



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Híradástechnikai Tanszék

Mobil relékkel kiegészített hálózatok teljesítőképességének és energiahatékonyságának vizsgálata

TDK dolgozat

Témavezető: Fazekas Péter tudományos munkatárs
Híradástechnikai Tanszék

Készítette: Patocskai Tamás
*Mérnök informatikus MSc
I. évfolyam*

2011

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	3
Abstract	4
1. Bevezetés	5
1.1. A cellás mobil hálózatok kialakulása és fejlődése.....	5
2. Energiahatékonyság az ICT szektorban	7
2.1. Energiafogyasztás mértéke.....	7
2.2. A cellás hálózatok fogyasztása	7
3. Multihop cellás hálózatok	10
3.1. MCN-hálózatok általános felépítése	10
3.2. Felhasználói relék használata	12
3.2.1. A felhasználói relék használatának előnyei	12
3.2.2. A felhasználói relék hátrányai	13
4. A megoldandó probléma	14
4.1. Felhasznált teljesítmény számítása	15
4.1.1. Bázisállomások teljesítménye	15
4.1.2. Mobil állomások fogyasztása.....	15
4.2. Lefedett terület nagyságának számítása.....	15
4.2.1. A bázisállomás és a mobil eszközök által lefedett terület számítása	16
4.2.2. A mobil eszközök eloszlása és sűrűsége	17
4.2.3. A relézés fokszáma.....	18
4.3. A számítások menete	19
4.3.1. Területnövekedés számítása – 1. számítás	19
4.3.2. Kikapcsolt bázisállomások területének lefedése – 2. számítás.....	20
5. Számítási módszertan	22
5.1. Cellasugár meghatározása.....	22
5.2. Mobil által lefedett kör sugarának meghatározása	24
5.3. Relézésben résztvevő mobil eszközök meghatározása	24
5.4. Lefedett terület meghatározása	25
5.5. Energiafogyasztás meghatározása	25
5.5.1. Bázisállomás fogyasztása	25
5.5.2. Mobil relék fogyasztása.....	26
5.6. Energiahatékonyság kiszámítása	27
6. Területnövekedés számítása	28
6.1. Egyenletes eloszlású mobil relék.....	28
6.2. Normális eloszlású mobil relék	30
6.3. Egyenes menti eloszlású mobil relék.....	32
6.3.1. Bázisállomástól fél cellasugárnyira lévő egyenes, $y=0,5R$	32
6.3.2. Bázisállomástól $0,9$ -cellasugárnyira lévő egyenes, $y=0,9R$	33
7. Lefedtség vizsgálata bázisállomások kikapcsolása esetén	35
7.1. Egy bázisállomás kikapcsolása.....	35
7.2. Hat bázisállomás kikapcsolása	36
8. Összefoglalás	38
Ábra-, egyenlet- és táblázatjegyzék	39
Irodalomjegyzék	40

Összefoglaló

A hagyományos cellás hálózatokban a bázisállomás közvetlen rádiós kapcsolatban áll a mobil eszközökkel, azaz a terminálok megszakítatlan rádiós összeköttetésen keresztül kommunikálnak a hálózattal.

A forgalom megváltozásának köszönhetően azonban a cellák szélén rendelkezésre álló átviteli kapacitások egyre kevésbé képesek kiszolgálni a robbanásszerűen megnövekedett adatforgalmat. A mobil adatkommunikáció erőteljes térnyerésével pedig igény mutatkozik új, eddig lefedetlen területek kiszolgálására is. Erre a problémára alapvetően a további bázisállomások telepítése, azaz a hálózat „sűrítése” jelent megoldást. A szakirodalomban és a szabványokban ezen túlmutatóan egyéb megoldások is megtalálhatók, például a kooperáló bázisállomások, elosztott antennarendszerek, többantennás átvitel, stb.

Egy további, ígéretesnek tűnő megoldás az adattovábbítók, vagy relék használata. A 3GPP (3rd Generation Partnership Project) a relék számos csoportját definiálja (pl. egyszerű jelerősítő, vagy hibajavítást is végző erősítő, stb.). Ezek előnye, hogy a bázisállomásoknál egyszerűbbek, olcsóbbak, gyorsabban, alacsonyabb költséggel telepíthetők, nem igényelnek átviteli hálózati (backhaul) kapcsolatot, ezért általuk a rosszul ellátott területeken a jel-zaj viszony egyszerűen növelhető, a lefedettség bővíthető. Ilyen eszközök alkalmazásával tehát bizonyos terminálok nem közvetlenül, hanem a relén keresztül kommunikálnak a bázisállomással.

Dolgozatomban a mobil eszközök által relézett hálózatokat vizsgálom meg hatékonysági szempontból. Munkám során feltételezem, hogy a hálózatban jelen lévő mobil terminálok képesek relé funkciót ellátni, azaz más terminálok adatforgalmát a bázisállomás felől/felé továbbítani. Statikus szimulációkkal elemzem egy mobil reléssel kiegészített, egy bázisállomásos rendszer által lefedett terület növekedését az eredeti cella területéhez viszonyítva. Ehhez a mobil eszközök három lehetséges eloszlását tekintetem: egyenletes eloszlást a városi forgalom modellezéséhez, két-dimenziós normális eloszlást a nagy forgalmú területek (hotspot) modellezéséhez, illetve egyenes menti egyenletes eloszlást egy forgalmas út melletti cella modellezéséhez. Vizsgálom, hogy a mobil készülékek sűrűsége, az egy átviteli útban alkalmazható relék maximális száma, illetve a mobil-mobil és mobil-bázisállomás átvitel maximális távolsága hogyan befolyásolja a lefedett terület növekedését.

További szimulációs vizsgálatokat mutatok be, amelyek célja, hogy több bázisállomásos rendszerben a mobil relézés hatékonyságát vizsgálja. Ebben az esetben az elemzés célja az, hogy a fent említett paraméterek függvényében meghatározza azt a minimális számú bázisállomást, amely esetén még a vizsgált terület lefedve marad, azaz a jelen lévő minden mobil terminál el tud érni egy bázisállomást bizonyos maximális számú reléállomáson keresztül. A vizsgálatok motivációja az, hogy egy ilyen hálózatban, egy adott forgalmi helyzetet modellező paraméterbeállításához adódó minimális számú bázisállomáson felüli állomásokat kikapcsolhatónak tekintjük, energiamegtakarítás céljából is. A mobil reléssel ellátott hálózatokat így egységnyi lefedett területre jutó felhasznált teljesítmény szerinti energiahatékonysági metrika szempontjából is elemzem a dolgozatban.

Abstract

In traditional cellular networks user equipment has direct radio connection with the base station. As the volume of data traffic in mobile networks increase rapidly, provided service quality and capacity near the edge of cells becomes insufficient. Moreover, the growing penetration of mobile data communications rise the need for providing service over areas that had not been covered so far. The basic solution to these problems is the deployment of more base stations, that is the densification of cellular networks. Scientific literature and network standards consider other solutions as well, like cooperative base stations, distributed antenna systems, multiantenna transmission, etc.

A further improvement possibility is the application of wireless relays. 3GPP (3rd Generation Partnership Project) defines several types of relays (e.g. simple „amplify and forward” repeater, or „decode and forward relay”, etc.). These devices have the advantage of being simpler and their lower price, along with the faster and cheaper deployment. Relays do not require backhaul links to be installed, hence within their coverage area the signal to noise ratio can be increased easily, hence better service quality can be achieved. Applying these devices means that in this case user terminals do not communicate directly with the base station, rather through the relay station.

In this study I evaluate the efficiency of cellular networks extended by mobile relays. Throughout this work I assume that the mobile devices being present in the network are capable of relaying other users’ data towards/from the base station. I use static computer simulations to analyse the possible coverage extension with mobile relaying in a single base station system. For this I considered three possible spatial distributions of mobile devices: uniform distribution to model urban traffic, two dimensional Gaussian distribution to model hotspot scenarios and uniform distribution over a line, to model cells around high traffic roads. I evaluate the increase in coverage area through multihop relaying, considering the effect of maximum number of relaying hops allowed, user density and the ratio of the distances of mobile – mobile and base station – mobile links.

I also present further simulation studies, with the goal of evaluating mobile relays in a multi-cell system. In this case the evaluations target the minimum number of base stations required for the area being covered (that is each mobile is able to reach any base station through the maximum number of relaying hops), as the function of said parameters. The motivation of these examinations is that in such a network we may consider that all other than the minimum number of base stations can be switched off, supposing a given set of parameters that represent a given traffic situation. This assumption is to save energy consumption of those base stations, in order to increase energy efficiency. In these scenarios mobile relaying is also evaluated according to used power per unit served area energy efficiency metric as well.

1. Bevezetés

1.1. *A cellás mobil hálózatok kialakulása és fejlődése*

A múlt század közepén a vezetékes telefonok nagymértékű elterjedésével az emberek életének részévé vált a telefonálás, az egyre olcsóbb tarifák elterjedése után pedig már csak egy lépés kellett a mozgó távközlés kialakulásához. Az 1950-es években használt első vezeték nélküli telefonokat azonban nagy súlyuk és magas energiafogyasztásuk miatt kizárólag autóba építve lehetett használni, így ezek nem terjedtek el széles körben.

A technológia fejlődésével azonban egyre könnyebb és kisebb fogyasztású telefonok gyártására volt lehetőség. Az ipar felkarolta a vezeték nélküli telefonálás fejlődését, és az ETSI (European Telecommunication Standards Institute) a 80-as évek közepén nekiállt a digitális alapokon álló második generációs (2G) GSM rendszer kialakításának. Az átállással lehetőség nyílt az adat alapú kommunikáció kifejlődésére, és a 90-es évek második felében elterjedt a csomagalapú szolgáltatásokat nyújtó GPRS (General Packet Radio Services) technológia. Ezzel az adatalapú átvitel széles körben is használhatóvá vált. Ezt követően a 3GPP (Third Generation Partnership Project) már kifejezetten az adatátviteli szolgáltatások igényeit szem előtt tartva alakította ki a harmadik generációs (3G) UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) rendszert, mely során hatékonyabbá vált a rádiós frekvenciakihasználtság és szélesebb lett a használt frekvenciatartomány, így a felhasználók nagyobb adatátviteli sebességgel tudtak kommunikálni a vezeték nélküli cellás hálózatokban. Ezzel együttesen megváltoztak a felhasználók szokásai is, a hang alapú szolgáltatások használata egyre kisebb arányúvá vált, míg az adat alapú szolgáltatások elterjedése erőteljes növekedésbe kezdett.

A bázisállomások és a gerinchálózat fogyasztása azonban nem tartozott a hálózattervezés legfontosabb szempontjai közé. A szolgáltatók és az infrastruktúra kialakítói a nagy piaci növekedés következtében egyre több és több hálózati elemet építettek bele a hálózatba, nem törődve azok fogyasztásával, kizárólag a szolgáltatások minél hatékonyabb értékesítését tűzték ki célul. Ezért a vezeték nélküli cellás hálózatok energiafogyasztása jelentősen megugrott ezen időszak alatt. A kialakult helyzetet felismerve az Európai Bizottság felszólította az ICT (Information and Communications Technology) szektort

energiafogyasztásának mérséklésére és szén-dioxid kibocsátásának csökkentésére, miszerint 2015-ig 20 %-kal kell mérsékelnie az általa kibocsátott szén-dioxid mennyiségét¹.

A forgalmi igények folyamatosan növekedése miatt tehát változtatásra szükség a hatékonyabb energiafelhasználás érdekében. A 3GPP belekezdett egy teljesen új alapokon nyugvó hálózat kifejlesztésébe, mely során megvizsgálták a korábbi rendszerek minden előnyét és hátrányát. Így egy teljesen új hálózati struktúra és rádiós átviteli technológia kialakítására is lehetőség adódott. A még nagyobb mobilitást, még nagyobb fizikai adatátviteli sebességet és még több felhasználót kiszolgálni képes negyedik generációs (4G) LTE (Long Term Evolution) hálózat kifejlesztése során az új hálózati struktúra energiahatékonysága meghatározó szerepet játszott. Az új rendszer által használt közeghozzáférési technológia az OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), mely sokkal hatékonyabb spektrumkihasználtságot tesz lehetővé, miközben a megnövekedett adatátviteli igényeket sokkal szélesebb spektrumon képes kiszolgálni.

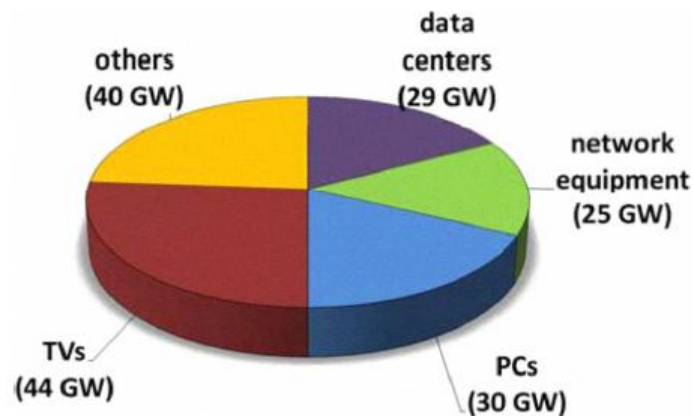
Az új hálózati struktúra, a SAE (System Architecture Evolution) is számos újdonságot tartalmaz a kommunikációs hálózat felépítésében, melyet az egyszerűsítés jegyében terveztek meg. Az információáramlás a számítógépekhez hasonlóan IP csomagokkal történik. Az egységesített maghálózathoz intelligensebb bázisállomások, új nevén eNodeB-k kapcsolódnak, melyek egymással is kommunikálva menedzselik a hálózat működését. A követelmények között előírták a hálózat fogyasztásának mérését, mellyel a felmerülő költségeket minimalizálni kell a kívánt teljesítmény fenntartása mellett. Ezen újítások hatékonyabb energiafelhasználást tettek lehetővé az új hálózatban.

¹ European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013)

2. Energiahatékonyság az ICT szektorban

2.1. *Energiafogyasztás mértéke*

A rádió, TV, internet nélkül szinte elképzelhetetlennek tartjuk az életet napjainkban. Mindeközben bele se gondolunk, hogy ez mennyi energiafelhasználással jár. Az információs társadalom elsődleges mozgatórugója az infokommunikációs rendszerek gyártása és felhasználása. Az ICT (Information and Communications Technology) szektor összteljesítménye egyes becslések a 168 GW körüli volt a 2008-as évben, mely több mint 8 %-át teszi ki az elektromos energiafogyasztásnak világszinten [1]. A szektoron belüli energiafogyasztás megoszlását mutatja a 1. ábra.



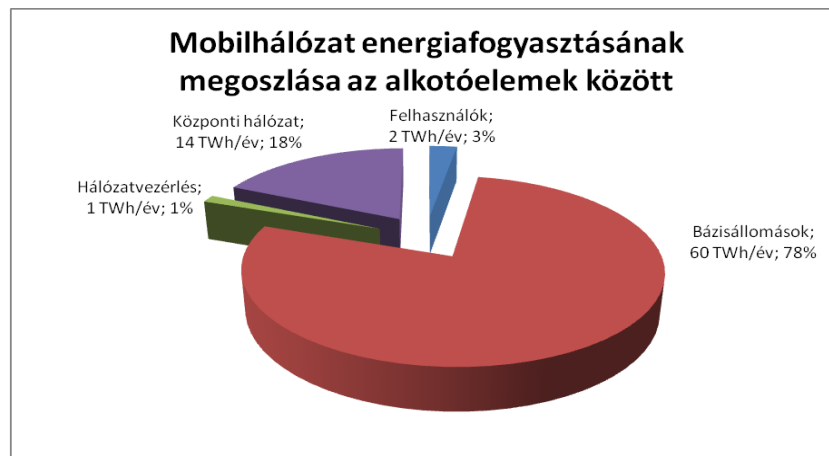
1. ábra - Az ICT szektor energiafogyasztásának összetevői [1]

A szektorban mérhető növekedés mértéke olyan nagy, hogy az energiatakarékos eszközök használata csak fékezni tudja az éves energiafogyasztás növekedési ütemét, ami még így is több mint 8 %-os bővülést mutat. Becslések szerint a felhasznált teljesítmény 2020-ra meg fogja haladni a 430 GW-os értéket, körülbelül 14 %-át képezve a világszintű elektromos energiafogyasztásnak. [1]

2.2. *A cellás hálózatok fogyasztása*

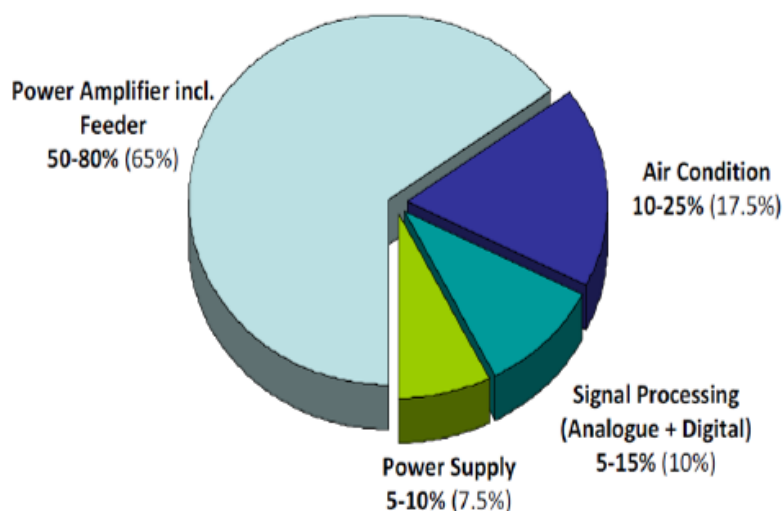
A vezeték nélküli hálózatok energiafogyasztásának két meghatározó tényezője a központi hálózat és a bázisállomások fogyasztása. Ezen két összetevő teszi ki a mobil hálózatok teljesítményének körülbelül 96 %-át, ami több mint 74 TWh energiát jelent évente. A központi hálózat hatékonyabb üzemeltetése céljából tervezték meg a SAE hálózati struktúrát, melyben a központi hálózat egyszerűsítésével annak üzemeltetése egyszerre lett hatékonyabb információáramlás és egyben energiahatékonyság szempontjából is.

A cellás hálózatok energiafogyasztásának másik meghatározó eleme a bázisállomások fogyasztása. A világméretű hálózat mintegy 4 millió bázisállomásának éves összfogyasztása 60 TWh-ra tehető, ami körülbelül 30 millió tonna szén-dioxid kibocsátásnak felel meg [2].



2. ábra – Mobilhálózat energiafogyasztásának megoszlása [2]

A vezeték nélküli hálózatok, így a cellás hálózatok energiafogyasztásának fő komponense a rádiós jel kisugárzásának rossz hatásfokából adódik. Az elsődleges cél tehát a kisugárzást lehetővé tevő jelerősítő minél hatékonyabb megvalósítása, és a rendelkezésre álló frekvenciatartomány minél jobb kihasználása. Mivel a hálózat felépítéséből adódóan szükséges a rádiós jel megbízhatatlan minőségű csatornára ültetése, ezért érdemes megvizsgálni a bázisállomások további összetevőit is energiahatékonyság szempontjából [6]:



3. ábra – A bázisállomás fogyasztásának összetevői [2]

- Teljesítményerősítő: amikor a jelet a kívánt teljesítménnyel akarjuk kisugározni, akkor figyelembe kell vennünk, hogy az ehhez felhasznált energia a teljesítményerősítő

hatékonyságától függ. Ez a komponens az, ami a legnagyobb részét képezi a felhasznált teljesítménynek, így kritikus feladat a teljesítményerősítő hatékonyságának fejlesztése. A hatékonyságot egy százalékos számértékkal szokták jellemezni, hogy a felhasznált teljesítmény hány százalékából lesz ténylegesen kisugárzott jel. Az erősítők hatékonysága körülbelül 10 és 40 százalék között szokott lenni, de már fejlesztés alatt állnak a nagyobb hatékonyságú Gallium-nitrid (GaN) alapú erősítők is.

- Jelfeldolgozás: a küldésre szánt, vagy vett jelet a bázisállomásnak értelmezni kell a további feldolgozás érdekében. Kétféle jeltípust is fel kell tudni dolgozni, mind analóg, mind digitális jeleket kell tudni fogadnia. Ez a feldolgozási teljesítmény 5 és 15 százalékát képezi a bázisállomás fogyasztásának. A jövő hálózataiban, mint például az LTE-ben sokkal összetettebb jelek vannak, így ez az érték növekvő tendenciát mutat.
- Hálózati táplálás, szünetmentes ellátás: a tápellátó egység, a transzformátorok hatékonyságából is adódik teljesítményvesztés. Ennek mértéke nem olyan nagy, ám mégis figyelembe kell venni a hatását. Az itt felhasznált teljesítmény körülbelül 5-15 %-a bázisállomás fogyasztásának.
- Hűtés: a bázisállomásokat a jelfeldolgozó egység, tápellátó egység, illetve az erősítők melege miatt hűteni kell. A hűtés leginkább a külső hőmérséklettől és a szellőzéstől függ. A hűtésre fordított energia egy jelentős részét képezi a bázisállomás fogyasztásának, szélsőséges esetben akár az összteljesítmény negyede is szükséges lehet. Jellemzően 10-25 %-ot képvisel ez az összetevő, azonban manapság már vannak hűtés nélküli mikro- és pico-cellák is.

3. Multihop cellás hálózatok

A mobiltelefonálás szokásainak változása miatt átalakultak a cellás hálózattal kapcsolatban elvárt követelményeink. A hang alapú szolgáltatások kis sáv szélességű, best-effort jellegű igényei helyett előtérbe kerültek a magasabb QoS-t (Quality of Service - szolgáltatásminőség) és magasabb adatátviteli sebességű szolgáltatásokra való igény.

A mobil távközlés elterjedése magával hozta a cellás hálózatok kialakulását, itt ugyanis a hálózat egymástól távol eső helyein is biztosítva van a központi hálózathoz való közvetlen hozzáférés. A második és harmadik generációs cellás hálózatok felépítése ezért kiválóan alkalmas volt feladatainak ellátására. Ezen hálózatok alapvetően egyhopos cellás hálózatok (SCN - Single-hop Cellular Network), melyben a mobil eszközök közvetlenül a bázisállomással állnak kapcsolatban, minden adatátvitel a bázisállomásokon keresztül történik. A hálózat adatátviteli sebesség növekedését a frekvencia-újrafelhasználásnak köszönhetően további bázisállomások elhelyezésével lehet biztosítani.

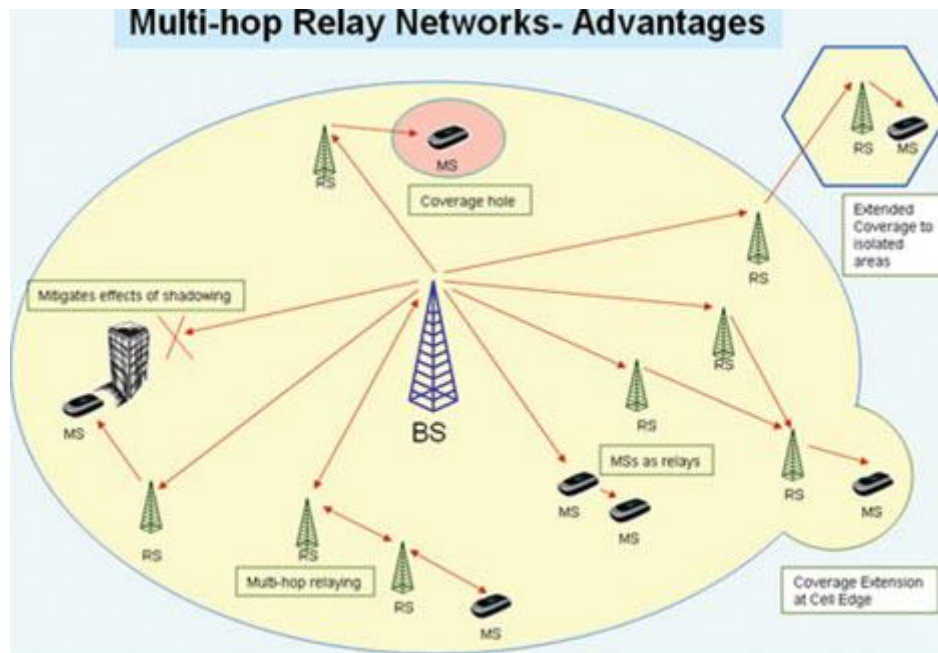
A másik véglet ezen a területen a multihop ad-hoc hálózatok kialakulása, mely elsősorban a szenzorhálózatok és a kis lefedettséget igénylő hálózatok számára alkalmas. Ebben az esetben nincs hierarchikus hálózati infrastruktúra, mely az adatok célba juttatásáért felelős, hanem a mobil eszközök egyenrangú módon, vagy saját hierarchiát felépítve juttatják adataikat a kívánt célállomáshoz. Az adatátviteli sebesség növekedését itt a mobil állomások sűrűbb elhelyezésével lehet elérni.

A negyedik generációs hálózatok ígéretes fejlesztéseként a multihop cellás hálózatok (MCN – Multihop Cellular Network) ötvözik a cellás hálózatok és az ad-hoc hálózatok számos jó tulajdonságát. Megtartják a hierarchikus felépítést a hálózatban, miközben jeltovábbító relék használatával fokozzák a hálózat teljesítőképességét.

3.1. *MCN-hálózatok általános felépítése*

Az MCN hálózatok központi eleme a hagyományos cellákhoz hasonlóan továbbra is a bázisállomás, mely kapcsolatban áll a központi hálózattal, összekapcsolva az egymástól távol lévő mobil állomásokat. A cellán belül a 4. ábrán látható módon rendelkezésre állnak még relék, melyek jeltovábbító funkciót valósítanak meg a mobil eszközök és a bázisállomás között, ezáltal a cella szélén tartózkodó mobil eszközök számára jobb jel-zaj viszonyt tesznek lehetővé. Ennek hatására megnő a hálózati lefedettség és a cella szélén elérhető adatátviteli

sebesség. Ez olyan területeken lehet előnyös, ahol lehetetlen, vagy költséges lenne egy új bázisállomás telepítése.



Picture Credit: Frost & Sullivan

4. ábra – Multihop cellás hálózatok általános felépítése és előnyei [4]

A jeltovábbító relék bázisállomásokkal szembeni előnye az olcsóbb telepítés, mely annak köszönhető, hogy a relé nem kapcsolódik közvetlenül a központi hálózathoz, nem szükséges vezetékes hálózati kapcsolat kiépítése, kizárólag áramellátás biztosítása szükséges a relé számára.

A jeltovábbító reléknél alapvetően három típust különböztetünk meg:

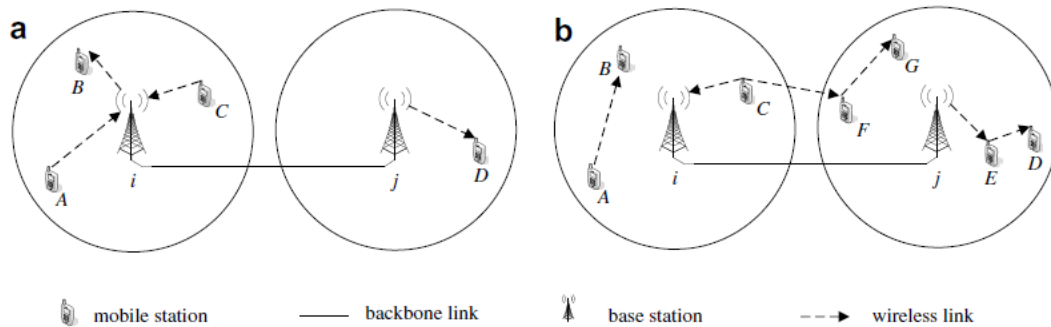
- fix relék: a bázisállomásokhoz hasonlóan telepítve vannak a hálózatban, elhelyezkedésük a működés során nem változik.
- mobil relék: a forgalmi viszonyoktól függően áthelyezhetők. Ilyenek például a mozgó tömegközlekedési eszközökre elhelyezett állomások.
- felhasználói relék: a felhasználók eszközei is elláthatnak adattovábbítási funkciót. A 3GPP szabványosító szervezet jelenleg is dolgozik a mobil eszközök kommunikációját lehetővé tevő szabvány kidolgozásán.

A fix és mobil relézéssel kapcsolatban rengeteg tanulmány látott már napvilágot, így a Wireless World Research Forum (WWRF) [5], és a következő generációs hálózatokat kutató

WINNER (Wireless-World-Initiative-New-Radio) projekt az Európai Unió 6th Framework Project keretén belül is felhívta a figyelmet a relézés fontosságára. [6]

3.2. Felhasználói relék használata

A felhasználói relék alkalmazásakor az adattovábbító funkciót maguk a mobil eszközök biztosítják. Ennek működését mutatja be az 5. ábra.



5. ábra – 1-hopos (a) és felhasználói reléket használó több-hopos (b) hálózatok [7]

. A felhasználói relék használata kevésbé elterjedt a szakirodalomban. Amióta megjelent az LTE szabványban a relék használatának lehetősége, azóta kezdtek el foglalkozni a felhasználói relék felhasználásának gondolatával.

3.2.1. A felhasználói relék használatának előnyei

A mobil eszközök reléként való alkalmazásának számos előnye van, mint például [7]:

- csökkenti a kisugárzott teljesítményt: ha egy mobil állomást több-hopon keresztül érünk el, az a rádiós terjedés tulajdonságai miatt kevesebb összteljesítményt igényel, mintha közvetlenül a bázisállomásból akarnánk elérni nagy teljesítményű kisugárzás árán.
- megnöveli a rendszer teljesítőképességét: a hálózatban lecsökkentett sugárzási teljesítmény következtében a szomszédos cellák jele kevésbé interferál a cellabeli jellel.
- magasabb átviteli sebességet tesz lehetővé: a hagyományos cellás hálózatokban a bázisállomáshoz közeli mobilok általában magasabb átviteli sebességet érhetnek el, mint a távolabbi eszközök, a jelterjedés csillapításának köszönhetően. A multihop hálózatnak köszönhetően azonban a cella szélén is

magasabb adatátviteli sebesség érhető el a relék továbbításával, a relék „közelebb hozzák” a távoli állomásokat a bázisállomáshoz rádiós értelemben.

- kiegyenlíti a hálózati terheltséget: a felhasználói relék segítségével a forgalmas cellák igényeit át lehet csoportosítani egy kevésbé forgalmas cellához. Kis forgalmú esetekben energia-megtakarítás céljából egyes bázisállomásokat ki is lehet kapcsolni, a forgalmat átirányítva a szomszédos cellákhoz.
- megnöveli a hálózati lefedettséget: a felhasználói relék segítségével olyan területek érhetőek el, amelyek bázisállomásokkal nehezen lefedhetők.
- kiterjeszti a hálózati struktúrát: a mobil eszközök nagyobb átviteli sebességet lehetővé tevő hálózati technológiával is kommunikálhatnak egymással, amennyiben mindketten támogatják azt, például Bluetooth-on vagy WLAN-on keresztül.

3.2.2. A felhasználói relék hátrányai

Az előnyökön kívül természetesen hátrányai is vannak az ilyen jellegű hálózati megoldásnak, melyek:

- a rendszer komplexitása megnő, a kialakult hálózatban kezelni kell a relék mozgását is. A nagy mozgékonyság megnöveli a handover-ek számát a rendszerben, emellett a bázisállomásban fenn kell tartani útvonalinformációkat a mobil eszközök elhelyezkedésének megfelelően.
- a rendszer biztonsági teljesítménye lecsökken, ugyanis a mobil eszköz és a bázisállomás eddig közvetlenül hitelesítették egymást, a kialakult hálózatban azonban ezt meg kell oldani a megbízhatatlan reléken keresztüli kommunikációban is.
- számlázási és adminisztrációs nehézségek adódnak abból is, hogy a mobil eszközök díjköteles frekvenciát használnak a továbbításhoz.
- megnöveli a csomagok késleltetését, így elsősorban azokat az adatalapú szolgáltatásokat támogatja, melyekben nem kritikus a késleltetés.

4. A megoldandó probléma

A dolgozatban a mobil eszközök által relézett hálózatok energiahatékonyságát vizsgálom. Az energiahatékonyság cellás hálózatokban értelmezett egyik gyakran használt mérőszáma az egységnyi terület lefedettségének fenntartásához felhasznált teljesítmény, azaz a hálózati lefedettség fenntartásához szükséges teljesítményt osztva a hálózat által lefedett terület méretével (mértékegysége W/km^2) [8]. Az energiahatékonyság növelése érdekében tehát a megoldandó feladat ezen érték csökkentése.

A hagyományos cellás hálózatokban az energiahatékonyság úgy számítható, hogy a bázisállomás teljesítményét el kell osztani a bázisállomás által lefedett területtel. Ezzel szemben a relézett hálózatokban az energiahatékonyságot úgy lehet kiszámítani, hogy a bázisállomások mellett a lefedettséget segítő, relézéshez szükséges mobil eszközök fogyasztását is hozzá kell adni a hálózat energiafogyasztásához, és ezt kell elosztani a relézés által kiterjesztett terület nagyságával.

A használt metrika jellegéből adódóan energiahatékonyságot kétféleképpen lehet javítani. Az egyik módszer, hogy a lefedett területet próbálom megnövelni a relék segítségével, és eközben a bázisállomások által felhasznált teljesítmény állandó marad. A másik módszer szerint pedig a bázisállomások összteljesítményét csökkentem le úgy, hogy a lefedett terület nagysága ne csökkenjen.

Számításaimban mindkét esetet megvizsgálom. Az első esetben egy bázisállomás helyezek el, és azt vizsgálom, hogy a mobil állomások által relézett hálózat területe milyen mértékben növekszik az eredetileg lefedett területhez képest. A második esetben egy több bázisállomásból álló hálózatban kapcsolok le egyes bázisállomásokat, és a mobil állomások sűrűségének függvényében vizsgálom a lefedettség mértékét. Mindkettő esetben kiszámítom, hogy a relézett hálózatban kialakuló energiahatékonyság hogyan viszonyul az eredeti hálózatéhoz képest.

A bázisállomások kikapcsolásának abban az esetben lehet létjogosultsága, amikor a hálózat terhelése kicsi, nem szükséges sok adatátviteli igényt kiszolgálni. Ez leggyakrabban az éjszakai-hajnali működés kapcsán merül fel, ugyanis ekkor általában csak néhány felhasználó használja aktívan a hálózatot. Számításaimban éppen ezért azt feltételezem, hogy a hálózat terhelése nem számottevő, ritkán van forgalmi igény, a bázisállomás az idő 10 %-ában aktív. A felhasznált teljesítmény nagy részét ebben az esetben a lefedettség

fenntartásához szükséges teljesítmény teszi ki (bázisállomás alapfogyasztása és az állandóan sugárzott vezérlőcsatornák miatti fogyasztás). Emiatt érdekes annak vizsgálata, hogy mi történik, ha egy vagy több bázisállomás kikapcsolása miatt kimaradó területet multihop hálózattal próbálok meg lefedni.

4.1. Felhasznált teljesítmény számítása

A felhasznált teljesítménynek két összetevője van, ez a bázisállomások és a területnövekedést elősegítő mobil eszközök többletfogyasztása.

4.1.1. Bázisállomások teljesítménye

A bázisállomások teljesítményének két összetevője van, egy dinamikus, a kisugárzott teljesítménytől függő lineáris és egy statikus, a bázisállomás bekapcsolt állapotában fellépő állandó komponens [3] (a modell pontos leírása megtalálható az 5.5.1 szakaszban). A bázisállomások terhelése a feltételezéseink szerint 10 %-os, ami azt jelenti, hogy nagy átlagban az idő 10 %-ában maximális teljesítménnyel sugároz, a többi időszakban a kimeneti teljesítmény elhanyagolható, kizárólag a statikus komponens fogyasztását kell figyelembe venni. Az időre kiátlagolva ez azt jelenti, mintha a bázisállomás a teljes időben 10 %-os teljesítménnyel sugározna.

4.1.2. Mobil állomások fogyasztása

A multihop hálózatban minden állomáshoz meghatározható, hogy belőle minimálisan milyen hosszú rádiós láncon keresztül érhető el a bázisállomás. Ezen lánc első tagja a bázisállomáshoz kapcsolódik, ezért ezt a linket a bázisállomás fogyasztásába már beleszámoltuk. A többi link fenntartása viszont a mobil eszközök által biztosított. A feladat tehát annak meghatározása, hogy mennyi a mobil eszközök által felhasznált teljesítmény, mely a multihop hálózat működéséhez szükséges. A mobil eszközök az 1-hopos hálózatban is készenléti állapotban vannak, ezért elégséges azzal a teljesítménnyel számolni, amit az eszköz a relézési funkció ellátására használ. Mivel a hálózatban lévő forgalmi igények feltételezéseink szerint olyan alacsonyak, hogy általában csak néhány felhasználó kommunikál, ezért a teljesítményt, amit a néhány relé felhasznál, elhanyagolhatónak tekintem számításaimban.

4.2. Lefedett terület nagyságának számítása

A lefedett terület számításakor a következő 4 paraméternek van fontos szerepe:

- a bázisállomás által lefedett terület nagysága

- a mobil eszköz által lefedett terület nagysága
- a mobil eszközök eloszlása és sűrűsége
- a relézés fokszáma

4.2.1. A bázisállomás és a mobil eszközök által lefedett terület számítása

Az egyes rádiós eszközök által lefedett területet a rádiós terjedés és a hálózati követelmények határozzák meg. A számítás során figyelembe vett tényezők, illetve ezek megválasztása következő módon történt:

- bázisállomás típusa: a cellás hálózatokban tipikusan kétféle antennát használnak. Az egyik a körsugárzó antenna, mely egyenletesen sugároz 360° fokban, a másik a szektorsugárzó, mely körülbelül 120° -os szögben sugároz. Számításaim során az inkább külvárosi, vagy sík vidékeken használt, minden irányban egyenletesen sugárzó körsugárzós antennát feltételeztem.
- mobil relé antennája: a mobil eszközök általában körsugárzós antennával rendelkeznek, így számításaimban is a 360° -ban egyenletesen sugárzó antennát feltételeztem.
- kisugárzott teljesítmény: a lefedett terület nagysága nagymértékben függ attól, hogy mekkora teljesítménnyel ad az adó, hiszen nagyobb teljesítmény esetén magasabb jel-zaj viszony (SNR – Signal to Noise Ratio) érhető el a cellában, így távolabbi területekhez is megfelelő lehet a vételhez elégséges jel-zaj viszony. A nagyobb területeket lefedő bázisállomások által kisugárzott teljesítmény napjainkban néhányszor 10 Watt. Számításaim során a bázisállomások 30 Wattos teljesítménnyel sugároznak. A mobil eszközök antennája használat közben néhány száz milliwatt teljesítménnyel sugároz, modellemben a 3GPP szabványnak megfelelő 250 mW maximális sugárzási teljesítményt választottam.
- antenna magassága: a terjedési csillapítás során fontos szempont, hogy milyen magasságban helyezkedik el a sugárzó antenna. Számításaim során a bázisállomás antennája 30 méteres, a mobil eszközé 1,5 méteres magasságban található.
- terjedési csillapítás: az antenna által kibocsátott teljesítmény az antennától való távolság függvényében fokozatosan csökken, a messzebről érkező jel sokkal kevésbé erős, mint a közletről jövő jel. A távolságtól való függés meghatározására a

környezettől függően sok empirikus és statisztikus modell született, ezek közül én a külvárosi terjedést jól modellező COST 231-modellel számoltam [9]. A modell szerint a csillapítás nagysága függ a bázisállomás és a mobil eszköz magasságától, a köztük lévő távolságtól, illetve a jel frekvenciájától.

- termikus zaj: a kisugárzott jel vételét rontja egy fehér alapzaj is, mely függ a hőmérséklettől és az átvitelben használt frekvenciatartomány nagyságától.
- ICI, (Inter-Cell Interference), cellaközi interferencia: egy további átvitelt zavaró tényezőnek számít még az azonos frekvencián kommunikáló eszközök interferenciája. A számításban az egy cellás esetben feltételeztem, hogy az alacsony forgalmi viszonyok miatt a cellán belül nincs interferencia. A többcellás esetben a kommunikációt a szomszédos bázisállomások által kisugárzott teljesítmény rontja.
- frekvenciatartomány: a rádiós átvitel a harmadik és negyedik generációs cellás hálózatokban szélessávú frekvenciatartományon valósul meg. Ennek megfelelően a számításban használt sáv szélesség 10 MHz.
- vivőfrekvencia: a terjedési csillapítás egy fontos paramétere az átvitelre felhasznált vivőfrekvencia nagysága. A korai rendszerek alacsony frekvencián kommunikáltak a jobb terjedés miatt, a jelenlegi rendszerekben viszont a kis cellák és szélesebb frekvenciasávok miatt magasabb vivőfrekvencián zajlik a kommunikáció. Manapság elterjedt vivőfrekvenciák a 900 és 1800 MHz (GSM rendszer) és a 2100 MHz (UMTS rendszer) körül találhatóak, modellemben az 1800 MHz-es vivőfrekvenciát választottam jobb terjedési tulajdonsága miatt.
- adatátviteli sebesség követelmények: a rádiós átvitel során a vételi pontban kialakult jel-zaj viszony és a frekvenciatartomány nagysága határozza meg azt, hogy a kommunikációs csatornán mennyi információ mennyiség vihető át másodpercenként. Az adatátviteli követelmények tehát azt határozzák meg, hogy adott sáv szélesség esetén milyen jel-zaj viszony értékek mellett valósulhat meg az adatátviteli követelményben megfogalmazott adatátviteli sebességgel történő kommunikáció.

4.2.2. A mobil eszközök eloszlása és sűrűsége

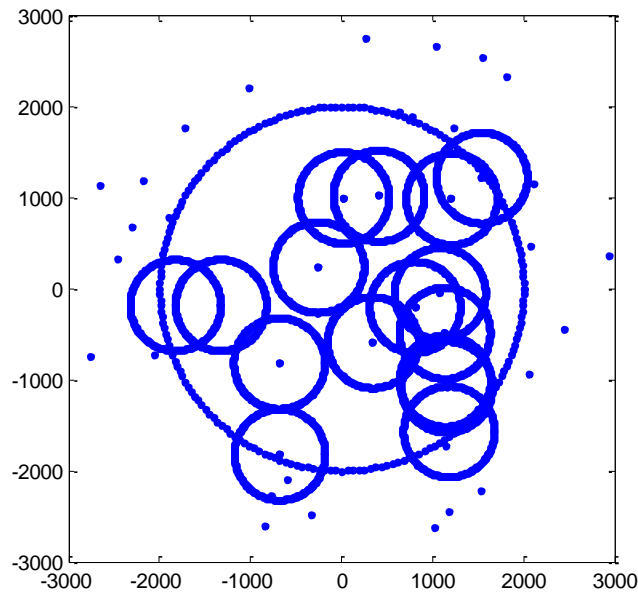
A területi lefedés fontos paramétere a hálózatban jelenlevő relék száma és elhelyezkedése, ezért a számítások során a következő eloszlásokat és sűrűségeket definiáltam:

- egyenletes eloszlás: a mobil eszközök eloszlása egyenletes a relézett hálózat számára elérhető területen. Az egy cellányi területre jutó relék számát az első számításban 50-500 db közötti, a másodikban 500-800 db közötti értéknek választom meg és a számítás paraméterének tekintem.
- normális eloszlás: a mobil eszközök kétdimenziós normális eloszlás szerint helyezkednek el a hálózatban. Ez modellezi a nagy forgalmú (hotspot) területeket. A relék a bázisállomás körül sűrűbbek, egyégyeni cellasugarat tekintve szórásnégyzetük 1. A mobil eszközök száma itt is 50-500 db/cella között választható paraméter.
- egyenes menti eloszlás: ebben az esetben a mobil relék egy egyenes mentén helyezkednek el, modellezve ezzel egy forgalmas utat. Itt két paraméter határozza meg a relék elhelyezkedését, az egyik az egyenes bázisállomástól vett távolsága, a másik pedig a mobil eszközök sűrűsége ezen az egyenesen.

4.2.3. A relézés fokszáma

A relézés fokszáma úgy definiálom, hogy egy mobil végpont állomás maximálisan hány rádiós linken keresztül kapcsolódhat a bázisállomáshoz. Tehát például az 1-hopos (1-ugrásos) relézés azt jelenti, hogy minden elért mobil állomás felé a kommunikációs csatornában egyetlen rádiós út van, nincs megszakító relé, a mobil végpont közvetlenül csatlakozik a bázisállomáshoz. N-hopos relézés esetén a rádiós linkekből álló lánc maximális hossza N.

Lefedett területnek mindezek után azt nevezem, amit a hálózat a bázisállomással vagy reléző állomások közbeiktatásával elér. Erre egy példa a 6. ábrán látható. Itt a bázisállomás által lefedett terület nagy körrel van jelölve, az egyes mobil relék által lefedett terület kis körrel. A lefedett terület a körök területének uniója.



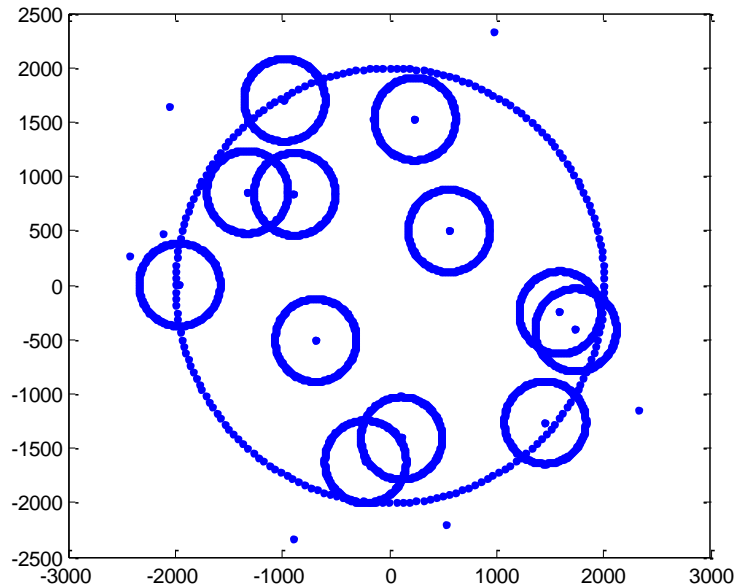
6. ábra - Lefedett terület

4.3. *A számítások menete*

A számítások során statikus szimulációkat futtatok le, melyben a mobil eszközök különböző elhelyezkedéseire vizsgálom meg a hálózat lefedettségét. Ezután a lefutott szimulációk területeit, mint valószínűségi változót tekintem, és meghatározom a 95 %-os valószínűséggel lefedett terület nagyságát.

4.3.1. Területnövekedés számítása – 1. számítás

Az első esetben egy bázisállomásunk van, és a minimálisan megkövetelt 2 Mbit/s adatátviteli sebességgel elérhető területeket tekintjük lefedettnek. Először ebben az esetben számítom ki a hálózat energiahatékonyságát. Ezután a lefedett területet kiterjesztem a lefedett területet a maximális hopszámú relézéssel, megtartva a követelményben megfogalmazott 2 Mbit/s adatátviteli sebességet. Ezután a kialakult állapotra is megvizsgálom a hálózat energiahatékonyságát az összteljesítmény és a megnövekedett terület hányadosaként. Ezután összehasonlítom egymással a két energiahatékonysági értéket.



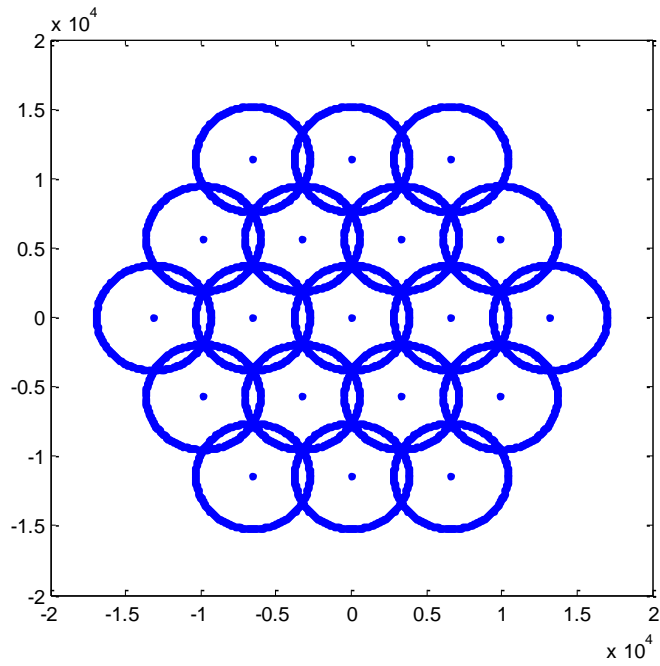
7. ábra - Területnövekedés vizsgálata

A 7. ábrán látható, hogy a központi bázisállomás körül elhelyezkedő mobil eszközök hogyan terjesztik ki a lefedett területet.

4.3.2. Kikapcsolt bázisállomások területének lefedése – 2. számítás

A második számítás során több cellás eseteket vizsgálok meg, az adatátviteli követelmény itt is a 2 Mbit/s átviteli sebesség. Első esetben kiszámítom a 19 bázisállomásból álló hálózat energiahatékonyságát arra az állapotra, hogy az összes bázisállomás be van kapcsolva. Ez után kikapcsolok néhány bázisállomást, és a felhasználó-sűrűség függvényében tekintem a relézett hálózat területi lefedettségét. Amennyiben a multihop hálózat lefedi a kezdeti állapotbeli terület 95 %-át, abban az esetben megvizsgálom a kialakult hálózat energiahatékonyságát. A kapott értéket összehasonlítom a kezdeti állapot energiahatékonyságával.

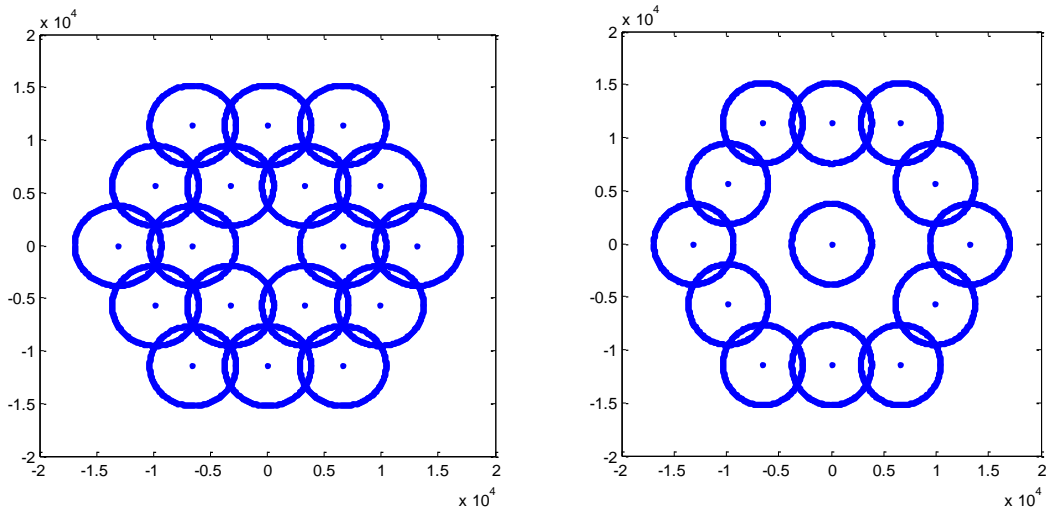
A számítások során 19 bázisállomás 8. ábrán látható hexagonális elhelyezkedését tekintem alapesetnek:



8. ábra – A 19 bázisállomás elhelyezkedése

Ebből első esetben egyetlen bázisállomást kapcsolok ki a 9(a). ábrán látható módon, így vizsgálom meg a teljes terület lefedettségét a multihop működés közben.

Második esetben a 9(b). ábrán látható bázisállomások maradnak bekapcsolva, a kikapcsolt bázisállomások gyűrű alakban helyezkednek el.



9. ábra - 1 kikapcsolt (a) és 6 kikapcsolt (b) bázisállomás elhelyezkedése

5. Számítási módszertan

5.1. Cellasugár meghatározása

A cellasugár nagyságát úgy határozom meg, hogy a bázisállomástól való legtávolabbi pont helyét keresem, ahol a kialakult jel-zaj viszony még lehetőséget ad a kívánt adatátviteli sebességgel való kommunikáció megvalósítására. Ez a pont fogja jelenteni a cella szélét, a bázisállomástól való távolsága pedig a cella sugarát. A csatornkapacitás számításához a Shannon kapacitást használom:

$$C = B \cdot \log_2(1 + SNR)$$

1. egyenlet – Shannon kapacitás számítása

ahol $C = 2$ MBit/s, a megkövetelt csatornkapacitás bit/s-ban

$B = 10$ MHz, a használt frekvenciatartomány nagysága Hertz-ben

SNR az adott pontban jelenlevő jelteljesítmény aránya a zajteljesítményhez viszonyítva

Ez a képlet a kívánt csatornkapacitás és a frekvenciatartomány ismeretében megadja nekünk azt a legalacsonyabb jel-zaj arányt, ahol ez a kommunikáció megvalósítható.

A cellasugár meghatározásakor így azt kell kiszámítani, hogy az antennától maximálisan milyen távolságban lesz a jel-zaj arány még éppen nagyobb az előbb kapott értéknél.

A jel-zaj arány meghatározásakor figyelembe kell venni a jelterjedés során bekövetkezett csillapítást, a zaj nagyságát, melynek két forrása a termikus zaj és a szomszédos cellák cellaközi interferenciája.

A jelterjedési csillapítás dB-ben történő kiszámításához a külvárosi területeket jól szimuláló COST-231 jelterjedési modellt alkalmaztam, mely a 2. egyenlet szerint számítható ki.

$$\begin{aligned} C_H &= 0.8 \cdot (1.1 \cdot \log_{10}(f) - 0.7) \cdot h_{MS} - 1.56 \cdot \log_{10}(f) \\ P_L(f, h_{MS}, h_{BS}, d) &= 46.3 + 33.9 \cdot \log_{10}(f) - 13.82 \cdot \log_{10}(h_{BS}) - C_H + \\ &+ (44.9 - 6.55 \cdot \log_{10}(h_{BS})) \cdot \log_{10}(d) \end{aligned}$$

2. egyenlet – Jelterjedési csillapítás külvárosi COST-231 modell esetén

ahol $h_{MS} = 1,5$ m, a mobil eszköz magassága

$h_{BS} = 30$ m, a bázis állomás magassága

$f = 1800$ MHz, a használt frekvencia nagysága Hertz-ben

d = a bázisállomás és a mobil eszköz távolsága kilométerben

A teljes száv szélességre jutó termikus zajt a 3. egyenlet által leírt módon kapjuk meg:

$$P_{term} = k * T * B$$

3. egyenlet – Termikus zaj számítása

ahol $k = 1,38 * 10^{-23}$ J/K, a Boltzmann állandó

$T = 293$ K, a hőmérséklet, 20 °C

$B = 10$ MHz, a használt frekvenciatartomány nagysága

Ezek után a jel-zaj viszony kiszámítása úgy történik, hogy az adóállomásról eljutott jelerősséget elosztjuk az ugyanezen a frekvencián jelen lévő zavaró tényezőkkel, így a szomszédos cellák teljesítményeinek és a termikus zajnak az összegével. Az (x,y) pontban lévő mobil eszköz SNR-jének a kiszámítási módját az 4. egyenlet írja le.

$$SNR(x, y) = \frac{\frac{P}{10^{\frac{P_L(f, h_{BS}, h_{MS}, \sqrt{x^2 + y^2})}{10}}}}{L_f \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P}{10^{\frac{P_L(f, h_{BS}, h_{MS}, \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2})}{10}}} + P_{term}}$$

4. egyenlet – Jel-zaj viszony kiszámítása

ahol $P = 30$ W, a bázisállomás kisugárzott teljesítménye

$L_f = 10$ %, a hálózat terheltsége

(x_i, y_i) a szomszédos szektor antennájának helye

és az alsó összegzés a szomszédos cellák antennáin megy végig.

Ezen képlet (R,0) pontbeli paraméteres behelyettesítésével meghatározható az a maximális sugár, amelyre a cella minden pontjában teljesül a kívánt minimális jel-zaj arány.

5.2. Mobil által lefedett kör sugarának meghatározása

A mobil eszköz által lefedett terület sugarát az előző ponthoz hasonló módon lehet számítani, a következő különbségek figyelembevételével:

- a jelterjedési csillapítás számításakor az adó magassága megegyezik a mobil eszköz magasságával, hiszen itt a mobil relé lesz az adó.
- a szomszédos cellák zavaró teljesítményeit ebben az esetben átagoltam a kitüntetett cella területére, ez alapján megkaptam a cella területén érvényes átlagos zavaró teljesítményt.
- a mobil eszköz kisugárzott teljesítménye 0,25 W.

5.3. Relészben résztvevő mobil eszközök meghatározása

A multihop hálózat teljesítményelemzésekor a lefedett terület és az összteljesítmény kiszámításakor meg kell határozni a relészben részt vevő mobil eszközöket. Számításaimban azt feltételezem, hogy minden mobil állomás képes relzési funkciót ellátni, így az általa elérhető további mobil eszközök részére adatot továbbítani. Egy maximális hopszámra vonatkozó feltétel esetén a relzésben azok a mobil eszközök vehetnek részt, akik a bázisállomásból maximálisan hopszám-1 hosszú rádiós láncon érhető el, ahol a rádiós lánc linkjei a kívánt adatátviteli sebességet lehetővé teszik.

A láncok meghatározása a következő módon történik:

1. Kiválasztom azokat a mobil állomásokat, melyek közvetlenül elérhetők a bázisállomásból a kiszámolt cellasugár mellett. Ezek lesznek az egy hoppal elérhető állomások.
2. Megkeresem azokat a még nem elért mobil állomásokat, melyek az egy-hoppal elért mobil állomásokból elérhetők. Ez függ attól, hogy mekkora a mobil eszköz által lefedett kör sugara. Ezek az eszközök lesznek a 2 hoppal elért állomások
3. Megkeresem azokat az állomásokat, akik 2 hoppal még nem, de a 2 hoppers állomások segítségével lefedhetők.
4. Ezt addig folytatom, amíg ki nem választottam az összes állomást, melyek n-1 hoppal lefedhetők, ahol n a relzés fokszáma.

Az így megtalált eszközök tehát a potenciális reléző állomások, melyek segítségével a maximum n-hopos kommunikáció megvalósítható.

5.4. Lefedett terület meghatározása

A lefedett terület meghatározása úgy történik, hogy a bázisállomások és a mobil relék segítségével együttesen lefedett terület nagyságát kell kiszámolni. A meghatározandó területhez tehát egymást metsző körök területét kell számolni. Mivel ilyen sok kör esetében az egyesített terület kiszámítására nem létezik hatékony algebrai megoldás, és a teljes területre való vizsgálat négyzetes lépésszámot eredményez a terület nagyságára tekintve, ezért a számítást a következő módon végzem el. A számítást soronként végzem el, így a terület nagyságában lineáris az algoritmus. A lépések a következők:

1. Kiszámítom a különböző sugarak x koordinátáit az y értékek függvényében.
2. Minden sorhoz felveszek két tömböt, az egyiket a kör bal oldali pontjainak, a másikat pedig a kör jobb oldali pontjainak fenntartva.
3. Ezután a körök pontjait beleteszem azon sorok tömbjeibe, amely sorokban a koordinátájuk és a sugaruk szerint területet fednek le.
4. Ezután soronként összegzem a lefedett területet, a bal oldali kezdőpontokat és jobb oldali zárópontokat megfelelő sorrendbe állítva.

5.5. Energiafogyasztás meghatározása

5.5.1. Bázisállomás fogyasztása

A számításban alkalmazott makró cellák energiafogyasztását a bázisállomás különböző állapotait figyelembe véve, azokat átlagolva kaphatjuk meg. A makró cellák fogyasztásának modellje a következő paramétereket veszi figyelembe:

- szektorok száma a cellában (N_{Sector})
- erősítők száma szektoronként (N_{PApSec})
- maximális kisugárzott teljesítmény egy erősítőre (P_{TX})
- erősítő hatékonysága (μ_{PA})
- jelfeldolgozás teljesítménye (P_{SP})
- hűtés teljesítménye (C_{C})
- tápellátás vesztesége (C_{PSBB})

Ezen paraméterek használatával a 5. egyenlet alapján számíthatjuk a bázisállomás fogyasztását [3]:

$$P_{BS} = N_{Sector} \cdot N_{PApSec} \cdot \left(\frac{P_{TX}}{\mu_{PA}} + P_{SP} \right) \cdot (1 + C_C) \cdot (1 + C_{PSBB})$$

5. egyenlet – Bázisállomás fogyasztásának kiszámítása [3]

A továbbiakban a következő, LTE-re jellemző értékekkel számítom a fogyasztást [3]:

$$N_{Sector} = 1; N_{PApSec} = 1; \mu_{PA} = 38 \%; P_{SP} = 58 \text{ Watt}; C_C = 0,29; C_{PSBB} = 0,11$$

A bázisállomás képletének átalakításából következik a 10. egyenlet:

$$P_{BS}(P_{TX}) = P_{stat} + P_{TX} \cdot \mu_{dyn}$$

6. egyenlet – A bázisállomás egyenértékű fogyasztási képlete

Az LTE-re jellemző értékek esetén a paraméterek helyettesítési értékei:

$$P_{stat} = 83,05 \text{ Watt}; \mu_{dyn} = 3,77$$

5.5.2. Mobil relék fogyasztása

A multihop hálózatban a mobil állomások egy kialakult elhelyezkedésére kiszámítható egy átlagos hopszám, ami azt mutatja meg, hogy egy mobil állomás átlagosan hány reléző mobil eszközön keresztül érhető el, a kommunikáció átlagosan hány reléző állomás teljesítményét igényli. Amennyiben minden mobil állomás a bázisállomás felől közvetlenül érhető el, abban az esetben az átlagos hopszám 0, így nem szükséges mobil eszköz a hálózat fenntartásához. Amennyiben minden mobil állomás 2 rádiós linken elérhető el, abban az esetben az átlagos hopszám 1. Ekkor annak a valószínűsége, hogy egy állomás relézni fog egy kapcsolatban $1/n_m$, ahol n_m a mobil eszközök száma. A n_h átlagos hopszámú hálózatban ugyanennek a valószínűsége n_h/n_m .

A második számítás során a hálózat 10 %-os terheltségével számolok, ami azt jelenti, hogy az idő 10 %-ában van szükség adat forgalmazására. Ebben az esetben tehát annak valószínűsége, hogy a reléző állomás az adott időpillanatban forgalmat továbbít $0,1 \cdot n_h/n_m$.

Mivel a mobil eszközök bekapcsolt állapotbeli fogyasztása 1-hopos hálózatban is szükséges, ezért elégséges azt a teljesítményt összegezni, amit a mobil eszköz relézéshez felhasznál. Ekkor a kommunikációhoz szükséges teljesítmény összesen:

$$P_{RN} = Lf \cdot \frac{n_h}{n_m} \cdot P_{rel} \cdot n_m = Lf \cdot n_h \cdot P_{rel}$$

7. egyenlet – Felhasználói relék fogyasztásának számítása

ahol $L_f = 10\%$, a hálózat terheltsége

n_h = az átlagos hopszám

n_m = a lefedett mobilok száma

$P_{rel} = 570$ mW, egy mobil eszköz relézéshez felhasznált teljesítménye [10]

Mivel a hálózatban lévő forgalmi igények feltételezéseink szerint olyan alacsonyak, hogy általában csak néhány felhasználó kommunikál, ezért a teljesítményt, amit a néhány relé felhasznál, elhanyagolhatónak tekintem számításaimban.

5.6. *Energiahatékonyság kiszámítása*

Az energiahatékonyságot úgy számítom, hogy a bázisállomások összteljesítményét elosztom a multihop hálózat által lefedett terület nagyságával:

$$Eff = \frac{\sum P_{BS}}{A}$$

8. egyenlet – Az energiahatékonyság számítása

ahol P_{BS} a bázisállomások teljesítménye

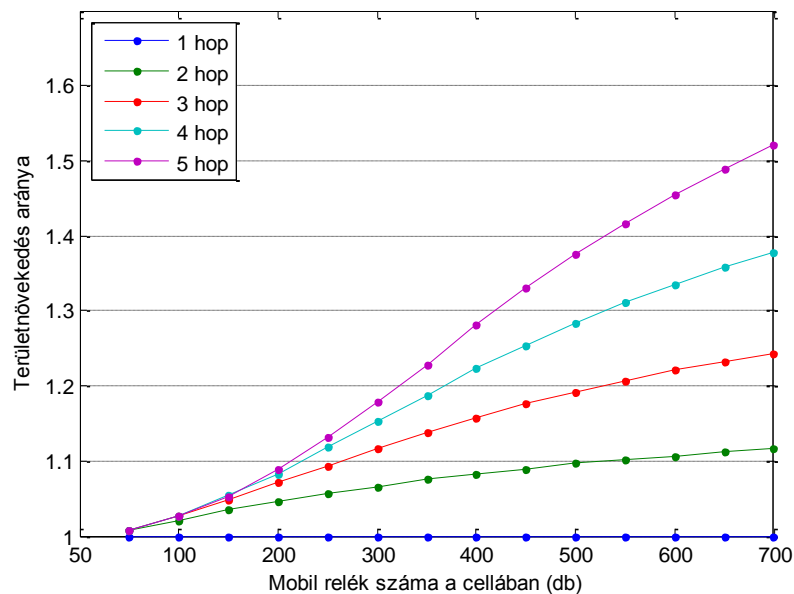
A a lefedett terület nagysága négyzetkilóméterben.

6. Területnövekedés számítása

Ebben a fejezetben azt vizsgálom meg, hogy egy bázisállomás által lefedett terület mekkora arányban tud kiterjeszteni a mobil eszközök relézése. Ehhez a felhasználók különböző eloszlását és sűrűségét tekintetem.

A bázisállomások által kisugárzott teljesítmény: 30 W, ebből adódóan a cellasugár nagysága az ismertett modell szerint: 3891 m, a bázisállomás által lefedett terület pedig: 47,56 km². Egy mobil relé által lefedett terület sugara: 388 m, a mobil relék által lefedett terület: 0,473 km². A bázisállomás fogyasztása 30 W sugárzási teljesítmény mellett a modell szerint: 196,15 W. A relézés nélküli eset energiahatékonysága tehát: 4,1246 W/km²

6.1. Egyenletes eloszlású mobil relék



10. ábra – Területnövekedés aránya – egyenletes eloszlás

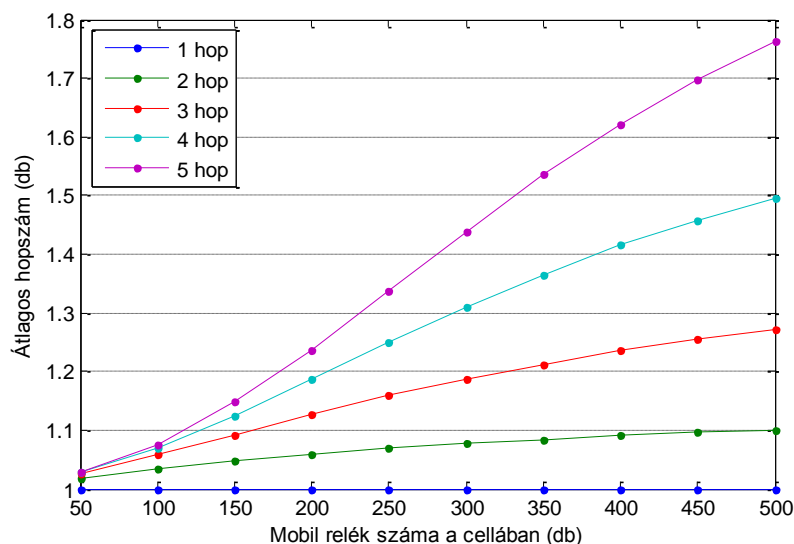
A grafikonnál jól leolvasható, hogy mennyivel növekedett meg a multihop hálózat által lefedett terület. A mobilsűrűség függvényében, a növekedés ütemét megfigyelve látható, hogy kis mobilsűrűségnél a növekedés alacsony, majd erőteljes növekedésnek indul, végül pedig ismét lelassul. Ez annak köszönhető, hogy kis számú mobil állomás esetén gyakrabban előfordulnak olyan esetek, hogy egy mobil eszköz csak kis mértékben járul hozzá a területnövekedéshez. Több mobil esetén viszont megnő annak a valószínűsége, hogy lesz a cella szélén is nagyobb lefedetlen területet elérő mobil eszköz. Az intenzív növekedés után újra lelassul a növekedés, ami annak köszönhető, hogy míg a mobil eszközök sűrűsége

lineárisan nő, addig a lefedett terület nagysága négyzetesen, így a nagyobb mobilsűrűség irányában a növekedés üteme folyamatosan csökken. A csökkenés jobb láthatósága érdekében a területnövekedés és az energiahatékonyság grafikonján a mobilsűrűséget 700 relé/cella értékig növeltem, így jobban látszik az 5 hapos esetben a növekedés lassulása.

Szintén jól látszik, hogy kis mobilsűrűség esetén sokkal kisebb mértékben tud eltávolodni az 5 hopszámú lefedés a 2 hopszámútól, később azonban az 5 hapos területnövekedés erőteljesebb növekedésének köszönhetően 700 relé/cella sűrűség esetén kialakul egy egyenletes távolság a különböző hopszámok között.

A számítások szerint 500 relé/cella és 5 hop esetén a multihop hálózat 37 %-kal növelte meg a lefedett területet az eredetihez képest, a 2 hapos kiterjesztés mértéke is közel 10 %-os.

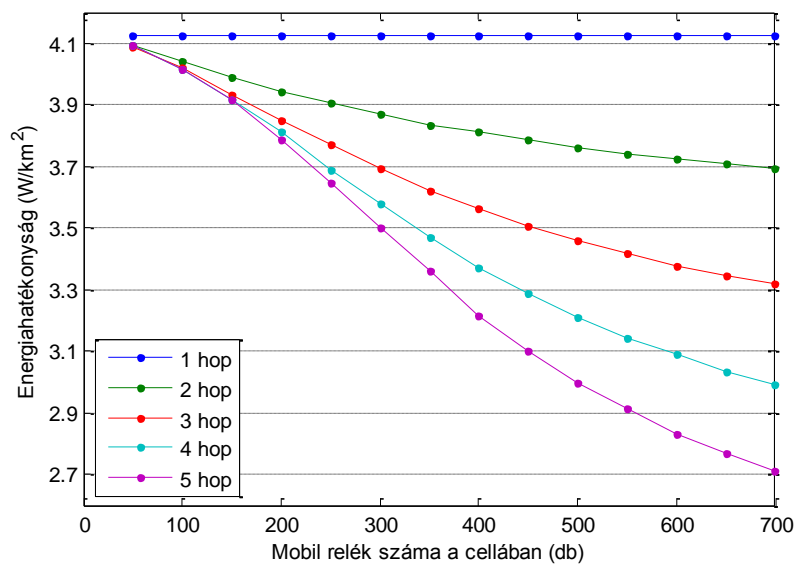
Érdekes megnézni az átlagos hopszám alakulását is a két paraméter függvényében. Itt is jól látszik az, hogy 5 hop kis mobilsűrűségnél lassan kezdődik az átlagos hopszám növekedése, nagyobbánál pedig jóval erőteljesebben nő, mint a 2 hapos esetben. Az 5 hapos esetben az ábráról leolvasható, hogy a maximálisan engedélyezett 5 hop ellenére az átlagos hopszám mégsem emelkedik 2 fölé, azaz így is többségben vannak az 1-2 hossal lefedett eszközök a magasabb hopszámúakhoz képest.



11. ábra – Átlagos hopszám – egyenletes eloszlás

A kialakult energiahatékonyságot tekintve elmondható, hogy az eredeti $4,1246 \text{ W/km}^2$, 5 hopot és 700 felhasználó/cella sűrűséget feltételezve $2,71 \text{ W/km}^2$ -re csökkent, ami azt jelenti, hogy több mint harmadával csökkent a költsége az egységnyi terület ugyanolyan

forgalmi követelményekkel való lefedésének a multihop hálózatban. Emellett az is jól látszik, hogy az eszközsűrűség növekedésével lelassul az összköltség csökkenésének gyorsasága.



12. ábra - Energiahatékonyság – egyenletes eloszlás

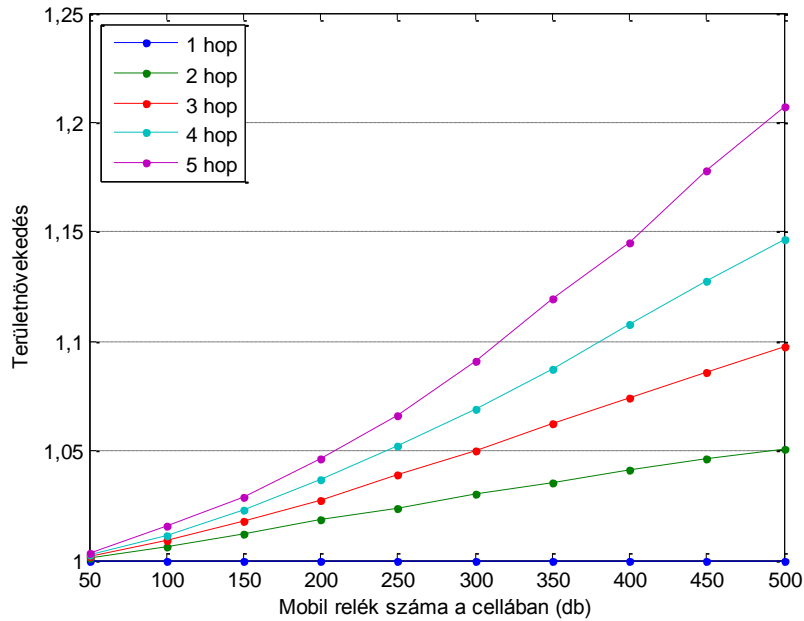
6.2. Normális eloszlású mobil relék

Normális eloszlású mobil relék esetén azt várjuk a területnövekedés nagyságától, hogy jóval elmarad majd az egyenletes eloszlású esettől, hiszen a mobil állomások a bázisállomáshoz közel helyezkednek el, kevés a cella szélén lévő mobil eszköz, mely a területet nagymértékben növelni tudná.

Az eredmények igazolják ezen sejtésünket, az ábrán jól látszik, hogy 500 relé/cella és 5 hop esetben is csak kicsit több mint 20 %-os, 2 hop esetén közel 5 %-os növekedést ért el a hálózat.

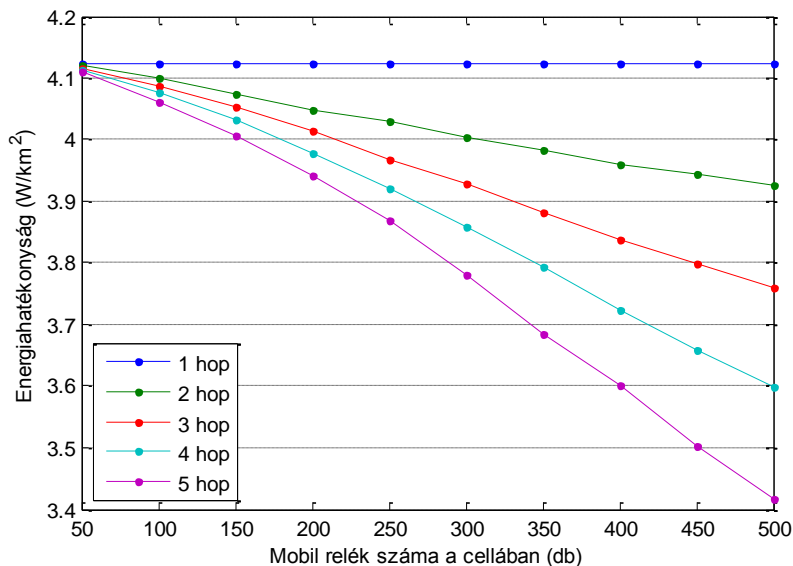
Az előző egyenletes eloszlással ellentétbe a növekedés üteme az 500 relé/cella eszközsűrűség esetén is erőteljesen nő. Ez annak köszönhető, hogy normális eloszlás esetén a bázisállomás közelében jóval nagyobb az eszközök sűrűsége, alacsonyabb hopszámú utak kiérnek a cella széléig is, ott növelve a lefedett terület nagyságát. Ennek köszönhetően a különböző maximális hopszámú utak aránya együtt növekszik.

Ez látható abból is, hogy az adott mobilsűrűséghez tartozó különböző hopszámú területnövekedések már a kisebb eszközsűrűségtől kezdve is arányosan együtt emelkednek, egyenlő távolságban vannak egymástól, kisebb mobilsűrűség esetén is elemelkedik az 5 hopos lefedettség a 2 hopostól.



13. ábra - Területnövekedés aránya – normális eloszlás

Az energiahatékonyságot tekintve azt lehet észrevenni, hogy az előzőhöz képest kisebb mértékben, de a mobilsűrűségtől erőteljesen növekvő mértékben csökken az egységnyi területhez felhasznált energia. 5 hop és 500 relé/cella esetén a csökkenés mértéke 15 %-os, azonban jól látszik, hogy ez a szám a mobilsűrűség további növekedésével intenzíven növekszik az előző esettel ellentétes módon.



14. ábra - Energiahatékonyság– egyenletes eloszlás

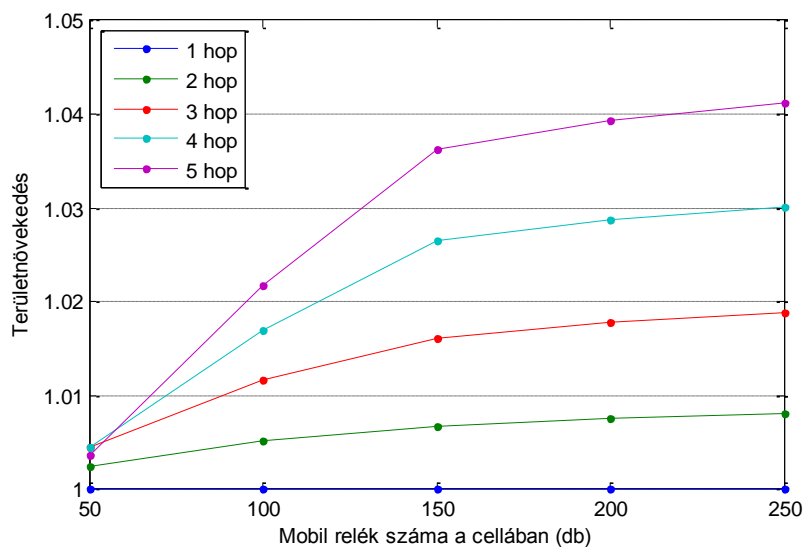
6.3. Egyenes menti eloszlású mobil relék

A következő eset az olyan forgalmas utak szimulálását tűzte ki célul, ami például forgalmas utak közelében fordul elő, a mobil eszközök itt a bázisállomástól meghatározott távolságra lévő egyenesen egyenletes eloszlást feltételezve helyezkednek el. Itt éppen ezért nem is várható nagyméretű területnövekedés, ez az eset inkább a cellák az úttal párhuzamos egyenes menti bázisállomások közötti átváltást könnyítheti meg az egyenes mentén való lefedettség kiterjesztésével.

A számításban két esetet vizsgálok meg az egyenes bázisállomástól való távolságára nézve. Az egyik esetben az egyenes a bázisállomástól fél cellasugárnyira, a másik 0,9-sugárnyira helyezkedik el.

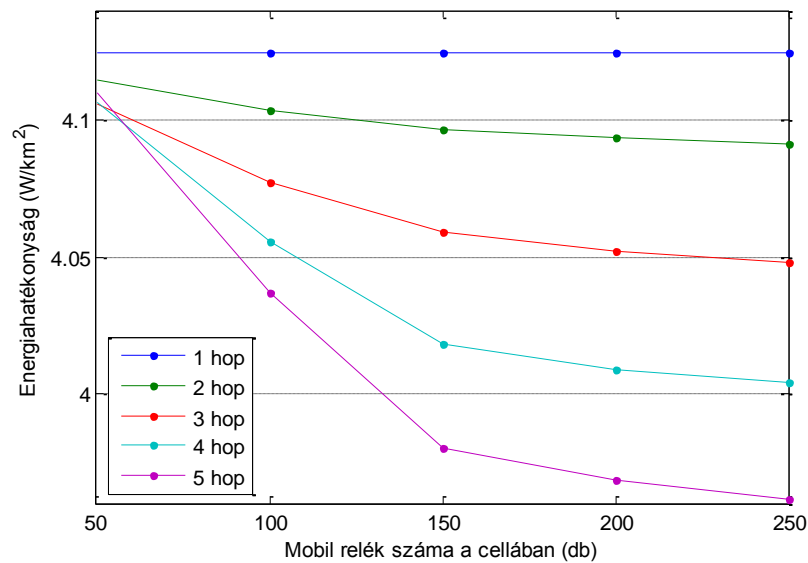
6.3.1. Bázisállomástól fél cellasugárnyira lévő egyenes, $y=0,5R$

Ebben az esetben a területnövekedés nem jelentős, 5 hop és 250 relé/cella esetén is csak kicsit több mint 4 %-os, 1 hop esetén kevesebb, mint 1 %-os a növekedés, az előző esetekhez képest a területnövekedés aránya nem olyan nagymértékű. Jól látszik, hogy a növekedés hirtelen megindul a mobilsűrűség növelésével, és később már csak alig növekszik valamit a lefedett terület nagysága. Ez annak köszönhető, hogy a relézés az egyenesen hamar eléri azt a pontot, ahonnan már nehezen tud távolabbi területeket lefedni. A hopszámok függvényében a növekedés inkább az egyenletes eloszláshoz hasonlít, kis mobilsűrűsége a magasabb hopszámú növekedések közelebb vannak az alacsonyabb hopszámúakéhoz.



15. ábra - Területnövekedés aránya – egyenes menti eloszlás – $y=0,5R$

Az energiahatékonyságot tekintve a hálózat jóval elmarad az eddigi értékektől, 5 hop és 250 relé/cella esetén körülbelül 4 %-os az egységnyi területre jutó teljesítmény csökkenése.

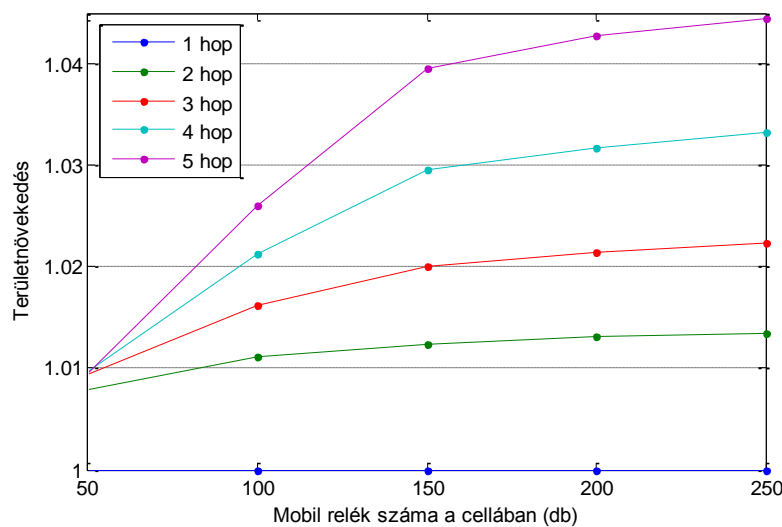


16. ábra - Energiahatékonyság – egyenes menti eloszlás – $y=0,5R$

6.3.2. Bázisállomástól 0,9-cellasugárnyira lévő egyenes, $y=0,9R$

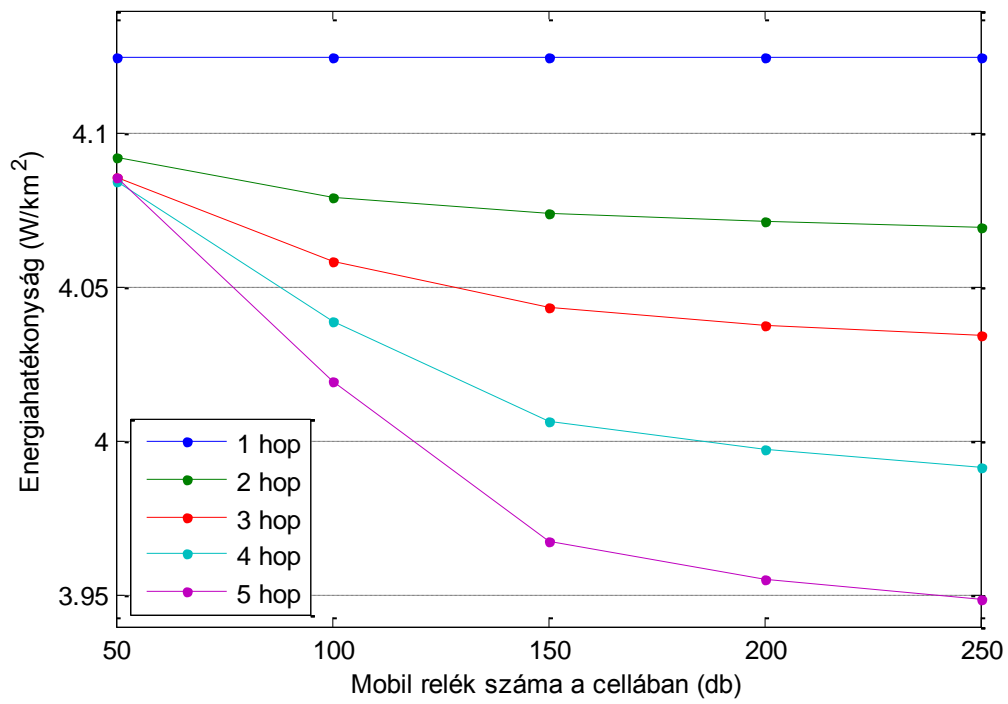
Ebben az esetben az egyenes kicsit távolabb helyezkedik el a bázisállomástól, így kisebb a lefedett cellában lévő szakasza, azonban éppen emiatt arányaiban több területet is képes lehet lefedni.

Az eredmények igazolják ezt a sejtést, 5 hop és 250 relé/cella esetén a növekedés közel 4,5 %-osra nőtt.



17. ábra - Területnövekedés aránya – egyenes menti eloszlás – $y=0,9R$

A kialakított multihop hálózatban az egységnyi terület lefedéséhez szükséges teljesítmény 3,95 W, ami több mint 4 %-kal kevesebb az eredeti hálózathoz képest.



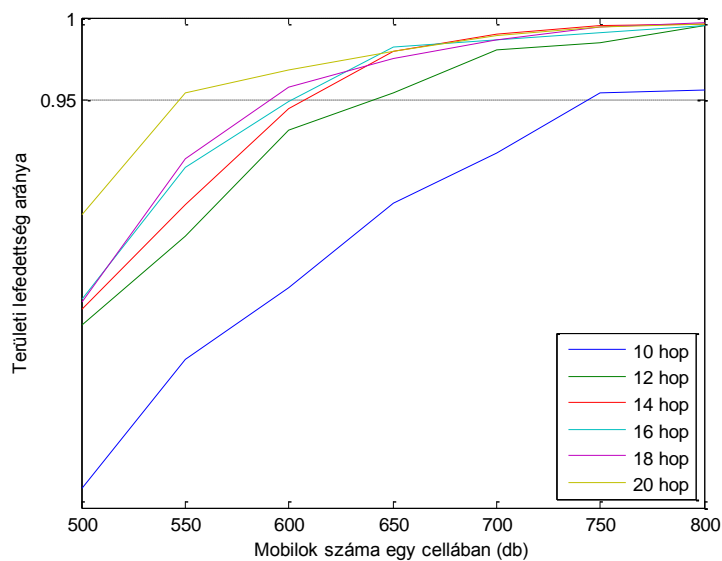
7. Lefedettség vizsgálata bázisállomások kikapcsolása esetén

Ebben a számításban az energiafelhasználást úgy teszem hatékonyabbá, hogy az eredeti hálózathoz képest lekapcsolok bázisállomásokat a hálózatban, és a lefedésből így kimaradó területeket multihop hálózattal fogom elérni. Ehhez a megengedett maximális hopszám és a relésűrűségeket használom paraméterként. Első körben meghatározom, hogy az egyes hopszámok esetén mekkora felhasználósűrűséggel fedhető le 95 % valószínűséggel a lefedésből kimaradó terület, majd kiszámítom az energiahatékonyság mértékét. Mivel a cella sugara körülbelül tízszerese a mobil relék által lefedett terület sugarának, ezért ebben az esetben a hálózat teljes lefedéséhez minimálisan 10 hopszámú multihop hálózat szükséges.

A bázisállomások által kisugárzott teljesítmény: 30 W, ebből adódóan a cellasugár nagysága az ismertett modell szerint: 3848 m, egy bázisállomás által lefedett terület pedig: 46,54 km². A 19 bázisállomás által lefedett terület: 771,89 km². Egy mobil relé által lefedett terület sugara: 385,5 m, a mobil relék által lefedett terület: 0,467 km². Egy bázisállomás fogyasztása 30 W sugárzási teljesítmény és 10 %-os terheltség mellett a modell szerint: 94,36 W. A 19 bázisállomás összfogyasztása így: 1792,84 W. A relézés nélküli eset energiahatékonysága tehát: 2,323 W/km².

7.1. Egy bázisállomás kikapcsolása

Ebben az a 19 cellás hálózat közepén lévő bázisállomást kapcsoltuk le. A területi lefedettség arányára a következő értékek adódnak:



18. ábra – Területi lefedettség aránya – 1 kikapcsolt bázisállomás

A 95 %-os lefedéshez szükséges mobil eszközök cellánkénti számát a fenti függvényeket interpolálva kaptam meg:

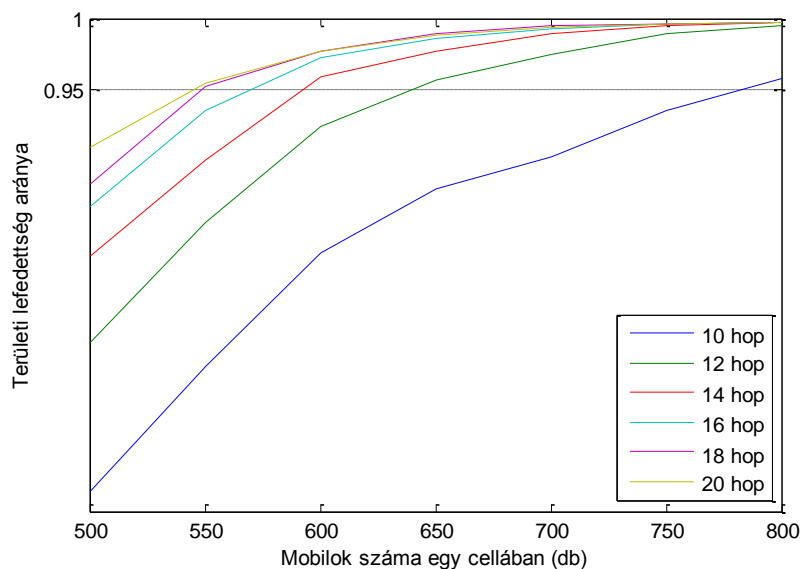
Hopszám	Relé/cella
10	794,50
12	641,48
14	608,36
16	601,82
18	591,18
20	547,44

1. táblázat – Lefedő mobil eszköz sűrűségek – 1 kikapcsolt bázisállomás

A lefedendő terület nagysága 771,89 km², a hálózat energiafogyasztása megegyezik a 18 bázisállomás fogyasztásával, tehát 18*94,36 W = 1698,48 W. A kialakult hálózatban az egységnyi terület lefedéséhez szükséges teljesítmény tehát: 2,200 W/km², mely 94,7 %-a a kezdeti esetbeli értéknek.

7.2. Hat bázisállomás kikapcsolása

Ebben az esetben a 19 cellás hálózat középső gyűrűjét kapcsoltam le. A területi lefedettség a mobilsűrűség és a maximális hopszám függvényében a következőképpen alakult:



19. ábra – Területi lefedettség aránya – 6 kikapcsolt bázisállomás

A 95 %-os lefedéshez szükséges mobil eszközök cellánkénti számát a fenti függvényeket interpolálva kaptam meg:

Hopszám	Relé/cella
10	783,78
12	640,75
14	592,62
16	570,64
18	548,49
20	545,48

2. táblázat – Lefedő mobil eszköz sűrűségek – 6 kikapcsolt bázisállomás

A lefedendő terület nagysága $771,89 \text{ km}^2$, a hálózat energiafogyasztása megegyezik a 13 bázisállomás fogyasztásával, tehát $13 \cdot 94,36 \text{ W} = 1226,68 \text{ W}$. A kialakult hálózatban az egységnyi terület lefedéséhez szükséges teljesítmény tehát: $1,589 \text{ W/km}^2$, mely 68,4 %-a a kezdeti esetbeli értéknek, a szükséges teljesítményt közel harmadával le tudtuk csökkenteni.

8. Összefoglalás

Dolgozatomban a multihop cellás (MCN) hálózatok teljesítőképességét és energiahatékonyságát vizsgáltam. A számítás elején megvizsgáltam cellás hálózatok tulajdonságait, majd a megismert szakirodalmak alapján felállítottam egy számítási módszertant a hálózat energiahatékonyságának vizsgálatára. Ezután kialakítottam két számítási modellt, melyek manapság előkerülő gyakorlati problémák megoldására töreksenek. Az egyik a hálózati kapacitás és lefedettség növelése, a másik pedig a hálózat néhány bázisállomásának lefedettséget nem csökkentő kikapcsolását lehetővé tevő modell.

A multihop hálózatok területnövekedésének vizsgálata során arra a következtetésre jutottam, hogy a multihop hálózatok kedvező esetben igen jelentős mértékben le tudják csökkenteni a hálózat által igényelt teljesítményt, mely igen fontos a hálózat energiahatékonyságának növeléséhez. Legjobb esetben akár harmadával is kevesebb teljesítmény használata is elég lehet az egységnyi terület lefedéséhez, a fennálló forgalmi követelmények megtartása mellett.

A multihop hálózatok a második számítás alapján lehetővé tették, hogy bázisállomásokat úgy kapcsoljunk ki, hogy közben a terület 95 %-os valószínűséggel lefedve marad. Ezzel az alacsony forgalmú időszakokban néhány bázisállomás alapfogyasztásával lehet csökkenteni a hálózat energiafogyasztását.

Mindezek alapján úgy gondolom, hogy a negyedik generációs LTE hálózat szabványában kidolgozott multihop cellás hálózatok megfelelő elemei lehetnek a jövő energiahatékony hálózati rendszerének.

Ábra-, egyenlet- és táblázatjegyzék

1. ábra - Az ICT szektor energiafogyasztásának összetevői [1].....	7
2. ábra – Mobilhálózat energiafogyasztásának megoszlása [2].....	8
3. ábra – A bázisállomás fogyasztásának összetevői [2].....	8
4. ábra – Multihop cellás hálózatok általános felépítése és előnyei [4]	11
5. ábra – 1-hopos (a) és felhasználói reléket használó több-hopos (b) hálózatok [7]...	12
6. ábra - Lefedett terület	19
7. ábra - Területnövekedés vizsgálata	20
8. ábra – A 19 bázisállomás elhelyezkedése.....	21
9. ábra - 1 kikapcsolt (a) és 6 kikapcsolt (b) bázisállomás elhelyezkedése.....	21
10. ábra – Területnövekedés aránya – egyenletes eloszlás	28
11. ábra – Átlagos hopszám – egyenletes eloszlás	29
12. ábra - Energiahatékonyság – egyenletes eloszlás.....	30
13. ábra - Területnövekedés aránya – normális eloszlás.....	31
14. ábra - Energiahatékonyság– egyenletes eloszlás	31
15. ábra - Területnövekedés aránya – egyenes menti eloszlás – $y=0,5R$	32
16. ábra - Energiahatékonyság – egyenes menti eloszlás – $y=0,5R$	33
17. ábra - Területnövekedés aránya – egyenes menti eloszlás – $y=0,9R$	33
18. ábra – Területi lefedettség aránya – 1 kikapcsolt bázisállomás	35
19. ábra – Területi lefedettség aránya – 6 kikapcsolt bázisállomás	36
1. egyenlet – Shannon kapacitás számítása	22
2. egyenlet – Jelterjedési csillapítás külvárosi COST-231 modell esetén.....	22
3. egyenlet – Termikus zaj számítása.....	23
4. egyenlet – Jel-zaj viszony kiszámítása	23
5. egyenlet – Bázisállomás fogyasztásának kiszámítása [3]	26
6. egyenlet – A bázisállomás egyenértékű fogyasztási képlete	26
7. egyenlet – Felhasználói relék fogyasztásának számítása	27
8. egyenlet – Az energiahatékonyság számítása.....	27
1. táblázat – Lefedő mobil eszköz sűrűségek – 1 kikapcsolt bázisállomás	36
2. táblázat – Lefedő mobil eszköz sűrűségek – 6 kikapcsolt bázisállomás	37

Irodalomjegyzék

- [1] **Worldwide Energy Needs for ICT: the Rise of Power-Aware Networking**
Mario Pickavet, Willem Vereecken, Sofie Demeyer, Pieter Audenaert, Brecht Vermeulen, Chris Develder, Didier Colle, Bart Dhoedt, and Piet Demeester
IEEE ANTS 2008 conf., 15-17 December 2008, Bombay (India)
- [2] **Green Future Mobile Networks**
Klaus Wuenstel
"What does the future hold for mobile networks?" – ICT 2010 Conference
Prezentáció, 2010. szeptember 27.
- [3] **Power Consumption Modeling of Different Base Station Type in Heterogeneous Cellular Network**
Oliver Arnold, Fred Richter, Gerhard Fettweis, Oliver Blume
Future Network and MobileSummit 2010 Conference Proceedings
Összefoglaló, 2010.
- [4] **Addressing wireless challenges**
Frost & Sullivan Technical Insights
Online dokumentáció, 2008. március – megtekintve: 2011. október 27.
- [5] **Multi-hop Protocols for Relay-based Deployment Concepts**
D.Schultz, R.Pabst, B.Walke, K. Navaie, H.Yanikomeroglu, N.Johansson, K.-E. Sunell, W.Zirwas
WWRF WG4 – White Paper, 2004. április 26-28.
- [6] **Assessment of relay based deployment concepts and detailed description of multi-hop capable RAN protocols as input for the concept group work**
Klaus Doppler, Simone Redana, Daniel Schultz, Niklas Johansson, Michal Wodczak, Peter Rost, Quiliano Pérez, Halim Yanikomeroglu, Afif Osseiran, Mark Naden, Peter Moberg, Ralf Pabst, Antonio Frediani, Lino Moretti, Martin Fuchs
IST-4-027756 WINNER II; D3.5.2 v1.0; 2007. 06. 30.

- [7] **Multihop cellular networks: Technology and economics**
Xue Jun Li, Boon-Chong Seet, Peter Han Joo Chong
Computer Networks, Volume 52, Issue 9, 26 June 2008, Pages 1825-1837
- [8] **Energy Efficiency Aspects of Base Station Deployment Strategies for Cellular Networks**
Fred Richter, Albrecht J. Fehske, and Gerhard P. Fettweis
Vodafone Stiftungslehrstuhl, Technische Universität Dresden
- [9] **DIGITAL MOBILE RADIO TOWARDS FUTURE GENERATION SYSTEMS**
Dieter J. Cichon, Thomas Kürner
COST 231 Final Report, Chapter 4
- [10] **Accurate Online Power Estimation and Automatic Battery Behavior Based Power Model Generation for Smartphones**
Lide Zhang, Birjodh Tiwana, Zhiyun Qian, Zhaoguang Wang, Robert P. Dick, Z. Morley Mao, Lei Yang
EECS Department, University of Michigan Ann Arbor, MI, USA
Google Inc. Mountain View, CA, USA