



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Faragó Ákos

**MILLIMÉTERES HULLÁMHOSSZÚ
HOZZÁFÉRÉSI ÉS ELLÁTÓ
HÁLÓZATOK CSAPADÉKTÓL FÜGGŐ
MEGBÍZHATÓSÁGAINAK VIZSGÁLATA
AZ 5G RENDSZEREKBE**

TDK DOLGOZAT

KONZULENS

Dr. Bitó János

BUDAPEST, 2015

Tartalomjegyzék

| | |
|---|-----------|
| Kivonat..... | 3 |
| Abstract..... | 4 |
| 1 Bevezetés | 5 |
| 2 Technológiai áttekintés | 7 |
| 2.1 Ötödik generációs mobil hálózatok | 7 |
| 2.2 Hullámterjedés a milliméter hullámhosszú tartományban..... | 12 |
| 2.2.1 Mérések rövid összeköttetésekkel | 12 |
| 2.2.2 Antenna nyereség és zaj..... | 14 |
| 2.2.3 Esőcsillapítás | 15 |
| 3 Csapadék hatása a hullámterjedésre | 17 |
| 4 A dolgozatban felhasznált elméleti ismeretek | 19 |
| 4.1 Eső hatásának modellezése ad-hoc mesh hálózatokra | 19 |
| 4.2 Node kiesési valószínűség | 20 |
| 4.3 Eső modellezése..... | 21 |
| 4.3.1 Esőcella modellezése | 21 |
| 4.3.2 Esőfront modellezése..... | 22 |
| 5 Analízis - mikrohullámú ad-hoc mesh hálózat megbízhatóságának vizsgálata | 23 |
| 5.1 Esőfront hatása..... | 23 |
| 5.2 Lefedettségek vizsgálata..... | 28 |
| 5.2.1 Lefedettség omnidirekcionális antennákkal..... | 29 |
| 5.2.2 Lefedettség irányított antennákkal..... | 33 |
| 6 Konklúzió, továbblépési lehetőségek | 39 |
| Irodalomjegyzék..... | 40 |

Kivonat

A 2020 után kereskedelmi forgalomba kerülő ötödik generációs hálózatok alapkövei még nincsenek lefektetve, azonban működőképes elképzelések már évek óta léteznek. Az egyik legvalószínűbb megoldás, hogy az ötödik generációs hálózatok telepítésével megjelennek az ad-hoc módon telepített mesh-szerű hálózatok, amelyek a többtíz gigahertzes sávban fognak kommunikálni. A spektrumkiterjesztés oka a jelenlegi 700-2600 MHz-es frekvenciasáv gyorsütemű telítődése, mely nem teszi lehetővé az ötödik generációs hálózatok által támasztott követelmények kielégítését. Az új frekvenciasáv azonban új csillapítótényezőt von maga után: a csapadék hatása egy ilyen hálózat összeköttetéseként kritikus lehet, így érdemes szimulációval megvizsgálni hogy az eső milyen hatással lehet a kommunikációra. A munkához rendelkezésre álltak valós esőintenzitás és csillapítás mérési adatok, ezek feldolgozása után a munka gerincét a csapadék hullámterjedésre gyakorolt hatásainak a vizsgálata képezte. Ezután mért intenzitás adatokból reprodukált esőfront hatását szimuláltam általam kialakított mesh-szerű hálózaton, ahol végül egy mozgó mobil eszköz csapadék melletti működőképességét és megbízhatósági kérdéseit vizsgáltam meg. A szimulációs környezet MATLAB volt, a megírt programok az adatok megjelenítését, szűrését, transzformációját illetve a mesh hálózat, valamint az esőcella modellek szimulációját végzik el.

Abstract

Cornerstones of the fifth generation networks likely to be placed on the market after 2020 haven't been laid down yet however, workable solutions are existing for years. One of the most possible one includes deployment of ad-hoc mesh networks operating in the multi-ten-gigahertz frequency band which is the reason of currently saturating 700-2600 MHz not able to fulfill of the requirements of future 5G networks. The new frequency band however, brings a new attenuation factor to be addressed: the effect of rain might be critical on links of such networks hence it is worth investigating how communication can be affected. In order to do that, measurement results on rain intensity and rain attenuation was processed, then the main focus of the work was investigating the influence of precipitation on propagation in a mesh-network. Afterwards, the availability and reliability questions of moving mobile user equipment have been investigated. MATLAB was chosen to be the simulation environment which performs visualization, filtering and transform of the data and is also applied for the simulation of the mesh network and different rain cell models.

1 Bevezetés

A mobilkommunikációs rendszerekbe csatlakozó eszközök száma és az adatforgalom napjainkban példátlan növekedésen megy keresztül, 2020-ra pedig megközelítőleg 50 milliárd eszköz kapcsolódik majd az internethez [1], így a hálózatok folyamatos fejlesztése és hosszútávú vizionálása elengedhetetlenül fontos feladattá. A már jelenlévő felhasználók egyre növekvő igényeikkel (pl.: Ultra-High-Definition, avagy UHD videók streamelése, Gbit/s-os letöltési sebesség) és a rendszer tartalékainak masszív kihasználásával (pl.: full HD videók megosztása közösségi hálókön) feszegetik a jelenlegi 4G-s hálózat határait, az újak belépése pedig a kapacitás növekedését teszik kötelezővé.

Az analóg mobilrendszerektől egészen a jelenlegi kommunikáció csúcspontjáig (LTE-Advanced) minden alkalommal a rendszernek egy kézzelfogható gyengesége motiválta a hálózat továbbfejlesztését. Az első mobil generációnak (1G) ez a gyenge spektrális hatékonyság és alapvető biztonsági problémák voltak, a 2G bevezetése lehetővé tette a digitális hívásokat és üzenetváltást (SMS), ám az internet iránti növekvő keresletet a rendszer hosszútávon nem tudta kielégíteni. A harmadik generáció (3G) jócskán megnövelte az internetezés élményét (pl.: „video on demand”), de az igazi szélessávú internet csak a 3.5G-ben érkezett el. Az LTE (Long Term Evolution), mely a 3GPP (3rd Generation Partnership Project) szabványai szerint csupán 3.9G-nek felel meg, akár 300Mb/s-os adatátviteli sebességet is tudott biztosítani downlink irányban. A jelenlegi negyedik generáció (4G) még gyorsabb internetezést tesz lehetővé (akár 1 Gbit/s) a teljesen IP (Internet Protocol) alapú csomagkapcsolt adatátvitellel, melybe a telefonálás és üzenetváltás is beletartozik már. A 4G szabványoknak megfelelő LTE-Advanced 2014-ben számos országban kereskedelmi forgalomba került (pl.: Spanyolország [2], Hollandia [3]) jellemzően 300 Mbit/s környéki letöltési sebességgel.

A különféle szabványoknak azonban más és más frekvenciasávok vannak kiosztva adatátvitelre, melyek 700 és 2600 MHz között helyezkednek el. Ez a közel 2 GHz széles spektrum azonban telítődik, az adatforgalom pedig előreláthatólag a jelenleginek több százszorosára nő 2020-ra [4]. Noha az 5G szabványosítását a 3GPP csak 2017-re tervezi befejezni [4], a legvalószínűbb szcenárió újabb frekvenciasávok, a milliméter hullámhossz

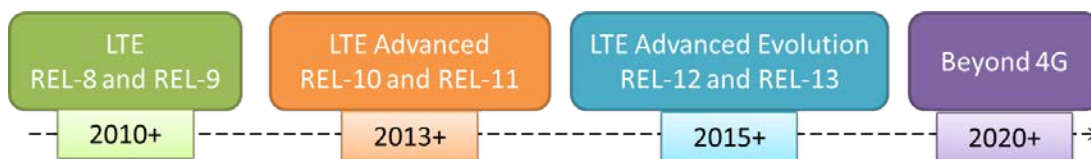
bevezetése, mely a 3G/4G ellátóhálózatokban már szerepet kapott, 5G esetében azonban a hozzáférési hálózat is ezen a többlet gigahertzes frekvencián fog működni [6].

Egy ötödik generációs hálózat tervezési kérdései azonban az ezen hullámhosszon való kevés mérési eredmények okán még nyitottak. Új csillapító tényező például a korábban használt frekvenciasávhoz képest a csapadék, melynek hatása az 5G rendszerek rövid összeköttetéseire egyelőre részben tisztázatlan, a dolgozatomban így a legnagyobb hangsúlyt az esőcsillapítás vizsgálatára fektettem. Először valós mérési eredményekből fogok rámutatni a csapadék intuícióval szemben nem elhanyagolható csillapítására, majd egy esőfront modellezésével és annak egy teszt hálózatra kifejtett hatásának szimulációjával próbálom ezen eredményeket igazolni.

2 Technológiai áttekintés

2.1 Ötödik generációs mobil hálózatok

A cellás átviteli szabványok domináns életciklusa az eddigi tapasztalatok alapján maximum 8-10 évig tartott [6]. Az egyre szigorúbb követelményeknek való megfelelés és a számítástechnika fejlődése így előrevetíti, hogy 2020 körül már új technológiára lesz szükség az egyre növekvő kapacitás kielégítéséhez. Az átviteli sebesség akkor már több gigabitre fog rúgni másodpercenként, melyet jóval nagyobb irányhatású antennák – bázis- és mobilállomáson egyaránt – és a még érintetlen milliméter hullámhosszúságú spektrum használata fog minden bizonnyal lehetővé tenni. Ezt a feladatot már nem a negyedik generációs szabványok hivatottak megoldani, hanem az ezek után következő ún. B-4G (Beyond-4G) vagy másnéven 5G rendszerek [7] (1. ábra).

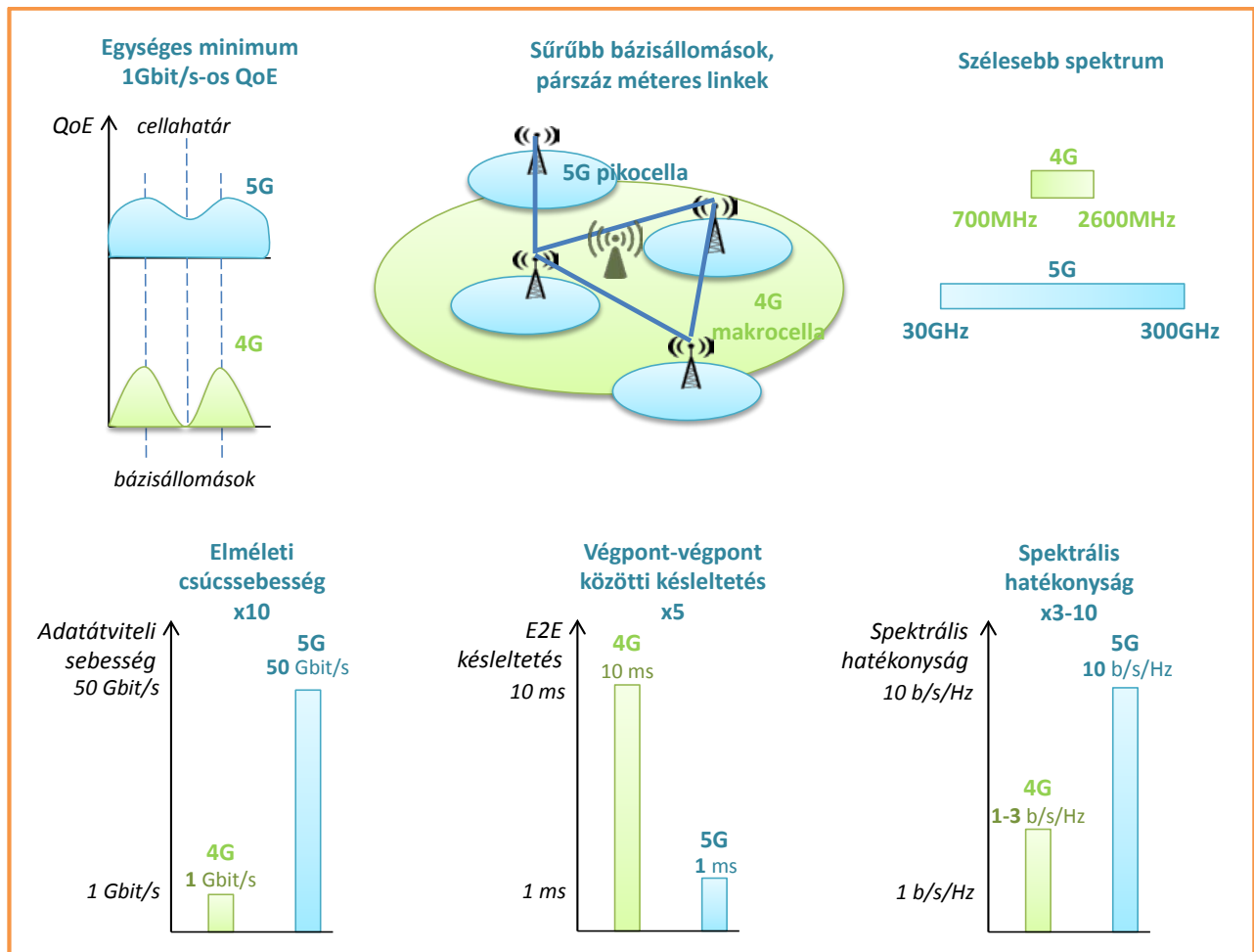


1. ábra: Az egyes átviteli szabványok és tervezett megvalósításuk. A B-4G már a következő évtized zenéje

Az elsődleges probléma onnan származik, hogy a jelenleg használt spektrum (700MHz – 2.6GHz) olyannyira kezd telítődött lenni, hogy új frekvenciák után kell néznünk a hálózat fejlesztéséhez, így jutunk el a milliméter hullámhosszhoz (30GHz-en ez 10mm-t jelent). Jóllehet, a 10GHz alatti frekvenciákon léteznek még technikák a spektrális hatékonyság növelésére (például a később bemutatott Massive MIMO), 30-90GHz között azonban a kapacitás tetemes növekedése a spektrumban jelenlévő kihasználatlan, akár több gigahertzes folytonos sávokból adódik.

Az ötödik generációs mobilhálózatok szabványosítását jelen dolgozat írásakor még nem kezdték el, így az 5G-hez tartozó követelmények egyelőre homályosak. Az interneten fellelhető források ugyanakkor számos kulcsfontosságú továbbfejlesztésben egyetértenek, a Samsung szerint például a következők jellemzik a majdani 5G-s hálózatok [8]:

- a letöltési sebesség csúcsa az 50 Gbit/s-ot is eléri majd, de mindenképpen Gbit/-os adatátviteli sebességgel történik a kommunikáció [9]
- ez az adatátviteli sebesség pozíciótól függetlenül biztosítva legyen – azonos QoE (Quality of Experience, felhasználói élmény) mindenhol, pl.: „cella” határán is meg legyen az 1 Gbit/s (ellenben a jelenlegi cellás rendszerrel, ahol pl.: a cella határán szignifikánsan csökkenhet a kapcsolat sebessége) [9]
- bázisállomások jóval sűrűbben lesznek telepítve (angol irodalomban „densification”), melyet a kapacitás iránti igény példátlan növekedése motivál
- a végpont-végpont közötti késleltetés (E2E – end-to-end) a 4G-ben jellemző érték tizedére, 5ms-ra csökken



2. ábra: A leendő 5G-s hálózatok néhány fontos jellemzője a Samsung szerint

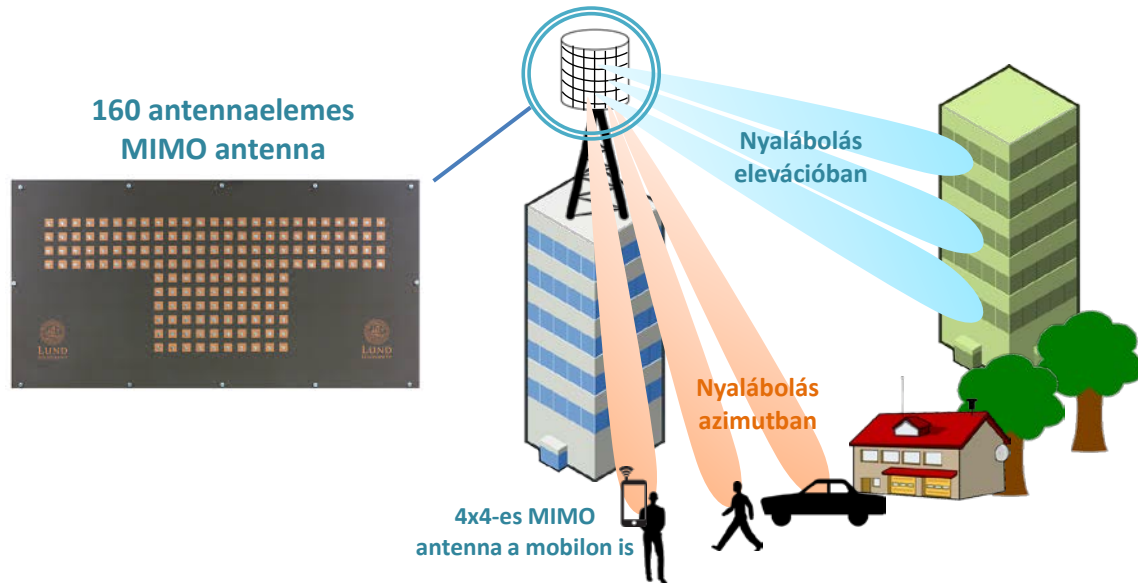
- a spektrális hatékonyság eléri a 10 b/s/Hz-et, mely pl.: a masszív MIMO technológia alkalmazásával válik megvalósíthatóvá
- a felhasználók mobilitási problémái legalább a mostani 4G-s rendszereknek megfelelő módon lesz megoldva, továbbá a Samsung elképzelhetőnek tartja, hogy akár 500 km/h-ás sebesség esetén is megfelelően működőképes marad az átvitel

Ezen víziók azonban triviálisan megvalósíthatatlanok a jelenlegi hálózat „csupán” továbbfejlesztésével, fundamentális változtatásokra van szükség. A 2020-ra megjósolt többszáz, akár ezerszeres kapacitásnövekedés egyedül a bázisállomások jóval sűrűbb telepítésével elégíthető ki. A késleltetés csökkentése, illetve az mobilhálózat használatának helyzetfüggetlen élménye (QoE) szintén ezt motiválja, de a következő alfejezetben és a dolgozatban bemutatott szimulációs eredmények után egyaránt látni fogjuk, hogy a milliméter hullámhossz kiaknázása is kizárólag sűrűn telepített hozzáférési pontokkal működtethető. Nem nehéz elképzelni, hogy így a jelenlegi cellás rendszer mellett egyfajta mesh (háló) rendszer fog kialakulni, mely esetében a milliméter hullámhossz nem csak a 3G/4G rendszerek megszokott ellátó hálózataiban, de a hozzáférési hálózatban is helyet kap.

A massive MIMO technológia a kedvezőbb spektrális hatékonyság és adatátviteli sebesség, illetve az energiagazdálkodásnak egyaránt motiváló tényezője, jóllehet a milliméter hullámhosszal való kombinációja még jócskán gyerekcipőben jár. Az új frekvenciasáv egyik nagy előnye, hogy magasabb frekvencián az antennák méretei kisebbek, így a massive MIMO technológia komoly előnyei végre kiaknázhatóvá válnak: a tervek szerint a bázisállomásokon például 16x16-os, a mobil eszközökön pedig akár 4x4-es antennasor is elképzelhető. Mindazonáltal, ha a jelenlegi 4G rendszer legalacsonyabb, 700 MHz-es frekvenciáján egy 8 elemes antennasort félhullámhossznyi antennatávolsággal alkalmazunk, körülbelül 1.7 méteres kiterjedésre van szükségünk. Jóval magasabb, 2.5 GHz-en egy 32 elemes antennasor ugyanúgy félhullámhossznyi antennatávolsággal pedig 1.9 métert követel meg, a hely korlátoltságából fakadóan viszont ez kivitelezhetetlen lenne a legtöbb bázisállomáson.

Praktikusság szempontjából ezért érdemes az antennaelemeket egy kétdimenziós rácsban elhelyezni (patch antenna), mely nem csak helyspórolással jár, de egyszerre történhet nyalábformálás azimutban és elevációban egyaránt, ez pedig az egy antenna által kiszolgált felhasználók számát jócskán megnövelheti. Az ilyen rendszereket egyébként FD-MIMO (Full-

dimensional MIMO) rendszereknek nevezzük, és noha az egyre több antennaelem egyre keskenyebb nyalábformálást tesz lehetővé (mely kisebb teljesítménnyel jár), az antennaelemek kalibrálása és a MIMO rendszereknél alkalmazott CSI (Channel State Information) előkódolása és az ahhoz való adaptálás jóval komplexebbé válik (erről bővebben a [10]-ben olvasható).

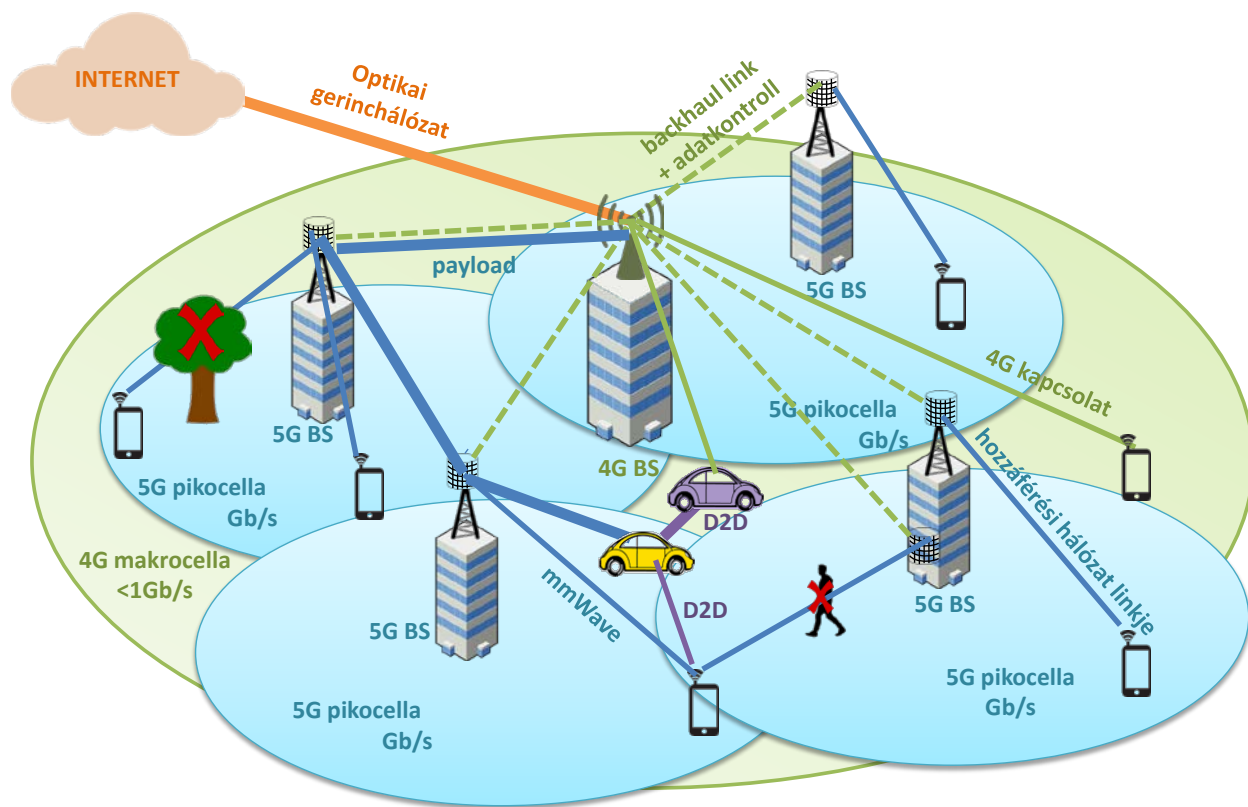


3. ábra: Az 5G-s hozzáférési pontokon valószínűleg patch antennák lesznek, melyek mind azimutban és elevációban is egyaránt tudnak majd nyalábolni [11]

A hálózati kapacitás iránti igényt továbbá a jelenleg LTE-A rendszerekben is már implementált D2D (device-to-device, ahol az egymáshoz közeli mobil eszközök között is megvalósul közvetlen kapcsolat bázisállomás közbeavatkozása nélkül) technológia továbbfejlesztésével próbálják kielégíteni [12][13]. Ahogy korábban említve volt, az ötödik generációs hálózatok egyik komoly víziója az is, hogy egységes gigabit szintű magas QoE-t garantáljon helyzetétől függetlenül. Mindazonáltal a jelenlegi 4G-s hálózat is inkább kiegészítője, mint helyettesítője a 2G/3G rendszereknek, az 5G-ben jelenlévő pikocellák is feltehetőleg kiegészítői lesznek a 4G makrocelláinak. Egy valószínű elképzelés, hogy a 4G-s bázisállomások az 5G-s átvitel, cellák és azok hozzáférési pontjainak irányítását fogják elvégezni, az ötödik generációs bázisállomások felelőssége pedig csupán a gigabites átvitel és a saját pikocelláikon belüli magas QoE fenntartása lesz.

Az 4.ábra egy ilyen elrendezést illusztrál. Látható, ahogy az 5G-s pikocellák a 4G-s makrocellán belül helyezkednek el és a hozzáférési hálózat mellett az ellátóhálózat is milliméter hullámhosszan kommunikál (a késsel jelölt szakaszok mindig milliméter hullámhosszú

kapcsolatot jeleznek). A 4G-s bázisállomás (4G BS) egyrészt tartja a kapcsolatot az 5G-s bázisállomásokkal (5G BS), másrészt adatátvitelt biztosít az olyan mobileszközöknek, amelyek 5G-s lefedettség nélküli pozícióban vannak, illetve egy 5G-s cellában elhelyezkedő eszközzel is kommunikál: olyan jeleket küld, melyek kizárólag az adatátvitelt irányítják, tiszta adatot (payload) nem. Az 5G-s bázisállomások már milliméteres hullámhosszon kommunikálnak az mobil eszközökkel (és egymással is, ez az ellátó- vagy backhaul hálózat), tehát egy fa lombozata, de már a jelbe belesétáló ember is megszakíthatja a kommunikációt. Érdekes még arra is gondolni, hogy kezünk vastagsága is jóval nagyobb lehet a hullámhossznál, így az is szignifikáns csillapítást okozhat (hand outage). Az ábrán egy lehetséges összeköttetést mutatnak a vastaggal jelölt linkek: a lila autó D2D kapcsolattal milliméter hullámhosszon kap közlekedési információt a sárga autótól, azt pedig a közeli épület tetején lévő patch antenna szolgálja ki. Az információ továbbra is milliméter hullámhosszon folyik az ellátóhálózatban egészen a 4G bázis állomásig, amely az optikai gerinchálózat egy pontját jelöli. Az itteni üvegszálakról pedig már ismert, hogy több tíz Gbit/s-os sebességet képesek biztosítani.



4. ábra: A jövő 5G-s hálózatainak egy koncepciója, a megvastagított szakaszok egy lehetséges utat mutatnak, hogyan csatlakozhat a lila jármű az Internetre

2.2 Hullámterjedés a milliméter hullámhosszú tartományban

2.2.1 Mérések rövid összeköttetésekkel

Nem véletlen, hogy a milliméter hullámhossz iránti érdeklődés a fent említett okok miatt jelentős növekedésen ment keresztül az utóbbi években (Samsung, Nokia Solution Networks), jelen pillanatban azonban a legnagyobb kihívást a milliméter hullámhosszon működő megfelelő csatornamodellek hiánya jelenti (illetve, 60 GHz-en vannak tanulmányok, de csak beltéri terjedésre). Habár csapadék és gáznemű anyagok csillapítására az ITU ad ajánlást (ITU-R P676-10, ITU-R P530-9), ezen a frekvencián elengedhetetlen fontosságú paraméterek (delay spread – többutas terjedésből adódó késleltetés kiterjedés, angular spread – többutas terjedésből adódó beesési szög kiterjedés, path loss exponent vagy PLE – a szakaszcsillapítást jellemző hatványkitevő) ismeretének híján vagyunk.

Érdeemes leszögezni, hogy a milliméter hullámhosszúságú jel már nem tud mélyen a tárgyakba, falakba hatolni – a felületi egyenetlenségek miatti hatás alig mutatkozik –, így egyszerűbbé válik a környezet modellezése, és egyben területben kisebb is, hiszen a magas szabadterei terjedési csillapítás miatt értelmetlen lenne több kilométeres összeköttetéseket vizsgálni. A alapvető terjedési tulajdonságok módosulása következtében nem lehet kizárólag a korábbi 3G/4G tervezési modellekre támaszkodni. Például az esőcsillapítás esetében – mint látni fogjuk – hibás lehet az ismert dB/km értékeket pusztán leosztani pár száz méteres összeköttetések vizsgálata esetén (ad-hoc mesh hálózatok esetében pedig pontosan az ilyen hosszúságú linkek kerülnek előtérbe). Illetve a rövid hullámhossz miatt kültérben a mellékutakon gyakorlatilag kiszámíthatatlan fázisban érkeznek a jelek a vevőhöz, beltérben pedig már egy vastagabb téglafal jelentős csillapítást okozhat stb, ezek mind egy új tervezési modell szükségességét vetítik előre. Ennek megismeréséhez 2012 nyarán a Polytechnic Institute of New York University kutatói számos mérést végeztek el és meglepő eredménnyel álltak elő [6].

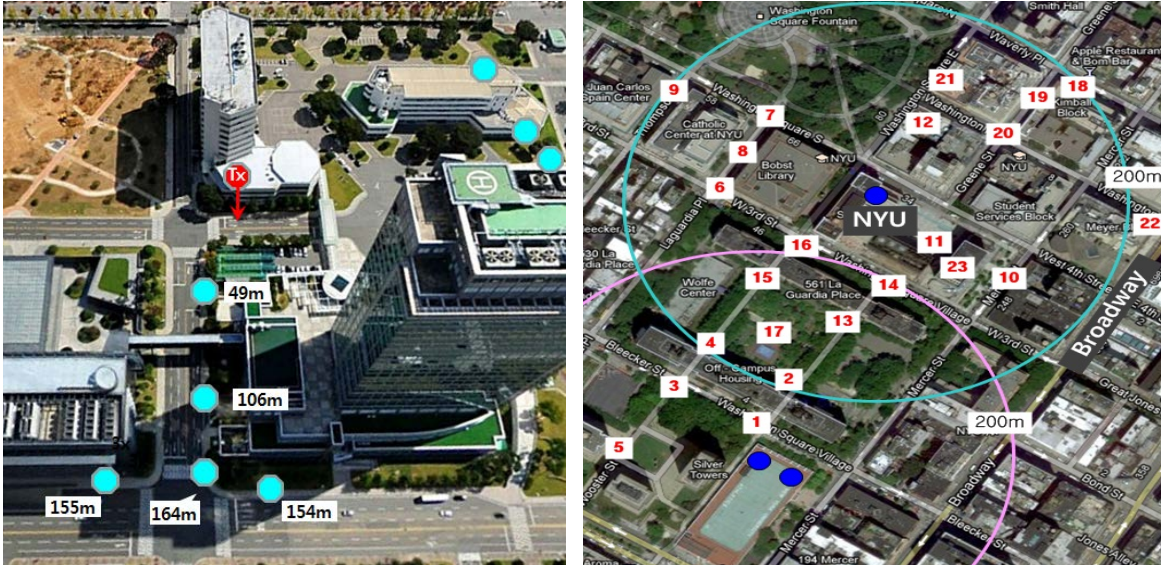
A méréseket első körben beltérben, egy irodai környezetben végezték el 28GHz-en a következőképpen: az adó és az 5 méterre tőle lévő vevő közé gyakran falnak, elválasztónak használt anyagokat – tiszta üveget, színezett üveget és téglát – helyeztek és azt vizsgálták, hogy ezen a frekvencián mekkora teljesítmény jut a vevőhöz, ahhoz az esethez képest, amikor légüres tér van közöttük. Eredménynek azt kapták, hogy egy 1 cm körüli vastagságú tiszta üveg alig 3.6

dB, egy ugyanilyen vastag színezett üveg akár 24.5 dB, míg egy 38 cm körüli vastagságú beltéri fal 6.8 dB csillapítást okozott. A következőkben már hosszabb linkeket vizsgáltak melyek között több fal, ajtó, esetleg lift vagy éppen néhány irodafülke helyezkedett el. Az eredmények azt mutatták, hogy 4-5 falon túl már jócskán legyengült a jel (64-74 dB csillapítás), azon túl pedig nem is történt jeldetektálás. Vastag fal vagy üveg esetén, melyek beltér-kültér összeköttetés esetén jöhetnek szóba ennél meglehetősen nagyobb csillapítást okoztak (pl.: egy 3.8 cm-es színezett üveg 40dB-t csillapított a mérésben) [6].

Kültéren a többutas terjedés okoz komoly gondokat. Kimérték, hogy New Yorkban egy 200 méteres összeköttetés esetén átlagosan 7 másik úton is visszaverődik a jel. Az interferencia miatti csillapítást – vagy éppen erősítést – A path loss (PL - szakaszcsillapítás) [14] értékével jellemzik, melynek értéke lehet nagyon kicsi (pl.: 0.2dB), ha éppen a mellékutakon és a a főúton terjedő jelek kb. azonos fázisban érkeznek az antennához, de lehet különösen nagy (8-9dB), ha a jelek többnyire kioltják egymást. A New York-i mérések alatt a legkisebb értéke LoS (Line-of-Sight – közvetlen rálátás az adó- és vevőantenna között) esetben 1.68-nak adódott (szabadtéri terjedés esetén 2 körüli), az átlag azonban ennél jóval nagyobb, 2.55 volt. NLoS (Non-Line-of-Sight – nincs közvetlen rálátás az adó- és vevőantenna között) esetben ez az érték 4 és 8 körül mozgott. A PLE vizsgálata alapján kiszámolható, hogy adott antenna nyereség mellett milyen távolságú összeköttetéseket lehet használni ezen a 28 GHz-en. Az eredmények azt adták, hogy 49dBi nyereség esetén a kapott átlag PLE érték mellett 200 méter a használható linktávolság maximuma [6]. A később bemutatott szimulációknál a LoS esetben kapott, 2.55-ös átlag értéket használtam.

Hasonló eredményeket kaptak a University of Texas kutatói is Austinban, ők 38 Ghz-en végeztek kísérletet 53 véletlenszerűen telepített vevővel és a hálózat 200 méternél rövidebb linkjei ésszerű adóteljesítmény mellett egyáltalán nem szenvedtek kiesést [15][14]. Továbbá az ITU a Samsung Suwoni központjában (Dél-Korea) végzett el méréseket 28 GHz-en, melynek eredménye az lett, hogy az átlagos PLE érték LOS esetben 2.39-nek adódott, NLOS esetben pedig 3.2 és 4.58 között mozgott. A 200 méteres távolság nem meglepően itt is említésre kerül, annál rövidebb linkek itt NLOS esetben még egy 60 mm/h-s erős esőzés mellett is működőképesek maradtak [16].

A [6][15][16] méréseiből következtetve kijelenthetjük, hogy milliméter hullámhossz használata mellett párszáz méternél hosszabb összeköttetést nem érdemes tervezni városi környezetre.



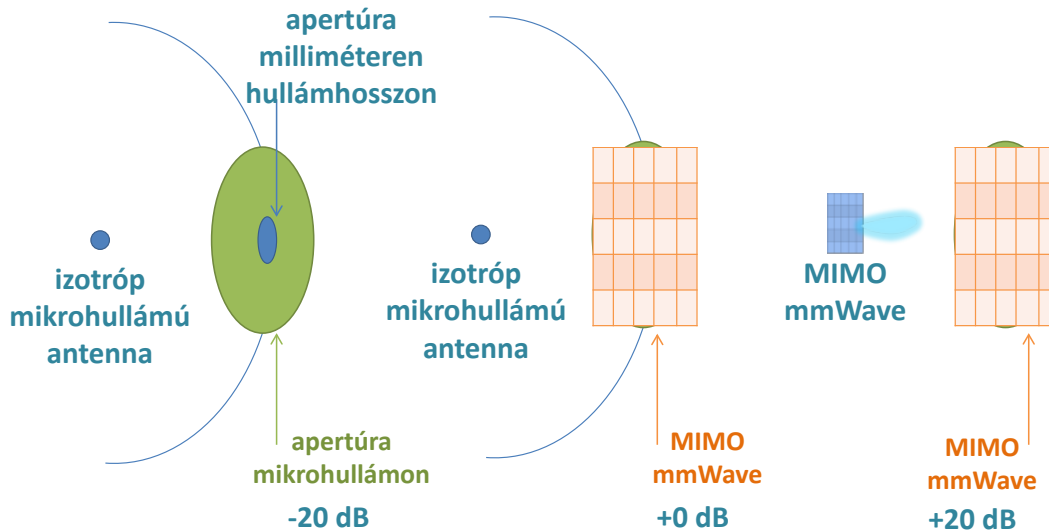
5. ábra: A Samsung Suwoni központja (balra) és a Manhattani környezet (jobbra) [16]

2.2.2 Antenna nyereség és zaj

Az antennákra jellemző vett teljesítmény képlete alapján több változást is meg tudunk állapítani ebben a tartományban a mikrohullámú terjedéshez képest (2.2.2-1 képlet).

$$P_{vevő} = \frac{P_{adó}}{4\pi R^2} \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2.2.2-1)$$

Ahogy látható a frekvencia növelésével négyzetesen csökken a vevő által begyűjtött teljesítmény. Ennek oka, hogy nagyobb frekvencián kisebb az antennák mérete, így az apertúrájuk is és ehhez triviálisan kisebb teljesítmény jut el. Ha 3 GHz-es vivőfrekvenciáról váltunk 30 GHz-re, akkor a hullámhossz 10 cm-ről 1 cm-re, a teljesítmény pedig századára csökken, tehát a frekvencia tízszeresével 20dB teljesítménycsökkenést szenvedünk el. További probléma gyökerezik abból is, hogy pontosan a széles folytonos frekvenciasávok hiánya miatt lépünk fel ebbe a tartományba, így ha egy 50 MHz széles sáv helyett 500 MHz-es sávot használnánk akkor a zaj is tízszeresére, 10 dB-el nagyobb lenne.



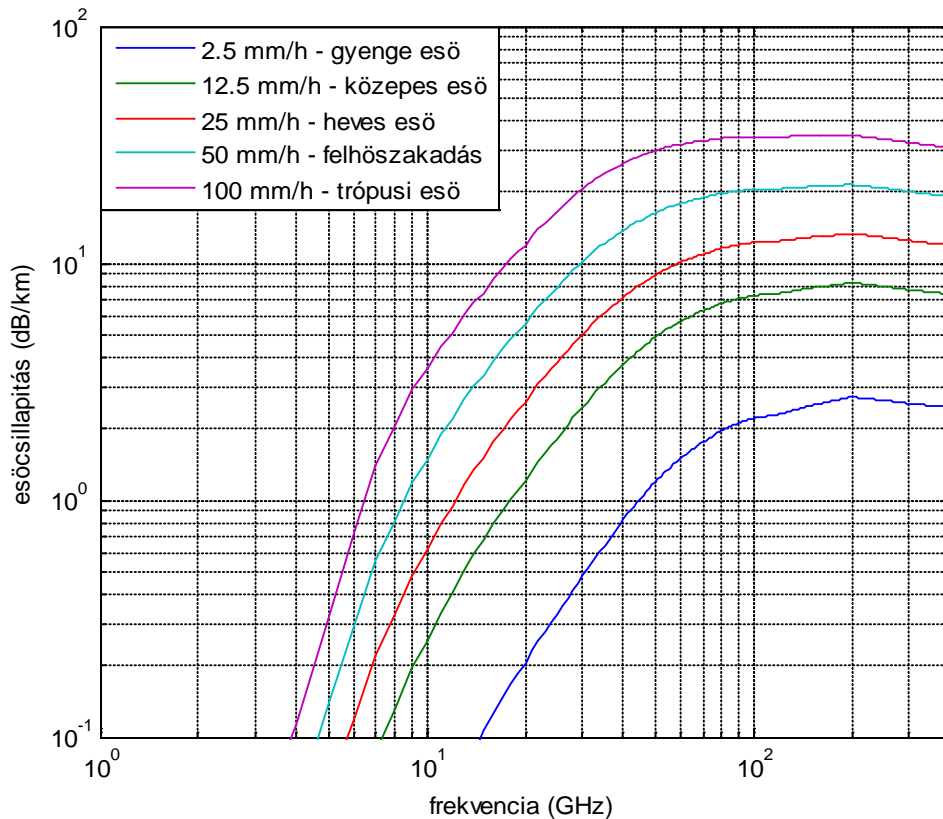
6. ábra: Jólehet milliméter hullámhosszon az apertúraméret csökken, MIMO antennákkal a hátrányból előnyt tudunk kovácsolni

Az apertúracsökkenésből származó veszteséget azonban a korábban említett MIMO technológiával elméletben ki tudjuk küszöbölni. Jólehet, hogy az egyes antennaelemek apertúrája csökken, antenasor alkalmazásával összességében be tudunk ugyanakkora teljesítményt gyűjteni, így a MIMO antennánk által begyűjtött teljesítmény hullámhosszfüggetlen lesz. Sőt, ha a mobileszközön is antenasorokat alkalmazunk, akkor az azon elhelyezett antenna teljes méretének sem kell feltétlenül csökkennie, így 30 GHz-es vivőfrekvencia alkalmazásával 20 dB veszteség helyett, 20 dB nyereséget könyvelhetünk el (természetesen a zaj által okozott veszteséget nem számítva)!

2.2.3 Esőcsillapítás

Kültérben egy leendő 5G rendszer modellezésénél a már említett többutas terjedés mellett azt is figyelembe kell venni, hogy az átvitelt nem csillapítják-e a hevesebb zivatarok akkora mértékben, hogy a kommunikáció lehetetlenné váljon. Noha a megfelelő fading tartalékot természetesen biztosítani kell, az esőcsillapítást mutató 7. ábra jól mutatja, hogy heves esőzés esetén is pl.: 38 GHz esetében 7 dB csillapítás jut egy kilométerre. Városi cellás hálózatban használt kb. 200 méter sugarú cellák esetén például egy átlagos, 25 mm/órás intenzitású homogén eső okozta kb. 1.5 dB-es csillapítás elhanyagolhatónak számítana az ITU görbék alapján, azonban az esőesemények idő- és térbeli inhomogenitása miatt ez az érték jóval nagyobb

lehet és tényleg okozhat megszakadást, ezért ezekre az esetekre fel kell készülni a rendszer tervezésekor.



7. ábra: Esőintenzitás a frekvencia függvényében [17] – számos forrás megemlíti, hogy rövid, párszáz méteres linkek esetében az alacsony dB/km érték miatt elhanyagolható az eső hatása. A mérési eredmények azonban nem ezt mutatják. Az ábra görbéit a 3. fejezetben ismertetett összefüggések segítségével generáltam.

A rövid sugarú cellák kritériuma így megmagyarázza, hogy az ötödik generációs hálózatok miért lesznek ad-hoc mesh hálózatok. A nodeok rendkívül sűrűn lesznek elhelyezkedve a mostani 3G/4G hálózatokhoz képest (ezzel egy mesh hálózatot alkotva), pontos helyzetüket pedig nem lehet előre meghatározni, mivel lámpaszlopokra stb. lesznek felszerelve, ahogy a lehetőség adja (ad-hoc telepítés).

A szakértők azonban egyértelműen a milliméter hullámhosszú összeköttetések használatát jósolják, 2020-ra pedig a mostaninál közel ezerszeres kapacitás növekedés várható [18], melyet egyaránt a teljesítmény, a használt spektrum és bázisállomások számának többszöröse fogja eredményezni.

3 Csapadék hatása a hullámterjedésre

A frekvencia növekedésével 10 GHz felett a használt hullámhossz összemérhetővé válik egy esőcsepp átlagos kiterjedésével, így komoly csillapító hatást észlelhetünk a vételben. A fizikai háttere a dolognak az, hogy a rádióhullámok az esőcseppben való szóródás következtében egyszerűen irányt válthatnak, vagy – abban az esetben, ha a hullámhossz jellemzően kisebb, mint az esőcseppek mérete – energiájuk egy része abszorpció révén eldisszipálódik az esőcseppekben (tehát az energia azok melegítésére használódik el). A frekvenciafüggés így abban nyilvánul meg, hogy minél nagyobb frekvencián használunk egy mikrohullámú összeköttetést, annál inkább megfigyelhető az abszorpció hatása, így ugyanazon távolságra egyre kisebb teljesítménnyel jut el a jel. Az esőcseppek mérete azonban nem csak a használható frekvenciát korlátozza: az esés közben az esőcseppek egyre lapultabbá válnak, így egy nagy csepp esetében a horizontális kiterjedése nagyobb lesz, mint a vertikális mérete, tehát általánosan kijelenthetjük, hogy a horizontálisan polarizált hullámokat az eső jobban csillapítja, mint a vertikálisan polarizáltakat [19]. A szél szintén ronthatja az átvitelt, hiszen az esőcseppeket eltorzíthatja a szabályos alaktól, ezzel együtt növelve a szóródás hatását, így a névleges irányban ebben az esetben is kisebb teljesítményű jel jut el [19].

Természetesen másfajta légköri gázok is csillapítják a rádióhullámokat, azonban magából a csillapításból előnyt is lehet kovácsolni. Az oxigénnek 60 GHz környékén van abszorpciós csillapítás csúcsa, mely 10-15dB/km-t jelent, tehát ezen a frekvencián nem valósíthatóak meg hosszabb összeköttetések, azonban katonai alkalmazásoknál – amikor éppen a lehallgathatóság kérdése válik alapvetővé – előszeretettel használják. Érdemes kitérni a diffrakció és refrakció kérdésére is: ezen a frekvenciatartományon már alig mérhető a jel elhajlása, így nagyrészt LOS terjedés szükséges ezekhez a linkekhez, a refrakciós és refrakciós jelenségek azonban ebben a tartományban is jelen vannak, bővebben erről a [20]-ben olvasható.

Az előbbiek alapján jól látható, hogy nagyfrekvenciás mikrohullámú hálózatok esetében az eső elleni védekezés jelentős problémát vet fel és nem hanyagolható el a tervezés során. A kérdés tehát az, hogy egy alapjában véve sztochasztikus folyamat mellett képesek vagyunk-e valamilyen védekező stratégiával optimálisan tartalékot vinni a rendszerbe. Ennek

megválaszolásához arra van szükségünk, hogy egy összeköttetés meghatározott eső okozta csillapításának valószínűségét valamilyen matematikai modell alapján egyszerű csillapítás értéké alakítsuk.

Ez az esőcsillapítás a következő összefüggéssel számolható (3-1 képlet):

$$A^{[dB]} = \int_L k * R^\alpha(l) dl \quad (3-1)$$

ahol k és α frekvencia- és polarizációfüggő empirikus paraméterek, melyekre az ITU ajánlást [21], L az összeköttetés hossza és R az esőintenzitás (a 7. ábrán lévő görbéket ezzel az összefüggéssel tudjuk legenerálni).

4 A dolgozatban felhasznált elméleti ismeretek

4.1 Eső hatásának modellezése ad-hoc mesh hálózatokra

Jogosan merül fel a kérdés, hogy egy tetszőleges – kizárólag a korábban levezetett 200 méternél rövidebb linkeket tartalmazó mesh – hálózatban mégis mikor szakad meg a kommunikáció két bázisállomás között és mennyiben befolyásolja azok további működését egy ilyen megszakadás (a modellezésnél eleve rövid linkekkel dolgozunk, nincs szükség linktranszformációra).

A szabadtéri szakaszcsillapítást egy ismert, távolság- és frekvenciafüggő összefüggés adja meg (4.1-1 képlet) [24]:

$$PL [dB] = 20 * \log_{10} \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (4.1-1)$$

Ismert, hogy szabad térben a PLE értéke 2 [6], tehát ha ezt kiemeljük, akkor kapunk egy általánosított összefüggést (a PLE a konvencionális jelölés miatt n-ként szerepel, 4.1-2 képlet):

$$PL [dB] = 10 * n * \log_{10} \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (4.1-2)$$

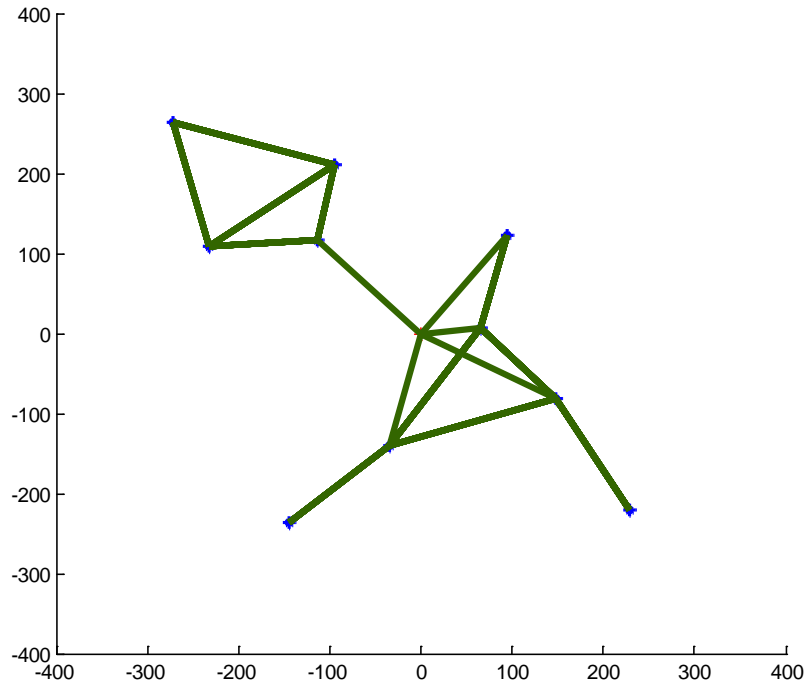
Egy tetszőleges hosszúságú linken az eső, a már korábban tárgyalt $A^{[dB]} = \int_L k * R^\alpha(l) dl$ összefüggéssel kiszámolható csillapítást okoz. Azt is tudjuk, hogy $d_{max}=200$ méter a megengedett maximális linktávolság, így egy adott $d < 200$ m hosszúságú link esetében meg tudjuk mondani, hogy mekkora hozzáadott esőcsillapításnál haladja meg a 200 méternél meghatározott szakaszcsillapítást. Ha a d és d_{max} -hoz tartozó csillapítások különbségét meghaladja a d hosszúságú linken megjelenő esőcsillapítás, akkor azon a linken nem lehet kommunikálni (4.1-3 képlet).

$$10 * n * \log_{10} \frac{4\pi d_{max}}{\lambda} - 10 * n * \log_{10} \frac{4\pi d}{\lambda} = 10 * n * \log_{10} \frac{d_{max}}{d} \gtrsim \int_L k * R^\alpha(l) dl \quad (4.1-3)$$

4.2 Node kiesési valószínűség

Nyilvánvaló, ha egy bázisállomáshoz kapcsolódó összes link megszakad, akkor maga a bázisállomás is elérhetetlenné válik. A szimulációknál azt kell leellenőrizni, hogy egy nyelőnek kitüntetett állomás és a körülötte lévő többi között létezik-e olyan elérési út, hogy egyik linken sem szakad meg a kommunikáció az eső miatt (az algoritmus véletlenszerűen tette le a bázisállomásokat és esőmentes esetben minden alkalommal elvégezte az útkeresést figyelembe véve a maximális 200 méteres távolságot, majd ha nem volt út minden bázisállomáshoz akkor újragenerált). Az útkeresés egyszerű gráfelméleti feladat: első lépésben megvizsgáljuk, hogy a nyelő milyen bázisállomásokat ér el, majd azt, hogy a már elért állomások milyen további állomásokkal tudnak kapcsolatot teremteni és így tovább egészen addig, amíg két egymás utáni lépés között nem változik az elért bázisállomások száma. A nodeok így átjátszóként fognak viselkedni, melyek ún. rerouting alkalmazásával segítik a távolabbi nodeok és a nyelő közötti kommunikációt. A 8. ábrán egy ezek alapján generált elrendezést láthatunk.

Ha az esőintenzitás nő, akkor a működő linkek száma és emiatt az elérhető bázisállomások száma nyilvánvalóan lecsökken. A MilliProp mérőrendszer esőintenzitás adatokat is szolgáltatott, tehát tudjuk, hogy különböző intenzitású esők milyen valószínűséggel fordulnak elő. Ezzel egyetemben az is ismertté válik, hogy milyen valószínűséggel esik ki 1,2,3... bázisállomás a hálózatból – ez fogja mutatni a kiesési valószínűséget.



8.ábra: Egy véletlenszerűen generált hálózatot és a közöttük jelenlévő összeköttetéseket illusztrálja $d_{\max}=200$ m feltételt figyelembe véve

4.3 Eső modellezése

4.3.1 Esőcella modellezése

Az eső egy tetszőleges hálózatra kifejtett hatását homogén és inhomogén térbeli esőintenzitás eloszlást feltételezve is elvégeztem. Homogén esetben az esőcella modellezése annyit jelent, hogy a vizsgálandó terület minden pontján azonos intenzitású esőt feltételezünk, így az összeköttetéseken megjelenő esőcsillapítás kizárólag a hosszától függ.

Inhomogén esetben különböző modellek írják le, hogy egy adott esőcella közepétől (ahol feltételezve a legnagyobb az esőintenzitás) tetszőleges távolságra milyen esőintenzitás figyelhető meg. Például az empirikus Goldhirsh-model a 4.3.1-1 összefüggés alapján tesz ajánlást egy esőcella kiterjedésére [25]:

$$D(R) = \alpha * R^{\beta} \quad 2 \leq R \leq 50 \text{ mm/h} \quad (4.3.1-1)$$

D a cella átmérője km-ben, R az esőintenzitás mm/h-ban, míg α és β empirikusan meghatározott paraméterek, ahol $\alpha = 12.43$ és $\beta = -0.553$ [25]. Ezután már csak egy eloszlásfüggvényre van szükségünk, amely minden pozícióban meghatározza az esőintenzitás

értékét az esőcella kiterjedésén belül. Ilyen jutunk el például egy Gaussi esőcellához, mely a 4.3.1-2 összefüggés alapján írja le az esőintenzitás eloszlását:

$$R = R_{max} * e^{-0.5 * \left(\frac{3d}{r}\right)^2 * \frac{1}{0.8^2}} \quad (4.3.1-2)$$

A képletben R jelöli az esőintenzitást egy tetszőleges pontban (a megszokott mm/h-ban), R_{max} a cella maximális intenzitását, d a távolságot a cella középpontjától km-ben, illetve r a cella sugarát szintén km-ben.

4.3.2 Esőfront modellezése

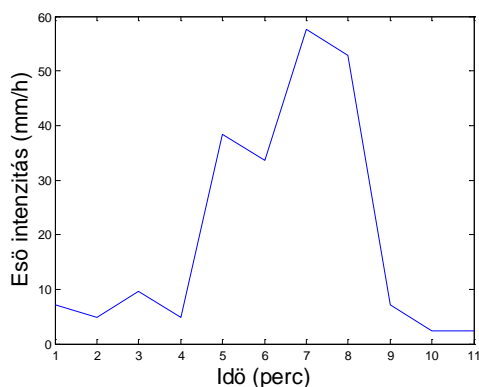
Az inhomogén vizsgálatot egy esőfront modellezésével végeztem el. Magát a front esőintenzitás értékeit most nem egy eloszlásfüggvény, hanem mért adatsorokból egy tetszőlegesen kiválasztott esőesemény adta. A front adott sebességgel áthaladt a mesh hálózat felett, majd megfigyeltem, milyen hatással van a hálózatra és mekkora node kiesést okoz. Mivel az esőcsillapítás nagyban függ attól, hogy a front milyen szögben érinti az egyes linkeket, így vízszintes és függőleges irányú mozgás esetén is megvizsgáltam az esőfront hatását.

5 Analízis - mikrohullámú ad-hoc mesh hálózat megbízhatóságának vizsgálata

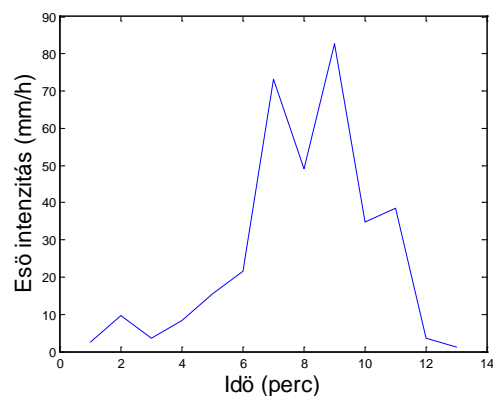
Az analízist MATLAB környezetben végeztem el, legtöbbször saját függvényeket használtam, mely alól kivételt a beépített *fminunc* minimumkereső, *interp1* interpoláláshoz használatos függvény stb. tesznek.

5.1 Esőfront hatása

A frontot egy 2011. májusi esőintenzitás adatsor egy-egy tetszőleges esőeseményéből generáltam, majd egyaránt vízszintes és függőleges irányú mozgás esetén is vizsgáltam a node-és linkkiesést (a vízszintes kelet-nyugati, a függőleges észak-déli irányt fog jelteni a következőkben). Mivel az esőintenzitás értékek percenként kerültek regisztrálásra, így a front sebességének valós modellezéséhez szélsőbesség adatokra is szükségem volt. A szimulációban azonban arra törekedtem, hogy akár másodperc alapú felbontásban is tudjam vizsgálni az esőfrontok hatását, így két esőintenzitás érték között úgy vettem fel 60 pontot, hogy lineárisnak feltételeztem az intenzitás változását. A két esőintenzitás adatsor – még percalapú felbontásban – az 9. és 10. ábrán látható: a bal oldali egy maximum 58 mm/h, míg a jobb oldali egy maximum 82 mm/h rövid esőintenzitású esőeseményt szemléltet.



9. ábra: Első esőesemény (maximális esőintenzitás: 58 mm/h)



10. ábra: Második esőesemény (maximális esőintenzitás: 82 mm/h)

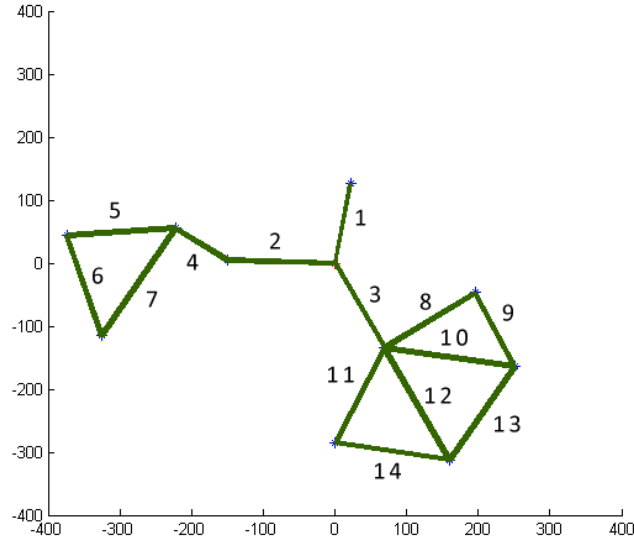
A szélesség adatok alapján meghatározhatóvá vált, hogy milyen kiterjedésűek lehetnek az adott esőfrontok. Párszáz méteres linkek esetében egyáltalán nem mindegy, hogy a például 50 mm/h körüli esőintenzitás értékek 50 vagy 200 méteren keresztül vannak jelen. A szélesség adatok azonban szintén perc alapon kerültek mérésre és erős ingadozásuk miatt a szimulációban egy átlagos értékkel, 2.5 m/s-al számoltam.

Esőfrontok esetében azt vizsgáltam meg, hogy az ábrán vízszintessel különböző szögeket bezáró linkekre milyen hatással van egy linkkel közel párhuzamos és merőleges irányú esőfront, illetve link- és nodekiesésben van-e különbség a kettő között a teljes hálózatra nézve. Nyilvánvaló, hogy ha az esőfront iránya merőleges egy linkre, akkor a csillapító hatás intenzívebben, de rövidebb ideig jelentkezik, ha pedig párhuzamosak, akkor a front hosszabb ideig fejt ki hatását, de összességében kevésbé intenzíven.

Az 1. táblázat mutatja az egyes linkek hosszát, illetve vízszintessel bezárt szögüket, az 11. ábra pedig a linkek számozását.

| Link szám | Linktávolság (m) | Vízszintessel bezárt szög (fok) |
|-----------|------------------|---------------------------------|
| 1 | 127.9 | 80.1 |
| 2 | 148.1 | 178.1 |
| 3 | 150.7 | 117.3 |
| 4 | 88.5 | 145.6 |
| 5 | 152.4 | 4.1 |
| 6 | 166.4 | 107.1 |
| 7 | 198.7 | 58.8 |
| 8 | 153.9 | 34.4 |
| 9 | 128.3 | 115.3 |
| 10 | 184.3 | 170.9 |
| 11 | 166 | 65.5 |
| 12 | 199.9 | 117 |
| 13 | 174.6 | 58.6 |
| 14 | 162.2 | 170.4 |

1. táblázat: A példahálózat vizsgált linkjeinek hossza és azok vízszintessel bezárt szöge



11. ábra: A példahálózat számozott összeköttetései

Az első esetben a 9. ábrán lévő esőfront keletről nyugatra való elhaladását figyeltem (2. táblázat). A felső sor mindig a link sorszámát mutatja, míg az alsó sor azt, hogy a front elhaladása alatt az idő hány százalékában működött.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|-----|------|-----|-----|------|
| 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 50% | 100% | 100% | 79% | 100% | 46% | 90% | 100% |

2. táblázat: Az egyes linkek kiesési ideje százalékban mérve az első esőesemény keletről nyugatra való elhaladása közben.

A második esetben ugyanezt az esőfrontot vizsgáltam meg, de most észak-déli irányú mozgatóssal (3. táblázat).

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|-----|------|-----|-----|------|
| 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 50% | 100% | 100% | 79% | 100% | 43% | 91% | 100% |

3. táblázat: Az egyes linkek kiesési ideje százalékban mérve az első esőesemény északról délre való elhaladása közben.

A front négy linket érint kritikusan (7,10,12,13). Nagy különbséget azonban nem vehetünk észre a horizontális és vertikális mozgás kiesési értékei között, ennek oka, hogy az esőfront meglehetősen nagy kiterjedésű a vizsgált linkek hosszához képest. Mindazonáltal érdekes számokkal is értelmezni ezeket az értékeket: a szimuláció (az esőfront elhaladása attól a pillanattól, amíg a vizsgált területre belép a front mindaddig amíg teljesen el nem vonul) 2420 másodpercig tartott, a 12-es számú link így a vertikális frontmozgásnál körülbelül 72 másodperccel rövidebb ideig volt működőképes. További következtetéseket azonban nem tudunk levonni, így nézzük meg a másik – jóval intenzívabb – esőfrontot!

A horizontális és vertikális elvonulás adatait rendre a 4. és 5. táblázat tartalmazza.

| | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 89% | 47% | 100% | 100% | 74% | 90% | 43% | 83% | 94% |

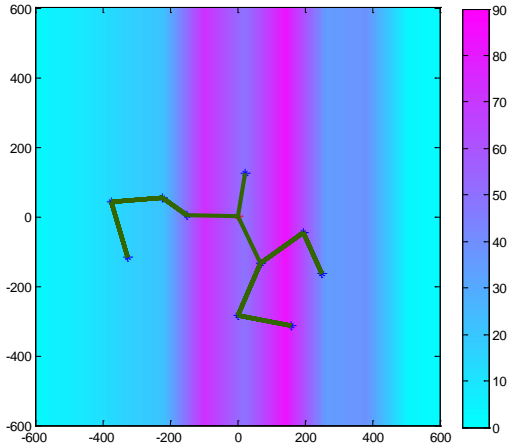
4. táblázat: Az egyes linkek kiesési ideje százalékban mérve a második esőesemény keletről nyugatra való elhaladása közben.

| | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 88% | 47% | 100% | 100% | 76% | 90% | 41% | 83% | 86% |

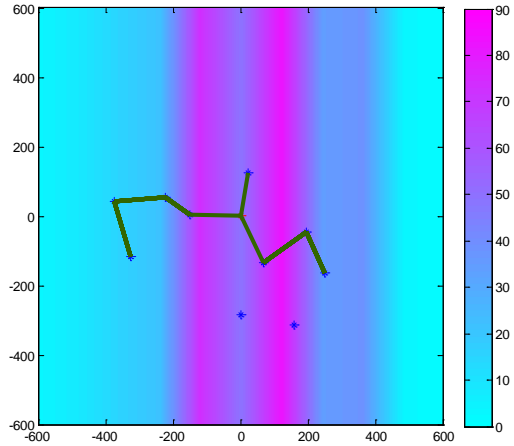
5. táblázat: Az egyes linkek kiesési ideje százalékban mérve a második esőesemény északról délre való elhaladása közben.

Az érintett linkek száma megnő (6,7,10,11,12,13,14) köszönhetően a jelenlévő jóval nagyobb esőintenzitás értékeknek. A 12-es linken ugyanúgy megfigyelhetjük, hogy vertikális frontmozgás esetén valamivel – 2%-kal – kevesebb ideig üzemel (mivel a szimuláció hosszát a front teljes elvonulási ideje, így arányosan a kiterjedése határozta meg, a szimulációs idő most változott, 2660 másodpercig tartott). Szignifikáns változás azonban a 14-es link esetében van. Vertikális mozgatás esetében 8%-kal, vagyis 3 és fél perccel rövidebb ideig üzemelt. A link ráadásul meglehetősen közel áll a vízszinteshez (170.4 fokos szöget zár be vele), így a hosszabb kiesés oka a rövidebb ideig tartó, de sokkal intenzívebb csillapító hatás. Részletesebben: a 4.1 fejezetben bemutatott képlet alapján a 14-es link fadingtartaléka 2.1 dB. Ez a tartalék elég lehet akkor, amikor a front nagy intenzitású része (60-80 mm/h) már érinti a linket, de a szakasz nagyobb részén még jóval kisebb intenzitással esik az eső, ezt láthatjuk a 12/a. ábrán.

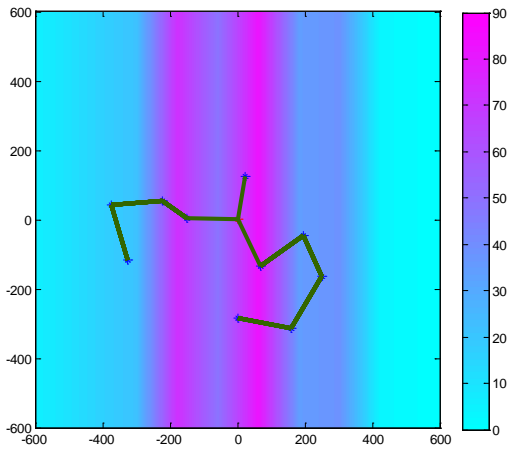
Az 12/b. ábra által mutatott állapotnál (körülbelül fél perccel az előző után) a front nagy intenzitású része a link meghatározó részén jelen van, a fadingtartalék nem elég az esőcsillapítás kompenzálására. Az esőfront ezen részének azonban nem is kell teljesen elvonulnia a linkről, nagyon hamar újra üzemképesé válik (12/c. ábra). Ezzel szemben a vertikális frontmozgás egy olyan állapotát mutatja az 12/d. ábra, ahol a nagyintenzitású rész már teljesen áthaladt a 14-es linken, az mégis kiesik a rendszerből.



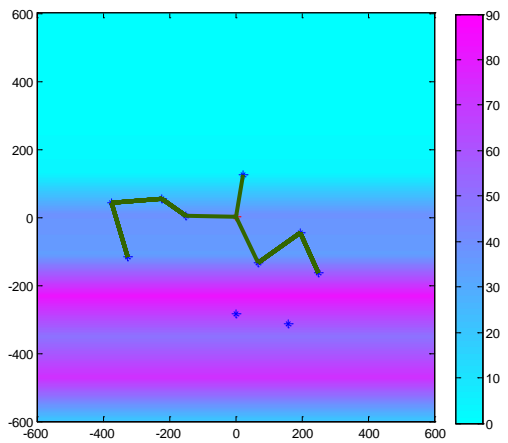
12/a. ábra: Horizontális irányú esőfront. Az front már jelen van az összeköttetésen, de a távolság többi részén még nincs akkora csillapítás, a fadingtartalék elég.



12/b. ábra: A front nagy intenzitású része a link meghatározó részén jelen van, a fadingtartalék nem elég, a link kiesik a rendszerből, de csak rövid ideig.



12/c. ábra: A nagy intenzitású rész majdnem elhagyja a linket, az újból működőképessé válik épséssé válik.



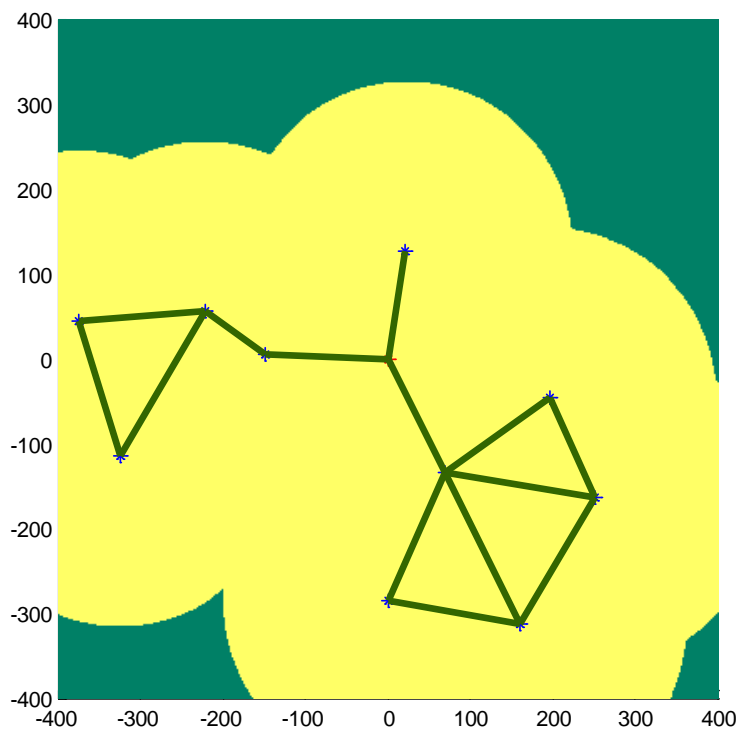
12/d. ábra: Vertikális irányú esőfront. A linken rövidebb ideig fejt ki hatását a front, de akkor sokkal intenzívebben, a kiesési idő így valójában hosszabb.

A fenti szimuláció konklúziója, hogy ha tisztában vagyunk a domináns széliránnyal – ami az esőfrontok mozgásáért felel –, akkor a bázisállomásokat célszerű úgy telepíteni, hogy a hosszabb linkek a domináns széliránnyal inkább merőlegesen helyezkedjenek el, rövidebb linkekre nyilván nem érdemes ilyen kikötést tennünk.

5.2 Lefedettség vizsgálata

Az esőfront nem az egyetlen zavaró tényező. Mivel eddig a linkek megbízhatóságát vizsgáltam, nem volt szó az egyes bázisállomások okozta interferenciáról. A kérdés ebben a fejezetben az, hogy a vizsgált területen hol képes a mobil eszköz kommunikálni és az esőfront, illetve az interferencia mennyire befolyásolják a működőképességet.

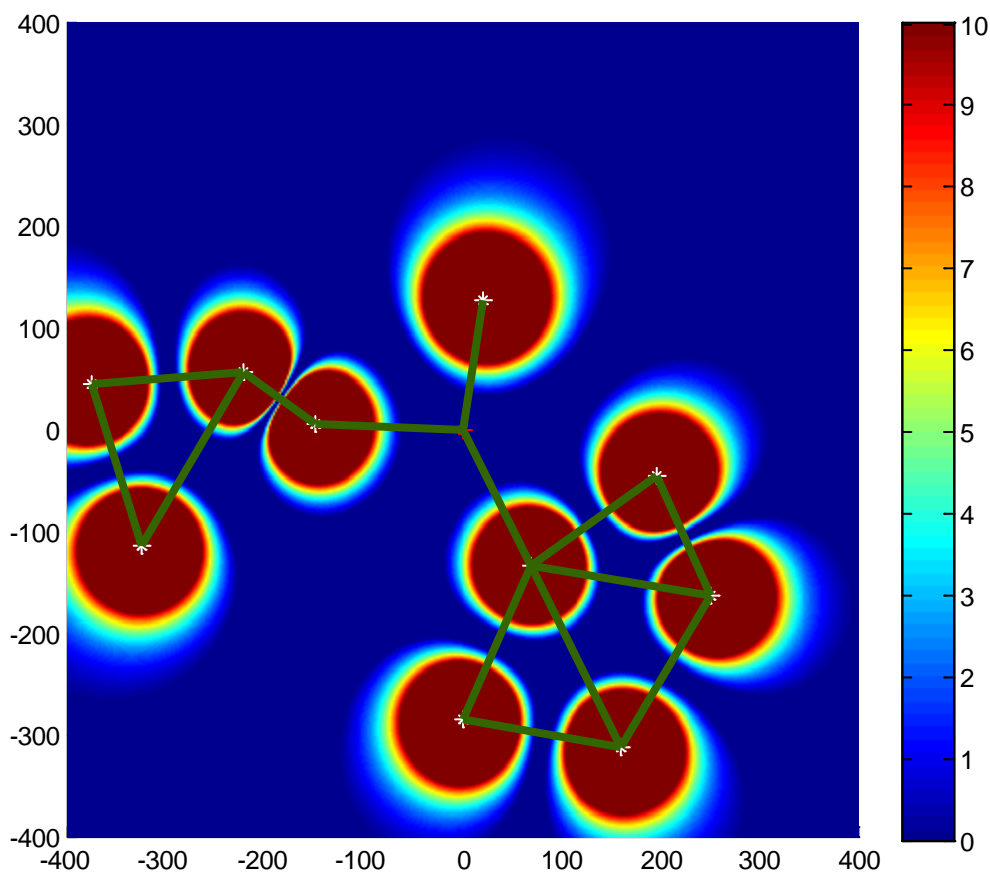
Először azt határoztam meg, hogy a csillapító tényezők jelenléte nélkül mekkora a maximális lefedett terület, ha az egyes bázisállomások legfeljebb 200 méterre tudnak hasznos jelet küldeni. A 13. ábrán a sárga terület mutatja ezt, a későbbi szimulációknál ehhez a területhez képest normálva számoltam ki százalékértékben a lefedettség mértékét. A bázisállomások ezenkívül ugyanazon a frekvencián kommunikálnak, ahelyett hogy feldarabolnák a spektrumot (pl.: egy 500 MHz-es szeletet, tíz darab 50 MHz-esre), egyszerre használják ugyanazt a széles sávot, így garantálva a gigabites adatátvitelt. Érdekes még megemlíteni, hogy a 2.1 fejezetben bemutatott 5G-s víziót követve a közepső (optikai gerinchálózatba kapcsolt) ponthoz nem tartozik lefedett terület, a szimulációban feltételeztem, hogy az a pont a többi bázisállomás adatátvitelét irányítja.



13. ábra: Eső- és interferenciamentes esetben a maximálisan lefedhető terület (sárga rész)

5.2.1 Lefedettség omnidirekcionális antennákkal

Ezeknél a szimulációknál feltesszük, hogy mind a mobil eszközökön és bázisállomásokon is omnidirekcionális antennák vannak (mivel egyelőre síkban vizsgálódunk, nem nevezhetjük izotrópnak). A bázisállomások közötti kommunikációra feltételezhetünk irányított antennákat, de a további szimulációk szempontjából ez nem lényeges. Az omnidirekcionális antennák alkalmazásának hátrányát sűrűn telepített ad-hoc mesh hálózatoknál jól mutatja a 14. ábra. A térkép esőmentes esetet mutat és színezése a fading tartalékot tükrözi: a sötétkék területeken nagyon alacsony a tartalék, 0 dB esetében pedig nem lehet kommunikálni. Ha a tartalék 10 dB-nél több lenne, a jobb illusztrálhatóság érdekében azt is 10 dB-el jelöltem.



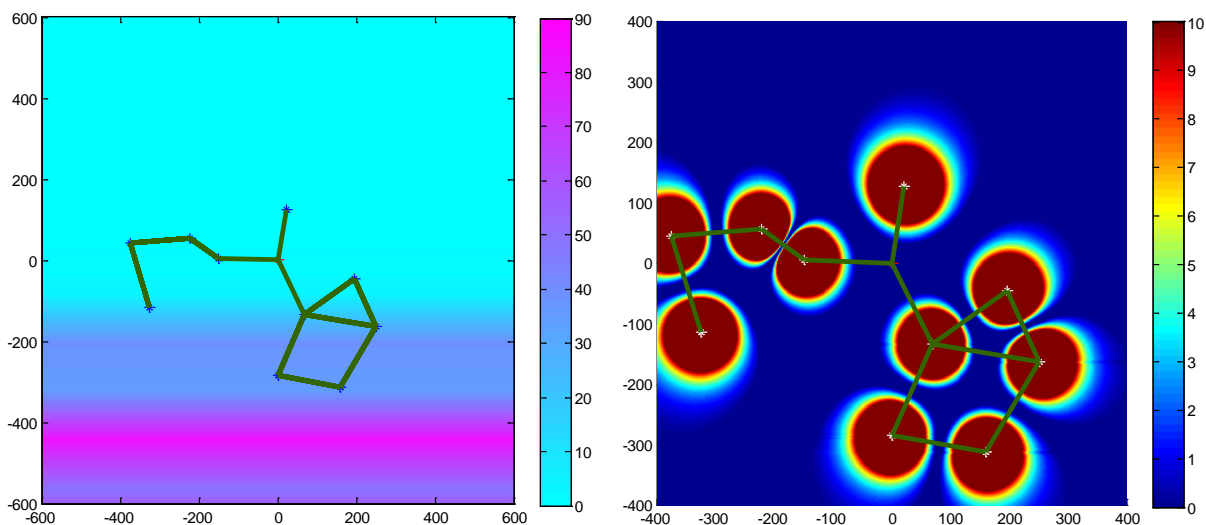
14. ábra: Omnidirekcionális antennák alkalmazásával az interferencia miatt „bogyós” elrendezés alakul ki, a színezés a fadingtartalékot mutatja és a 0 – vagy a sötétkék szín – jelenti a lefedetlen területet

Az interferencia számítása a következő módszerrel történt: egy bázisállomástól 200 méter távolságban a fading tartalék esőmentes esetben 0 dB, ez legyen egyenlő 1 „egységgel” teljesítményben (ami lehet pl.: 1 mW). A 4.1-es fejezetben bemutatott egyenlőtlenséget

felhasználva, ha d kisebb, mint 200 méter, akkor a tartalék 1-nél nagyobb, ha azonban nagyobb, mint 200 méter akkor 1-nél kisebb a tartalék teljesítményegységben kifejezve. Egy bázisállomás így 200 méternél távolabbra is okozhat interferenciát, limitje továbbra is csak a hasznos jelnek van.

Az 14. ábrán a „bogyós” lefedettség ennek az interferenciának a következménye. A tartalék minden ponton úgy lett kiszámítva, hogy az azon a helyen elhelyezett mobil a síkban legközelebbi bázisállomással kommunikál, az lesz a hasznos jel, a többi bázisállomás pedig interferenciát okoz. Így érthető, hogy az omnidirekcionális sugárzás miatt egy link közepén az egyik oldalról érkező hasznos jelet teljesen kioltja a link másik oldaláról érkező interferencia és kialakul két „bogyó”, közöttük pedig egy tartalék nélküli sáv. A többi bázisállomás okozta interferencia ezt a sávot pedig csak tovább duzzasztja. Mindazonáltal a teljes lefedettség az eredeti interferenciamentes terület 55%-ára csökken.

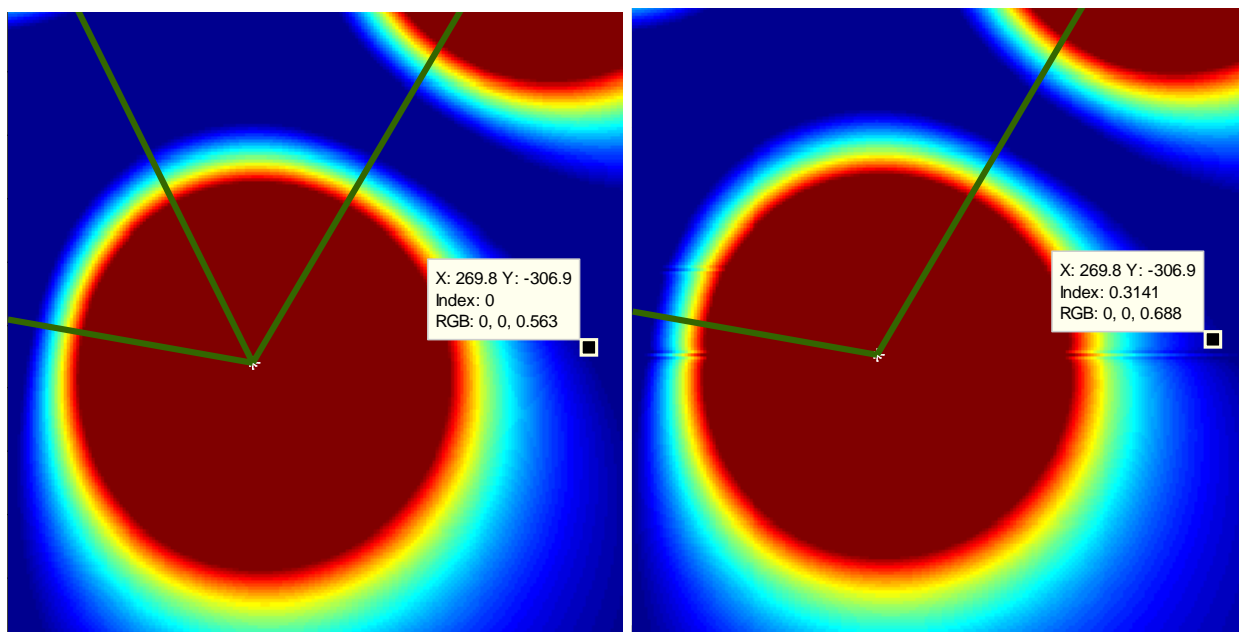
Most tételezzük fel, hogy az eső a 15. ábrán lévő pozícióban van (1. pozíció)! Az első benyomásunk az lehet, hogy az eső rontja a kommunikációt és a lefedettség valamekkora mértékben csökkenni fog. Ez a bázisállomás-bázisállomás kommunikációra igaz is, ahogy korábban be volt mutatva, de a lefedettségre most ellentétes hatással lehet.



15. ábra: Esőfront hatása a lefedettségre (vegyük észre, hogy a lefedettséget az esőfronthoz képest kisebb területen illusztrálom)

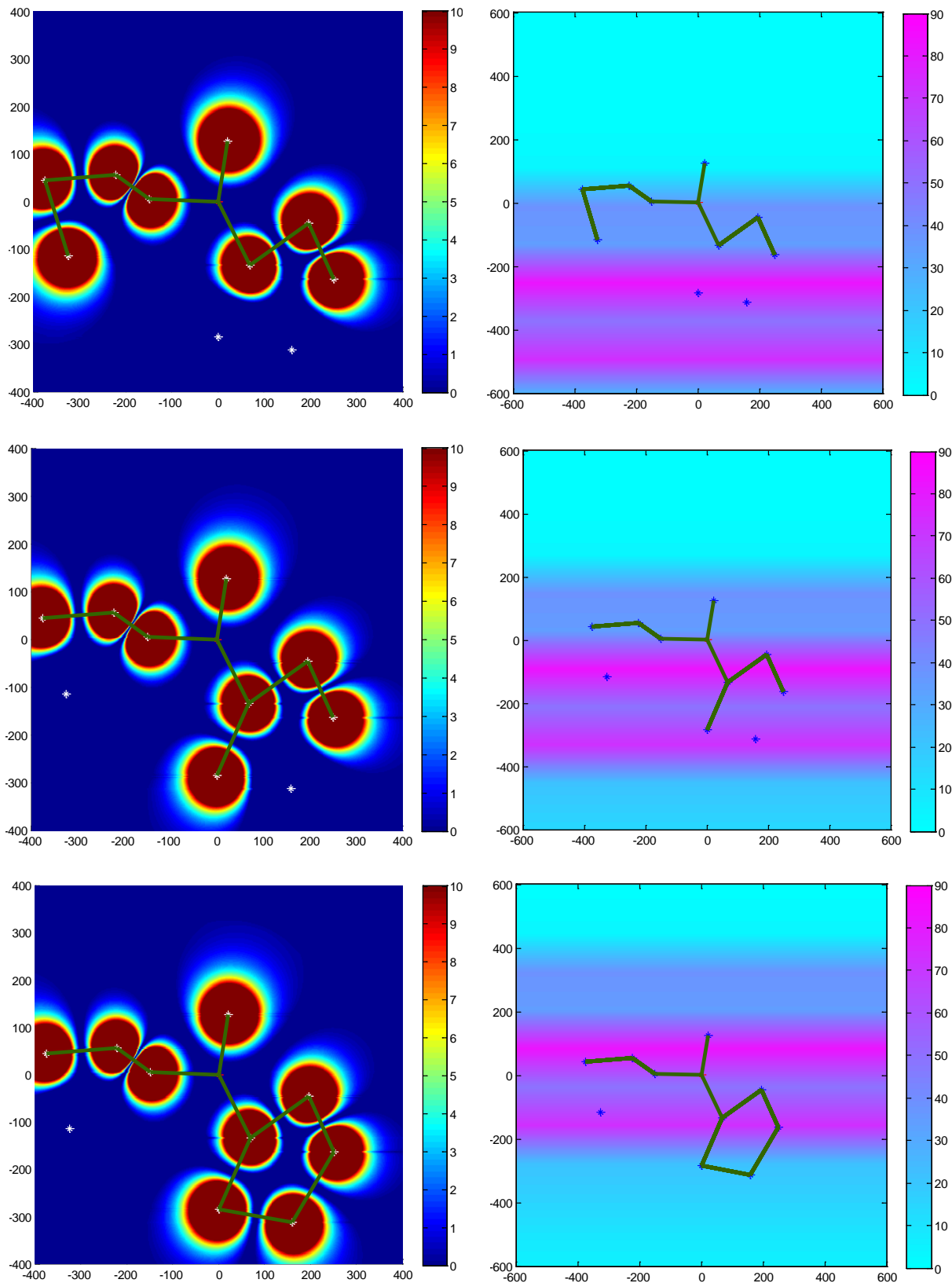
Az eső ugyanis okozhat konstruktív interferenciát is, vagy másképpen fogalmazva csillapíthatja a zavaró interferenciákat. Habár ennek eredménye a 15. ábrán nem látszik számottevően, a teljes lefedettség mégis 55%-ról 59%-ra nő. Minden bázisállomás egy kicsivel

nagyobb területet fed le, ezt a 16. ábrán a jobb alsó bázisállomáshoz tartozó lefedett területtel mutatom be. A megadott pozícióban esőmentes esetben nincs fadingtartalék (a pontosítás kedvéért van, de annyira kevés, hogy 0-ra kerekíték), eső jelenlétében viszont az arra a pontra érkező összes interferenciát nagyobb mértékben csökkenti az eső, mint amennyit a hasznos jelet csillapítja, így 0.314 dB tartalék lesz még azon a ponton. A felnagyított ábrán továbbá látható az is, hogy a felette lévő „bogyóval” való távolság csökkent, a közöttük lévő interferenciában gazdag sáv kissé szűkült.



16. ábra: Az eső pozitív hatással lehet a lefedettségre, ha egy adott területre beérkező interferenciákat összességében jobban csillapítja, mint a hasznos jelet

A 17. ábrán az esőfront három további pozíciójában mutatom be hogyan változik a lefedettség. Az első sorban (2. pozíció), a front a teljes hálózatot érinti, így a nagyobb mértékű csillapított interferencia tovább növeli a lefedett területet, azonban két bázisállomás kiesik a rendszerből (a szimulációban a kiesett állomások továbbra is adnak, így azok csupán interferenciáért felelnek). A lefedettség az első sorban 8 bázisállomással nem meglepően így lecsökken 51%-ra. A második sorban (3. pozíció), ugyancsak 2 állomás esik ki az eső hatására, azonban a lefedettség 55%-ra ugrik fel. Jóllehet, ennek csupán az elrendezés és az általam definiált vizsgált terület az oka, hiszen az előző esethez képest egy olyan állomás esik ki a rendszerből, melyhez tartozó „bogyónak” valamivel kisebb része esik a vizsgált területre, mint amelyik újra működőképessé válik.



17. ábra: Lefedtség változása az esőfront eltérő pozícióiban

| | >0 dB | ≥1 dB | ≥2 dB | ≥3 dB | ≥4 dB |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nincs eső | 55.4% | 45.6% | 39.8% | 35.8% | 32.6% |
| 1. pozíció | 59.0% | 47.2% | 40.8% | 36.4% | 33.0% |
| 2. pozíció | 51.6% | 38.9% | 33.1% | 29.2% | 26.4% |
| 3. pozíció | 55.2% | 40.5% | 33.7% | 29.4% | 26.4% |
| 4. pozíció | 62.9% | 46.3% | 38.7% | 33.9% | 30.3% |

6. táblázat

A harmadik esetben (4. pozíció), 9 működő állomással 63%-ra nő a lefedettség, a pontosabb adatokat a 6. táblázat tartalmazza, ahol külön azt is jelölöm, hogy az egyes esetek mekkora részén volt legalább 1-4 dB fadingtartalék.

A minimális fadingtartalék különböző értékeire való százalékos információk a szimuláció továbbfejlesztése szempontjából lehet fontos. Megemlítendő, hogy jelenleg nincs adóteljesítmény-optimalizálás, azért ad egyszerre minden bázisállomás, mert felteszem, hogy minden bázisállomás közelében van egy mobil eszköz, amellyel kapcsolatban áll. Ezek távolsága független a „saját” bázisállomásuktól, tehát hiába lesz a legközelebbi állomás 5, vagy 150 méterre, az ugyanakkora teljesítménnyel fog adni. Egyébként az adóteljesítmény-optimalizálás nyilvánvalóan az interferencia ellen is egy jó védekezési mechanizmus.

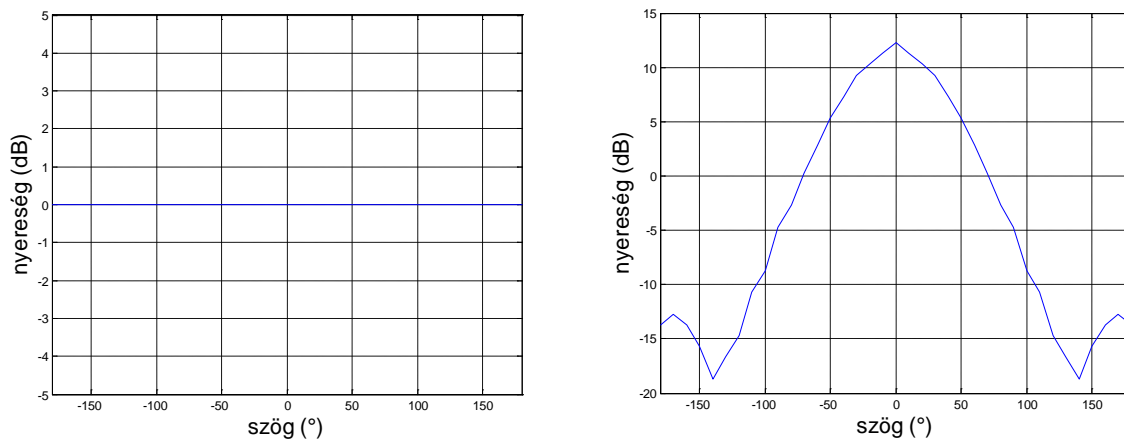
5.2.2 Lefedettség irányított antennákkal

Az 5G koncepciójából kifolyólag a „densification” – tehát a bázisállomások sűrűsödése – elengedhetetlen, omnidirekcionális antennákat pedig láthatóan nem érdemes alkalmazni. Mivel magáról a rendszerről is csak elképzelések születtek eddig, az antennák lehetséges karakterisztikáiról egyáltalán nincsenek információk.

Triviális, hogy minél jobb irányítottágú antennákat feltételezünk, annál kisebb mértékű az interferencia, ugyanakkor annál több állomásra van szükségünk adott terület lefedéséhez. A szimuláció precízégének kedvéért egy olyan irányított antennát generáltam, melynek teljes sugárzási teljesítménye megegyezik az omnidirekcionáliséval. Ismert, hogy az pontosan 200 méterre teljesítményegységet sugároz, pontosabban a 200 méterre lévő körvonalon 1 méter vonalmenti integráltja 1 teljesítményegység vagy másképp: a teljesítménysűrűsége 1mW/m (ha az egységnyi teljesítmény 1 mW). Annak karakterisztikája $-\pi$ és π között mindenhol 1, a görbe alatti integráltja pedig fejből is könnyen meghatározható, 2π . A 18.ábra bal oldalán az amplitúdó

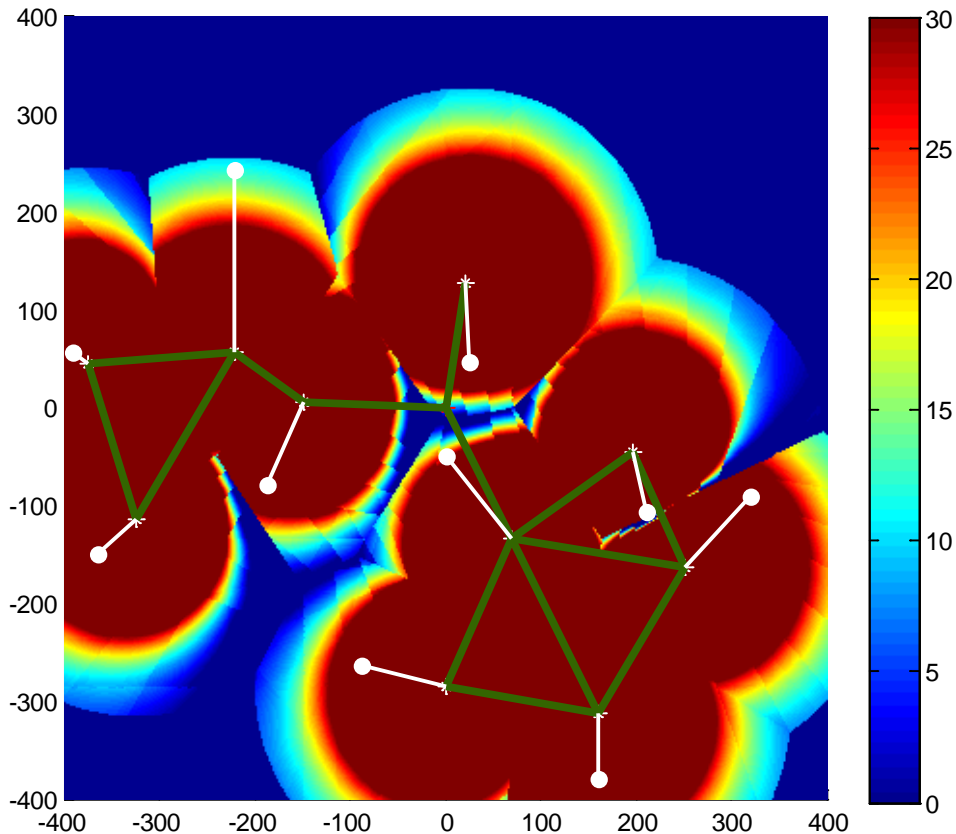
karakterisztika látható, mely nyilvánvalóan a teljes 360 fokban 0 dB (ez kizárólag síkban igaz, térben az izotróp antenna lenne megfelelő erre).

Az irányított antenna generálásnál azt kell figyelembe venni, hogy a hozzátartozó (teljesítménysűrűség) karakterisztika görbe alatti integráltja megegyezzen ezzel (2π), a formája szabadon választható. Egy ilyen amplitúdó karakterisztika látható a 18. ábra jobb oldalán, melynek főirányba számolt nyeresége 12.3 dB.



18. ábra: Omnidirekcionális (balra) és az általam generált irányított antenna (jobbra) amplitúdó karakterisztikája

Jelen esetben is minden bázisállomás kommunikált, mindegyik a síkban hozzá legközelebbi mobil eszközzel (mindegyikhez feltételezünk egy legközelebbit), adóteljesítmény-optimalizálás még mindig nincs. A 12.3 dB-s nyereség miatt várhatóan csökken az interferencia miatt lefedetlen terület. Esőmentes esetben a lefedettséget a 19. ábra illusztrálja. A fehér pöttyök a mobil eszközöket jelölik, mindegyiknek van egy hozzá legközelebb eső bázisállomása, így azok fő sugárzási iránya is jelölve van az ábrán (a szimulációban adaptívan arra fordítja a fő sugárzási irányát, amelyre a mobil található). Például a legalsó bázisállomás 270 fokra néz, ahol 0 fok az óra 3 órájánál van és az az óra járásával ellentétes irányba nő.

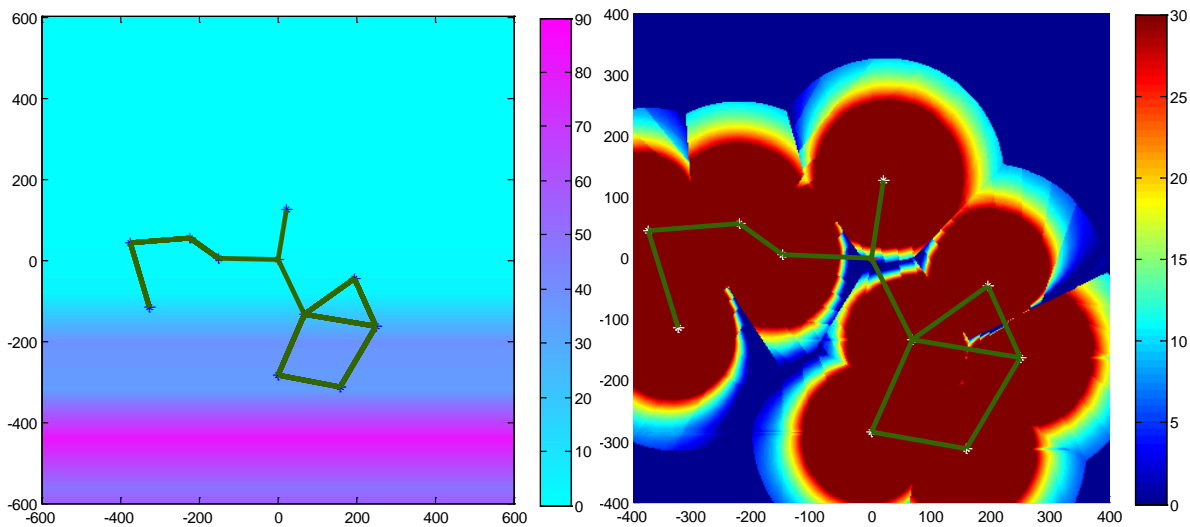


19. ábra: Az irányított antennák használata jelentősen megnöveli a lefedettséget, a fehér pontok jelölik a mobil eszközök pozícióit, a hozzájuk vezető szakaszok pedig a legközelebbi bázisállomásokat, melyek fő sugárzási irányukat adaptívan az adott mobil eszköz felé fordítják

A lefedett terület jóval nagyobb, 96.7%. Megfigyelhetők azonban kisebb vágások, melyekért az interferencia felel. Ilyen található például bal felül a kb. -300, +100 koordinátától kezdődően kb. 135 fok felé irányuló vágás. Amíg olyan terület vizsgálunk, hogy a tőle balra lévő bázisállomás a hozzá legközelebbi, addig az odairányítja a fő sugárzási irányát, ugyanakkor a tőle jobbra lévő állomás (amely 90 fokra néz, azaz a képen pontosan felfelé) a fő sugárzási irányától kb. 45 fokban interferenciát okoz 6 dB nyereséggel. Ha kicsit jobbra megyünk a vizsgálandó területen, akkor már a jobbra lévő állomás lesz a legközelebbi, a bal oldali pedig kb. 90 fokkal a fő sugárzási irányától sugároz interferenciát a 18. ábra szerint -5 dB nyereséggel.

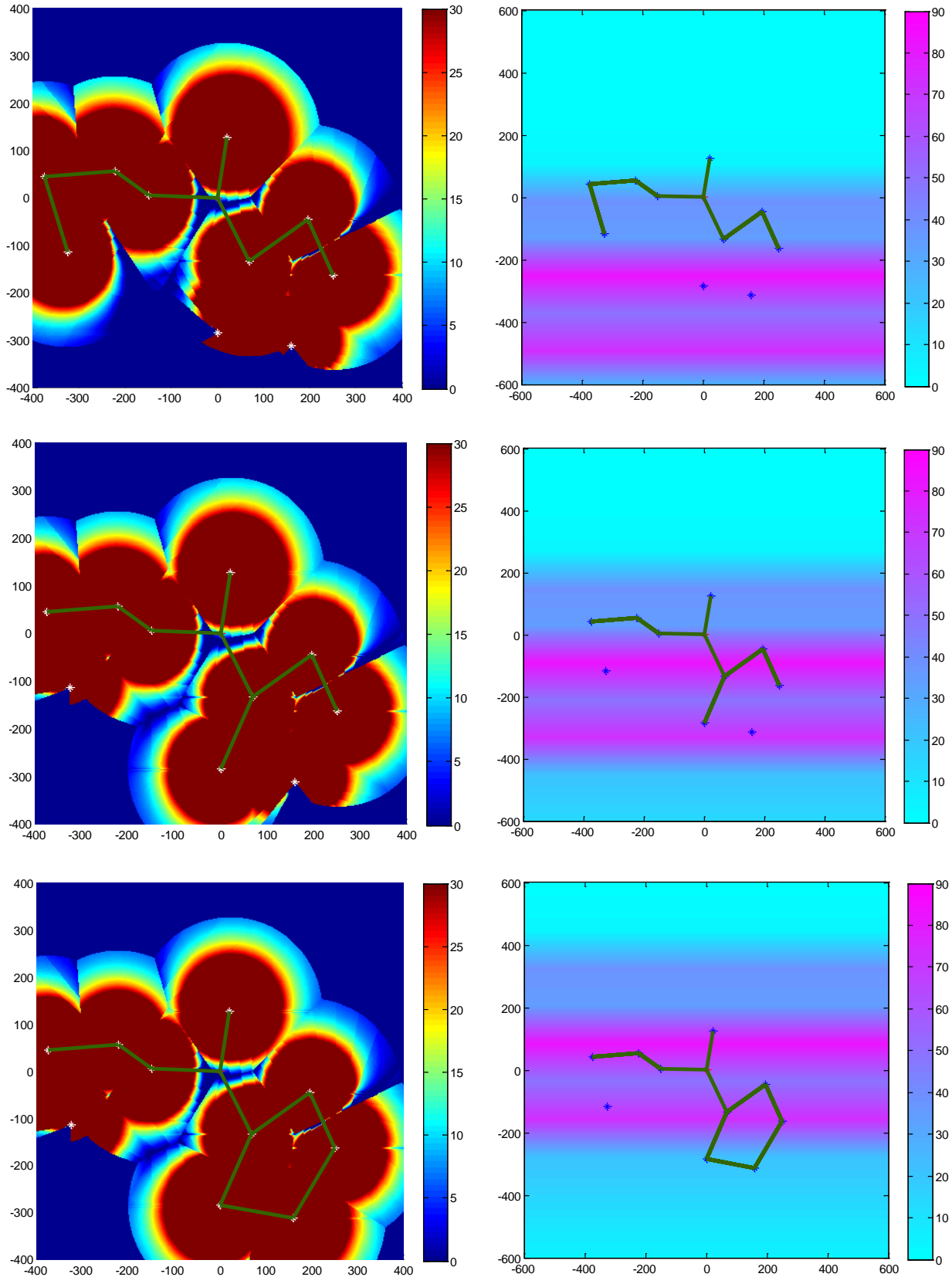
Most képzeljük el, hogy az esőfront az omnidirekcionális esetben is vizsgált 20. ábrán látható helyzetben van (1. pozíció)! Az eső omnidirekcionális antennák alkalmazásával valamelyest javított a lefedett terület kiterjedésén, most azonban a lefedetlen területek leginkább az előbb említett erős vágásokból jönnek össze, egy távoli interferencia csillapítása így nem fog

szignifikáns változást okozni. A lefedettség mindazonáltal 97.1%, vagyis majdnem fél százalékkal nő esőmentes esethez képest (20. ábra).



20. ábra: Esőfront hatása a lefedettségre a bázisállomásokon irányított antennák alkalmazásakor

A 21. ábrán látható a lefedettség az eső ugyanazon pozícióiban, ahogy omnidirekcionális esetben is vizsgáltam. Az első esetben (2. pozíció) két állomás megszűnésével 86.3%-ra csökken a lefedett terület, a irányított antennák okozta interferencia pedig kiválóan látszik a kiesett bázisállomások környékén (melyek most is adnak izoláció esetén).



21. ábra: Lefedtség változása az esőfront eltérő pozícióiban

A második sorban 90% (3. pozíció), a harmadikban pedig 92.5% (4. pozíció) a teljes lefedett terület. A 7. táblázatban ezen értékek mellett az is fel van tüntetve, hogy az egyes esetek mekkora részén volt legalább 1-4 dB fadingtartalék.

| | >0 dB | ≥1 dB | ≥2 dB | ≥3 dB | ≥4 dB |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nincs eső | 96.7% | 96.2% | 95.7% | 95.2% | 94.5% |
| 1. pozíció | 97.1% | 96.5% | 95.9% | 95.3% | 94.6% |
| 2. pozíció | 85.8% | 85.8% | 85.2% | 84.6% | 83.9% |
| 3. pozíció | 90.0% | 89.6% | 89.1% | 88.5% | 87.7% |
| 4. pozíció | 92.5% | 92.1% | 91.6% | 91.1% | 90.4% |

7. táblázat

Ahogy omnidirekcionális esetben is említésre került, az eltérő minimális fading tartalékra számolt százalékértékek az adóteljesítmény optimalizálásakor fontos kiindulópont lehet. Irányított antennáknál pedig jóval kritikusabb probléma merülhet fel, ha egy olyan mobil eszköz tartalékát számoljuk, amely egy vonalban van egy éppen kommunikáló bázisállomás-mobil linkkel (és nem attól a bázisállomástól kap hasznos jelet), hiszen az alkalmazott antenna a fő sugárzási irányától pár fokra könnyen 10-11 dB-es nyereséggel sugározhat interferenciát.

A dolgozatnak ezen része (5.2 fejezet) azt hivatott megmutatni, hogy az interferencia a bázisállomások sűrűsödésével komoly problémát jelenthet, azonban irányított antennákkal jócskán növelhetünk a lefedettségen. A 7. táblázat adatai ugyanakkor azt mutatják, hogy az adóteljesítmény-optimalizálás és a mobil eszközökre telepített több bázisállomással egyszerre kapcsolatot tartó MIMO antennák alapos vizsgálata elengedhetetlen (90-95% körüli lefedettség nyilvánvalóan közel sem elég). Sajnos a leendő 5G-s hálózatok MIMO antennáiról halovány sejtés sincsen egyelőre, azok szimulációja 2017 utánra marad.

6 Konklúzió, továbblépési lehetőségek

A tudományos diákköri munka keretében mobil ellátó- és hozzáférési hálózatok gigahertzes frekvenciatartományban működő rádió-összeköttetéseknek speciális terjedési, mérési és modellezési eljárásait ismertem meg. A munkához valós mérési adatok is rendelkezésre álltak, melynek során elsősorban a csapadék terjedésre gyakorolt hatásainak vizsgálata volt az elsődlegesen vizsgálandó terület. A korábbi mérési eredmények jó lehetőséget biztosítanak ötödik generációs mobil ellátó- és hozzáférési hálózatok összeköttetéseknek vizsgálatára, melyek szintén a milliméter hullámhosszú tartományban fognak üzemelni, ezáltal a csapadék hatása ezen összeköttetések esetén kritikus lehet. A dolgozatomban valós esőeseményből kivágott esőfrontok segítségével mutatom be, hogy azok milyen hatást fejtenek ki az összeköttetésekre és egy tetszőlegesen generált hálózatra. Ezek eredménye azt igazolja, hogy hiába a rövid cellasugaras felépítés, a csapadék hatása az ellátóhálózatokban kritikus lehet és a tervezésnél mélyrehatóbban foglalkozni kell vele. A hozzáférési hálózatokban ugyanakkor azt mutatom be, hogy az interferencia miként jelent akadályt az 5G-ben valószínű „densification”-nek, illetve rámutatok arra, hogy a csapadék itt miért képes konstruktívan is hatni a kommunikációra.

Ezek bemutatását Matlab program segítségével írt szimulációk végzik el, melyek ugyanakkor még messze lehetnek életszerűbbek: eltérő terjedési modellek, több/kevesebb bázisállomás egy kisebb/nagyobb térképen, más frekvenciák és polarizáció vizsgálata, Non-Line-of-Sight összeköttetések figyelembe vétele, fraktális esőmodell implementálása, mozgó mobil eszközök stb. Ezek mind továbblépési lehetőséget jelentenek egy ötödik generációs hálózat tervezési modellének precízebb megalkotásához.

Irodalomjegyzék

- [1] UMTS, "Mobile Traffic Forecasts 2010-2020 Report," UMTS Report Forum 44, January 2011.
- [2] [Online] „Movistar launches 300 Mbps LTE-A in Madrid, Barcelona”, *Telecompaper*, Oct. 1, 2014, <http://www.telecompaper.com/news/movistar-launches-300-mbps-lte-a-in-madrid-barcelona--1040242>
- [3] [Online] „Vodafone, KPN trumpet LTE-A rollouts”, Sept. 19, 2014, *TeleGeography*, <https://www.telegeography.com/products/commsupdate/articles/2014/09/19/vodafone-kpn-trumpet-lte-a-rollouts/index.html>
- [4] Wonil Roh, Ji-Yun Seol, JeongHo Park, Byunghwan Lee, Jaekon Lee, et al., „Millimeter-Wave Beamforming as an Enabling Technology for 5G Cellular Communications: Theoretical Feasibility and Prototype Results”, *IEEE Communications Magazine*, Volume: 52, Issue: 2, pp: 106-113, February 2014
- [5] [Online] „Tentative 3GPP timeline for 5G”, *3GPP*, March 17, 2015 http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1674-timeline_5g
- [6] Rappaport, T.S., et al., „Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!”, *IEEE Access*, Volume: 1, pp: 335-349, May 29, 2013.
- [7] Cudak, M., Ghosh, A., Kovarik, T., Ratasuk, R., et al., „Moving Towards mmWave-Based Beyond-4G (B-4G) Technology”, *IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp: 1-5, 2-5 June 2013
- [8] Samsung Electronics Co., „5G vision”, DMC R&D Center, Ltd, February 2015
- [9] Wonil Roh, „Performances and Feasibility of mmWave Beamforming Prototype for 5G Cellular Communications”, *IEEE ICC 2013*, June 11, 2013.
- [10] Emil Bjornson, Erik G. Larsson, and Thomas L. Marzetta, „Massive MIMO: Ten Myths and One Critical Question”, pp: 2-4, Aug. 18, 2015
- [11] [Online] „LiU research for super-fast 5G”, *LiU Magazine*, Sweden, <https://www.liu.se/forskning/forskningsnyheter/1.622522?l=en>
- [12] A. Roessler, J. Schlien, S. Merkel, M. Kottkamp, „LTE - Advanced (3GPP Rel.12) Technology Introduction - White Paper”, June 2014
- [13] Xingqin Lin; Andrews, J. ; Ghosh, A. ; Ratasuk, R., „An overview of 3GPP device-to-device proximity services”, *IEEE Communications Magazine*, Volume: 52, Issue: 4, pp: 40-48, April 2014

- [14] Martin Haenggi, Sunil Srinivasa, „Path Loss Exponent Estimation in Large Wireless Networks”, Cornell University Library, arXiv:0802.0351v3, Feb. 4, 2008
- [15] J. Murdock et al., “A 38 GHz Cellular Outage Study for an Urban Outdoor Campus Environment,” *Wireless Commun. Network. Conf.*, April 2012, pp. 3085–90.
- [16] ITU-R WP5D Contribution 407, „Further Information on Technical Feasibility of IMT in the Bands above 6 GHz”, July 4, 2013
- [17] ITU Recommendations P.838-3, „Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,” March 2005
- [18] Raaf, B., Zirwas, W., Friederichs, K.-J., Tirola, E. et al., „Vision for Beyond 4G broadband radio systems”, *IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp: 2369-2373, 11-14 Sept. 2011
- [19] Cs. Sinka, J. Bitó, „Modelling of Joint Effect of Rain and Wind on the Attenuation of Millimetre Wave Propagation”, *Proceedings of URSI Commission F Meeting, Open Symposium on Propagation and Remote Sensing*, Garmisch-Partenkirchen, Germany, Feb 12-15, 2002, 6 pages (CD-ROM proceeding)
- [20] Crane, Robert K. „Propagation Handbook for Wireless Communication Design”, ISBN-13: 978-0849308208
- [21] ITU Recommendations P.530-14, „Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems”
- [22] ITU Recommendations P.1623-1, „Prediction method of fade dynamics”
- [23] Nicewander, J. L. Rodgers and W. A., „Thirteen ways to look at the correlation coefficient”, *The American Statistician*, Volume. 42, No. 1., pp: 59-66, February 1988.
- [24] Sooyoung Hur, Youngbin Chang, Sangkyu Baek, YoungJu Lee, Jeongho Park, „mmWave Propagation Models Based on 3D Ray-Tracing in Urban Environments”, May 26-28, 2014.
- [25] Goldhirsh, J., „Rain cell size statistics as a function of rain rate for attenuation modeling”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Volume:31, Issue: 5, pp: 799-801, Sept. 1983