Interference,” 2011.
- [11] B. T. F. Intézet, „Fizipédia,” [Online]. Available: http://fizipedia.bme.hu/index.php/A_zaj_mint_jel. [Hozzáférés dátuma: 16 október

- 2014].
- [12] 3GPP, „3GPP TR 25.996 V10.0.0 (Release 10),” 2011.
- [13] E. O. T. K. é. K. F. Y. Okumura, „Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile service,” *Rev. Elec. Comm. Lab.*, pp. 825-873., 1968.
- [14] M. Hata, „Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services,” *IEEE Trans. Veh. Tech.*, pp. 317-325, 1980.
- [15] L. C. E. Damosso, „Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems Communications,” Brussels, Belgium, 1999.
- [16] I. T. Péter Fazekas, „An energy efficient cellular mobile network planning algorithm”.
- [17] I. Pupaleski, *Monte Carlo Simulation for UMTS capacity planning in one.* [Performance]. Telekom Slovenia Group.
- [18] S. Raychaudhuri, „Introduction to Monte Carlo Simulation,” in *IEEE*, 2008.
- [19] C. System, „Cisco Wireless Mesh Access Points, Design and Deployment Guide, Release 7.3,” Cisco System, Inc., San Jose, USA, 2012.
- [20] G. Auer, V. Giannini, I. Gódor, M. Olsson, M. Ali Imran, D. Sabella, M. J. Gonzalez, O. Blume, A. Fehske, J. A. Rubio, P. Frenger és C. Desset, „How Much Energy is Needed to Run a Wireless Network ?,” FP7-ICT-2009-4-247733-EARTH, 2013.
- [21] A. Alexiou, C. Bouras, V. Kokkinos, A. Papazois és G. Tsihrizis, „Spectral Efficiency Performance of MBSFN-enabled LTE Networks,” in *IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, 2010.

8 Ábrajegyzék

1. ábra Heterogén mobil hozzáférési hálózat	5
2. ábra Hasznos jel és interferencia ábrázolása	9
3. ábra LTE cellák elhelyezkedése	10
4. ábra 3 szektoros sugárzó karakterisztikája [12]	12
5. ábra 3-szektorsugárzó antennák elhelyezkedése [12]	12
6. ábra Szektorsugárzó SINR képe.....	13
7. ábra COST231-Okumura-Hata modell	15
8. ábra Alpha-Shannon Formula [17].....	16
9. ábra Felhasználók elhelyezése a területen egyenletes elosztás szerint.....	18
10. ábra Hexagonális cellák elhelyezése	18
11. ábra Referencia Wi-Fi AP elhelyezése.....	19
12. ábra $Q=3$ esetén a bázisállomások és az AP-k elhelyezése.....	19
13. ábra Egy mobil készülék Wi-Fi AP-hoz való csatlakozása.....	22
14. ábra Heterogén hálózatban a készülék LTE bázisállomáshoz való kapcsolódása	23
15. ábra Pico bázisállomáshoz való kapcsolódás	24
16. ábra A makro bázisállomások interferenciája	25
17. ábra Pico bázisállomás interferenciája LTE bázisállomáshoz való kapcsolódáskor.....	27
18. ábra A felhasználó a pico bázisállomás hatósugarán kívül helyezkedik el.....	27
19. ábra A méretező szoftver folyamatábrája.....	31
20. ábra A szimuláció folyamatábrája.....	32
21. ábra LTE-pico cella heterogén hálózat – 240 Mbps/km^2	34
22. ábra Görbeillesztés a kapott méretezési eredményekre.....	35
23. ábra Pico cellák sűrűsége	36
24. ábra LTE pico - Wi-fi heterogén hálózat 240 Mbps/km^2	37
25. ábra 480 Mbps/km^2 méretezési eredmények összefoglalása.....	38
26. ábra Változó kapacitássűrűségek méretezési eredményei.....	40