

Mikrohullámú ad-hoc mesh hálózatok modellezése csapadékos környezetben

Faragó Ákos

Konzulensek: Kántor Péter, Csurgai-Horváth László, Bitó János

Villamosmérnöki kar

Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat

2014.10.22.



Kivonat

A tudományos diákköri munka keretében egyrészt vezeték nélküli mobil ellátóhálózatok mikrohullámú frekvenciatartományban működő rádió-összeköttetéseknek speciális terjedési, mérési és modellezési eljárásai kerültek vizsgálat alá. A munkához rendelkezésre álltak valós esőintenzitás és csillapítás mérési adatok, ezek feldolgozása után a munka gerincét a csapadék hullámterjedésre gyakorolt hatásainak a vizsgálata képezte mind mikrohullámú ellátóhálózatok, mind mikrohullámú ad-hoc mesh hálózatok esetén. A rendelkezésre álló mérési eredmények jó lehetőséget biztosítanak ugyanis ötödik generációs ad-hoc mobilhálózatok összeköttetéseknek vizsgálatára is, mely hálózatok szintén a mikrohullámhosszú tartományban fognak üzemelni. Emiatt jelen dolgozatban egy ad-hoc mesh hálózat szintén vizsgálat alá került, hiszen a csapadék hatása ezen hálózat összeköttetések esetén is kritikus lehet. A munka második részét ezen hálózatok megbízhatósági és rendelkezésre állási kérdéseinek vizsgálata képezte csapadékos környezetben. A kitűzött vizsgálatok elvégzéséhez a rendelkezésre álló mérési eredmények transzformációja volt szükséges, mivel az ötödik generációs hálózatok összeköttetések hossza legfeljebb néhány száz méter lehet. A szimulációs környezet MATLAB volt, a megírt programok az adatok megjelenítését, szűrését, transzformációját illetve a mesh hálózat szimulációját végzik el.

Abstract

On one hand, modelling and measuring methods of radio wave propagation on microwave links of wireless mobile backbone networks is investigated in this paper. In order to do that, measurement results on rain intensity and rain attenuation was processed, since the main focus of the work is the investigation of the influence of precipitation on microwave propagation in mobile access networks and microwave ad-hoc mesh networks. The available measurement data present good opportunities for examining radio links of fifth generation ad-hoc mobile networks as they are subject to operate in the microwave domain. On the other hand, an ad-hoc mesh network is also investigated in this paper since the influence of precipitation can become critical in case of radio links of such networks. Moreover, reliability and availability of these networks in a rainy environment was also examined. My tasks require the transformation of measured data as the radio links in fifth generation networks cannot exceed a few hundred metres. 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.

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés	5
2	Technológiai áttekintés	6
2.1	Ötödik generációs mobil hálózatok	6
2.2	Hullámterjedés a milliméter hullámhosszú tartományban	7
3	A mérőrendszer.....	10
3.1	A mikrohullámú mérőrendszer felépítése	10
3.2	Automatikus erősítés szabályozás hatása	14
3.3	Meteorológiai mérések.....	15
4	Csapadék hatása a hullámterjedésre	15
5	A dolgozatban felhasznált elméleti ismeretek.....	18
5.1	Komplemens eloszlás függvény	18
5.2	Linktranszformáció	19
5.3	A korreláció és jelentősége	20
5.4	Ad-hoc mesh hálózatok modellezése.....	22
5.4.1	Eső hatásának modellezése	22
5.4.2	Node kiesési valószínűség	23
5.4.3	Esőcella modellezése	24
6	Analízis	25
6.1	A csillapítás komplemens eloszlásának vizsgálata	25
6.2	A linktranszformáció hatása.....	28
6.3	Korreláció analízis	30
6.4	Mikrohullámú ad-hoc mesh hálózat megbízhatóságának vizsgálata.....	40
6.4.1	Homogén esőeloszlás esetén.....	40
6.4.2	Inhomogén esőeloszlás esetén	46
7	Konklúzió, továbblépési lehetőségek.....	49
8	Referenciajegyzék	50

1 Bevezetés

A mobilkommunikációs rendszerekbe csatlakozó felhasználók száma nap, mint nap drasztikus növekedésen megy keresztül. Mobilelőfizetésekből már 2011-ben 6 milliárdot számolhattunk (1) így a hálózatok folyamatos fejlesztése egy minden pillanatban felmerülő feladatot jelent. A már jelenlévő felhasználók egyre növekvő igényeikkel (pl.: jobb képminőség, nagyobb adatforgalom) támasztanak követelményeket, míg az újak belépése a kapacitás növelését teszi kötelezővé.

A minőség javulásával egyre modernebb szolgáltatások érhetőek el, melyek újabb követelményeket támasztanak, ez egy öngerjesztő folyamatot eredményez. A harmadik generációs hálózatok által biztosított átviteli sebesség olyan modern szolgáltatások mindennapi használatát tette lehetővé, melyek korábban elképzelhetetlenek lettek volna (pl.: videókonferencia). Ma már a 4G is kezd teret hódítani, LTE-képes telefonok pedig tömegével kerülnek piacra (Long Term Evolution, amely még 3.9G a szabványok szerint), melyek pl.: a T-Mobile hálózatában jelenleg 106 településen használhatók hazánkban (2). Az LTE Advanced mint egy „igazi” negyedik generációs hálózat lesz a következő csúcsa a mobilkommunikációs átvitelnek, ennek elterjedésére hazánkban azonban még pár évet várni kell. Ahogy az elmúlt évtized tapasztalatai mutatják, a felhasználók szinte megkövetelik az egyre nagyobb kapacitású összeköttetéseket, így újabb frekvenciasávok használatával kényszerülünk nekik biztosítani a következő generációs (5G) átvitelt. Ezen fejlődés jelenleg ott tart, hogy a bázisállomások között már milliméter nagyságrendű hullámhosszon fogjuk az adatokat továbbítani, ezzel a többtíz gigahertzes frekvenciasávba lépve. A 3G/4G ellátóhálózatokban már szerepet kapott ezen frekvenciasáv használata, 5G esetében azonban a hozzáférési hálózat is itt fog működni (3).

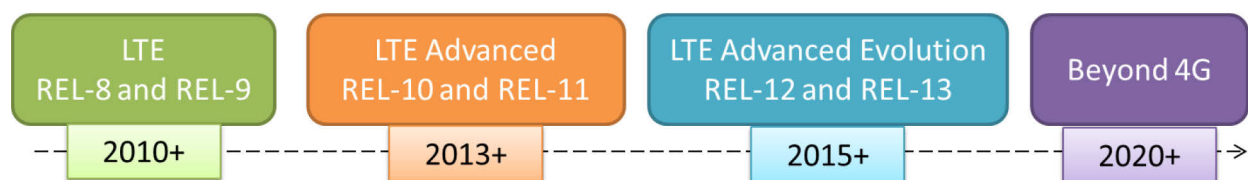
Egy ötödik generációs hálózat tervezési kérdései azonban az ezen hullámhosszon való kevés mérési eredmények okán még nyitottak. Új csillapító tényező például a korábban használt frekvenciasávhoz képest a csapadék, melynek hatása az 5G rendszerek rövid összeköttetéseinek egyelőre részben tisztázatlan, a dolgozatomban így a legnagyobb hangsúlyt az esőcsillapítás vizsgálatára fektettem. Először valós mérési eredményekből fogok rámutatni a csapadék

intuícióval szemben nem elhanyagolható csillapítására, majd esőcella modellezéssel, szimulációkkal 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 (3). Az egyre szigorúbb követelményeknek való megfelelés és a számítástechnika fejlődése így vészesen előrevetíti, hogy 2020 körül már új technológiára lesz szükség az egyre növekvő igények 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 (4) (1. ábra).



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

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 (CoMP – Coordinated Multi-point, Massive MIMO), 30-90GHz között azonban a hatékonyság tetemes növekedése a spektrumban jelenlévő kihasználatlan, akár több gigahertzes folyamatos sávokból adódik. Ezen sávblokkok továbbá azt is lehetővé teszik, hogy egy alacsonyabb szintű modulációs

eljárás – amely kisebb teljesítményt követel meg, így olcsóbb – is magas adatforgalmat tud biztosítani. További pozitívum, hogy mivel egyre nagyobb frekvencián az antennák méretei egyre kisebbek, így olyan többelemes antennasorok is megvalósíthatóvá válnak, melyek a nyalábformálás következtében az ezen frekvencián megjelenő járulékos terjedési csillapításokat kompenzálni tudják (5).

Nem véletlen, hogy a milliméter hullámhossz iránti érdeklődés a fent említettek miatt jelentős növekedésen ment keresztül az utóbbi években (Samsung, Nokia Solution Networks), jelen pillanatban azonban a legnagyobb kihívást a milliméter hullámhosszon működő megfelelő csatornamodellek teljes 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, lásd 5.4.1 fejezet) ismeretének híján vagyunk. Azt, azonban érdemes 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 kisebbé is, hiszen a magas szabadtéri terjedési csillapítás miatt értelmetlen lenne több kilométeres összeköttetéseket vizsgálni.

2.2 Hullámterjedés a milliméter hullámhosszú tartományban

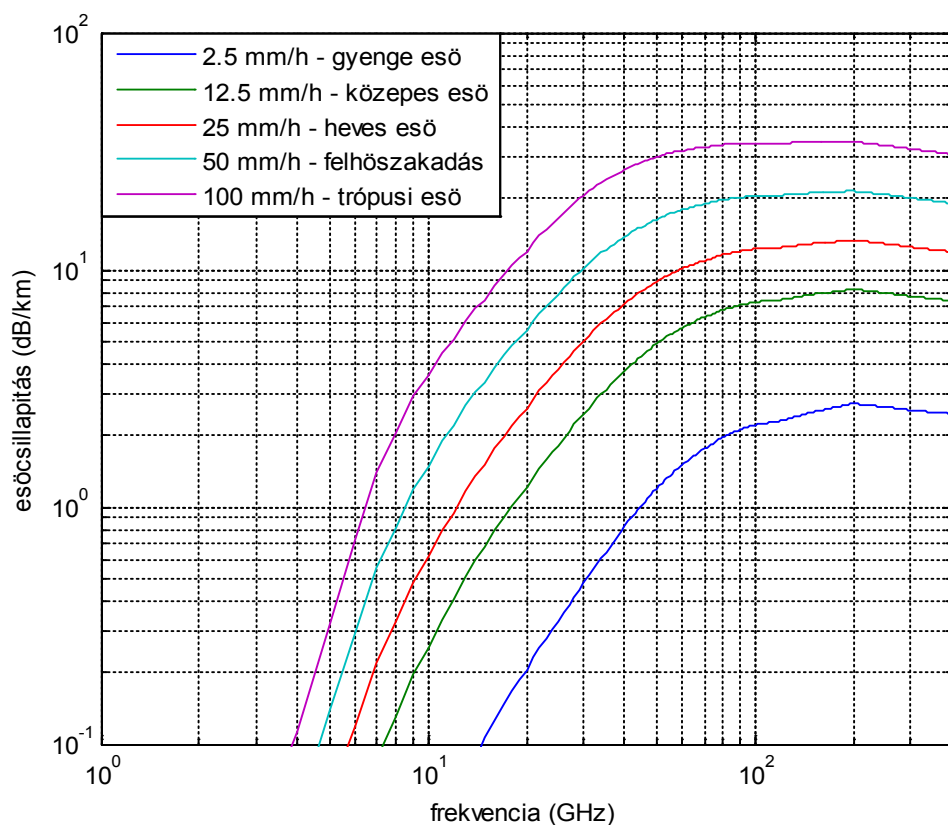
A alapvető terjedési tulajdonságok módosulása következtében nem lehet kizárólag a korábbi 3G/4G tervezési modellekre támaszkodni. Például az esőcsillapítás esetében – mint látni fogjuk – hibás lehet az ismert dB/km értékeket pusztán leosztani pár száz méteres összeköttetések vizsgálata esetén (ad-hoc 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 (3).

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) (3).

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) (6) értékével jellemzik, melynek értéke lehet nagyon kicsi (pl.: 0.2dB), ha éppen a mellékutakon és 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 (3). A később bemutatott szimulációknál a LoS esetben kapott, 2.55 átlag értéket használtam.

A (3) méréseiből következtetve kijelenthetjük, hogy milliméter hullámhossz használata mellett 200 méternél hosszabb összeköttetést nem érdemes tervezni városi környezetre.

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 2. 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 az eső okozta kb. 1.5 dB-es csillapítás elhanyagolhatónak számítana az ITU görbék alapján, azonban a mérési eredmények azt igazolták, hogy bizonyos esetekben ez az érték jóval nagyobb lehet és tényleg okozhat megszakadást, ezért ezekre az esetekre fel kell készülni a rendszer tervezésekor. A dolgozatomban későbbi fejezetében mérési eredményekkel igazolom ezt.



2.ábra: Esőintenzitás a frekvencia függvényében (7) – 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 4. 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 lámpaoszlopokra 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 kapacitásnövekedés várható (8), melyet egyaránt a teljesítmény, a használt spektrum és bázisállomások számának többszöröse fogja eredményezni. A (3) alapján kapott limit miatt a később bemutatott *linktranszformáció* alappillére a dolgozatnak, hogy az eső hatását akár 50-250 méteres cellasugár mellett is megfigyelhessük a milliméteres hullámhossztartományban. Ezek után ugyanezt a vizsgálatot egy általam Matlabban írt szimulátor segítségével is elvégzem: több száz véletlenszerűen generált hálózat esetén figyelem meg, hogy egy eső modell milyen hatást fejt ki az ilyen hosszúságú összeköttetésekre.

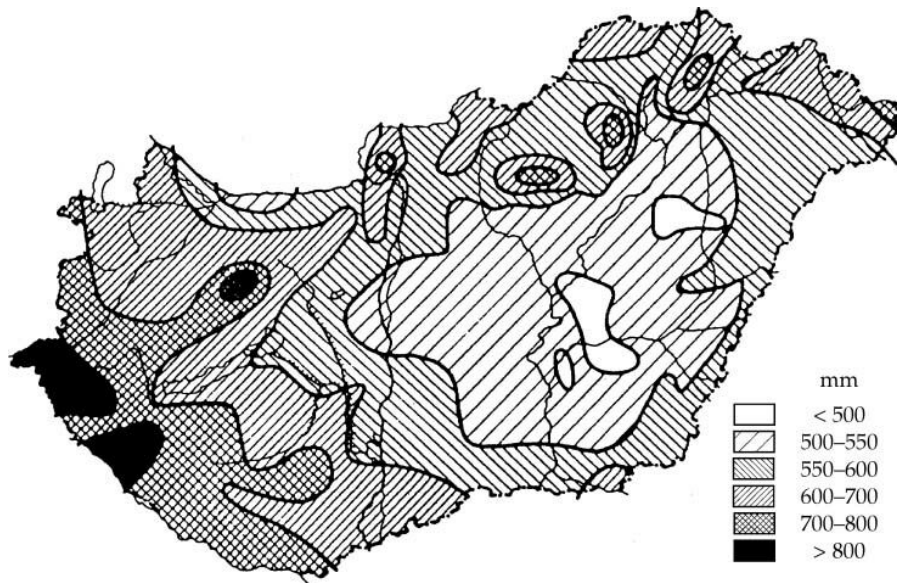
Érdeemes megjegyezni, hogy 5G-ben maga a cella fogalma már nem igazán létezik, a pártíz méteres nagyságrend miatt inkább egy mesh látszik kialakulni – dolgozatomban a könnyebb érthetőség miatt azonban cellát fogok említeni.

3 A mérőrendszer

3.1 A mikrohullámú mérőrendszer felépítése

Az esőcsillapítás jelenségét 1997-től kezdték el mélyrehatóbban vizsgálni, amikor a norvég Telenor Mobilnet, az ír Esat Digifone, az itthoni Pannon GSM (ma már Telenor Hungary) és a BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan tanszéke megalapították a nemzetközi Millimetre wave Propagation, azaz a MilliProp projektet. Különböző földrajzi és változatos csapadék intenzitású területeken alakítottak ki összeköttetéseket, melyek másodpercenként gyűjtötték a vételi jelszinteket és különféle meteorológiai adatokat, mint pl.: szélirány, szélesebesség, hőmérséklet stb.

A vizsgálatra Magyarország számos településén került sor (a külföldi szolgáltatók támogatóként vettek részt a projektben): Szegeden, Miskolcon, Győrben, Józsán, Budafokon, Pécsen és Budapesten. Az összeköttetések száma négy és hét között mozgott, minden esetben csillagtopológiát követve, kialakításuknál pedig a lehető legváltozatosabb jellemzőkre törekedtek: a távolságok 300 méter és 30 kilométer között váltakoztak, a linkek azimutjai is különböztek és az emelkedési szög sem volt azonos. Továbbá különbözött a használt frekvencia (13GHz, 15GHz, 23GHz, 38GHz (9)), illetve egyszer vertikális, egyszer horizontális polarizációt használtak. A települések kiválasztásánál a változatosság a földrajzi adottságokban rejlett: közel sík és hegyes-völgyes területeken történtek a vizsgálatok, illetve – mint a legmeghatározóbb paraméter – az esőintenzitás figyelembe vétele alapvető volt, hogy az ország legszárazabb területétől a legcsapadékosabbig legyen mérési eredmény. A 3. ábra mutatja Magyarországon az átlagos évi csapadékösszeget.



3.ábra: Átlagos évi csapadékösszeg Magyarországon (10)

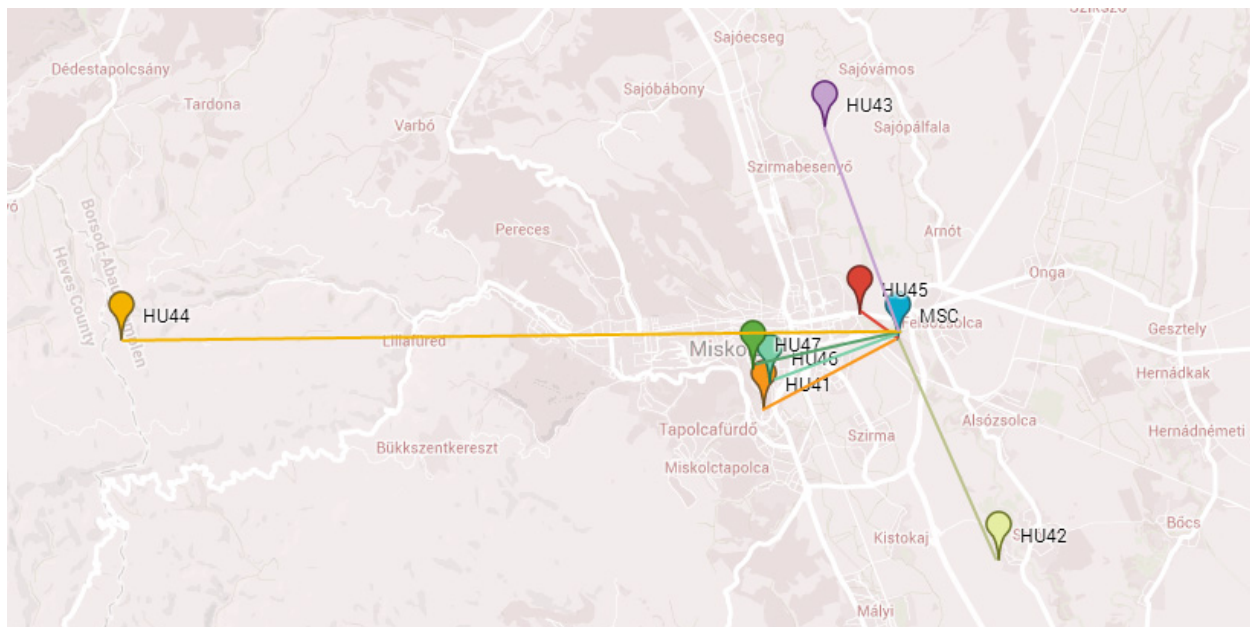
Az adatok feldolgozásánál részletesebben a miskolci adatsorokkal dolgoztam, így ennek linkjeit és azok jellemzőit a következő táblázat mutatja:

Link kód	Vizsgált mikrohullámú összeköttetés	Frekvencia (GHz)	Polarizáció	Távolság (km)	Azimut (fok)
HU41	Miskolc MSC 2 - Miskolc Avaz Szt. György	23	H	5,07	241,60
HU42	Miskolc MSC 2 - Sajópetri	23	V	8,11	153,90
HU43	Miskolc MSC 2 - Szirmabesenyő	23	V	7,42	339,50
HU44	Miskolc MSC 2 - Bánkút	13	V	26,00	268,80
HU45	Miskolc MSC 2 - Miskolc Vízmű	38	V	1,52	302,60
HU46	Miskolc MSC 2 - Miskolc Középszer	23	H	4,54	249,89
HU47	Miskolc MSC 2 - Miskolc Jósika	23	H	4,93	257,12

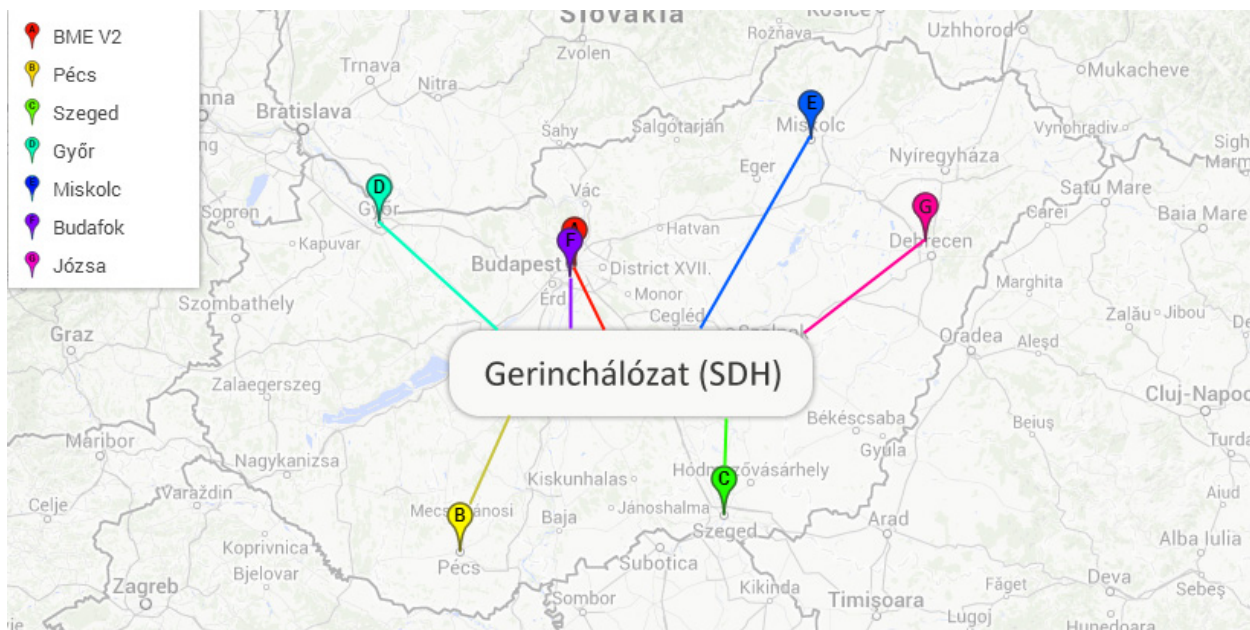
1. táblázat: A Miskolcon elhelyezett mérőrendszer és az összeköttetések jellemzői

A MilliProp központi számítógépe a BME V2 épületének hetedik emeletén volt, mely 1997-től gyűjtötte és tárolta az adatokat (jelenleg nem üzemel, de tervben van újra üzembe helyezése), de ezen kívül azok feldolgozására egy interfészt is biztosított a felhasználóknak. Ide kellett biztonságosan eljuttatni azt a hatalmas adathalmazt, melyek a különböző településeken felállított mérőrendszerekből érkeztek. A magyarországi MilliProp partner az akkor még Pannon GSM néven ismert Telenor mobil szolgáltató volt, mely a következő módon oldotta meg az átviteli hálózat kialakítását. Az egyes településeken a mérőrendszerekből kapott adatokat először a – csillag topológiából adódó – csomópontban elhelyezkedő MSC-nek (Mobil Switching Center) kellett elküldeni, ez volt a *hozzáférési hálózat*, mely esetében mikrohullámú PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) összeköttetéseket használtak. A második lépésben az MSC-k a mérőrendszerekből begyűjtött adatokat a BME tetején található központi számítógépnek kellett elküldeniük, ez volt a *gerinchálózat*. Mivel a gerinchálózaton nagy távolságokon hatalmas mennyiségű adatok biztonságos átvitele volt a cél, így itt SDH (Synchronous Digital Hierarchy) összeköttetésekhez fordultak, tehát optikai linkeken továbbították a mért adatokat.

A mérési eredményeket a Telenor is megkapta statisztikai analízisre, illetve a MilliProp program külföldi partnereinek is elküldték azokat interneten keresztül. A 4. ábra mutatja a miskolci hozzáférési hálózat topológiáját, a 5. ábra pedig az országban felállított mérőrendszerek elhelyezkedését Google Maps használatával.



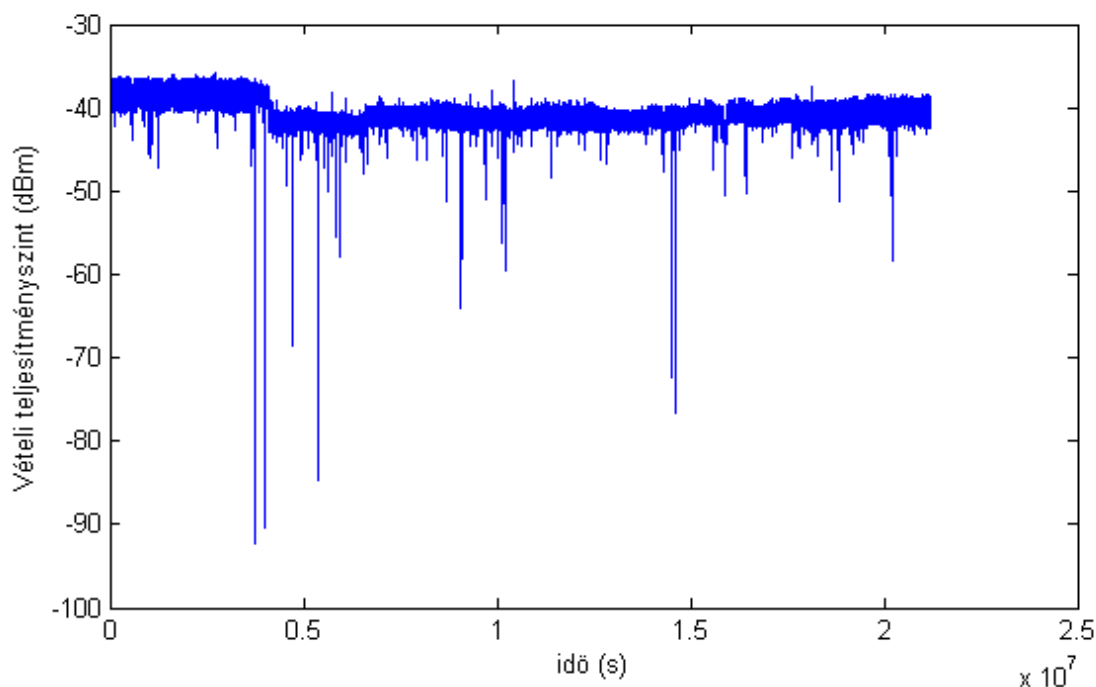
4.ábra: A miskolci hozzáférési hálózat topológiája (Google Maps)



5.ábra: A Telenor Magyarországi gerinchálózata a MilliProp projektben (Google Maps)

3.2 Automatikus erősítés szabályozás hatása

A központi számítógép által begyűjtött adatok feldolgozása korántsem egyszerű feladat. A vételi jelszinteket leíró analóg AGC (Automatic Gain Control) feszültségértékek számos esetben adhatnak értelmetlen, vagy értelmesnek tűnő, de hibás értékeket. Az AGC érzékeny működése, illetve a ritka ellenőrzés miatt előfordulhat, hogy egy-egy berendezés hónapokig helytelen adatokat küld a rendszernek. Az értelmetlen adatok esetében arra kell gondolni, hogy hosszú időn keresztül teljesen azonos, például -100dBm-s jelszintet veszünk, míg értelmes, de hibás adatok esetében az látható, hogy az átlag jelszint adott időn belül egy fix értékkel eltolódik. Az utóbbi hibákat „ránézésre” fel lehet ismerni, és a kijelölt adathalmaz egyszeri módosításával (az összes jelszint érték adott eltolásával) javítani lehet egyes esetekben. Az 6.ábra kiválóan mutatja ezt a jelenséget, illetve azt is, hogy javítása csak egy megfelelő érték eltolásával megoldható, amely egyszerűen lehet például a két szakasz mediánjának különbsége.



6.ábra: Javítható AGC hiba a vételi jelszint adatsorában

Az AGC meghibásodásán kívül külső tényezők is előidézhettek hibás jelszinteket. Az antennák lejegesedése szintén hosszabb tartamú értelmetlen adatsort eredményezhet, de például egy nagyobb szélleökés vagy a vevőantenna előtt egy áthaladó személy is másodpercekre drasztikus

csökkenést okozhat a vételben. Egy ilyen rövid csillapító hatás elsőre esőeseménynek tűnhet, azonban némi utánajárás segítségével könnyen kiszűrhetők, optimális megoldása pedig az esemény körüli helyes adatok mediánjával helyettesíteni az adott időtartamra az adatsort.

A vételi teljesítményszinteket az AGC feszültségértékekből egy kalibrációs táblázat segítségével lehet visszaszámolni.

3.3 Meteorológiai mérések

Érdemes megemlíteni, hogy a csillapítás értékek másodpercenként kerültek rögzítésre, a rendszer azonban számos más meteorológiai jellemzőt is – mint esőintenzitás, szélirány, hőmérséklet, relatív páratartalom stb – is mért, ezekből percenként vett mintát. A meteorológiai állomások a mérőlinkek végpontjainál vannak telepítve.

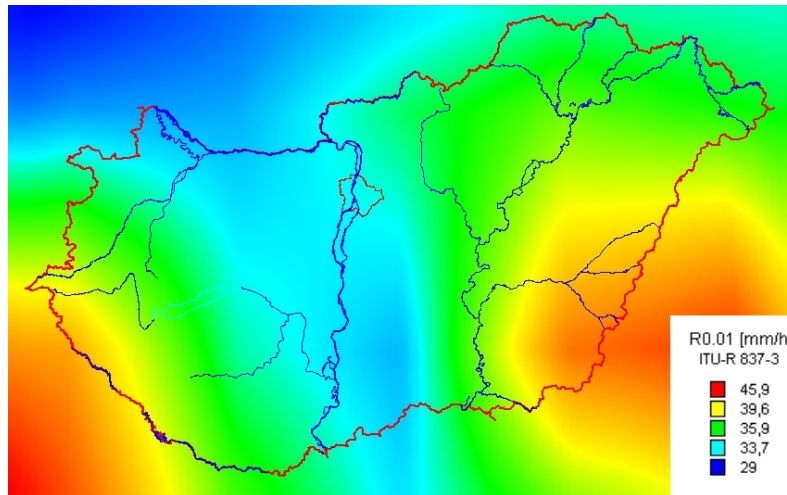
4 Csapadék hatása a hullámterjedésre

A frekvencia növekedésével 10GHz 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 esőcseppen 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 (11). 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 (11).

Természetesen másfajta légköri gázok is csillapítják a rádióhullámokat, azonban magából a csillapításból előnyt is lehet kovácsolni. Az oxigénnek 60 GHz környékén van abszorpciós csillapításcsúcsa, 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. Érdekes kitérni a diffrakció és refrakció kérdésére is: ezen a frekvenciatartományon már alig mérhető a jel elhajlása, így nagyrészt LOS (line-of-sight) terjedés szükséges ezekhez a linkekhez, a refrakciós és refrakciós jelenségek azonban ebben a tartományban is jelen vannak, bővebben erről a (12)-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 tartalékokat vinni a rendszerbe. Ennek megválaszolásához arra van szükségünk, hogy egy összeköttetés meghatározott eső okozta csillapításának valószínűségét valamilyen matematikai modell alapján egyszerű csillapítás értékké alakítsuk.

Ehhez az alapvető fontosságú *esőintenzitás* paraméter ismeretére van szükségünk. Az ITU-R (International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector) az éves esőintenzitás komplementis eloszlás függvény egy pontjával jellemez egy adott területet esőzés szempontjából. Ez az az esőintenzitás érték, amit az idő 0.01%-ban halad meg az esőintenzitás, jelölése pedig $R_{0.01}$. Mivel ez egy időben rendkívül változékony érték, így a Föld egy adott pontján ennek jól közelítő kiszámításához több éves vagy évtizedes mérés szükséges, sőt a globális klímaváltozás miatt ez sem fog mindig kielégítő eredményt adni (az OMSZ szerint a hazánkban előforduló esős napok száma csökkenő tendenciát mutat (13)), így a keresendő matematikai modellben nem folyamodhatunk saját mérési eredményeinkhez, ha nincs az adott környezetről megfelelő mennyiségű adatunk.



7.ábra: Esőintenzitás ($R_{0.01}$) eloszlása hazákban az ITU-R 837-3 ajánlása alapján (14)

Mérési eredmények hiányában az ITU (International Telecommunication Union) ajánlásai azonban megfelelőek lehetnek. Az esőcsillapítással foglalkozó ajánlás a Földön mérhető esőintenzitás értékeit zónákra osztva adja meg, mely esetében Magyarországot a K-zónába ($R_{0.01}=42\text{mm/h}$), illetve a szlovák határnál a H-zónába sorolják ($R_{0.01}=32\text{mm/h}$) (14). Maga az esőcsillapítás ezen érték ismeretében már számolható a következő összefüggéssel:

$$A^{[dB]} = \int_L k * R^\alpha(l) dl ,$$

ahol k és α frekvencia- és polarizációfüggő empirikus paraméterek, melyekre az ITU ad ajánlást, L az összeköttetés hossza és R az esőintenzitás (a 2. ábrán lévő görbéket ezzel az összefüggéssel tudjuk regenerálni). A jelentőséggel bíró érték az $A_{0.01}$ [dB] – tehát az év 0.01%-ban mérhető csillapításnál nagyobb csillapítás valószínűsége – esetén az integrálás elhagyható, mivel az ITU ajánlást ad ezen érték kiszámítására (15):

$$A_{0.01}^{[dB]} = k * R_{0.01}^\alpha * d * r$$

A k és α frekvencia- és polarizációfüggő empirikus paraméter, melyre az ITU ad ajánlást (16), d (km) az összeköttetés hossza, r pedig a redukáló faktor (ez lesz használatos a hipotetikus linkekre való transzformációnál). Ezen ajánlások egy összeköttetés tervezése esetén hasznos segítséget nyújthatnak a megfelelő fading tartalék kiszámításában. A 7.ábra mutatja az $R_{0.01}$ érték eloszlását hazákban az ITU-R 837-3 alapján. Ahogy fentebb már írtam a MilliProp projekt

1997 óta gyűjti ezeket az adatokat, így azok feldolgozásánál a saját eredmények felhasználása lehetségessé vált.

5 A dolgozatban felhasznált elméleti ismeretek

5.1 Komplement eloszlás függvény

A statisztikai feldolgozás első lépésében a kapott – és már korábban javításra került – AGC feszültségértékekből visszszámolt vételi teljesítményszint értékekből nyerhetünk ki hasznos információt. Ebből fogunk csillapítást számolni, azonban fontos, hogy a légköri szcintillációból adódó szórást csökkentsük, így ezen jelsorokra egy 20 másodperces mozgó átlagszűrő alkalmazása ajánlott. A 20 másodperces ablakozás az ITU ajánlásából következik (17) és egy olyan aluláteresztő szűrőnek felel meg, melynek 3dB-es törésponti frekvenciája 0.02 Hz-nél van.

A csillapítás meghatározásához újból az ITU ajánlásaihoz kell fordulnunk: az időfüggvény valamennyi értékét eltoljuk a *havi mediánnal*, így a kapott csillapítás időfüggvény havi mediánja a 0dB-es pont lesz. Azonban felmerülhet a kérdés, hogy miért nem az éves medián értéket használtuk, vagy esetleg az egyes esőesemények környezetében azok mediánjait? A válasz erre az, hogy a csapadékban szélsőséges hónapok eltérő mediánt adhatnak az éves értéktől, így például egy száraz márciusi hónap esetében a csillapításba való „eltolásakor” egy 1 dB körüli többletcsillapítás is megjelenik. Ezt a fajta – havi mediánnal való – számolást egyébként az ITU ajánlja, így más kutatási eredményekkel is összevethetővé válik a mérés.

A csillapítás időfüggvényéből ezek után a komplement eloszlás függvényt számítjuk ki, mely annak a valószínűségét adja meg, hogy a csillapítás meghalad egy adott A_i értéket.

$$F(A_i) = P(A > A_i)$$

Ezt a görbét már érdemes lehet egy éves adatsorra meghatározni, a jelentőséggel bíró adat pedig – akárcsak az esőintenzitás esetében – az $A_{0.01}$ értéke. Jóllehet a komplement eloszlás függvény hasznos információhoz juttat minket, az eső egy jellegzetes tulajdonsága miatt nem vonhatunk le messzemenő következtetéseket belőle. Egy esőcella a szélsőbességtől függően

lépésekben éri el a vizsgált összeköttetést, így hatása legtöbbször nem észlelhető a teljes hosszon. Ráadásul – ahogy korábban már említésre került – a linkeket szándékosan a lehető legváltozatosabb földrajzi és esőintenzitású helyeken állította fel a MilliProp, melynek elsődleges célja az volt, hogy különböző esőesemények alapján korrelációt találjanak az összeköttetések rendelkezésére állásának idejében és ezek segítségével prediktív védekezési stratégiát fejlesszenek ki az eső ellen. A kapott eredmények így csupán meghatározott távolságú, frekvenciájú, esőintenzitású stb. összeköttetésekre vonatkoztak, ezért következő feladat ezen jellemző paraméterek eliminálása volt.

5.2 Linktranszformáció

A linktranszormáció fontos eszköz a mérési eredményekből képzett rövidebb, nem valós linkek vizsgálatához. Ennek segítségével tudjuk megvizsgálni, hogy egy rövidebb, pár száz méteres összeköttetésen hogyan fejthette ki hatását az eső, ha a mérési adatok segítségével tisztában vagyunk azzal, hogy egy pár kilométeres linkkel pontosan mi történt.

Az alapvető kérdés azonban az, hogy mekkora távolságú összeköttetésre érdemes letranszformálni az eredeti linket, ugyanis minimalizálni kell annak hatását, hogy az esőcella egy ideig nem fejti ki hatását a teljes hosszon. Ennek eredményeképpen én a 50250 méteres távolság tartományt választottam, mely érték a (3) cikkben van meghatározva. A referencia linkem további jellemzőit a következő fejezet részletesebben tárgyalja. A hipotetikus linkre való transzformáció végrehajtásához a következő képletekre van szükség:

$$r = \frac{1}{0.477 * d^{0.633} * R_{0.01}^{0.073 * \alpha} * f^{0.123} - 10.579 * (1 - e^{-0.024 * d})}$$

Az α frekvencia- és polarizációfüggő empirikus paraméter, melyre az ITU ad ajánlást (16), míg d (km) az eredeti összeköttetés hossza, f (GHz) pedig az eredetileg használt frekvencia. Így magát az esőintenzitás értékét, $R_{0.01}$ -et és r -et, a redukáló tényezőt kell meghatároznunk. Ezen és a korábban mutatott redukáló faktort tartalmazó – $A_{0.01}$ -re kapott – összefüggés segítségével már numerikusan kiszámolható $R_{0.01}$, majd ezt az értéket visszahelyettesítve meghatározható a redukáló faktor is. Ezek után ugyanezt el kell végeznünk a hipotetikus link paramétereire is,

azonban elegendő egy behelyettesítés is, hiszen $R_{0.01}$ -et már ismerjük, így a hipotetikus redukáló faktor is meghatározásra kerülhet. Az eredeti időfüggvény csillapítás értékeit így a következő összefüggés segítségével könnyen átranzformálhatjuk a hipotetikus összeköttetés csillapítás értékeire.

$$A_h = k_h * \left[\frac{A_r}{k_r * d_r * r_r} \right]^{\frac{\alpha_h}{\alpha_r}} * d_h * r_h$$

A képletben a valódi és hipotetikus paraméterek alsó indexszel vannak egymástól megkülönböztetve, az r (real) a valódi, a h (hypotetical) a hipotetikus link paramétereit jelölik. Érdemes megemlíteni, hogy az ITU a fent alkalmazott képletek esetében a redukáló faktorra egy maximális értéket is előír ($r = 2.5$), melynek meghaladásakor annak használata ajánlott.

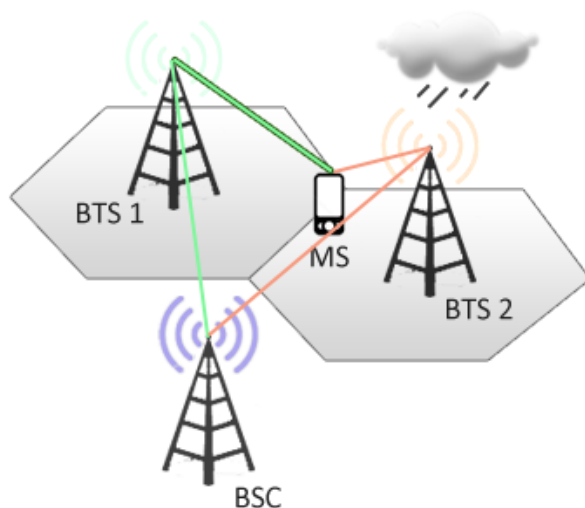
A vételi jelszint időfüggvényétől tehát egy tetszőlegesen kiválasztott hipotetikus link komplementis eloszlás függvényéig jutottunk. Azonban jelentőséggel bíró korreláció-analízis, vagyis több összeköttetés egyidejű vizsgálata fog nekünk stratégiaileg is fontos eredményekhez vezetni.

5.3 A korreláció és jelentősége

Noha a feldolgozott adatoknak önmagukban is van jelentőségük, az egymás közötti korreláció ad igazán fontos eredményeket. Egy összeköttetés feldolgozott eredményei azért lehetnek különösen fontosak, mivel a MilliProp csillagtopológiában helyezte el a mérőállomásokat valamennyi településen, így vizsgálható, hogy egymás közelében lévő, de különböző belső (frekvencia, polarizáció) és külső (azimut, emelkedési szög, távolság) paraméterekkel rendelkező linkek milyen korrelációt mutatnak. A korreláció ismeretével így megjósolható, hogy az eső miatt egy adott linken mért nagymértékű fading hatása mikor és melyik másik linkeken fog megjelenni, így preventív módon előretervezhetünk a fading tartalék méretezésére.

Szemléletes példa erre az átadásra (hand-over) való előre felkészülés. Cellás rendszerek esetén a mobil állomás (Mobile Station, MS) folyamatosan figyeli, hogy milyen jelerősséggel jut el hozzá az információ, átadás pedig akkor történik, ha ez egy küszöbérték alá esik. A további

adatokat innentől a szomszédos cella bázisállomásától kapja meg. Azonban egy adott bázisállomás élő linkjein végbemenő kommunikációit egy hirtelen megjelenő, vagy gyorsan mozgó esőcella könnyedén tönkretelheti, így a rendszer nem lesz képes jelezni az átadási szándékot azon mobilállomásoknak, melyeket az érintett bázisállomás szolgáltat ki. A preventív átadási kérelem azonban a korreláció ismeretével még az eső hatása előtt elküldésre kerülhet, így a mobilállomásokat egy kevésbé érintett bázisállomás szolgálhatja ki, amíg az esőcella komoly fading hatást okozhat az átadás előtt élő linkeken (8. ábra).



8.ábra: A narancs színnel jelölt BTS 2 felé érkező eső miatt a vezérlés preventív módon kerül átadásra a BTS 1-nek. Amíg a rendszer azt érzékeli, hogy a BTS 2 nem tudna megfelelő minőségű összeköttetést biztosítani, a vezérlés a BTS 1-nél marad

Érdemes azt is megemlíteni, hogy az állomások rengeteg alkalommal mértek hibás, értelmetlen jelszinteket, így ritka volt, hogy az egy csillagban lévő összeköttetések ugyanazon időtartamokon értelmes adatokat mértek. Így az általam vizsgált 2007-es miskolci hozzáférési hálózatban csupán négy linkre (HU41, HU43, HU45, HU46) tudtam az analízist elvégezni, azonban a korreláció jól megfigyelhető volt ezeken is (lásd később).

A korrelációt a jól ismert képlettel a csillapítás időfüggvényei között, egyrészt egyes esőesemények, másrészt több eső eseményt magába foglaló (hosszabb) időintervallumra is megállapítottam (18):

$$\rho_{X,Y} = \text{corr}(X,Y) = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y}$$

A csak esőesemények közötti korreláció számítása a rövidtávú együttmozgás megfigyelése miatt alapvető fontosságú, míg a hosszú távú vizsgálat esetén a linkek egymással bezárt szöge is információhoz juttat minket a korreláció kérdésében.

A korrelációt mindig ugyanazon referencialinkkel végeztem el, illetve a görbéket a referencialink autokorrelációjához normáltam.

5.4 Ad-hoc mesh hálózatok modellezése

5.4.1 Eső hatásának modellezése

Az előzőekben tárgyalt komplementis eloszlás függvény és a 2. fejezetben bemutatott elméleti alapok kapcsán 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 (19):

$$PL [dB] = 20 * \log_{10} \frac{4\pi d}{\lambda}$$

Ismert, hogy szabadtérben a PLE értéke 2, tehát ha ezt kiemeljük, akkor kapunk egy általánosított összefüggést (a PLE a konvencionális jelölés miatt n-ként szerepel):

$$PL [dB] = 10 * n * \log_{10} \frac{4\pi d}{\lambda}$$

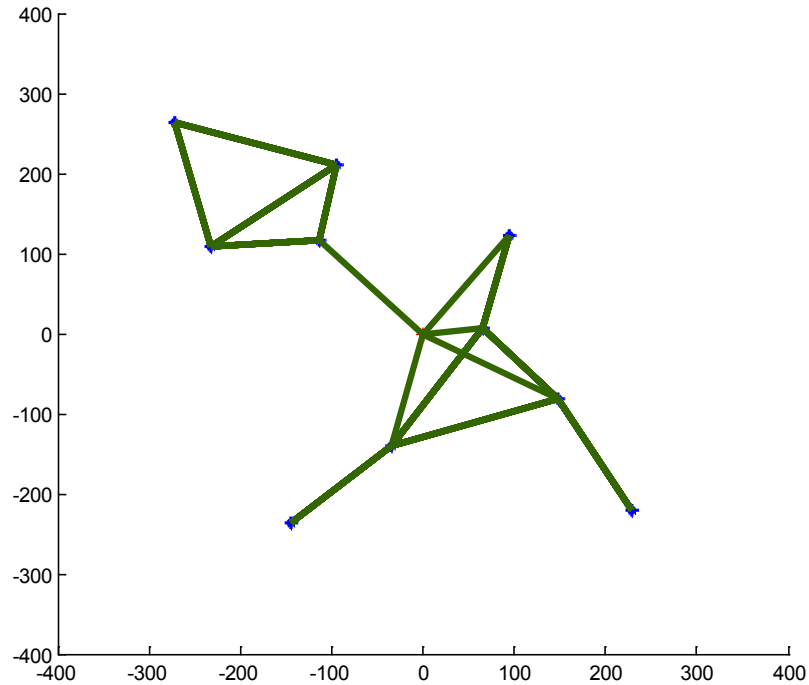
Egy tetszőleges hosszúságú linken az eső, a már korábban tárgyalt $A^{[dB]} = \int_L k * R^\alpha(l)dl$ összefüggéssel kiszámolható csillapítást okoz. Azt is tudjuk, hogy $d_{max}=200$ méter a megengedett maximális linktávolság, így egy adott $d < 200m$ hosszúságú link esetében meg tudjuk mondani, hogy 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.

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

5.4.2 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 állomásokat érnek el 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 következő 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 (6.4.1. fejezet 29. ábra). Ezzel egyetemben az is ismertté válik, hogy milyen valószínűséggel esik ki 1,2,3... bázisállomás a hálózathoz – ez fogja mutatni a kiesési valószínűséget.



Az ábra egy véletlenszerűen generált hálózatot és a közöttük jelenlévő összeköttetéseket illusztrálja $d_{\max}=200$ m feltételt figyelembe véve

5.4.3 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 szükségünk van arra, hogy egy adott esőcella közepétől (ahol feltételezve a legnagyobb az esőintenzitás) tetszőleges távolságra milyen esőintenzitás figyelhető meg. Ezt a következő összefüggés határozza meg (20):

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

D a cella átmérője km-ben, R az esőintenzitás mm/h-ban, míg α és β empirikusan meghatározott paraméterek, ahol $\alpha = 12.43$ és $\beta = -0.553$ (20). A 33.ábrán (6.4.2. fejezet) pontosan látható, hogy ez az átmérő hogyan változik az R függvényében.

A bázisállomások kiesésének vizsgálatát mind homogén és inhomogén esőintenzitást feltételezve is elvégeztem, utóbbi esetben egy Gaussi esőcellát szimulálva, melyhez a következő összefüggést használtam fel:

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

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.

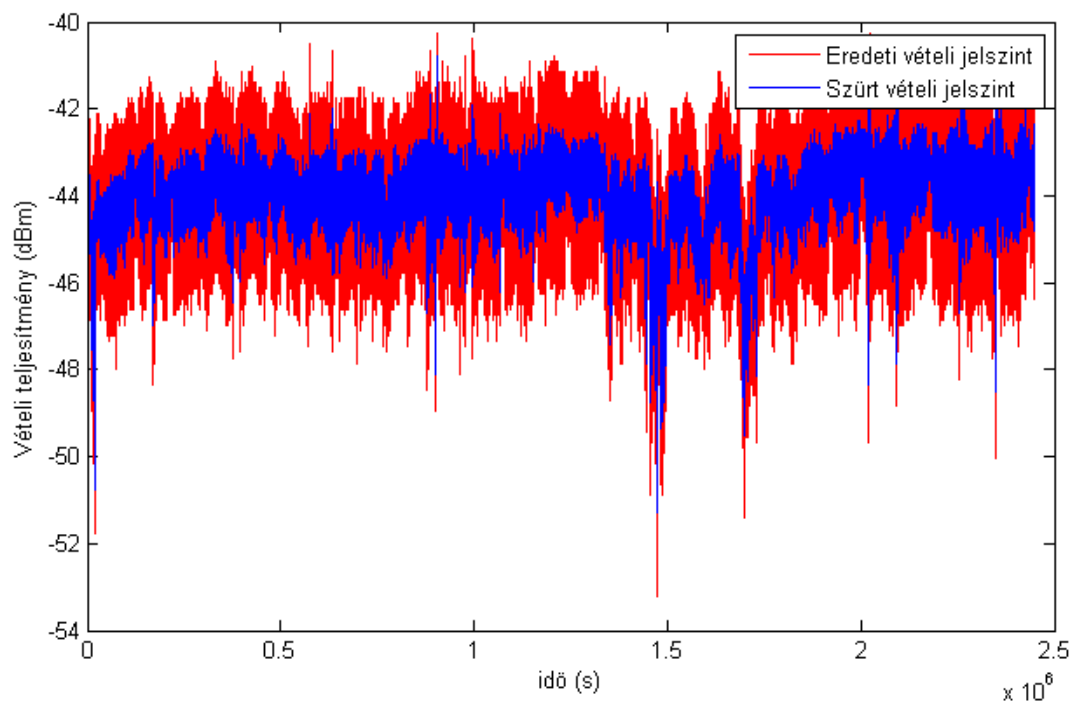
6 Analízis

Az analízist MATLAB környezetben végeztem el, legtöbbször saját függvényeket használtam, mely alól kivételt a beépített *xcorr* keresztkorrelációt számító, az *fminunc* minimumkereső és az *interp1* interpoláláshoz használatos függvény tesztek (természetesen további függvényeket is használtam, de ezek túlságosan általánosak a megemlítéshez, pl.: `max()`).

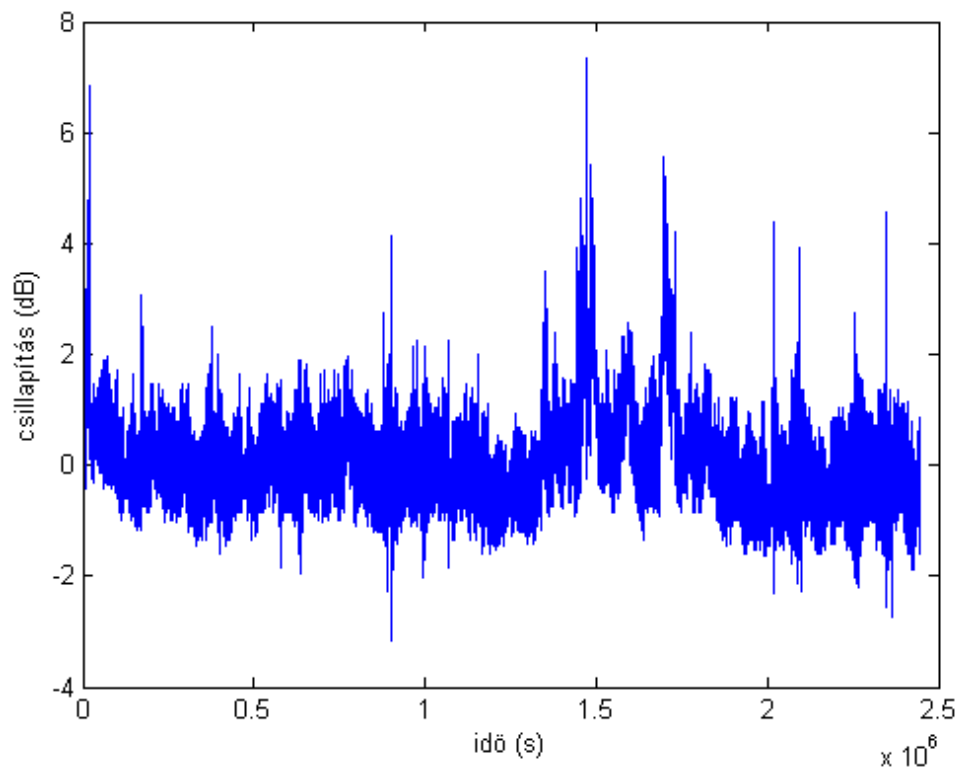
6.1 A csillapítás komplemens eloszlásának vizsgálata

Az analízisre a hét összeköttetésből álló miskolci csillaghálózat 2007-ben mért adatait használtam – a linkek jellemző paramétereit az 1. táblázat tartalmazza. Először a kapott vételi jelszint időfüggvények ablakozására került sor, melynek egy tetszőlegesen választott hónapra a 9. ábrán figyelhető meg. Az eredeti jelszint piros színnel, míg a szcintillációból adódó szórás csökkentésére alkalmazott ablakozott idősor kékkel van jelölve.

A már fent említett ITU ajánlás szerint alkalmazott módszerrel a vételi jelszint idősorból csillapítás idősort generáltam, melynek eredményét a 10. ábra mutatja.



9.ábra: Vételi jelszint időszora (piros), illetve ablakozott idősor (kék) (HU43, 2007. Március)



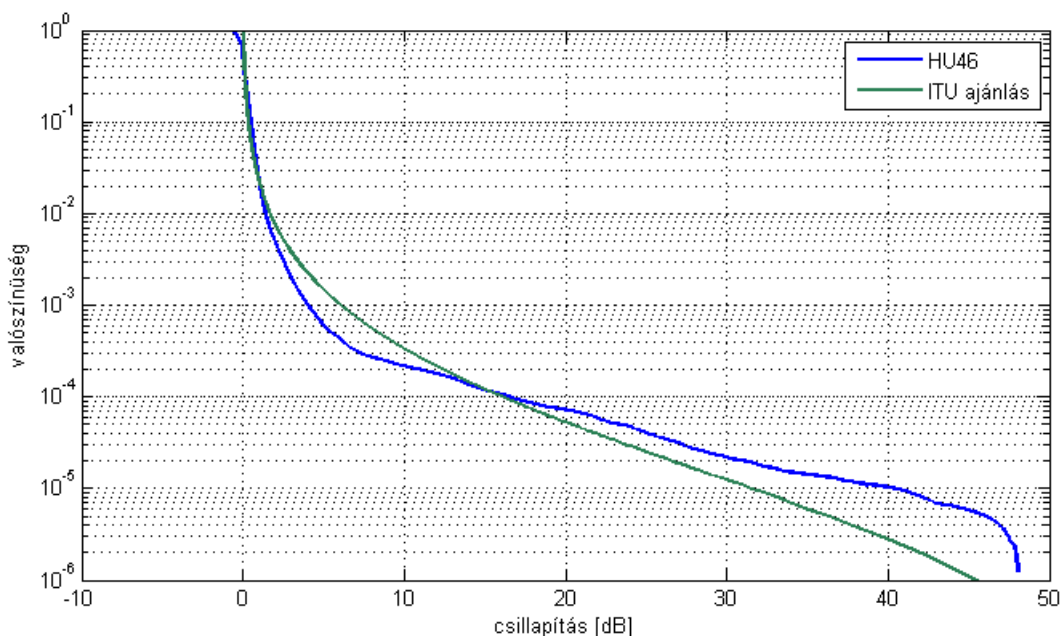
10.ábra: Ablakozott vételi jelszintből meghatározott csillapítás időfüggvény (HU43, 2007. március)

A használt linkek éves csillapítás időfüggvényeiből kinyerhetők az éves komplement eloszlás függvények. A 11. ábrán a HU46-as miskolci összeköttetés 2007. évi mérési eredményeiből számolt eloszlás függvény látható, melynél ehhez az $A_{0.01}$ értékhez 16.5 dB-es csillapítás tartozik, tehát az év valamennyi pillanatában 0.01% a valószínűsége annak, hogy 16.5 dB-nél nagyobb esőcsillapítás mérhető. Zöld színű görbével jelöltem az ITU ajánlást is, melyet a (16) alapján számoltam ki (ez a görbe kizárólag az eredeti $A_{0.01}$ értéktől és a frekvenciától függ).

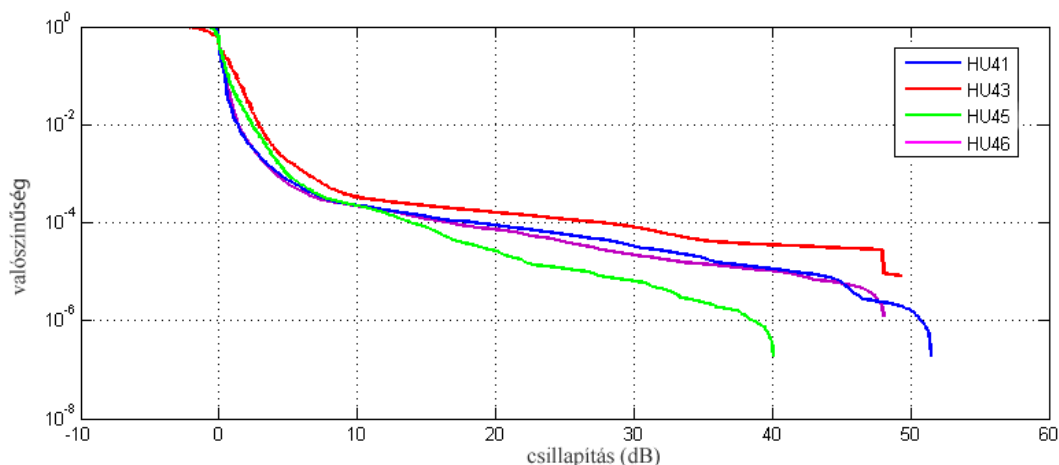
$$\frac{A_p}{A_{0.01}} = C_1 * p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)}$$

A C_1 , C_2 , C_3 kizárólagosan frekvenciafüggő paraméterek, meghatározásukról bővebben a (16)-ban olvasható.

A 12. ábrán a négy vizsgált link komplement eloszlás függvénye együtt jelenik meg. Jól látszik, hogy 10^{-2} valószínűségig nagyjából rásimul a mért görbe az ajánlotthoz, a kisebb valószínűségeken való eltérés a már említett AGC hibákból és a rengeteg – kiszűrni lehetetlen – apróbb többletcsillapításokból származik.



11.ábra: Komplement eloszlás függvény – a 10^{-4} valószínűséghez tartozó csillapítás bír jelentőséggel (HU46, 2007). A zöld színű görbe az ITU ajánlást mutatja (a görbe meghatározásakor kizárólag az azonos $A_{0.01}$ érték megadására kellett figyelni)



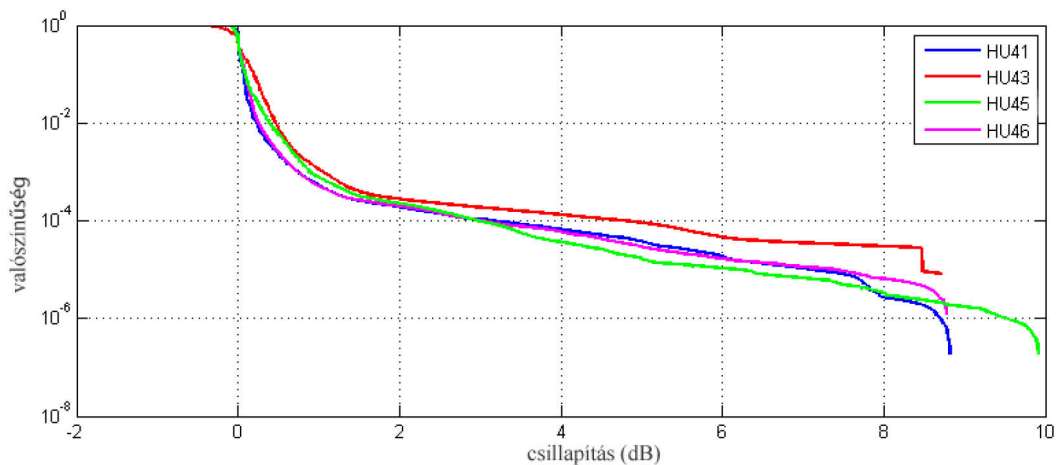
12.ábra: Komplement eloszlás függvények (HU41, HU43, HU45, HU46 – 2007)

A 12. ábrán megfigyelhető eltérések a különböző linkparamétereknek tudhatóak be. A HU45 jóval rövidebb link a többihez képest (1.52 km), így az eső csak rövid szakaszon fejtette ki hatását; innen következik, hogy ott kisebb csillapítások voltak mérhetőek. A többi összeköttetés távolsága közel ugyanakkora, azonban jól láthatóan a HU43 linken kisebb valószínűséggel jelentek meg 40-50 dB közötti csillapítások. A használt frekvencia megegyezik közöttük (23 GHz), de a polarizáció a HU43 esetében vertikális, míg a HU41-nél és HU46-nál horizontális. Korábban már volt szó róla, hogy a horizontális polarizációt használó összeköttetéseket jobban csillapítja az eső, mint a vertikált linkeket, innen jöhet a piros vonal eltérése nagyobb csillapításokon.

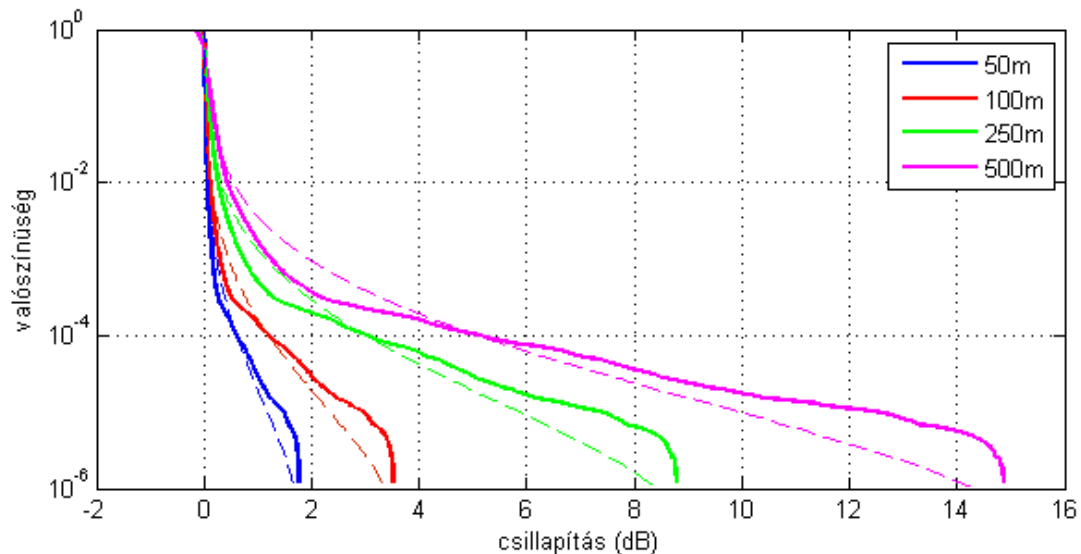
6.2 A linktranszformáció hatása

Ahhoz, hogy az esőintenzitás elhanyagolhatóságát megcáfoljuk, alapvető fontosságú, hogy linktranszformáció esetén, hogyan is néznek ki ezek a görbék, ezt mutatja a 13. ábra, mely esetében a korábban bemutatott módszer segítségével a csillapítás-idő függvényeket egy 250 méter hosszúságú, 23 GHz-en alkalmazott horizontális polarizációjú linkre transzformáltam le. A különbség jól látható: rövidebb linken ugyanakkora valószínűséggel kisebb csillapítások jelennek meg. Az 45-50 dB-es csillapítások 9dB köré kerültek egy közel húsz-huszonötöd akkora hosszúságú összeköttetésen. A transzformált komplement eloszlásfüggvény egy nagyon fontos

dologra világít rá: egy ilyen hosszúságú linken 6-10 dB csillapítás jelentősnek mondható, így hálózattervezéskor figyelembe kell venni az eső okozta többletcsillapítást mégis és nem hanyagolható el, ahogy a (3)-ban említve volt. Az ott leírt – 2.ábrára hivatkozott – 1.5dB-es csillapítás közel 10^{-4} -en valószínűséggel fordul elő, a 13.ábra viszont jól mutatja, hogy ennél nagyobb csillapítások is előfordulhatnak kisebb, de semmiképpen sem elhanyagolható valószínűséggel.



13.ábra: Transzformált (250 m, 'h', 23 GHz) komplexens eloszlás függvények (HU41, HU43, HU45, HU46 – 2007)

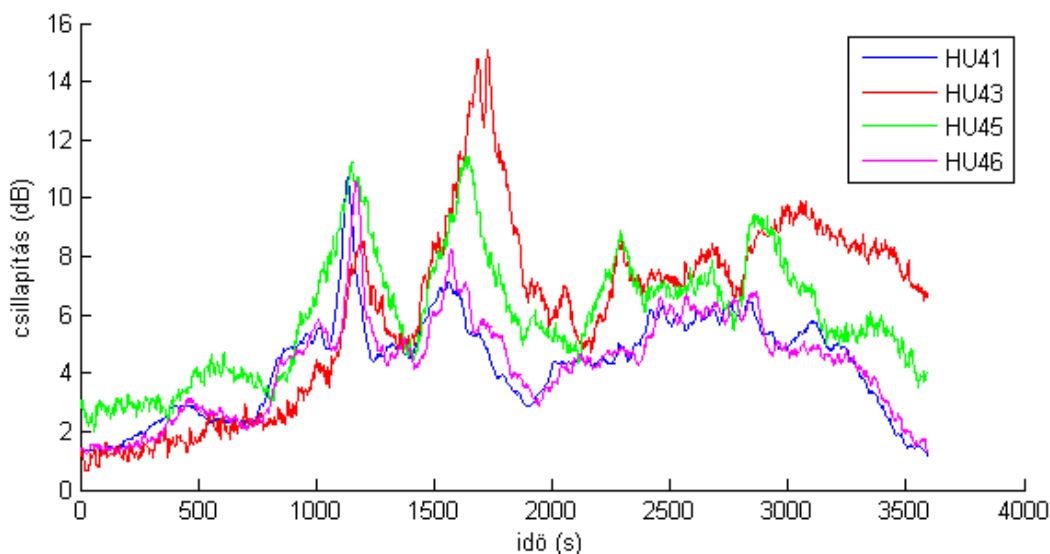


14.ábra: Transzformált komplexens eloszlás függvények (HU46 – 2007). A szaggatott görbék mutatják a hozzájuk tartozó ITU ajánlásokat – az eltérések lehetséges okait már korábban tárgyaltam

Ahogy korábban már írtam, a B-4G hálózatok kialakítása folyamán a cellasugár városi környezetben nem mehet 200 méter felé, sűrűbb város esetén pedig ennél kisebb sugár is szükséges lehet, hogy az egy négyzetméterre jutó kapacitás optimális legyen adott cellán belül. Így kérdéses, hogy különböző távolságú hipotetikus linkeken hogyan jelenik meg az eső hatása. Továbbra is horizontális polarizációjú és 23 GHz-es linkeket vizsgáltam, a távolságokat pedig a 14. ábra mutatja.

6.3 Korreláció analízis

A komplementis eloszlás függvények mellett a korrelációanalízis adta a jelentőséggel bíró eredményeket. Pontosabban, hogy az adott linkeken az eső mennyire fejti ki hatását különböző paraméterek mellett (távolság, frekvencia, polarizáció, azimut stb). Elsőként tetszőlegesen kiválasztott májusi és júliusi esőesemények és azok transzformáltjait vizsgáltam.

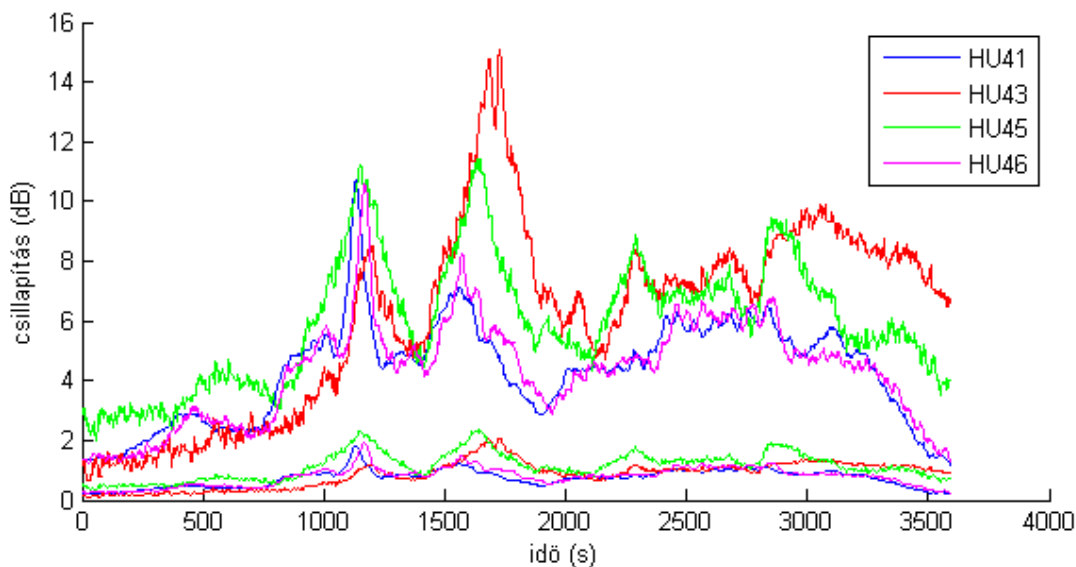


15.ábra: Májusi eső időfüggvényei (HU41, HU43, HU45, HU46 – 2007)

Egy májusi esőesemény csillapítás-idő függvényei láthatóak a 15. ábrán.

A linkek közötti korreláció jól megfigyelhető a közel egy óra hosszú esőesemény alatt. Az eső különösen nagy csillapítást a 20. és 30. perc körül okozott (1200s és 1800s), az egyes görbék együttmozgásán jól látszik, hogy mind a négy összeköttetésre igaz ez. Az eltolódásokból szélirány és szélsébség is becsülhető, ha megvizsgáljuk, hogy az egyes „csúcscsillapítások”

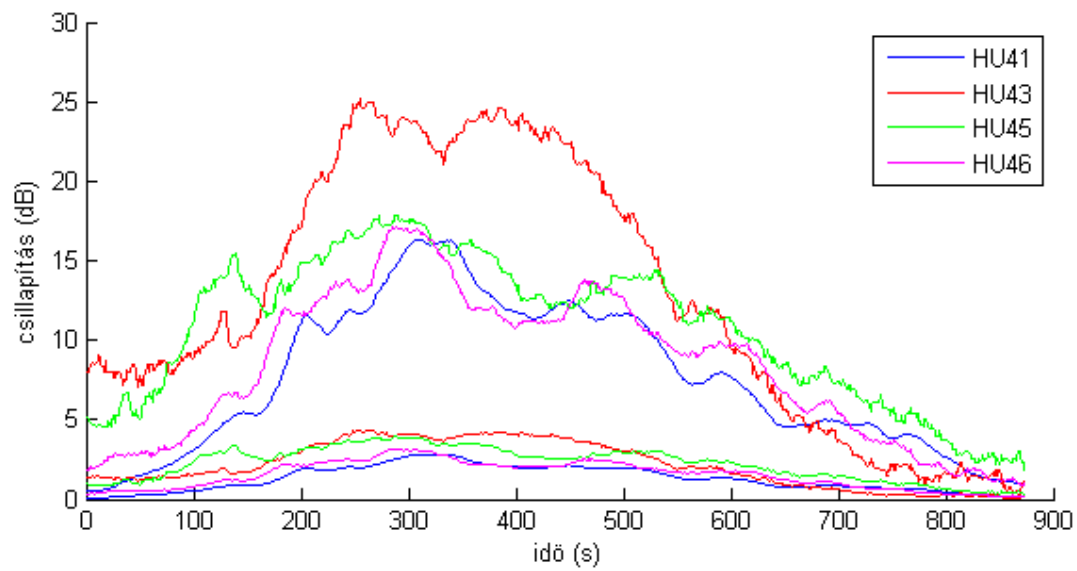
időben milyen messze kerültek egymástól. A HU43-hoz láthatóan 50-60 másodperccel később érhetett el az esőcella a HU45-höz képest, illetve előtte már érintette a HU41 és HU46 linkeket. A korábban ismert elhelyezkedések alapján (4. ábra) így egy lassú, 15-20 km/h-ás dél-délnyugati szél fújhatott ezen esőesemény alatt. A későbbiekben a korrelációs görbék eltolódása alapján térképen illusztrálom az utóbbi feltételezést.



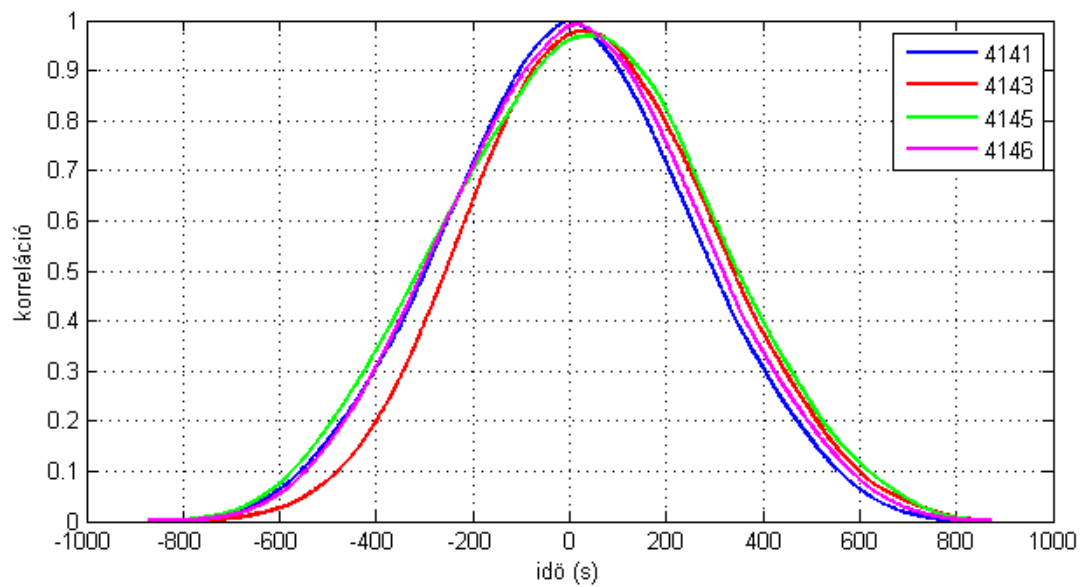
16.ábra: Májusi eső valódi és a transzformált (250 m, 'h', 23 GHz) időfüggvényei (HU41, HU43, HU45, HU46 – 2007)

Fontos azonban az is, hogy ezen linkek hogyan viselkednek egy tetszőleges hipotetikus összeköttetésre., melynek eredménye a 16. ábrán látható. A hipotetikus linken ugyancsak jól megfigyelhető a görbék együttmozgása. A 17. ábrán ugyanez látható egy rövidebb, kb. negyedórás júliusi eső esetében.

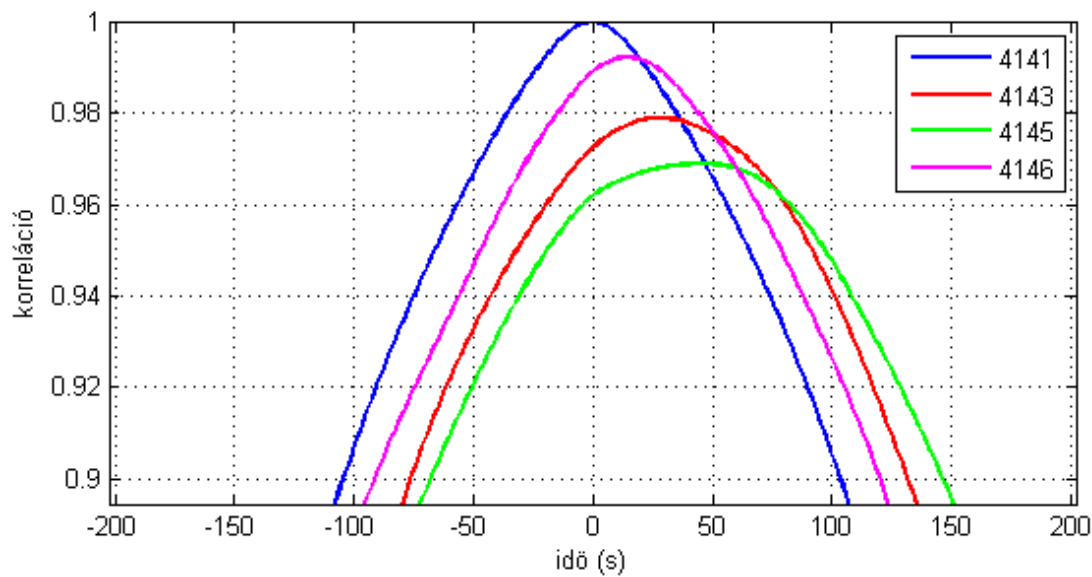
Természetesen nem csak „ránézésre” érezhető a korreláció, egy referencialinket választva az összeköttetések közötti keresztkorreláció pontosan meghatározható, valamint ezek segítségével jól megfigyelhető az időbeli együttmozgás is. A HU41-es linket választva referenciának, a 18. és 19. ábrán a kék görbe az önmagával vett keresztkorrelációját mutatja, így annak maximum értéke definíció szerint 1, a többi összeköttetés pedig ott éri el maximumát, ahol a HU41-es linkkel a legjobban korrelál (júliusi esőesemény).



17.ábra: Júliusi eső valódi és a transzformált (250 m, 'h', 23 GHz) időfüggvényei (HU41, HU43, HU45, HU46 – 2007)

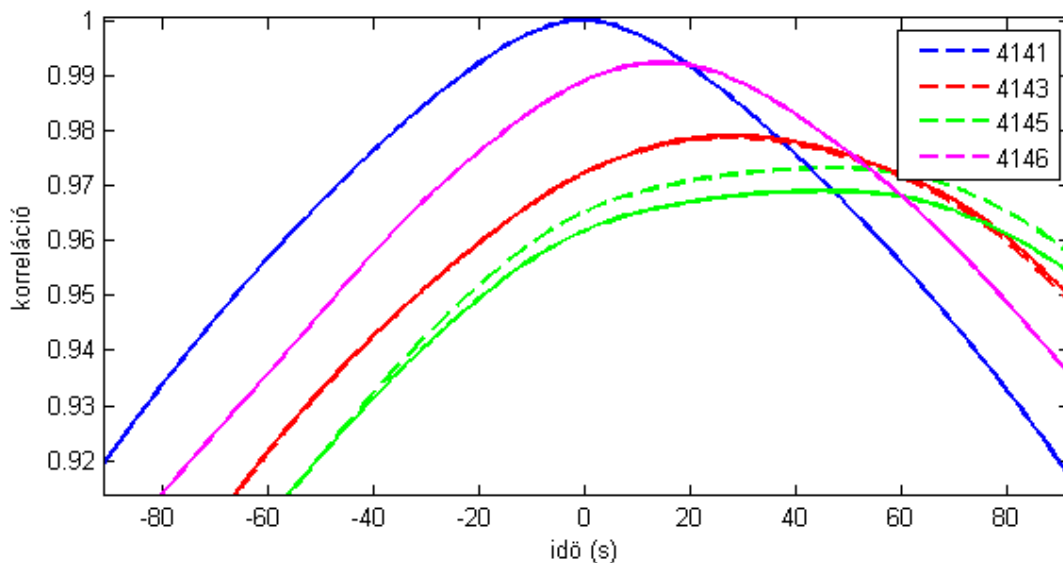


18.ábra: Májusi esőesemény esetében keresztkorrelációs görbék, referencia: HU41 (HU41, HU43, HU45, HU46 – 2007)



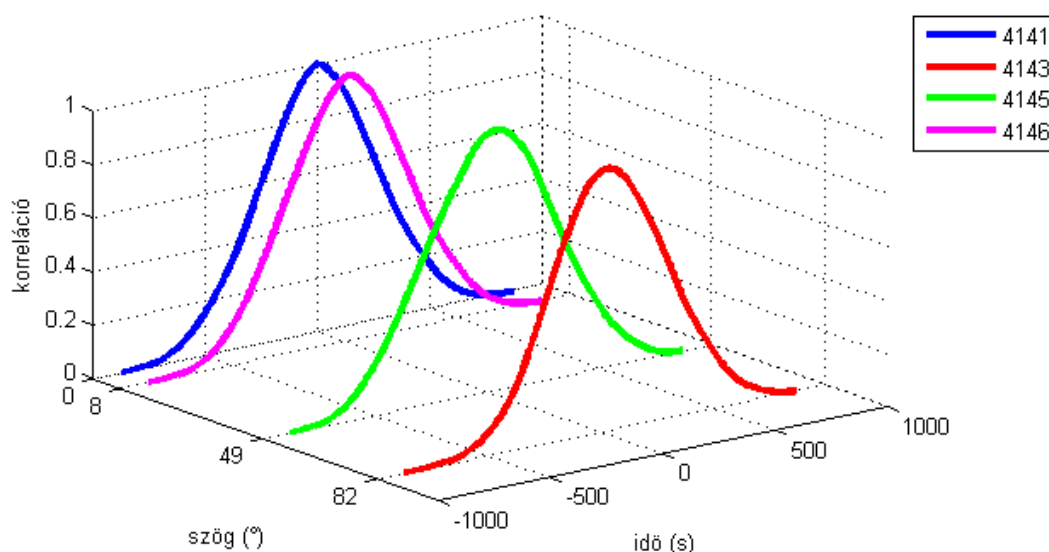
19.ábra: Májusi esőesemény esetében keresztkorrelációs görbék felnagyítva, referencia: HU41. Meteorológiai adatok hiányában az időbeli eltolódásból szélirány és szélesség becsülhető (HU41, HU43, HU45, HU46 – 2007)

A felnagyított ábrán jól látható, hogy az egyes keresztkorrelációs görbék nem ugyanannál az időértéknél érik el maximumaikat. A 20. ábra egy grafikonon mutatja a valódi és a transzformált linkek keresztkorrelációját.



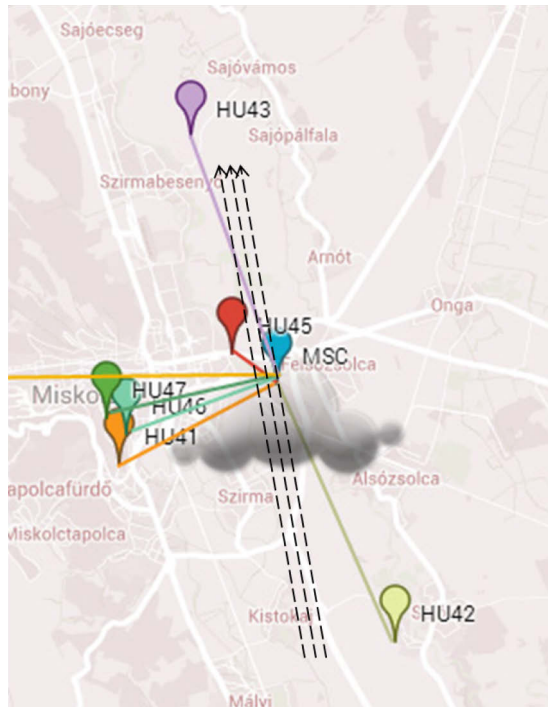
20.ábra: Júliusi esőesemény esetében a valódi és transzformált keresztkorrelációs görbék felnagyítva, referencia: HU41 (HU41, HU43, HU45, HU46 – 2007)

Érdekes még azt is megfigyelni, ahogy az egyes azimutokban eltérő linkek mennyire korrelálnak egymással. Ezt a 21. ábra szemlélteti a júliusi esőesemény esetén, melynek harmadik tengelyén megjelenik az összeköttetések egymással bezárt szöge is (referencia még mindig a HU41).



21.ábra: Júliusi esőesemény esetében a keresztkorrelációs görbék az egymással bezárt szög függvényében, referencia: HU41. A rövidtávú mintavétel miatt az egymással bezárt szög szerinti korreláció nem figyelemre méltó (HU41, HU43, HU45, HU46 – 2007)

Meteorológiai adatok hiányában nem volt lehetséges összehasonlítani, hogy az esőcella mozgása okozta-e korrelációs görbék egymáshoz képesti időbeli eltolódását. A 21. ábra alapján azonban egy lehetséges szélirányt leszűrhetünk: jól megfigyelhető, hogy éppen a HU41 referencialinken fejti ki hatását az eső időben először, a többin 20-40 másodperccel később érkezik meg a csillapító hatás. A HU41 és HU46 közötti erős korreláció a közel ugyanakkora linktávolságnak és az alig 8 fokban való eltérésnek tudható be. Legvégén a HU45 és HU43-as linken figyelhető meg a hatás 5-10 másodperces késéssel. Ezek alapján egy lehetséges szélirány feltételezhető, azonban csak a meteorológiai adatok tudnak pontos okokat adni a fenti korrelációs eltolódások magyarázatára (22. ábra).

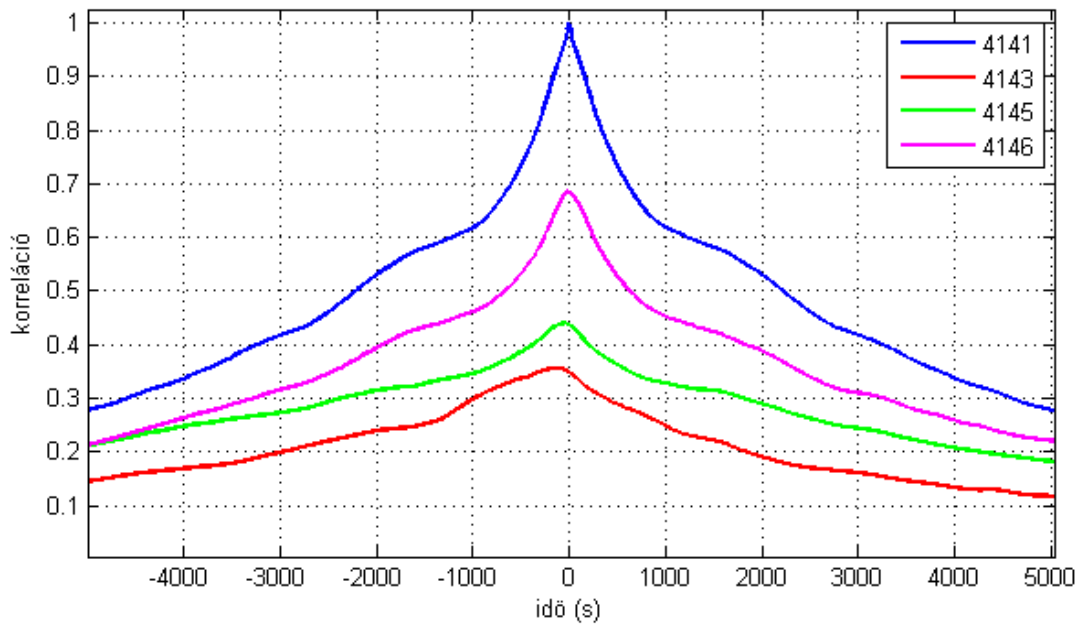


22.ábra: Részlet a miskolci hozzáférési hálózat topológiájából és a vizsgált linkek – júliusi esőeseményre vett – korrelációs görbéi alapján egy feltételezett szél irány (Google Maps). A szélsősebesség körülbelül 20-30 km/h lehetett a korrelációs görbék időbeli eltolódása alapján

A 20. ábrán azonban a túlságosan is magas korreláció miatt nem figyelhető meg, hogy az azimut mennyire befolyásolja az eső hatását. Ahhoz, hogy ez is szemléletes legyen, hosszabb távú, akár több hetes intervallumot vizsgáló korreláció szükséges, így számos esőesemény fog részt venni a korrelációs számításban. Várakozásunk szerint a több esőesemény kisebb keresztkorrelációt fog adni, így megfigyelhető lesz a azimuttól való függés is.

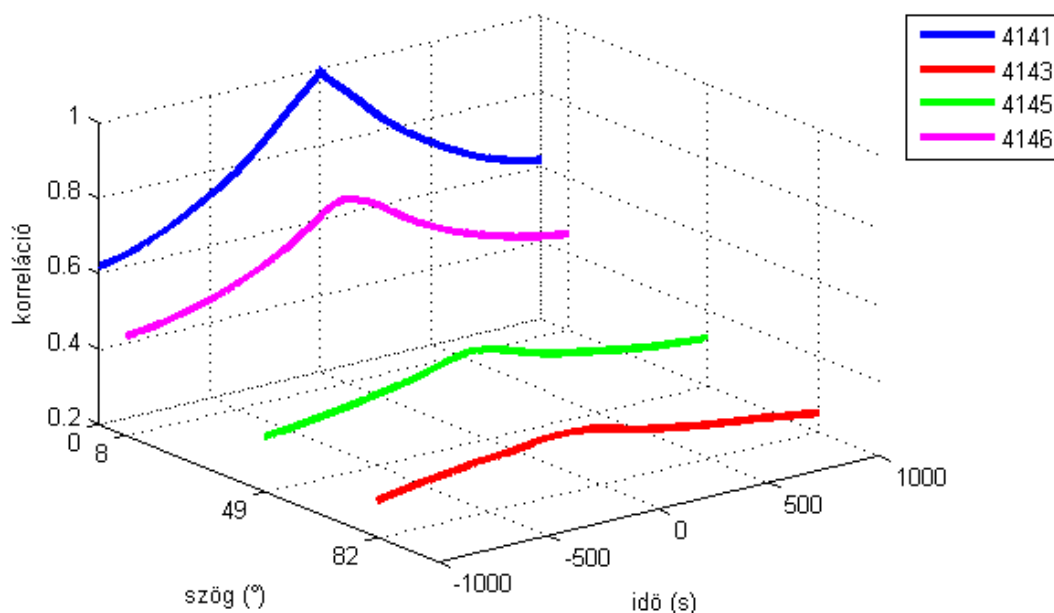
Ennek fényében tipikusan nyári időszakokra fókuszáltam, amikor ennek megfelelő intervallumot kerestem. A hosszabb távú korreláció miatt a görbék már nem fognak ugyanúgy mozogni, a keresztkorreláció közöttük pedig jócskán lecsökken (illetve megeshet, hogy egyes görbék vertikálisan helyet cserélnek az előzőekben vett kevés minta miatt), melyet a 23. ábra mutat egy 2007. augusztus közepére eső kéthetes intervallumra.

A háromdimenziós keresztkorrelációs görbék így már jól mutatják azt is, hogy nem mindegy, hogy az eső milyen szögben ér egy linket (24.ábra).



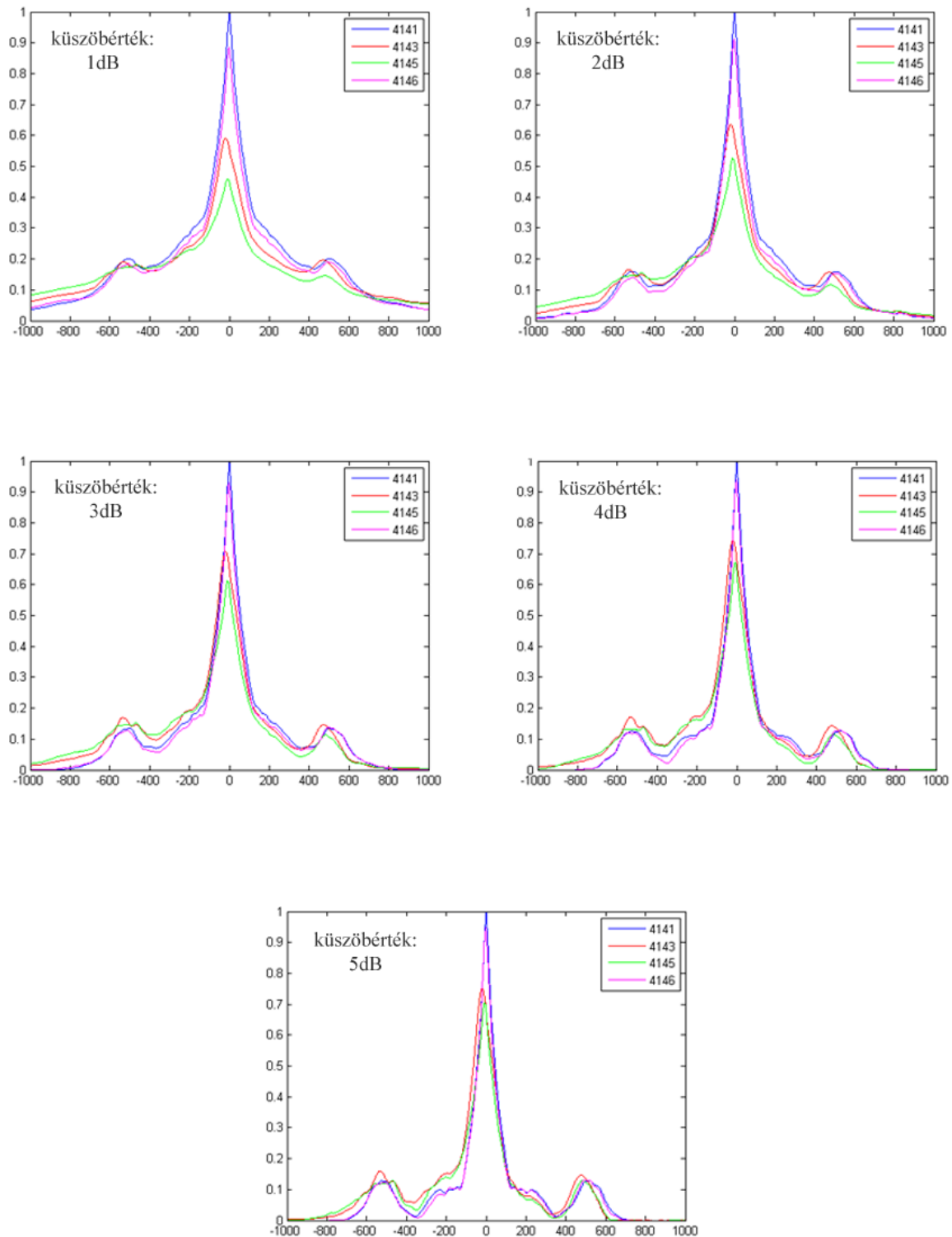
23.ábra: Keresztkorrelációs görbék, 2007. augusztus 8-22, referencia: HU41. A korreláltság a hosszútávú vizsgálat miatt lecsökken a korábbiakhoz képest, mivel számos esőeseményt tartalmaz az adott időintervallum (HU41, HU43, HU45, HU46)

Fontos azonban, hogy ezzel a vizsgálattal a száraz intervallumok is bekerülnek a korrelációs számításba, míg nekünk alapvetően esőket kellene vizsgálnunk. Ezek csupán értelmetlen adatokat szolgáltatnak, pl.: két link között egyiknél +0.3dB, másiknál -0.3dB csillapítás érték feleslegesen csökkenti a korrelációt, így kiküszöbölésük fontossá válik.



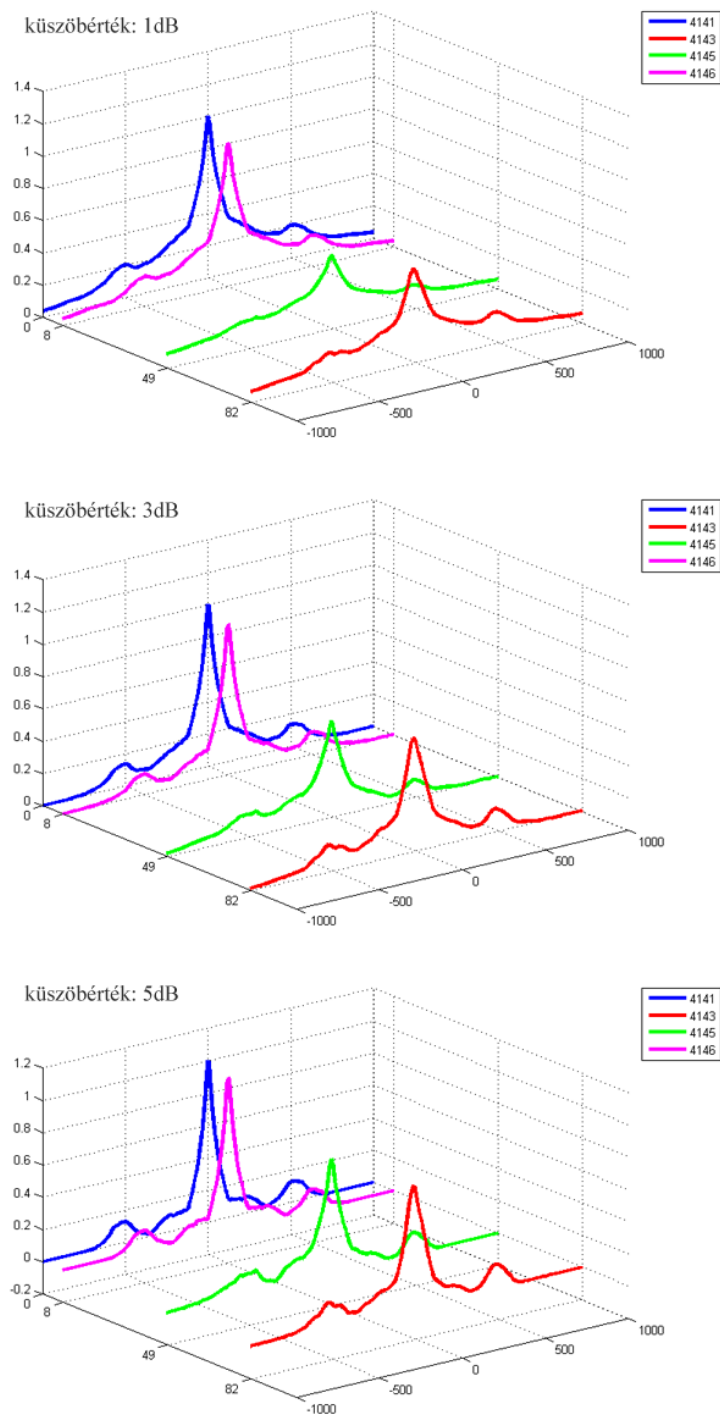
24.ábra: Keresztkorrelációs görbék az egymással bezárt szög függvényében, 2007. augusztus 8-22, referencia: HU41. A 21. ábrához képest a különbség, hogy egy hosszabb, több esőeseményt tartalmazó periódus vizsgálatával megfigyelhetővé válik a linkek egymással bezárt szög szerinti korrelációja. A HU43 közel derékszögben áll a HU41-hez képest, így az eső is jól láthatóan eltérő hatást gyakorol a terjedésre (HU41, HU43, HU45, HU46)

A zavaró szárazság kiküszöbölése azonban nem egyértelmű, nincsenek arra ajánlások, hogy milyen csillapítás érték alatt érdemes a korreláció számításból eliminálni ezeket az értékeket, hiszen az egyes összeköttetések más és más terjedési tulajdonságokkal rendelkeznek. Belegondolva itt a már korábban tárgyalt szcintilláció miatt nem tűzhetünk ki egy küszöb értéket amely alatt nem vesszük számításba az eső hatását. Így ezt a kitüntetett értéket 1 és 5 dB között változtattam, majd egész éves viszonylatban elvégeztem a korreláció vizsgálatot (25. ábra). Az eredmények a várakozásnak megfelelően alakultak: a hevesebb zivatarok egyaránt magas korrelációval megjelennek az idősorokon, a kisebb csillapítás hatások, amelyek az adott értékek alatt vannak már kevésbé korrelálnak, így a nagyobb küszöb értékek csak a nagyobb és jobban korreláló csillapítás hatásokat veszik számításba. A HU45 és HU41 közötti korreláción figyelhető ez meg leginkább: a küszöbérték 1 dB-ről 5 dB-re változtatásával a 0.45-ös korreláció 0.7-re kúszik fel.



25.ábra: Egész éves keresztkorrelációs görbék küszöbérték beiktatásával, referencia: HU41 (HU41, HU43, HU45, HU46 - 2007). A vízszintes tengely továbbra is az időt, a függőleges tengely pedig a korrelációt mutatja. A küszöbérték növelésével A HU41 és HU45 közötti korreláció (zöld görbe) másfélszeresére nő, melynek oka, hogy egyre nagyobb csillapítás hatásokat veszünk figyelembe, amelyek egyre jobban korrelálnak.

Ugyanez ábrázolható az egymással bezárt szög függvényében, melyet a 26. ábra mutat. A változás jobb szemléltetése miatt itt csak az 1, 3 és 5 dB-es küszöbértékek látszódnak.



26.ábra: Egész éves keresztkorrelációs görbék küszöbérték beiktatásával az egymással bezárt szög függvényében, referencia: HU41 (HU41, HU43, HU45, HU46 - 2007). A tengelyek jelentése a korábbi háromdimenziós ábrákhoz hasonló. Akárcsak az előző ábrán, itt is megfigyelhető, hogy a küszöbérték növelésével a más szögben álló linkek egyre inkább korrelálnak.

6.4 Mikrohullámú ad-hoc mesh hálózat megbízhatóságának vizsgálata

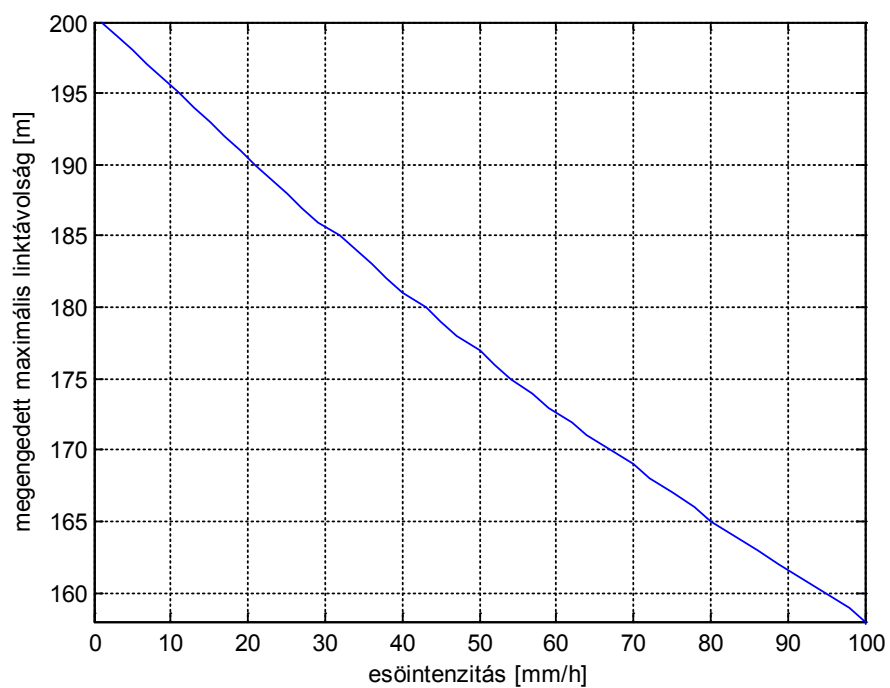
6.4.1 Homogén esőeloszlás esetén

A bázisállomások kiesését akkor lehet jól vizsgálni, ha egy időben elvonuló esőcellát a hálózat „felé” szimulálunk. Az 5.4.2 fejezetben már említésre került az útkeresés, az esőintenzitás és maximális linktávolság kapcsolata stb, melyek bemutatásán keresztül jutunk el a végső szimulációkig. Ezeket a szimulációkat homogén és inhomogén esőintenzitás feltételezésével is elvégeztem, homogén esetben az esőintenzitás eloszlása egyenletes a teljes területen, míg inhomogén esetben egy esőcella modell határozza meg, hogy az egyes pontokban mekkora az intenzitás (nyilvánvaló, hogy ez az eset pontosabb eredményre fog vezetni).

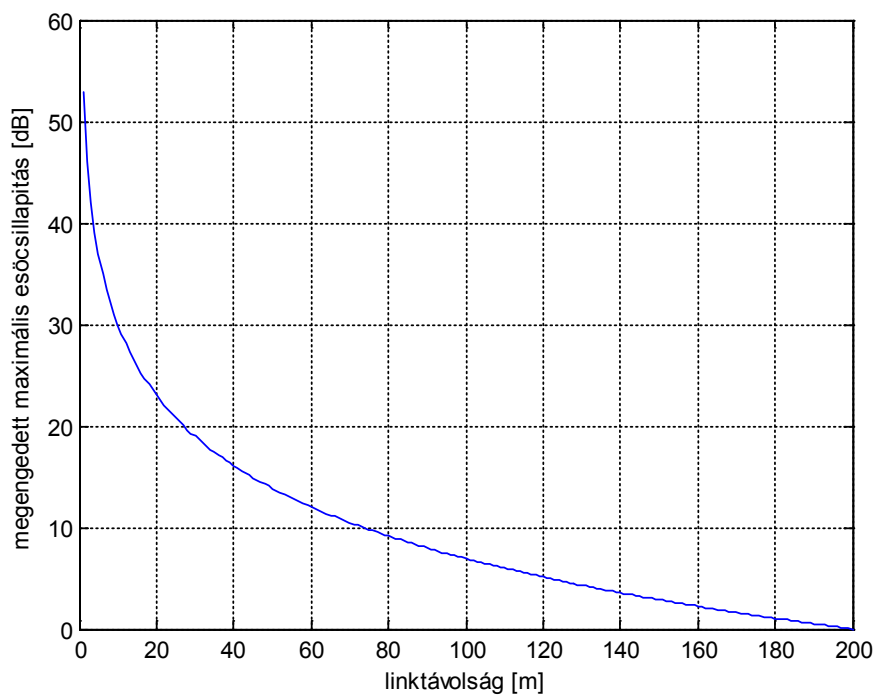
A vizsgálandó terület egy 800 méter oldalhosszúságú négyzet volt, ebben helyeztem el a bázisállomásokat (összesen 10-et), a nyelőt, amely pontosan középen volt és az összeköttetéseket is. Először vizsgáljuk a homogén esetet!

Ahogy azt már az 5.4.1 fejezetben említettem, az esőintenzitás egy járulékos esőcsillapítást okoz a linken a szabadtéri szakaszcsillapítás mellett, ennek az összcsillapításnak pedig van egy maximuma, amit a 200 méter hosszúságú link határoz meg. Így adott esőintenzitás mellett meghatározható az a küszöbérték, amely távolságnál a link még éppen nem szakad meg. A 27. ábrán jól látszik, hogy például egy 80 mm/h-s eső legfeljebb 165 méter hosszúságú link használatát teszi lehetővé.

Adott linktávolsághoz így meg tudjuk határozni azt a küszöbértéket, amely csillapítás felett megszakad a kommunikáció (28. ábra). Például egy 80 méteres link esetében, ha az eső 9.4 dB-nél nagyobb csillapítást okoz, akkor az a link kiesik a hálózathoz (továbbra is az eredeti 200 méteres maximális távolságot, 28 GHz frekvenciát és horizontális polarizációt feltételezve).

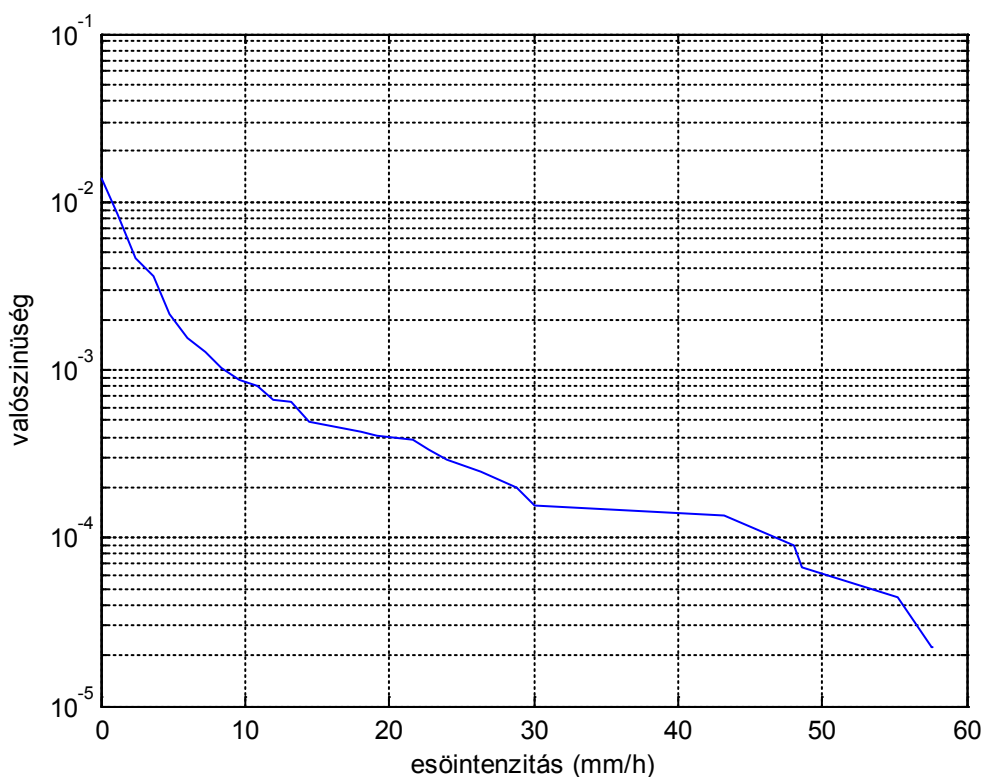


27.ábra: Adott esőintenzitáshoz tartozó linktávolság, ahol a link még éppen nem szakad meg (500 véletlenszerűen generált hálózat átlaga alapján)



28.ábra: Adott linktávolság mellett megengedhető maximális esőcsillapítás

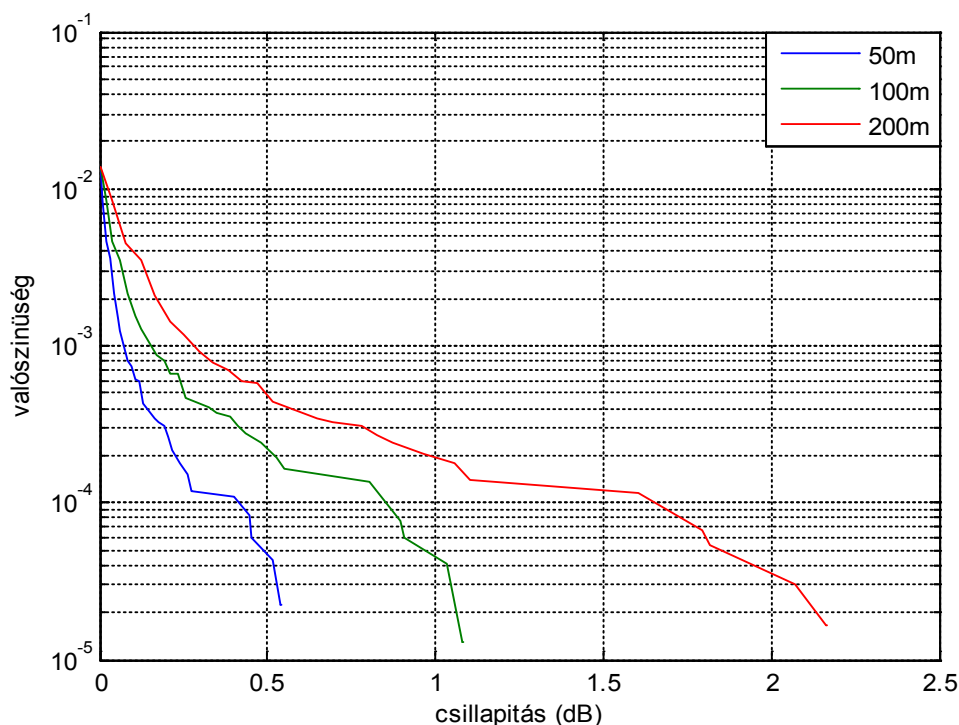
Ahhoz, hogy a szimuláció a lehető legélethűbb legyen, az esőintenzitás eloszlásához érdemes valós adatokat használni. A 2005 májusi esőintenzitás adataiból kapott komplement eloszlás függvény a 29. ábrán látható, mely – a csillapításhoz hasonlóan – azt adja meg, hogy mekkora annak a valószínűsége, hogy az esőintenzitás meghalad egy adott R_i értéket.



29.ábra: Esőintenzitás komplement eloszlás függvény

Az esőintenzitás eloszlás függvény ismeretében elő tudjuk állítani a csillapítás eloszlás függvényt is különböző méretű összeköttetések esetére. Korábban (6.2 fejezet, 14.ábra) már láttuk, hogy valós linkeket letranszformálva milyen csillapítások jellemzőek, most az esőcsillapítás komplement eloszlás függvényeket egy homogén esőmodell feltéve is előállítottam (30. ábra).

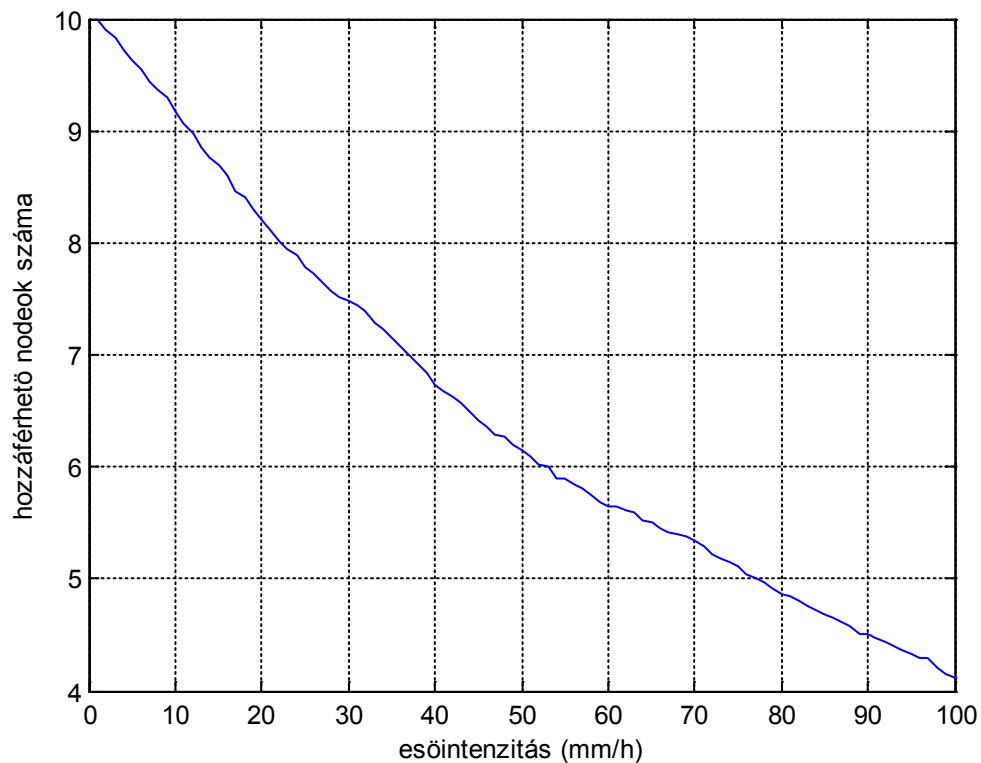
Az ábra jól mutatja, hogy viszonylag jelentős csillapítások léphetnek föl a linkeken, melyek a hosszabb (200m-nél valamivel rövidebb) linkeken elérhetik az értéket, hogy az adott összeköttetés megszakadjon (összevetve a 28. ábrán látható értékekkel) A rövidebb (körülbelül 160 m-nél rövidebb) linken viszont nem éri el a csillapítás a maximálisan megengedett értéket, tehát ezek az összeköttetések nem fognak kiesni.



30. ábra: Csillapítás komplementers eloszlás függvények homogén esőmodell feltételezve (frekvencia: 28 GHz)

A 30. ábra eredményeit összevetve a linktranszformációval kapott csillapítás eloszlásokkal (lásd 14. ábra) látható, hogy a generált csillapítások valamivel alacsonyabbak, mint amit a transzformáció segítségével kaptam. Ez egyrészt adódhat a modellek pontatlanságából, másrészt viszont a transzformáció során használt csillapításokhoz tartozó esőintenzitás eloszláshoz nagyobb értékek tartoznak, mint a 29. ábrán láthatók, tehát ez a magasabb transzformált csillapítás értékeket jelent.

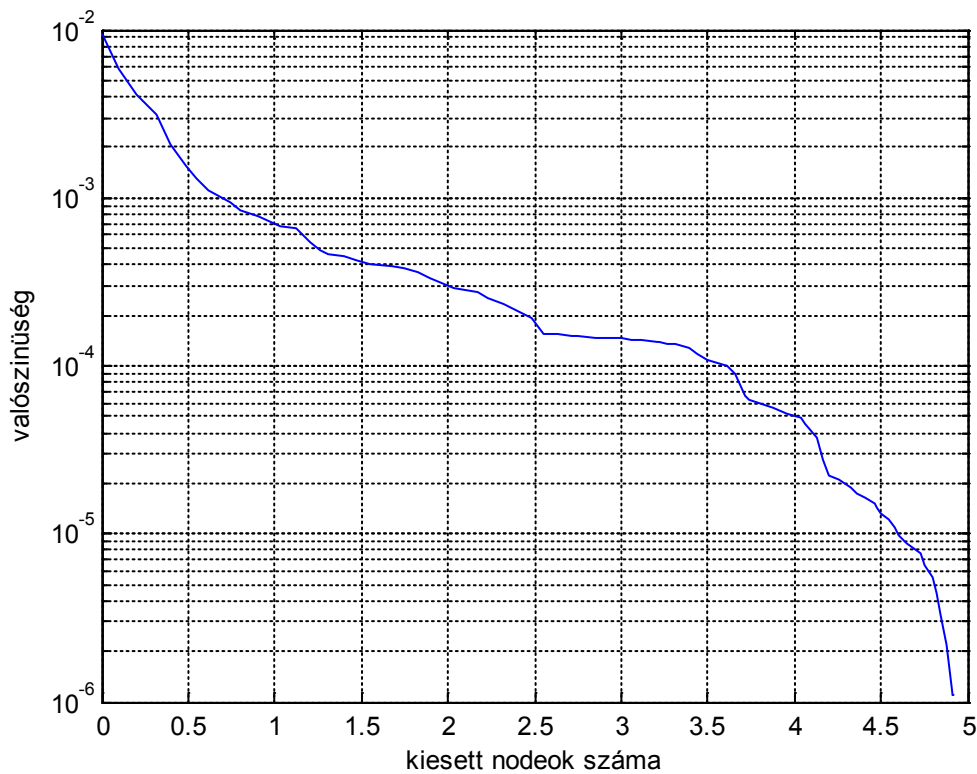
Mivel minden esőintenzitáshoz tudjuk azt a küszöbértéket, amely távolságnál egy link megszakad, ezért innen minden véletlenszerűen generált hálózaton elvégezve a már korábban említett útkeresést meghatározható az elérhető bázisállomások átlagos száma (31. ábra). Természetesen a közel lineáris függés teljesen véletlen. Ha a vizsgálandó terület egy nagyobb, pl.: 1 km oldalhosszúságú négyzet lenne, akkor a bázisállomások közti összeköttetések hossza átlagosan megnőne, a hozzáférhető állomások száma adott esőintenzitás mellett lecsökkenne, így a 31. ábrán szereplő görbe „jobban az origó felé görbülne”.



31.ábra: Hozzáférhető bázisállomások száma az esőintenzitás függvényében (500 véletlenszerűen generált hálózat átlaga alapján)

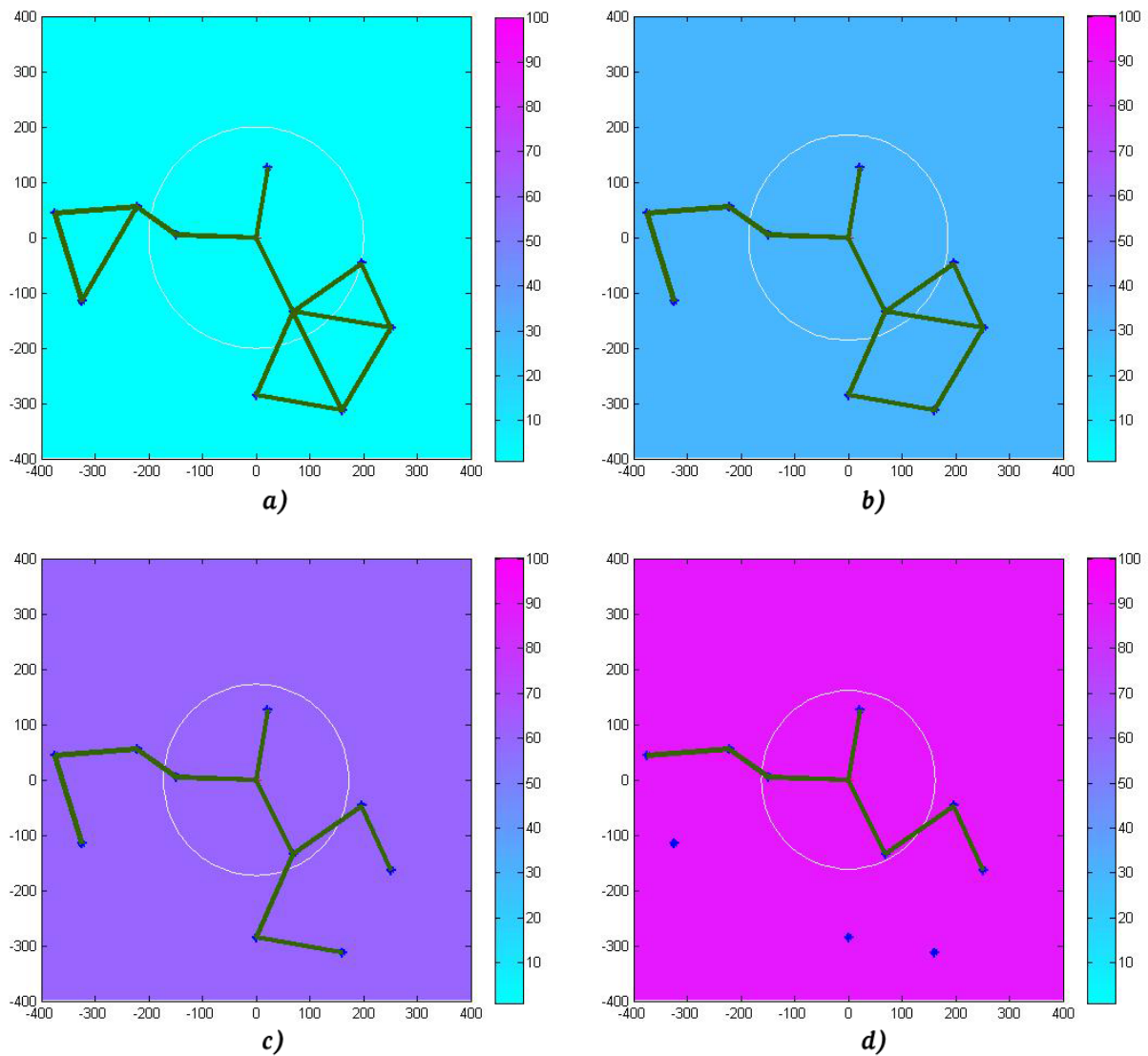
A 29. és 31. ábrából egyenesen következik a bázisállomások kiesési valószínűsége homogén esetben (32.ábra). Például 10-ből kettő vagy több bázisállomás $2.5 \cdot 10^{-4}$ valószínűséggel esik ki: ez azt jelenti, hogy egy 800x800 méteres területen 10 állomást véletlenszerűen elhelyezve – de betartva a 200 méteres küszöbértéket a hálózat generálásakor – 2005 májusában kb. 12 percig lett volna olyan eset, hogy 8 vagy annál kevesebb bázisállomás elérhető.

Homogén esetben a szimulációk tehát a fenti eredményeket adják. Ezek látván látványosabb bemutatásához Matlabban egy animációt is elkészítettem, amely egy adott hálózaton megmutatja, hogy a vizsgálandó területen folyamatosan emelve az esőintenzitás értékét, mely linkek és bázisállomások esnek ki a hálózatból. Ennek pár pillanatát mutatja a 33. ábra.



32.ábra: Kiesett bázisállomások száma az valószínűség függvényében (500 véletlenszerűen generált hálózat átlaga alapján).
Az ábra azt mutatja, hogy egy adott értéknél több bázisállomás milyen valószínűséggel esik ki.

Az 33/a ábrán nincs eső, az eredeti összeköttetések működnek, az összes bázisállomás elérhető. A 33/b ábrán 30 mm/h-ás esőintenzitás mellett két linken megszakad a kommunikáció, de továbbra is mind a 10 állomás hozzáférhető. A 33/c ábrán egy 60 mm/h-ás heves eső újabb linkek megszakadását okozza, itt minden bázisállomáshoz már csak egy út maradt, de legalább továbbra sincs izolált állomás. A 33/d ábrán egy trópusi zivatarnak megfelelő 90 mm/h-ás eső azonban három bázisállomás kiesését okozza. A 31. ábrával nem teljesen konzisztens eredményt kaptunk (ott 90 mm/h-ás eső 6 állomást izolál), melynek oka, hogy ez egy darab szimulációs eredmény, az pedig 500 generált hálózaton végzett szimuláció átlaga. Az ábrák közepén látható kör sugara mutatja a maximális megengedett linktávolságot, amely jól láthatóan csökken az esőintenzitás növelésével.

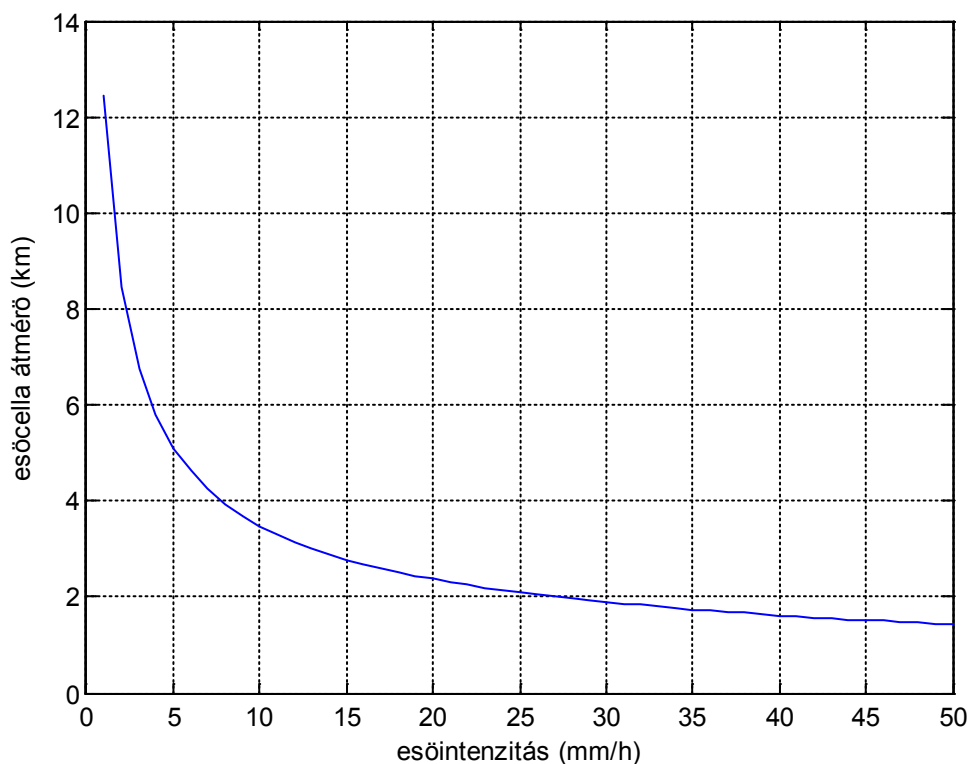


33.ábra: A szimuláció nem mondható életszerűnek a homogén esőintenzitás eloszlás miatt, azonban jól látható, hogy az esőintenzitás növelésével (0 és 100 mm/h között) egyre több összeköttetés szakad meg és bázisállomás izolálódik. Az origó középpontú kör sugara megegyezik azzal a maximális linktávolsággal, ahol még épp nem szakad meg a kommunikáció

6.4.2 Inhomogén esőeloszlás esetén

Inhomogén esetben az összeköttetések különböző pontjain eltérő esőintenzitások figyelhetők meg, így egy esőcella modell használata volt szükséges, amely megmondja, hogy a cella közepétől adott távolságra mekkora az esőintenzitás. A szimulációknál számos modell közül választhattam, én a Gaussi lecsengésűt alkalmaztam, ahogy azt az 5.4.3 fejezetben említettem.

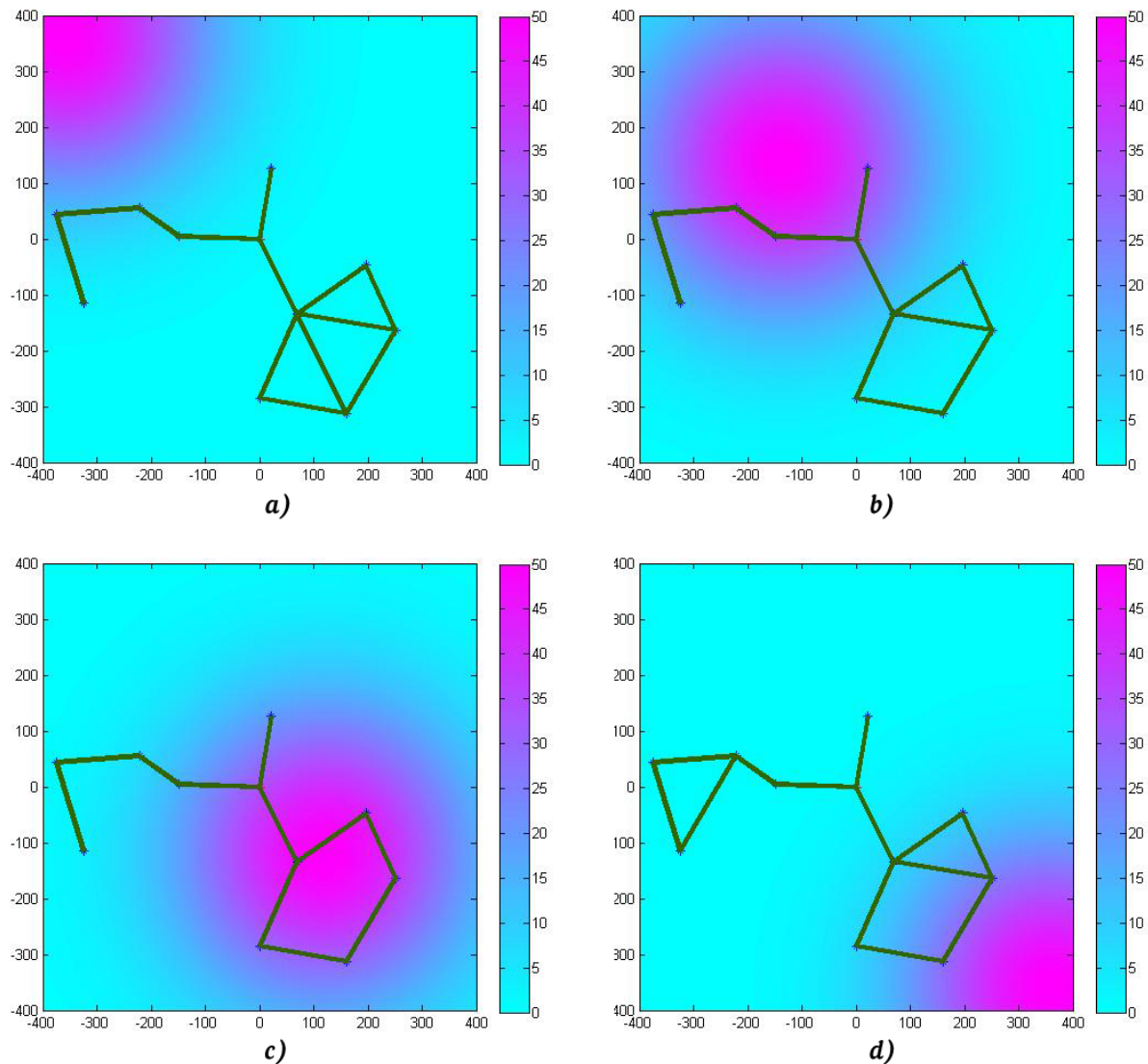
Szükséges volt azt is ismerni, hogy egy cella milyen kiterjedésű, erre a (20) ad választ, amely az maximális esőintenzitás függvényében (2 és 50 mm/h között) megbecsüli az esőcella átmérőjét. A 34. ábra azt mutatja, hogy minél kisebb az esőintenzitás a zivatar közepén, annál nagyobb kiterjedésű a cella, így a Gaussi lecsengés is egyre szélesebb.



34.ábra: Esőcella átmérőjére tett becslés a maximális esőintenzitás függvényében. A modell feltételezi, hogy a maximális intenzitás a cella közepén van és a kiterjedés kör alakú

A szimulációt inhomogén esetben a 35. ábrán látható hálózaton végeztem el. Az esőcella maximális intenzitása 50 mm/h volt, amely a modell szerint a cella origójában jelentkezett, kiterjedése (átmérője) pedig ezek alapján 614 méternek adódott. A cella északnyugatról délkeletre mozgott és lényegesen érintette a vizsgálandó hálózatot. Jól látszik, ahogy a front áthalad a hálózat felett és egyes linkeken, a cella pozíciójától függően megszakad a kommunikáció, azonban messze nem olyan durva hatást okoz, mint homogén esetben. Ez abból

ered, hogy az 50 mm/h-ás intenzitás többnyire csak az összeköttetés kis részén, vagy egyáltalán nem jelenik meg.



35.ábra: Gaussi esőcella áthaladása egy tetszőleges hálózat felett. Az összeköttetések kevésbé esnek ki a homogén esethez képest, mivel az azokon megjelenő összesőcsillapítás számottevően lecsökken

A Gaussi esőcella alkalmazásával adódó csillapítás értékek a 6.4.1 fejezetben ismertetett homogén esethez képest eltérően alakulnak, amit az esőcella térbeli eloszlása okoz. Amennyiben az esőcellák maximális esőintenzitású értékeit sorsoljuk a 29. ábrán látható eloszlásnak megfelelően (a 35. ábrán rózsaszín színnel jelölve), a hálózat többi pontjában ennél

kisebbs értékeket ad a modell, tehát a linkeken számított csillapítás értékek is kisebbre adódnak. Ugyanakkor viszont ha a 29. ábrán látható esőintenzitás eloszlás értékeit a gaussi esőcella tetszőleges pontjainak feleltetjük meg, a terület fölött a sorsoltnál magasabb esőintenzitású értékek is megjelennek. Tehát például ha egy, a 35. ábrán kék színnel jelölt pontban határozzuk meg az esőintenzitást, az rózsaszínnel jelölt intenzitás maximumok ennél nagyobb értékre adódnak, ami nagyobb esőcsillapítást jelent.

7 Konklúzió, továbblépési lehetőségek

A TDK dolgozat keretében egyrészt mobil ellátóhálózat gigahertzes frekvenciatartományban működő rádió-összeköttetések speciális terjedési, mérési és modellezési eljárásaival volt lehetőségem megismerkedni. A munkához valós mérési adatok is rendelkezésre állnak, melynek során elsősorban a csapadék terjedésre gyakorolt hatásainak a vizsgálata az elsődlegesen vizsgálandó terület. Emellett a korábbi mérési eredmények jó lehetőséget biztosítanak ötödik generációs mobilhálózatok összeköttetések vizsgálatára is, mely hálózatok szintén a milliméter hullámhosszú tartományban fognak üzemelni, ezáltal a csapadék hatása ezen összeköttetések esetén is kritikus lehet. A kitűzött vizsgálatok elvégzéséhez a rendelkezésre álló mérési eredmények transzformációja szükséges, mivel az ötödik generációs összeköttetések cellasugara legfeljebb néhány száz méter lehet. A transzformáció segítségével dolgozatomban rávilágítok arra, hogy miért nem hanyagolható el az eső hatása, az ITU ajánlások miatt pedig miért gondolkoznak sokan úgy az ötödik generációs hálózatokról, hogy a rövid cellasugaras felépítésből adódóan ezzel a területtel nem kell mélyrehatóbban foglalkozni. A dolgozatomban egy esőcella modellezésével is bemutatom, hogy az milyen hatást fejt ki az összeköttetésekre és egy tetszőlegesen generált hálózatra, ennek eredménye ugyancsak igazolja, hogy az eső hatása kritikus lehet és a tervezésnél figyelembe kell venni azt. A linktranszformáció felhasználásával kapott eredmények alátámasztják ezt az eredményt.

A szimulációk azonban még messze lehetnek életszerűbbek: további, a valóságot pontosabban leíró, térben inhomogén esőcella modellek, eltérő terjedési modellek (más PLE értékek), több/kevesebb bázisállomás egy kisebb/nagyobb térképen, más frekvenciák vizsgálata, Non-

Line-of-Sight összeköttetések figyelembe vétele stb. melyek mind továbblépési lehetőséget jelentenek egy ötödik generációs hálózat tervezési modellének precízebb megalkotásához.

A munka során Matlab programok írása is szükséges, melyek az adatok megjelenítését, szűrését, transzformációját illetve egyéb statisztikai feldolgozását végzik el.

8 Referenciajegyzék

1. apprepim.com. [Online] http://stats.areppim.com/archives/insight_mobile.htm.
2. 4G/LTE Lefedettség T-mobile hálózatban, 2014 május 5. [Online] <http://www.t-mobile.hu/lakossagi/ugyintezes/lefedettseg/lte>.
3. *"Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work!"* - May 29, 2013. **Rappaport, T.S., és mtsai., és mtsai.**
4. *"Moving Towards mmWave-Based Beyond-4G (B-4G) Technology"*. **Cudak, M., és mtsai., és mtsai.**
5. *„Millimeter-wave propagation characterization and modelling towards 5G systems”*. **Sana Salous, Mazier Nekovee, Vittorio Degliesposti, Sooyoung Hur.** 26-28, May 2014.
6. *Path Loss Exponent Estimation in Large Wireless Networks*. **Haenggi, Sunil Srinivasa and Martin.**
7. ITU-R P.838-3, *"Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,"* 2005.
8. *"Vision for Beyond 4G broadband radio systems", PIMRC-2011, pp 2369-2373.* **et.al, B. Raaf.**
9. *"Space and time correlation of rain attenuation in millimetre wave feeder network".* **A. Daru, Zs. Kormányos and J. Bitó.** July 2002.
10. Éghajlat. [Online] <http://mek.oszk.hu/02100/02185/html/102.html>.
11. *"Modelling of Joint Effect of Rain and Wind on the Attenuation of Millimetre Wave Propagation".* **Csaba Sinka, János Bitó.**
12. **Crane, Robert K.** *Propagation Handbook for Wireless Communication Design.*
13. Hungarian Meteorological Service: "Observed variations of the climate". [Online] http://www.met.hu/eghajlat/eghajlatvaltozas/megfigyelt_valtozasok/Magyarorszag/.
14. **Ambrus Daru, Tamás Faragó, Zsolt Kormányos, János Bitó, István Frigyes and László Babits.** *"Long term propagation measurements in a countrywide microwave network: the application of the first results in network planning and operation".*

15. *"The Effects of Climate Change on Microwave Telecommunications", 11th International Conference on Telecommunications. ConTEL 2011, Graz, Austria, 15-17 June 2011. : Paulson, K. S.*
16. *P.530-14, ITU Recommendations, "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems".*
17. *ITU Recommendations P.1623-1, "Prediction method of fade dynamics".*
18. **Nicewander, J. L. Rodgers and W. A.** *Thirteen ways to look at the correlation coefficient.* February 1988.
19. *„mmWave Propagation Models Based on 3D Ray-Tracing in Urban Environments". Sooyoung Hur, Youngbin Chang, Sangkyu Baek, YoungJu Lee, Jeongho Park.* 26-28, May 2014.
20. *Rain cell size statistics as a function of rain rate for attenuation modeling. Goldhirsh, Julius.* 10/1983.