



**SZÉCHENYI  
ISTVÁN  
EGYETEM**

GÉPÉSZMÉRNÖKI, INFORMATIKAI ÉS  
VILLAMOSMÉRNÖKI KAR

# **DIPLOMAMUNKA**

## **Elektromágneses hullámterjedés szimuláció plugin készítése QGIS szoftverhez**

**Lukács Balázs**

**Villamosmérnöki MSc szak  
Infokommunikáció szakirány**

**2020**



# Feladat-kiíró lap diplomamunkához

## Hallgató adatai

Név: Lukács Balázs

Neptun-kód: QAYXPM

Szak: Villamosmérnöki MSc

Specializáció: Infokommunikáció

Tagozat: nappali

## A diplomamunka adatai

Kezdő tanév és félév: 2019/20/2

Nyelv: Magyar

Típus: Nyilvános

## **Elektromágneses hullámterjedés szimuláció plugin készítése QGIS szoftverhez**

Feladatok részletezése:

- 1) Irodalomkutatás (hullámterjedési jelenségek, hullámterjedési modellek, geoinformatikai rendszerek)
- 2) QGIS szoftver ismertetése (a szoftver általános ismertetése, fő funkciói, hullámterjedési szimulációhoz való alkalmazhatósága)
- 3) Használt hullámterjedési modellek bemutatása (paraméterek, felhasználási terület)
- 4) QGIS plugin fejlesztésének ismertetése (a QGIS plugin-ek készítési folyamatának részletes ismertetése)
- 5) Elektromágneses hullámterjedési szimulációs plugin elkészítése
- 6) Valós hullámterjedési adatok gyűjtése (a szimulációs eredmények összehasonlításához)
- 7) Szimulált és valós hullámterjedési eredmények összehasonlítása (hullámterjedési modellenként)

Belső konzulens adatai

Név: Prukner Péter

Tanszék: Távközlési Tanszék

Beosztás: Egyetemi Tanársegéd

Külső konzulens adatai

Név: Friedl Gergely

Munkahely: Jaguar Land Rover Hungary Kft

Beosztás: Lead Engineer – Antenna systems

Győr, 2020.11.27

---

*belső konzulens*

*Prukner Péter*

---

*külső konzulens*

*Friedl Gergely*

---

*Távközlési Tanszék*

*Dr. Borbély Gábor*

# Nyilatkozat

Alulírott, Lukács Balázs (QAYXPM), Villamosmérnöki MSc szakos hallgató kijelentem, hogy az Elektromágneses hullámterjedés szimuláció plugin készítése QGIS szoftverhez című diplomamunka feladat kidolgozása a saját munkám, abban csak a megjelölt forrásokat, és a megjelölt mértékben használtam fel, az idézés szabályainak megfelelően, a hivatkozások pontos megjelölésével.

Eredményeim saját munkán, számításokon, kutatáson, valós méréseken alapulnak, és a legjobb tudásom szerint hitelesek.

Győr, 2020.11.27

---

hallgató

# Kivonat

## Elektromágneses hullámterjedés szimuláció plugin készítése QGIS szoftverhez

A vezeték nélküli hálózatok tervezése folyamán az egyik legnehezebben meghatározható paraméter a közeg csillapítása, ennek becslésére elektromágneses hullámterjedés szimulációs modelleket alkalmaznak. A modellek megadják az adott távolsághoz tartozó közegcsillapítást.

A dolgozatban empirikus hullámterjedési modelleket alkalmazva létrehozok egy QGIS plugin alkalmazást, amellyel bázisállomások lefedettségét lehet szimulálni, meghatározni. Először ismertetem a hullámterjedési alapismereteket, milyen jelenségeket kell figyelembe venni a szimuláció folyamán (refrakció, reflexió, fading stb.) és magukat az alkalmazott hullámterjedési modelleket is. A bemutatott hullámterjedési modelleket mért térerősség adatokkal hasonlítom össze a korrekciós adatok kinyeréséhez. A GIS rendszert alkalmazva különböző adatforrásokkal építem fel a szimulációs környezetet. A szimulációs környezet a QGIS vásznon elhelyezkedő rétegek alkotják. A rétegek tartalmazzák a magasság adatokat, a közeg típusokat, épületeket, a térképet, amelyen a szimulációt megjelenítem. A rétegekből kivont információ segítségével és a hullámterjedési modellekkel határozom meg a közeg csillapítását és a vételi jelszintet, amely a lefedettség szimulálásához elengedhetetlen.

Ezt követően a QGIS plugin elkészítésének folyamatát mutatom be (fejlesztési környezet, az alkalmazás különböző részeinek kidolgozása, felépítése). Az elkészült plugin-nel pedig hullámterjedési szimulációkat végzek el a kapott korrekciós értékek felhasználásával. Legvégül a különböző paraméterek és felhasznált adatok alapján kapott lefedettség térképeket bemutatom és összehasonlítom egymással.

# Abstract

## Creation of an electromagnetic wave propagation simulation plugin for QGIS

During electromagnetic wave propagation, the hardest aspect is to determine the medium attenuation (signal path). For this purpose, electromagnetic wave propagation models are used. These models return the value of attenuation at a given distance.

In this study, I create a QGIS plugin with electromagnetic wave propagation models, which can calculate the coverage and field strength of a base station. In the beginning of the study, I present the principal electromagnetic wave propagation phenomena, what effects need to be considered when using a wave propagation model (reflection, refraction, fading etc.) and the wave propagation models themselves. The presented wave propagation models are compared to measured field strength values, to determine the needed correction factors, for the models, to be as accurate as possible. Using the GIS, I build the simulation environment. The layers contain the height information, the area type, buildings, on which the simulation results are highlighted. With the data extracted from the layers and with the electromagnetic wave propagation models, the application determines the medium attenuation and the received signal strength, which is needed for the simulation of coverage.

After this the development of the QGIS plugin is presented (developer environment, design of the application's certain parts, structure of the application). With the completed plugin, I made simulation, using the calculated correction factors. And finally, the simulated coverage areas (with different settings) are compared to each other.

# Tartalomjegyzék

1. Bevezetés .....	1
2. Elektromágneses hullámterjedés.....	3
2.1. Elektromos mező .....	3
2.2. Mágneses mező.....	4
2.3. Elektromágneses hullámok .....	4
2.4. Elektromágneses spektrum felosztása.....	5
2.5. Hullámterjedési módok.....	6
2.5.1. Line-of-Sight (közvetlen rálátás - LOS) hullámterjedés és a rádióhorizont ...	7
2.5.2. Nem közvetlen rálátású hullámterjedés (Non-LOS).....	9
3. Energiamérleg (link budget) .....	15
3.1. Jelút csillapítás általános tényezői .....	16
3.2. Zajok .....	18
3.3. Interferencia .....	20
3.4. Energiamérleg kiszámítása .....	21
3.4.1. EIRP.....	22
3.4.2. Jelút csillapítás .....	22
3.4.3. Vevő nyeresége.....	23
3.4.4. Link margin.....	23
3.4.5. Jel-Zaj viszony (SNR) .....	23
3.4.6. Energiamérleg számítási példa .....	25
4. Fading .....	27
4.1. Fresnel zónák .....	28
4.2. Diffrakció okozta csillapítás .....	30
4.3. Large scale fading .....	30
4.4. Small Scale fading .....	32
5. Hullámterjedési modellek .....	34



5.1. Empirikus hullámterjedési modellek .....	34
5.1.1. Okumura modell .....	35
5.1.2. Hata modell.....	37
5.1.3. Ericsson 9999 modell.....	39
5.2. Determinisztikus hullámterjedési modellek.....	39
5.2.1. Multi Ray modell.....	40
5.2.2. Véges differenciák módszere.....	40
5.2.3. Végeselem-módszer.....	41
6. Geographic Information System (GIS).....	42
7. Fejlesztési környezet létrehozása.....	44
8. Alkalmazás fejlesztése.....	47
8.1. Alkalmazás működési alapelve, tervezete .....	47
8.2. A UI létrehozásának módszere .....	48
8.3. Szimulációs terület kijelölése .....	48
8.4. Szimulációs rács generálása (grid).....	51
8.5. Bázisállomás/Gateway pozíciójának megadása .....	53
8.6. DEM (Digital Elevation Model) használata .....	54
8.7. Terület típus meghatározása, kinyerése .....	55
8.8. Antenna karakterisztika felhasználása .....	57
8.9. Hullámterjedési csillapítás kiszámítása modellek segítségével.....	59
8.10. Szimulációs rácsok adatainak kiszámítása és elmentése .....	61
8.11. Elkészült program használati útmutatója .....	63
9. Hullámterjedési modellek tesztelése szimulációs alkalmazással.....	65
9.1. LoRaWAN hálózat bemutatása .....	65
9.2. Adatgyűjtésre használt LoRaWAN hálózat.....	66
9.3. Hullámterjedési szimulációk elvégzése .....	68
9.3.1. Alkalmazott paraméterek.....	69

9.4. Hullámterjedési szimulációk eredménye .....	69
9.4.1. Urban környezet.....	69
9.4.2. Suburban környezet .....	71
9.4.3. Rural környezet.....	72
9.4.4. Következtetések .....	72
10. Lefedettségek tervezése a hullámterjedési szimulációs alkalmazással .....	74
10.1. Alapvető paraméterek .....	74
10.2. Fading tartalékok meghatározása.....	75
10.2.1. Large scale fading (Shadowing) margin meghatározása .....	75
10.2.2. Small scale fading margin meghatározása.....	75
10.3. Energiamérleg összeállítása .....	76
10.4. Szimuláció elvégzése a QGIS plugin-el .....	76
11. Összegzés.....	82
Irodalomjegyzék .....	83

# 1. Bevezetés

A vezeték nélküli hálózatok tervezéséhez szükség van az elektromágneses hullámok terjedésének ismeretére. A technológia fejlődésével egyre fontosabb ezeknek az alapelveknek az ismerete és az elektromágneses hullámok terjedésének meghatározása. Főleg az új generációs (5G) mobilhálózatok egyre nagyobb frekvenciákat alkalmaznak, ennek következtében a cellák lefedett területe is csökken, egyre sűrűbben helyezik el a bázisállomásokat. A sűrűbben elhelyezett cellák és magasabb frekvencia tartományok következtében egyre fontosabb az elektromágneses hullámok terjedésének minél pontosabb szimulációja. Az elektromágneses hullámok terjedésének és a bázisállomások lefedettségének becslésére empirikus és determinisztikus hullámterjedési módszereket alkalmaznak. Az empirikus hullámterjedési modelleket tapasztalati és statisztikai úton hozzák létre, egyszerű őket használni, viszont nem képesek a térerősség értékek pontos meghatározására. A determinisztikus modellek pedig hullámterjedési egyenletek és jelenségek segítségével határozzák meg az elektromágneses hullámok terjedését. A determinisztikus módszer sokkal pontosabb lehet, de sokkal számításigényesebb (jelentős számítási kapacitást igényel, főleg nagyobb területek számítása esetén) és sokkal több, pontosabb adatra van szükség (fák, épületek, vízfelületek, épületek anyagai stb.). Figyelni kell az adatok hitelességére, mennyiségére, mert a hiányos vagy hibás adatok is okozhatják a determinisztikus modellek számítási hibáit.

A hullámterjedési modelleket 2D-ben vagy akár 3D-ben számítják ki, ezért szükség van egy rendszerre, amely képes a kiszámított terület adatait tárolni, betölteni, kezelni. A GIS (Geographic Information System) [1] szoftvereket szokás használni erre a feladatra, főleg a mai modern rendszerekben. A GIS rendszerek által nyújtott eszközökkel könnyedén lehet megjeleníteni, analizálni, kiszámítani a földrajzi területhez tartozó különböző értékeket. A gyakorlatban ezeket használják közművekhez, közigazgatáshoz, közigazgatáshoz, városrendezéshez, topográfiához, kartográfiához stb. A hullámterjedési modellek esetén könnyedén lehet menedzselni ezekkel a rendszerekkel a magasság értékeket, épületeket, földrajzi tulajdonságokat és azok metaadatait. Így adott pontban minden könnyen kiszámolható a térerősség, ha a megfelelő adatok ehhez megvannak. A számítások után pedig könnyedén megjeleníti a kiszámított térerősség értékeket, amivel már tud dolgozni a vezeték nélküli hálózat-tervező, hol megfelelő a lefedettség, hol kell még hangolni. Ezzel a módszerrel jelentős költségeket tudnak megspórolni a hálózat-tervezők. A bázisállomások, gateway-ek pontos

pozíciója előre tervezhető ezáltal. Amennyiben a szimulációt megfelelő körültekintéssel és pontossággal végezték el, a hálózat telepítését követően már csak kisebb módosításokra, finomhangolásra van szükség ahhoz, hogy a tervezett lefedettséget és teljesítményt biztosítsa a hálózat.

Én a QGIS szoftver felhasználva hoztam létre egy hullámterjedési szimulációs alkalmazást, amely empirikus modelleket alkalmazva számolja ki a térerősség értékeit. Empirikus hullámterjedési módszereket alkalmaztam, mivel a determinisztikus modellekhez nem találtam megfelelő mennyiségű és pontosságú adatbázisokat. Ez egy ingyenes és nyílt forráskódú szoftver. Rendkívül sok, már alaphelyzetben telepített eszközzel rendelkezik, amelyek megkönnyítik a térbeli számításokat. A sok felhasználónak és a nyílt forráskódnak köszönhetően nagyon sok plugin tölthető le hozzá, amely különböző, specifikus felhasználásra alkalmas. Az alkalmazást python programnyelven készítettem el, mivel maga a QGIS is ezzel a nyelvvel készült, konkrétan a PyQt keretrendszerrel. Ahhoz, hogy összehasonlíthassam a szimulált és valós mérési eredményeket, térerősség értékeket kell mérnem egy valós hálózaton. Ehhez egy LoRaWAN hálózatot alkalmazok. A LoRaWAN [2] hálózat segítségével Győr területén belül több helyen térerősség értékeket veszek fel, ezzel vetem majd össze a szimulációs értékeket.

A dolgozatban először a hullámterjedési alapismereteket, a különböző hullámterjedési modelleket és a GIS szoftverek felépítését ismertetem. Az elméleti áttekintést követően pedig a konkrét tevékenységet mutatom be. Ez magában foglalja a hullámterjedési szimulációs alkalmazás létrehozásának folyamatát, az alkalmazás működésének bemutatását majd az alkalmazását. A dolgozat legvégén pedig az alkalmazás által kiszámított térerősség értékeket összehasonlítom a valós mérési eredményekkel, ezzel megkapva, hogy milyen pontosan számolja ki a térerősség értékeket.

## 2. Elektromágneses hullámterjedés

### 2.1. Elektromos mező

Az elektromágneses sugárzás két egymásra merőleges, időben változó komponensből áll össze: elektromos és mágneses komponens. Mindkét komponens egyedi tulajdonságokkal bír: A hullámegyenletekkel való leírásukkal megkapjuk a hullámterjedés matematikai alapját.

Az elektromos töltés mértékegysége a coulomb. Az elektromos mezőt egy elektromos töltés hozza létre, és egy elektromos töltésre ható erő vektorral definiálják, általában  $E$ -vel jelölik. Az dielektromos eltolást az elektromos térerősség és a permittivitás határozza meg:

$$D = \epsilon E \quad (1)$$

Mivel az elektromos mező nem csak az elektromos eltolási vektortól, hanem az anyag, közeg vagy környezet permittivitástól is függ, amelyben az elektromágneses hullám terjed, érdemes ezzel is foglalkozni. A permittivitás egy dielektrikumhoz társított tulajdonság, ami megadja az anyagban lévő kötött töltések számát, mértékegysége pedig Farad/méter. A permittivitást a vákuum többszöröseként adják meg ( $\epsilon_0$ ). Ezt hívják relatív permittivitásnak ( $\epsilon_r$ ) vagy az anyag dielektrikum állandójának.

Két különböző dielektrikum közötti határ elhajlítja az elektromos mező vektort. Ez annak a következménye, hogy a dielektrikum határra merőleges elektromos eltolási vektor állandó a határ mentén, míg az elektromos mező párhuzamos komponense állandó a határ mentén.

Azokat az anyagokat, amelyekben szabad töltéshordozók vannak, vezetőknek hívjuk. A vezetőket a vezetési képességük szerint ( $\sigma$ ), vagy annak reciprok értékével, ellenállással ( $\rho$ ) karakterizálják. A vezetőképesség mértéke a Siemens/méter, az ellenállás pedig Ohm/méter. A nagyon alacsony vezetőképességű anyagokat szigetelőknek nevezik. A tökéletes dielektrikumnak nulla a vezetőképessége, miközben a legtöbb valós anyagnak dielektromos állandója és nem nulla vezetőképessége van. Ahogy a dielektrikum vezetőképessége nő, úgy egyre veszteségesebbé válik az elektromágneses hullámok tekintetében. Amikor a nem ideális anyagok hatását vesszük figyelembe az elektromágneses hullámokon, a permittivitást egy komplex számként lehet értelmezni, amely a dielektromos állandó, a vezetőképesség és a frekvencia függvénye.

Statikus mező nem létezhet egy vezetőben, mivel a mező hatására a szabad töltéshordozók úgy mozognak, hogy kiegyenlítsék az elektromos mezőt. Ezért, amikor egy

vezető anyagot elektromos térbe helyezünk, elegendő mennyiségű szabad töltéshordozó fog a vezető anyag felszínére mozogni, hogy kiegyenlítsék az elektromos mezőt, így felületi töltéssűrűség alakul ki. Ez a viselkedés például kritikus a kondenzátorok működéséhez.

## 2.2. Mágneses mező

Statikus mágneses mezőt hozhat létre az állandó (vagy lineárisan növekvő) áram folyása vagy a mágneses anyagok. A mágneses mezőnek van intenzitása és iránya is. Az elektromos mezőhöz hasonlóan ezt is két részre lehet bontani: Mágneses térerősség ( $H$ ) és Mágneses fluxussűrűség ( $B$ ). A nem mágneses anyagok esetén a mágneses mező és a mágneses fluxussűrűség között lineáris összefüggés van, amelyet a permeabilitás ( $\mu$ ) határoz meg.

$$B = \mu H \quad (2)$$

A permeabilitás mértékegysége a henry/méter, ahol a henry az indukció mértékegysége. A permeabilitást itt is a vákuum permeabilitása és a relatív permeabilitás adja meg:

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (3)$$

Az áram nagysága az őt létrehozó mágneses mező térerősségétől és a közeg permeabilitásától függ.

## 2.3. Elektromágneses hullámok

Az elektromágneses hullámok terjedésének alapjául a Maxwell egyenletek szolgálnak [3]. A Maxwell egyenletek lényege, hogy egy időben változó elektromos mező mágneses mezőt hoz létre, és egy időben változó mágneses mező pedig egy elektromos mezőt hoz létre. Egy gyorsuló elektromos töltés egy időben változó mágneses mezőt hoz létre.

Nagyobb távolságok hullámterjedési szimulációja esetén síkhullámként lehet kezelni az elektromágneses sugárzásokat. Habár minden elektromágneses hullám gömbhullámnak tekinthető, kellő távolságban akkora lesz a gömb sugara, hogy már megfelelő közelítésnek számít, ha síkhullámnak tekintjük. Az elektromágneses hullámok terjedési iránya, a mágneses komponens és elektromos komponens mind merőleges egymásra. Síkhullámok esetén a terjedési irányra merőleges síkon az  $E/H$  fázisa és iránya mindenhol állandó. A haladási irány vektorának megjelenítése jelentősen leegyszerűsíti az analizálását és a vizualizációját. Ezt hívják sugár elméletnek (Ray Theory). A sugár elmélet nagyon hasznos síkhullámok esetén (a forrástól nagy távolságra), viszont a közel térben már csak bizonyos esetekben alkalmazható.

Az időben változó elektromos és mágneses mezők közötti kapcsolatot az alábbi formában lehet matematikailag kifejezni:

$$\nabla \times \bar{E} = -\mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \varepsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (5)$$

A Maxwell egyenletek differenciál alakjából levezetett hullámegyenletek pedig az alábbiak:

$$\Delta \bar{H} = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \quad (6)$$

$$\Delta \bar{E} = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (7)$$

Ezek a parciális differenciálegyenletek határozzák meg az alapvető elektromágneses hullámterjedési kölcsönhatásokat. Az elektromágneses hullám sebességét is a hullámegyenletből lehet megkapni, amely a közeg permittivitás és a permeabilitás függvénye:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (8)$$

## 2.4. Elektromágneses spektrum felosztása

Az elektromágneses spektrumok különböző sávokra osztották fel felhasználás szempontjából. Az felosztott elektromágneses spektrum sávok hivatkozásaira leggyakrabban az alábbi két felosztást alkalmazzák [4].

1. Táblázat: Frekvenciasávok

Frekvenciasáv	Rövidítés	Frekvenciatartomány
Ultra alacsony frekvencia	ULF	< 3 kHz
Nagyon alacsony frekvencia	VLF	3 – 30 kHz
Alacsony frekvencia	LF	30 – 300 kHz
Közepes frekvencia	MF	300 kHz – 3 MHz
Magas frekvencia	HF	3 – 30 MHz
Nagyon magas frekvencia	VHF	30 – 300 MHz
Ultra magas frekvencia	UHF	300 MHz – 3 GHz
Szuper magas frekvencia	SHF	3 – 30 GHz
Extra magas frekvencia	EHF	30 – 300 GHz

A második világháború során kezdték el karakterekkel elnevezni a radarokhoz használt frekvenciasávokat. A későbbiekben aztán a műholdas technológiák által használt frekvenciasávokat is így nevezték el.

2. Táblázat: Frekvenciasávok

Frekvenciasáv	Frekvenciatartomány [GHz]
L	1 – 2
S	2 – 4
C	4 - 8
X	8 - 12
Ku	12 - 18
K	18 - 27
Ka	27 - 40

## 2.5. Hullámterjedési módok

Az elektromágneses hullám terjedését a Maxwell egyenletek írják le, amely szerint a váltakozó elektromos mező mágneses mezőt hoz létre, a váltakozó mágneses mező pedig változó elektromos mezőt. Az elektromos és a mágneses mező kapcsolatban vannak egymással, az egyik függ a másiktól. A legtöbb rádiófrekvenciás terjedési modell esetén elegendő, ha hullámot egy nyíllal vizualizáljuk (Poynting vektor) a haladási irány felé mutatva.



### 2.5.1. Line-of-Sight (közvetlen rálátás - LOS) hullámterjedés és a rádióhorizont

A szabad térben az elektromágneses hullámok terjedését úgy modellezzük, hogy a tér minden irányába haladnak a forrástól kifelé, egy gömb formát létrehozva. Az ilyen forrást izotrópikus sugárzónak neveznek, de a valóságban nincs olyan forrás, amely ennek pontosan megfelel (szőrös golyók elmélet). A forrástól való növekedés folytán a gömbhullám átalakul síkhullámmá, és a hullámot így modellezzük. Az elektromágneses hullám haladási irányát minden esetben az elektromos és a mágneses komponens vektor szorzata határozza meg, amely a Poynting vektor. Amennyiben a Poynting vektort elosztjuk a közeg impedanciájával, úgy megkapjuk a haladási irányát és a teljesítménysűrűségét. A forrást körülvevő képzeletbeli gömb felületén az energiasűrűségét az alábbi képlettel lehet kiszámítani:

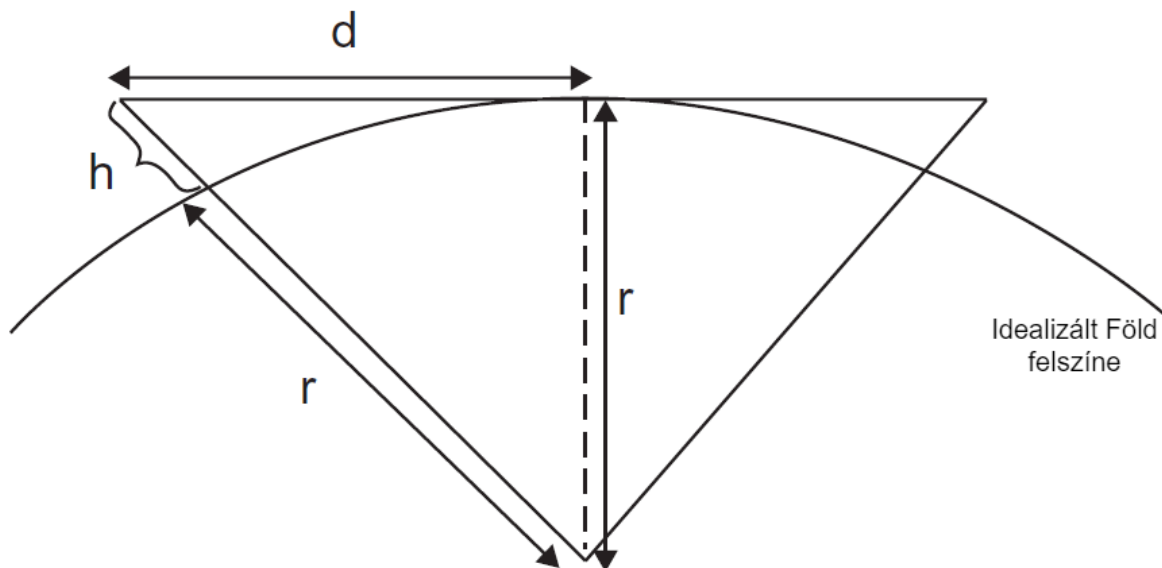
$$S = \frac{P}{4\pi d^2} \quad (9)$$

Ahol **S** a teljesítménysűrűség, **P** az összes teljesítmény, **d** pedig a képzeletbeli gömb átmérője. Az egyenletből látszik, hogy a teljesítménysűrűség fordítottan négyzetesen arányos a távolsággal. Vákuumban a terjedési sebessége megegyezik a fénysebességgel, de a levegőben is közel azonos ezzel az értékkel. A hullámhossz és a frekvencia pedig az alábbi módon függ egymástól:

$$C = \lambda f \quad (10)$$

Ahol a **C** a fénysebesség,  **$\lambda$**  a hullámhossz és **f** a frekvencia.

Közvetlen rálátás esetén szükséges lehet figyelembe venni a Föld sugarát. A föld görbülete korlátot szab a LOS hullámterjedésnek, kifejezetten akkor, ha az adó és vevő közötti távolság sokkal nagyobb, mint az antennák magassága. Ilyen esetben lehet, hogy nem is létezik LOS hullámterjedési mód. Ezt a legegyszerűbben úgy lehet modellezni, hogy a Földet az egy gömbnek tekintjük, amely sugara megegyezik a Föld egyenlítőnél lévő sugarával.



1. Ábra: LOS hullámterjedési mód a föld görbületét figyelembe véve

Így a maximális távolság adó és vevő között:

$$d^2 + r^2 = (r + h)^2 \quad (11)$$

Tovább egyszerűsítve:

$$d^2 = (2r + h)h \quad (12)$$

A maximális távolság tehát:

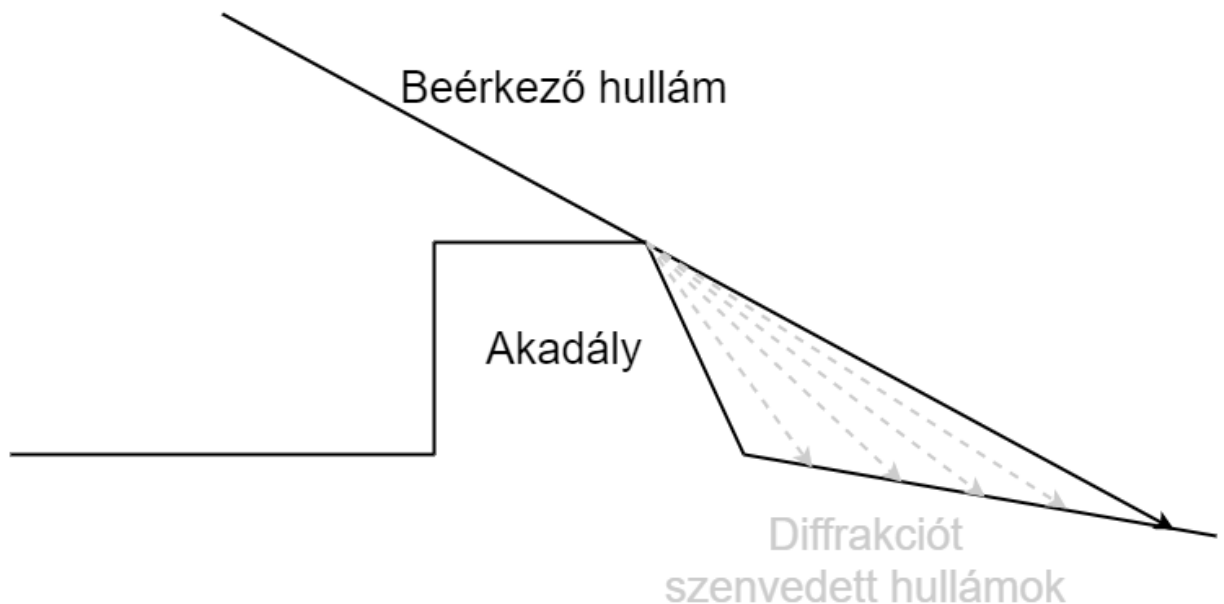
$$d = \sqrt{2rh} \quad (13)$$

**d** az adó és a rádió horizont közötti távolság. LOS hullámterjedési mód esetén ez az elméleti maximum távolság, ahol kapcsolatot lehet kiépíteni. A Föld sugara az egyenlítőnél 6378 km [5]. Az atmoszféra tipikusan lefelé hajlítja az elektromágneses hullámokat a magasság növekedésével csökkenő légnyomás miatt (változó elektromágneses közeg). Az elektromágneses hullám hajlása miatt a Föld sugarát módosítják, hogy megkapják azt az elméleti Föld sugarat, amely figyelembe veszi ezt a hullám hajlási jelenséget. Ehhez meg kell szorozni a tényleges sugár méretet 4/3-al. Ekkor a Föld sugara 8054 km-re módosul.

Értelemszerűen ezért a rádiós horizont távolabbra van, mint amit az elektromágneses hullámok hajlását figyelembe nem vevő módszer esetén.

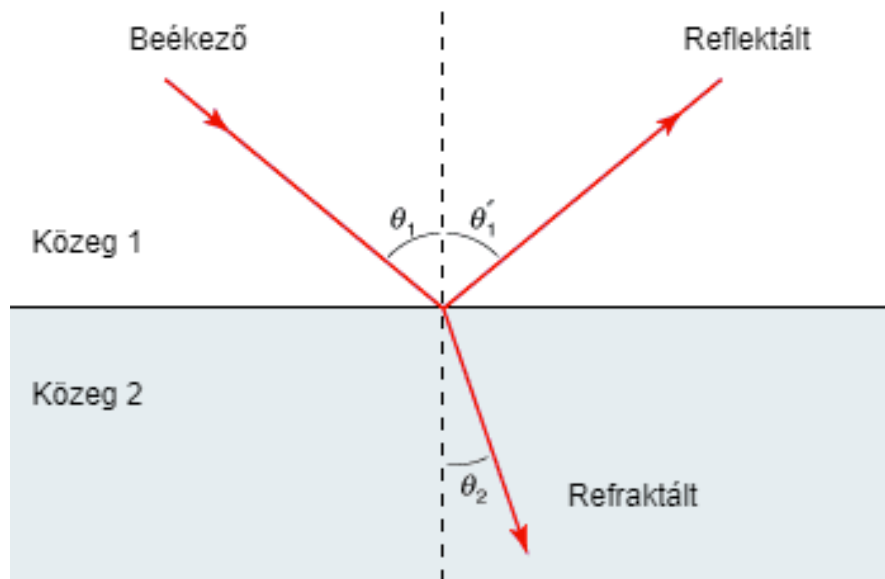
### 2.5.2. Nem közvetlen rálátású hullámterjedés (Non-LOS)

Számos, nem közvetlen, indirekt hullámterjedési mód létezik. Az indirekt hullámterjedési mechanizmusok fajtája nagy mértékben függ az elektromágneses hullám frekvenciájától. Például a VHF és az UHF frekvenciákon az indirekt hullámterjedési módokat gyakran használják, például mobil vagy WLAN hálózatok esetén. Természetesen ezeken a frekvenciákon is használható az LOS terjedési mód, de közvetlen rálátás hiányában a refrakció, diffrakció és a reflexió a fő hullámterjedési mód. Diffrakció esetén az elektromágneses hullám egy késélszerű akadályhoz ér (például egy ház teteje vagy oldala) és az akadály „árnyékába” is tovább terjed az elektromágneses hullám (kisebb teljesítménnyel).



2. Ábra: Diffrakció jelenség késélszerű akadálynál

Amikor a közeg inhomogén, az elektromágneses hullám elhajlik a változó dielektrikum miatt. Erre tipikus példa a Föld légköre, ahol az elektromágneses hullám nem egyenesen halad, hanem a Föld felé hajlik az egyre ritkább légkör következtében. Ezen kívül még kialakul akkor is, ha új közegbe lép be az elektromágneses hullám. Ilyenkor a dielektrikum határnál más a beesési szög a két dielektrikum oldalán (például a levegőből vízbe lép bele az elektromágneses hullám).



3. Ábra: Reflexió és refrakció

Reflexió során az elektromágneses hullám szintén egy dielektrikum átmenethez ér, viszont itt nem hatol be az új közegbe, hanem a két dielektrikum határáról, a beesési szöggel megegyező szögben visszapattan, reflektálódik. Bizonyos frekvenciáknál így nagyon sok indirekt útvonalon eljuthat a forrásból a vevőhöz ugyan az a jel. Ezt nevezzük többutas terjedésnek. Ilyenkor ugyan az a hullám vagy jel több úton, időben eltolva érnek oda a vevőhöz. Ez főleg a sűrűn lakott területeken történik, ahol az épületek között pattoghat az elektromágneses hullám, míg végül elér a vevőhöz.

A horizonton túli terjedési módok:

- Ionoszférikus: Az ionoszférában történő reflexiók, refrakciók következtében jön létre;
- Troposzférikus: A troposzférán keresztül haladnak;
- Felületi hullámok: Két dielektrikum között haladnak (például a föld és az ionoszféra).

#### 2.5.2.1. Indirekt hullámterjedés

Ez a hullámterjedési mód leginkább a földfelszíni hullámterjedést jellemzi, ahol a LOS terjedést különböző objektumok akadályozzák meg (fák, épületek stb.). Ezekben az esetekben az épületek vagy objektumok következtében kialakult refraktált vagy reflektált elektromágneses hullámok megfelelő vételt biztosíthatnak a kommunikáció biztosításához. A

közvetlen hullámterjedés hatékonysága attól függ, hogy a kommunikációs hálózatba mekkora tartalékot terveznek. A működési frekvenciáknak jelentős hatása van az indirekt terjedési módra, a kisebb frekvenciák a leginkább használhatók. A HF frekvenciatartományba tartozó hullámok könnyen áthatolnak épületeken és egyéb akadályokon, a VHF és UHF frekvenciák is, viszont már nagyobb teljesítmény veszteséggel, valamint ezeken a frekvenciákon már dominánsabb a diffrakció vagy refrakció szerepe. Az UHF felett viszont már olyan nagy a szabadtéri csillapítás, hogy az indirekt terjedési mód már nem hatékony. Amikor az akadály méretei nagyok a hullámhosszhoz képest, akkor hajlamos az elektromágneses hulláma reflexióra vagy a refraxióra a szórás helyett. Szórás akkor jön létre, amikor az elektromágneses hullám egy egyenetlen felületre érkezik, és innen sok irányba reflektálódik tovább. Főleg ezekkel a hullámterjedési módokkal foglalkozok, ugyanis a későbbiekben tesztelt és felhasznált hullámterjedési modelleket UHF (~900 MHz) frekvenciasávban használok, ahol a troposzférikus, ionoszférikus hullámterjedési módok már nem számottevőek.

#### 2.5.2.2. Troposzférikus hullámterjedés

A troposféra a Föld atmoszférájának legalsó, 10 km magas rétege, ahol az időjárási jelenségek mennek végbe. A troposzférikus hullámterjedés a különböző hőmérsékletű és páratartalmú rétegekről való reflexióból és refrakcióból áll. A troposzférikus hullámterjedés kevésbé megbízható az ionoszférikus terjedésnél, de elég gyakran létrejön ahhoz, hogy a tervezések folyamán figyelembe vegyék. Ezt a hatást leggyakrabban „duct”-nak nevezik, amikor kialakul kettő olyan réteg a troposzférában, amely között az elektromágneses hullám halad. Ilyen jelenségek esetén rendkívül nagy távolságra lehet kommunikáció kapcsolatot létrehozni (akár 1000 km-re is) [6].

#### 2.5.2.3. Ionoszférikus hullámterjedés

Az ionosféra egy ionizált plazma réteg a Föld körül, amely szükséges az ionoszférikus hullámterjedéshez, és a HF frekvenciatartományban, a rádióhorizonton túli kapcsolatok kiépítését teszi lehetővé. A műholdas kommunikációban is figyelembe kell venni, mert az elektromágneses hullámoknak át kell mennie ezen a rétegen. Az ionosféra áthatolása közben az elektromágneses hullám szóródik, csillapodik, megváltozik a polarizációja a csoportos késleltetés és szórás következtében.

Az ionoszférikus HF kommunikáció valamikor a nagytávolságú kommunikáció alapjaként szolgált. Az utóbbi időkben viszont már inkább a rövidhullámú műsorszórók és a rádióamatőrök használják ezt a frekvenciasávot. Az ionoszférikus hullámterjedés néha

interferenciát okozhat a HF és VHF frekvenciatartományokban működő rendszerekben, amikor egy geográfiai helyről származó jelek szétszóródnak az ionoszférán és egy másik helyen, azonos frekvencián működő rendszerhez jutnak el. Ezt a jelenséget néha úgy nevezik, hogy „skip”.

Az ionoszférikus réteg kb. 60 km-től 1300 km magasságig terjed. Hullámterjedési szempontból akkor lényeges ez a réteg, ha a rétegben lévő részecskék ionizáltak, töltéssel rendelkeznek. Az ionizáció fő forrása a Nap [7]:

- röntgen sugárzás;
- ultraibolya sugárzás;
- részecske sugárzás (napszél).

Egyéb ionizáló forrás:

- kozmikus sugárzás;
- légkörbe bejutó és elégő meteoritok.

Az ionoszféra különböző rétegekből áll. A különböző rétegek eltérő tulajdonságokkal, elnyelési hullámhosszal rendelkeznek (a különböző gázok csak bizonyos, sajátos hullámhosszokon nyelik el az elektromágneses hullámokat), valamint eltérő napszakokban alakulnak ki. A 100 km feletti légkör nem homogén:

- különböző elnyelési hullámhosszú gázokból áll;
- a nyomás nem állandó;
- a hőmérséklete nem állandó.

Ennek következménye:

- több ionizációs maximum keletkezik;
- az ionizációs maximumok között az ionizáció foka átmenetileg csökken;
- az egyes rétegeken belül az elektron sűrűség közel parabolikus eloszlású.

Az ionizációs rétegek:

### 3. Táblázat: Ionosféra rétegek

Réteg elnevezés	Magasság [km]
C	10 - 50
D	50 - 90
Es	90 – 100
E	90 – 130
F	200 – 400
F1	130 – 210
F2	210 – 600
Fs	200 – 600
G	> 600

#### **D réteg**

A Föld felszíne felett 50-90 km magasságban helyezkedik el. A sűrű elektronütközések következtében az 1-10 MHz közötti frekvenciasávban akkora a csillapítása, hogy a beérkező hullámokat teljesen elnyeli. Azonban az alacsony frekvenciájú elektromágneses hullámokat (20 kHz körül) visszaveri. Tipikusan nappali réteg, az oxigén és nitrogén molekulák ionizációja következtében jön létre. Napnyugta után az ionizáció nagyon gyorsan megszűnik. Amennyiben igen erős a nap aktivitása, úgy 50 km alá is mehet a réteg, ilyenkor már a C rétegről beszélünk és a 100 kHz feletti hullámokat nagymértékben csillapítja.

#### **E réteg**

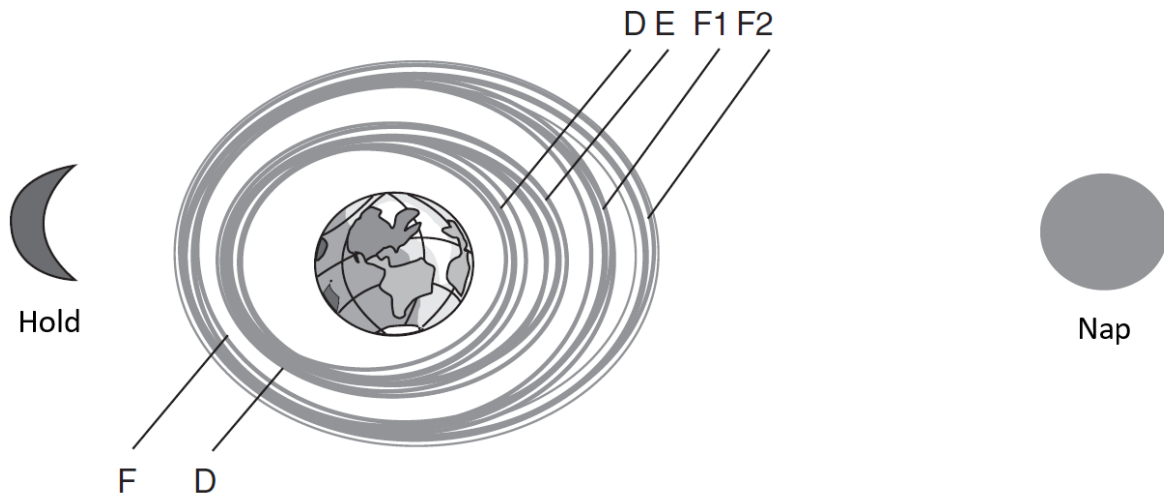
Az ionosféra legstabilabb része, nappal a nap sugárzása ionizálja a molekulákat. Az éjszaka folyamán legyengül ugyan, de nem teljesen szűnik meg, mert maradnak benne ionizált molekulák, amelyek nem rekombinálnak (bizonyosan hozzájárulnak ehhez a meteoritok). Az Es réteg rendszertelenül jelenik meg. Általában az E réteg alján jön létre. A réteg megjelenése káros lehet az F rétegre, mert a frekvenciatartományának egy része egybeesik az F réteg frekvenciatartományával. Azonban, ha a kialakulását előre jelzik, akkor a közeli területek magasabb frekvenciával is besugározhatók.

#### **F1 réteg**

Nappali réteg, az E réteghez hasonlóan újul meg minden nap. Éjszaka az elektronkoncentrációja a nappali 10%-ra csökken, így ilyenkor az F2 réteg a domináns.

## F2 réteg

A legfontosabb réteg a nagytávolságú rádióösszeköttetések szempontjából. Az ionizációs menete azonban nem olyan szabályos, mint az E vagy F réteg esetén. Ez nagymértékben függ a földrajzi helytől és a naptevékenység intenzitásától. Télen 250 km, tavasszal és ősszel pedig 350 – 400 km magasan alakul ki.



4. Ábra: Ionoszféra rétegek



### 3. Energiamérleg (link budget)

A vezeték nélküli hálózatok tervezése esetén (pl.: mobil, WLAN, DVB-T hálózatok) fontos az alapos tervezés, különben az elvárt teljesítmény nem teljesül, vagy túltervezik a hálózatot, ezzel feleslegesen költségessé téve a hálózatot. Ilyenkor a legfőbb paraméterek a vételi térerősség, a vételi jelet kísérő zaj és az átviteli közegben fellépő csillapítások (többutas interferencia, közeg csillapítás, fading stb.).

Az összeköttetés tervezéséhez szükség van az adó által kisugárzott EIRP (Effective Radiated Power – Effektív kisugárzott teljesítmény) értékére, valamint az összes olyan csillapításra, amelyet elszenved az elektromágneses hullám, mielőtt elérne a vevőhöz. Az EIRP az a teljesítmény, amelyet az adó a fő sugárzási irányba kisugároz. Bizonyos esetekben a vevőnél lévő zajpadlót is meg kell határozni a minimális térerősség meghatározásához, amikor a vevő még képes dekódolni az üzeneteket. Az energiamérleget logaritmikus mértékegységben, dB-ben számítják ki, a könnyű kezelhetőség érdekében (csak összeadni és kivonni kell, közvetlen összehasonlítható a teljesítményszintekkel, hiszen azokat is dBm-ben vagy dBW-ben szokás megadni).

A link margin-t (biztonsági tartalék) a várható vételi térerősség és a vevő érzékenységből (jel érzékeléséhez szükséges legkisebb térerősség szint) számítják ki. A link margin adja meg, hogy mekkora tartalék van a rendszer átvitelében, mekkora csillapítást képes elviselni a kommunikáció megszakadása nélkül. A link margin legegyszerűbb kiszámítási módja:

$$\text{Link margin} = \text{EIRP} - L_{\text{path}} + G_{\text{Rx}} - \text{TH}_{\text{Rx}} \quad (14)$$

Ahol:

- EIRP: Az adó effektív kisugárzott teljesítménye [dBm vagy dBW];
- $L_{\text{path}}$ : Az adó és vevő közötti közeg csillapítása [dB];
- $G_{\text{rx}}$ : A vevő antennájának nyeresége;
- $\text{TH}_{\text{rx}}$ : A vevő érzékenysége, ahol még biztosítható az elvárt minimum működés (például minimum BER, MER, üzenet vételi arány stb.).

A link margin mértéke sok mindentől függ, a moduláció fajtájától, a kisugárzott teljesítménytől, a távolságtól, az antennák nyereségétől, kábelek csillapításától. A moduláció azért fontos, mert ezzel a minimum jel-zaj viszony is változik (SNR). A jelút csillapítása a

legfontosabb, ez jelenti a legnagyobb csillapítást és a legnagyobb bizonytalanságot is. Ezt a jelút csillapítást számoljuk ki a különböző hullámterjedési modellek segítségével. Ez a jelút csillapítást a szabadtéri csillapításból (Free Space Loss -FSL) és az egyéb akadályok okozta csillapításokból áll (szórás, anyag okozta csillapítás, refrakció, reflexió stb.).

### 3.1. Jelút csillapítás általános tényezői

A jelút csillapítás – mint már korábban említve volt – az egyik legfontosabb alkotóeleme az energiamérleg kiszámításának, hiszen ez a legbizonytalanabb és ezt e legnehezebb meghatározni. A jelút csillapítás magában foglalja a szabadtéri csillapítást, a gázok és csapadék okozta atmoszférikus csillapítást, fading csillapítást és egyéb csillapításokat, amelyek a frekvencia függvényében változnak.

Amikor a jelút csillapítás legnagyobb részét a szabadtéri csillapítás teszi ki (kevés akadály, közvetlen rálátás), akkor elegendő lehet a szabadtéri csillapítás meghatározása, ennek módja:

$$FSL = 32,4 + 20 \log d + 20 \log f \quad (15)$$

A fenti egyenletben a távolság (d) km-ben, a frekvencia (f) pedig MHz-ben van megadva. Érdekes, hogy a frekvencia növekedésével a szabadtéri csillapítás is nagyobb. Ennek magyarázata a hatásos felületben keresendő. Ha a hullámhossz nagyobb, akkor állandó nyereség mellett nagyobb a hatásos felület és a vevőantenna nagyobb teljesítményt vesz fel a térből [8]. A hatásos felület képlete:

$$A_h = \frac{P_v}{S_1} \quad (16)$$

Ahol:

- $A_h$ : hatásos felület;
- $P_v$ : vevőantenna által felvett teljesítmény;
- $S_1$ : a vevőantenna helyén a teljesítménysűrűség.

A nyereség képlete pedig:

$$G = \frac{S_1}{S_0} \quad (17)$$

Ahol:

- $G$ : nyereség;

- $S_1$ : a vevőantenna felületegységén áthaladó teljesítmény P pontban;
- $S_0$ : a viszonyítása antenna felületegységén áthaladó teljesítmény P pontban.

Állandó nyereség esetén az  $S_1$  érték nem változik (mert a viszonyítási antennát sem változtatjuk, ennek  $S_0$  értéke pedig állandó). A hullámhossz csökkentésével (ezzel a frekvencia növelésével) a hatásos felület is csökken. Mivel az  $S_1$  állandó és az  $A_h$  csökken, ezért a  $P_v$  is csökken. Ezért nő a szabadtéri csillapítás a frekvenciával.

Ezen kívül még számos tényező befolyásolja a jelút csillapítást és a jel-zaj viszonyt. Ezek a tényezők a használt berendezések tulajdonságaitól függenek, viszont a gyártók nem minden esetben adják meg ezeket. Ilyen esetben egy tapasztalt tervező ezeket az értékeket kellő pontossággal meg tudja becsülni. Ilyen tényezők például a sáv korlátozás, modulációs veszteség. A különböző szűrők szabályozzák az kisugárzott jel sáv szélességét, azonban beiktatási csillapítást visznek a rendszerbe.

Ha radome anyaggal takarják el az antennát (időjárás elleni védelem vagy esztétika miatt), akkor ez csökkentheti az antenna nyereségét és növelheti a zajt. Ez a hatás tovább súlyosbodhat, ha a radome burkolatra szennyeződés kerül (sár, víz). Továbbá bármilyen kábel, hullámvezető, csőtápvonal csillapítást és zajt visz be a rendszerbe. Fontos, hogy ezek a kábelek, csőtápvonalak ne sérüljenek, megfelelő frekvencián működjenek.

Egy másik fontos tényező a vevő és adó antenna. A pont-pont összeköttetésekhez leggyakrabban irányított antennákat alkalmaznak, míg a pont-multipont összeköttetések esetén pedig körsugárzókat (vagy több irányított antennával alakítják ki a körsugárzót). A kisebb nyereségű antennák optimális esetben nagyobb területet sugározná be, ezért használják például műsorszórásra vagy mobil hálózatok kiépítéséhez, míg a mikrohullámú összeköttetésekhez irányított antennákat (pl.: parabola antenna). Minél nagyobb az antenna nyeresége, annál nagyobb a link margin is. Ezt kétféleképpen használhatják ki: nagyobb távolság esetén is kialakíthatják a kommunikációs csatornát vagy megtartják a távolságot, viszont biztosabb kommunikációt kapnak ezzel, nagyobb csillapításnak kell kialakulnia az adó és vevő között ahhoz, hogy a kapcsolat megszakadjon.

Az elektromágneses hullámok polarizációját is figyelembe kell venni. Fix telepítésű rendszerek esetén ezzel nem kell foglalkozni, itt ritkán történik meg, hogy az elektromágneses hullám polarizációja megváltozik. Ez inkább a mobil és műhold rendszerek esetén jelentkezik, aminek következtében további csillapítást adódik a jelúthoz. Végezetül pedig még figyelembe

kell venni az atmoszférikus jelenségek okozta csillapítást. A legtipikusabb jelenség az eső, köd vagy a magas páratartalom, illetve a gázok okozta csillapítás (főleg oxigén és nitrogén). Ezek frekvencia szelektíven csillapítják az átvitelt. Egyes alkalmazásoknál jobban figyelembe kell venni (főleg magasabb frekvenciákon).

## 3.2. Zajok

A legfontosabb vevő tulajdonság, amelyek meghatározzák az összeköttetés minőségét a vevőérzékenység. A vevőérzékenység a legalacsonyabb jelszint, amely elegendő ahhoz, hogy a vevő detektálja és dekódolja a rádiófrekvenciás jeleket megadott kritériumoknak megfelelően. Ha ezt az érzékenységet nem adják meg, akkor a minimum SNR-re vagy bit energia/zaj spektrális teljesítménysűrűségre van szükség ennek meghatározására. A bit energiát úgy kapjuk meg, ha az adó kisugárzott teljesítményét elosztjuk a sebességgel (és nem a szimbólum sebességgel). A zaj spektrális teljesítménysűrűsége pedig megadja, hogy a 1 Hz sáv szélességben mekkora a zaj teljesítménye. Ennek a kettő tulajdonságnak az aránya adja meg a bit energia/zaj spektrális teljesítménysűrűség arányát ( $E_b/N_0$ ) [9].

A legtöbb földfelszíni vezeték nélküli hálózat esetén a zajszintet a vevő első fokozatának tulajdonságai és a sáv szélesség határozza meg. A vevő zaját az elektronok hőmérséklet gerjesztett mozgása okozza, amit Brow-mozgásnak neveznek. Ezt a zajt Gauss amplitúdó eloszlással és konstans spektrális teljesítménysűrűséggel ( $N_0/2$  – azaz az összes frekvenciatartományban állandó) modellezik. Ez a termikus zaj összeadódik, így a termikus zajt additív fehér Gauss zajként jellemzik (AWGN – Additive White Gaussian Noise).

Az elméleti termikus zaj teljesítménye illesztett terhelés esetén:

$$N = KT_0B \quad (18)$$

Ahol:

- $K = 1.38 \times 10^{-23}$  [J/K] (Boltzman állandó)
- $T_0 = 290$  K (Standard zaj hőmérséklet)
- $B = A$  zajjal megegyező sáv szélessége [Hz]

Ez adja meg egy tökéletes vevő bementére jutó zaj mennyiségét (illesztett lezárás esetén, pl.: antenna). A zaj sáv szélességével megegyező sáv szélesség annak az ideális szűrőnek a sáv szélessége, amely ugyan akkora teljesítményű fehér zajt enged át, mint a vizsgált

rendszerben lévő zaj. A legtöbb digitális rendszerben ezt az értéket az alábbi alapján lehet meghatározni (megközelítőleg):

$$B_N = \frac{1}{T_S} [Hz] \quad (19)$$

A  $T_S$  megegyezik a szimbólumidővel. A teljes zajteljesítmény pedig az alábbi szerint számítható ki (egyetlen komponens esetén):

$$N [dBm] = -204 - \frac{W}{Hz} + 10 \log B - Hz + F [dBW] \quad (20)$$

Ahol  $F_{dB}$  a zajtényező (noise figure).

$$F = 1 + \frac{T_e}{T_0} \quad (21)$$

Egy rendszerben több elemet köthetnek egymás után (kaszádolás), és a korábbiakban már említettem, hogy ez a zaj additív, vagyis összeadódnak. Ilyenkor ugyan úgy ki kell számolni a teljes zajteljesítményt azzal a különbséggel, hogy a zajtényezőt úgy kell meghatározni, hogy az egymás után kapcsolt elemek nyereségét is figyelembe kell venni [10]. Ilyenkor a teljes rendszerre vetített zajtényezőt az alábbi módon lehet megkapni:

$$F_{total} = F_1 + \frac{F_2}{G_1} + \frac{F_3}{G_1 G_2} + \frac{F_4}{G_1 G_2 G_3} + \dots \quad (22)$$

Ebből látszik, hogy a teljes rendszert figyelembe véve a zajszintet leginkább a legelső elem befolyásolja a zajtényezőjével és a nyereségével, valamint egy veszteséges, nagy csillapítású elem növeli a zajszintet. A zajszint csökkentése érdekében ezért sokszor egy LNA-t (Low Noise Amplifier) helyeznek el legelső elemként, mert ennek az erősítőnek kicsi a zajszintje.

A termikus zajon kívül még számos más zajforrás is jelentős lehet. Néhány példa ezekről:

- Helyi oszcillátor fáziszaja: A helyi oszcillátorokat egy jel modulációjának és demodulációjának referenciájaként használják. Az oszcillátor fázis jitter-e a jel energiájának frekvenciatartományon belüli eloszlását eredményezi a berendezés

adó és vevő oldalán egyaránt. A legtöbb esetben ezeket a frekvenciatartományban elosztott termékeket nem tudják visszanyerni a berendezések. A legtöbb sávon belüli termék zajnak tekinthető.

- Intermodulációs termékek: Néhány rendszer egyszerre több vivőt alkalmaz, amelyeket ugyan az a szélessávú erősítő erősít fel. Az erősítő nem lineáris tulajdonsága következtében intermodulációs termékek keletkezhetnek a vivő frekvenciák egész többszöröseinek különbségeinél és összegeinél.
- Szinkron veszteség: A nem megfelelő szinkronizáció következtében a vevő jel detektálási képessége csökken, valamint további zajt generálhat a rendszeren belül.

### 3.3. Interferencia

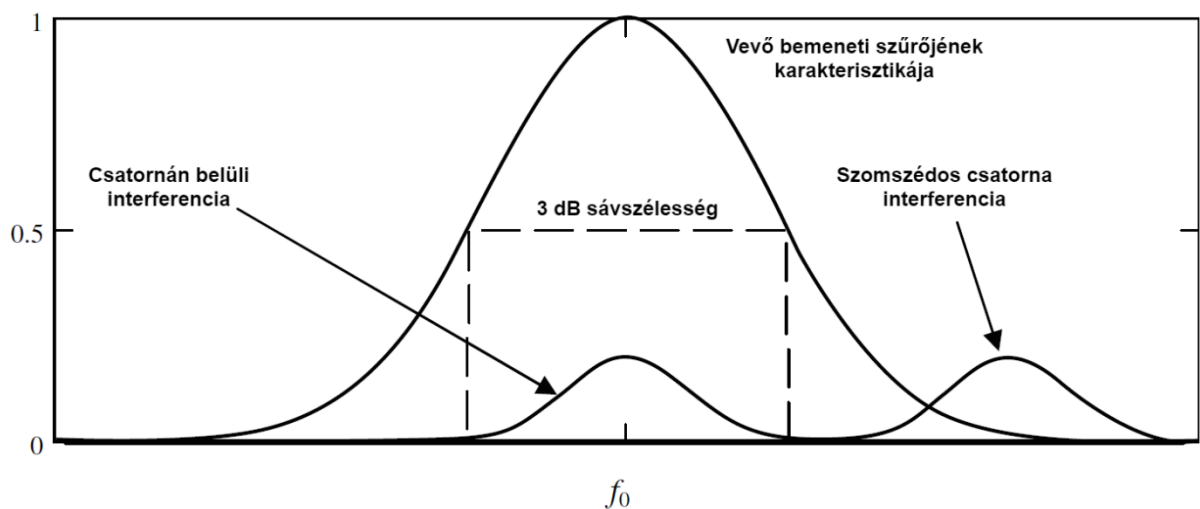
Az adóban, vevőben vagy magában a csatornában impulzus átfedéseket okozhatnak a sávszélesség korlátozások. A digitális hálózatok csatornái szorosan egymás mellett helyezkednek el általában, ezért a digitális impulzusokat megfelelő odafigyeléssel kell létrehozni, hogy a csatornák ne fedjék egymást. Ahogy a szűrők egyre keskenyebbek, a karakterisztikájuk pedig egyre meredekebb lesz, az impulzusok egyre hajlamosabbak az időben jobban eloszlanak, így egymást fedhetik. Ezt hívják szimbólumközi áthallásnak (ISI) és jelentősen csökkentheti a hálózat teljesítményét.

Ha egyszerre több vivőt sugároz ki az adó, akkor a nem lineáris közeg következtében intermodulációs termékek jöhetnek létre, amelyek zajként jelennek meg. Hasonló jelenség jön létre egy erős, szomszédos csatornában lévő jel esetén, amikor a vevő telítődésbe kerül ennek hatására és nem lineáris üzemi állapotba megy át.

További interferenciákat okozhatnak más adók is. Ha a zavaró jel a csatornán belül helyezkedik el, akkor ezt csatornán belüli interferenciának nevezik. A csatornán belüli interferenciát okozhatják más rendszerek felharmonikusai, nem szándékos sugárzók vagy bizonyos távolságra és azonos frekvencián működő eszközök is. Mindegyik esetben a zavaró jel a csatornán belül van.

Azt az interferenciát, amely a csatorna közelében helyezkedik, szomszédos csatorna interferenciának nevezik. Az interferencia mértéke a vevő szűrőjének karakterisztikájától függ.

Ha a szűrő 3 dB tartományán túl nem csillapít megfelelően, akkor az interferencia nem kívánt működést okozhat.



5. Ábra: Csatornán belüli és szomszédos csatorna interferencia

Mivel a csatornán belüli interferencia a középfrekvenciáján (vagy legalábbis a 3 dB tartományon belül) jelenik meg, ezért a szűrő nem csillapítja azt. Ezzel szemben a szomszédos csatorna a középfrekvenciához közeli frekvencián jelenik meg, ezért a bemeneti csillapító ezeket csillapítja. A szomszédos csatorna okozta interferencia csökkenthető a szűrő meredekségének növelésével, de ezzel növeljük a szimbólumközi áthallás esélyét.

### 3.4. Energiamérleg kiszámítása

Az energiamérleg kiszámítása során összegezzük a rendszerben fellépő nyereségeket és csillapításokat. A kisugárzott teljesítményt összevonjuk az összes releváns, összeköttetést érő nyereséggel és csillapítással, majd ebből kivonjuk a vevő érzékenységet és így megkapjuk a link margin-t. Ez a link margin adja meg, hogy mekkora csillapítást képes a rendszer elbírní a megfelelő összeköttetés fenntartása mellett. Ha a csillapítás meghaladja ezt a link margin értéket, akkor az összeköttetés megszűnik addig, amíg a csillapítás értéke újra kisebb lesz a link margin értékénél. A kis link margin értékű összeköttetések alapvetően nem tekinthetők robusztusnak, mert viszonylag kis környezeti változások következtében megszakadhat az adatátvitel. Az elérhetőségi követelmények miatt az energiamérlegbe fading tartalékokat is megadnak. Ilyen esetekben a tervezés folyamán figyelembe kell venni azokat a jelenségeket, amelyek időszakosan megnövelhetik a rendszerben fellépő csillapításokat. Ilyen jelenség például az eső, felhők, a növényzet változása stb.

### 3.4.1. EIRP

Az egyik első lépés az energiamérleg kiszámítása során az effektív kisugárzott teljesítmény meghatározása. Az EIRP az alábbiakból áll:

- adó teljesítménye ( $P_{Tx}$ ),
- adóantenna nyeresége ( $G_{Tx}$ ),
- kábel/csőtápvonal veszteség ( $L_{WG}$ ),
- radom borítás vesztesége ( $L_R$ ).

$$EIRP [dB] = P_{Tx}[dBm] + G_{Tx}[dB] - L_{WG}[dB] - L_R \quad (23)$$

Az adóberendezés és az antenna/kábel/hullámvezető illesztetlensége által okozott csillapítást is hozzá lehet adni az EIRP kiszámítása közben vagy ezeket az értékeket külön be lehet számítani az antenna vagy a vezetékek/csőtápvonalak paramétereiben is. A radom által okozott csillapítás változhat a környezeti feltételekkel, ezért mindig a legrosszabb eshetőséget kell felhasználni. Természetesen az EIRP mértékegysége meg fog egyezni az adó teljesítményének mértékegységével (ha az adóteljesítmény dBm, akkor az EIRP értékét is dBm-ben fogjuk megkapni).

### 3.4.2. Jelút csillapítás

A jelút csillapítása (Path Loss – PL) magában foglalja a szabadtéri csillapítást és az összes környezeti jelenséget, mint például a többutas terjedést. Ezeknek a jelenségeknek egy része determinisztikus, másik része pedig valószínűség alapú. A szabadtéri csillapítás például a távolság determinisztikus függvénye.

A valószínűség alapú csillapításokat fading tartalékkal és egy valószínűséggel vesszük figyelembe, amely szerint a csillapítás értéke meghaladja a fading tartalék értékét. Ennek a valószínűségnek a komplement értéke adja meg a az összeköttetés rendelkezésre állási arányát. Például, ha az eső okozta fading 1%-os eséllyel haladja meg a 15 dB-t, akkor az összeköttetés rendelkezésre állása 0.99. Ha az eső okozta fading meghaladja a 15 dB-t, akkor feltételezhetően a kapcsolat ideiglenesen megszűnik, amíg a csillapítás értéke lecsökken. A valószínűséget az adott alkalmazáshoz megfelelően kell kiválasztani.



### 3.4.3. Vevő nyeresége

A vevő antenna nyeresége, mínusz a radom veszteség, a kábel vagy egyéb csőtápvonal veszteség, polarizációs veszteség.

$$G_{Rx} = G_{ant} - L_{radom} - L_{WG} - L_{pol} \quad (24)$$

Ebben az esetben is az illesztetlenség okozta csillapítást ki lehet vonni vevő nyereségéhez vagy bele lehet számítani az antenna, a csőtáp, a kábelek vagy egyéb elemek nyereségébe, csillapításába.

A polarizációs csillapítást az elektromágneses hullám és a vevő antenna polarizációjának különbsége okozza. Ez fix telepítésű pont-pont kapcsolatok esetén nem szokott problémát okozni, viszont műholdas és mobil hálózatok esetén már igen. A vételi jel teljesítmény (RSL) kiszámolásához az EIRP értékéből ki kell vonni a jelút csillapítását és hozzá kell adni a vevő nyereségét.

$$RSL = EIRP - PL + G_{rx} \quad (25)$$

### 3.4.4. Link margin

Egy energiamérleg számításának végeredménye lehet a vételi jelszint (RSL), a jel-zaj viszony (SNR), a vivő-zaj viszony (CNR) vagy a bit energia – zaj spektrális teljesítménysűrűség viszony (Eb/N0). Ha kiszámítottul a vételi jelszintet, akkor ezt hozzá lehet viszonyítani a minimális detektálható jelszinthez (Minimum detectable signal – MDS) vagy a vevőérzékenységhez.

### 3.4.5. Jel-Zaj viszony (SNR)

Ha szükség van a jel-zaj viszonyra (nem elérhető a vevőérzékenység)- akkor az alábbiak szerint lehet kiszámítani:

Először a vevő zajszintjét a korábbiakban már leírt módon meg kell határozni. Ezt követően már csak ki kell vonni a vételi jelszintből:

$$SNR = RSL - N \quad (26)$$

Ha vételi jelszint helyett a jel-zaj ismert, akkor a link margin meghatározásánál a meghatározott jel-zaj viszonyból kell kivonni a minimum jel-zaj viszonyt.

A digitális rendszerek esetén a BER (Bit Error Rate) és a jel-zaj viszony a meghatározó paraméter. Egy adott BER eléréséhez szükséges  $E_b/N_0$  viszonyt megadják a műszergyártók, amit a tervezés folyamán figyelembe kell venni. Az  $E_b/N_0$  viszonyt ki lehet számolni a jel-zaj viszonyból, ha a bit sebesség és a szimbólum sebesség ismert.

### 3.4.6. Energiamérleg számítási példa

<b>Paraméter</b>	<b>Érték</b>	<b>Megjegyzés</b>
Frekvencia	38.6 GHz	
Hullámhossz	0,0078 m	
Polarizáció	Vertikális	
Távolság	2 km	
Tx teljesítmény	10 dBm	
Tx veszteség	-1.5 dB	
Tx antenna nyereség	32 dB	
Radom veszteség	-2 dB	
<b>EIRP</b>	<b>38.5 dBm</b>	
Jelút csillapítás (FSL)	-130.2 dB	
Eső csillapítás (0.999)	-15 dB	
Többutas terjedés fading	2 dB	
<b>Teljes jelút csillapítás</b>	<b>-147.2 dB</b>	
Radom veszteség	-2 dB	
Rx antenna nyereség	32 dB	
Polarizációs veszteség	-0.2 dB	
Rx veszteség	-2 dB	
<b>Teljes Rx nyereség</b>	<b>27.8 dB</b>	
<b>Vételi jelszint (RSL)</b>	<b>-80.9 dB</b>	
Interferencia tartalék	-1 dB	
Rx zajtényező	7 dB	
Zaj sávszélessége	25 MHz	
<b>Teljes zaj teljesítmény</b>	<b>-93.0 dBm</b>	<b>10log(KT<sub>0</sub>BF)</b>
Jel-zaj viszony	12.1 dB	
Vevőérzékenység	-88 dBm	
<b>Link margin</b>	<b>6.1 dB</b>	

Ebben a példában a link margin-t úgy számoltam ki, hogy a vételi jelszinthez (RSL) hozzáadtam az interferencia tartalékot (mivel az interferencia tartalék  $-1$  dB volt, ezért kivonódott az RSL értékéből), majd az így kapott értékből kivontam a vevőérzékenységet. A másik lehetőség az lenne, ha a minimum jel-zaj viszonytal hasonlítanánk össze a vételi oldal jel-zaj viszonyát.

Az EIRP értékének kiszámításához a Tx teljesítményt, a Tx veszteséget, a Tx antenna nyereséget és a radom veszteséget összegeztem. Ebből jött ki a  $38.5$  dBm effektív kisugárzott teljesítmény.

A teljes jelút csillapításához a szabadtéri csillapítást (FSL) az eső csillapítást és a többutas terjedés fading tartalékot (ezt kivonom a jelút csillapításból, mivel ezt csillapításként veszem figyelembe a számolás közben, hogy a legrosszabb eshetőségre számoljak) összegeztem. Az így kapott teljes jelút csillapítás értéke  $-147.2$  dB.

A vevő oldali nyereséghez a radom veszteséget, a vevőantenna nyereséget, a vevő veszteséget és a polarizációs veszteséget összegeztem. A vevő oldali teljes nyereség értéke így  $27.8$  dB.

A vételi jelszintet az EIRP, a teljes jelút csillapítás és a teljes vevő oldali nyereség összegzésével számoltam ki. Az összegzést követően a vételi jelszint (RSL) értéke  $-80.9$  dBm.

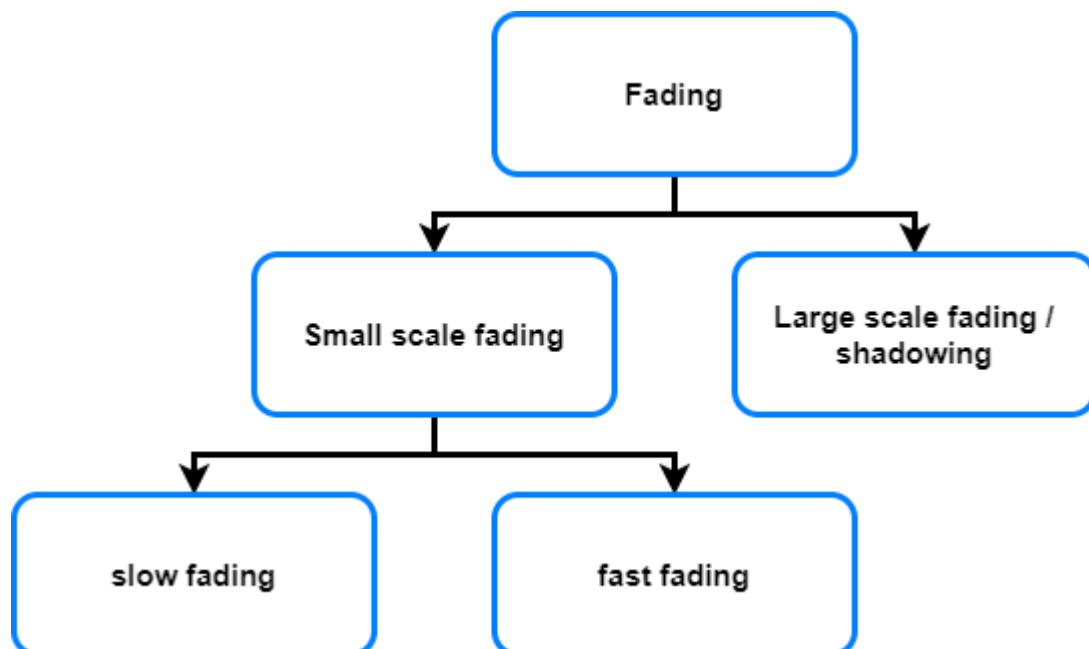
A vételi jelszintet ezzel kiszámoltam, a vevő érzékenysége ismert ( $-88$  dBm) és azt is tudom, hogy interferencia tartaléknak  $1$  dB-t használok (várhatóan ekkora lesz a legnagyobb interferencia csillapítás). Ezért a vételi jelszintből kivonom a vevő érzékenységet és az interferencia tartalékot, kiszámítva a fading margin-t, aminek az értéke  $6.1$  dB. Ez azt jelenti, hogy az átvitel még további  $6.1$  dB csillapítást képes elviselni jelentősebb teljesítmény csökkenés nélkül.

## 4. Fading

A fading, mint fogalom a vezeték nélküli rendszerekben a vételi oldalon történő térerősség szint csökkenését, ingadozását jelenti. A fading jelenségek különböző típusokba sorolhatók [11]. A fading-et elsősorban két kategóriára lehet bontani: nagymértékű fading (large scale fading) és kismértékű fading (small scale fading). A small scale fading-et még tovább szokás bontani gyors és lassú fading-re (fast, slow fading). A large scale fading-re pedig „shadowing”-ként is szoktak utalni.

A large scale fading-et általában valamilyen log-normális eloszlású valószínűség sűrűségfüggvényként modellezik, amelyet a különböző refrakció, többutas terjedés, shadowing jelenségeknek tulajdonítanak. A large scale fading akkor jelentkezik, amikor az adó és/vagy vevő relatív elhelyezkedése jelentős mértékben megváltozik, például helyváltoztatás esetén.

A small scale fading-et ezzel szemben az adó és vevő elhelyezkedésének kismértékű megváltozása okozza, ami nagyságrendileg megegyező az átvitel hullámhosszával. Ez a fading jelenség lehet gyors vagy lassú, amelyet a többutas terjedési útvonalak változása, a doppler effektus vagy az átviteli csatorna megváltozása okoz. Emiatt ezek a fading jelenségek gyorsan és gyakran megjelenhetnek. A small scale fading-et általában Rayleigh vagy Rician sűrűségfüggvénnyel modellezik.



6. Ábra: Fading típusok

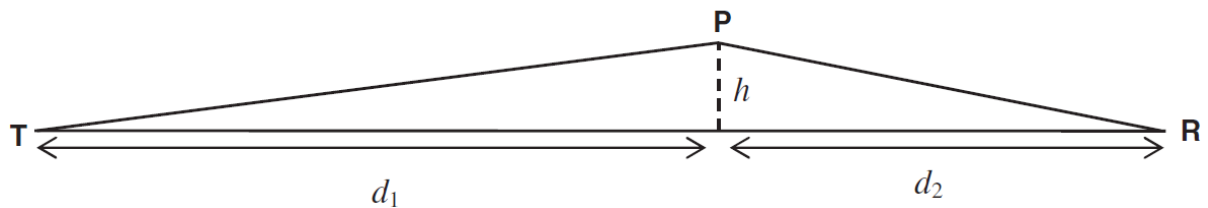
A legtöbb esetben a környezet olyan komplex, hogy a fading statisztikai modellezésére van szükség. Ez fokozottan igaz a mobil alkalmazások esetén, ahol az egyik vagy mindkettő terminál mozoghat (a relatív geometria megváltozik), kifejezetten amikor a termináloknak körsugárzó antennáik vannak. Lehetséges a fading jelenségek pontos kiszámítása is, viszont ehhez rendkívül sok adatra és számítási kapacitásra van szükség.

A földfelszíni mobilhálózatok jelút csillapításának vizsgálata három lépésre bontható:

1. Először az adott környezetnek megfelelő hullámterjedési modellel (Hata, Okumura, FSL) kiszámoljuk a közepes (medián) jelút csillapítást;
2. A large-scal fading meghatározása a terepviszonyoknak megfelelően. Ezt shadowing-nak nevezik és általában log-normális eloszlással modellezzük.
3. A small-scale fading figyelembevétele a környezetnek megfelelően.

#### 4.1. Fresnel zónák

Legtöbb esetben, az elektromágneses hullám nem csak a közvetlen útvonalon ér el az adótól a vevőig, hanem számos másik indirekt útvonalon is.



7. Ábra: Direkt és indirekt útvonal

A fenti ábrán látható, hogy a direkt útvonal a TR, az indirekt útvonal pedig a TPR. Az útvonalak közötti hosszkülönbség:

$$\Delta = \frac{h^2}{2d_1} + \frac{h^2}{2d_2} \quad (26)$$

Ennek megfelelően a közvetlen és közvetett elektromágneses hullámok közötti fáziskülönbség:

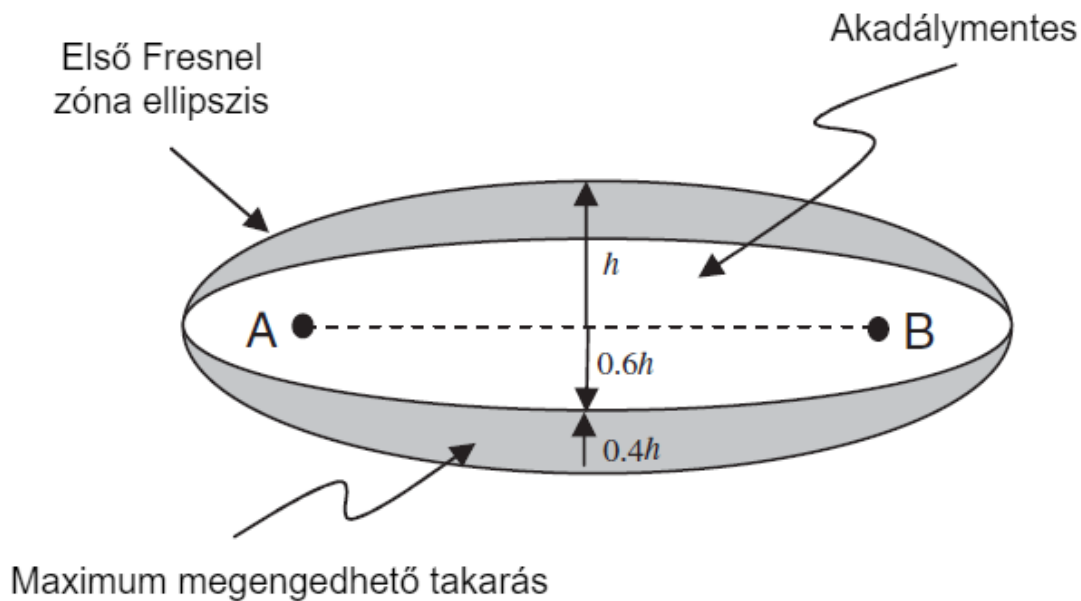
$$\varphi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} \quad (27)$$

Olyan esetekben, amikor a két útvonal különbsége  $\Delta=n\lambda/2$  ( $n$  pozitív egész szám) és az  $n$  páratlan szám, akkor a fáziskülönbség  $180^\circ$  lesz, vagyis kioltják egymást az elektromágneses hullámok. A kioltási pontok az alábbi képlettel határozhatók meg (páratlan, pozitív egész számok esetén):

$$h_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (28)$$

Mivel ilyen esetekben az útvonalak közötti távolság a hullámhosszal összemérhető, ezért a két elektromágneses hullám megegyező amplitúdójú lehet, így akár teljesen ki is olthatják egymást.

A fenti képlet ellipsziseket határoz meg, amelyeken ezek a kioltások létrejöhetnek. A páratlan számú Fresnel zónában lévő akadályok (reflexiót vagy diffrakciót okozva) kioltást okozó interferenciát hoznak létre. Nagyon fontos, hogy az első Fresnel zónát szabadon kell hagyni, mert különben a térerősség jelentősen lecsökken a vételi oldalon. A Huygens elv [12] következtében, az akadály árnyékában jelentősen kisebb lesz a térerősség, mint közvetlen rálátás esetén. Ilyen esetben az FSL csillapítási modell nem használható, hanem további korrekciós értékeket kell alkalmazni. A legtöbb alkalmazáshoz elegendő, ha az 1. Fresnel zóna 60%-ban szabadon van.



8. Ábra: Első Fresnel zóna akadálymentesítendő területe

## 4.2. Diffrakció okozta csillapítás

A diffrakció okozta csillapítást csak a legegyszerűbb geometriai felületek mentén lehet könnyedén kiszámítani. Ilyen alapforma a késélszerű perem. A késélszerű akadály okozta diffrakciós veszteséget viszonylag könnyen és pontosan meg lehet határozni.

Azonban a valóságban a legtöbb forma nem ilyen egyszerű, jól definiált és nem ad megfelelő pontosságot, ha az egyszerű késél akadály modellt alkalmazzuk. Erre két opció van: vagy több késélszerű akadállyal modellezzük az akadályt (ez nem túl megbízható és általában kisebb csillapítást ad meg a valósnál) vagy a lekerekített felület modellt alkalmazzuk.

A lekerekített sarok esetén ugyan úgy ki kell számolni a késélszerű akadály csillapítást, csak ezt még ki kell egészíteni a lekerekített akadály diffrakció értékével.

## 4.3. Large scale fading

A hálózat tervezésekor először meghatározzák az átlagos jelút csillapítást (hullámterjedési modell segítségével), majd ezt követően határozzák meg a large scale fading (vagy shadowing) értékét. A shadowing-ot általában az épületek éleinél kialakuló diffrakció okozza. A fading log-normális eloszlást követ, ezért log-normális változóval modellezzük. Ezért



a jelút csillapítás átlag értékének meghatározása után már csak a szigma értékét kell meghatározni. A log-normális fade-et az adott terület százalékos lefedettségének meghatározásához használják (pl.: a kiszámolt terület 90%-ában legyen megfelelő a lefedettség).

Az energiamérleg kiszámításánál ezt shadowing margin-ként szokták csillapításként hozzáadni. A shadowing csillapítás értéke:

$$L_s = z\sigma_L \quad (29)$$

A  $z$  jelöli a Gauss valószínűségi változót. A területi lefedettség valószínűségét (hogy mekkora valószínűséggel lesz megfelelő a kommunikáció a kijelölt területen) az alábbi határozza meg:

$$P_{\text{lefedettseg}} = 1 - Q\left(\frac{L_s}{\sigma_L}\right) \quad (30)$$

A matematikában és a statisztikában  $Q$  függvényt inverzét kell alkalmazni. A  $Q$  függvény:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (31)$$

A  $Q(z)$  helyére kell behelyettesíteni a lefedettség valószínűségének inverz értékét (tehát 90%-os lefedettség esetén  $1-0.9=0.1$ -et). Ha megvan a  $z$  értéke, már könnyen kiszámítható a shadowing margin is. Ha például 140 dB a maximum csillapítás, amit a rendszer képes elviselni, a shadowing margin pedig 10 dB lett, akkor a hullámterjedési modellbe visszahelyettesítve a 130 dB-t, megkapjuk, hogy mekkora a maximális távolság, ahol a kommunikáció a terület 90%-ában megfelelő lesz.

A  $\sigma$  értéke mindig az adott területtől függ, de például Okumura modellekhez az alábbi jól alkalmazható:

$$\sigma_L = 0.65(\log(f_c))^2 - 1.3 \log(f_c) + A \quad (32)$$

Ahol:

- $A = 5.2$  (belváros);
- $A = 6.2$  (külváros);
- $f_c$ : frekvencia [MHz]

A teljes cella tervezése esetén a cella területét fel lehet osztani koncentrikus körökre, ahol külön-külön el lehet végezni ezt lefedettségi valószínűségi számítást, hogy a teljes cellának a lefedettségét megtervezhessük, leellenőrizhessük.

#### 4.4. Small Scale fading

A small scale fading magában hordozza az összes olyan fading jelenséget, amely nagyon kis változások következtében jön létre (hullámhossz nagyságrendjében). Ezt a jelenséget a többutas terjedésnek tulajdonítják, amikor is a különböző útvonalat bejárt elektromágneses hullámok fáziskéséssel találkoznak a vevőnél. Az így összesített jelenséget Gauss valószínűségi változóval jellemzik. Ez Rayleigh (vagy Ricean) [13] sűrűségfüggvényt jelent az amplitúdó számára a fázis esetében pedig egyenletes eloszlású sűrűségfüggvényt.

Ha a vett jel csak reflektált, többutas jelekből áll, akkor Rayleigh eloszlást, ha pedig van egy domináns, LOS vagy reflektált, akkor pedig a Ricean eloszlást alkalmazzuk.

A small scale fading-et spektrális tulajdonságai (frekvencia szelektív vagy lapos) és a változási sebessége (lassú vagy gyors) alapján kategorizálják. A spektrális tulajdonságát a reflektált hullámok késleltetése határozza meg. Ezt a hatást nevezik delay spread-nek és a vett jelek időbeli eloszlását okozza. A vevő és adó közötti relatív mozgás okozza a doppler hatást, aminek következtében a jelek a spektrumban „kenődnek” el, ez okozza a fading változási sebességét. Fontos megkülönböztetni egymástól a small scale fading spektrális tulajdonságát és a változásának, variációjának sebességét.

A small scale fading meghatározásához statisztikai módszereket használnak. A már említett módon, ha nincs domináns hullámterjedési útvonal, akkor Rayleigh eloszlású a small scale fading. Rayleigh eloszlás esetén az alábbi egyenlet adja meg, hogy adott fading csillapítás mekkora valószínűséggel alakul ki:

$$P_x = 1 - e^{-\frac{1}{2}10^{-x/10}} \quad (33)$$

Ahol  $P_x$  annak az esélye, hogy a megadott csillapítás értéket a fading az idő hány százalékában lépi túl és  $x$  pedig a fading csillapítás értéke dB-ben. Például, ha azt akarjuk

megkapni, hogy a 12 dB fading kialakulásának mekkora az esélye, akkor a képletbe behelyettesítve a  $P_x$  értéke 0.031 lesz. Ez azt jelenti, hogy az idő 3.1%-ban fogja meghaladni a fading értéke a 12 dB-t.

A domináns útvonal esetén pedig Rician eloszlást kell alkalmazni. Ennek kiszámítása kicsit bonyolultabb, mivel szükség van a domináns útvonal és a többi, másodlagos útvonal átlagos teljesítményére. Az alábbi paraméterek szükségesek a valószínűség kiszámításához:

- $\sigma^2$ : a reflektált elektromágneses hullámok átlagos teljesítménye (például a vételi jelszint átlaga)
- $A$ : a domináns útvonal amplitúdója;
- $K$ : A Rician faktor

A Rician faktort az alábbi módon kell meghatározni:

$$K = 10 \log \left( \frac{A^2}{2\sigma^2} \right) \quad (34)$$

Az adott fading csillapítás kiszámításához pedig az alábbi valószínűség sűrűségeloszlás függvény alkalmazható [14]:

$$P_x = \int_0^{\sigma^{10-x/20}} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{(r^2+A^2)}{2\sigma^2}} I_0 \left( \frac{Ar}{\sigma} \right) dr \quad (35)$$

A függvényben az  $r$  jelöli a vett jel burkológörbéjének amplitúdóját,  $I_0$  a módosított Bessel függvény és  $A$  pedig a domináns jel amplitúdója. Ezt az eloszlást használva, és feltételezve, hogy  $I_0 = 2\sigma$ , a valószínűsége, hogy a fading csillapítása 12 dB legyen, 0.018. Ez azt jelenti, hogy az idő 1.8%-ban fogja meghaladni a csillapítás értéke a 12 dB-t.

## 5. Hullámterjedési modellek

Az elektromágneses hullámok terjedésének szempontjából a legbonyolultabb feladat a közeg csillapításának meghatározása. A hullámterjedési közel a legtöbb esetben nagyon komplex, sok változóval rendelkezik. A közeg csillapításának meghatározásához ezért hullámterjedési modelleket alkalmaznak. Két fő típusra oszthatók fel a hullámterjedési modellek:

- Empirikus (tapasztalati)
- Determinisztikus

### 5.1. Empirikus hullámterjedési modellek

Az empirikus hullámterjedési modelleket mérési eredmények statisztikai elemzésével hozzák létre. Nincsenek benne komplex számolások, hanem a tapasztalati úton szerzett tudás statisztikai elemzésével hozták létre a hozzájuk tartozó egyenleteket, állandókat. Előnyük, hogy könnyű velük számolni, és pontos eredményeket kaphatunk velük egységesebb, homogénebb területeken, például városokban. Hátrányuk, hogy a gyorsan változó környezeteket már nem képesek modellezni, így ilyen területeken nagyobb a pontatlansága. Alkalmasak makro cellák méretezésére, azonban mikro és femto cellák esetében már túl nagy a pontatlansága.

Ezek a módszerek a közegcsillapítás átlagértékét határozzák meg a távolság függvényében. Az átlagos csillapítás érték kiszámítása után meghatározzák a fading jelenségek lehetséges csillapítását és az egyéb nyereséget, csillapítást okozó tényezőket (energiamérleg felállítása). A legtöbb modell az UHF, VHF frekvenciasávra lett kialakítva, ugyanis tipikusan ezek a frekvenciatartományok, amelyeket városokon belül használnak mobil, WLAN hálózatok kialakításához. Minden környezet típushoz különböző hullámterjedési modelleket hoztak létre. Én a földfelszíni hullámterjedési modelleket vizsgálom jelen dolgozatban. Ezeknek is több alkategóriája van:

- Fólia modellek (foilage models): Ezek a modellek annyiban térnek el az LOS modelltől, hogy legalább egy, valamilyen vastagságú akadály van az adó és a vevő között (például egy épület, fa, erdő), pl.: Weissberger modell, ITU vegetation modell, Single Vegetative Obstruction modell, Terrestrial Path with One Terminal in Woodland stb. [15] [16]
- Terep modellek (Terrain models): Az egyenetlen terepviszonyokat veszik figyelembe a hullámterjedés során. A változó terepviszonyok reflexiót, diffrakció okozhat.

Ezeknek a modelleknek a lényege, hogy a távolság és a terep egyenetlenség függvényében meghatározza a csillapítást. pl.: Egli modell, Longley-Rice modell stb. [17] [18]

- Beépített terület modellek: Ezek tipikusan a településeken, városokon belüli hivatottak megadni. Ezek a modellek figyelembe veszik, hogy milyen sűrűn van beépítve az adott terület, az antennák elhelyezkedését. Ezekből a modellekből használók fel néhányat a hullámterjedési szimulációs alkalmazás létrehozásához.

### 5.1.1. Okumura modell

1960-ban, a Tokyo-ban gyűjtött adatok alapján hozták létre a 200 – 1920 MHz közötti hullámterjedés csillapításának kiszámítására [19]. Alkalmos városi környezet modellezésére, azonban problémákat okozhat, ha sok a magas, elektromágneses hullámokat blokkoló épület. Ez az egyik legegyszerűbb hullámterjedési modell, és városon belül viszonylag pontosan alkalmazható, ezért még ma is előszeretettel alkalmazzák városok lefedettségének modellezéséhez.

Az Okumura modell három terület típust határoz meg: open area, suburban area és urban area. Az open area jelenti a nyílt területeket, ahol nincsenek magas fák vagy épületek és kb. 300-400 méteres távolságban nincsenek nagyobb akadályok (vidéki kicsi települések, mezőgazdasági területek). A suburban area a falvakat, vagy a fákkal körbevett országutakat, autópályákat modellezi, amikor néhány akadály van a mobil egység körül, de nem túl sok. Az urban area pedig már egy nagyobb falut vagy egy várost modellez, kettő vagy több emeletes házakkal és magas fákkal. Az Okumura modell az urban area-t használja alapértelmezetten, a többi terület típushoz pedig korrekciós értékeket alkalmaz. Ezen felül terep kategóriákat is alkalmaz, a kvázi-sima az alapértelmezetten használt. Az Okumura az alábbi peremfeltételekkel használható:

- Frekvencia: 150 - 1920 MHz
- Mobil állomás antenna magassága: 1 - 3 m
- Bázisállomás antenna magassága: 30 - 1000 m
- Összeköttetés távolsága: 1 - 100 km

A csillapítás mértékének meghatározása:

$$L = LF + A_{mu} - G_{hte} - G_{hre} - G_{area} \quad (36)$$

Ahol:

- $L$  = A számított közegcsillapítás [dB]
- $LF$  = A szabadtéri csillapítás [dB]
- $A_{mu}$  = A közeg csillapítása, relatív a szabad térhez képest [dB]
- $G_{hte}$  = A bázisállomás nyereség korrekciós tényezője [dB]
- $G_{hre}$  = A mobil állomás nyereség korrekciós tényezője [dB]
- $G_{area}$  = a környezeti korrekciós nyereség [dB]

Az állomások magassága okozta nyereség korrekciós tényezők kiszámítása pedig az alábbi:

$$G_{hte} = 20 * \log\left(\frac{h_{te}}{200}\right) \quad \text{ha } 30 \leq h_{te} \leq 1000 \text{ [m]} \quad (37)$$

$$G_{hte} = 10 * \log\left(\frac{h_{te}}{200}\right) \quad \text{ha } h_{te} < 30 \text{ [m]} \quad (38)$$

és

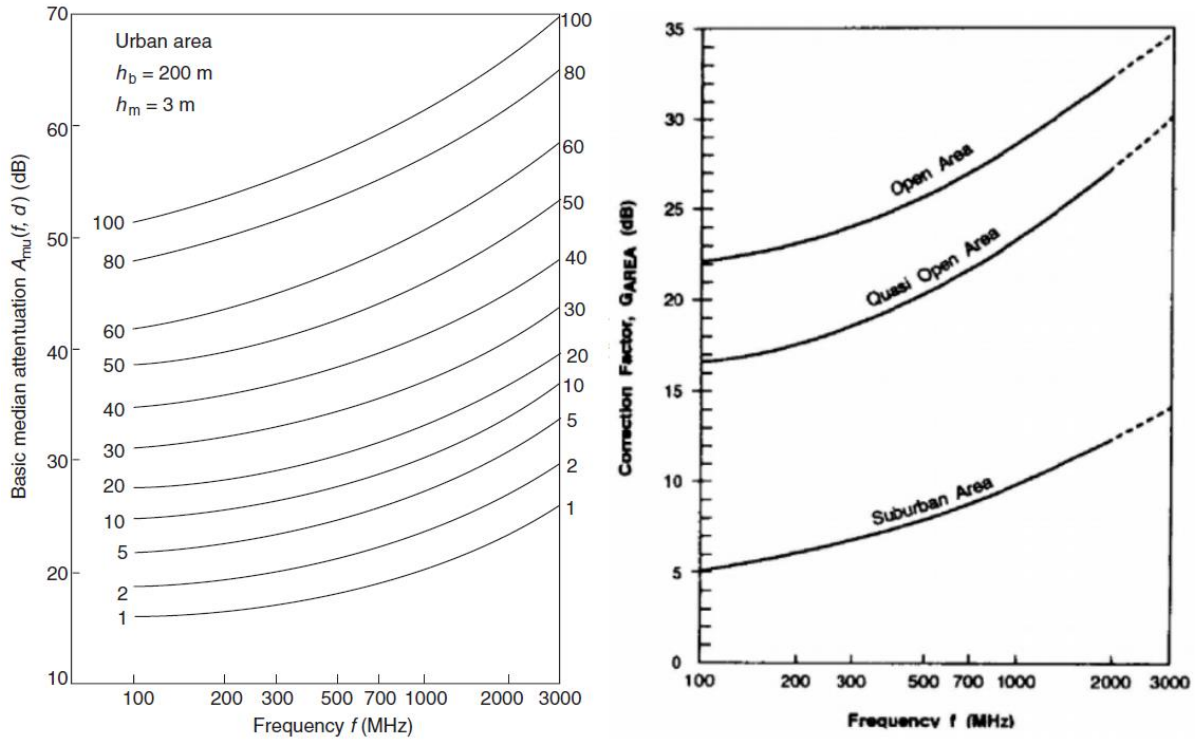
$$G_{hre} = 20 * \log\left(\frac{h_{re}}{3}\right) \quad \text{ha } 3 \leq h_{re} \leq 10 \text{ [m]} \quad (39)$$

$$G_{hre} = 10 * \log\left(\frac{h_{re}}{3}\right) \quad \text{ha } h_{re} < 3 \text{ [m]} \quad (40)$$

Ahol:

- $h_{te}$ : A bázisállomás magassága [m];
- $h_{re}$ : A mobil állomás magassága [m].

Az  $A_{mu}$  és a  $G_{area}$  értékeket az alábbi két ábráról lehet leolvasni:



9. Ábra:  $A_{\mu}$  és  $G_{area}$  értékek

### 5.1.2. Hata modell

Szintén empirikus hullámterjedési modell. Az Okumura modell által gyűjtött információkat felhasználva, további korrekciókat elvégezve hozták létre. Hozzászámolja az épületek által okozott diffrakció, reflexió és szórás hatását, továbbá korrekciós tényezőket hozott létre külvárosi és vidéki környezetekhez.

A Hata modell peremfeltételei:

- Frekvencia: 150 - 1500 MHz
- Mobil állomás antenna magassága: 1 - 10 m
- Bázisállomás antenna magassága: 30 - 200 m
- Összeköttetés távolsága: 1 - 10 km

A Hata modell is különválasztja a területeket Urban, Suburban és Rural area-ra. Az Urban kategória is két alkategóriára van bontva, nagyvárosi és kis/közepes városi kategóriára.

A csillapítás kiszámolása Urban városi környezetben:

$$L_{urban} = 69.55 + 26.16 * \log(f) - 13.82 * \log(h_b) - C_H + [44.9 - 6.5 * \log(h_b)] * \log(d) \quad (41)$$

A  $C_H$  értéke kis és közepes városok esetén:

$$C_H = 0.8 + [1.1 * \log(f) - 0.7] * h_m - 1.56 * \log(f) \quad (42)$$

A  $C_H$  értéke nagy városok esetén:

$$C_H = 8.29 * [\log(1.54 * h_m)]^2 - 1.1 \quad \text{ha } 150 \leq f \leq 200 \text{ [MHz]} \quad (43)$$

$$C_H = 3.2 * [\log(11.75 * h_m)]^2 - 4.97 \quad \text{ha } 200 < f \leq 1500 \text{ [MHz]} \quad (44)$$

Ahol:

- $L_{urban}$ : A városi közeg csillapítása [dB]
- $h_b$ : Bázisállomás antenna magassága [m]
- $h_m$ : Mobil állomás magassága [m]
- $C_H$ : Mobil állomás antenna magasság korrekciós tényező [dB]
- $f$ : Frekvencia [MHz]
- $r$ : Távolság [km]

Suburban városi környezet csillapítása:

$$L_{suburban} = L_{urban} - 2 * \left[ \log\left(\frac{f}{28}\right)^2 \right] - 5.4 \quad (45)$$

Ahol:

- $L_{suburban}$ : Külvárosi közeg csillapítása [dB]
- $L_{urban}$ : Városi környezet csillapítása [dB]

Vidéki környezet csillapítása:

$$L_{rural} = L_{urban} - 4.78 * [\log(f)]^2 + 18.33 * \log(f) - 40.94 \quad (46)$$

Ahol:



- $L_{rural}$ : A vidéki környezet csillapítása [dB]

### 5.1.3. Ericsson 9999 modell

Ezt a hullámterjedési modellt az Ericsson hozta létre [20], a Hata modellt felhasználva. 1900 MHz-ig használható, de abban különbözik a többi hullámterjedési modelltől, hogy a paraméterei szabadon változtathatók. A jelút csillapításának számítási módja:

$$L_E = a_0 + a_1 \log(d) + a_2 \log(h_b) + a_3 \log(h_b) \log(d) - 3.2(\log(11.75 * h_m))^2 + g(f) \quad (47)$$

A  $g(f)$  értéke:

$$g(f) = 44.49 \log(f) - 4.78(\log(f))^2 \quad (48)$$

Ahol:

$L_E$ : Az Ericsson modell jelút csillapítása [dB]

$d$ : A távolság [km]

$h_b$ : Bázisállomás magassága [m]

Az „a” paraméterek szabadon változtathatók, de az alábbi értékeket az alapértelmezettek:

4. Táblázat: Ericsson modell alapértelmezett paraméter értékek

Paraméter	Rural	Suburban	Urban
a0	45.95	43.2	36.2
a1	100.6	68.93	30.2
a2	12.0	12.0	12.0
a3	0.1	0.1	0.1

## 5.2. Determinisztikus hullámterjedési modellek

A determinisztikus modellek a Maxwell egyenleteken alapszanak. Ekkor a hullámokat nagyon vékony nyalábként modellezik, és a hullámterjedési formák szerint számítják ki az

elektromágneses hullám útját. Ezt a különböző hullámterjedési jelenségekkel számoljuk, például: Refrakció, reflexió, diffrakció, szórás. Ezekkel nagyon pontosan meghatározhatjuk a hullámok terjedését. Az elektromágneses hullámok útvonalának és csillapításának kiszámításához rendkívül sok információra van szükség a környezetről. Pontos, részletes térkép kell, sokszor 3D-ben, valamint a különböző akadályok tulajdonságai. Ezért nagy területekre nehéz alkalmazni, hiszen ekkor nagyon sok információra van szükség. Számítási igénye is jelentős, attól függően, hogy hány nyalábra számítjuk az útvonalat, illetve ezeket milyen részletesen, mekkora területen végezzük. A hátrányai miatt sok esetben még mindig az empirikus hullámterjedési modelleket használják, azonban főleg mikro és femto cellák esetén alkalmazzák, főleg épületek belsejében, például wifi hálózatok tervezése esetén. A kis területet még viszonylag könnyű lemodellezni, és az ott előforduló anyagoknak, akadályoknak is ismertek a tulajdonságaik.

### 5.2.1. Multi Ray modell

A Multi Ray modell beltéri, az újabb, magas frekvencián működő WLAN hálózatok modellezésére szolgál [21]. A 60 GHz-es WLAN hálózatok modellezésére sokszor az úgynevezett „Multy-Ray” vagy „Többsugaras” modellt alkalmazzák. A modell a beltéri egyszeri és kétszeri reflexiók hatásával számol egy adott geometriájú és anyagparaméterű beltéri helyiségben. Az eredményt szimuláció útján lehet kiszámítani. A modell alapján a csillapítást az alábbi összefüggés alapján kell számítani:

$$L_M = 68 + 20 \log \left| \frac{1}{d_0} + \sum_{i=1}^N \frac{R_i}{d_i} e^{j\Delta\theta_i} + \sum_{j=1}^M \frac{R_{ja} * R_{jb}}{d_j} e^{j\Delta\theta_j} \right| \quad (49)$$

Itt  $d_0$  a direkt hullám által a vevőig megtett út,  $d_i$  az  $i$ -edik egyszeres reflexióval megérkező hullám által megtett út,  $d_j$  a  $j$ -edik kétszeres reflexióval megérkező hullám által megtett út,  $R_i$  az  $i$ -edik egyszeres reflexióval érkező hullám által szenvedett reflexió,  $R_{ja}$  és  $R_{jb}$  a  $j$ -edik kétszeres reflexióval érkező hullám által szenvedett reflexiók,  $\Theta_i$  illetve  $\Theta_j$  pedig a direkt és a reflektált hullámok közötti fáziskülönbség.

### 5.2.2. Véges differenciák módszere

Az időtartománybeli véges differenciák módszere (FDTD) egy numerikus módszer a Maxwell-egyenletek megoldására. A megoldandó problémateret kis téglalapokra, vagy

görbevonalú síkidomokra bontja, majd ezekre felírva a hullámegyenletet, a szomszédos csomópontok közötti véges különbségeket alapul véve kiszámítható az elektromos térerősség a tér minden pontjában minden időlépésben.

### 5.2.3. Végeelem-módszer

A végeelem-módszer alkalmazásakor, hasonlóan a véges differenciák módszeréhez, a problémateret kis elemekre bontva kell a megoldást keresni. A problémateret diszkrétizálva, és a Maxwell-egyenletekből levezethető hullámegyenletek idő- illetve frekvenciatartománybeli alakja alapján a problémátérre egy egyenletrendszer írható fel. Az egyenletrendszer megoldásaként a problémátéren a diszkrét geometria csomópontjaiban megkapható az eredmény, tetszőleges pontban pedig egy adott elemen belül az elem csomópontjaiban felvett értékek interpolációjából számítható.

## 6. Geographic Information System (GIS)

A GIS rendszerek a geográfiai, térbeli adatokat kezeli. A GIS alkalmazásokkal digitális térképeket lehet megnyitni és térbeli adatokat lehet rajta feltüntetni, analizálni. A Föld kerek formája miatt, az adatok megjelenítéséhez különböző vetület típusokat használ. A vetület meghatározza, hogy hogyan jelenítjük meg a gömb felületű Föld képét egy síkban (térképen). Mivel a Föld felszíne nem fejthető ki síkban, ezért az alakzatok (távolságok, szögek, területek) torzulnak síkban ábrázoláskor. Ezért különböző vetület típusokat alkalmaznak a feladattól függően [22]:

- Síkvetület: A felületi pontokat közvetlenül a térkép síkjára képezik.
- Hengervetület: A gömböt hengerpalástra képezzük, melyet egy alkotója mentén felvágva síkba terítünk.
- Kúpvetület: A gömböt kúppalástra képezzük, melyet egy alkotója mentén felvágva síkba terítünk.
- Poláris Vetület: A képfelület forgástengelye a Föld forgástengelyével esik egybe.
- Ekvatoriális vetület: A képfelület forgástengelye az Egyenlítő síkjában fekszik.
- Meridionális vetület: A két forgástengely hegyesszöget zár be.

A különböző vetületeik szerint is kategorizálják. Egy vetület lehet hossztartó, területtartó, szögtartó stb. Az alkalmazásnak megfelelő vetület megválasztása ezért kritikus, különben hamis információkat vonunk le például tárgyak elhelyezkedését illetően, vagy nem tudjuk pontosan meghatározni két pont távolságát.

A koordináta referencia rendszerekkel (Coordinate Reference System - CRS) a vetület minden pontját ki lehet jelölni három értékkel (koordinátával). A CRS-ek két további kategóriába sorolhatók: vetületi koordináta referencia rendszer és geográfiai koordináta referencia rendszer.

A geográfiai CRS rendszereket nagyon gyakran alkalmazzák. Ezek hosszúság (latitude) és szélesség (longitude) és néha magasság koordinátákat használnak a pozíció megadásához. A legelterjedtebb ilyen CRS a WGS 84 [23]. Ezt nagyjából mindenki ismeri, a hosszúság -90 és +90 fok között, a szélesség pedig -180 és +180 fok közötti tartományban változik.

A vetületi CRS rendszereknél egy koordináta rendszert használnak x, y és z koordinátákkal. Ezzel a három koordinátával bármely pont definiálható. Ezeknek a CRS-eknek

általában az egyenlítő egyik szélességi foka a viszonyítási pont. Az egyik ilyen CRS az Universal Transvers Mercator (UTM) [24].

A hullámterjedési szimuláció alkalmazás készítéséhez a QGIS szoftvert alkalmazom. Ez egy nyílt forráskódú, a PyQt keretrendszerrel felépített GIS szoftver. Az OSGeo fejleszti (Open Source Geospatial Foundation), amely egy non-profit szervezet. Céljuk az open source alkalmazások fejlesztése és népszerűsítése. A QGIS fejlesztésén kívül számos más geográfiai alkalmazás fejlesztésén dolgoznak, pl.: degree, GDAL, GeoMoose, GeoNewroks, stb.

## 7. Fejlesztési környezet létrehozása

Az alkalmazás fejlesztéséhez lehet használni, Windows, Linux vagy MAX OS-t is. Én Windows 10 operációs rendszeren dolgoztam. Az alábbi programokra, csomagokra, kiegészítőkre van szükség az alkalmazás elkészítéséhez:

- Python (én a 3.8-as verziót használtam, a minimum követelmény, hogy 3.x legyen);
- Python binder (én a pyrcc5-öt használtam);
- Qt Creator (én a 4.11.0 verziót használtam);
- QGIS (3.4.14-es verzió-t használtam, a lényeg, hogy 3.x legyen);
- QGIS plugin builder 3 plug-in;
- Valamilyen szövegszerkesztő a kód írásához (én a Qt beépített szerkesztőjét használtam).

Mindegyik szoftver ingyenesen elérhető a saját honlapjukon. Python programnyelven írta az alkalmazást a PyQt keretrendszeren belül (maga a QGIS is ezzel készült). Továbbá még szükség van python binding-ra, amire én a **pyrcc5**-öt használtam. Ez egy API (Application Programming interface), amelynek segítségével a python program képes használni a más programozási nyelven írt könyvtárakat. A releváns binding-okat a QGIS telepítéskor importálja, de a használatukhoz meg kell adni a plugin-nek az elérési útjukat. Létre kell hozni egy Batch fájlt (.bat). A Batch fájl tartalma az én esetemben az alábbi:

```
@echo off
call "C:\Program Files\QGIS 3.4\bin\o4w_env.bat"
call "C:\Program Files\QGIS 3.4\bin\qt5_env.bat"
call "C:\Program Files\QGIS 3.4\bin\py3_env.bat"

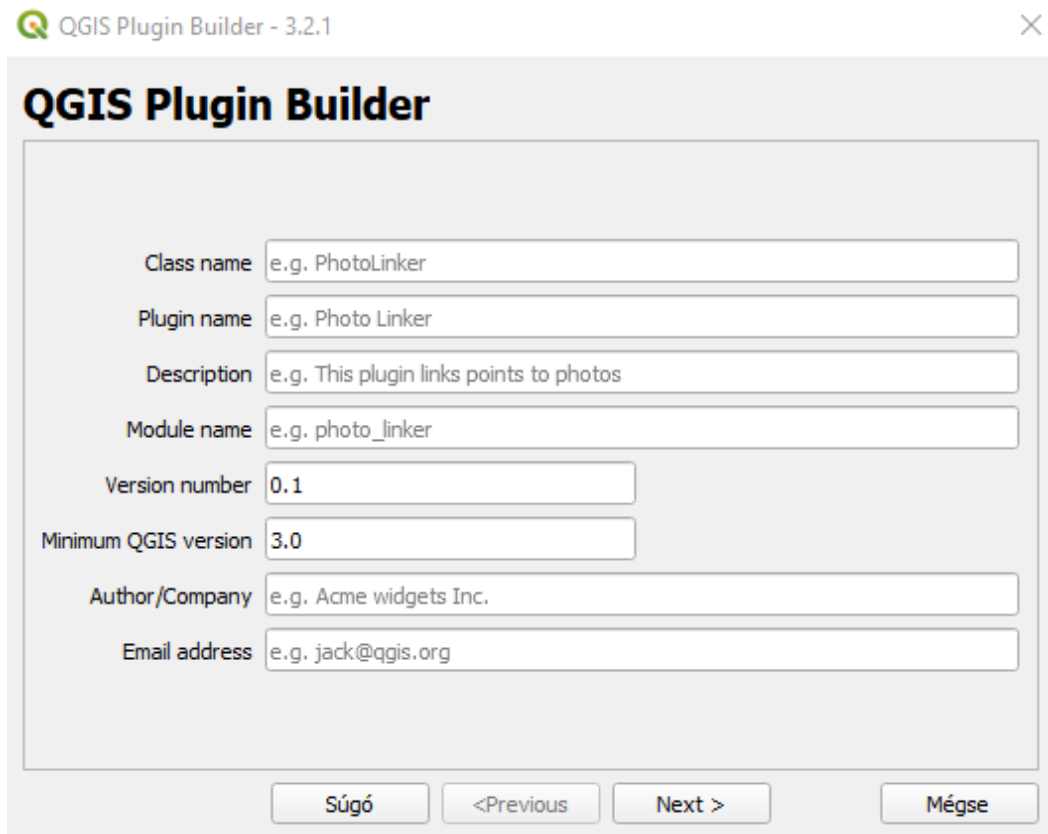
@echo on
pyrcc5 -o resources.py resources.qrc
```

Ezt a fájlt a későbbiekben be kell másolni a QGIS plug-in mappájába, a fájl neve legyen compile.bat (nem kötelező, hogy ez legyen a neve, de ajánlott).

A plugin fejlesztéséhez még kettő QGIS plug-in telepítése ajánlott. Az egyik a **Plugin Builder**. Ez a plugin létrehozza a szükséges fájlokat, könyvtár struktúrát a plugin fejlesztéséhez, nagyban megkönnyítve a folyamatot. A másik plugin a **Plugin Reloader**, amely segítségével a QGIS újraindítása nélkül is frissíthetjük a fejlesztett plugin-t, nem kell

újraindítani hozzá a QGIS-t (a QGIS alaphelyzetben csak az elindulásakor tölti be a plugin-eket).

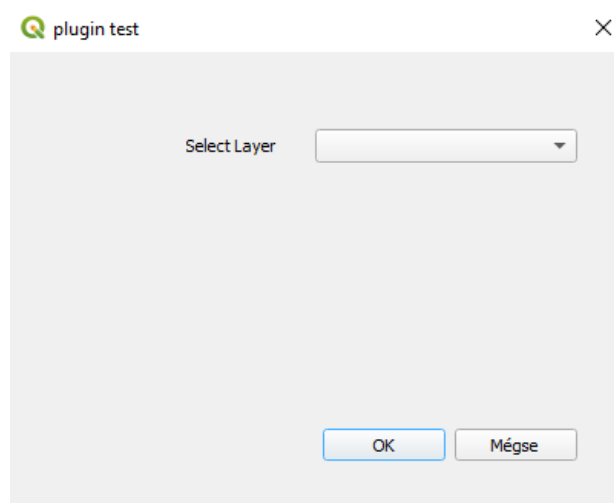
Miután fel lett telepítve az összes szükséges szoftver, a QGIS-ban a **modulok** → **plugin builder** → **plugin builder** menüpontot választva kezdhethetjük el a plugin létrehozását.



10. Ábra: Plugin builder kezdőablaka

Ha ezt megnyitottuk, akkor meg kell adni különböző adatokat (plugin név, verziószám, fejlesztő, cégnév, email cím, kiválasztott plugin sablon) és ki kell választani, hogy hova hozza létre a plugin mappáját. Ha létrehoztuk a plugin sablont, akkor ezt a létrehozott sablont be kell másolni a QGIS plugin mappájába, hogy meg is találja. Ez minden gépen más lehet, de a legegyszerűbb módja az útvonal meghatározásának, hogy a QGIS-en belül kiválasztjuk a **Beállítások** → **felhasználói profil** → **Aktív profil könyvtár megnyitása** menüpontot, amely a fájlkezelőben megnyitja az adott mappát. Itt még tovább kell menni a **python/plugins** mappába. Ide kell bemásolni a plugin builder által létrehozott plugin sablonunkat. Ezt követően a már létrehozott **comple.bat** fájlt is be kell másolni a plugin mappájába, és futtatni kell a script-et. Ha sikeresen lefutott, akkor meg kell jelennie egy **resources.py** fájlnek.

A plugin-t most már képes használni a QGIS, igaz funkciója nincs, de érdemes letesztelni, hogy minden megfelelően haladt-e. Ha a QGIS éppen fut, akkor ki kell kapcsolni, majd újra be, hogy betöltse az újonnan bemásolt plugin-t. Ha a QGIS újra betöltött, akkor a **Modulok** → **Modulok kezelés és telepítése** → **Telepített** menüpontban meg kell keresni és aktiválni kell a létrehozott plugin-ünket. A plugin neve meg fog egyezni a mappája nevével. Ezután már megtalálható a plugin-ünk a többi plugin mellett a kezelőfelületen, és el is indítható, igaz ez csak egy egyszerű ablakot nyit meg, és semmilyen funkciója nincs (még).



11. Ábra: QGIS plugin builder-el létrehozott plugin sablon

A fenti ábrán látható az alapértelmezett QGIS plugin UI-a. A fő python script neve megegyezik a plugin létrehozásakor megadott névvel (pl.: plugin.py). Ez a fő script és ezt kell szerkeszteni a plugin logikájának kialakításához. A UI szerkesztéséhez a Qt Creator-t alkalmazom.



## 8. Alkalmazás fejlesztése

### 8.1. Alkalmazás működési alapelve, tervezete

Alap térképnek az Open Street Map térképét használom. Ez a térkép EPSG:3857 CRS-t használ, ami egy geográfiai CRS. Gömb vetületű, aminek következtében a szögeket nem tartja rendesen nagyobb távolságok esetén, valamint az egyenlítőtől távolodva is egyre kevésbé tartja a területet. A hullámterjedési alkalmazásomhoz megfelel, mert empirikus hullámterjedési modelleket használok és mindig csak lokális szimulációkat végzek (nem a teljes Föld felszínére).

A hullámterjedés szimulációs alkalmazása során a legelső feladat a szimulációs terület meghatározása. Az egyik opció maga a koordináták megadása (hosszúság, szélesség), a másik pedig, hogy egy kijelölő eszközzel egy négyzetet rajzolhatunk a térképre, ezzel kiválasztva a szimulációs területet. A kiválasztott területet fel kell bontani kisebb négyzetekre. A felhasználónak itt lehetősége van megadni a kisebb négyzetek magasságát és szélességét méterben.

A terület kiválasztása után meg kell adni a bázisállomás koordinátáit. Ezt is kétféleképpen lehet megadni: a koordináták megadásával vagy egy pont kijelölő eszközzel, ami a térképre kattintott pont koordinátáit kiolvassa, és ezt helyezi be a bázisállomás koordinátáinak.

Az adóantenna nyereség karakterisztikáját is figyelembe kell vennie a vételi jelszint kiszámítása során. Amennyiben az adóantenna teljes karakterisztikája nem ismert, úgy lehetőség van egy konstans nyereség érték megadására, de így pontatlanabb lesz a szimuláció, az irány változásával nem változik a nyereség. Viszont egy megadott formátumú .csv fájlal meg lehet adni a bázisállomás antennájának horizontális és vertikális nyereség karakterisztikáját, amiből az alkalmazás kiolvassa a karakterisztikát.

Ezt követően a hullámterjedési modellhez szükséges alapvető paraméterek kezelését kell megoldani. Ezeket egyszerűen egy közös ablakba és a modellekhez külön készített ablakokba kell megadni számszerűen (magasság, nyereség, adóteljesítmény, frekvencia stb.).

Mivel ezek a szimulációk sokáig tarthatnak, az alkalmazás tartalmaz egy haladást jelző csíkot (progress bar), amely jelzi, hogy a szimuláció hány százalékig van kész jelenleg. Továbbá lehetőséget fog biztosítani a szimulációs réteg mentési módjának kiválasztására. A QGIS rétegeben kezeli a különböző adattáblákat (a képszerkesztőkhöz hasonlóan rétegeket

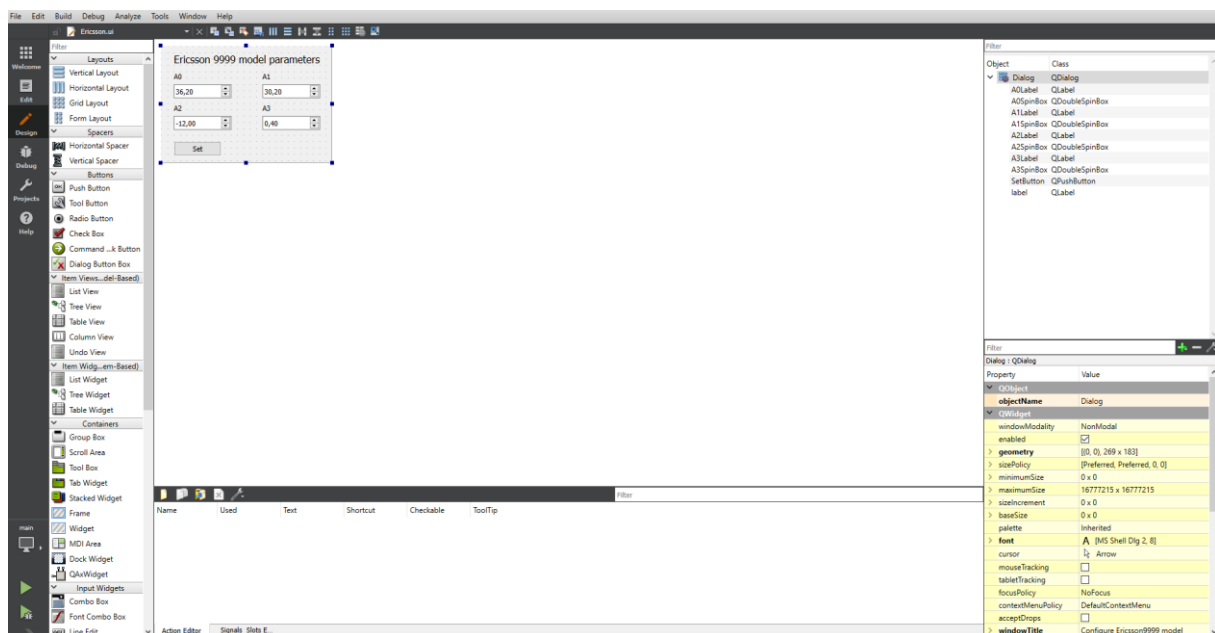
lehet elhelyezni a vászonra). Ezért a szimulációs eredményt ideiglenes „memory” rétegbe vagy fájlba lehet elmenteni.

Ezeknek a funkcióknak a létrehozását, beépítését mutatom be a hullámterjedési szimulációs alkalmazás elkészítése során.

## 8.2. A UI létrehozásának módszere

A plugin UI (User Interface) elkészítéséhez a Qt Creator-t használom. Ezzel rögtön lehet látni a UI kinézetét és vizuálisan, „drag&drop” módszerrel lehet szerkeszteni. Ilyenkor a Qt Creator egy .ui fájlt hoz létre. A Qt creator pedig ebből a .ui fájlból képes generálni a szükséges python kódot. Ezzel felgyorsítva a fejlesztést.

Ha módosítunk az adott UI kezelőfelületén, akkor a plugin-t újra be kell tölteni, hogy a módosítások életbe lépjenek. Ehhez a Reload plugin-t kell használni. A kiválasztott plugin-t újra betölti, ezzel érvénybe léptetve a módosításokat. A UI-t folyamatosan a funkciók fejlesztésével együtt fejlesztettem.



12. Ábra: Qt Creator UI fejlesztési felülete

## 8.3. Szimulációs terület kijelölése

A szimulációs területet egy négyzetként lehet megadni. Ehhez két pontra van szükség, a kijelölendő terület bal felső és a jobb alsó sarkára. Két módon lehet megadni ezt a területet:

- Beírni a két pont koordinátáját a megfelelő formában (pl.: *1955761.4825295145,1973982.3607905041,6057837.963994449,6049199.918004055 [EPSG:3857]*). Itt a térképnek megfelelő, vagyis EPSG:3857 CRS koordinátákat kell megadni.
- A terület kiválasztó eszközzel bejelölni.

A terület kiválasztó eszközhöz a QGIS beépített python class-át alkalmazom, a QgsMapToolEmitPoint-ot. Egy külön python fájlba, a Tools.py-ba definiálom a terület kijelöléshez szükséges class-okat. Ahhoz, hogy ezt használhassam, az alábbi class-okat kell importálni a python script-be:

```
from qgis.core import QgsPointXY
from qgis.gui import QgsMapToolEmitPoint, QgsRubberBand
from qgis.PyQt.QtCore import Qt
```

A class-ot RectangleMapTool-nak nevezem el, és egyetlen változóra van szüksége a létrehozásakor, a vászonra (maga a térkép), amelyen használni akarom. Ezt követően a egy QgsRubberBand objektumot rendelek hozzá. Ez az objektum alkalmaz változtatható geometriájú vonalak létrehozására, megjelenítésére. Továbbá az isWorking változót igaz-ra állítja be, ezzel aktívvá téve az eszközt, és végül alaphelyzetbe állítja a reset() funkcióval:

```
self.rubberBand = QgsRubberBand(self.canvas, True)
self.rubberBand.setColor(Qt.blue)
self.rubberBand.setWidth(1)
self.rubberBand.setFill(Qt.blue)
self.isWorking = True
self.reset()
```

Következőnek a reset() funkciót definiálom, aminek során a négyzet kezdő és végpontját „none”-ra állítom be és reseteli a „rubberband” paramétereit.

```
def reset(self):
    self.startPoint = self.endPoint = None
    self.isEmittingPoint = False
    self.rubberBand.reset(True)
```

A következő a vászonra kattintás eseményének kezelése. Ehhez a kezdő és végpontot először a kattintás pontjával teszi egyenlővé és kirajzolja a négyzetet a kezdő és végpont alapján (ilyenkör egyértelműen csak egy pontot rajzol ki, mert a kezdő és végpontja megegyezik egymással).

```
def canvasPressEvent(self, e):
    self.startPoint = self.toMapCoordinates(e.pos())
    self.endPoint = self.startPoint
```

```
self.isEmittingPoint = True
self.showRect(self.startPoint, self.endPoint)
```

A következő funkció azt az eseményt figyeli, amikor elengedjük az egér gombnyomását a vásznon. Ilyenkor elmenti a kezdő és végpontot és a változók segítségével jelzi, hogy most már inaktív, a kijelölést elrejt.

```
def canvasReleaseEvent(self, e):
    if self.startPoint == self.endPoint:
        self.rubberBand.hide()
        return
    self.isEmittingPoint = False
    self.rubberBand.hide() #Hides the rubberband
    self.isWorking = False
```

Amikor éppen jelöljük ki a szimulációs területet, az egér mozgására az alábbi funkció mindig frissíti a végpontot (ha az eszköz éppen aktív állapotban van) és kirajzolja az újabb végpont szerint a négyzetet a vásznon.

```
def canvasMoveEvent(self, e):
    if not self.isEmittingPoint:
        return

    self.endPoint = self.toMapCoordinates(e.pos())
    self.showRect(self.startPoint, self.endPoint)
```

Végezetül pedig már csak a négyzet kirajzolását kellett megírni, valamint, hogy a a kezdő és végpontok koordinátáit elmentse változóba.

```
def showRect(self, startPoint, endPoint):
    self.rubberBand.reset(True)
    if startPoint.x() == endPoint.x() or startPoint.y() ==
endPoint.y():
        return

    point1 = QgsPointXY(startPoint.x(), startPoint.y())
    point2 = QgsPointXY(startPoint.x(), endPoint.y())
    point3 = QgsPointXY(endPoint.x(), endPoint.y())
    point4 = QgsPointXY(endPoint.x(), startPoint.y())
    point5 = QgsPointXY(startPoint.x(), startPoint.y())

    self.rubberBand.addPoint(point1, False)
    self.rubberBand.addPoint(point2, False)
    self.rubberBand.addPoint(point3, False)
    self.rubberBand.addPoint(point4, False)
    self.rubberBand.addPoint(point5, True) # true to update
    canvas
    self.rubberBand.show()

    def deactivate(self):
```

```
QgsMapTool.deactivate(self)
self.deactivated.emit()
```



13. Ábra: Szimulációs terület kiválasztó eszköz

A fenti ábrán látható módon egy kék négyzettel lehet kijelölni a szimulációs területet, majd az egérgomb elengedésével automatikusan betölti az adatokat az alkalmazás a kezelőfelületbe:

Selected area

14,6057331.8284872,6070288.897472792 [EPSG:3857]

14. Ábra: A szimulációs terület koordinátái a kezelő felületen

Ezt a terület kijelölő objektumot egy másik class-hoz adom hozzá. Ezek az úgynevezett „worker” class-ok. A worker-ek a párhuzamos számításokért felelnek. Erre azért van szükség, hogy a terület kijelölése közben a QGIS szoftver ne fagyjon le. Ha nem alkalmazzuk ezeket a párhuzamos szálú folyamatokat, akkor az alkalmazás nem lesz jól használható, váratlan helyzetekben lefagyhat. A későbbiekben bemutatásra kerül a worker class működése és felhasználása is. Ezt az eszközt a „ToolWorker” class-hoz adtam hozzá.

## 8.4. Szimulációs rács generálása (grid)

Miután megvannak a szimulációs terület koordinátái, létrehozom a rács réteget, amely kisebb négyzetrácsokra van felosztva. Ezeknek a négyzetrácsoknak fogja kiszámolni az

alkalmazás a térerősség értékeit. Ehhez a QGIS rendelkezik saját, beépített algoritmussal, ezt csak meg kell hívnom az alkalmazásban a megfelelő paraméterekkel.

A QGIS beépített algoritmusainak használatához szükség van egy könyvtárra, amely alapértelmezetten nem érhető el a plugin-ek számára. Először meg kell adni a könyvtárnak az elérési útját és csak ez után lehet importálni a „processing” könyvtárat:

```
sys.path.append('C:\Program Files\QGIS 3.4\apps\qgis-  
ltr\python\plugins')  
from processing.core.Processing import processing
```

A könyvtár importálása után már használható a „processing” class összes funkciója (arra figyelni kell, hogy a „processing” modul nem azonos helyen van minden egyes gépen, ezt mindig ki kell deríteni). A rács réteg létrehozásához az alábbi paraméterekre van szükség:

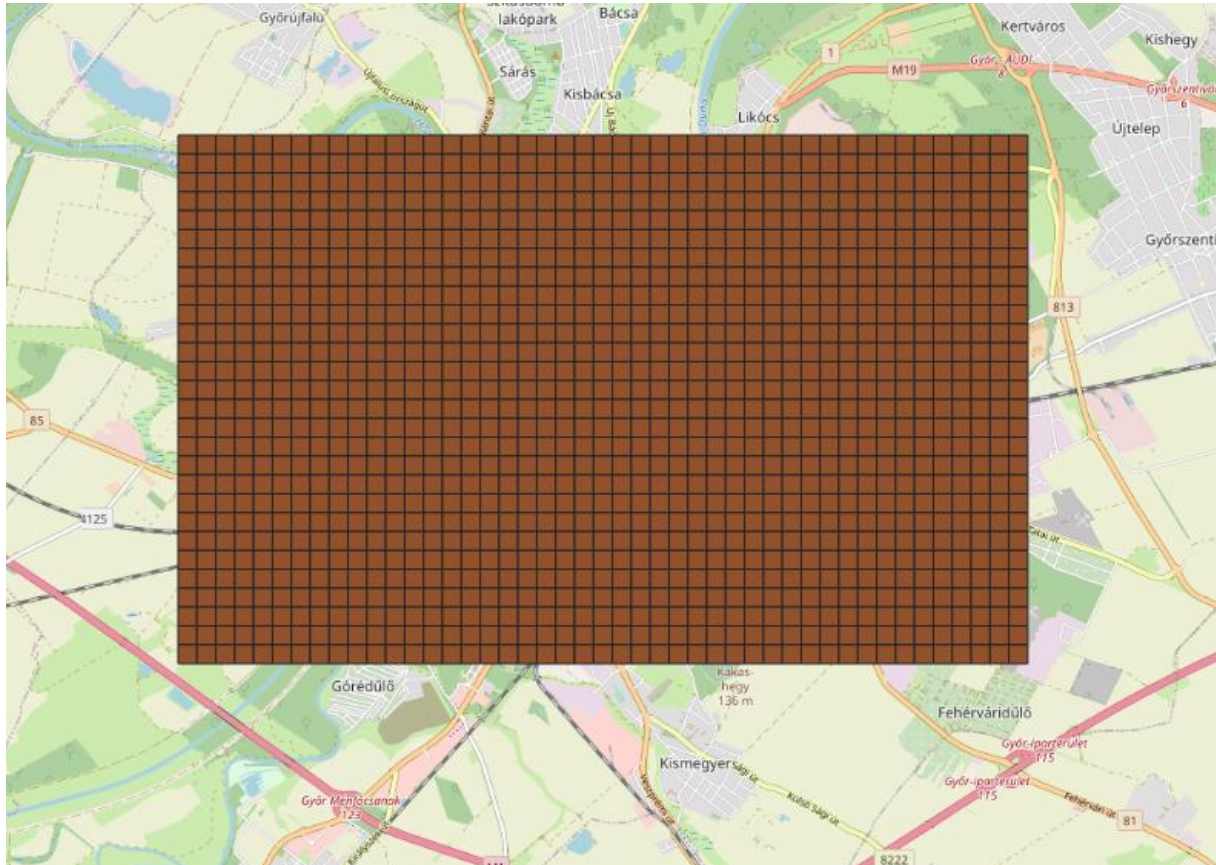
- A kijelölt terület bal felső és jobb alsó koordinátáira (amit a terület kijelölő eszköz ad vissza);
- Típus (lehet rombusz vagy más forma is, én a 2-es típust használom, ami a négyzetrács);
- A rácsok horizontális mérete;
- A rácsok vertikális mérete;
- A rácsok horizontális átfedése (ezt mindig nullára állítom);
- A rácsok vertikális átfedése (ezt is mindig nullára állítom);
- A használt CRS típus (Az OSM térképnek megfelelő, EPSG:3857 CRS-t állítom be);
- Az algoritmus eredményének kimenete (mindig egy ideiglenes, úgynevezett „memory” rétegbe mentem).

A szükséges paraméterek közül csak hármat paraméterezek, a rácsok horizontális és vertikális méretét, valamint a kijelölt területet koordinátáit. Ezeket az alkalmazás felületén lehet megadni. A rácsgeneráló algoritmust az alábbi módon kell meghívni:

```
def CreateGrid(self):  
    self.Layer =\  
    processing.run(\  
    "qgis:creategrid",\  
    {'TYPE':2,\  
    'EXTENT': str(self.Extent),\  
    'HSPACING':self.Hspacing,\  
    'VSPACING':self.Vspacing,\  
    'HOVERLAY':0,\  
    )
```

```
'VOVERLAY':0,\n'CRS':'EPSG:3857',\n'OUTPUT':'memory:'))
```

Ezt a funkciót is egy worker class-hoz rendeltem hozzá. Az algoritmus végeztével létrejön egy rács réteg a megadott paramétereknek megfelelően.



15. Ábra: Létrehozott rács réteg

## 8.5. Bázisállomás/Gateway pozíciójának megadása

A bázisállomás koordinátáinak megadására is két lehetőség van: kézzel beírni a koordinátákat (EPSG:3857) vagy egy pont kijelölő eszköz segítségével a QGIS vásznára kattintva behelyettesíti a kiválasztott pont koordinátáit. A felépítése hasonlít a terület kijelölő eszközhöz.

```
class ClickTool(QgsMapToolEmitPoint):\n    def __init__(self, canvas):\n        self.canvas = canvas\n        self.isWorking = True\n        QgsMapToolEmitPoint.__init__(self, self.canvas)\n\n    def canvasPressEvent(self, e):\n        self.Point =self.toMapCoordinates(self.canvas.mouseLastXY())
```

```
def canvasReleaseEvent(self, e):
    self.isWorking = False
```

Az eszköznek itt is meg kell adni, hogy melyik vásznat (canvas) használja. Ezt követően pedig két esemény (event) kezelését kell megoldani: a vászonra kattintás és az egérgomb elengedését. Amikor a vászonra kattintunk, akkor az eszköz elmenti az egér jelelnei koordinátáit. Az egérgomb elengedésekor pedig inaktív állapotba megy át. Ezt az eszközt is majd egy worker class kezeli, hogy párhuzamosan tudjon működni a többi funkcióval, a QGIS ne fagyjon le teljesen amikor ezt a felhasználó kiválasztja. Az eszköz a projekt CRS-ének megfelelő koordinátákat ad vissza, de ezt átalakítom WGS 84 CRS-be, hogy a felhasználó könnyebben értelmezze ezt, illetve ha manuálisan akarja megadni a koordinátákat könnyebben beírhatta, ne kelljen az átalakítással foglalkoznia (ezt a koordinátarendszert használják a leggyakrabban).



Gateway latitude: 47,6865656486

Gateway longitude: 17,6360276036

Select

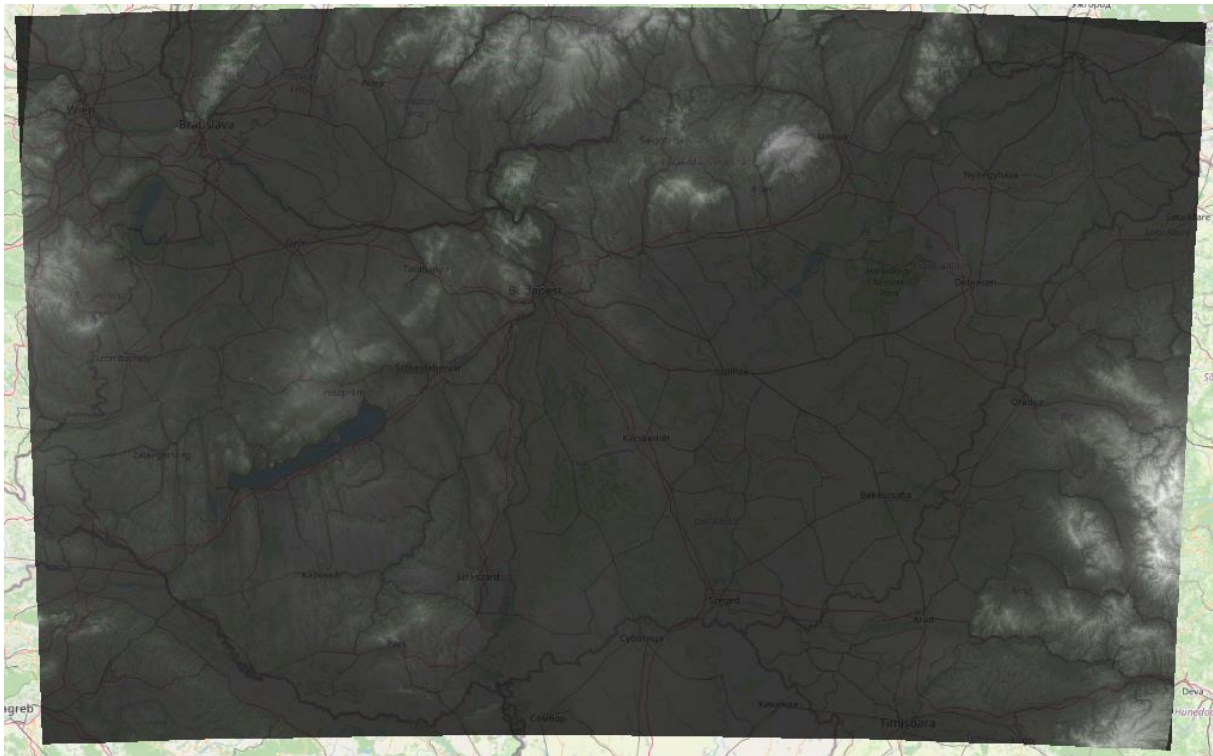
16. Ábra: A kiválasztott pont koordinátáit kiírja az alkalmazás kezelőfelületére

## 8.6. DEM (Digital Elevation Model) használata

A hullámterjedési szimuláció pontosításához figyelembe veszem a szimulációs terület magasságváltozását. Ehhez olyan adatbázisra van szükség, amely tartalmazza a felszín magasságát. Erre a DEM térképek alkalmasak [25]. A DEM egy 3 dimenziós modell, amely megadja hogy az adott terület magasságát, ezzel modellezve a felület egyenetlenségét. Ilyen adatbázisok ingyenesen elérhetők, mint például a Copernicus Európa DEM adatbázisa. Az én általam használt DEM adatbázis egy 25x25 raszter méretű Európa adatbázis magyarországi részlete (ezek az adatbázisok több GB nagyságúak lehetnek, ezért használtam csak a magyarországi metszetet, hogy a feldolgozás könnyebb legyen).

Az adatbázis TIFF (Tagged Image File Format) fájlformátumú, amelyet rasztergrafikus képek tárolására fejlesztettek ki. Egyszerűen hozzáadható a QGIS projekthez az adatbázis, a **réteg → réteg hozzáadása → raszter réteg hozzáadása** menüpontban ki kell választani a TIFF fájlt és meg kell nyitni. A QGIS automatikusan generál ebből egy réteget és elhelyezi a vásznon.





17. Ábra: Magyarország DEM adatbázis megjelenítése

A fenti ábrán látható, hogy az OSM térkép fölé helyezett DEM adatbázissal jól láthatók az alacsonyabban és magasabban fekvő területek. A hullámterjedési szimuláció szempontjából a magasság értékek ismerete fontos.

A QGIS ilyenkor különböző sávokba (band) rendezi a raszter réteg adatait. Mivel a DEM réteg csak egyetlen értékkel, a magassággal rendelkezik, ez az 1-es sávban van (band 1). Ennek az 1-es sávnak az értékét kell lekérdezni az adott koordinátában, hogy megkapjuk a magasságot. Miután a raszter réteg referenciáját eltároltuk egy változóban, az alábbi módon lehet kinyerni a magasság értéket adott koordinátánál:

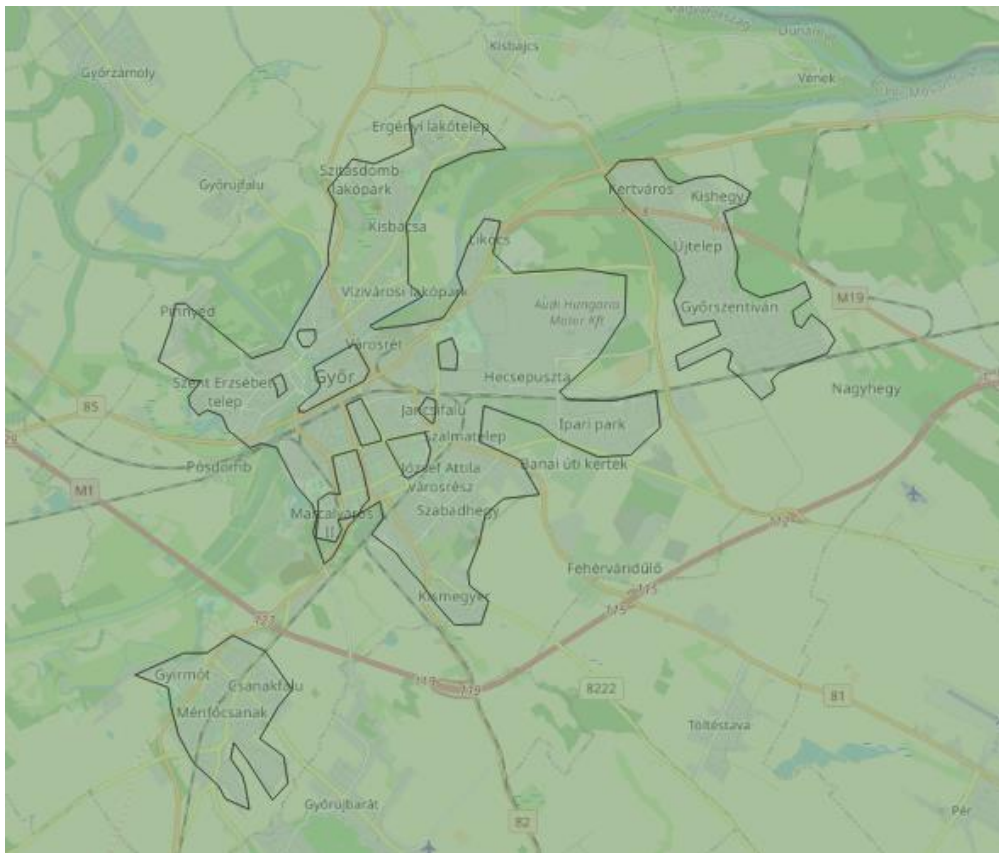
```
Height, res = DEMLayer.dataProvider().sample(coordinates, 1)
```

A magasság értéket ilyenkor a Height változóban tárolja el, és a coordinates változó pedig egy pont koordinátáit tartalmazza [x,y], a végén pedig az 1-es azt jelöli, hogy az 1-es band adatát kérdezzük le. Az így kinyert terepmagasság felhasználható a bázisállomás és a mobil állomás magasság korrekciójára.

## 8.7. Terület típus meghatározása, kinyerése

A hullámterjedési modell alkalmazásakor különböző korrekciós tényezőket használhatunk a végeredmény pontosítása érdekében. Például a más csillapítás tényezőt lehet

rendelni belváros, külváros, erdő, víz, mező stb. területekhez. Ehhez először egy „shape” fájl hoztam létre, amely területeket tartalmaz (polygon). Miután a réteget létrehoztam, a területeket is meghatároztam a térképre rajzolva. Ha részletesen akarja ezt valaki elvégezni, akkor két módszere van: szerezni egy olyan adatbázist, ami már tartalmazza ezeket az adatokat vagy egy képfelismerő algoritmust le kell futtatni a műholdas felvételeken, ami képes felismerni a különböző terület típusokat és kijelölni őket. Mivel nem volt számomra elérhető részletes adatbázis, a területek kategorizálása képfelismerő algoritmussal pedig túl sokáig tartott volna, ezért én manuálisan, kevésbé részletesen kijelöltem a területeket Győr környékén.



18. Ábra: Kategóriákba sorolt területek

Minden egyes területhez tartozik egy típus, ami a lapján az alkalmazás majd képes lesz eldönteni, hogy mekkora korrekciós faktort alkalmazzon.

	id	Type
1	6	rural
2	5	suburban
3	4	suburban
4	3	suburban
5	2	suburban
6	1	urban
7	0	urban
8	12	urban

19. Ábra: QGIS terület típus réteg attribútum táblázata

## 8.8. Antenna karakterisztika felhasználása

Az antenna karakterisztikája és nyeresége alapvetően befolyásolja a hullámterjedést, ezért ez figyelembe kell venni a szimuláció folyamán is. Az antenna karakterisztikáját egy csv fájlal lehet megadni. A .csv fájl a horizontális és vertikális nyereség értékeket tartalmazza. A .csv fájlban a mezőelválasztó karakter a vessző (,) és a számok tizedespontot használnak. Ez szükséges ahhoz, hogy az alkalmazás megfelelően tudja beolvasni az adatokat. A fájl egy header sorral kezdődik:

Position [deg]	Horizontal gain [dB]	Vertical Gain [dB]
----------------	----------------------	--------------------

A .csv fájl beolvasásához a python csv modulját kell importálni, majd az alábbi szerint olvasom be a karakterisztika értékeket. Az értékeket szög szerint növekvő sorrendbe rendezi el, ha esetleg nem így lenne, mert az alkalmazás többi része így tudja feldolgozni.

```
def ReadCsv(filepath, hor, ver):
    with open(filepath, newline='') as file:
        reader = csv.reader(file, delimiter = ',')
        for i, line in enumerate(reader):
            if(i > 0):
                hor.append({'deg' : float(line[0]), 'gain' :
float(line[1])})
                ver.append({'deg' : float(line[0]), 'gain' :
float(line[2])})
```

```
hor.sort(key = keyfunc)
ver.sort(key = keyfunc)
```

Van lehetőség a karakterisztika eltolására is, hogy a szimuláció során az antenna forgatását, pozíciójának változtatását lehessen szimulálni. Az offset szögértéket hozzáadja a legelső oszlophoz, majd ismét sorba rendezi az értékeket, és 0 és +360 fok között tartja a pozíció értékeket:

```
def AddOffset(array, offset):
    for x in array:
        x['deg'] += offset
        if(x['deg'] > 360):
            x['deg'] -= 360
    array.sort(key = keyfunc)
```

Következőnek az azimut szöget kell meghatározni a bázisállomás és a vizsgált pont között. Ezt az azimut szöget felhasználva kapjuk meg az antenna karakterisztikáját. Az azimut meghatározásához csak a bázisállomás és a vizsgált pont koordinátája szükséges:

```
def CalcAzimut(gateway, point):
    gatewaylat = math.radians(gateway.y())
    gatewaylon = math.radians(gateway.x())
    pointlat = math.radians(point.y())
    pointlon = math.radians(point.x())
    z = math.cos(pointlat) * math.sin(pointlon - gatewaylon)
    w = math.cos(gatewaylat) * math.sin(pointlat) -
    math.sin(gatewaylat) * math.cos(pointlat) * math.cos(pointlon -
    gatewaylon)
    Azimut = math.atan2(z,w)
    Azimut = math.degrees(Azimut)
    if(Azimut < 0):
        Azimut += 360
    return Azimut
```

Az adott irány nyereség kinyeréséhez még interpolálni kell a karakterisztika értékeket. Ha például 10 fokonként van megadva a nyereség, de az azimut szöge 15° akkor interpolálni kell a 10 és 20 fok értékével. Az antenna karakterisztikájának interpolációja:

```
def InterpolateGain(array, deg):
    try:
        for i, x in enumerate(array):
            if(deg == x['deg']):
                Gain = x['gain']
                break
            elif(deg > array[len(array)-1]['deg']):
                Gain1 = array[len(array)-1]['gain']
                Gain2 = array[0]['gain']
                dGain = Gain2 - Gain1
                dAzimut = array[0]['deg'] + 360 - array[len(array)-
                1]['deg']
```

```

        rAzimut = deg - array[len(array)-1]['deg']
        Gain = Gain1 + dGain/dAzimut * rAzimut
        break
    elif(deg < array[len(array)-1]['deg'] and deg >
array[len(array)-2]['deg']):
        Gain1 = array[len(array)-2]['gain']
        Gain2 = array[len(array)-1]['gain']
        dGain = Gain2 - Gain1
        dAzimut = array[len(array)-1]['deg'] -
array[len(array)-2]['deg']
        rAzimut = deg - array[len(array)-2]['deg']
        Gain = Gain1 + dGain/dAzimut * rAzimut
        break
    elif(deg < x['deg']):
        if(deg < array[0]['deg']):
            Gain1 = array[len(array)-1]['gain']
            Gain2 = array[0]['gain']
            dGain = Gain2 - Gain1
            dAzimut = 360 + array[0]['deg'] -
array[len(array)-1]['deg']
            rAzimut = 360 - array[len(array)-1]['deg'] + deg
            Gain = Gain1 + dGain/dAzimut * rAzimut
            break
        else:
            Gain1 = array[i]['gain']
            Gain2 = array[i+1]['gain']
            dGain = Gain2 - Gain1
            dAzimut = array[i+1]['deg'] - array[i]['deg']
            rAzimut = deg - array[i]['deg']
            Gain = Gain1 + dGain/dAzimut * rAzimut
            break

    return Gain
except:
    e = sys.exc_info()[0]
    print("Error while interpolating gain values!")
    print(e)
    return -1

```

Az interpolációt követően megvan az adott ponthoz tartozó antenna nyereség, amivel aztán ki lehet számolni a térerősség értékét.

## 8.9. Hullámterjedési csillapítás kiszámítása modellek segítségével

A vételi oldalon fellépő térerősség kiszámítása során a legnehezebben kiszámítható tényező az átviteli közeg csillapítása. Ehhez használjuk a különböző hullámterjedési modelleket. Az alkalmazásba három hullámterjedési modellt alkalmaztam:

- Okumura
- Hata

- Ericsson 9999

A már korábbiakban ismertetett paramétereket kell ezeknek a modelleknek megadni, hogy kiszámíthassuk a közeg csillapítását. Létrehoztam egy hullámterjedési modell calss, amely képes kiszámolni a hullámterjedési csillapítást a megadott paraméterek alapján. Az Okumura modell csillapításának kiszámolása így:

```
def CalcOkumura(self, distance , GWHeight, MoteHeight, Freq, Garea,
Corr):

    fsl = 20*math.log10(distance)+20*math.log10(Freq)-27.55

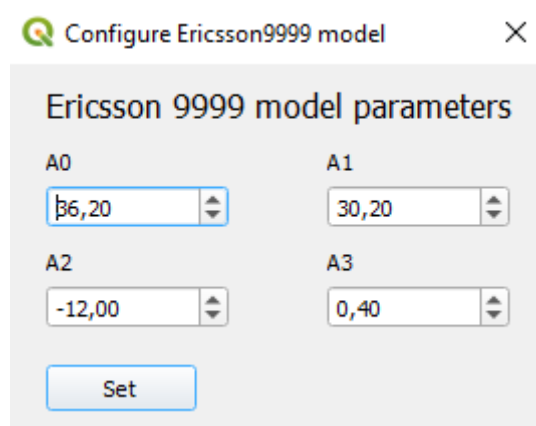
    amu = 43653.73 + (12.08923 -
43653.73)/(1+pow((distance/195043900000),0.4730321))

    ghre = 10*math.log10(MoteHeight/3)
    ghte = 20*math.log10(GWHeight/200)

    Okumuraloss = fsl-Garea+amu-ghre-ghte-Corr
    return Okumuraloss
```

Az  $A_{mu}$  érték kiszámításakor minden irodalom csak egy ábrát ad meg a meghatározásához, ezért egy pontokra illeszkedő függvény generátor alkalmazást használva hoztam létre egy függvényt, ami megadja az  $A_{mu}$  értékét. A MyCurveFit online felületét használtam ehhez [26].

Minden hullámterjedési modellhez tartozik egy funkció, ami kiszámolja a közegcsillapítást, és azt használja fel az alkalmazás, amit a felhasználó a kezelőfelületen kiválaszt. A különböző hullámterjedési modellek más-más paramétereket igényelnek, ezért a modellekhez külön paraméter modal ablakot hoztam létre a Qt Creator segítségével. A modal ablak jelentősége, hogy amikor ezt előhívjuk a paraméterek beállítása érdekében, addig a többi, háttérbe került ablakot nem használhatjuk, először mindenképp a megnyitott modal ablakot kell becsukni. Ez biztosítja, hogy befejezzük az összes beállítást még mielőtt tovább haladnánk a folyamatban. Az Ericsson 9999 modell paraméter modal ablaka:



20. Ábra: Ericsson paraméter modal ablak

## 8.10. Szimulációs rácsok adatainak kiszámítása és elmentése

A szimulációs terület négyzetekből áll, és minden négyzet saját adatokkal rendelkezik. Ahhoz, hogy minden egyes négyzetben ki tudja számolni az alkalmazás a térerősség értékét, az ahhoz szükséges adatokat is ki kell számolni. A rács létrehozását követően minden négyzetnek csak a négy sarkának koordinátája szerepel az attribútum táblájukban (EPSG:3857 CRS-ben).

Rács :: Összes elem: 3760, Szűrve: 3760, Kiválasztva: 0

	left	top	right	bottom	id
1	1959650,316004...	6051194,526498...	1959850,316004...	6050994,526498...	720
2	1959850,316004...	6058994,526498...	1960050,316004...	6058794,526498...	721
3	1959850,316004...	6056394,526498...	1960050,316004...	6056194,526498...	734
4	1959850,316004...	6056194,526498...	1960050,316004...	6055994,526498...	735
5	1959850,316004...	6056794,526498...	1960050,316004...	6056594,526498...	732
6	1959850,316004...	6056594,526498...	1960050,316004...	6056394,526498...	733
7	1959850,316004...	6057194,526498...	1960050,316004...	6056994,526498...	730
8	1959850,316004...	6056994,526498...	1960050,316004...	6056794,526498...	731
9	1959850,316004...	6057594,526498...	1960050,316004...	6057394,526498...	728

21. Ábra: Létrehozott raszter réteg kezdeti adatai

A négyzetek középpontjainak koordinátájára van szükség, mert itt vizsgálom a térerősség értékét, valamint kell a magassága, a gateway-hez viszonyított azimut szöge, a gateway-től való távolsága, a bázisállomás nyeresége és a kiszámított térerősség szint.

Mivel a rétegek az adatokat az attribútum tábláikban tárolják, ide kell lementeni az összes releváns információt. A raszter réteg létrehozásakor nincs meg az összes mező (oszlop) ami kell, így első lépésben ezeket kell létrehozni. Minden rétegnek van egy „DataProvider” objektuma, amellyel az attribútum táblát lehet szerkeszteni. Egy réteghez az alábbi módon lehet új mezőt adni (például a gateway-től való távolság kezeléséhez):

```
layer.dataProvider().addAttributes([QgsField("Distance",QVariant.Double)])
```

A QGIS esetében ezeket a mezőket QgsField-eknek nevezik. A mező létrehozásakor meg kell adni a mező nevét (ebben az esetben Distance) egy string értékkel, a mező adattípusát pedig egy class-al kell megadni. Mivel a QGIS a PyQt keretrendszerrel készült el, ezért ugyan azokat az adattípusokat használja. A QVariant egyik objektumával lehet megadni, hogy milyen adatot tároljon. Ez lehet string (QVariant.String), double (QVariant.Double), boolean (QVariant.Boolean) stb.

Miután az összes szükséges mezőt létrehozta a program, elkezdi kiszámolni minden egyes rács elem értékeit (azimut szög, antenna nyereség, távolság, közegcsillapítás). Amikor kiszámította az adott paramétert, elmenti a réteg attribútum táblázatába az alábbi szintaktikával:

```
DataProvider.changeAttributeValues({ id :  
{layer.fields().indexOfName('Distance') : distance} })
```

Az összes adat kiszámolása után már csak a vételi jelszintet kell kiszámolnia. Ehhez az adóteljesítményt, az adóantenna és a vevőantenna nyereségét és a hullámterjedési modell csillapítását összegzi.

```
rss_i = self.TxPower + Gain + self.UEGain - model_loss
```

A további változók okozta csillapítást be lehet táplálni a modellek korrekciós tényezőinek változtatásával (például fading tartalékot csillapításként hozzáadjuk a hullámterjedési modellhez).

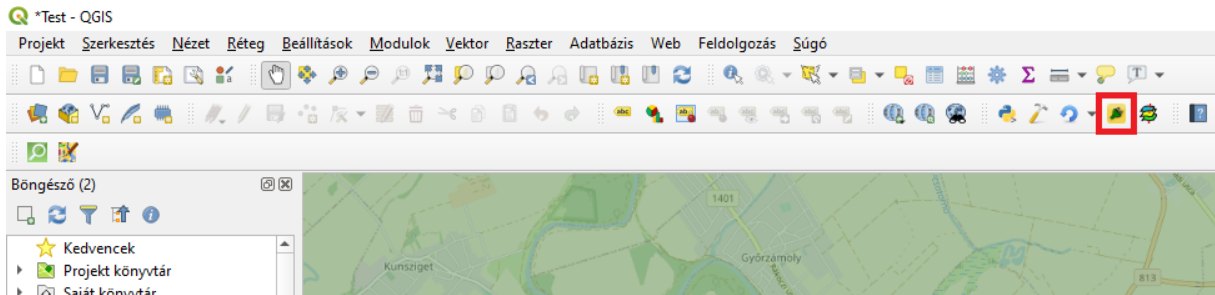
A program eközben megszámolja, hogy összesen hány négyzetre kell kiszámolni az adatokat, és azokat elosztja 100-al. Ezt figyeli, és mindig, amikor a négyzetek 1%-át kiszámította, úgy növeli a progress bar értékét. Amikor a progress bar eléri a 100%-ot, a szimuláció véget ér és megjelenik az újszimulációs réteg.

Ezzel egy viszonylag könnyen kezelhető, de rugalmas hullámterjedési szimulációs alkalmazást hoztam létre.



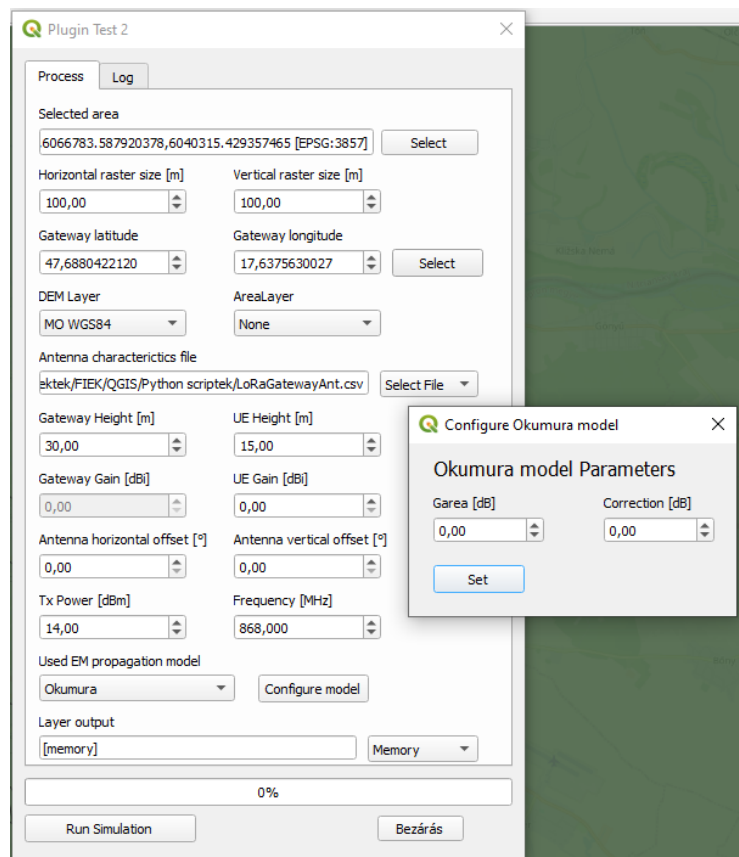
## 8.11. Elkészült program használati útmutatója

A plugin megnyitható a QGIS kezelőfelületén:



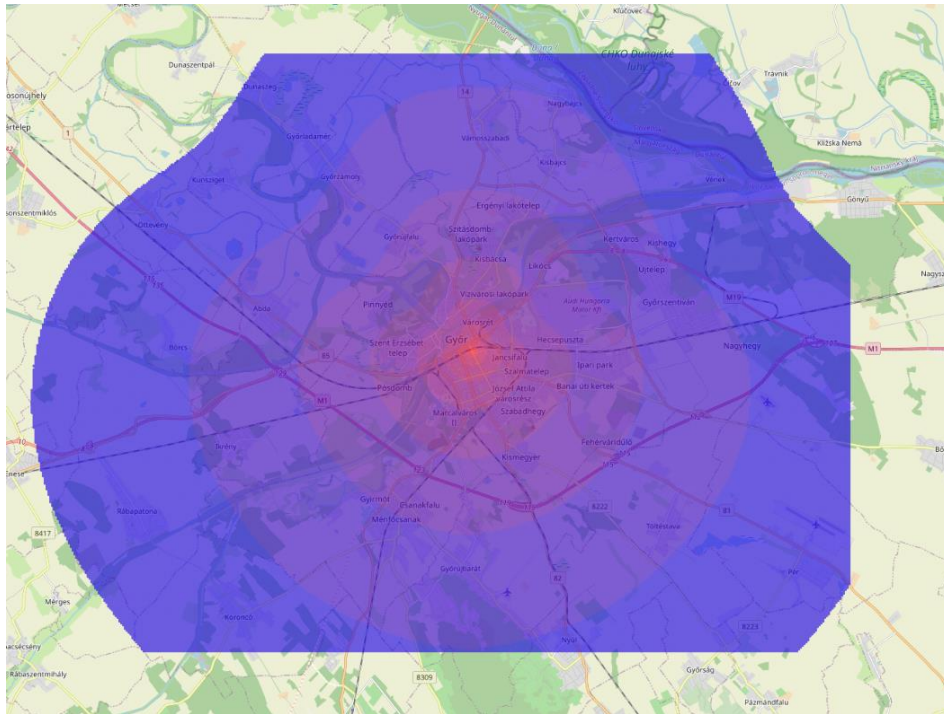
22. Ábra: Plugin megnyitása a QGIS-ben

Az ikonra kattintva felugrik a plugin kezelő felülete:



23. Ábra: Hullámterjedés plugin beállítása, teljes kezelőfelülete

Ezután csak a „Run Simulation” gombot kell megnyomni és elkezd az értékek kiszámítását. A szimbólum beállítások után (értékek skálázása, színek meghatározása) a végeredmény az alábbiak szerint néz ki:



24. Ábra: Példa hullámterjedési szimulációs eredmény antenna karakterisztikával



25. Ábra: hullámterjedési szimuláció terület típusokat figyelembe véve

## 9. Hullámterjedési modellek tesztelése szimulációs alkalmazással

A beépített hullámterjedési modelleket pontosságuk szerint letesztetem és összehasonlítom. A folyamat az alábbi lépésekből áll:

- Térerősség adatok gyűjtése valós hálózaton;
- Hullámterjedési szimulációk elvégzése mindhárom hullámterjedési modellel;
- A mért és számított hullámterjedési adatok összehasonlítása (eltérés átlaga, szórása);
- Korrekciós állandók meghatározása.

A térerősség adatok összegyűjtéséhez LoRaWAN hálózatot és egy LoRaWAN GPS mote-t használok. A LoRaWAN GPS mote 5-6 másodpercenként kiküld egy üzenetet, amely tartalmazza a GPS koordinátáit. Ezeket egy NodeJS webserver segítségével elmentem egy SQL adatbázisba, amit aztán későbbiekben az elemzés során fel tudok használni.

Az adatok összegyűjtése után a LoRaWAN hálózatnak megfelelő adatok felhasználásával elvégzem az hullámterjedési szimulációt a QGIS plugin-el. Az így kapott térerősség adatokat összegyűjtöm és összehasonlítom a LoRaWAN hálózattal mért értékekkel.

Az összehasonlítás során két értéket elemzek: a mért és számított térerősség értékek különbségének átlaga, valamint a mért és számított értékek különbségének szórását. Az átlag eltérés nem okoz gondot, mert a hullámterjedési szimuláció során ezt egy konstans érték segítségével ki tudom javítani, hogy az átlag eltérés nulla legyen. Viszont az átlag eltérés 0 értéke nem azt jelenti, hogy százszázalékosan pontos a hullámterjedési modell, hanem azt, hogy átlagosan pozitív és negatív irányba azonos arányban téved. Erre használom fel a szórás értékét. Ugyanis a szórás megadja az átlagos eltérést a középértéktől (vagyis a korrekció után az átlagos eltérés 0 lesz). Minél kisebb a szórás értéke, annál pontosabb a hullámterjedési modell.

Legvégül a korrekciós állandókat meghatározom és alkalmazom a hullámterjedési modellekben. A korrekciós értékkel módosított hullámterjedési modellekkel pedig legvégezetül egy bázisállomás lefedettségének a tervezését mutatom be.

### 9.1. LoRaWAN hálózat bemutatása

A LoRaWAN hálózat kifejezetten IoT felhasználásra lett kifejlesztve, LPWAN (Low Power Wide Area Network). Alacsony energiafogyasztású és nagy lefedettségű hálózat. Üzenet

alapú a kommunikáció, tehát a gateway és a végberendezés között nincs folyamatos kapcsolat. A kis energiafogyasztást többek között az úgynevezett alvó állapottal érik el. Ilyenkor a végberendezés az összes lehetséges alrendszerét kikapcsolja, így minimalizálva a teljesítményfelvételét.

Szórt spektrumú, CSS (Chirp Spread Spectrum) technikát használ [27]. Ennek lényege, hogy a jel egyetlen vivőből áll, aminek a frekvenciáját lineárisan változtatják. Az információt maga a frekvenciaváltozás hordozza. A csatorna sávszélesség lehet 125, 250 vagy 500 kHz, de a leggyakrabban a 125 kHz sávszélességet alkalmazzák, mert így lehet kiosztani a legtöbb csatornát, amivel egyszerre a legtöbb eszközt is ki lehet szolgálni. Európában a 433 vagy a 868 MHz-es csatornában működik, de inkább a 868 MHz-en építik ki.

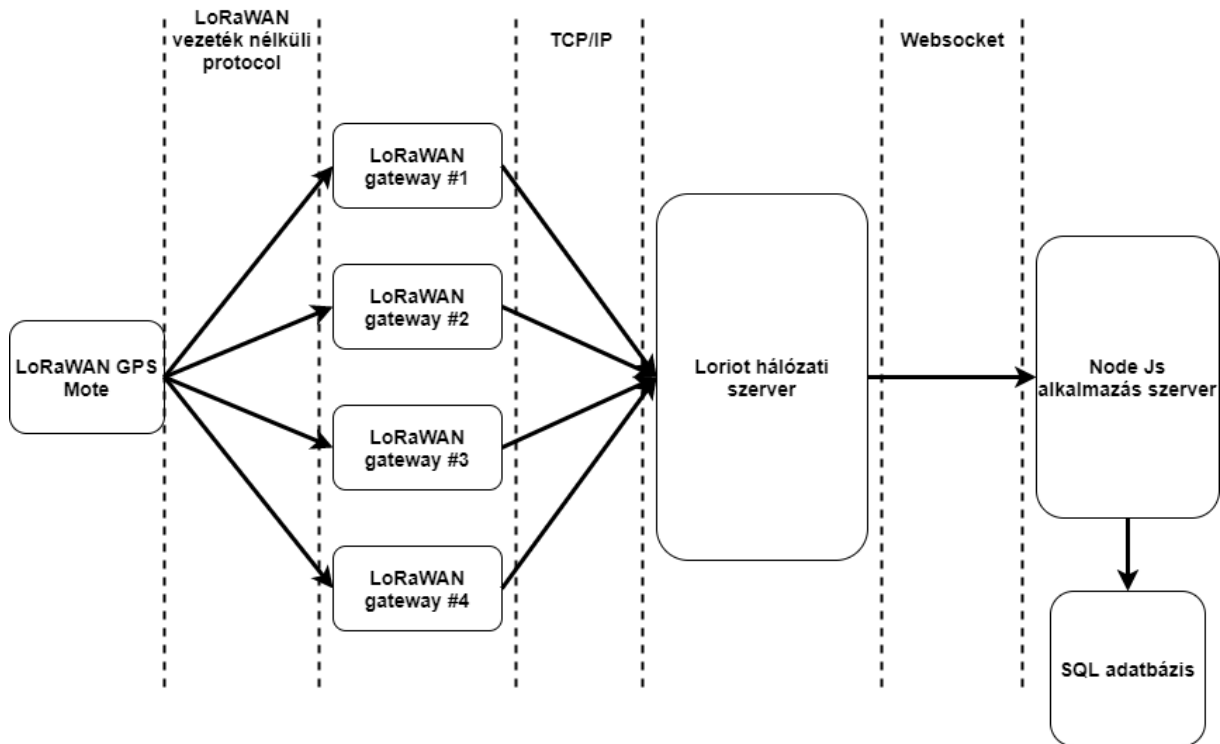
A LoRaWAN modulációban a másodpercenként generált chirp megegyezik a használt sávszélességgel. Minden szimbólum pedig  $2^{SF}$ -ediken chirp-ből áll, ahol SF az úgynevezett spreading factor. Ez határozza meg, hogy mennyire van a spektrumban „elkenve” a szimbólum. Minél nagyobb a spreading factor, annál ellenállóbb az átvitel az interferenciákkal szemben, viszont az adatsebesség is közel a fele lesz minden egyes spreading factor növelése esetén (mivel a chirp/sec állandó, a szimbólumokat felépítő chirp-ek száma duplája lesz, így a szimbólumidő is a duplája lesz).

A LoRaWAN hálózat csillag topológiájú. Az eszközök nincsenek szinkronizálva a gateway-ekhez, hanem amikor kiküldik az üzenetet, azt minden gateway veheti. A vett üzeneteket a gateway-ek továbbítják a hálózati szerver felé, amely kiszűri a többszörösen beérkezett üzeneteket. Végezetül az adott alkalmazás szerver felé továbbítja az üzeneteket, ahol aztán a végfelhasználó feldolgozhatja azt.

## 9.2. Adatgyűjtésre használt LoRaWAN hálózat

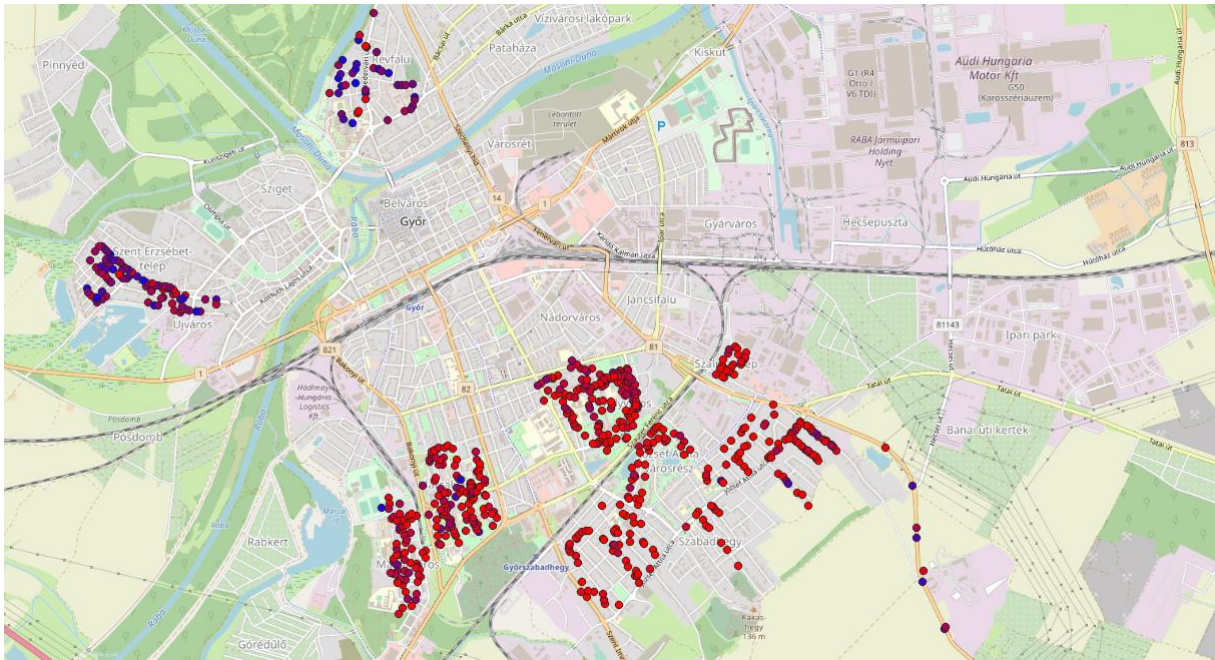
Az adatok gyűjtésére a már említett LoRaWAN GPS mote-ot használtam, ami kb. 5 másodpercenként elküldi a GPS koordinátáit. Győrben 4 db gateway volt jelen az adatok gyűjtése közben. A gateway-ek továbbították az üzeneteket a Lorient hálózati szerver felé. A Lorient egy svájci cég, amely LoRaWAN hálózatok számára biztosít hálózati szervert. Ez a hálózati szerver websocket linken keresztül továbbítja az én általam készített Node Js szerver felé az üzeneteket. Az üzenetek JSON formátumban érkeznek a Lorient hálózati szerver felől. Ezek az üzenetek tartalmazzák a vételi jelszintet, az időbélyeget, a payload-ot, a jel-zaj viszonyt és még egyéb adatokat. Ha egy üzenetet egyszerre több gateway is továbbítja, akkor minden

gateway-hez külön megadja a vételi paramétereket. Így egy üzenettel egyszerre több jelutat lehet analizálni. A Node Js alkalmazási szerver pedig egy SQL adattáblába menti el a kapott üzeneteket.

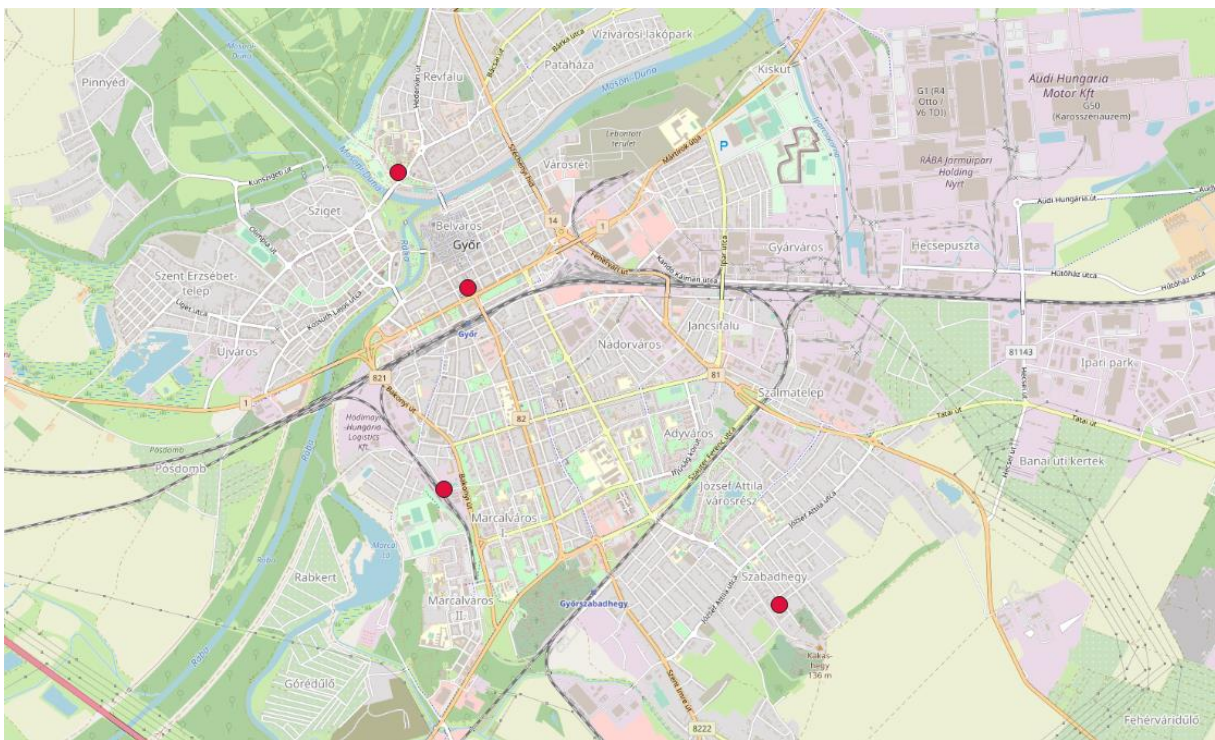


26. Ábra: Adatgyűjtéshez használt LoRaWAN hálózat

Ezzel a módszerrel könnyedén gyűjtöttem adatokat Győr és környékén. A gyűjtött mérési pontok egy részét az alábbi képen lehet látni:



27. Ábra: Hullámterjedési modellek elemzéséhez gyűjtött adatok egy része



28. Ábra: Az adatgyűjtésre használt gateway-ek elhelyezkedése

### 9.3. Hullámterjedési szimulációk elvégzése

A hullámterjedési modellek átlag eltérés és szórás értékek meghatározásához a mért értékek pontjaiban kiszámolom mindhárom hullámterjedési modellel a térerősséget. A számolt és mért értékek különbsége adja meg az átlag különbség és szórás értékeket.

A mért és szimulált pontokat három kategóriába soroltam:

- Urban
- Suburban
- Rural

Külön-külön végzem el a hullámterjedési modellek kiértékelését ezekre a terület kategóriákra, hiszen nagyban eltérhetnek a közegcsillapítási értékek, ezzel sokkal pontosabb eredményt kapva.

### 9.3.1. Alkalmazott paraméterek

Az általános hullámterjedési paraméterek:

- Adóteljesítmény: 14 dBm
- Adóantenna nyeresége: 0 dB
- Mobil állomás magassága: 1.5 m
- Bázisállomás magassága: 45/35/45/35 m
- Bázisállomás antenna nyereség: 2.7 dB
- Frekvencia: 868 MHz

Okumura modell specifikus paraméterek:

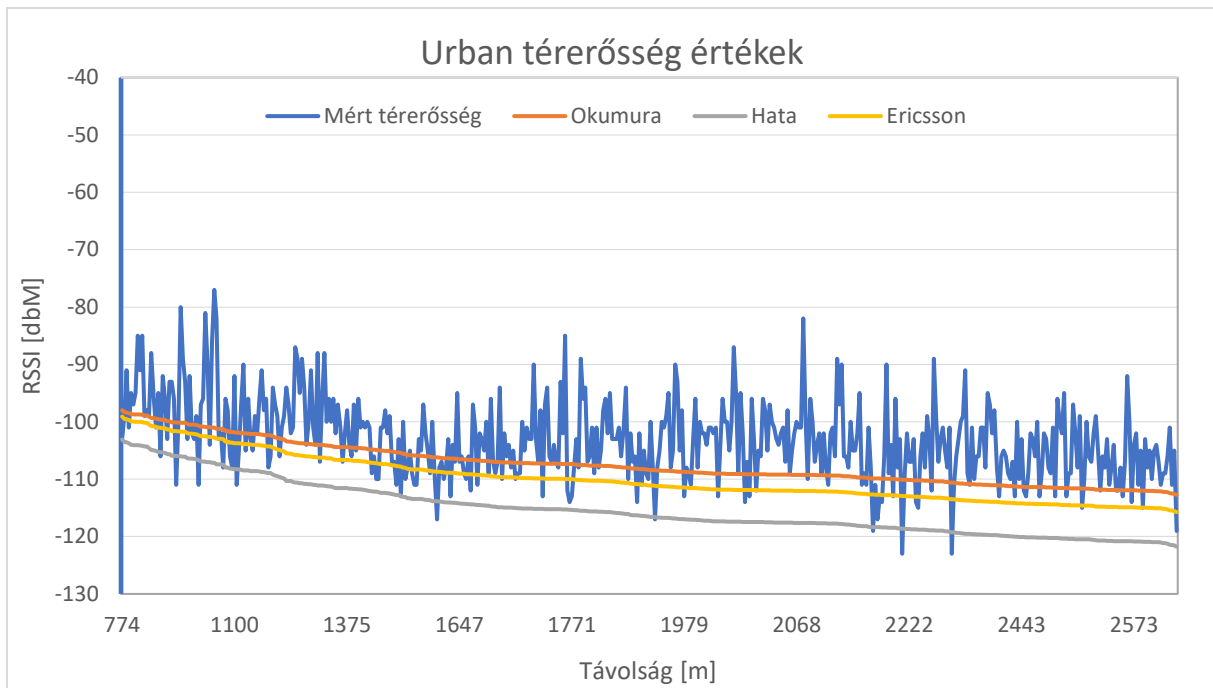
- Garea:
  - Urban/Suburban: 7 dB
  - Rural: 21 dB

Hata modellhez nincs specifikus paraméter, hanem a közegcsillapítás képlete változik attól függően, hogy milyen közeget vizsgálunk (urban, suburban, rural). Ericsson 9999 esetén az  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  értékeit az ajánlottak szerint állítom be, itt is az adott közegnek megfelelően.

## 9.4. Hullámterjedési szimulációk eredménye

### 9.4.1. Urban környezet

Városi körülmények között a három hullámterjedési modell hasonló pontossággal működik:



29. Ábra: Urban környezetben mért és számított térerősség értékek

A három hullámterjedési modell közül alapesetben az Okumura modell a legpontosabb. A három modell eltéréseinek átlaga és szórása az alábbi:

5. Táblázat: Hullámterjedési modellek átlagos eltérése és eltérések szórása Urban környezetben

	<b>Okumura</b>	<b>Hata</b>	<b>Ericsson 9999</b>
<b>Átlag eltérés</b>	0.32	-7.27	-0.37
<b>Eltérés szórása</b>	6.08	6.1	6.05

A fenti táblázatban látható eredmények azt mutatják, hogy átlagosan az Okumura 0.32 dB-vel nagyobb térerősséget, tehát ennyivel kisebb közegcsillapítást számol ki. Ezzel szemben a Hata és az Ericsson 9999 modell kisebb térerősség értéket ad meg átlagosan (Hata -7.27, Ericsson 9999: -0.37), vagyis ezek a modellek túl nagy közegcsillapítást határoznak meg. Az átlag eltérést könnyen lehet kompenzálni. Ezt úgy érhetjük el, hogy a kiszámított átlagos eltérés hozzáadjuk a hullámterjedési modell által számított közegcsillapításhoz. Ha a korrekciós tényező pozitív, akkor ezáltal a számított közegcsillapítás nagyobb lesz, ellenkező esetben pedig kisebb.

A fontosabb paraméter az eltérések szórása. Minél nagyobb ez az érték annál pontatlanabb a hullámterjedési modell. Okumura modell esetén a 6.08 dB szórás azt jelenti,

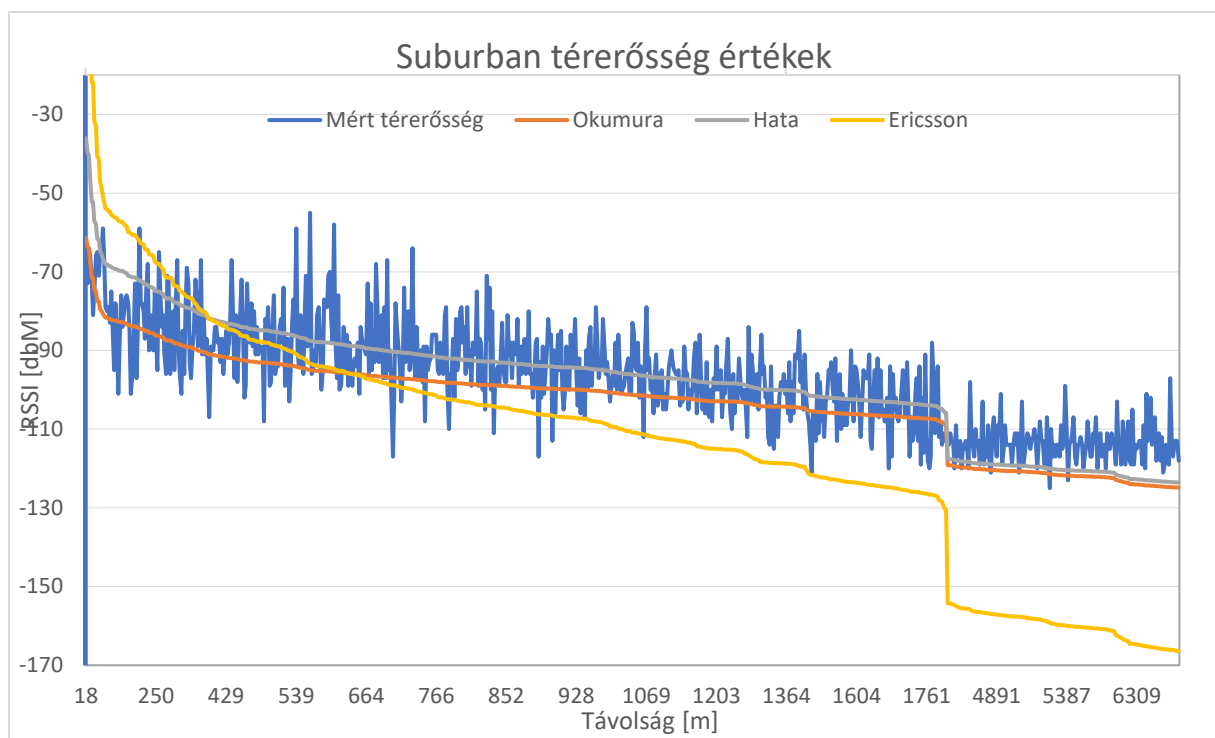


hogy a szimulációs pontok 68%-a esetén a valós és a számított érték különbsége kisebb vagy egyenlő, mint 6.08 dB.

Mindhárom hullámterjedési modell közel azonos szórás értékkel rendelkezik, ezért hasonlóan pontosak. A három modell közül ebben a környezetben az Ericsson 9999 modell a legpontosabb, bár nem sokkal.

#### 9.4.2. Suburban környezet

A Suburban környezetben már jóval pontatlanabb az Ericsson 9999 modell, főleg a nagyobb távolságok esetén:



30. Ábra: Suburban környezetben mért és számított térerősség értékek

A modellek átlag eltérés és szórás értékei:

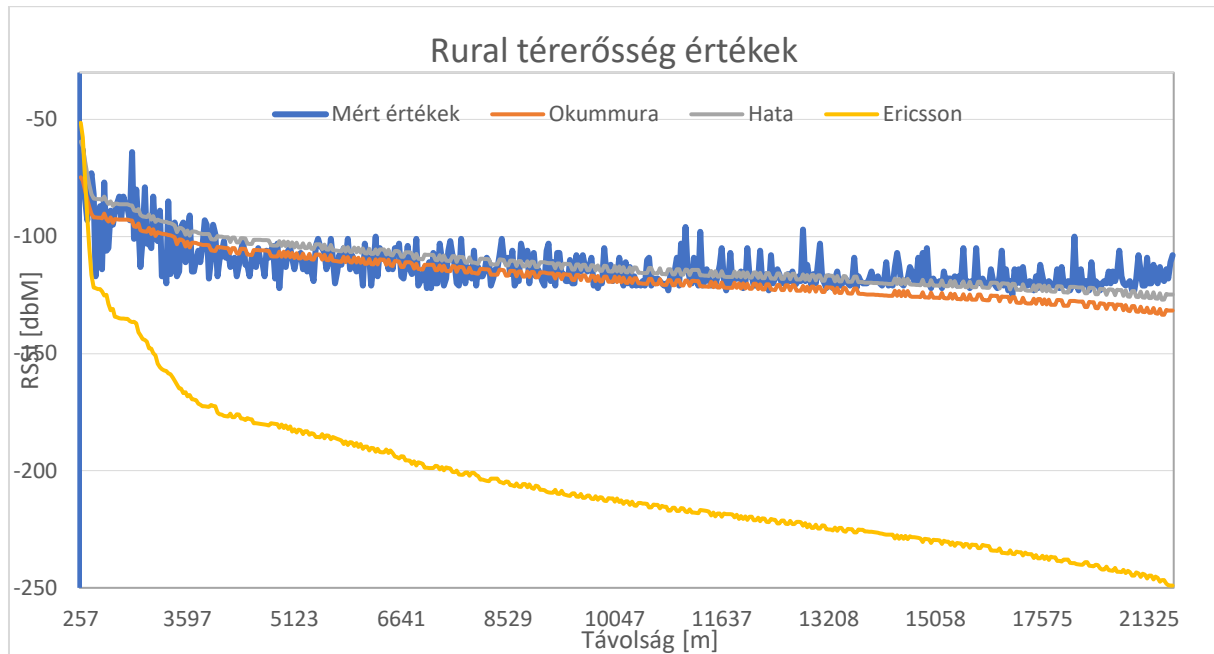
6. Táblázat: Hullámterjedési modellek átlagos eltérése és eltérések szórása Suburban környezetben

	<b>Okumura</b>	<b>Hata</b>	<b>Ericsson 9999</b>
<b>Átlag eltérés</b>	-1.35	2.1	-22.01
<b>Eltérés szórása</b>	6.75	7.35	13.84

Mindegyik hullámterjedési modell pontatlanabb lett. Az Okumura modell maradt a legpontosabb, az Ericsson 9999 modell pedig a legpontosabb, még hozzá drasztikusan. Az

Ericsson 9999 modell meredeksége túl nagy, a távolság növekedésével túl gyorsan nő a közegcsillapítása.

### 9.4.3. Rural környezet



31. Ábra: Rural környezetben mért és számított térerősség értékek

A Rural környezetben az eltérések átlaga és szórás értéke:

	<b>Okumura</b>	<b>Hata</b>	<b>Ericsson 9999</b>
<b>Átlag eltérés</b>	-3.86	1.24	-92.95
<b>Eltérés szórása</b>	5.73	7.03	25.014

Az Okumura és Hata modell pontosabb lett, míg az Ericsson 9999 modell még sokkal pontatlanabb. Az Ericsson hullámterjedési modell karakterisztikája túl meredek, túl nagy mértékben csökken, így kis távolságnál túl kicsi közegcsillapítást, nagy távolságoknál pedig túl nagy közegcsillapítást okoz.

### 9.4.4. Következtetések

A három modell közül az Okumura modell lett a legpontosabb és a legtöbb környezetben jól használható. A Hata modell is viszonylag pontos maradt végig, csak kis mértékben tér el az Okumura modelltől.

Az Ericsson 9999 modell Urban környezetben jól használható, itt ennek a modellnek a legkisebb a szórása, viszont Suburban és Rural környezetben nagyon pontatlanná válik. Ebben a kísérletben az alapértelmezett paraméter értékek rossz eredményre vezettek. Feltehetően az Ericsson 9999 modellt is lehet hatékonyan használni különböző környezetekben, viszont ezekhez a modell „a” paramétereit kell módosítani. Ha valaki ezzel a modellel akar a jövőben részletesen foglalkozni vagy akár hálózatot tervezni, minden egyes tervezési fázis előtt erősen ajánlott az adott területen elvégzett hullámterjedési adatgyűjtés, az adatok elemzése és végezetül a paraméterek helyes beállítása, hogy minél jobban megegyezzenek a valós és a szimulációs értékek.

## 10. Lefedettség tervezése a hullámterjedési szimulációs alkalmazással

Ebben a fejezetben egy példa számítást mutatok be egy bázisállomás lefedettségének szimulálására. A számításokhoz felhasználok a korábban kiszámított korrekciós tényezőket. Okumura modellt használva számítom ki a lefedettséget, mert ez a modell volt a legpontosabb az összehasonlítások között. A példa során bemutatom, hogy milyen hatással van a lefedettségre az antenna karakterisztika változtatása, valamint az antenna forgatása. Ezeknél külön elvégzem a hullámterjedési szimulációt. A LoRaWAN bázisállomás lefedettségével mutatom be a folyamatot.

Normál körülmények között az energiamérleg számolást mindig Uplink és Downlink irányban is elvégzik, hiszen a kommunikáció kétirányú. A példában csak az Uplink irányt számolom ki, mivel a hálózat szinte kizárólag UL üzeneteket alkalmaz, valamint a Downlink energiamérleg kiszámításakor a folyamat szinte teljesen megegyezik.

### 10.1. Alapvető paraméterek

- Mobil állomás antenna:
  - Nyereség 0 dB
  - Karakterisztika: Körsugárzó (botantenna)
  - Magasság: 1.5 m
- Bázisállomás antenna:
  - Nyereség: 2.7 dB (maximum)
  - Karakterisztika: körsugárzó (karakterisztika fájlal)
  - Magasság: 40 m
- Adó teljesítmény: +14 dBm
- Vevőérzékenység: -125 dBm
- Kábel veszteség: 0 dB (a mobil állomás adójához közvetlen van csatlakoztatva az antenna, a bázisállomás pedig csak egy kb. 20 cm-es koax kábelt használ)
- Frekvencia: 868 MHz

## 10.2. Fading tartalékok meghatározása

### 10.2.1. Large scale fading (Shadowing) margin meghatározása

A shadowing-ot statisztikai módszerrel határozom meg, és fading tartalékként tüntetem majd fel az energiamérlegben. A már korábbiakban ismertetett (30) egyenlettel lehet meghatározni a fading tartalék értékét. Ehhez először a  $\sigma_L$  értékét kell kiszámítani:

$$\sigma_L = 0.65(\log(868))^2 - 1.3 \log(868) + 5.2 \quad (48)$$

Ezek alapján a  $\sigma_L$  értéke: 6.99 dB

A fading tartalék meghatározásához már csak a Gauss valószínűségi változóra van szükség. Jelenlegi példában 90%-os területi lefedettséget akarok a cella határán. Ezért az inverz Q függvénybe az 1-0.9-et, vagyis 0.1-et kell behelyettesíteni. A 0.1-et behelyettesítve az inverz Q függvénybe, 1.282 lesz az eredmény. Ezzel már könnyen kiszámítható, hogy a shadowing fading margin:

$$z * \sigma_L = 1.282 * 6.99 = 8.96 \text{ dB} \quad (48)$$

### 10.2.2. Small scale fading margin meghatározása

Mérési eredményekkel nem tudom alátámasztani, de a környezetet figyelembe véve most azt feltételezem, hogy nincs domináns komponens a vevő oldalon, hanem a különböző útvonalakon beérkező jelek közel hasonló amplitúdójúak. Ezért ilyenkor Rayleigh eloszlásúnak feltételezhető a small scale fading. Annak esélyét, hogy a small scale fading meghaladja az adott csillapítási szintet, a (31) egyenlettel lehet kiszámolni.

$$P_x = 1 - e^{-\frac{1}{2}10^{-7/10}} \quad (49)$$

Ha 7 dB-t helyettesítek a képletbe, akkor az eredmény 0.09494, ami azt jelenti, hogy az idő 9.5%-ában fogja meghaladni a small scale fading értéke a 7dB-t. Mivel a 90%-os valószínűséget határoztam meg követelménynek, ezért a 7 dB small scale fading margin elegendő, hiszen így az idő több, mint 90%-ban a fading margin-nál kisebb lesz a small scale fading csillapítása.

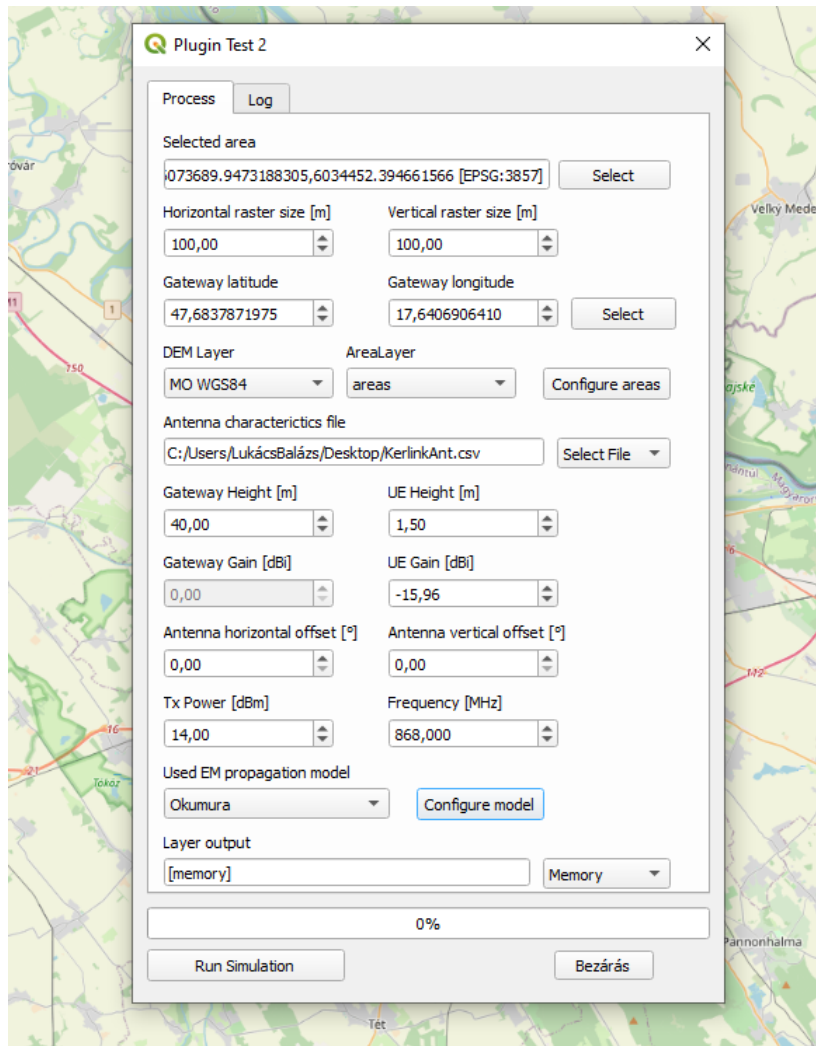
### 10.3. Energiamérleg összeállítása

Frekvencia	868 MHz
Hullámhossz	0.345 m
Polarizáció	Vertikális
Adó teljesítmény	+14 dBm
Adóantenna nyereség	0 dB
<b>EIRP</b>	<b>+14 dBm</b>
Jelút csillapítás	X (Ezt számítja ki a hullámterjedési modell)
Shadowing margin	8.96 dB
Small scale fading margin	7 dB
Vevőantenna nyereség (maximum)	2.7 dB
<b>Vételi jelszint</b>	<b>-1.96 - X</b>
<b>Vevőérzékenység</b>	<b>-125 dBm</b>
<b>Link margin</b>	<b>(-1.96 - X) - (-125)</b>

Az energiamérleget nem lehet egyenlőre meghatározni, mivel nem ismerjük a jelút csillapítását. A hullámterjedési szimulációs alkalmazás ezt a csillapítás értéket határozza meg minden egyes szimulációs rácsban, amelyet aztán összegez az energiamérleg összes többi komponensével. Így számolja ki a vételi jelszintet a szimulációs alkalmazás, és ezt követően már csak a jelzéseket kell beállítani a QGIS-ben, hogy az a megfelelő színeket párosítsa a megfelelő teljesítmény tartományokhoz.

### 10.4. Szimuláció elvégzése a QGIS plugin-el

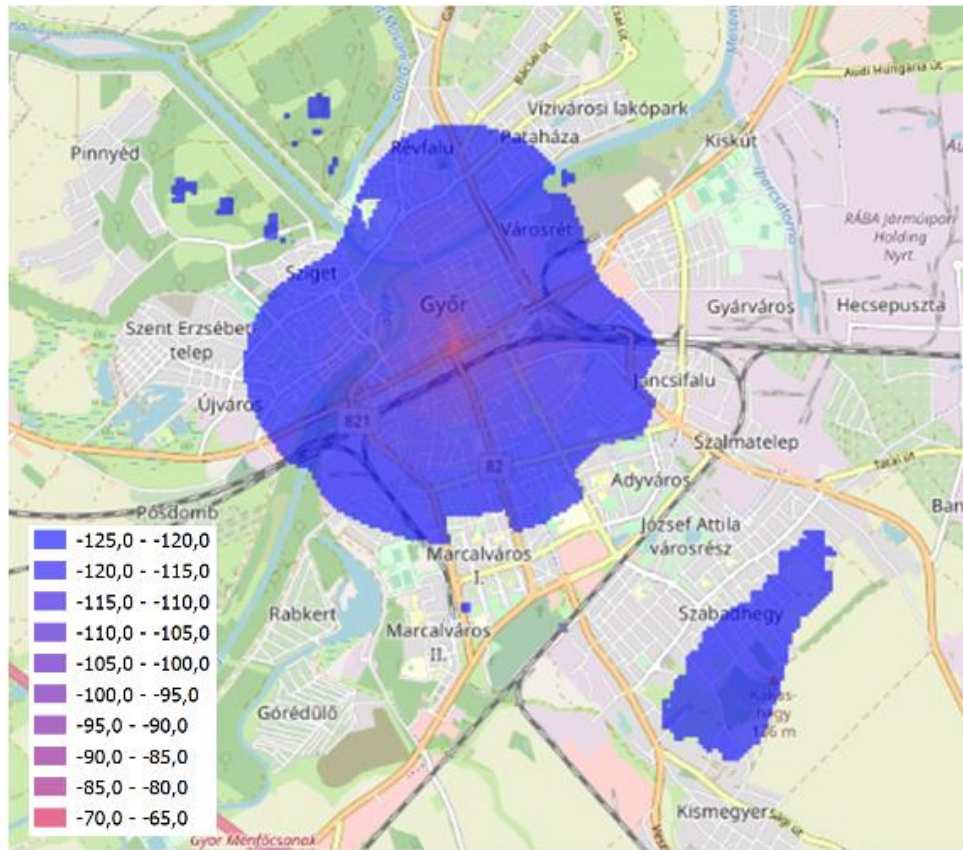
A QGIS plugin megnyitása után már csak ki kell választani a szimulációs területet, és a bázisállomás helyzetét, majd megadni a szükséges paramétereket. Az alkalmazásban még nem lehet megadni a különböző fading jelenségek okozta csillapításokat, tartalékokat, ezért ezeket most a mobil állomás antenna nyereségéhez adom hozzá. Nem számít, hogy a folyamat során hol adjuk ezt az értéket hozzá, mert nem változnak.



32. Ábra: Felkonfigurált alkalmazás

A szimulációt 100x100 méteres rácskiosztással végeztem el.

Az első szimuláció során figyelembe vettem a terület típusokat, az antenna karakterisztikát, és a domborzati magasságot is a térerősség kiszámítása során. A lefedett terület az alábbi lett:

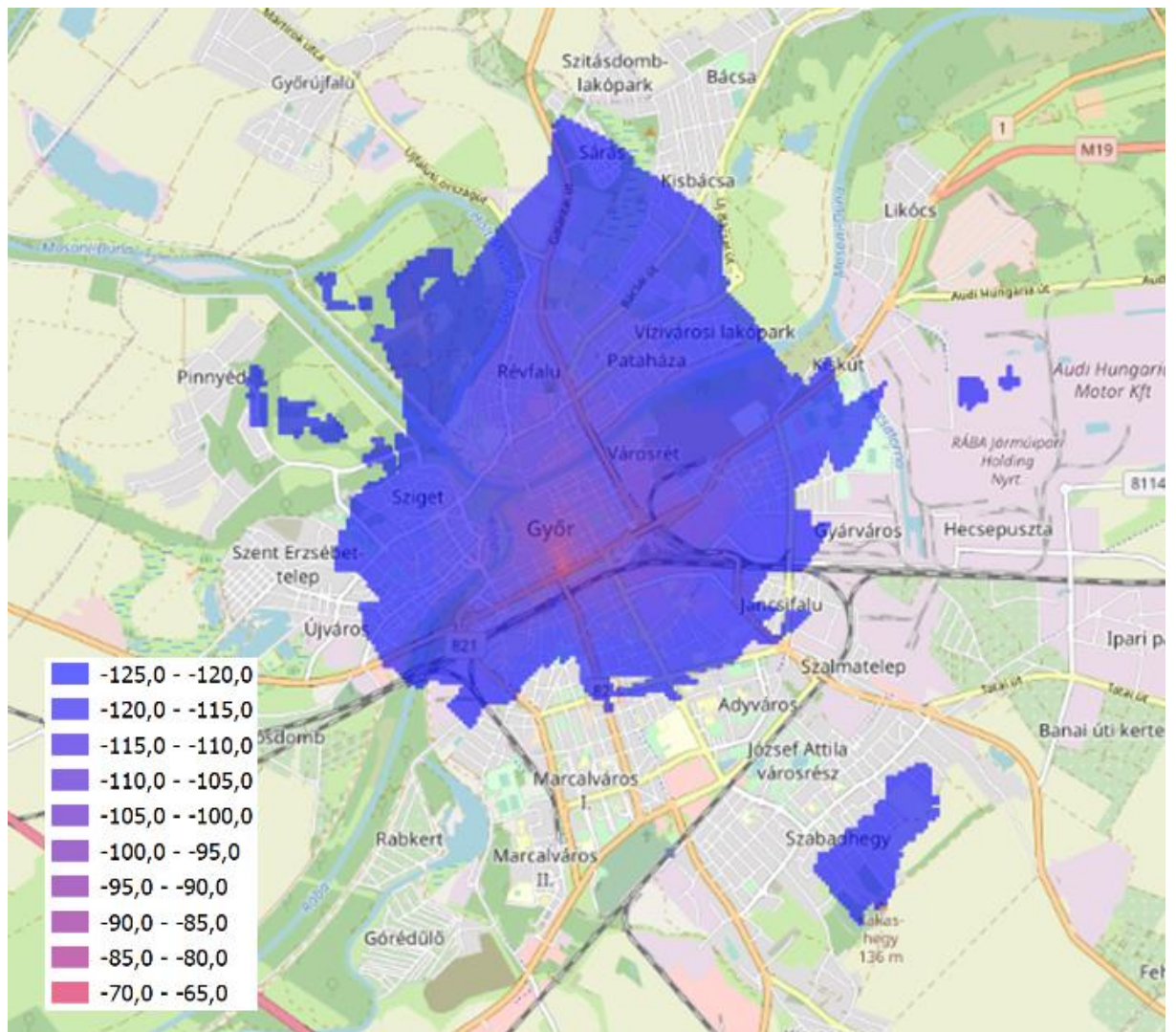


33. Ábra: Hullámterjedési szimuláció eredménye a magasság értékek, terület típusok és az antenna karakterisztika figyelembevételével

Az eredményből látható, hogy a lefedettség nagyobb területeket fed le azokban az irányokban, ahol az antenna nyeresége nagyobb. Továbbá például Szabadhegy területén is van egy lefedett terület, mert itt nagyobb a domborzati magasság, így a mobil állomáshoz tartozó korrekciós érték is nagyobb.

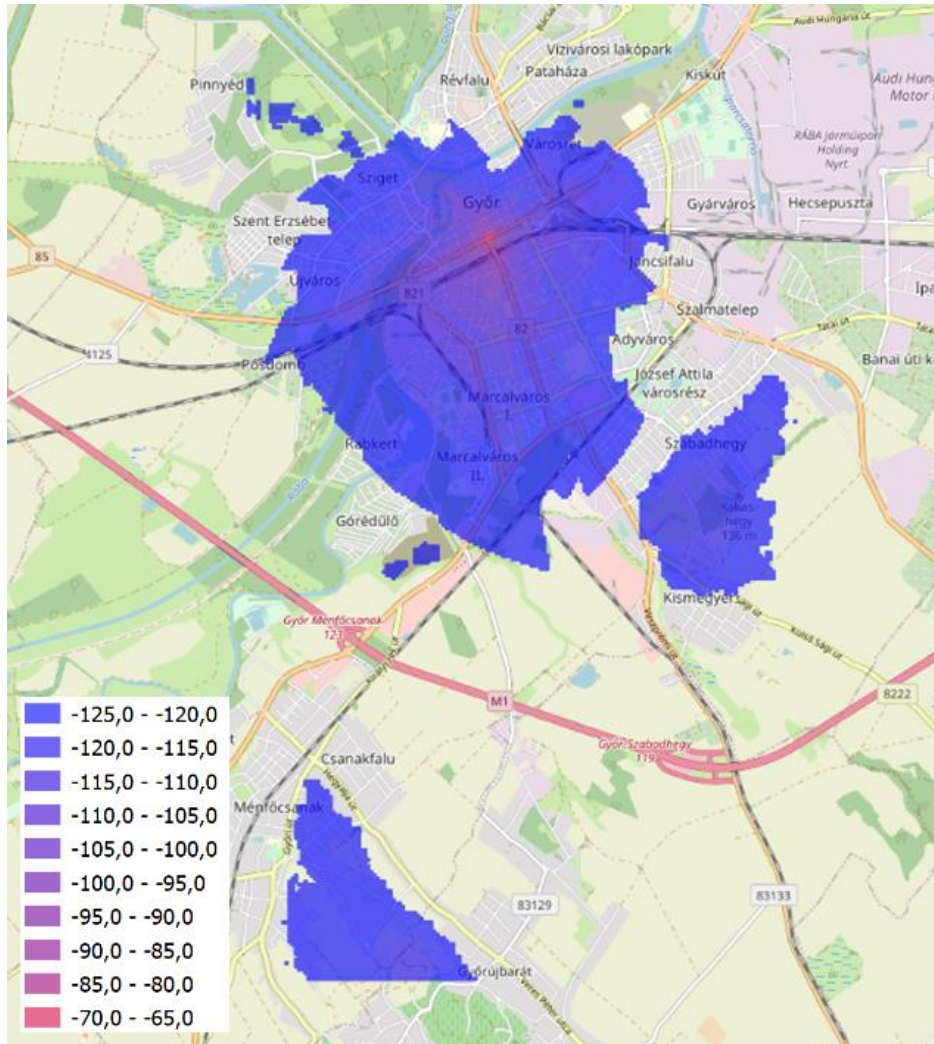
Ezt követően a szimulációt lefuttattam egy irányított antennával is (maximum 12 dB nyereség).





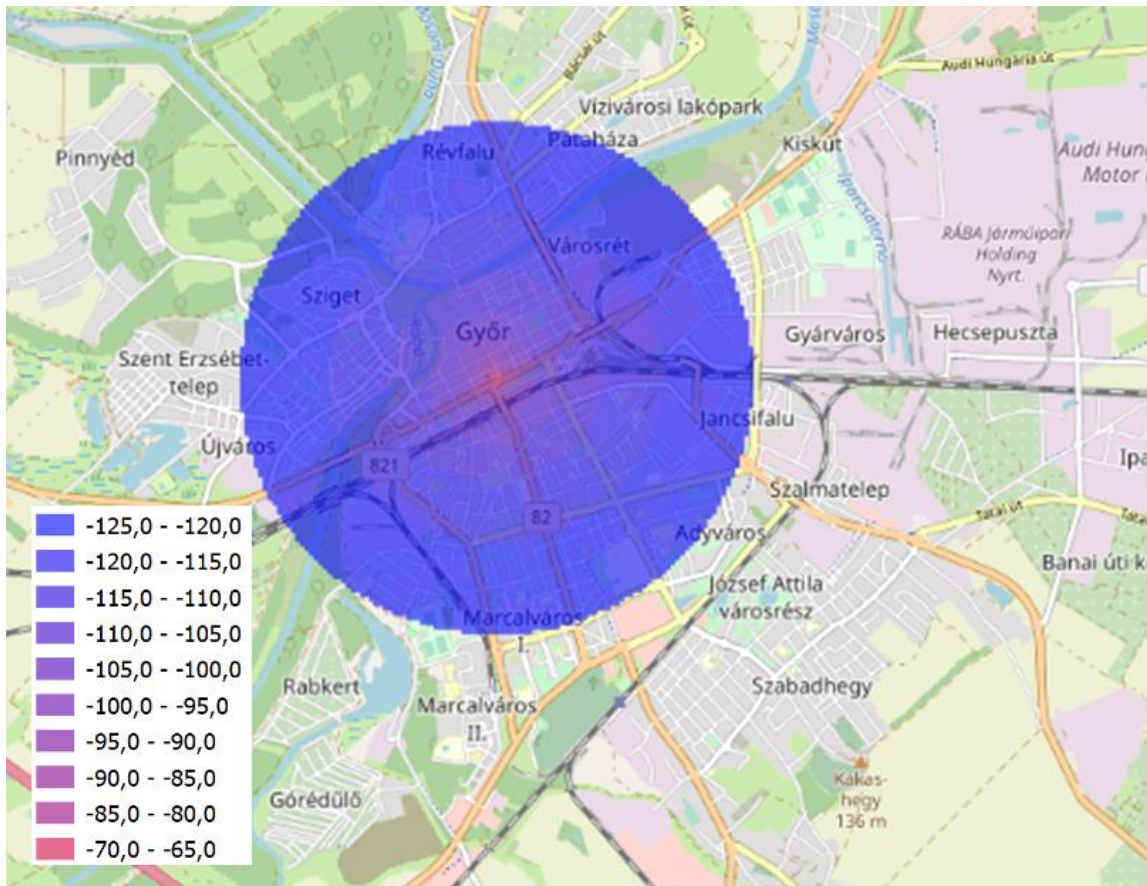
34. Ábra: Hullámterjedési szimuláció irányított antennával

Az irányított antenna következtében a lefedett terület jelentősen megnőtt az északi terület felé, kis mértékben pedig csökkent a déli irányban. A mennyiben az antenna forgatásával akarjuk változtatni a lefedett terület elosztását, a lefedettség az alábbi szerint néz ki, ha az antennát 180°-al elforgatom:



35. Ábra: Irányított antennával, 180°-os elforgatással végzett lefedettség szimuláció

Az elforgatás következtében a lefedettség a déli irányban növekedett meg jelentősen. Végezetül pedig elvégeztem egy szimulációt, amely során nem vettem figyelembe antenna karakterisztikát (a bázisállomás antenna nyeresége konstans 3 dB volt), a domborzati magasságot és a terület típusokat, hanem az Okumura modellben csak az Urban területre vonatkozó korrekciós állandókat alkalmaztam.



36. Ábra: Lefedtség szimuláció antenna, terület, magasság adatok nélkül

A képen látható, hogy amikor nem vesszük figyelembe semmilyen paramétert figyelembe a távolságon kívül, a lefedettég kör formájú lesz. Ez az eset a legegyszerűbb, viszont a legpontatlanabb is egyben.

Természetesen a lefedett területeken kívül is létrejöhet összeköttetés, lehetséges a sikeres üzenetküldés, viszont a fading tartalékok kiszámításakor azt vettem figyelembe, hogy a lefedett terület határán 90%-os eséllyel legyen kisebb a közegcsillapítás a rendszer által elviselt maximum csillapításnál. Ezért, ha egy rendszer esetén nem olyan fontos a megbízhatóság vagy a több gateway okozta redundancia miatt elég a kisebb fading tartalék, a bázisállomások által lefedett területek jelentősen megnőhetnek.

## 11. Összegzés

A hullámterjedési szimuláció elvégzése előtt nagyon fontos a hálózat és a környezet alapos áttekintése. A környezeti jellemzők (város, külváros, erdő, terepviszonyok) nagy mértékben módosíthatják az elektromágneses hullámterjedést. Az empirikus hullámterjedési modelleket vizsgáltam meg, amelyek viszonylag kevés információ segítségével pontos lefedettség eredményeket képesek megadni. Mivel nem volt számomra elérhető részletes adatbázis (terület típus, növényzet, épületek formája, épületek magassága stb.) ezért determinisztikus modelleket most nem alkalmaztam. A determinisztikus modellek nagyobb pontosságúak lehetnek, de csak akkor, ha a megfelelő típusú, részletességű és mennyiségű adat ehhez megvan.

A QGIS és az egyéb GIS szoftverek megfelelő fejlesztési és tervezési platformot biztosítanak a hullámterjedési modellek megvalósítására és a lefedett területek kirajzolására. Különböző keretrendszerekkel, szoftverekkel akár 3D-ben is lehet a hullámterjedést szimulálni és figyelembe venni a különböző akadályok minden méretét, tulajdonságát. Ilyen esetben viszont már az akadályok anyaga is fontos.

A hullámterjedési szimuláció során, amit nem vettem figyelembe az az egyéb rendszerek/bázisállomások okozta interferencia. Ez egy külön részét képezi a lefedettség tervezésének. Az interferencia jelenségekhez ismerni kell a környezetben lévő egyéb rendszerek/bázisállomások frekvenciáját, teljesítményét, technológiáját. A szomszédos hálózatok okozhatnak sávon belüli és szomszédos csatorna interferenciát is.

Az elkészített szimulációs alkalmazás továbbfejlesztését főleg két irányban végezném még el:

- 3D antenna karakterisztika felhasználása
- Szomszédos hálózatok által okozott interferencia

A 3D antenna karakterisztika figyelembevételével pontosabb lenne a hullámterjedési szimuláció, nem csak a horizontális karakterisztikát tudnám figyelembe venni. Továbbá, ha figyelembe veszem a 3D karakterisztikát, akkor már az antennák döntésének hatását is lehet szemléltetni az alkalmazásban (tilt) és terepmagasság okozta nyereség változást is. Az interferenciák okozta fading jelenségekre pedig fading tartalékokat tudna az alkalmazás kiszámítani.

## Irodalomjegyzék

- [1] Geographic Information Systems  
URL: <http://www.geog.ucsb.edu/~good/papers/354.pdf>  
Letöltés Dátuma: 2020.11.19
- [2] A technical overview of Lora and LoraWAN  
URL: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>  
Letöltés Dátuma: 2020.11.19
- [3] John, S.: Introduction to RF propagation  
„Könyv”: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005
- [4] ITU-R V.431-8: Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications, 2015
- [5] The Earth and coordinates  
URL: [https://esripress.esri.com/storage/esripress/images/315/mapuse\\_ch1.pdf](https://esripress.esri.com/storage/esripress/images/315/mapuse_ch1.pdf),  
Letöltés dátuma: 2020.11.19
- [6] Eric D. (Ozgur B.): Beyond-Line-of-Sight Communications with Ducting Layer  
IEEE Communications Magazine, Vol. 52, No. 10, pp. 37-43, 2014
- [7] Honfy J.: Hullámterjedés és antennák I., Második, átdolgozott verzió  
„Könyv”: Széchenyi István Egyetem, Győr, 2003
- [8] Honfy J.: Hullámterjedés és antennák II., Második, átdolgozott kiadás  
„Könyv”: Széchenyi István Egyetem, Győr, 2002
- [9] Signal-to-Noise, Carrier-to-Noise, EbNo  
URL: <https://www.noisecom.com/Portals/0/webinars/SN%20CN%20EbNo.pdf>  
Letöltés dátuma: 2020.11.20
- [10] Parnuchandra P. (Rushil K.): Signal Chain Noise Figure Analysis  
Texas Instruments Application report, 2014
- [11] Popa S. (Draghiciu N.): Fading types in wireless communication systems  
Journal of Electrical and Electronics Engineering 1, pp 232 - 237, 2008
- [12] Peter E.: Huygens' Principle as Universal Model of Propagation  
Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 3, No. 1, pp. 19-32, 2009
- [13] EE353 Lecture 14: Rayleigh and Rician random variables  
URL: <https://www.usna.edu/ECE/ee433/Handouts/Lecture%2014%20-%20Rayleigh%20and%20Rician%20RV.pdf>  
Letöltés dátuma: 2020.11.22

- [14] Adrej T. (Vladimir W., Stefan P.): Calculation of impulse response in Rician and Rayleigh channel  
2012 Elektro, 2012
- [15] Simeon o. (Enyenihi H., Emmanuel U.): Application of Weissberger Model for Characterizing the Propagation Loss in a Gliricidia sepium Arboretum  
Universal Journal of Communications and Network, Vol 6, No. 2, pp. 18 -23, 2018
- [16] ITU-R: Attenuation in vegetation, Recommendation ITU-R P.833-7  
URL: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-7-201202-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.833-7-201202-S!!PDF-E.pdf)  
Letöltés dátuma: 2020.11.22
- [17] Jide J. (Aderemi T.): A Versatile Wave Propagation Model for Very High Frequency Broadcasting Band in Vegetation and/or Rocky Environment  
International Journal of Engineering Science and Application, Vol. 2, No. 1, 2018
- [18] Pavlos I., (Stylianos K.): Longley-Rice model precision in case of multiple diffracting obstacles  
URSI AT-RASC conference, Gran canaria, Canary Islands, 2015
- [19] Zia N. (Muhammad i.): Pathloss Determination Using Okumura-Hata Model and Cubic Regression for Missing Data for Oman  
Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Vol 2, 2010
- [20] Noman S. (Muhammad T., Hasnain K.): Comparison of Radio Propagation Models for Long Term Evolution (LTE) Network  
International Journal on Next-Generation Networks Vol. 3, No. 3, pp. 27-41, 2011
- [21] Nektarios M. (Philip C.): Indoor channel modeling at 60 GHz for wireless LAN applications  
13th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, 2002
- [22] GIS for beginners  
URL: [http://www.aag.org/galleries/mycoe-files/OT3\\_GIS\\_for\\_beginners.pdf](http://www.aag.org/galleries/mycoe-files/OT3_GIS_for_beginners.pdf)  
Letöltés dátuma: 2020.11.24
- [23] World Geodetic System 1984  
URL: [http://www.unoosa.org/pdf/icg/2012/template/WGS\\_84.pdf](http://www.unoosa.org/pdf/icg/2012/template/WGS_84.pdf)  
Letöltési dátum: 2020.11.24

- [24] The UTM system  
URL: [https://www.luomus.fi/sites/default/files/files/utm\\_ups.pdf](https://www.luomus.fi/sites/default/files/files/utm_ups.pdf)  
Letöltési dátum: 2020.11.24
- [25] Digital Elevation models  
URL: <https://opendri.org/wp-content/uploads/2016/06/Digital-Elevation-Models-10-23-15-web.pdf>  
Letöltés dátuma: 2020.11.25
- [26] MyCurveFit  
URL: <https://mycurvefit.com/>  
Letöltés dátuma: 2020.11.25
- [27] LoRa Alliance: LoRaWAN 1.1 Specification  
URL: [https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm\\_specification\\_-v1.1.pdf](https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_-v1.1.pdf)  
Letöltés dátuma: 2020.11.25