

TMDK-DOLGOZAT

A HCM MEGÁLLAPODÁS ÉS ALKALMAZÁSA,
TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEI A FÖLDI
MOZGÓSZOLGÁLAT NEMZETKÖZI
FREKVENCIAKOORDINÁCIÓJÁBAN

ÍRTA:

UNGER TAMÁS ISTVÁN

B.Sc. szakos villamosmérnök hallgató

KONZULENSEK:

VÁRI PÉTER

egyetemi adjunktus

KISSNÉ DR. AKLI MÁRIA

osztályvezető

Médiafrekvencia-tervezési és koordinációs osztály
Nemzeti Média- és Hírközlési Hatóság

SZARKA ANDRÁSNÉ

Nemzetközi frekvenciakoordinációs szakértő

Széchenyi István Egyetem

Távközlési Tanszék

2014

"AMIRE AZ EMBEREK SOKÁIG, NAGY AKARATTAL,
KITARTÁSSAL, ELŐRELÁTÁSSAL
ÉS KÖRÜLTEKINTÉSSSEL KÉSZÜLŐDNEK,
VÉGÜL IS BEKÖVETKEZIK."
/MÁRAI SÁNDOR/

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés, köszönetnyilvánítás	3
2. A HCM megállapodás	4
2.1. A megállapodás alapja, célja	4
2.2. Koordinálandó frekvenciák és kategóriáik	6
2.3. A koordináció adminisztrációs menete	7
2.4. A koordináció műszaki menete	8
2.5. A HCM-program	10
2.6. A koordinációs eljárás nehézségei	10
3. Nemzetközi frekvenciakoordináció a gyakorlatban	12
3.1. A koordinálandó hálózat felépítése	12
3.2. A sávra vonatkozó preferált megállapodás	14
3.3. Hazai állomások nemzetközi frekvenciakoordinációja	15
3.3.1. A hálózat bázisállomásának koordinációja	15
3.3.2. A hálózat fix állomásának koordinációja	17
3.3.3. A hálózat mobil állomásának koordinációja	19
3.3.4. Fix állomás koordinációja	22
3.4. Beérkező kérelem elbírálása	23
4. A preferált megállapodás effektív kihasználása	25
4.1. A probléma ismertetése	25
4.2. Iránykarakterisztika definiálása	26
4.3. A bázisállomás paramétereinek javítása	27
4.4. A fix állomás paramétereinek javítása	29
5. A földi mozgószolgálat koordinációs eljárásának javítási lehetőségei	31
5.1. Az eljárás javíthatóságának alapgondolata	31
5.2. Topográfia generálása	32
5.3. Koordináták síkban és térben	33
5.4. Az elsőrendű Fresnel-zóna	35
5.5. Effektív antennamagasság meghatározása	36

5.6. Terjedési görbék alkalmazása	38
5.7. Terepegyenetlenség meghatározása	40
5.8. Tereptisztasági szög meghatározása	42
5.9. A térerősségszámítási algoritmus	43
5.10. Mozgó állomások helyzetének statisztikai leírása	45
6. Az implementált számítási módszer alkalmazása a gyakorlatban	48
6.1. Duplex bázis-mobil összeköttetés fiktív topográfián	48
6.2. Számítás határvonalra fiktív topográfián	53
6.3. Szimplex összeköttetés vizsgálata valós topográfián	55
6.4. Futási idők összehasonlítása	58
7. Konklúzió, jövőbeli tervek	60
A. Matlab-scriptek	64
A.1. topo_gen.m	64
A.2. hcm_script.m	64

1. fejezet

Bevezetés, köszönetnyilvánítás

Dolgozatom a vezeték nélküli és mobil távközlési rendszerek zavarmentes és spektrumhatékony használatának témakörén belül a nemzetközi frekvenciakoordinációval foglalkozik. Az elmúlt évtizedek során a modern hírközlő rendszerek elterjedésével jelentősen megnőtt a vezeték nélküli szolgálatok és szolgáltatások frekvenciaigénye, amely arra sarkallja a nemzeti és nemzetközi szervezeteket, hogy a rendelkezésre álló frekvenciakészletet hatékonyan használják fel, osszák ki a szolgáltatók és a felhasználók számára egyaránt úgy, hogy az állomások a lehető legkisebb mértékben okozzanak és szenvedjenek el káros zavarást az összeköttetések minőségének biztosítása érdekében. A spektrumgazdálkodás komplex kérdéskör, egyszerre igényel mérnöki és közgazdaságtani szemléletet, hiszen a spektrum, mint termék keresletének és kínálatának alakulása bonyolult piaci folyamatok eredménye.

A véges mennyiségben rendelkezésre álló frekvenciakészlet nemzeti kincs, melynek értékesítése és felhasználása kizárólag szabályozott úton, egyezmények és előírások megalkotásával, a megalkotott szabályrendszerek betartásával és betartatásával lehetséges. A vezeték nélküli technológiák számtalan előnye mellett számolni kell azzal, hogy a határon belüli szabályozáson és tervezésen kívül szükség van összehangolt nemzetközi együttműködésre, hiszen a hullámterjedés nem ismer országhatárokat. A feladat tehát kettős: egyrészt nemzeti szinten szükséges megvizsgálni, hogy az adott paraméterek mellett üzembe lehet-e helyezni az állomást, másrészt nemzetközi egyeztetések útján meg kell bizonyosodni arról is, hogy az nem okoz, és annak nem okoznak interferenciát a szomszédos országok állomásai.

Dolgozatomban bemutatom a kijelölt, állomásokhoz rendelt frekvenciák nemzetközi koordinációját a földi mozgószolgálat és állandóhelyű szolgálat vonatkozásában általánosan, valamint egy konkrét koordinációs példán keresztül is, továbbá a spektrum gazdaságosabb felhasználásának érdekében felvázolok egy lehetséges megoldást a jelenleg érvényes, a koordináció során felhasznált számítási módszer kibővítésére a földi mozgószolgálattal kapcsolatban.

Dolgozatomat a Nemzeti Média- és Hírközlési Hatóságnál nyári gyakorlatként végzett munkám alapján írtam. Ezúton is szeretném megköszönni a Médiafrekvencia-tervezési és koordinációs osztály munkatársainak, különös tekintettel Kissné dr. Akli Mária Osztályvezető Asszonynak és Szarka Andrásnénak azt a segítséget és támogatást, amit a gyakornoki idő alatt, valamint előtte is kaptam. Köszönettel tartozom a szimulációk futtatási környezetének biztosítása miatt Budai Tamás barátomnak és kollégámnak is. A dolgozatot $\text{\LaTeX}$ szövegszerkesztőben szerkesztettem.

2. fejezet

A HCM megállapodás

Ebben a fejezetben rövid, a fontosabb kérdéseket átfogó elméleti áttekintést nyújtok a nemzetközi frekvenciakoordináció európai eljárását műszaki és adminisztrációs szempontból definiáló HCM megállapodással kapcsolatban olyan részletességgel, ahogy azt a gyakorlati munka megkívánja. A műszaki paraméterek meghatározásának összefüggéseit, előírásait dolgozatom számítási eljárás javítási lehetőségeivel foglalkozó fejezetében részletezem.

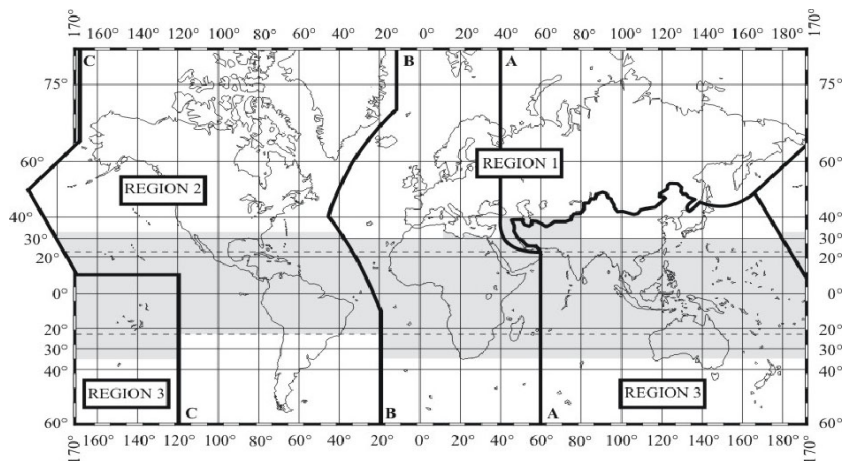
2.1. A megállapodás alapja, célja

Az európai frekvenciakoordinációs megállapodás tárgyalása előtt szükséges és célszerű a kollektív szabályozási rendszer rövid ismertetése, hiszen az ilyen többoldalú megállapodások megkötéséhez egy kontinenseken átnyúló, világszintű szervezet ad széles lehetőségeket biztosító keretet. A távközlés világszintű felügyeletét egy ENSZ mellett működő szervezet, az *International Telecommunication Union* (ITU) végzi ajánlások és szabályozások segítségével. Az ITU három fontos spektrumgazdálkodási fogalmat definiál [1]:

- Felosztás (*allocation*): egy vagy több szolgálat hozzárendelése egy adott frekvenciasávhoz a 2.1. ábrán definiált régiók szerint;
- Kiosztás (*allotment*): a felosztás szerint definiált szolgálatra rögzített feltételek mellett, hatóságok közötti megállapodás vagy terv alapján egy vagy több ország általi felhasználás;
- Kijelölés (*assignment*): a kiosztott frekvenciák állomásokhoz rendelése.

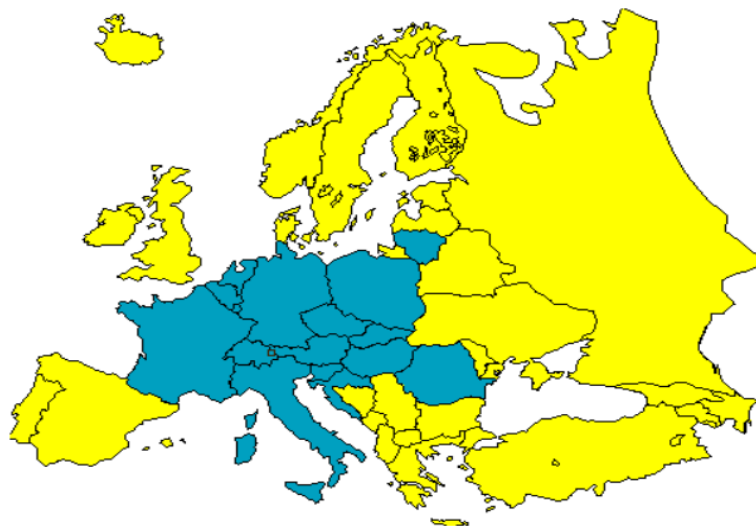
Az európai országok kivétel nélkül az 1. régióba tartoznak, tehát azonos felosztás vonatkozik rájuk, így lehetővé és szükségessé válik az ITU előírásainak alárendelt, kontinensen belüli szabályozás, együttműködés. A Rádiószabályzat ezt a 6. cikk értelmében lehetővé is teszi két- vagy többoldalú megállapodások megkötésével a frekvenciakijelölés vonatkozásában, amennyiben a megállapodást kötő országok a Rádiószabályzat szerinti felosztást alkalmazzák, kivéve az 5060 kHz – 27500 kHz sávot.

A kijelölési eljárás során fontos kérdés a zsúfolt rádiófrekvenciás spektrum optimális kihasználása, továbbá az állomások közötti kölcsönös zavar okozásának kike-



2.1. ábra. Az ITU által definiált régiók [1]

rülése, minimalizálása, amely párbeszédet és egyeztetést igényel a szomszédos országok hatóságai között még az állomások üzembe helyezése előtt. Ennek a nemzetközi egyeztetésnek (koordinációnak) a kereteit definiálja az elsőként 1993-ban megkötött *Harmonized Calculation Method* (HCM) megállapodás. A jelenleg érvényes (2014. július 1.) HCM megállapodást 17 európai ország (Ausztria, Belgium, Cseh Köztársaság, Németország, Franciaország, Magyarország, Hollandia, Horvátország, Olaszország, Lichtenstein, Litvánia, Luxemburg, Lengyelország, Románia, Svájc, Szlovák Köztársaság és Szlovénia) írta alá, ezzel vállalva, hogy a határaikon belül létesítendő állomásaikat koordinálják a földi mozgószolgálat és az állandóhelyű szolgálat vonatkozásában.



2.2. ábra. Európa, kézzel a HCM megállapodást aláíró országok [3]

A HCM megállapodás nagy előnye – miként azt a neve is sugallja – az, hogy a koordinációban részt vevő távközlési igazgatóságok a megállapodásban előírt, a megállapodás mellékleteiben jól definiált számítási módszert használják az interferencia meghatározására, így (elméletileg) kikerülhetők a számítási különbségekkel adódó problémák, fennakadások, ezzel elősegítve a gyors, effektív munkát és

a spektrum gazdaságosabb kihasználását. Nem volt ez mindig így: Magyarország 1990-es csatlakozása előtt is zajlott koordináció Európában, kevésbé jól definiált, nem összehangolt számítási módszerekkel (számítógépes szoftvertámogatás nélkül kézzel, papíron), kevesebb ország között. Az első, még a HCM elődjének tekinthető megállapodást 1956-ban kötötte Belgium, Hollandia és a Német Szövetségi Köztársaság Brüsszelben a 146 MHz–156 MHz, 156 MHz–174 MHz és 450 MHz–470 MHz sávokra [4].

A HCM megállapodáshoz bármely olyan európai ország csatlakozhat annak aláírásával, amely kijelöléseit a megállapodás szerint kívánja egyeztetni valamely olyan ország igazgatásával, amely már tagja a HCM megállapodásnak. A csatlakozás feltétele tehát egyszerűbben fogalmazva az, hogy az illető országnak legalább egy olyan szomszédos országgal kell rendelkeznie, amely már a megállapodás szerint végzi a nemzetközi frekvenciakoordinációt.

2.2. Koordinálandó frekvenciák és kategóriák

A jelenleg érvényes HCM megállapodás a 29,7 MHz és 43,5 GHz közötti frekvenciasávban üzemelő földi mozgószolgálat és állandóhelyű szolgálat állomásaira vonatkozik. Ez a széles spektrum több részre tagolódik. Földi mozgószolgálat esetén a megállapodás szerint kell koordinálni a következő frekvenciákat [5]:

29,7 MHz - 47 MHz	440 MHz - 470 MHz
68 MHz - 74,8 MHz	790 MHz - 960 MHz
75,2 MHz - 87,5 MHz	1710 MHz - 1785 MHz
146 MHz - 149,9 MHz	1805 MHz - 1880 MHz
150,05 MHz - 174 MHz	1900 MHz - 1980 MHz
380 MHz - 385 MHz	2010 MHz - 2025 MHz
390 MHz - 395 MHz	2110 MHz - 2170 MHz
406,1 MHz - 430 MHz	2500 MHz - 2690 MHz

Az itt fel nem sorolt frekvenciasávokban történt kijelölések is egyeztetethetők a HCM megállapodás keretei között, és amennyiben szükséges, a felek megegyezhetnek a megállapodás szövegétől eltérő technikai paraméterekben is.

Állandóhelyű szolgálat esetén a megállapodás szerint kell koordinálni a következő frekvenciákat [5]:

1350 MHz - 1375 MHz	10,15 GHz - 10,65 GHz
1375 MHz - 1400 MHz	10,7 GHz - 11,7 GHz
1427 MHz - 1452 MHz	12,75 GHz - 13,25 GHz
1492 MHz - 1525 MHz	14,5 GHz - 14,62 GHz
2025 MHz - 2110 MHz	15,23 GHz - 15,35 GHz
2200 MHz - 2290 MHz	17,7 GHz - 19,7 GHz
3410 MHz - 3600 MHz	22 GHz - 22,6 GHz

3600 MHz - 4200 MHz	23 GHz - 23,6 GHz
5925 MHz - 6425 MHz	24,5 GHz - 26,5 GHz
6425 MHz - 7125 MHz	27,5 GHz - 29,5 GHz
7125 MHz - 7725 MHz	31,8 GHz - 33,4 GHz
7725 MHz - 7975 MHz	37 GHz - 39,5 GHz
8025 MHz - 8275 MHz	40,5 GHz - 43,5 GHz
8275 MHz - 8500 MHz	

A megállapodásban az állandóhelyű szolgálattal kapcsolatban lefektetett koordinációs eljárás csak abban az esetben érvényes, ha az érintett országok koordinálandó frekvenciái egyaránt állandóhelyű szolgálatra vannak felosztva, és azok az igazgatások hatáskörébe tartoznak. Amennyiben a földi mozgószolgálattal kapcsolatban feltüntetett frekvenciasávok valamelyikében üzemel állandóhelyű szolgálat, akkor azokat az állomásokat a mozgó szolgálatra vonatkozó előírások szerint szükséges koordinálni. A táblázatban fel nem tüntetett frekvencián működő állandóhelyű szolgálatok koordinálhatók a HCM megállapodás szerint, és amennyiben szükséges, úgy az igazgatások külön megegyezhetnek a műszaki paraméterekkel kapcsolatban.

A frekvenciák nem kizárólag a felosztás alapján csoporthozíthatók [6]: koordinációs szempontból beszélhetünk *koordinálandó frekvenciákról, preferált frekvenciákról, megosztott frekvenciákról, tervezett rádióhálózatok frekvenciáiról, földrajzi tervek alapján használt frekvenciákról, preferált kódokat használó frekvenciákról és üzemeltetők közötti megállapodások alapján használt frekvenciákról*. Dolgozatom külön nem tér ki mindegyik itt felsorolt kategóriára, csak a leggyakrabban használtakra.

Koordinálandó frekvenciának hívunk minden olyan frekvenciát, melyet a szomszédos igazgatásokkal a megállapodás szerint koordinálni szükséges még az állomás üzembe helyezése előtt. Két- vagy többoldalú megállapodások megkötése alapján az igazgatásoknak lehetőségük nyílik ún. preferált frekvenciák kijelölésére, mely kijelölések alapján az igazgatások a rendelkezésükre bocsátott preferált frekvenciákon az két- vagy többoldalú megállapodásban lefektetett keretek között előzetes koordináció nélkül, csak az állomás üzembe helyezésének bejelentésével helyezhetnek üzembe állomásokat. Előzetes koordináció nélkül helyezhetők üzembe azok az állomások is, melyek frekvenciáiról az üzemeltetők megállapodást kötöttek, ha az érintett igazgatás engedélyezi az ilyen megállapodások megkötését.

2.3. A koordináció adminisztrációs menete

A frekvenciakoordináció adminisztrációs folyamata során a műszaki paraméterek figyelembevételével, a megállapodásban megfogalmazott számítási módszerek használatával azt kell megvizsgálni, hogy a koordinálandó állomás okoz-e, illetve annak okoznak-e káros zavart a szomszédos országok már üzembe helyezett állomásai, és az eredmény függvényében állást kell foglalni az állomás engedélyének kiadásáról. Ezt a kérdést egy adott ország igazgatásának szemszögéből nézve kétfelé kell választani: amennyiben az igazgatás egy, a felügyelete alá tartozó állomás engedélyének megadásáról kíván dönteni, akkor az állomás földrajzi és műszaki paramétereinek, valamint határvonaltól mért távolságának figyelembe vételével el kell döntenie, hogy az állomást szükséges-e koordinálni, és ha szükséges, akkor mely országokkal. A kérdés eldöntése után az igazgatásnak az engedélyezési eljárás keretei között a HCM

megállapodásban definiált módon kötelessége az állomás földrajzi és műszaki paramétereinek elküldésével a koordinációt megindítani az érintett országok igazgatásaival.

Amennyiben az érintett igazgatás a kiértékeléshez szükséges adatok hiányát észleli, azt a kérelem megérkezésétől számított 30 napon belül jeleznie kell a kérelmező igazgatás felé, amely köteles azt 30 napon belül az igazgatás rendelkezésére bocsátani. Az érintett igazgatásnak alapértelmezésben 45 napon belül állást kell foglalnia. Amennyiben ezt nem teszi meg, úgy a kérelmező emlékeztetőt küldhet, melyre 20 napon belül válaszolni kell. Ha az érintett igazgatás nem foglal állást, akkor azt a megállapodás értelmében beleegyezésnek kell tekinteni. A sikeresen koordinált állomásokat és az így létrejött *assignment*eket legkésőbb 180 nappal az üzembe helyezés után be kell jegyezni a közös frekvenciajegyzékbe, mely *assignment*-adatbázis alapján az országok a koordinációt folytatják [6].

Amennyiben a kijelölés preferált frekvencián, a két-vagy többoldalú megállapodásban foglalt módon történik, akkor az állomás koordináció nélkül helyezhető üzembe a kijelölés bejelentésével és bejegyzésével. Ha a preferált frekvencián történő kijelölés paraméterei eltérnek a megállapodásban foglaltaktól, akkor a kijelölést a koordinálandó frekvenciák szerint szükséges egyeztetni az érintett igazgatásokkal. A preferált kijelölések elsőbbséget élveznek a többi kijelöléssel szemben.

Ha egy állomás – legyen az preferált, vagy nem preferált frekvencián működő – zavart szenved bármely szomszédos igazgatás hatásköre alá tartozó állomás által a vonatkozó megállapodás(ok) be nem tartása miatt, akkor az adott ügy közös kivizsgálást igényel az ITU Rádiószabályzatának előírásai szerint, és az eljárás során mindkét fél számára megfelelő eredményre kell jutni.

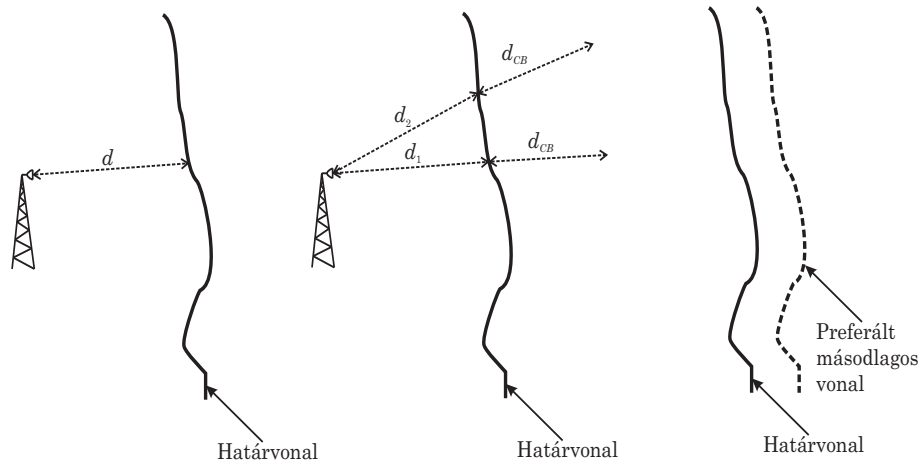
Abban az esetben, ha koordinációs kérelem érkezik be az igazgatáshoz, a frekvenciajegyzék, a két-vagy többoldalú megállapodások alapján használt frekvenciák, valamint a koordinációs kérelem elbírására váró frekvenciák időrend szerinti figyelembevételével el kell döntenie, hogy a szomszédos igazgatás által kijelölni kívánt frekvencia miatt szenved-e el, vagy annak okoz-e az igazgatás hatásköre alá tartozó bármely, már koordinált állomás káros zavart, és ez alapján állást kell foglalni, amit meg kell küldeni a kérelmező igazgatásnak, mely azt az engedélyezés során figyelembe kell, hogy vegye.

2.4. A koordináció műszaki menete

Földi mozgószolgálat esetén koordinációt igényel az az adóállomás, amely az érintett ország irányában, annak határvonalára számítva a földfelszín feletti 10 m magasságban nagyobb térerősséget hoz létre a megállapodás 1. mellékletében foglaltaknál. A földi mozgószolgálat vevőállomásait abban az esetben szükséges koordinálni, ha a vevőrendszer védelmet igényel, és az a HCM megállapodás első mellékletében meghatározott frekvenciafüggő, határvonaltól mért távolságon belül található.

A vevők koordinációja során az állomást a megállapodás 1. mellékletében definiált, frekvencia függvényében változó térerősségsszinttel üzemelő referenciaadóval kell helyettesíteni, és a létrehozott térerősséget így kell kiszámítani. Állandóhelyű szolgálat esetén koordinációt igényel minden olyan állomás, amely az érintett igazgatás határvonalától legfeljebb a megállapodás 11. mellékletében definiált távolságban található, vagy az összeköttetés adója és/vagy vevője védelmet igényel.

Földi mozgószerkezet esetén beszélhetünk a határvonalra, határon átnyúló, megállapodás szerint definiált frekvenciafüggő hatótávolságra (*cross-border* távolság, d_{CB}), valamint preferált frekvenciák esetén a határvonal pontjainak valamekkora távolsággal történő transzlációjával származtatható másodlagos vonalra történő térerősségszámításról is, miként azt a 2.3. ábra mutatja. Határvonalra történő számítás



2.3. ábra. Határvonal, határon átnyúló távolság és a másodlagos vonal

esetén nem a határvonal állomáshoz legközelebb eső pontjára, hanem arra pontra szükséges számolni, ahol az állomás a legnagyobb térerősséget hozza létre. A számítás során a terepviszonyok figyelembevétele miatt ez a két pont ritkán egyezik.

Földi mozgószerkezet esetén elutasítható a koordinációs kérelem, ha:

- az állomás a megállapodás 1. mellékletében meghatározott térerősség szintet túllépi az érintett igazgatás frekvenciajegyzékében szereplő állomások valamelyikénél;
- a használni kívánt frekvencia két- vagy többoldalú megállapodások által definiált feltételekbe ütközik;
- az állomás a megállapodás 1. mellékletében meghatározott térerősség szintet túllépi legalább egy, koordinációs kérelmének elbírálására váró állomásnál (a kérelmeket beérkezésük szerinti időrendben kell figyelembe venni);
- az állomás a megállapodás 1. mellékletében meghatározott, határon átnyúló távolságra számított térerősség szintet túllépi.

A vevővédelem kérelme csak akkor utasítható el, ha:

- a kérelem kiértékelését végző igazgatásnak van már legalább egy olyan koordinált adója, ami a megállapodás 1. mellékletében definiált térerősség szintnél nagyobb hoz létre az érintett vevőnél;
- a kérelem pozitív elbírálása megakadályozná az igazgatóságot az általa birtokolt preferált frekvenciák valamelyikének két- vagy többoldalú megállapodásban lefektetett feltételek szerinti felhasználásában;

- a kérelem kiértékelését végző igazgatásnak van legalább egy olyan, koordinációs kérelem elbírálására várakozó adója, ami a megállapodás 1. mellékletében definiált térerősségszintnél nagyobb hoz létre az érintett vevőnél;
- a megállapodás 1. mellékletében megállapított, a határon átnyúló zavarással kapcsolatosan támasztott feltételek nem teljesülnek [10].

Az állandóhelyű szolgálat elbírálási kritériumai hasonlóak az itt bemutatott pontokhoz azzal a fontos különbséggel, hogy az adóállomás elutasítása automatikusan magával vonja a hozzárendelt vevőállomás elutasítását is. Mivel dolgozatomban a földi mozgószolgálat koordinációs kérdéseivel foglalkozik elsősorban, ezért az fix összeköttetések koordinációs kérdéseire csak a megkívánt mélységig térek ki. Preferált frekvenciák koordinálása esetén az két- vagy többoldalú megállapodások alapján definiált, a 2.3. ábrán látható másodlagos határvonalra kell elvégezni a koordinációhoz szükséges számításokat.

2.5. A HCM-program

A megállapodás szerinti frekvenciakoordinációs eljárás során történő térerősségszámítások alapja, hogy az igazgatások azonos frekvenciajegyzékkel, azonos topográfiai adatbázissal, és azonos matematikai eljárásokon alapuló módszerekkel számoljanak és döntsenek a kérelmek elbírálásáról. Szükség van tehát egy olyan központi rendszerre, amely összegyűjti és folyamatosan frissíti a szükséges adatbázisokat (a frekvenciajegyzéket például az igazgatásoknak fél évente ki kell cserélniük), továbbá fejleszti és az igazgatások rendelkezésére bocsátja a mellékletekben definiált számítási eljárásokat implementáló programot.

A HCM-program egy szubrutin, amit az igazgatások a saját programkörnyezetükbe építve futtatnak és használnak. A megállapodás szerint a HCM-program a forráskódból, a .dll-fájlokból, egy vitás helyzetek esetén referenciaként használható, a szubrutin futtatására alkalmas tesztprogramból (.exe) és a hozzájuk tartozó dokumentációkból áll. Az igazgatásoknak tehát olyan saját programkörnyezetet kell fejleszteniük, amely alkalmas a központi HCM-szubrutin betépitésére és felhasználására. A Nemzeti Média- és Hírközlési Hatóság munkatársai a földi mozgószolgálat koordinációjához a CHIRplus LM [8] (Land Mobile) programkörnyezetet alkalmazták, melyet munkám során én is használtam.

2.6. A koordinációs eljárás nehézségei

Dolgozatomban már számtalan érvet említettem a nemzetközi frekvenciakoordináció elengedhetetlensége és elnyőnye mellett, de – mint minden esetben – a gyakorlati alkalmazás során sokféle problémával és kihívással lehet szembesülni. A koordinációs kérelmek küldése, fogadása és elbírálása jelentősen megnöveli az igazgatásokra háruló adminisztratív munkát, hiszen az eljárás összetett munka. Egy-egy koordinációs procedúra problémás ügyek esetén el is húzódhat, így lassítva az igazgatások frekvenciaengedélyezési eljárásait [9].

Hátrány, hogy az igazgatásoknak azonos, vagy maximum kis mértékben eltérő topográfiai és *assignment*-adatbázisból célszerű dolgozniuk, ami folyamatos frissí-

tést, kicserélést és egyeztetést igényel. Sokszor adódnak speciális ügyek is, hiszen a HCM megállapodás mellett rendszerint születnek (és érvényben is vannak) megállapodások például preferált frekvenciákról. A kiegészítő megállapodások figyelembe vétele bonyolultabbá teszi az ügyintézkést.

Magyarország szempontjából különleges helyzet, hogy két szomszédos ország, Ukrajna és Szerbia nem tagja a HCM megállapodásnak, így az érintett országok igazgatásaival úgy kell lefolytatni a koordinációt, hogy – bár van kétoldalúan érvényes, a HCM megállapodástól eltérő keretrendszer – az említett országokkal történő koordináció során eltérő típusú, bizonyos frekvenciasávokra megkötött megállapodásokat kell alkalmazni, ami nehézségeket szül a gyakorlatban, például az adatcsere ügyében is. Előfordul, hogy a szomszédos igazgatások olyan állomásokra kérnek vevővédelmet, melyeket nem jelentettek be, nem koordináltak, így az nem került be az érintett igazgatás frekvenciajegyzékébe. Az ilyen esetekben az érintett igazgatás a koordináció nélkül üzembe helyezett állomásra vevővédelmet nem igényelhet.

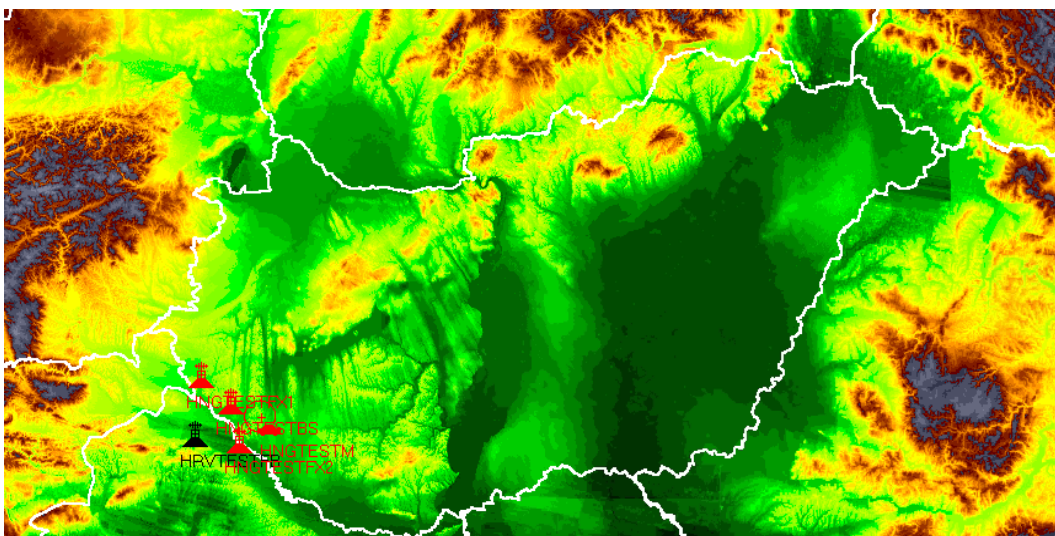
3. fejezet

Nemzetközi frekvenciakoordináció a gyakorlatban

Ebben a fejezetben egy fiktív, de koordinációs szempontból rendkívül szemléletes magyar hálózat, valamint egy horvát állomás segítségével ismertetem a nemzetközi frekvenciakoordináció menetét a gyakorlatban. A bemutatásra kerülő koordinációs eljárást a számításokkal együtt CHIRplus LM környezetben végeztem el.

3.1. A koordinálandó hálózat felépítése

Tegyük fel, hogy az ország igazgatásának frekvenciaengedélyezési osztálya nemzetközi frekvenciakoordináció lefolytatására kérte az ezzel foglalkozó szervezeti egység munkatársait a 3.1. ábrán piros színnel jelölt magyar állomásokkal kapcsolatban. Az állomások koordinátái alapján térképre rajzolva azonnal szembetűnik, hogy a kijelölések mindegyike közel található Szlovéniához (SVN) és Horvátországhoz (HRV), ezért az eljárás kulcsfontosságú az állomások üzembe helyezése előtt. Ezzel egy-



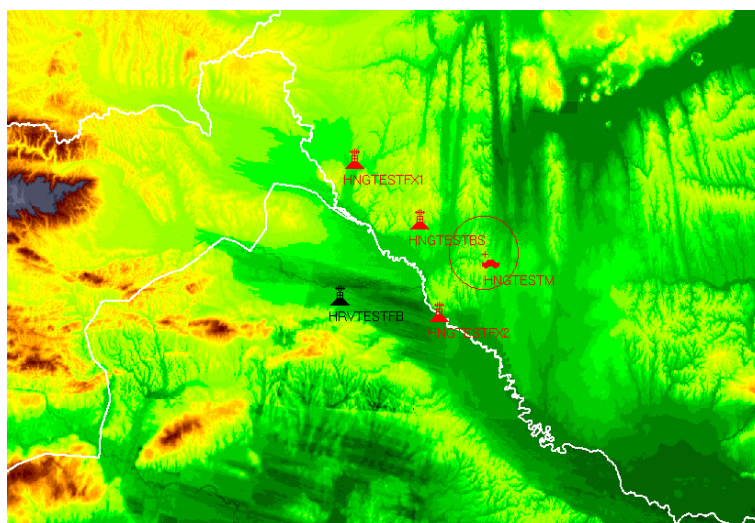
3.1. ábra. A koordinálandó állomások földrajzi elhelyezkedése

időben Horvátország igazgatása úgy találta, hogy a térképen feketével jelölt, a határ közelében üzembe helyezendő állomása túllépi a HCM megállapodás szerint a

hatávonálra számított térerősségszintet, ezért a magyar igazgatás részére kérelem formájában elküldte azt.

A kijelölések adatainak igazgatások közötti cseréje – mivel a koordináció *assignment*-adatbázis segítségével történik – az adatokat leíró rekordok elküldésével zajlik, mely rekordok mezőit a HCM megállapodás speciális kódjelzéssel azonosítja, azoknak speciális, egységes formátumot ír elő [11]:

Mező jelzése	Mező neve
1A	Adási frekvencia
1Z	Frekvenciakategória
6A	Állomás osztálya
6B	Szolgálat jellege
6Z	Felhasználási kategória
10Z	Csatornafoglaltság
2C	Üzembe helyezés dátuma
4A	Állomás neve
4B	Ország
4C	Állomás koordinátái
4D	Működési terület sugara
4Z	Telephely tengerszint feletti magassága
7A	Adás megjelölése
8B1	Állomás maximális effektív kisugárzott teljesítménye
8B2	Referenciaantenna típusa (körsugárzó/dipól)
9A	Azimut szög
9B	Elevációs szög
9D	Polarizáció típusa
9G	Antennanyereség
9Y	Antenna földfelszín feletti magassága
1Y	Vételi frekvencia
13X	Koordinációs azonosító



3.2. ábra. Az állomások kinagyítva

A magyar állomások rekordjainak legfontosabb mezői ezek alapján:

4A	HNGTESTBS	HNGTESTFX1	HNGTESTM	HNGTESTFX2
1A [MHz]	463,39375	453,39375	453,39375	453,390000
1Y [MHz]	453,39375	463,39375	463,39375	463,390000
4C (x)	016E51 16,256	016E35 53,742	017E05 57,491	016E56 47,000
4C (y)	46N28 16,276	46N37 06,981	46N24 29,524	46N15 23,000
4D	0 km	0 km	10 km	0 km
4Z	229 m	191 m	-	157 m
6A	Bázis (FB)	Fix (FL)	Mozgó (ML)	Fix (FL)
8B1/8B2	13 dBW/ERP	10 dBW/ERP	10 dBW/ERP	7 dBW/ERP
10Z	1	1	1	1
7A	14K0G7EGT	14K0G7EGT	14K0G7EGT	14K0G7EGT
9D	Vertikális	Vertikális	Vertikális	Vertikális

Kezdetben az összes állomás antennáját alapértelmezetten körsugárzóként definiáltam, továbbá a kijelölések mindegyike 12,5 kHz sávszélességű és digitális. Fix állomások esetén a 4D alapértelmezetten nulla, mobil állomások esetén a 4Z nem értelmezhető, hiszen az folyamatosan változik. A 3.3. ábrán látható 13X mező az adatbázis elsődleges kulcsa, tehát minden rekord egyedi azonosítóval rendelkezik, amely össze is rendeli az azonos eljárás alatt koordinált, valamint az azonos hálózatban működtetni kívánt állomásokat.

	Status Coord	13X Coord Reference	associa	NrOfCountry	City	4A Station Name	4B Cd	4C x-Coordinate	4C y-Coordinate	8B1 Po	1A Frequency	1Y Frequency
1	NRC	HNG14TMDKSI01313	0			HNGTESTBS	HNG	016E51 16,276	46N28 43,630	13,0	463,393750	453,393750
2	NRC	HNG14TMDKSI01323	0			HNGTESTM	HNG	017E05 57,491	46N24 29,524	10,0	453,393750	463,393750
3	NRC	HRV14TMDKSI01111	1			HRVTESTFB	HRV	016E34 15,277	46N16 51,279	13,0	463,384370	453,384370
4	NRC	HNG14TMDKSI01111	0			HNGTESTFX2	HNG	016E56 47,000	46N15 23,000	7,0	453,390000	463,390000
5	NRC	HNG14TMDKSI01333	3			HNGTESTFX1	HNG	016E35 53,742	46N37 06,981	10,0	453,393750	463,393750

3.3. ábra. A szoftverbe vitt rekordok

Az elsődleges kulcs első három betűje azonosítja a koordinációt kérelmező országot, a következő két karakter a kérelem évének utolsó két számjegye, majd hat karakter eljárás azonosító és két karakter frekvenciasorszám következik, végül az utolsó két számjegy jelzi, hogy az összetartozó rekordok közül az adott rekord hanyadik. Koordináció előtt az összes rekord státusza **NRC**, ami azt jelenti, hogy a rekordok az eljárás lebonyolítására várnak (*New Request for Coordination*).

3.2. A sávra vonatkozó preferált megállapodás

Minden kérvény kiküldése és elbírására során figyelembe kell venni, hogy az elbírálandó kijelölések milyen frekvenciasávban történtek, hiszen ettől függően előfordulhat, hogy a HCM megállapodáson kívül más megállapodás iránymutatásait is figyelembe kell venni. A dolgozatomban felvázolt kijelölések esetén sincs ez másként: a kijelölésekre négyoldalú (Ausztria, Horvátország, Magyarország és Szlovénia), a horvát igazgatás által 2014. május 28-án aláírt, a 450,000 MHz – 457,400 MHz, 458,400 MHz – 460,000 MHz, valamint a 460,000 MHz – 467,400 MHz, 468,400 MHz – 470,000 MHz sávokra érvényes preferált megállapodás vonatkozik [11].

A hivatkozott preferált megállapodás duplex kommunikáció esetén előírja, hogy a bázisállomásoknak a 460 MHz – 470 MHz sávban kell adniuk, a bázishoz rendelt állomások adási frekvenciája ellenben a 450 MHz – 460 MHz sávba kell, hogy essen. A preferált blokkok szimplex felhasználása esetén a bázishoz rendelt állomások adási frekvenciáját a 460 MHz – 470 MHz sávban kell allokálni, és a bázisállomások ugyanezen sávba eső vevőfrekvenciái nem igényelhetnek vevővédelmet [12].

A kiosztás szerinti preferált blokkokban történt kijelölések előzetes koordináció nélkül helyezhetők üzembe, amennyiben

- az állomás által létrehozott térerősségszint a határvonaltól az érintett ország felé számított 15 km-re nem haladja meg a $34 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -t, ha az állomás legfeljebb 15 km-re található attól a határponttól, melyen az a legnagyobb térerősségszintet hozza létre, vagy
- az állomás által létrehozott térerősségszint az érintett ország határától számított 50 km-re nem haladja meg a $20 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -t, ha az állomás több mint 15 km-re található attól a határponttól, melyen az a legnagyobb térerősséget hozza létre.

A megállapodás melléklete a következőképpen rendelkezik arról a frekvencia-blokkokról, melyben a koordinálandó magyar állomások is találhatóak [12]:

Frekvenciasáv [MHz]	Blokk száma	AUT/ HRV/ SVN	AUT/ HNG/ HRV/ SVN	HNG/ HRV/ SVN	HNG/ HRV	HRV/ SVN
452,200 – 452,400	12	HRV	HNG	HNG	HNG	SVN

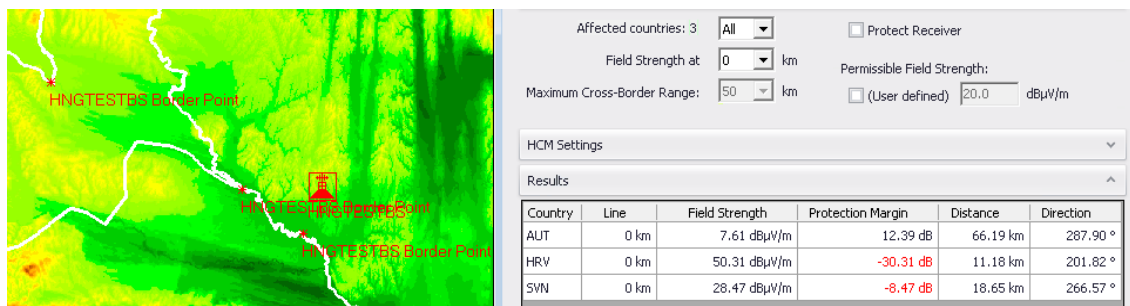
Ezek alapján tehát – amennyiben a kijelölések betartják a preferált megállapodás előírásait – a sávon belül működő állomások előzetes koordináció nélkül helyezhetők üzembe Ausztria, Horvátország és Szlovénia felé egyaránt.

3.3. Hazai állomások nemzetközi frekvenciakoordinációja

A vizsgált magyar állomások paramétereik alapján két csoportra szedhetők: egy bázis- (HNGTESTBTS), egy mobil- (HNGTESTM) és egy fix (HNGTESTFX1) állomás által alkotott hálózatra, valamint egy ezektől különálló, gyakorlatilag közvetlenül a határvonalon található fix állomásra (HNGTESTFX2). Ezek mindegyikét külön-külön kell megvizsgálni, és ha szükséges, akkor koordinálni az érintett igazgatóságokkal.

3.3.1. A hálózat bázisállomásának koordinációja

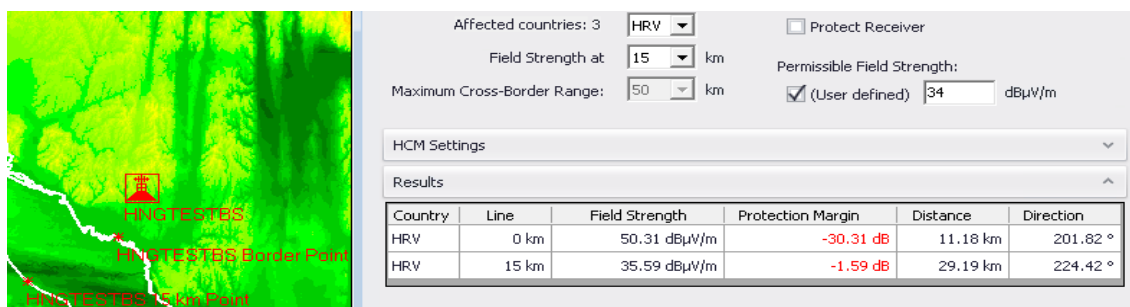
A bázisállomás a preferált megállapodásnak megfelelően a 460 MHz – 470 MHz-es sávban ad, és a 450 MHz – 460 MHz-es sávban vesz ($\Delta f_{\text{duplex}} = 10 \text{ MHz}$), ezért amennyiben a térerősséggel kapcsolatos előírásoknak megfelel, akár mindhárom ország felé preferáltként, előzetes koordináció nélkül jelenthető és helyezhető üzembe. A koordinációs folyamat elindítása során a CHIRplus LM Ausztria, Horvátország és



3.4. ábra. Térerősségszámítás a határvonalra

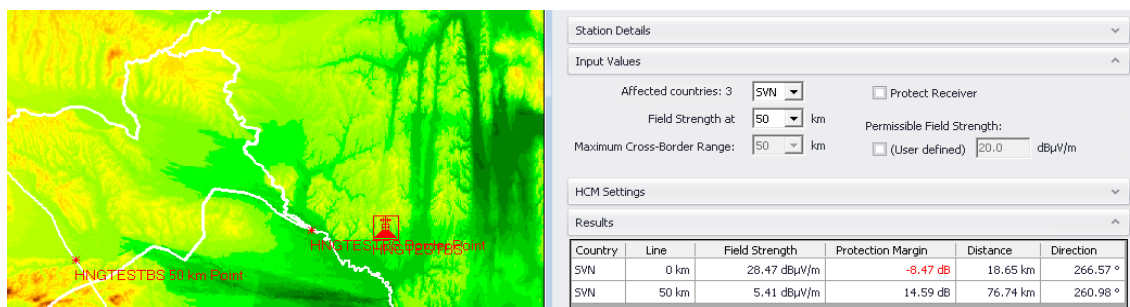
Szlovénia határvonalát találja a beállított 200 km-nél közelebbinek. A határvonalakra számított térerősségeket a 3.4. ábra mutatja.

Mivel az osztrák határon létrehozott térerősségszint 12,39 dB-vel kevesebb, mint a HCM megállapodás szerint előírt $20 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$, ezért Ausztria felé az állomás koordinációja nem szükséges, az adott igazgatást nem kell bevonni a folyamatba. A horvát és a szlovén esetet külön kell kezelni, hiszen az állomás előbbihez 15 km-nél kisebb, utóbbihoz 15 km-nél nagyobb távolságra található. Az állomás abban az esetben nem igényel koordinációt Horvátország felé, ha a határtól 15 km-re legfeljebb $34 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -t hoz létre. A 3.5. ábrán látható, hogy ezt 1,59 dB-vel lépi túl, ezért az állomás az adott ország felé a *koordinálandó frekvenciáknak* megfelelő koordinációt igényel, az nem helyezhető üzembe előzetes egyeztetés nélkül.



3.5. ábra. Számítás a horvát határra

Szlovénia felé az 50 km-es vonalra szükséges számolni, és a határérték $20 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$. A



3.6. ábra. Számítás a szlovén határra

ténylegesen létrehozott térerősségszint ennél 14,59 dB-vel kevesebb, ezért a kijelölés

preferált jogot élvez az igazgatás felé, annak koordinációja nem, csak bejelentése szükséges.

A számítási eljárás befejezése, valamint a kérelmek és bejelentések kiküldése előtt a megállapodás értelmében szükséges megvizsgálni, hogy van-e olyan koordinált, már üzemelő állomás vagy hálózat, amellyel kapcsolatban felmerülhet a kölcsönös interferencia lehetősége. Duplex hálózatok esetén olyan állomások jöhetnek szóba, melyek vételi frekvenciája a koordinálandó kijelölés adási frekvenciája közelébe esik (ebben az esetben az új kijelöléssel zavarnánk koordinált állomást), valamint olyanok, melyek adási frekvenciája a koordinálandó kijelölés vételi frekvenciájának környezetében található (ez a koordinálandó állomás vevővédelmi kérdése). A vizsgálat a **CHIRplus LM Protect Networks** menüpontjával végezhető el, mely a bázisállomás esetén nem talált sem védendő adási-, sem védendő vételi frekvenciát.

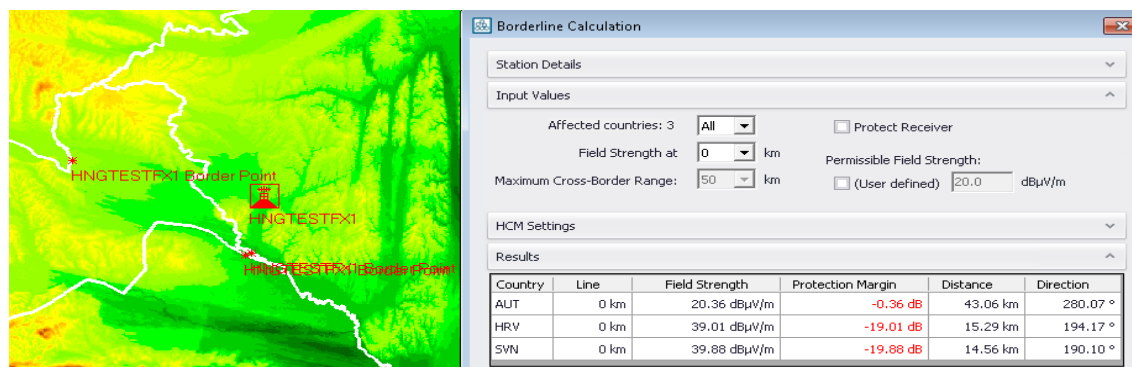
A kijelölés érintett igazgatásokkal történő koordinációjának állapotáról ad felvilágosítást a rekordhoz rendelt, a 3.7. ábrán látható **country info**, amit a kérelmek elküldése előtt a számításoknak megfelelően kitöltődik. Az eddigiek alapján tehát az osztrák igazgatást nem kell értesíteni a kijelölésről, Szlovénia felé P-vel (*Preferential frequencies*) be kell jelenteni, hogy a kijelölés preferált frekvencián, előzetes koordináció nélkül kerül üzembe helyezésre, Horvátország felé pedig a nem preferált eljárásnak megfelelően B-re kell állítani a koordináció állapotát (*Request for agreement*).

Country	Foreign Number	FCoord Id	State of coo	Send	Info Asked	Confirmation	Reminder	Last File Exchange	Answer
HRV	HNG14TMDKS10131	190589	B	23.07.14 12:01	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00
SVN	HNG14TMDKS10131	190589	P	23.07.14 12:01	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00

3.7. ábra. Az állomás country infója

3.3.2. A hálózat fix állomásának koordinációja

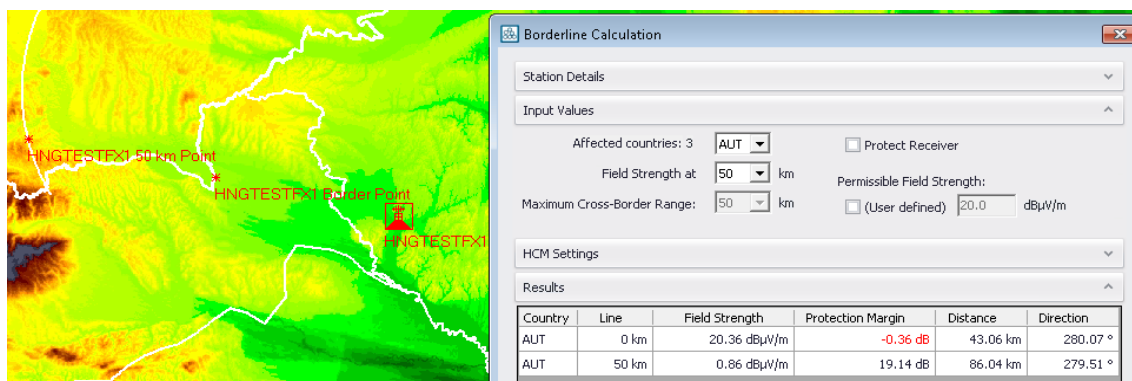
A bázishoz rendelt fix állomás adási frekvenciája a 450 MHz – 460 MHz-es sávban található, így megfelel a preferált megállapodásban előírtaknak, tehát ebben az esetben is a térerősségszintek döntenek a koordináció szükségességéről az érintett három ország vonatkozásában. A határvonalra elvégzett számítások alapján az ál-



3.8. ábra. Térerősségszámítás a határvonalra

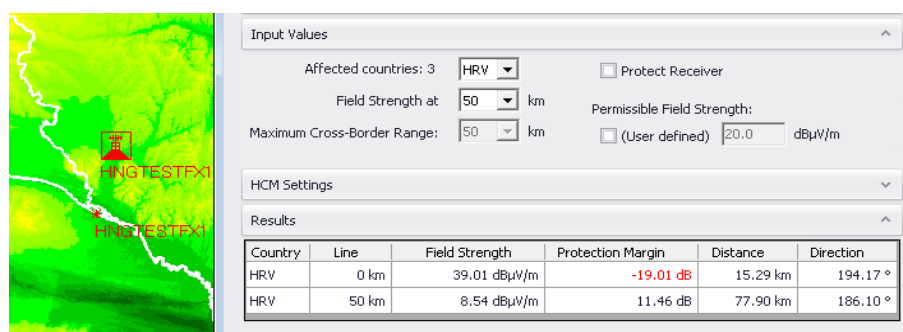
lomás által létrehozott térerősség mindhárom ország irányába túllépi a $20 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -t, ezért a négyoldalú megállapodást figyelembe véve biztos, hogy legalább bejelentési

kötelezettséggel jár az állomás üzembe helyezése. Ausztria és Horvátország felé az $50 \text{ km}/20 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -es, míg Szlovénia felé a $15 \text{ km}/34 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -es szabály kell alkalmazni. A

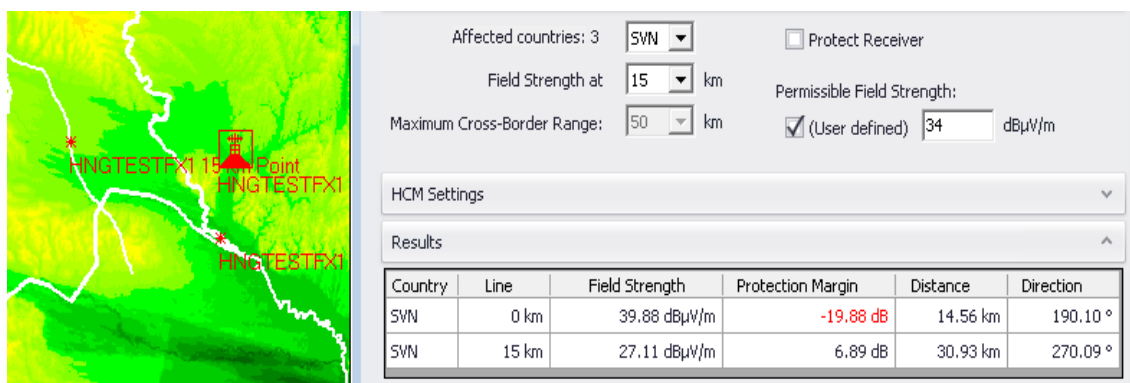


3.9. ábra. Számítás az osztrák határra

határon átnyúló térerősségszint kritikus értékét az állomás egyik ország irányában sem lépi túl, ami szerencsés, hiszen az állomás egyáltalán nem igényel nemzetközi egyeztetést, az egy egyszerű bejelentéssel üzembe helyezhető.



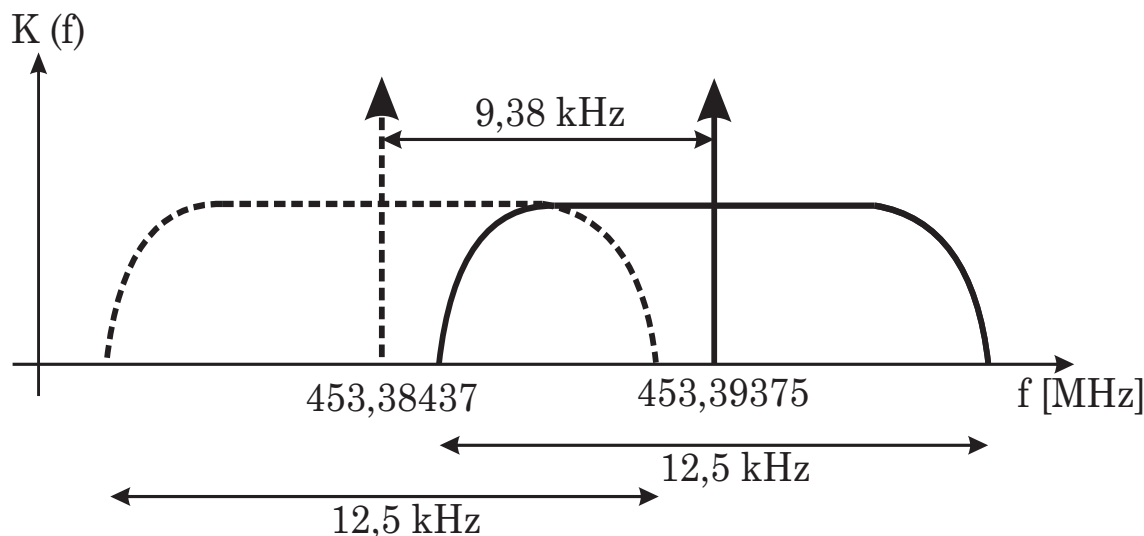
3.10. ábra. Számítás a horvát határra



3.11. ábra. Számítás a szlovén határra

A Protect Networks-analízis során a szoftver megtalálja a még nem koordinált, így NRC-státuszú horvát rekordot, hiszen a 3.12. ábrán látható módon fix állomás adójának középfrekvenciája 9,38 kHz-re található a horvát állomás vevőjének középfrekvenciájától, ami 12,5 kHz-es sáv szélesség esetén spektrumátfedést okoz, így nem

kizárt az interferencia. Ebben az esetben a CHIRplus LM egy pont-pont összeköttetést számol a zavaró állomás és a zavart állomás között, kiszámítva az adó által a vételi ponton létrehozott térerősség értékét.



3.12. ábra. Átlapolódás a frekvenciatartományban

A 3.13. ábrán látható, hogy a horvát állomáson létrehozott térerősség nem lépi túl a megengedett határértéket ($20 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$), ezért akkor sem utasíthatná el a szomszédos igazgatás a magyar kérelmet, ha az állomás nem magyar preferált frekvencián működne.

Protected Station Name	TX -> RX	TX Freq. [MHz]	RX Freq. [MHz]	Permissible FS	Permissible FS (from Table)	Permissible FS (from HCM)	Field strength	Protection Margin	Critical?
HRVTESTFB	FL -> FB	463.38437	453.38437	25.61	20.00	25.61	24.46	1.15	

3.13. ábra. A Protect Networks-analízis eredménye

A szimulációs eredmények alapján tehát egyeztetésre nincsen szükség egyetlen országgal sem, a kijelölésről viszont P jelöléssel értesíteni kell az osztrák, a horvát és a szlovén igazgatásokat, és ezt a country infóban is rögzíteni kell.

Country	Foreign Number	FCoord Id	State of coord	Send	Info Asked	Confirmation	Reminder	Last File Exchange	Answer
AUT	HNG14TMDKS10133	190593	P	23.07.14 12:19	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	24.07.14 08:59
HRV	HNG14TMDKS10133	190593	P	23.07.14 12:19	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	24.07.14 08:59
SVN	HNG14TMDKS10133	190593	P	23.07.14 12:19	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	24.07.14 08:59

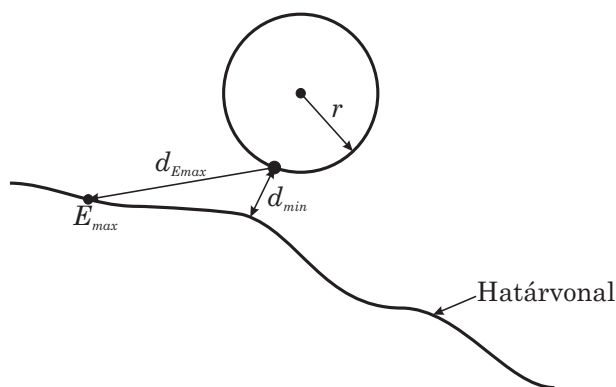
3.14. ábra. Az állomás country info rekordjai

3.3.3. A hálózat mobil állomásának koordinációja

Fix helyű állomások koordinációjánál egyetlen szabadságfokú számítást kell végezni, hiszen az állomás földrajzi helyzete adott, így ahhoz képest csak azt a határvonalra

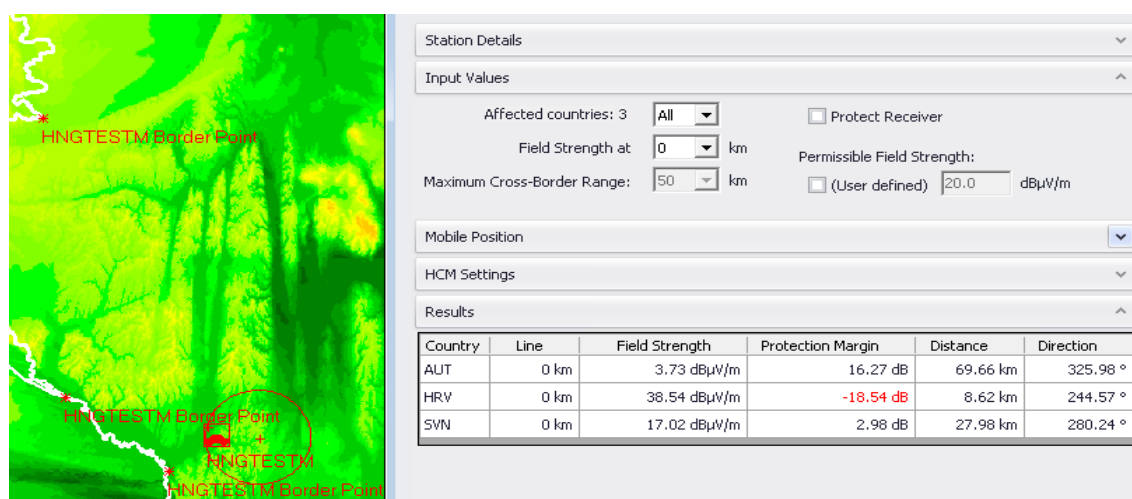
eső pontot kell megkeresni, amelyen – az összes tényező figyelembevételével – az a legnagyobb térerősségszintet hozza létre. Mobil állomás koordinációja esetén más a helyzet, hiszen az állomáshoz nem egy fix földrajzi pont, hanem egy körrel közelített földrajzi terület ismert, melyet annak középpontjával és sugarával adunk meg.

Mobil állomások esetén tehát két szabadságfokú számítást kell végezni: egyrészt meg kell határozni, hogy a működési terület mely pontján kerül rögzítésre az állomás, másrészt erről a pontról a határvonal melyik pontjára számítjuk ki az ott létrehozott térerősségszintet. A HCM megállapodás szerint a működési terület azon pontján kell rögzíteni a mobil állomást, amely az adott ország határhoz a legközelebb esik (d_{min}), és innen azt a határpontot kell figyelembevenni, amelyen a d_{min} -re rögzített állomás a maximális (E_{max}) térerősséget hozza létre.



3.15. ábra. E_{max} és d_{min} meghatározása mobil állomás esetén

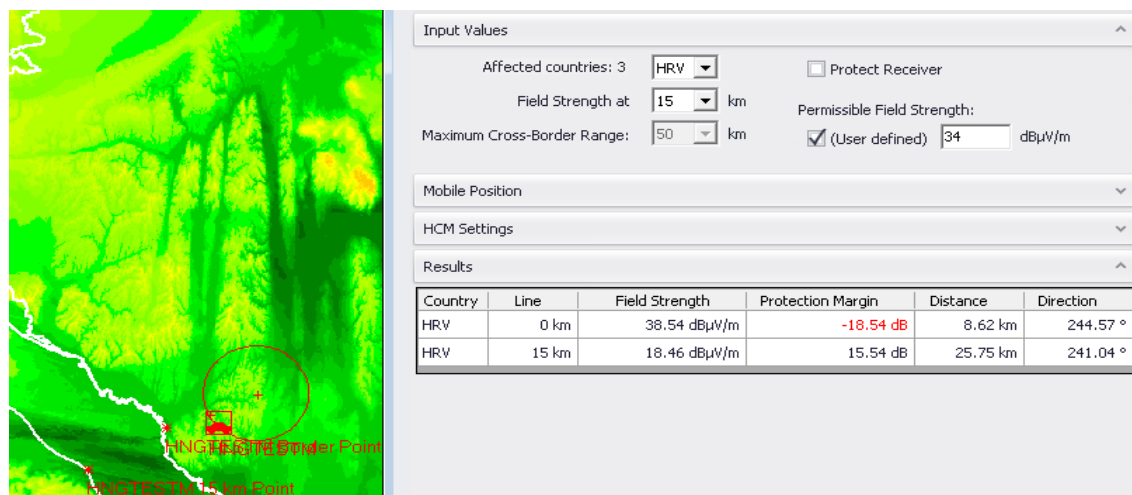
A 3.16. ábrán látható, hogy az így elvégzett számítás a határpontra csak Horvátország felé hoz létre $20 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -nél nagyobb térerősségszintet, Szlovénia és Ausztria felé kisebb a számított érték, így a két ország igazgatása felé még az állomás bejelentése sem szükséges.



3.16. ábra. Térerősségszámítás a határvonalakra

Az eljárásba bevont Horvátország felé a 15 km-nél kisebb távolság alapján alkalmazott $15 \text{ km}/34 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -es szabály alapján az állomás nem lépi túl a preferált

megállapodásban előírt küszöbszintet, ezért a kijelölés preferált jogolt élvez, az állomás koordináció nélkül, a horvát igazgatás felé történő bejelentéssel helyezhető üzembe.



3.17. ábra. Számítás a horvát határvonalra

A Protect Networks-analízis során a CHIRplus LM a magyar állomás 100 km-es körzetén belül megtalálja a még nem koordinált, de kérelem formájában beérkezett horvát állomást az adó- és a vevőfrekvencia szempontjából egyaránt. Az analízis eredményéből látható, hogy a kölcsön interferencia szempontjából csupán a horvát állomás által okozott zavarás kritikus.

Protected Station Name	TX -> RX	TX Freq. [MHz]	RX Freq. [MHz]	Permissible FS	Permissible FS (from Table)	Permissible FS (from HCM)	Field strength	Protection Margin	Critical?
HRVTESTFB	ML -> FB	463.38437	453.38437	25.61	20.00	25.61	22.97	2.64	
HRVTESTFB	FB -> ML	463.38437	453.38437	25.61	20.00	25.61	25.93	-0.32	!!! critical !!!

3.18. ábra. A Protect Networks-analízis eredménye

Amennyiben a megállapodásban a kijelölés frekvenciája nem magyar preferált lenne, akkor a magyar kérelmet elutasíthatná a horvát igazgatás, de jelen esetben mobil állomás preferált jogot élvez, ezért elegendő annak P-vel történő bejegyzése a frekvenciajegyzékbe. Ebben az esetben tehát a magyar állomás bejelentési kötele-

Country	Foreign Number	FCoord Id	State of coo	Send	Info Asked	Confirmation	Reminder	Last File Exchange	Answer
HRV	HNG14TMDKS10132	190590	P	23.07.14 12:05	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	01.01.70 01:00	24.07.14 09:33

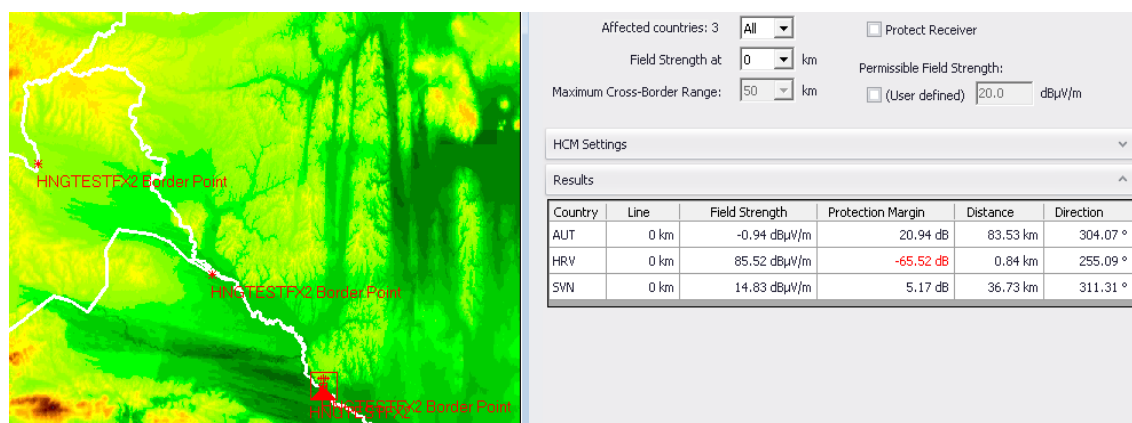
3.19. ábra. Az állomás country infója

zettsége mellett a hazai igazgatás részéről elutasítható a hivatkozott horvát kijelölés, hiszen az magyar preferált állomást zavarna az üzembe helyezése esetén.

3.3.4. Fix állomás koordinációja

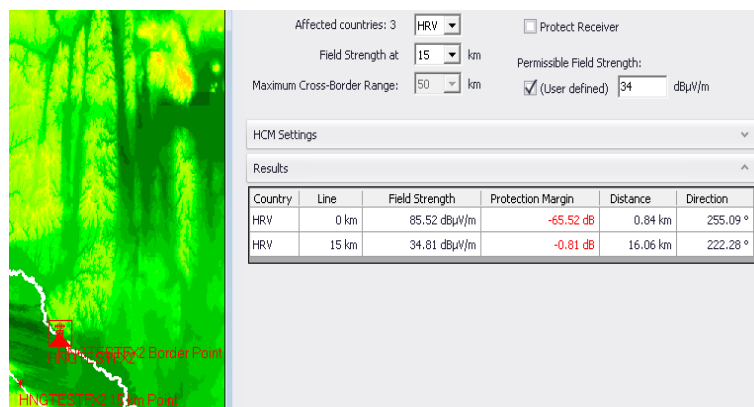
A HNGTESTFX2 nevű fix állomás külön kezelendő az előző három állomás al-kotta hálózattól, hiszen más az adási-, és más a vételi frekvenciája is (543,39000 MHz/463,39000 MHz). A térképre rajzolva megfigyelhető, hogy az állomás gyakorlatilag pontosan a határvonalon helyezkedik el. Egy határvonalra telepített fix állomás során felmerül a kérdés, hogy miért szükséges körsugárzó antenna használata, hiszen az állomás kiszolgálási területe nyilvánvalóan Magyarország területére szorítkozik.

A HCM megállapodás második cikkének ötödik pontja a földi mozgószolgáltat-tal kapcsolatban előírja, hogy az állomások effektív antennamagasságát és kisugár-zott teljesítményt úgy kell meghatározni, hogy az igazodjon a lefedni kívánt terület nagyságához. A megállapodás kimondja továbbá, hogy – amennyiben lehetséges – irányított antennákat kell használni az interferencia kiküszöbölése érdekében a szomszédos országok igazgatásai alá tartozó kijelölések vonatkozásában [13]. Erős a gyanú, hogy ez az állomás ennek az előírásnak nem felel meg, de ezt számításokkal szükséges igazolni.



3.20. ábra. Térerősségszámítás a határvonalra

A 3.20. ábrán látható, hogy se Ausztria, se Horvátország igazgatása felé nem szükséges bejelenteni a kijelölést, ellenben Horvátország felé jelentős térerősségszint-túllépés adódik.



3.21. ábra. Számítás a horvát határ- és másodlagos vonalra

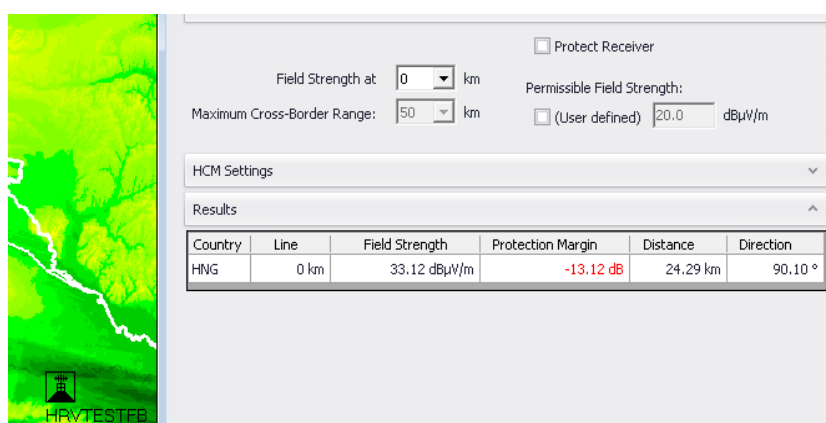
Az állomás a preferált előírás szerinti $15 \text{ km}/34 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -es előírást nem teljesíti, az $50 \text{ km}/20 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -es szabálynak viszont megfelel, így a kijelölést a horvát igazgatással a *koordinálandó frekvenciáknak* megfelelően egyeztetni kell.

3.4. Beérkező kérelem elbírálása

A következőkben bemutatom egy szomszédos ország igazgatásától érkező koordinációs kérelem elbírálásának menetrendjét a már az előzőekben is említett HRV-TESTFB állomás segítségével. Az állomás paraméterei (az antenna itt is alapértelmezett körsugárzó):

4A	HRVTESTFB
1A	463,38437 MHz
1Y	453,39437 MHz
4C (x)	016E34 15,277
4C (y)	46N16 51,279
4D	0 km
4Z	140 m
6A	Bázis (FB)
8B1/8B2	13 dBW/ERP
10Z	1
7A	14K0G7EGT
9D	Vertikális

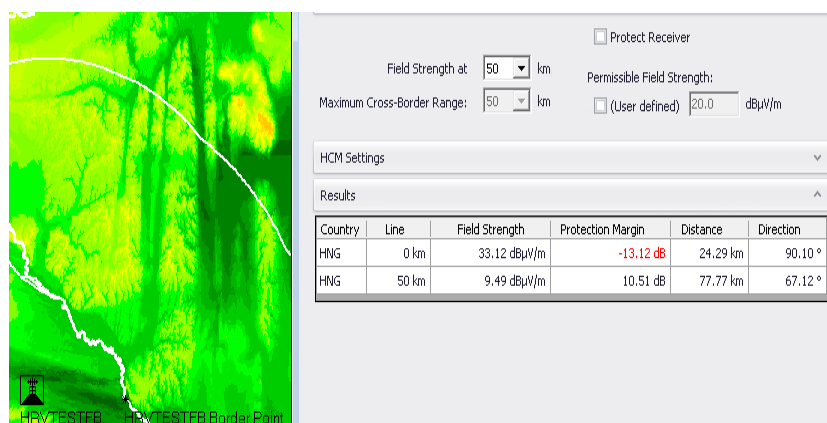
Az állomás által létrehozott térerősség szint a határvonalon túllépi a megállapodásban előírt $20 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -t (emiatt küld el a horvát igazgatás koordinációra az állomást), de az 50 km-es cross-border-küszöböt már nem lépi túl, így a kérelem csak akkor utasítható el, ha preferált megállapodást sért, vagy koordinált állomást zavar.



3.22. ábra. Térerősségszámítás a határvonalra

Amennyiben a horvát kijelölés nem magyar preferált frekvencián történt volna, abban az esetben csak már koordinált, vagy éppen koordináció alatt lévő magyar kijelölésre hivatkozva lehetne elutasítani a kérelmet. Ebben az esetben viszont a

horvát igazgatás olyan kérelmet küldött, melyben magyar preferált frekvenciát szeretne felhasználni, és nem preferáltként koordinálni azt. A Protect Networks-analízis során egyértelműen kiderül, hogy a horvát kijelölés koordináció alatt lévő magyar állomásokat zavar, így ezt a kérelmet (ebben a formában, körsugárzó antennával) el kell utasítani.



3.23. ábra. Számítás a magyar határra

HNGTESTM	FB								
	->	453.39375	463.39375	25.61	20.00	25.61	25.93	-0.32	!!! critical !!!
HNGTESTFX1	FB								
	->	453.39375	463.39375	25.61	20.00	25.61	27.43	-1.82	!!! critical !!!
	FL								

3.24. ábra. A Protect Networks-analízis eredménye

A 3.25. ábrán látható a rekordok állapota a kérelmek kiküldése és elbírálása után. **COA** (*Approved Coordination Request*) státuszt kaptak azok a magyar kérelmek, amelyek a számítások alapján egyik ország igazgatásával sem igényelnek koordinációt, **IWS** (*In Waiting Status*) állapotba kerültek azok a rekordok, melyek legalább egy érintett igazgatással koordinálandóak (ezért onnan elbírálási eredményt várunk), és **CR02** (*Coordination Rejected*) állapotba billent a horvát rekord, hiszen az sérti a preferált megállapodást, magyar preferált állomásokat zavar.

Status Coord	13X Coord Reference	associa	NrOfCountry	City	4A Station Name	4B Cd	4C x-Coordinate	4C y-Coordinate	8B1 Pox	1A Frequency	1Y Frequency
IWS	HNG14TMDKS101313	3	2		HNGTESTBS	HNG	016E51 16.276	46N28 43.620	13.0	463.393750	463.393750
COA	HNG14TMDKS101323	3	1		HNGTESTM	HNG	017E05 57.491	46N24 29.524	10.0	463.393750	463.393750
CR02	HRV14TMDKS101111	1	1		HRVTESTFB	HRV	016E34 15.277	46N16 51.279	13.0	463.384370	463.384370
IWS	HNG14TMDKS101111	1	1		HNGTESTFX2	HNG	016E56 47.000	46N15 23.000	7.0	463.390000	463.390000
COA	HNG14TMDKS101333	3	3		HNGTESTFX1	HNG	016E35 53.742	46N37 06.981	10.0	463.393750	463.393750

3.25. ábra. A rekordok státusza a kérelmek elbírálása után

4. fejezet

A preferált megállapodás effektív kihasználása

A nemzetközi frekvenciakoordináció komplexitását elsősorban az adja, hogy több, folyamatosan változó megállapodást kell egyszerre alkalmazni, figyelembe venni. A HCM megállapodás mellett kötött megállapodások legfontosabb előnye, hogy a preferált jogot kihasználva koordináció nélkül helyezhetők üzembe az állomások. A koordináció alapértelmezett körsugárzó antenna használata esetén csak ritkán kerülhető ki a határ mentén, éppen ezért célszerű a tervezés során figyelembe venni a megállapodás előírásait, és a működéshez optimális, irányított antennát használni. Ebben a fejezetben bemutatom, hogy miként lehet az előzőekben ismertetett kijelöléseket még hatékonyabban, a koordinációs eljárást kikerülve, gyorsan üzembe helyezni.

4.1. A probléma ismertetése

Az előző fejezet eredményei alapján első közelítésben célszerű felvázolni egy táblázatot arról, hogy a magyar kijelölések mely igazgatások irányába helyezhetők üzembe előzetes koordináció nélkül (✓), és kikkel szükséges koordinációt folytatni (×):

Állomás neve	AUT	HRV	SVN
HNGTESTBS	✓	×	✓
HNGTESTFX1	✓	✓	✓
HNGTESTM	✓	✓	✓
HNGTESTFX2	✓	×	✓

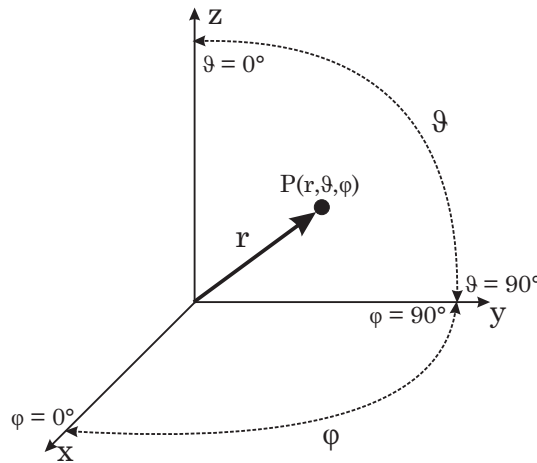
A 3.2. ábra alapján belátható, hogy azoknál az állomásoknál, melyek preferált frekvencián történő üzemeltetés mellett koordinációt igényelnek Horvátország igazgatásával, felesleges a körsugárzó antenna alkalmazása. Amennyiben a HNGTESTBS, valamint a HNGTESTFX2 állomás iránykarakterisztikáját az alkalmazáshoz igazítjuk, úgy kikerülhető a koordinációs folyamat lebonyolítása Horvátország igazgatása felé.

A határ közvetlen közelében található HNGTESTFX2 állomás "előre sugárzó" iránykarakterisztikát igényel, hiszen a kijelölésnek nem feladata a határon átnyúló terület kiszolgálása, így "hátrafelé" maximális csillapítással kell, hogy rendelkezzen. Az ilyen típusú karakterisztikáról első közelítésben belátható, hogy ideális esetben

egyetlen főnyalábbal rendelkezik. A HNGTESTBS állomás bonyolultabb, két főnyalábbal rendelkező iránykarakterisztikával kell, hogy működjön, hiszen a tőle jobbra, valamint a tőle balra található állomásokkal áll duplex összeköttetésben. Előre-, valamint hátrafelé viszont nem szükséges sugároznia, hiszen abban az irányban nem található bázishoz rendelt állomás.

4.2. Iránykarakterisztika definiálása

Az iránykarakterisztika az antenna által létrehozott sugárzás intenzitásának térbeli eloszlását adja meg, a szakirodalom gyakran nyereségfüggvénynek hívja [14]. A nyereségfüggvény értelmezéséhez a 4.1. ábrán látható módon a Descartes-féle koordináta-rendszerből (x, y, z) át kell térni a gömbi koordináta-rendszerbe (ϑ, φ) .



4.1. ábra. A gömbi koordinátarendszer

A nyereségfüggvény $G(\vartheta, \varphi)$ a tér különböző irányában az antennától azonos távolságokban mért teljesítménysűrűség viszonya fő sugárzási irányban mért teljesítménysűrűséghez képest. Fontos, hogy $G(\vartheta, \varphi)$ kizárólag irány-, és nem távolságfüggő adat:

$$G(\vartheta, \varphi) = \frac{S(\vartheta, \varphi)}{|S(\vartheta, \varphi)_{max}|}. \quad (4.1)$$

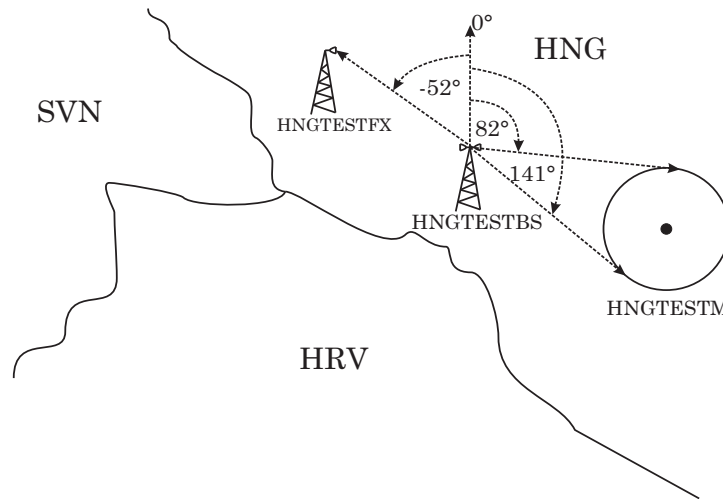
Mivel $G(\vartheta, \varphi)$ kétváltozós térbeli függvény, könnyebb két egyváltozós függvény szuperpozíciójaként kezelni, ezért a gyakorlatban a nyereségfüggvény vízszintes és függőleges vetületével foglalkozunk. A vízszintes (horizontális) függvény a $\vartheta = 90^\circ$, $\varphi \in [0^\circ, 360^\circ]$, a függőleges (vertikális) függvény a $\varphi = 90^\circ$, $\vartheta \in [-180^\circ, 180^\circ]$ értelmezési tartományon definiálható.

A HCM megállapodás szerint a kijelölések által használt antennák iránykarakterisztikáinak az így definiált vetületeit kell megadni, erre szolgálnak a rekordok 9XH (horizontális) és 9XV (vertikális) mezői. Az iránykarakterisztika fokenkénti osztásközzel definiálja az antennára az adott irányban jellemző csillapítását dB-ben a fő sugárzási irány antennanyereségéhez képest. A megállapodás speciális, 7 karakterből álló antennakódokkal azonosítja a különböző iránykarakterisztika-típusokat, melyek pontos jelentését a HCM megállapodás hatodik melléklete definiálja.

Általánosságban elmondható, hogy az antennakód negyedik és ötödik karaktere mindig betű, melyek azonosítják a karakterisztika jellegét, míg az első három, továbbá az utolsó két szám az adott jellegű karakterisztika irányítottságát befolyásolja. A nyereségfüggvény függőleges irányban dönthető, ennek mértékét fokban definiálja az elevációs szög (9B mező), továbbá vízszintes irányban forgatható is (azimut szög, 9A mező). Az antenna főirányban értelmezett nyereségét a 9G mező, magasságát a 9Y mező adja meg.

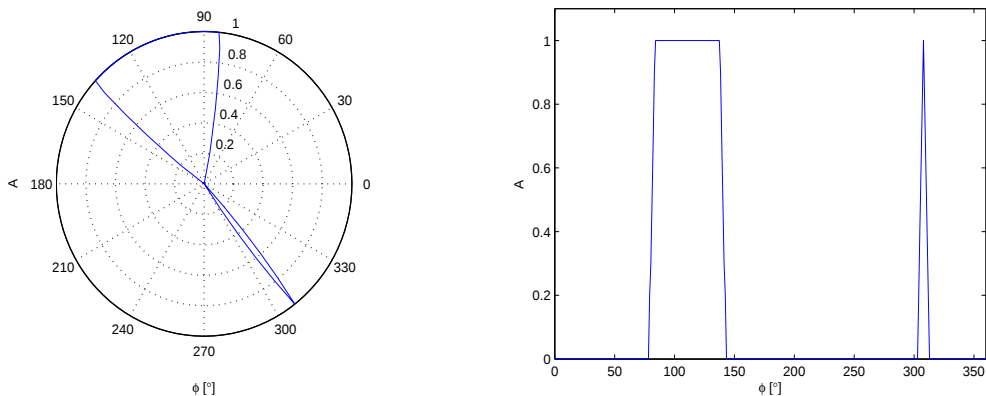
4.3. A bázisállomás paramétereinek javítása

A bázisállomás antennaparamétereinek megválasztásához a 4.2. ábrán tanulmányozható vázlat alapján célszerű egy, az adott feladat ellátásához optimális antennakarakterisztika elméleti megtervezése. A segédábra alapján belátható, hogy az állomás



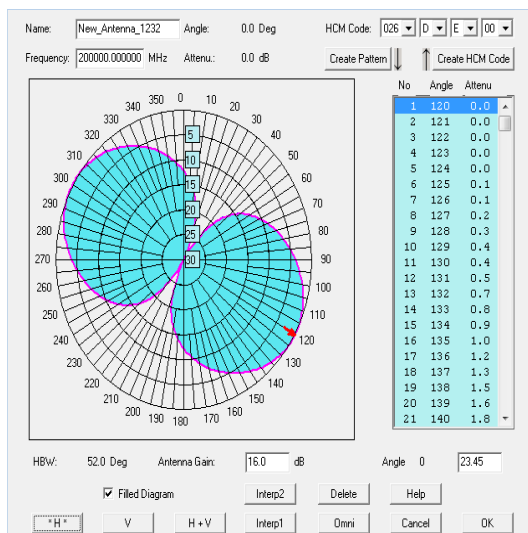
4.2. ábra. Segédábra az antenna iránykarakteristikájához

antennájának horizontális iránykarakteristikája egy, a mobil állomás mozgásterületét lefedő szélesebb nyalábbal ($\varphi = 82^\circ$ -tól $\varphi = 141^\circ$ -ig), valamint egy, a fix állomás felé irányított keskenyebb tűnyalábbal ($\varphi = 308^\circ$) kell, hogy rendelkezzen.



4.3. ábra. Az ideális horizontális iránykarakterisztika

Az ideális karakterisztika meghatározása után olyan antennát kell definiálni, hogy az a lehető legjobban közelítse a megtervezett horizontális nyereségfüggvényt. Az adatbázisban rendelkezésre álló iránykarakterisztikák közül a felvázolt függvényt a 4.4. ábrán látható karakterisztikatípus közelíti a legjobban, melynek HCM-kódja 026DE00, $\alpha = 120^\circ$ azimuttal.



4.4. ábra. Az adatbázisban rendelkezésre álló antennatípus

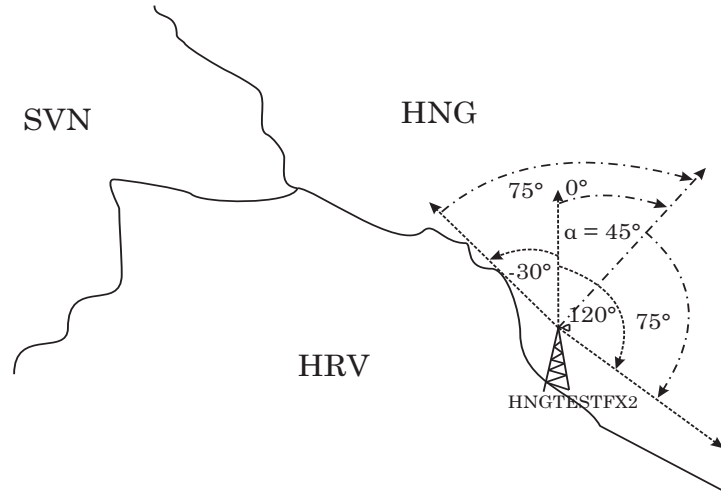
Igaz, hogy a karakterisztika mindkét főirányban azonosan széles nyalábokkal rendelkezik (így elveszítjük a fix állomás előnyét), de amennyiben így már kikerülhet a preferált megállapodás határon átnyúló zavaró télerősség maximumára előírt szint túllépése, akkor az antenna irányítása eredményesnek mondható. Az antenna effektív kisugárzott teljesítménye 13 dBW, polarizációja veritkális, magassága 12 m, főirányú nyeresége 16 dB. A paraméterek beállítása után ismét elvégeztem az elsődleges-, valamint a preferált megállapodásnak megfelelő másodlagos vonalra végzett számításokat, és a következő eredmények adódtak:

Country	Line	Field Strength	Protection Margin	Distance	Direction
AUT	0 km	6,89 $\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$	13,11 dB	66,19 km	287, 90°
SVN	0 km	36,41 $\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$	-16,41 dB	13,90 km	176, 22°
SVN	50 km	-0,64 $\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$	20,64 dB	76,74 km	260, 98°
HRV	0 km	24,31 $\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$	-4,31 dB	19,00 km	269, 16°
HRV	15 km	20,30 $\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$	13,70 dB	29,42 km	239, 36°

Az eredményekből látszik, hogy az antennatípus megváltoztatása nem befolyásolja a koordinációs eljárás kimenetelét sem a szlovén, sem az osztrák igazgatás felé (itt továbbra is az előírt küszöb alatt marad a télerősségszint, P-vel bejegyezhetők a kijelölések), de a horvát határ felé ezzel a karakterisztikával 13,70 dB tartalék marad a 34 $\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -hez képest, melynek köszönhetően így már a horvát igazgatás felé sem igényel koordinációt a kijelölés.

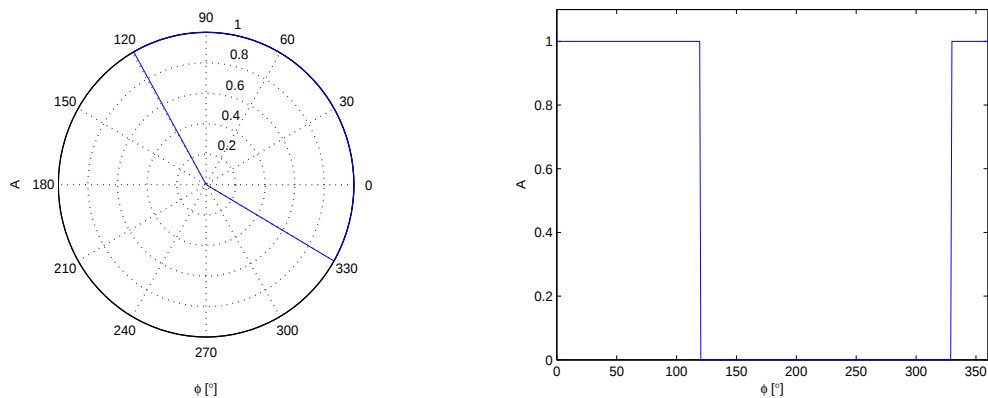
4.4. A fix állomás paramétereinek javítása

A határvonal közelében található HNGTESTFX2 nevű állomás műszaki paramétereinek javítási lehetőségének vázlata a 4.5. ábrán látható. A határmenti kijelölés



4.5. ábra. Segédábra az antenna iránykarakteristikájához

vonatkozásában egyszerűbb a helyzet, mint a magyar hálózat bázisállomása esetén, hiszen ezúttal az antennának egyetlen széles nyalábbal kell rendelkeznie, ugyanis most a határon belüli terület felé történő sugárzást biztosító nyereségfüggvény elérése a cél. A segédábra alapján belátható, hogy a horizontális nyalábnak $\Delta\varphi = 150^\circ$ szélesnek kell lennie a kívánt karakterisztika eléréséhez.

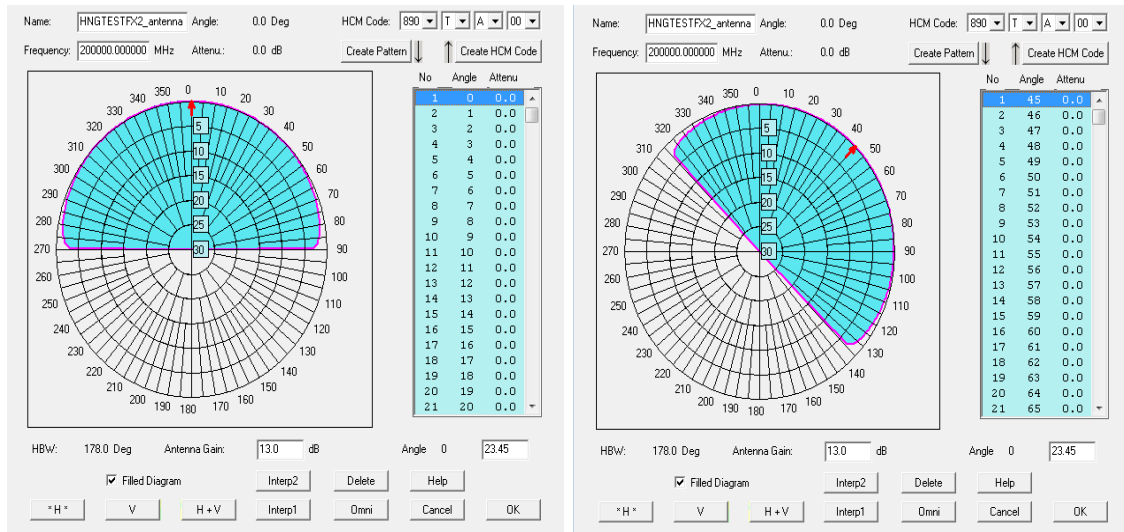


4.6. ábra. Az ideális horizontális iránykarakterisztika

A kívánt nyalábszélesség elérhető a 600TA00 HCM-kódú antennatípussal, a $75^\circ - 75^\circ$ -os felosztás pedig $\alpha = 45^\circ$ -os azimutál állítható be.

Az eddiek alapján tehát a kijelölés új antennájának effektív kisugárzott teljesítménye 7 dBW, polarizációja vertikális, magassága 12 m, főirányú nyeresége 13 dB, horizontális és vertikális nyereségfüggvényének HCM-kódja 600TA00. Az új antenajellemzők beállítása után várható, hogy a határvonal közvetlen közelében üzembe helyezendő állomás a határvonalon túllépi az előírt télerősségszintet, de a preferált

megállapodásban előírt $15 \text{ km} / 34 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -t már nem haladja meg, ezért preferáltként helyezhető üzemben a horvát igazgatás vonatkozásában is.



4.7. ábra. Az adatbázisban rendelkezésre álló antennatípus ($\alpha = 0^\circ$ és $\alpha = 45^\circ$)

Az új antennatípussal elvégzett számítások során a következő eredmények adódtak:

Country	Line	Field Strength	Protection Margin	Distance	Direction
AUT	0 km	-9,14 $\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$	29,14 dB	105,88 km	339, 22°
SVN	0 km	5,14 $\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$	14,86 dB	47,31 km	315, 88°
HRV	0 km	46,07 $\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$	-26,07 dB	5,51 km	132, 23°
HRV	15 km	-0,11 $\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$	34,11 dB	102,73 km	131, 35°

Az új antennával tehát továbbra is előzetes koordináció és bejelentés nélkül helyezhető üzembe a HNGTESTFX2 nevű kijelölés a szlovén- és az osztrák igazgatás vonatkozásában, de ezúttal jelentős védelmi tartalék keletkezett a horvát igazgatás felé a másodlagos vonal tekintetében, tehát feljűk kizárólag P-vel történő bejelentéssel kell élni, ami jelentősen felgyorsítja az engedélyezési folyamatot.

Összefoglalásképpen elmondható, hogy – amikor csak lehet – szükséges és célszerű irányított antennákat használni a földi mozgószolgálatban, hiszen egyrészt a kérelmező sokkal gyorsabban jut engedélyhez, másrészt az irányított nyereségfüggvény segíti az interferencia kiküszöbölését, ami előnyös a szomszédos igazgatások kijelöléseinek védelme számára, valamint a magyar állomás számára is.

5. fejezet

A földi mozgószolgálat koordinációs eljárásának javítási lehetőségei

Ebben a fejezetben a Nemzeti Média- és Hírközlési Hatóság által a nemzetközi frekvenciakordinációs eljárások során használt CHIRplus LM szoftvertől elszakadva, Matlab-környezetben [15], saját scriptek segítségével bemutatom a megállapodás alapján történő térerősségszámítási eljárások menetét, valamint ezek felhasználásával javaslatot teszek a számítási és koordinációs módszer javításának lehetőségeire a földi mozgószolgálat vonatkozásában.

5.1. Az eljárás javíthatóságának alapgondolata

A HCM megállapodás megkötése, valamint a számítási módszerek kidolgozása során a megállapodáson dolgozó munkacsoportok és az országok igazgatásai arra törekedtek, hogy az eljárási menetrend, valamint a számítási módszer összehangolt, de ugyanakkor a lehető legegyszerűbb is legyen. Az egyszerűség nagy előnye, hogy a HCM-szubrutin megírása és használata könnyebb, de érdemes szem előtt tartani azt a tényt is, hogy az leegyszerűsített számítási eljárások nem segítik elő minden tekintetben a spektrum hatékony felhasználását.

A mozgó szolgálatok jellemzője, hogy összeköttetéseinek legalább egyik végpontja mozog, vagy előre meg nem határozható helyen tartózkodik [19]. Ahogyan azt már az előző fejezetekben bemutattam, a mobil állomásokkal végzett szimulációs eljárások két szabadságfokúak: nem csak a határpontot, hanem az állomás helyzetét is meg kell határozni a számítások során. Amennyiben ragaszkodunk a megállapodás szövegéhez, úgy a mozgó állomásokat mindig a működési körterület peremének azon pontjára kell helyezni, amely a határvonalhoz leközelebb található. A szimuláció vonatkozásában felmerül a kérdés, hogy – bár valóban ez a legrosszabb eset a zavarás szempontjából a térerősségszintek tekintetében – az egyetlen pontra történő számítás mennyiben segíti a spektrum effektív felhasználását. A konkrét esetben előfordul-e egyáltalán, hogy a mozgó állomás érinti azt a pontot, amelyre számolunk? És ha igen, milyen *valószínűséggel*? Biztos, hogy körrel célszerű leírni az állomások megtalálási körzetét?

Munkám során kísérletet tettem arra, hogy Matlab-környezetben úgy valósítsam meg a HCM megállapodás által előírt számítási módszereket, hogy azokat a mozgó állomások sztochasztikus jellemzőinek bevonásával, a valószínűségszámítás és ma-

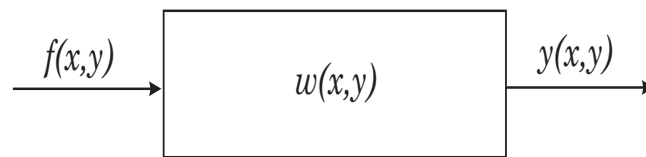
tematikai statisztika eszköztárával egészítsem ki, így szakadva el a megállapodás *worst case* szimulációs módszerétől. A bővített, bonyolultabb szimulációs eljárással – feltételezésem szerint – hatékonyabb spektrumkihasználást lehet elérni, hiszen amennyiben a vizsgált mozgó állomás csak igen kis valószínűséggel tartózkodik a legnagyobb zavaró térerősségszinthez tartozó ponton, akkor nem kizárt, hogy a kijelöléshez az érintett igazgatás úgy is hozzájárulhat, hogy egyébként – az aktuálisan érvényes megállapodás szerint – el kellene azt utasítani.

5.2. Topográfia generálása

A CHIRplus LM a szimulációkhoz szükséges topográfiai adatokat hosszúsági- és szélességi fokok raszteréhez rendelt terepmagassági adatok segítségével írja le. Ez az úgynevezett klasszikus földrajzi koordináta-rendszer, melytől első közelítésben – egy nem túl bonyolult absztrakcióval – célszerű eltérni, és a terepmagassági adatokat Descartes-féle koordináta-rendszerben leírni, definiálni. Az első feladat tehát egy terep- és térerősségszámításhoz megfelelő, fiktív, pseudovéletlen, de a valóságot jól modellező terep generálása Matlab segítségével. A problémát digitális jelfeldolgozási eszközökkel oldottam meg.

A terepmagassági adatokat egy $d = 100$ km-es négyzeten értelmeztem, melynek felosztása x és y -irányban egyaránt 100 elemű. Az x és y -koordinátákat ennek megfelelően egy 100×100 elemű kvadratikus mátrixban tároltam el ($\mathbf{X}$ és $\mathbf{Y}$), mely mátrixokhoz első közelítésben egy ugyanekkora méterű, pseudovéletlen, normális eloszlású számokkal feltöltött kvadratikus mátrixot rendeltem ($\mathbf{F}$). Ez a mátrix önmagában még alkalmatlan magassági adatok leírására, hiszen rendkívül sztochasztikus, egyenetlen. A felhasználáshoz ezt *"ki kell simítani"*, amit meg lehet tenni például egy képfeldolgozási eljárás segítségével, Gauss-szűrő használatával [16].

Tekintsük a 5.1. ábrán látható egy bemenetű, egy kimenetű, kétváltozós függvényekkel operáló, dobozzá absztrahált rendszert. Ismeretes, hogy a rendszer $w(x, y)$



5.1. ábra. Rendszeremléleti megközelítés

impulzusválaszának függvényében tetszőleges $f(x, y)$ gerjesztésre kiszámítható a $t(x, y)$ válaszjel a kétváltozós konvolúciós integrál segítségével [17]:

$$t(x, y) = f(x, y) * w(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\chi, \psi) w(x - \chi, y - \psi) d\chi d\psi. \quad (5.1)$$

A helytartománybeli konvolúciós integrál kiértékelése célszerűbb a helyfrekvenciák tartományában, hiszen ott a konvolúció művelete szorzássá egyszerűsödik. A két tartomány közötti áttérést aperiodikus esetben a kétváltozós Fourier-transzformáció biztosítja, mely általánosan a

$$F(\chi, \psi) = \mathcal{F}\{f(x, y)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi(\chi x + \psi y)} dx dy \quad (5.2)$$

formulával definiálható. A helytartománybeli inverz transzformáció a következő alakban adódik [18]:

$$f(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \{F(\chi, \psi)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\chi, \psi) e^{j2\pi(\chi x + \psi y)} d\chi d\psi. \quad (5.3)$$

Az eddigiek alapján a szimulációhoz megfelelő pszeudovéletlen topográfiai adathalmaz állítható elő, ha $\mathbf{F}$ ($f(x, y)$) kvadratikus mátrixot egy olyan Gauss-szűrővel szűrjük meg, melynek impulzusválasza

$$\mathbf{W} = w(x, y) = e^{-\left(\frac{2|x|}{c_x} + \frac{2|y|}{c_y}\right)} \quad (5.4)$$

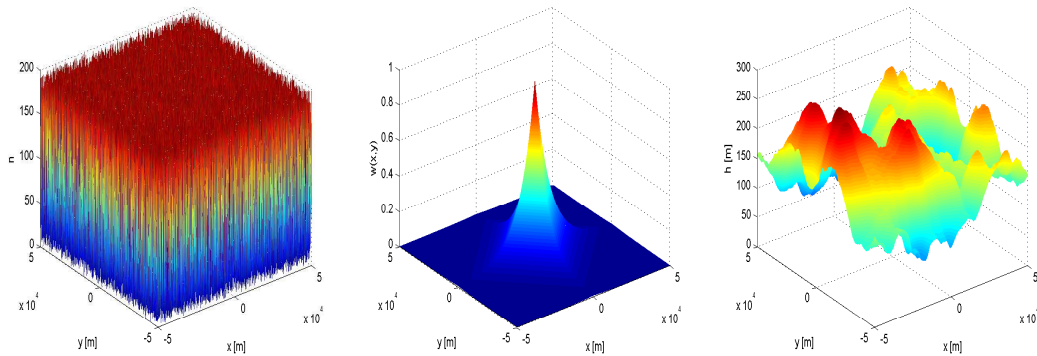
alakú, ahol c_x és c_y ún. korrelációs faktorok: minél nagyobb az értékük, az adott irányban annál gyorsabban csillapodik a rendszer impulzusválasza, annál "simább" lesz a rendszer gerjesztett válasza. A magasságértékeket reprezentáló mátrix ennek függvényében a

$$\mathbf{T}(x, y) = \frac{2d}{N\sqrt{c_x c_y}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{W}(\chi, \psi) \mathbf{F}(x - \chi, y - \psi) d\chi d\psi \quad (5.5)$$

alakban írható fel, melyenek kiértékelésére célszerű a

$$\mathbf{T}(x, y) = \frac{2d}{N\sqrt{c_x c_y}} \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} \{ \mathbf{W}(x, y) \} \mathcal{F} \{ \mathbf{F}(x, y) \} \} \quad (5.6)$$

alakot használni, ahol N a felosztás finomságát jelöli. Az így kapott mátrix még tartalmazhat negatív magasságértékeket is, ennek elkerülése érdekében a mátrix minden eleméből kivontam annak minimumát. Az eredmény a 5.2. ábrán látható.



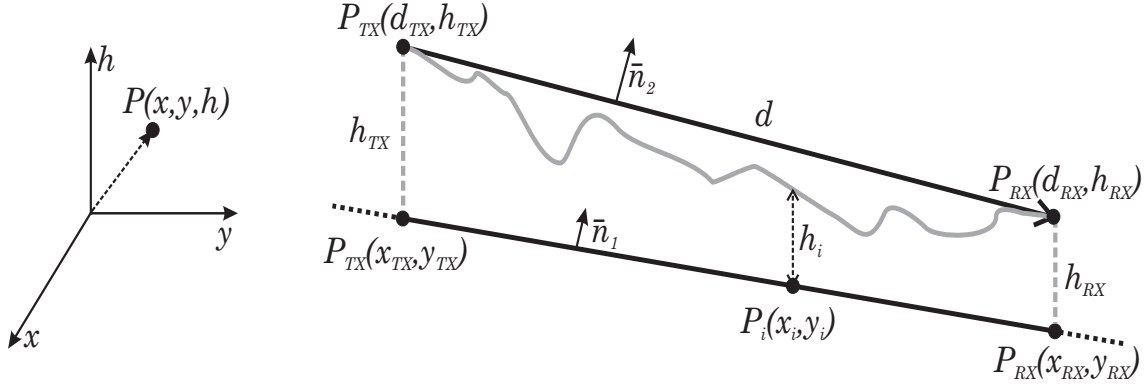
5.2. ábra. Véletlenszám-mátrix, a szűrő impulzusválasza és egy generált topográfia

5.3. Koordináták síkban és térben

A rendelkezésre álló topográfián egy tetszőlegesen kijelölt P pontot az (x, y, h) koordinátahármas ír le, ahol h az xy -sík adott pontjában értelmezett magasságérték. A matematikai szempontból kétváltozós függvényként értelmezett domborzat koordináta-rendszerében történő tájékozódás alapesetben háromkoordinátás, térbeli

alakzatleírást kívánna meg, de erre nincsen szükség, hiszen a térerősségszámításokat egyidejűleg két fix pont között szükséges elvégezni.

A rögzített pontok közötti számítás lehetővé teszi a tér helyett annak két síkmet-szetében történő értelmezést és számítást. A 5.3. ábra segít megérteni a tér leírásának a számítások során általam felhasznált módszerét. Első közelítésben meg kell



5.3. ábra. A térerősségszámítás tértartományának matematikai leírása

határozni az xy -síkon azokat a pontokat, melyek a $P_{TX}(x_{TX}, y_{TX})$ és $P_{RX}(x_{RX}, y_{RX})$ végpontok közé esnek. A két ismert pont koordinátáiból felírható az egyenes síkbeli egyenlete, melynek normálvektoros alakja az

$$n_{1x}x + n_{1y}y = n_{1x}x_{TX} + n_{1y}y_{TX} \quad (5.7)$$

formulával írható fel [20], ahol

$$\vec{n}_1 = [n_{1x}, n_{1y}] = [(y_{TX} - y_{RX}), (-x_{TX} + x_{RX})]. \quad (5.8)$$

Az összefüggésben az egyik változó (például az x) szabadon megválasztható a topográfia értelmezési tartományán belül, a másik (y) pedig az egyenlet alapján számítható:

$$y = \frac{n_{1x}x_{TX} + n_{1y}y_{TX} - n_{1x}x}{n_{1y}}. \quad (5.9)$$

Fontos megjegyezni, hogy az így felírt összefüggés az egyenest teljes hosszában leírja, így ezt a halmazt le kell szűkíteni azokra a pontokra, melyek P_{TX} és P_{RX} között találhatók, tehát P_{TX} -től mért távolságuk nem nagyobb, mint P_{RX} ugyanonnan mért távolsága, és nincsenek távolabb P_{RX} -től, mint P_{TX} :

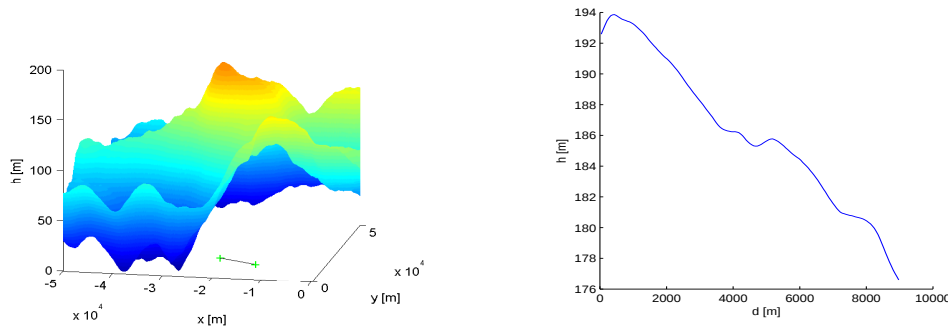
$$\begin{aligned} \sqrt{(x - x_{TX})^2 + (y - y_{TX})^2} &\leq \sqrt{(x_{RX} - x_{TX})^2 + (y_{RX} - y_{TX})^2} \wedge \\ &\wedge \sqrt{(x - x_{RX})^2 + (y - y_{RX})^2} \leq \sqrt{(x_{TX} - x_{RX})^2 + (y_{TX} - y_{RX})^2}. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Az így meghatározott pontok koordinátái és a hozzájuk tartozó, egyik- vagy másik ponttól mért távolságok alkotják a vizsgáldás egyik síkját. A szimuláció során szükség van a két pont közötti távolság függvényében felvett magasságértékekre is, amely a vizsgáldás másik, az előzőre merőleges síkját jelenti. A magasságértékek felvehetők a P_{TX} , valamint a P_{RX} ponttól mért távolságok alapján, attól függően, hogy az adott számítási eljárás melyiket kívánja meg. A távolság meghatározása

diszkrét pontokból álló szakasz esetén visszavezethető két pont távolságának összefüggésére. A szakasz egy adott $P_i(x_i, y_i)$ pontjának $P_{TX}(x_{TX}, y_{RX})$ ponttól mért d_i távolsága:

$$d_i = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = \sqrt{(x_i - x_{TX})^2 + (y_i - y_{TX})^2}. \quad (5.11)$$

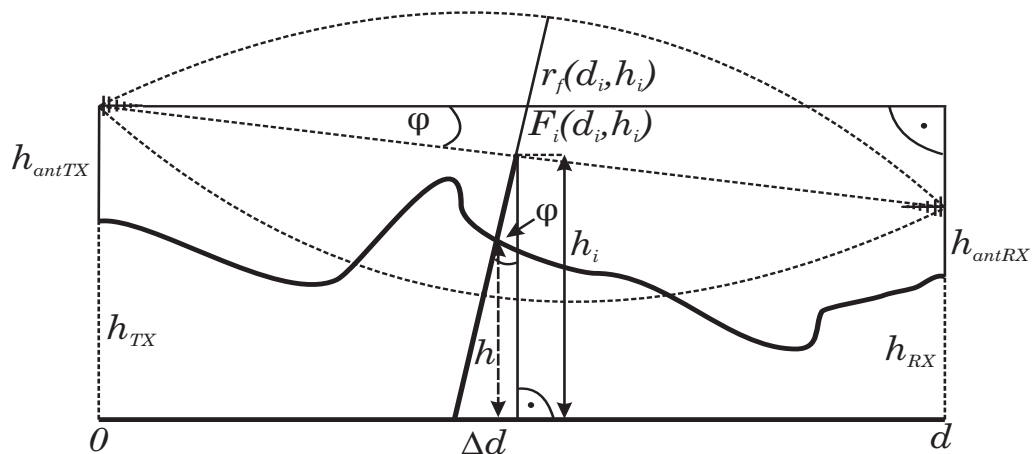
A d_i távolsághoz tartozó h_i magasságérték a **Matlab interp2** függvényének segítségével meghatározható a generált topográfiából, az adott pont koordinátáinak ismeretében.



5.4. ábra. A két végpont, a távolság és a magasság értelmezése

5.4. Az elsőrendű Fresnel-zóna

Mint minden rádióösszeköttetés vizsgálata során, a földi mozgószolgalat esetében is első közelítésben azt kell megvizsgálni, hogy az adó és a vevő között biztosított-e az optikai hullámterjedési útvonal. Optikai az útvonal, ha a két pont között definiált elsőrendű Fresnel-zónában nem található semmilyen terepakadály [14]. Ebben az esetben a szabadtéri hullámterjedés feltételei érvényesek. Amennyiben ez a feltétel



5.5. ábra. Az elsőrendű Fresnel-zóna meghatározása

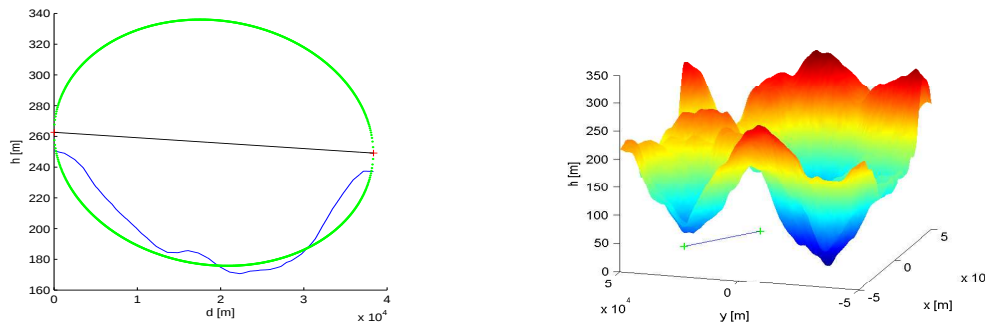
nem áll fenn – tehát az adó és a vételi pont között terepegyenetlenségek, terepakadályok találhatók, melyek miatt az elsőrendű Fresnel-zóna tisztasága nem biztosítható –, úgy a szabadtéri hullámterjedés törvényei nem használhatók. A szimuláció során

tehát meg kell határozni az elsőrendű Fresnel-zónát, és annak segítségével el kell dönteni, hogy optikai-e az összeköttetés. A meghatározás menete az 5.5. ábrán követhető nyomon.

Definíció szerint az elsőrendű Fresnel-zónát definiáló ellipszoid (kétdimenziós metszetében ellipszis) kistengelyének helyfüggését az

$$r_f(d_i) = 1,73 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{d_i(d - d_i)}{fd}} \quad (5.12)$$

formula írja le, melyben f az adó frekvenciája [21]. Az ellipszis tisztaságának meg-



5.6. ábra. Példa elsőrendű Fresnel-zóna számítására

hározásához definiálni kell az adó- és a vevőantenna terep- és antennamagassági különbségéből adódó φ szöget, amiből meghatározható a Fresnel-ellipszis nagytengelye, a magassági differencia és a két pontot összekötő egyenes alkotta derékszögű háromszögből:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{h_{TX} + h_{ant_{TX}} - h_{ant_{RX}} - h_{RX}}{d} \right). \quad (5.13)$$

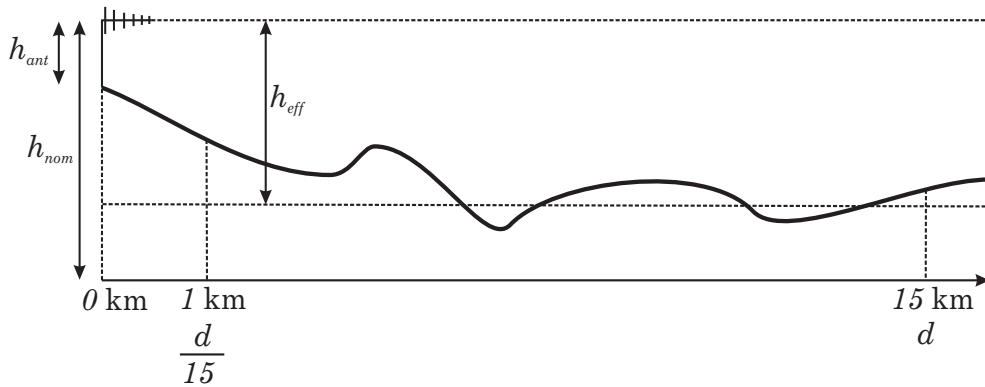
Az elsőrendű Fresnel-zóna tisztasága akkor és csak akkor biztosított, ha igaz, hogy

$$\frac{h_i}{\cos \varphi} - r_f(d_i) \geq h \quad \forall d_i \in [0, d]. \quad (5.14)$$

5.5. Effektív antennamagasság meghatározása

A rádiófrekvenciás szempontból értelmezett effektív antennamagasság az adó- és a vevőpont közötti terepegyenetlenségek következtében nem fog megegyezni az antenna fizikai magasságának számértékével, hiszen a terep jelentősen befolyásolja az elektromágneses hullámok terjedését, így azt szükségszerűen figyelembe kell venni a számítások során. Az effektív magasság meghatározását mutatja az 5.7. ábra. A $d = 0$ km-es pontban elhelyezett adóantenna névlegesen $h_{nom} = h_{terep} + h_{ant}$ magassággal rendelkezik. Az ITU ajánlása szerint [22] h_{nom} értékét az antennától mért $d_1 = 1$ km és $d_2 = 15$ km pontok között definiált terepmagasságok átlagával kell csökkenteni a következő formula szerint:

$$h_{eff} = h_{nom} - \frac{\sum_{i=0}^{140} h(d = 1000 \text{ m} + i100 \text{ m})}{141}. \quad (5.15)$$



5.7. ábra. Effektív antennamagasság meghatározása

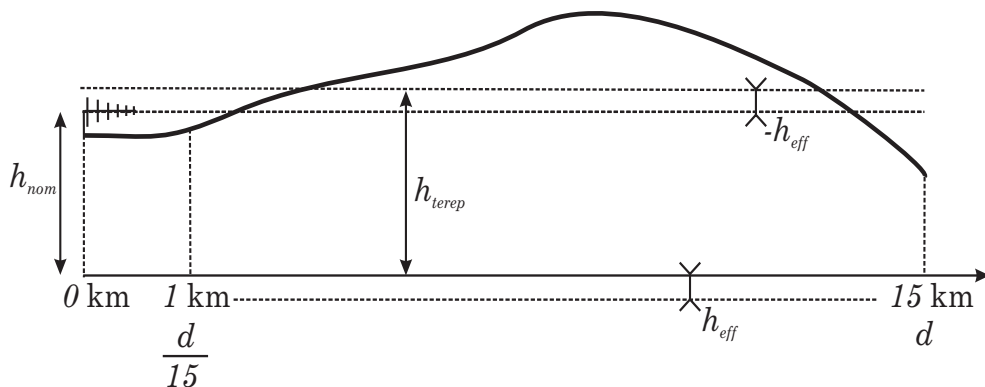
Amennyiben a vételi pont az adóantennától mért 15 km-nél kisebb távolságra (d) található, úgy (5.15) kivonandó szummájában csak azt az n tagot kell figyelembe venni, amelyre igaz, hogy

$$\frac{d}{15} \leq (d = 1000 \text{ m} + i100\text{m}) \leq d, \quad (5.16)$$

valamint a tört nevezője 141-ről n -re csökken. A definíció a vevőantennára az adó irányában mért távolságra vonatkoztatva teljesen analóg az itt leírtakkal. Az effektív antennamagasság meghatározására használt képletből adódik, hogy olyan terepviszonyok esetén, ahol

$$h_{terep} = \frac{\sum_{i=0}^{140} h(d = 1000 \text{ m} + i100\text{m})}{141} > h_{nom}, \quad (5.17)$$

ott h_{eff} szükségszerűen negatív értékűre adódik. Egy ilyen esetet mutat be az 5.8. ábra. A negatív antennamagasság egyrészt fizikailag nem értelmezhető, másrészt használata problémákat okozna a térerősségszámítás menetében, ezért mindenképpen ki kell küszöbölni. A HCM megállapodás nem közvetlenül h_{eff} értékét használja



5.8. ábra. Negatív effektív antennamagasság

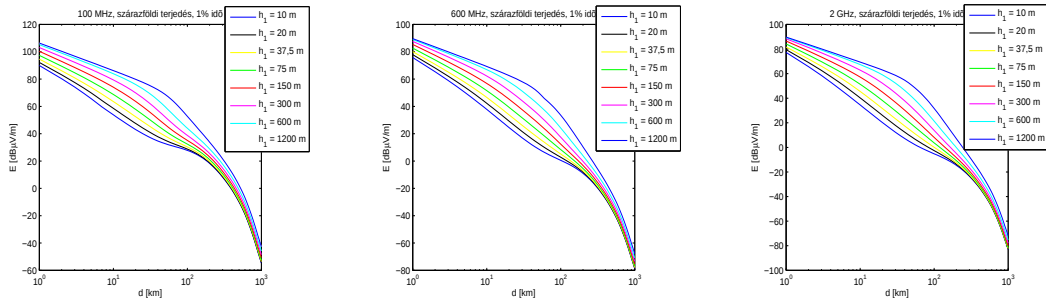
fel, hanem az adó-, valamint a vevőantenna effektív magasságának függvényében egy h_1 értéket származtat olyan módon, hogy az biztosan nemnegatív, így küszöbölve ki a formulából adódó problémákat [23].

5.6. Terjedési görbék alkalmazása

A nemzetközi frekvenciakoordináció térerősségszámítási eljárásának alapját az *ITU-R P. 1546*-os ajánlás [22] adja. Az eljárás lényege, hogy az elsőrendű Fresnel-zóna tisztaságának függvényében választja meg a térerősségszámítási módszert, első közelítésben az adó és a vevő között található síkmetszet terepviszonyainak konkrét ismerete nélkül. Amennyiben az elsőrendű Fresnel-zóna tisztasága biztosított, úgy a szabadterei hullámterjedésre érvényes térerősségszámítási eljárás használandó. Ha az adó P teljesítményt sugároz ki, úgy a tőle d kilométerre létrehozott térerősség szint értéke $\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -ben:

$$E\left[\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}\right] = 107 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}} + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P[\text{W}]}{1000 \text{ W}} \right) - 20 \cdot \log_{10} (d[\text{km}]). \quad (5.18)$$

Ha az elsőrendű Fresnel-zónában terepakadály található, akkor az összeköttetés nem tekinthető optikainak, és az ITU ajánlásában található terjedési görbéket kell alkalmazni. A terjedési görbék olyan, adott frekvenciához (100 MHz, 600 MHz, 2 GHz), adott h_1 magasságértékhez (10 m, 20 m, 37,5 m, 75 m, 150 m, 300 m, 600 m, 1200 m) és adott időbeli valószínűséghez (1 %, 10 %, 50%) tartozó görbék, melyek a térerősség távolságfüggését adják meg.

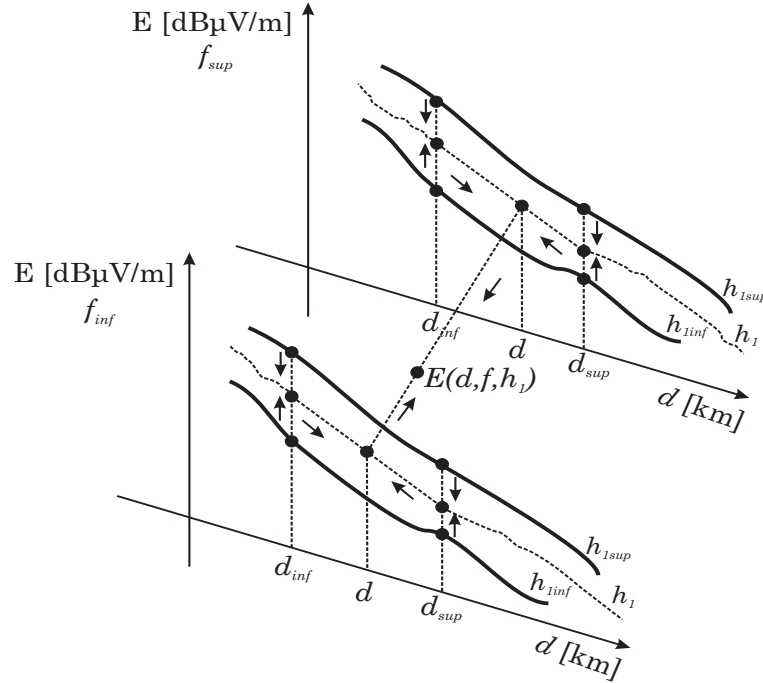


5.9. ábra. Szárazföldi terjedési görbék 1%-os időbeli valószínűség mellett

A terjedési görbék matematikai szempontból olyan négyváltozós függvényként kezelendők, melyek zárt, analitikus képlet formájában nem adhatók meg, a táblázatba foglalt, diszkrét értelmezési tartományon empirikusan meghatározott érték-készlettel rendelkeznek. A diszkrét érték-készletből következően ritka az olyan eset, amikor az adott térerősségszámításnál a terjedési görbesereg valamelyikéről a kívánt f , h_1 , d értékekhez tartozó térerősség szint leolvasható, ezért az esetek túlnyomó többségében inter- és extrapolációra van szükség (az időbeli valószínűség változója ebből a szempontból nem fontos, ugyanis a HCM megállapodás előírja, hogy mely esetekben mely idővalószínűségű görbéket kell használni).

Többváltozós függvények inter- és extrapolációjánál a kívánt függvényérték egyváltozós függvényérték-közelítések összege, szuperpozíciója alkalmazandó. A legáltalánosabb esetre az 5.10. ábra mutat szemléletes példát. Háromlépcsős közelítés alkalmazandó abban az esetben, ha sem az adott f frekvenciára nem áll rendelkezésünkre görbesereg, sem az adott h_1 értékre nem áll rendelkezésre görbe, és a vizsgálandó d távolság sem a táblázatba foglalt távolságok valamelyike. A közelítés egyaránt kezdhető f , d és h_1 változók alapján, az ábra az utóbbira mutat példát.

A közelítési algoritmus összesen négy, rendelkezésre álló terjedési görbét igényel: kettőt a vizsgálandó f frekvenciánál kisebb, a hozzá legközelebb eső rendelkezésre álló frekvenciasíkon (f_{inf}), kettőt az f -nél nagyobb névleges frekvenciasíkon (f_{sup}). Abban az esetben, ha $f < 100$ MHz, $f_{sup} = 100$ MHz és $f_{inf} = 600$ MHz választással



5.10. ábra. Térerősség interpolálása a terjedési görbék segítségével

kell élni, valamint ha $f > 2$ GHz, akkor $f_{sup} = 600$ MHz és $f_{inf} = 2$ GHz. A két-két görbe a vizsgált h_1 értékénél kisebb (h_{1inf}), valamint annál nagyobb (h_{1sup}) magasságértékek tartozik. A közelítést mindkét frekvenciasíkon d_{sup} és d_{inf} pontokban kell elvégezni az

$$E = E(h_{1inf}) + \frac{(E(h_{1sup}) - E(h_{1inf})) \log_{10} \left(\frac{h_1}{h_{1inf}} \right)}{\log_{10} \left(\frac{h_{1sup}}{h_{1inf}} \right)} \quad (5.19)$$

összefüggés alapján, amennyiben $10 \text{ m} \leq h_1 \leq 3000 \text{ m}$. A $0 \text{ m} \leq h_1 < 10 \text{ m}$ esetének kezelése a sima földfelszín mellett értelmezett látóhatár-távolságra alapozódik, melynek összefüggése [14]:

$$d_h(h_1)^{[\text{km}]} = 4,1 \sqrt{h_1^{[\text{m}]}}. \quad (5.20)$$

A térerősség d_{sup} és d_{inf} pontokban, mindkét frekvenciasíkon a következő formulával közelíthető:

$$\begin{aligned} E &= E(h_1 = 10 \text{ m}, d_h = 4,1 \sqrt{10 \text{ m}}) + E(h_1 = 10 \text{ m}, d) - \\ &- E(h_1 = 10 \text{ m}, d_h = 4,1 \sqrt{h_1}) \quad d < d_h(h_1) \\ E &= E(h_1 = 10 \text{ m}, (d_h = 4,1 \sqrt{10 \text{ m}} + d - d_h = 4,1 \sqrt{h_1})) \quad d \geq d_h(h_1). \end{aligned} \quad (5.21)$$

Az így végrehajtott közelítés alapján a kezdetben a névleges távolságok által kimetszett nyolc pont négyre, görbeseregenként kettőre redukálódik. A következő lépés a d távolság szerinti inter- vagy extrapoláció. Az összefüggés az

$$E = E(d_{inf}) + \frac{(E(d_{sup}) - E(d_{inf})) \log_{10} \left(\frac{d}{d_{inf}} \right)}{\log_{10} \left(\frac{d_{sup}}{d_{inf}} \right)} \quad (5.22)$$

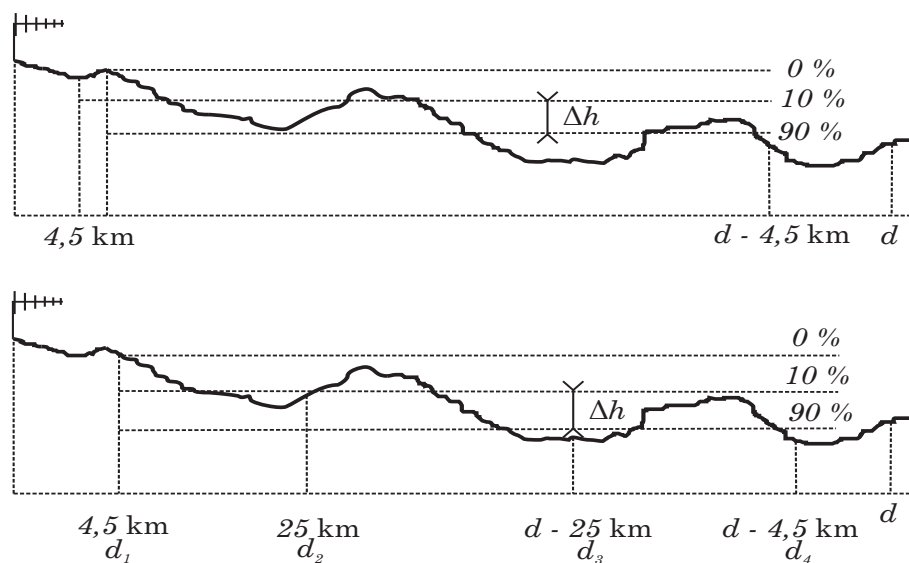
alakban adódik, mely a rendelkezésre álló négy függvénytípust kettőre, frekvenciánként egyre redukálja. A végső térerősségszint f -szerinti közelítéssel számítható:

$$E = E(f_{inf}) + \frac{(E(f_{sup}) - E(f_{inf})) \log_{10} \left(\frac{f}{f_{inf}} \right)}{\log_{10} \left(\frac{f_{sup}}{f_{inf}} \right)}. \quad (5.23)$$

Abban az esetben, ha a térerősség függvényének változói közül egy vagy több pontosan a táblázat szerinti értékre adódik, úgy az interpolációs lépések száma csökken, az eljárás egyszerűsödik, az ilyen esetek az itt leírtakkal teljes analóg módon kezelendők. A Matlab-script írása során nyolc különböző interpolációs esetet különböztettem meg egymástól (3 változó, $2^3 = 8$ lehetőség, 8 if-ág).

5.7. Terepegyenetlenség meghatározása

A terjedési görbék által a vételi pontban meghatározott térerősségszintet a terepviszonyok figyelembevételével, meghatározott módszerek és függvények szerint korrigálni szükséges. Szárazföldi hullámterjedés esetén az 5.11. ábrán látható módon definiálható egy Δh terepegyenetlenségi tényező, melynek függvényében a terjedési görbékből történő inter- vagy extrapolációval kapott térerősségszintet a HCM megállapodás [24] szerint csökkenteni kell. Amennyiben vételi pont és az adóantenna



5.11. ábra. Terepegyenetlenség (Δh) meghatározása

távolsága 10 km-nél kisebb, úgy Δh hatását nem kell figyelembe venni. Ha ez a d

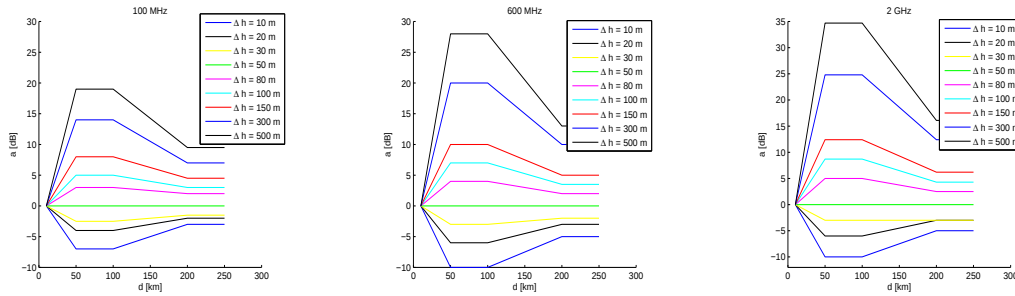
távolság legalább 10 km és legfeljebb 50 km, akkor a terepegyenetlenség a felső ábra alapján a

$$\Delta h = \left| 0,1 \cdot \max_d (h(d)) - 0,9 \cdot \max_d (h(d)) \right| \quad d \in [4, 5 \text{ km}, d - 4, 5 \text{ km}] \quad (5.24)$$

képlettel számítható. Ha d 50 km-nél nagyobb, úgy az alsó ábra alapján a

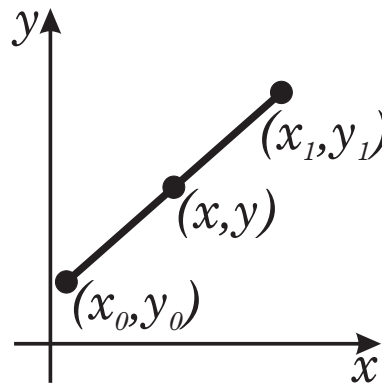
$$\Delta h = \left| 0,1 \cdot \max_d (h(d)) - 0,9 \cdot \max_d (h(d)) \right| \quad d \in [0, d] \setminus [0, d_1] \cup [d_2, d_3] \cup [d_4, d] \quad (5.25)$$

formulával írható fel. Az így meghatározható Δh érték, valamint a frekvencia és a távolság ismeretében a terepegyenetlenségből adódó korrekciós tényezőt (csillapítás) az 5.12. ábrán látható görbék segítségével lehet meghatározni. A görbesereg a terjedési görbékhez hasonlóan a megadott három frekvencia (100 MHz, 600 MHz, 2 GHz) alapján síkokra, a terepegyenetlenség alapján a síkokon értelmezett görbékre, a távolság alapján pedig a görbéken értelmezett pontokra bomlik. Mivel a függvényanalízis szempontjából az így értelmezett csillapítás egy háromváltozós, diszkrét értelmezési tartománnyal és diszkrét értékkészlettel rendelkező függvény, a számítások során inter- és extrapolációra lehet szükség.



5.12. ábra. A felhasznált csillapítási görbék

A csillapítás adott $(d, \Delta h, f)$ -ponthoz tartozó értékének közelítését az ismert függvénypontok alapján a terjedési görbékkel kapcsolatosan leírt lineáris interpolációs módszer segítségével végeztem el. Mivel a megállapodás szövege kizárólag a



5.13. ábra. Lineáris interpoláció

frekvencia szerinti közelítést írja elő logaritmikus formulával, ezért a másik két változót a klasszikus összefüggés szerint végeztem el. Lineáris függvényt feltételezve

ismeretes, hogy annak deriváltja konstans, ezért az 5.13. ábra alapján

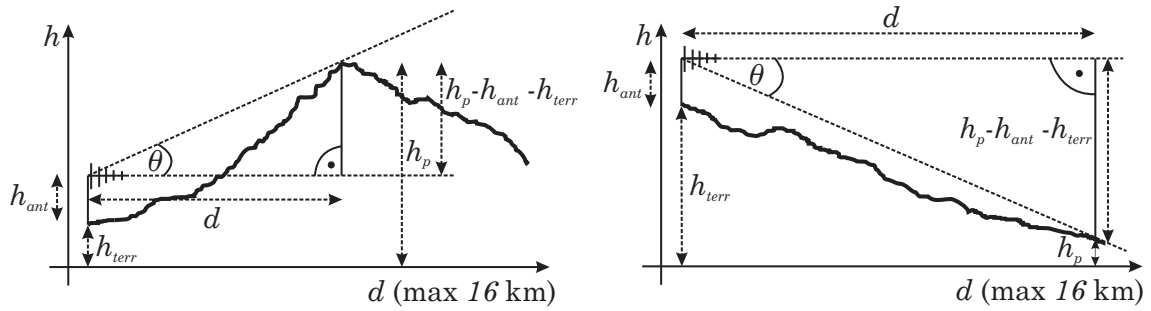
$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{y - y_0}{x - x_0} = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (5.26)$$

írható fel. Az összefüggést átrendezve adódik a logaritmikus összefüggéssel teljesen analóg kifejezés [20]:

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} (x - x_0). \quad (5.27)$$

5.8. Tereptisztasági szög meghatározása

A terjedési görbék alapján meghatározott térerősségszintet az 5.14. ábrán látható módon számítható ún. tereptisztasági szögből származtatható csillapítási tényezővel is korrigálni kell. A terepviszonyoktól függően kétféle eset különböztethető meg: θ értéke pozitív, ha a terep az antennától mért legfeljebb 16 km távolságban emelkedik, és θ negatív, ha a terep ugyanezen távolságon lejt.

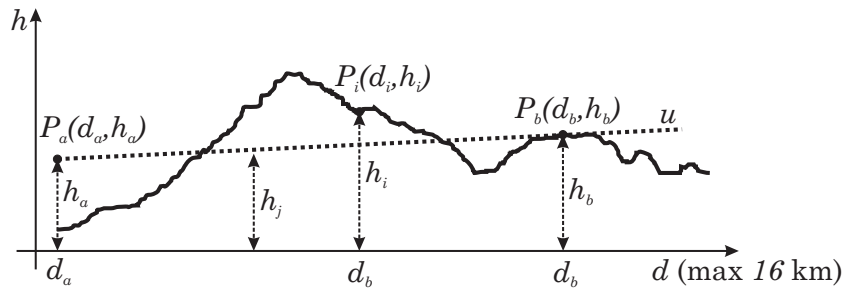


5.14. ábra. Pozitív és negatív tereptisztasági szög meghatározása

A tereptisztasági szög mindkét esetben meghatározható a

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{h_p - h_{ant} - h_{terr}}{d} \right) \quad (5.28)$$

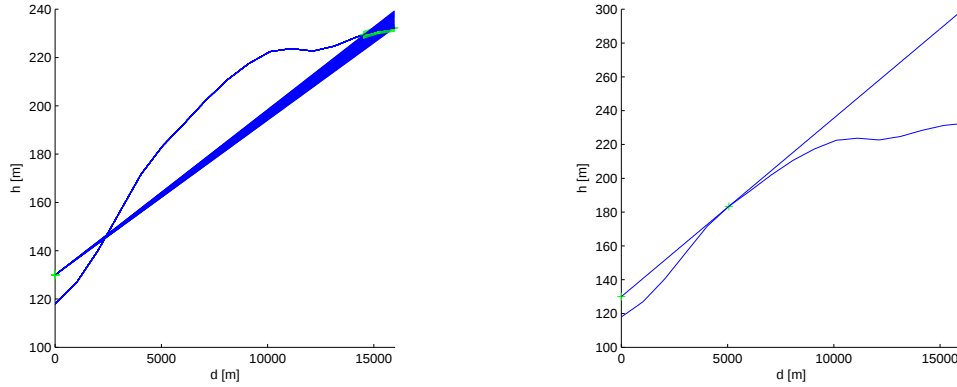
formulával, hiszen az inverz tangens páratlan függvény. A tereptisztasági szög meghatározásának Matlab-script formájában történő implementációjában nem a szög konkrét értékének meghatározása okoz nehézséget, hanem annak az antennát a terep egy adott pontjával összekötő egyenesnek a megtalálása, melyből θ számítható. A módszerre az 5.15. ábra mutat szemléletes példát. Az antenna magassági pontját



5.15. ábra. A tereptisztasági szög egyenesének megkeresése

$(P_a(d_a, h_a))$ a terep azon $P_b(d_b, h_b)$ pontjával összekötő egyenes megkeresése a cél a tereptisztasági szög meghatározásához, melyre igaz, hogy

$$h_i \leq h_j \quad \forall h_j \in u, \quad \forall h_i \in [h(d_a), h(d_{max} = 16 \text{ km})]. \quad (5.29)$$



5.16. ábra. A keresési algoritmus és a feltételeket teljesítő egyenes

A tereptisztasági szög korrekciós tényezője frekvenciafüggő adat, analitikus formában a terjedési görbék, valamint a terepegyenetlenségi csillapításának megadásánál használt három frekvenciaértéken adott. Amennyiben $f = 100 \text{ MHz}$, úgy értéke a

$$C = 9,1 - \left[6,9 + 20 \log_{10} \left(\sqrt{(37,2\theta - 0,1)^2 + 1} + 37,2\theta - 0,1 \right) \right], \quad (5.30)$$

$f = 600 \text{ MHz}$ esetén a

$$C = 13,1 - \left[6,9 + 20 \log_{10} \left(\sqrt{(91,2\theta - 0,1)^2 + 1} + 91,2\theta - 0,1 \right) \right], \quad (5.31)$$

továbbá ha $f = 2 \text{ GHz}$, akkor a

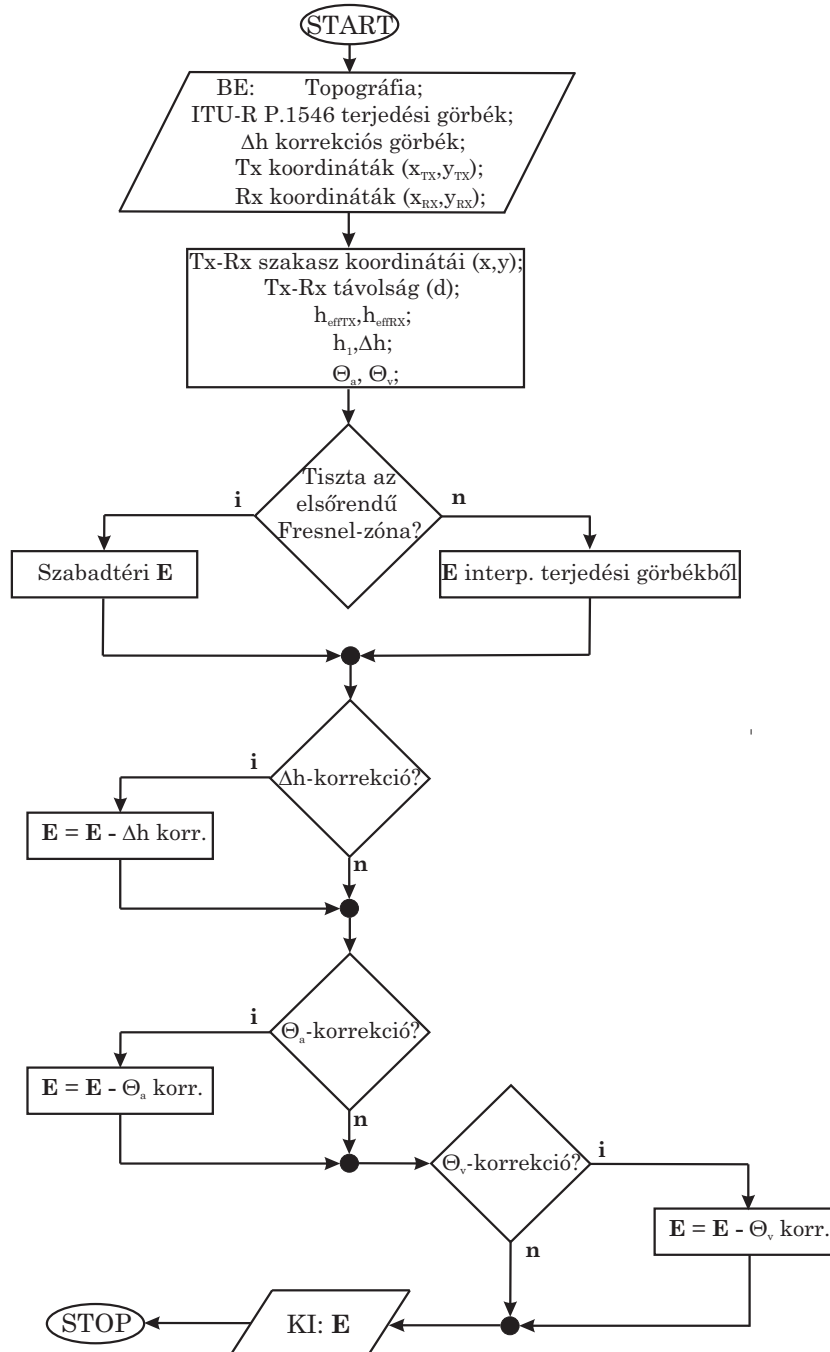
$$C = 17,3 - \left[6,9 + 20 \log_{10} \left(\sqrt{(167\theta - 0,1)^2 + 1} + 167\theta - 0,1 \right) \right], \quad (5.32)$$

összefüggés alapján számítható, minden egyéb frekvencián a már ismertetett lineáris interpoláció használandó. Amennyiben a távolság 16 km-nél kisebb, úgy a formulák alapján kapott érték $\frac{d^{[km]}}{16 \text{ km}}$ -szeresét kell használni.

5.9. A térerősségszámítási algoritmus

A Matlab-script formájában implementált térerősségszámítási algoritmust az 5.17. ábra mutatja. A pont-pont számítási rutin bemenete a topográfia, a terjedési görbék és terepegyenetlenséghez tartozó korrekciós görbék, továbbá az adó- és a vevőpont koordinátái, mely bemenetekből az algoritmus távolságot, magasságot, terepegyenetlenséget és tereptisztasági szöget számol, majd az elsőrendű Fresnel-zóna

megvizsgálása után dönt arról, hogy az alap térerősségszintet a szabadtéri terjedés összefüggéséből, vagy a terjedési görbékkel határozza meg. Az így kiszámított térerősségszintet az algoritmus a HCM megállapodásnak megfelelően, az adott esetet megvizsgálva a megfelelő korrekciós tényezőkkel korrigálja, egyetlen térerősségszint-értéket adva kimenetként.



5.17. ábra. A térerősségszámítás folyamatábrája

5.10. Mozgó állomások helyzetének statisztikai leírása

A földi mozgószolgálat mobil állomásainak koordinálása során alkalmazott térerősségszámítási eljárás a fix állomások esetétől lényegesen eltérő, komplexebb, hiszen nem lehet egzakt módon megmondani, hogy az adott kijelölés a tér melyik pontjában tartózkodik. A jelenleg érvényes HCM megállapodás a mobil állomások során használt térerősségmeghatározási algoritmust az állomás – a lehető legegyszerűbb módon, egy körrel közelített mozgáskörzetének – egy adott pontján történő rögzítésével egyetlen számításra szimplifikálja. Ennek előnye a gyorsaság és az egyszerűség, de nem segíti elő minden tekintetben a frekvenciák nemzetközi egyeztetésének célját, a korlátos erőforrásként definiált rádiófrekvenciás spektrum gazdaságos felhasználását.

A jelenlegi gyakorlattól elszakadva a mozgáskörzet leírásának pontosabb, valószínűbb modellje alkotható meg a valószínűségi számítás és a matematikai statisztika eszköztárának felhasználásával. Mivel a mobil kijelölések mozgása véletlenszerű, sztochasztikus folyamat, célszerű a tartózkodási valószínűséget vagy empirikus, képletek formájában nem meghatározható módon, vagy analitikus, nevezetes eloszlásfüggvénnyel leírni. Az eloszlásfüggvény definiálása a tartózkodási pontok koordinátáinak síkján történik, ezért a módszer a többváltozós, együttes eloszlások matematikájának ismeretét és használatát kívánja meg.

A leíráshoz definiálni kell két valószínűségi változót: legyen ξ az állomás x -irányú tartózkodási helyzete a síkon, míg η jelölje az y -irányú pozíciót. A valószínűségi változók együttes eloszlása az a kétváltozós $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}_0^+$ függvény, melyre igaz, hogy

$$F(x, y) = P(\xi < x, \eta < y) \quad (x, y \in \mathbb{R}). \quad (5.33)$$

Az eloszlásfüggvény mindkét változójában növekedő és balról folytonos [25]. Előfordulhat, hogy az állomás x -irányú mozgása független az y -irányútól, ebben az esetben ξ és η független valószínűségi változók, együttes eloszlásfüggvényük a két eloszlásfüggvény szorzata: $P(\xi < x, \eta < y) = P(\xi < x) P(\eta < y) \rightarrow F(x, y) = F_\xi(x) F_\eta(y)$. Együttes sűrűségfüggvénynek nevezzük azt az $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}_0^2$ függvényt, melyre

$$F(x, y) = \int_{-\infty}^x \int_{-\infty}^y f(u, v) \, dv du \rightarrow \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} F(x, y) = f(x, y) \quad (5.34)$$

igaz. Az együttes sűrűségfüggvény tulajdonsága, hogy

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \, dy dx = 1. \quad (5.35)$$

A legegyszerűbb eset, amikor a ξ és η , tehát az állomás x és y -irányú mozgása egymástól független, ekkor az együttes eloszlás a két eloszlás szorzatára faktorizál. A gyakoribb és általánosabb eset, hogy a két valószínűségi változó nem kezelhető egymástól függetlenül. Ekkor az egymástól való függőségüket le kell írni, erre szolgál a kovariancia és a korrelációs együttható [20]. Kovarianciának hívjuk a

$$\text{Cov}(\xi, \eta) = M((\xi - M(\xi))(\eta - M(\eta))) \quad (5.36)$$

várható értéket. Zérus a kovariancia, ha ξ és η függetlenek. A kovariancia és a valószínűségi változók $\sigma(\xi)$ és $\sigma(\eta)$ szórásainak segítségével definiálható a korrelációs együttható:

$$r = \frac{\text{Cov}(\xi, \eta)}{\sigma(\xi) \sigma(\eta)} \quad r \in [-1, 1]. \quad (5.37)$$

Első közelítésben kézenfekvőnek tűnik, hogy a mobil állomások tartózkodási helyét a síkon klasszikus normális eloszlással közelítsük. Azt mondjuk, hogy $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ valószínűségi változók együttes eloszlása normális, ha sűrűségfüggvényük

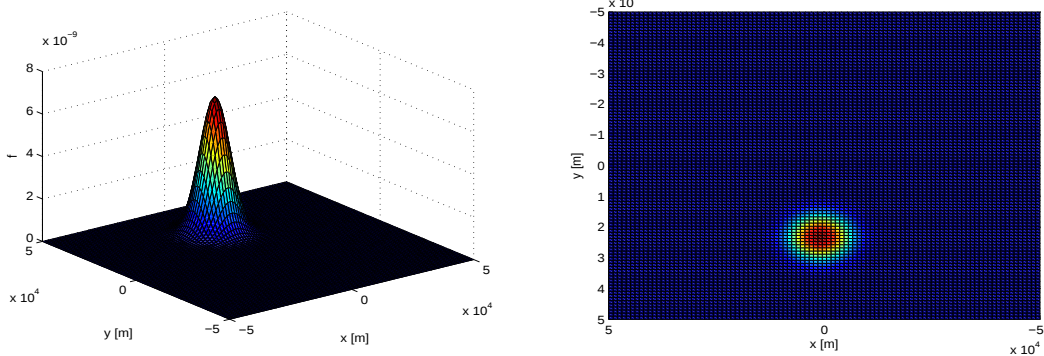
$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt{\frac{|\mathbf{B}|}{(2\pi)^n}} \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} (x_i - m_i) (x_j - m_j)\right) \quad (5.38)$$

alakú, ahol m_i ξ_i várható értéke, $\mathbf{B}$ pedig a $c_{ij} = \text{Cov}(\xi_i, \xi_j)$ alakú $\mathbf{C}$ kovarianciamátrix inverze. Kétváltozós esetben ez az összefüggés lényegesen leegyszerűsödik:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-r^2}} \exp\left(-\frac{1}{2(1-r^2)} \left[\frac{(x-m_1)^2}{\sigma_1^2} - 2r \frac{x-m_1}{\sigma_1} \frac{y-m_2}{\sigma_2} + \frac{(y-m_2)^2}{\sigma_2^2} \right]\right) \quad (5.39)$$

Bár a korrelálatlanság ($r = 0$) általánosan nem vonja maga után a valószínűségi változók függetlenségét, érdemes megfigyelni, hogy az összefüggés zérus korrelációs együttható esetén két, egy x -től és egy y -től függő tag szorzatára egyszerűsödik, tehát ebben az esetben a két valószínűségi változó független:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \exp\left(-\frac{1}{2} \left[\frac{(x-m_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y-m_2)^2}{\sigma_2^2} \right]\right). \quad (5.40)$$

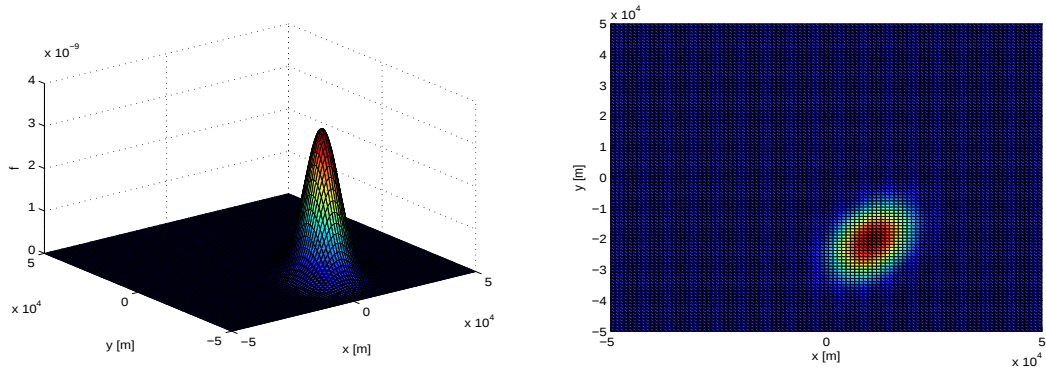


5.18. ábra. $m_1 = 505,1 \text{ m}$, $m_2 = 2,374 \cdot 10^2 \text{ m}$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 5000 \text{ m}$, $r = 0$

Az 5.18. és 5.19. ábrák szemléltetik a sűrűségfüggvény matematikai paramétereinek fizikai jelentéstartalmát. Látható, hogy a kétváltozós normál eloszlás várható értékei azt az (x, y) pontot definiálják, ahol az állomás a legnagyobb valószínűséggel tartózkodik, míg a két σ , valamint a korrelációs együttható értékével beállítható,

hogy milyen széles legyen a működési terület, továbbá milyen alakú, milyen jellegű legyen.

Az így leírt, meghatározott működési terület egyrészt formailag sokkal rugalmasabb, mint a körrel történő közelítés, például a határmenti kijelölések esetén sokkal jobban igazodik az adott mobil állomás tényleges működési területéhez, így szüntette meg azt a CHIRplus LM-ben is jelentkező problémát, hogy a nyilvánvalóan hamis cross-border működési területek miatt a szimuláció hibás térerősségeredményt ad. A pontosabb területleíráson túl a módszer segítségével lehetőség nyílik az egy-



5.19. ábra. $m_1 = 1 \cdot 10^4$, $m_2 = -2 \cdot 10^4$ m, $\sigma_1 = 6200$ m, $\sigma_2 = 8100$ m, $r = 0,35$

szerű, pont-pont alapú számítás kiterjesztésére a függvény tartományán belül, a kiszámított térerősségértékek eloszlás szerinti figyelembevételével, súlyozásával, mely módszer a tartózkodási valószínűség figyelembevételével precízebb információt ad az állomás által létrehozott térerősségviszonyokról, ezzel segítve a hatékonyabb spektrumgazdálkodást.

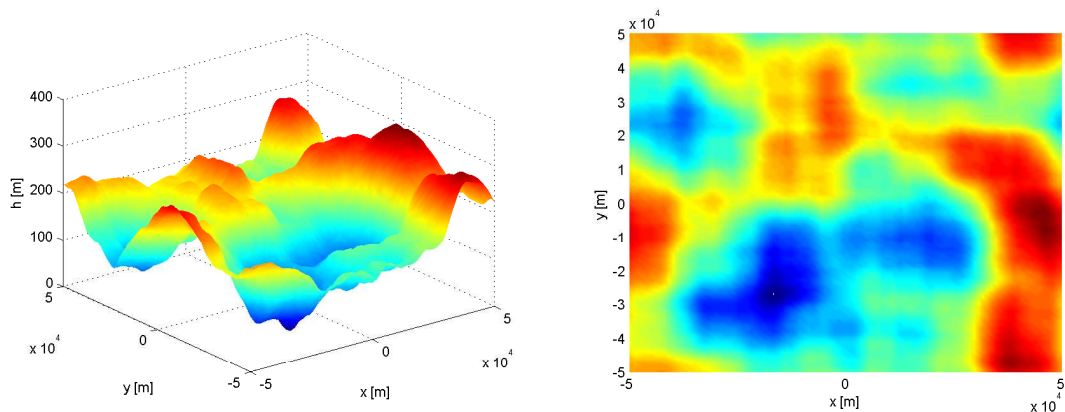
6. fejezet

Az implementált számítási módszer alkalmazása a gyakorlatban

Ebben a fejezetben bemutatom az előzőekben ismertett módon megvalósított HCM algoritmus új, a jelenlegi gyakorlattól eltérő módszerrel leírt működési területet használó, kibővített változatának működését a gyakorlati felhasználás során, konkrét, szemléletes példákon keresztül, fiktív és valós topográfia alkalmazásával. Az eredmények alapján levonom a következtetéseket a számítási módszer alkalmazásának szükségességével, előnyeivel és hátrányaival kapcsolatban, továbbá bemutatom, hogy az új módszer miként segíti a gazdaságosabb spektrumkihasználást, és miben nyújt többet, mint a jelenleg alkalmazott számítási eljárás.

6.1. Duplex bázis-mobil összeköttetés fiktív topográfián

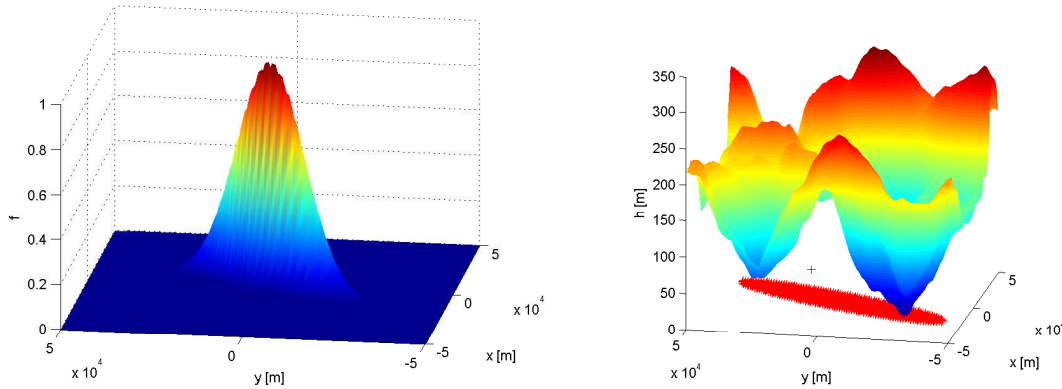
Legyen adott egy, a 6.1. ábrán látható fiktív topográfia, melynek átlagos magassága $h_{avg} = 161,9063$ m, továbbá $h_{max} = 307,66$ m és $h_{min} = 0$ m. A szimuláció során



6.1. ábra. A vizsgált topográfia

ebben a környezetben helyeztem el egy fix helyű bázisállomást és egy adott területen szabadon mozgó mobil állomást, így vizsgálva meg ennek a duplex rádióösszeköttetésnek a térerősségviszonyait a javított, HCM-alapú számítási algoritmust megvaló-

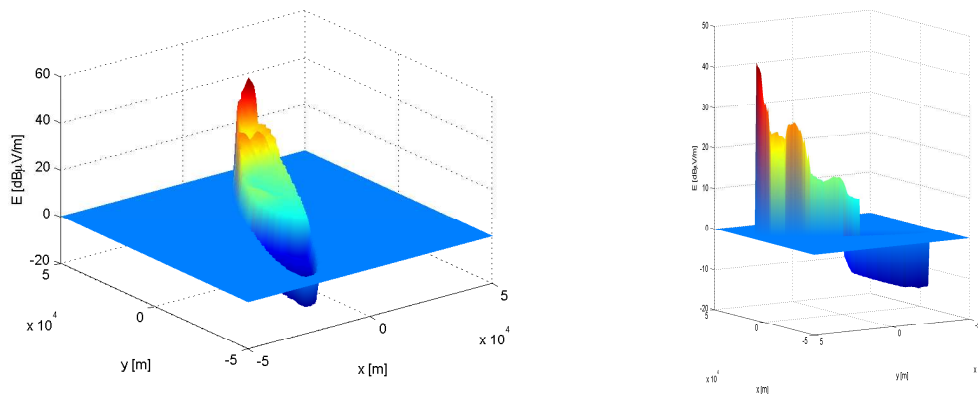
sító **Matlab**-script segítségével. Az $x, y \in [-5 \cdot 10^4 \text{ m}, 5 \cdot 10^4 \text{ m}]$ értelmezési tartományú Descartes-féle koordináta-rendszerben a bázisállomást a $P_b(3, 99 \cdot 10^4, 1, 97 \cdot 10^4)$ koordinátájú, $h_b = 220, 9489 \text{ m}$ magasságú pontban helyeztem el, míg a mobil állomás helyét egy $m_1 = m_2 = 0, \sigma_1 = 5000, \sigma_2 = 10000, r = 0, 5$ paraméterekkel rendelkező, normális eloszlással modellezett működési területen értelmeztem.



6.2. ábra. A mobil állomás sűrűségfüggvénye és a bázis-mobil pontok a topográfián

Első közelítésben a duplex összeköttetés mobil adás – bázis vétel esetét (*uplink*) vizsgáltam meg, $f = 450 \text{ MHz}$ adási frekvenciával, $P = 20 \text{ W}$ kisugárzott teljesítménnyel, körsugárzó antennát feltételezve. Ha alaposabban megvizsgáljuk a mobil állomás működési pontjait, a hozzájuk rendelt magasságértékeket és az adó-vevő közötti terepviszonyokat, akkor a szimuláció tényleges lefuttatása előtt le lehet vonni néhány egyszerű következtetést.

Amennyiben a normált sűrűségfüggvény nullától eltérő ($\|f(x, y)\| > 1 \cdot 10^{-4}$) pontjaiból számolunk térerősséget a függvény kvantitatív adatainak figyelmen kívül hagyásával (tehát csak az a fontos, hogy előfordulhat-e, hogy az adott pontban megtalálható az állomás, de azt nem nézzük, hogy a sűrűségfüggvény ott mekkora értéket vesz fel), azon pontoknál fog nagyobb térerősségérték adódni, melyek egyrészt közelebb vannak a bázishoz ($y > 0$), másrészt ahonnan nézve a terepegyenetlenség és az abból fakadó korrekciós tényezők a legkisebbek. Ez jól láthatóan szintén a pozitív y -értékek részsíkja. A szimulációs eredmények a 6.3. ábrán láthatók.

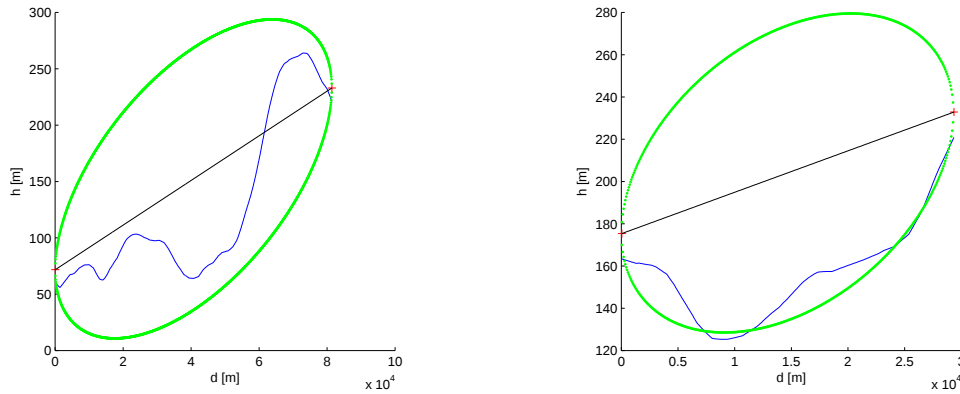


6.3. ábra. A mobil állomás működési pontjaiból számított térerősségértékek

Fontos megjegyezni, hogy az *uplink*-eset térerősségértékeinek ábrázolását az egyszerűség és az átláthatóság kedvéért úgy végeztem el, hogy az értékeket azokhoz a pontokhoz rendeltem hozzá, ahonnan a számítás elvégzése történt. Ez a módszer nyilvánvalóan kezelhetőbb eredményt ad, hiszen a fordított esetben a fix vételi pontban lenne szükséges feltüntetni a térerősségeket, ami problémás feladat.

A sűrűségfüggvényből származtatott súlyozási eljárás nélkül meghatározott térerősségértékek kvalitatíve az elvárt módon alakulnak. A mobil állomás által a fix bázisponton létrehozott térerősségszint maximális értéke $E_{max} = 42,6960 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -re adódott a $P_{max} (2,0707 \cdot 10^4, 4,1919 \cdot 10^4)$ koordinátájú, $h_{max} = 163,46$ m magaságú pontból. Innen nézve az adó-vevő távolság $d = 29,353$ km, a terepegyenletlenség $\Delta h = 138,1793$ m, a tereptisztasági szögek elhanyagolhatóan kicsik, az effektív antennamagasságok $h_{eff_{TX}} = 36,2079$ m és $h_{eff_{RX}} = 67,0210$ m értékekre adódnak ($h_{ant_{TX}} = h_{ant_{RX}} = 12$ m) és az elsőrendű Fresnel-zóna tisztasága nem biztosított.

A legkisebb létrehozott térerősségszint $E_{min} = -13,8130 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ értékűre adódik a $P_{min} (-1,6667 \cdot 10^4, -3,8889 \cdot 10^4)$ koordinátájú, $h_{min} = 59,9210$ m magaságú pontból. Ebben az esetben az adó-vevő távolság $d = 81,433$ km, a terepegyenletlenség $\Delta h = 211,2127$ m, a tereptisztasági szögek jó közelítéssel zérusra adódnak, az effektív antennamagasságok $h_{eff_{TX}} = 4,3207$ m és $h_{eff_{RX}} = -18,8286$ m értéket vesznek fel, optikai összeköttetésről ezúttal sem beszélhetünk. A maximális és a minimális ponthoz tartozó terepmetszetek a hozzájuk tartozó Fresnel-zónával a 6.4. ábrán láthatók.



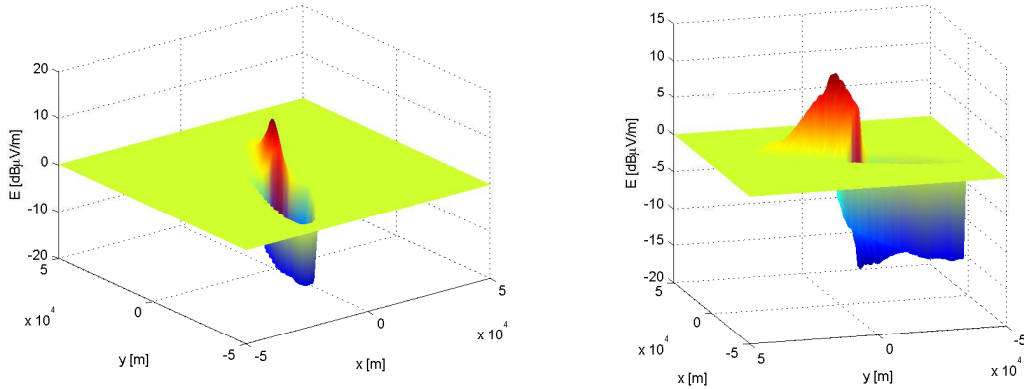
6.4. ábra. A minimális és a maximális térerősséghez tartozó terepmetszetek

Az eredmények alapján látható, hogy a vizsgált mobilállomás igen szélsőséges térerősségszinteket hoz létre attól függően, hogy éppen hol tartózkodik. A térerősségszint ingadozása miatt adódhat olyan eset, hogy a vizsgált kijelölés működési területének létezik olyan pontja, amelyből már jelentős mértékű káros zavart okoz egy másik állomásnak, ezáltal koordinációs szempontból lehet, hogy problémás lenne a kezelése.

Vegyük észre, hogy a maximális térerősségértékek a működési területnek azon a szélén adódnak, ahol az állomás már igen kis valószínűséggel tartózkodik a hozzárendelt sűrűségfüggvény alapján (az y -irányú szórás kétszerese az x -irányú értéknek). Ezt a tényezőt célszerű valamilyen formában bevonni a számítási eljárásba, hiszen fontos mérlegelési lehetőséget nyit meg az ügyintéző előtt. Mivel a sűrűségfüggvény értékei meglehetősen kicsik ($\max_{x,y} f(x,y) \approx 10^{-9}$), ezért azt nem praktikus közvet-

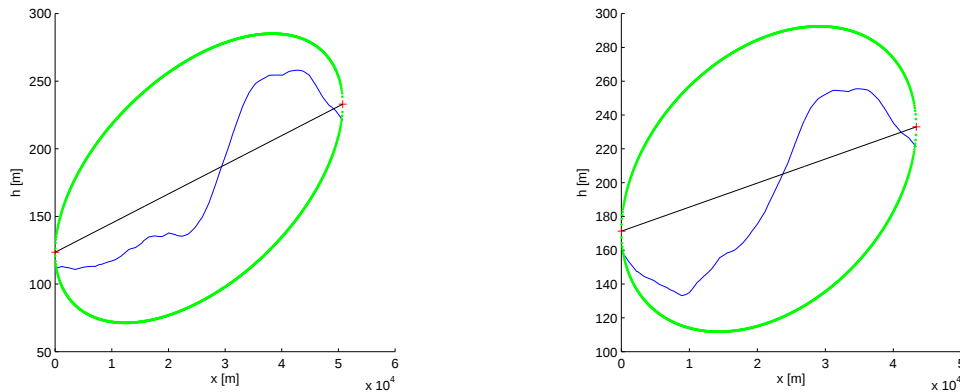
lenül az értékek súlyozására használni, helyette célszerű az értékkészlet maximumára normált függvényt alkalmazni.

A normálást két részre kell szedni, hiszen amíg a pozitív térerősségszintek egy-nél kisebb számmal történő megszorozása kisebb értékeket generál, addig a negatív térerősségszinteket ugyanezen szorzási eljárás megnöveli, így a negatív értékek esetén a súlyozott értéket hozzáadtam az eredeti térerősségszinthez, betartva az eljárás monotonitását. Az eredmények a 6.5. ábrán láthatók.



6.5. ábra. A számított térerősségszintek súlyozás után

Megfigyelhető, hogy a sűrűségfüggvény alakulásának figyelembevétele jelentősen csökkenti az eredetileg kiszámított térerősségszinteket, és szinte teljes egészében levágja, zérusra csökkenti a függvény szélén található maximumokat, megtartva a várható értéknél, valamint annak közvetlen közelében kiszámított szinteket. Az így adódó maximális térerősségszint $E_{max} = 11,3580 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$, a hozzá tartozó adatok: $P_{max} (505,707, 1,5152 \cdot 10^3)$, $h_{max} = 159,53 \text{ m}$, $d = 43,384 \text{ km}$, $\Delta h = 204,4035 \text{ m}$, $\theta_{TX} = \theta_{RX} \approx 0$, $h_{eff_{TX}} = 29,7095 \text{ m}$, $h_{eff_{RX}} = -12,9185 \text{ m}$ és az összeköttetés nem optikai. A minimális térerősséghez tartozó adatok: $E_{min} = -15,1810 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$, $P_{min} (-3,5354 \cdot 10^3, -6,5657 \cdot 10^3)$, $h_{max} = 111,5 \text{ m}$, $\Delta h = 206,4826 \text{ m}$, $\theta_{TX} = \theta_{RX} \approx 0$, $h_{eff_{TX}} = 7,6088 \text{ m}$, $h_{eff_{RX}} = -14,7914 \text{ m}$, az elsőrendű Fresnel-zóna tisztasága ezúttal sem biztosított. A terepmetszetek a 6.6. ábrán láthatók. Az így

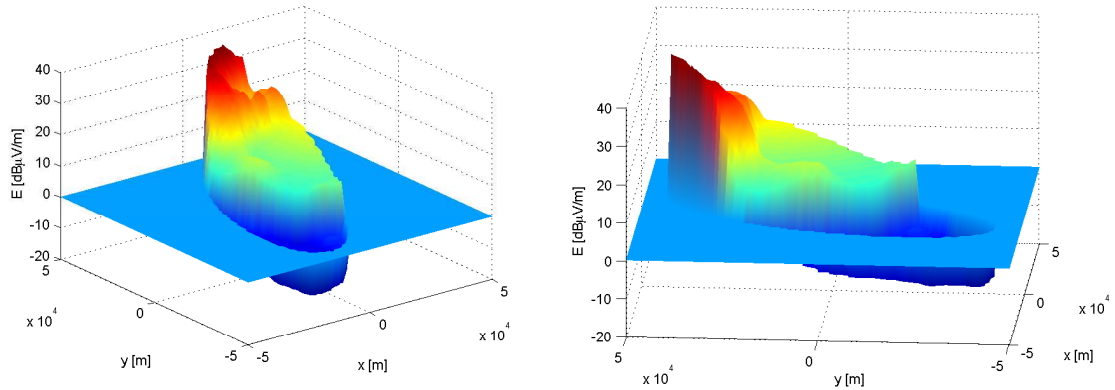


6.6. ábra. A minimális és a maximális térerősséghez tartozó terepmetszetek

adódó $10 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ körüli maximumok jelentősen kisebb térerősségszintet reprezentál-

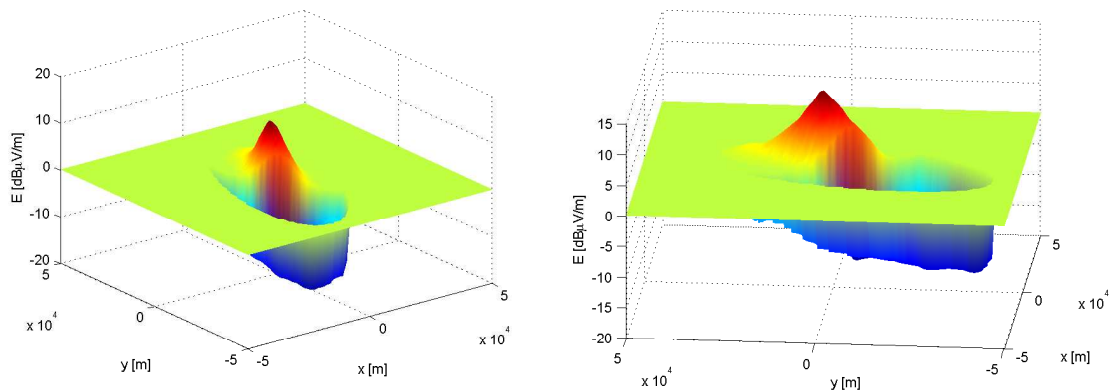
nak a hagyományos, súlyozatlan számítási módszerhez képest, így azt mondhatjuk, hogy ez az eljárás pontosabb képet ad az állomás működése közben kialakuló térerősségviszonyokról, megnyitva a lehetőséget az egyedi esetek rugalmasabb kezelésére, koordinálására.

A bázisállomás által a mobil működési területére (*downlink*) létrehozott térerősségszinteket a 6.7. ábra mutatja. Az állomás $f = 460$ MHz adási frekvencián, 20 W kisugárzott teljesítménnyel és körsugárzó antennával üzemel.



6.7. ábra. A mobil állomás működési pontjaira számított térerősségek

A súlyozási eljárás nélkül létrehozott maximális térerősségszintet a kijelölés a P_{max} ($10606,4,2929 \cdot 10^4$) pontban $E_{max} = 38,052 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ értékkel hozza létre, míg a minimális térerősségszint a P_{min} ($-1,6667 \cdot 10^4, 3,8889 \cdot 10^4$) pontban $E_{min} = -13,98 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ értékre adódik. Előbbi az *uplink*-irányhoz képest 4,644 dB-val, míg utóbbi 0,167 dB-val kevesebb. A súlyozás utáni értékek a 6.8. ábrán láthatók.



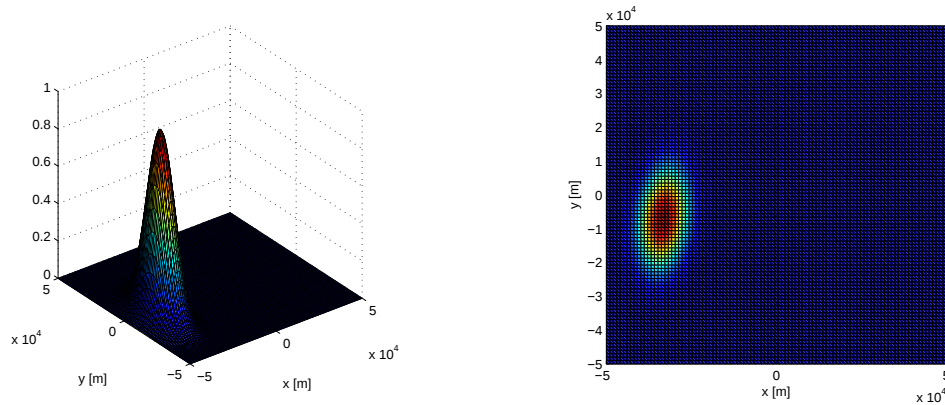
6.8. ábra. A számított térerősségszintek súlyozás után

Az eljárás a maximális térerősségszintet $E_{max} = 12,095 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -re csökkenti, ami a súlyozatlan maximumnál 25,957 dB-val kevesebb, míg az *uplink*-értékhez képest 0,737 dB-val több, a minimális térerősségszint pedig $-15,004 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -re adódik. Összefoglalásképpen elmondható, hogy az *uplink-downlink*-irányok térerősségviszonyai kisebb különbségektől eltekintve megegyeznek, mely egyezés elsősorban a távolság alapú térerősségszámításból adódik (különbséget csak a frekvencia-offset és

terepviszonyok közötti eltérés okozhat), így a súlyozott térerősségszintek is hasonlóan alakulnak. A legnagyobb térerősségszintek a várható érték környezetében, míg a minimum a működési terület bázisállomástól vizsgált távolabbi végén alakul ki. Mivel a koordinációs eljárások során a maximális szintek érdekesek, ezért elmondható, hogy az eredeti algoritmus segítségével adódó $40 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ körüli értékek helyett az átlagosan $15 - 20 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ nagyságú térerősségszintekkel kell számolni.

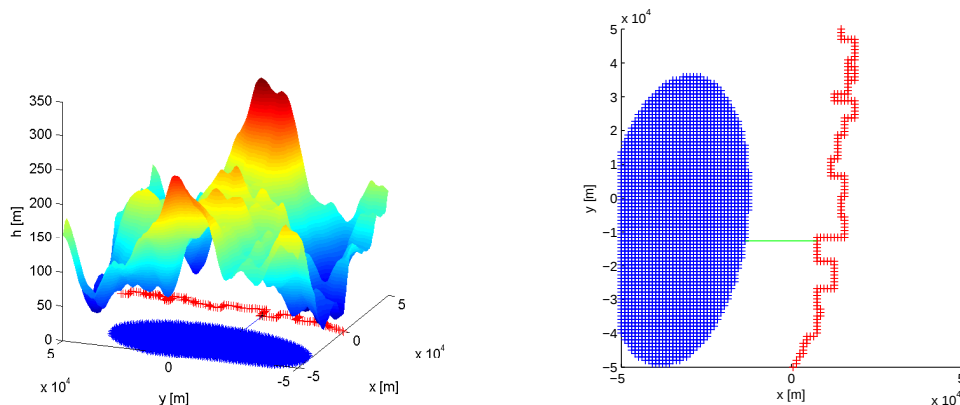
6.2. Számítás határvonalra fiktív topográfián

Munkám során egy fiktív topográfián megvizsgáltam a mobilállomások által a határvonalon létrehozott térerősség meghatározására szolgáló eljárás működését, javíthatóságát. Ehhez a mobil állomás helyzetét egy $m_1 = -3,384 \cdot 10^4$, $m_2 = -6,566 \cdot 10^3$, $\sigma_1 = 5000$, $\sigma_2 = 10000$ és $r = 0,2$ paraméterekkel rendelkező normális eloszlás sűrűségfüggvényével modelleztem, a határvonalat pedig az annak pontjait leíró (x, y) -koordinátákat azonosító vektor segítségével értelmeztem. A területet leíró függvény



6.9. ábra. A mobil állomás helyzetét leíró sűrűségfüggvény

a 6.9. ábrán, míg a határvonal és a terület helyzete a 6.10. ábrán látható. Hagyományos számítási algoritmust feltételezve az első lépés a működési terület azon pontjának megkeresése, amely a határvonalhoz a legközelebb található. A minimális távolság



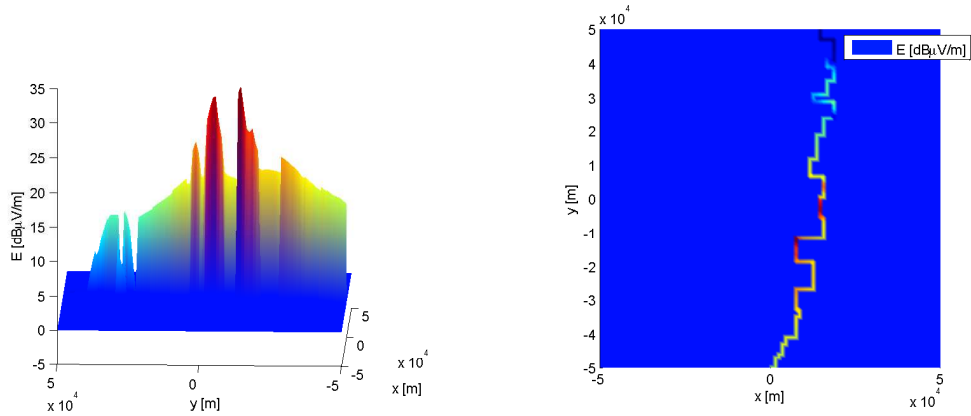
6.10. ábra. Az állomás területe, a határvonal és a minimális távolság

megtalálására egy kimerítő kereséssel algoritmust írtam, amely végigmegy a mobil állomás működési területének minden pontján, és ott megvizsgálja a határvonal összes pontjának távolságát a

$$d = \sqrt{(x_p - x_{border})^2 + (y_p - y_{border})^2} \quad (6.1)$$

formula segítségével, és ahol ez az érték a legkisebb, azt a határvonal- és működési terület pontot választja ki. A legkisebb távolság ezúttal $d_{min} = 21,211$ km-re adódott a $P_a(-1,3636 \cdot 10^4, 1,4646 \cdot 10^4)$ adási- és a $P_{border}(-1,3636 \cdot 10^4, 7,5758 \cdot 10^3)$ határpont között.

A klasszikus algoritmust használva tehát a feladat a következő: a megkeresett P_a pontból a határvonal összes pontjára meghatározni a $h = 10$ m magasságban létrehozott térerősség értékét, majd kiválasztani a legnagyobbat, és annak koordinátáit, valamint a kiszámított térerősségszint értékét visszaadni kimenetként. A szimuláció során a mobil kijelölés adási frekvenciáját $f = 455,125$ MHz-re, teljesítményét $P = 25$ W-ra, az antenna magasságát $h_{ant} = 30$ m-re választottam. A határvonal teljes hosszára meghatározott térerősségszinteket mutatja a 6.11. ábra. A maximális



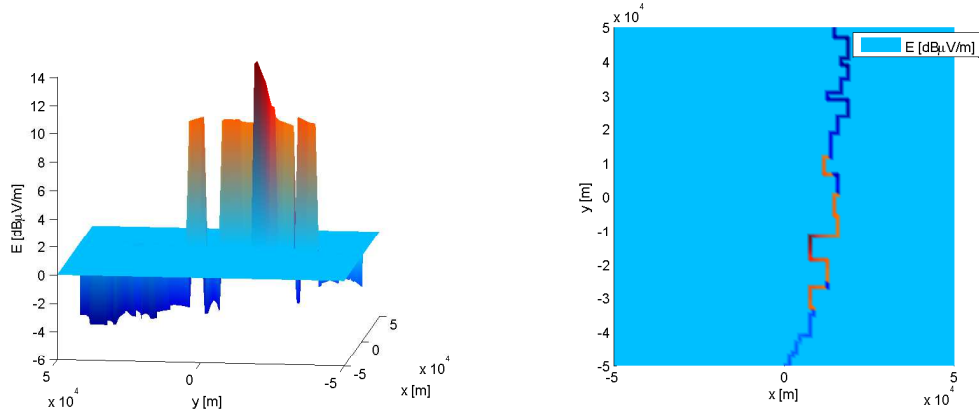
6.11. ábra. Térerősségszintek a határvonalon

térerősség értéke a $P_{max}(7,5758 \cdot 10^3, -1,2626 \cdot 10^4)$ pontban $E_{max} = 30,5793 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -ra adódik, amely meghaladja a HCM megállapodásban az adott frekvenciára előírt $20 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -t, tehát a kijelölést mindenképpen koordinálni kell.

Látható, hogy a vizsgált adási pont a mobil állomás meghatározott működési területének szélén található, ami azt jelenti, hogy normális eloszlást feltételezve a kijelölés a tárgyalt pontban igen kis valószínűséggel tartózkodik. Amennyiben ismert a kijelölés tartózkodási helyének eloszlása a síkon, úgy célszerű abból a pontból számítani a térerősség értékét a határvonalra, ahol a legnagyobb valószínűséggel található meg az adott állomás. Ez a pont nem más, mint a várható érték.

A várható értékhez a raszter alapján legközelebb eső $P_m(-3,3838 \cdot 10^4, -6,5657 \cdot 10^3)$ pontból elvégzett szimuláció során a határvonal pontjaira meghatározott térerősségszintek a 6.12. ábrán láthatók. Az eredmények alapján a maximális térerősségszint ugyanarra a határpontra esik, de az eredetinel több mint 15 dB-vel kevesebb, $E_{max} = 13,3904 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -re adódik. Az így meghatározott térerősségszint a $20 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ -es koordinációs küszöb alatt marad, így ez alapján a kijelölés egyeztetés nélkül helyezhető üzembe. Az ügyintézőnek ezúttal is szem előtt kell tartania azt a

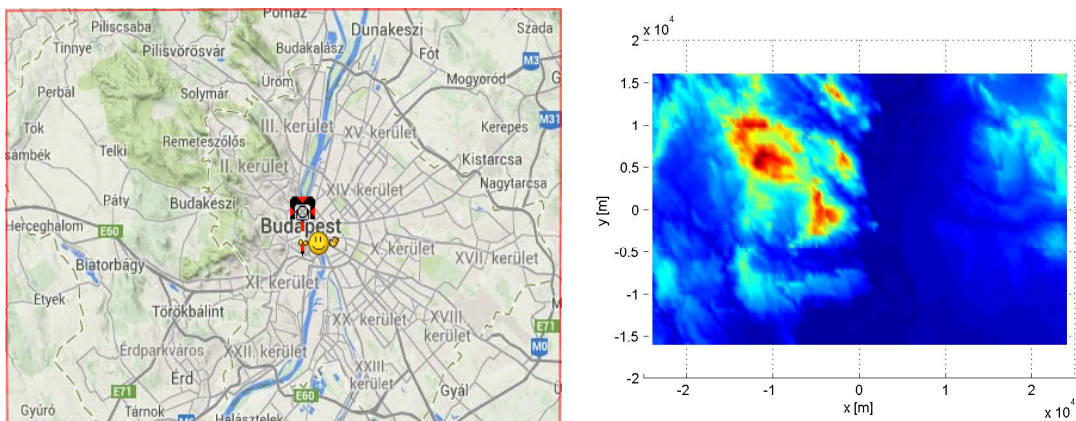
tényt, hogy a kijelölés működési területének van olyan pontja, ahonnan az a kritikus szint feletti térerősséget hoz létre a határvonalon, így adott esetben az állomás koordinálható, a működési terület sajátosságainak figyelembevételével.



6.12. ábra. Térerősségszintek a határvonalon, a várható érték pontjából

6.3. Szimplex összeköttetés vizsgálata valós topográfián

A gyakornoki munkám során megvalósított térerősségszámítási eljárást a fiktív topográfiákon kívül a 6.13. ábrán látható, valós terepadatokat leíró környezetben is teszteltem egy simplex bázis-mobil összeköttetést feltételezve. A Budapestet, valamint a szélesebb agglomerációt is magában foglaló terepadatokat – mely a magyarországi földmérési térképek vetületi rendszerének 65-ös sorszámú egységes országos vetületi (EOV) szelvénye [26] – a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem alapszakos villamosmérnök-hallgatója, Vigh Péter bocsátotta rendelkezésemre, amit ezúton is szeretnék megköszönni. A szelvény eredetileg egy $32 \text{ km} \cdot 48 \text{ km}$ -es

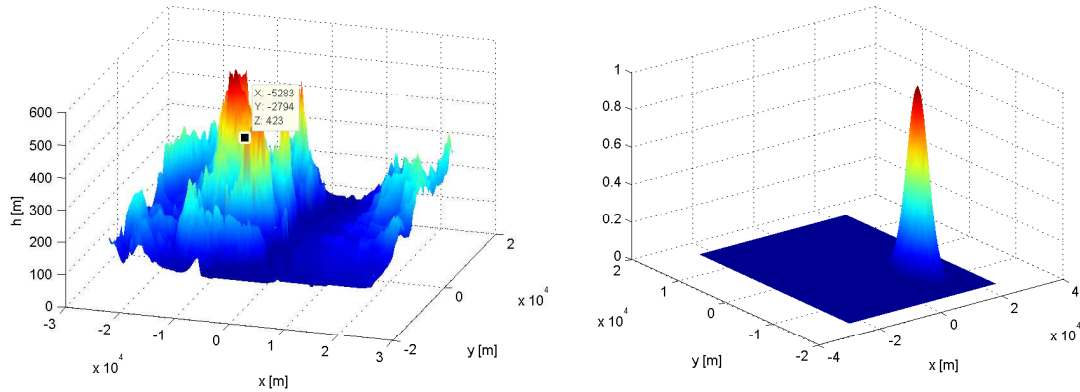


6.13. ábra. A vizsgált 65-ös EOV-szelvény és topográfiája felülnézetből [26]

téglalap, amely 50 méteres osztásközzel tárolva egy 640×960 -as mátrixot alkot. Ezt a mátrixot számítási idő csökkentése érdekében egy 64×160 -as mátrixra redukáltam, ami a térerősségszámítási pontosságot a pont-pont közötti interpolációs eljárás

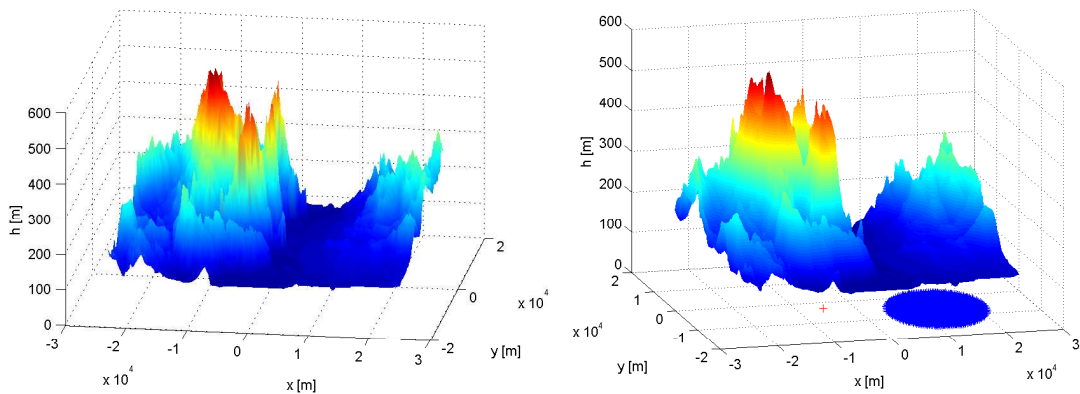
miatt nem befolyásolja, csupán az adó- és a vevőállomás helyzetének meghatározási finomságára van hatással.

A szimuláció során egy fix vevőállomást definiáltam a Széchenyi-hegy $h = 423$ m tengerszint feletti magasságú, $P_{RX}(-5283, -2794)$ koordinátákkal azonosítható pontjában $h_{ant} = 60$ m antennamagassággal, melyhez egy, a 6.14. ábrán látható, a pesti kerületekben történő üzemetelt modellező, $m_1 = 1,313 \cdot 10^4$, $m_2 = -6349$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 2000$ és $r = 0,1$ paraméterekkel rendelkező normális eloszlás sűrűségfüggvényével leírható működési területen értelmezett mobil adót rendeltem. Az adóan-



6.14. ábra. A fix- és a mobil állomás helyzete

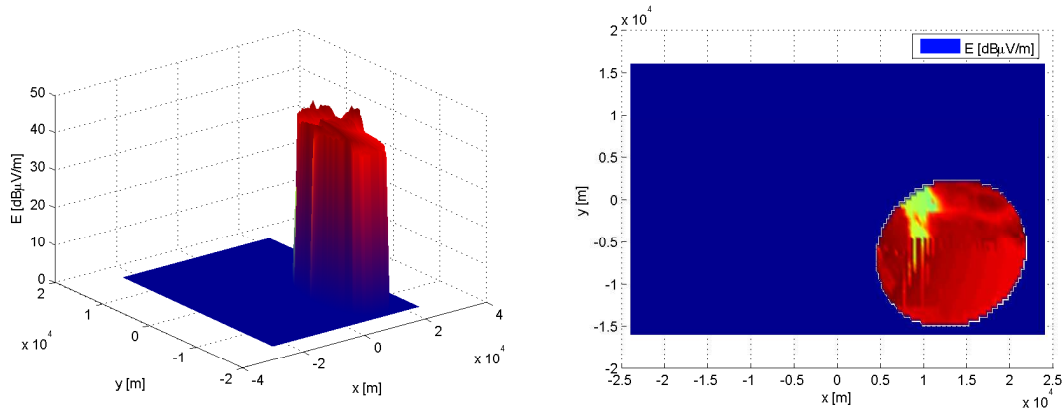
tenna körsugárzó és $h_{ant} = 3$ m magas, a kisugárzott teljesítmény $P = 0,35$ W, az üzemi frekvencia $f = 451,250$ MHz. A működési terület és a vizsgált topográfia viszonya a 6.15. ábrán láthatók.



6.15. ábra. A topográfia és a vizsgált működési terület

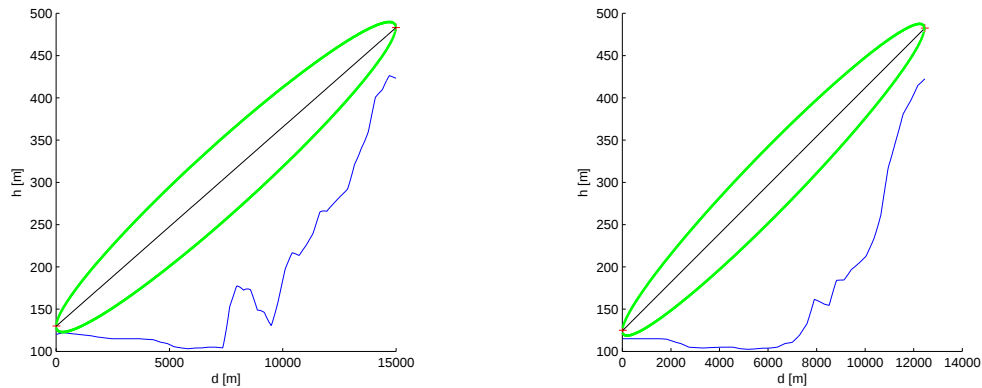
A súlyozatlan térerősségszintek alakulását a vevőantenna pontjában a mobil állomás tartózkodási helyének függvényében a 6.16. ábra mutatja. Megfigyelhető, hogy a mobil állomás által létrehozott térerősség a tartózkodási területen belül közel helyfüggetlen, konstans (alaposabb szemrevételezéssel látható, hogy a távolság növekedésével kis mértékben csökken), átlagosan $40 \frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}$ körül alakul. A közel állandó térerősség értéke abból adódhat, hogy a pontonként elvégzett szimulációs lépések során érdemben nem változik az adó és a vevő között a terep, így az eredmény

kizárólag a két pont közötti távolság befolyásolja. A viszonylag nagynak mondható térerősségértékek forrása egyrészt fakadhat a kisebb távolságokból, másrészt a terepviszonyok alaposabb tanulmányozása során felmerülhet a gyanú, hogy az elsőrendű Fresnel-zóna tisztasága ezúttal biztosított, ezért a szabadtéri terjedés összefüggése (5.18) szerint kell számolni.



6.16. ábra. A súlyozatlan térerősségértékek alakulása

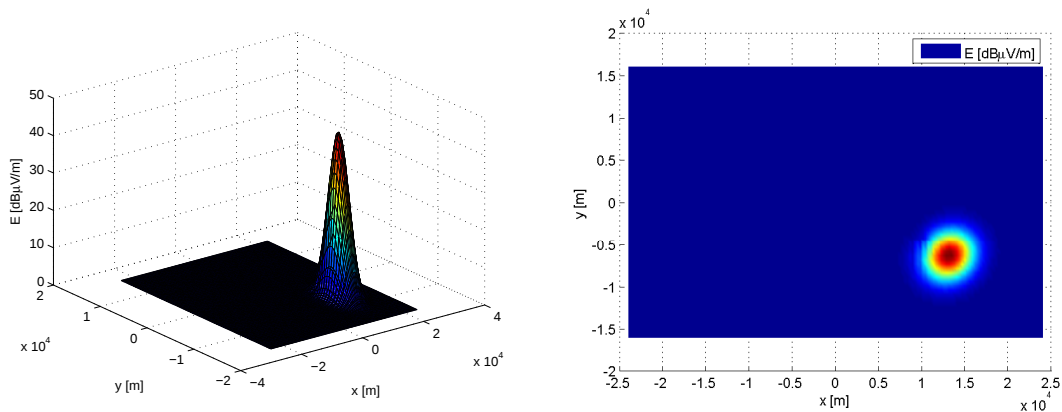
A sejtést a 6.17. ábrán látható, a minimális és a maximális térerősségszinthez tartozó terepmetszetek, és az azokra felrajzolt elsőrendű Fresnel-zónák viszonya is igazolja. Látható, hogy a topográfiai adatok alapján történő számítások alapján egy,



6.17. ábra. Az elsőrendű Fresnel-zónák tisztasága biztosított

Pest déli kerületei és a Széchenyi-hegy között kialakításra kerülő simplex összeköttetés esetén, a vizsgált frekvencián és annak környezetében a szabadtéri hullámterjedés törvényeit lehet és kell is alkalmazni. A térerősség értékének minimális ingadozását nem az alapvető számítási módszerek (terjedési görbék és szabadtéri összefüggés) közötti váltás okozza a vizsgált működési területen belül, hanem a terepegyenetlenségek, valamint az azokból számított korrekciós tényezők hatásai.

Mivel a területre számított térerősségek közel állandó értékűnek adódnak, így az eddig szemléletes, effektív hatást mutató súlyozási eljárás ezúttal várhatóan nem fog érdemi eredményre vezetni, az így kapott térerősség-eloszlás nem fog új információval szolgálni a kialakuló viszonyokkal kapcsolatban. A súlyozás után adódó

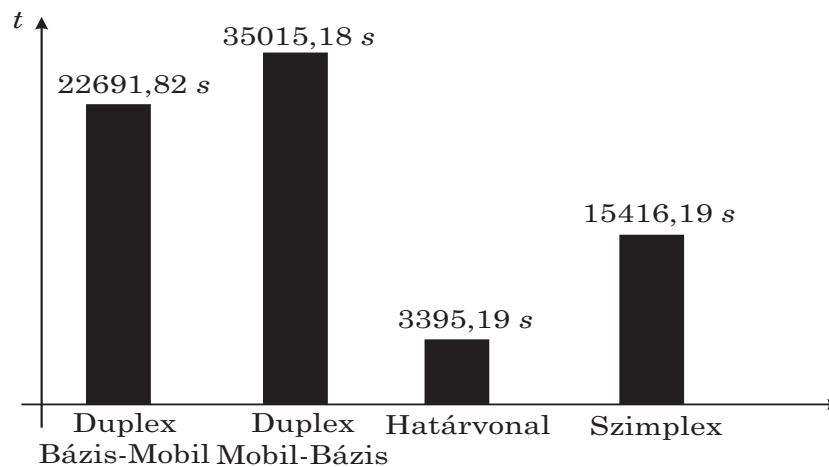


6.18. ábra. A súlyozott térerősségszintek alakulása

térerősségszintek a 6.18. ábrán láthatók. Az eredmények kvalitatív módon a közel konstans eredeti térerősségszintek miatt a működési terület leírásához használt normális eloszlás sűrűségfüggvényének megfelelően alakulnak. Összefoglalásképpen elmondható, hogy abban az esetben, ha az elsőrendű Fresnel-zóna tisztasága biztosított, úgy kis működési területeket feltételezve a súlyozási eljárás nem szolgál új információval, ebben az esetben célszerűbb és kézenfekvőbb egy átlagos térerősségszinttel számolni, hiszen az állomás jó közelítéssel a mozgáskörzetének minden pontján azonos térerősségszintet fog létrehozni a vizsgált ponton.

6.4. Futási idők összehasonlítása

A Matlab-script formájában implementált térerősségszámítási algoritmus szűk keresztmetszete a futási idő, ahogy azt a 6.19. ábra is alátámasztja. A duplex összeköttetés térerősségviszonyainak meghatározási ideje az adott programkörnyezetben összesen több mint 16 órára adódott, a szimplex összeköttetés megvizsgálása 4 órát, míg a határvonalra történő számítás 1 óránál kevesebb időt vett igénybe. A script



6.19. ábra. A vizsgált problémák futási ideje

rendkívül hosszú futási idejének oka elsősorban az, hogy a végrehajtott feladat lényegében sok pont-pont közötti térerősségszámítás szuperpozíciója, melyek egyenként is

sok időt vesznek igénybe a `Matlab` korlátai, a topográfiai adatok nagysága, valamint bizonyos esetekben a számítások során használt kimerítő kereséses eljárások miatt.

Belátható, hogy az eljárás mindennapi használatához a jelenleg még túlzottan hosszú futási időket csökkenteni kell. Az egyik lehetséges megoldás az algoritmus más, gépközi programkörnyezetbe történő átültetése, átkódolása, a független programrészek párhuzamosítása, vagy a tényleges számítási algoritmus tökéletesítése a kimerítő keresés használatának elkerülésével, ahol az lehetséges. A legrövidebb, egy óra alatti futási idő a határvonalra történő számítás esetén adódott, hiszen ebben az esetben a fix adási pontból a kétszáznál alig több határpontra kellett számolni, ami számszerűen kevesebb iterációs lépést takar.

7. fejezet

Konklúzió, jövőbeli tervek

Dolgozatomban betekintést adtam az országok igazgatásainak hatáskörébe tartozó kijelölések nemzetközi egyeztetését szabályozó, előíró két- vagy többoldalú megállapodások megkötésének lehetőségébe a világszintű szabályozási környezetben. Bemutattam az európai frekvenciakoordinációs eljárás műszaki és adminisztrációs menetét előíró HCM megállapodás gyakorlati szempontból legfontosabb fogalmait, valamint a koordinációs eljárás általános módszereit, a koordinációt segítő programok legfőbb tulajdonságait, hazai vonatkozású példákkal szemléltetve a nemzetközi egyeztetés gyakorlati nehézségeit.

Munkám során fiktív *assignment*-adatbázis használatának segítségével elvégeztem és bemutattam egy magyar hálózat koordinálása során fellépő kérdések, problémák és feladatok megoldását, valamint a beérkező egyeztetési kérelmek elbírásának módszerét CHIRplus LM környezetben, és a szoftver nyújtotta lehetőségek keretein belül felvázoltam a vizsgált kijelölések vonatkozásában azokat a megoldásokat, melyekkel csökkenthető a határon átnyúló káros zavar, s így a kijelölések gyorsabban, nagyobb biztonsággal helyezhetők üzembe.

Ismertettem a HCM megállapodás mellékleteiben összefoglalt, a földi mozgószolgálat nemzetközi frekvenciakoordinációja során felhasznált térerősségszámítási eljárásokat, a terepviszonyok kezelését és az azokból származtatható korrekciós tényezőket műszaki és matematikai vonatkozásban, különös tekintettel a programozási gyakorlatban történő megvalósítási módszerekre. A CHIRplus LM szoftvertől elszakadva, Matlab-script formájában megvalósítottam a meghatározott és leírt algoritmust, így egy saját, egyedi, független környezetet teremtettem a HCM-eljárást alkalmazó számításokhoz.

A klasszikus szimulációs algoritmust kiegészítettem a mobil állomások működési területének statisztikai, valószínűségszámítási eszközkészlettel történő leírásával, valamint az ehhez kapcsolódó függvények szerinti térerősségszint-súlyozással, így nyitva lehetőséget egy pontosabb, a jelenleginél rugalmasabb, és spektrumgazdálkodási értelemben több lehetőséget magában foglaló módszer alkalmazása előtt.

A saját script felhasználásának segítségével illusztratív példákat mutattam be az új eljárás alkalmazásának lehetőségeire, valamint az eredményekből levont következtetésekkel összefoglaltam az új módszer előnyeit és hátrányait, fiktív és valós terepadatok alkalmazásának segítségével.

A jövőben szeretném a jelenleg Matlab környezetben futó scriptet a szimuláció felgyorsítása érdekében C programozási nyelvre átkódolni, ezzel küszöbölve ki

az eljárás jelenlegi legnagyobb hátrányát, problémáját, továbbá foglalkozni szeretnék a mozgó állomások tartózkodási valószínűségének leírásának még pontosabb, a normális eloszlástól eltérő formulával történő közelítésével is.

Irodalomjegyzék

- [1] International Telecommunication Union, *Radio Regulations*. Article 5, ITU, 2012.
- [2] International Telecommunication Union, *Radio Regulations*. Article 6, ITU, 2012.
- [3] <http://www.hcm-agreement.eu/> (utolsó látogatás: 2014. július 17.)
- [4] <http://www.hcm-agreement.eu/http/englisch/historie/historie.pdf> (utolsó látogatás: 2014. július 17.)
- [5] HCM Agreement, 1.2, 2014.
- [6] HCM Agreement, 1.3, 2014.
- [7] HCM Agreement, 4.1, 2014.
- [8] <http://www.lstelcom.com> (utolsó látogatás: 2014. július 18.)
- [9] Bozsóki I. Cross border frequency co-ordination, ITU.
- [10] HCM Agreement, 4.7, 2014.
- [11] HCM Agreement, Annex 2 A, *Data exchange in the Land Mobile Service*. 2014.
- [12] Agreement, *between the Administrations of Austria, Croatia, Hungary and Slovenia concerning the allotment of preferential frequency blocks in the bands 450.000 – 457.400 MHz and 458.400 – 460.000 MHz as well as 460.000 – 467.400 MHz and 468.400 – 470.000 MHz*. Budapest, 28 May 2014.
- [13] HCM Agreement, 2.5, 2014.
- [14] Honfy József: *Hullámterjedés és Antennák I-II*. Széchenyi István Egyetem, 2003.
- [15] <http://www.mathworks.com> (utolsó látogatás: 2014. augusztus 1.)
- [16] Fodor Gy. *Jelek és Rendszerek*. Műegyetemi Kiadó, 2006.
- [17] Kuczmann M. *Jelek és Rendszerek*. Universitas-Győr, Győr, 2005.
- [18] Székely V. *Képfeldolgozás*. Egyetemi Jegyzet, Budapest, 2002.
- [19] Szekeres B, Nagy L. *Antennák és hullámterjedés*. Jegyzet, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.

- [20] Bronstein I. N., Szemengyaljev K. A. *Matematikai kézikönyv*. Typotex Kiadó, Budapest 2009.
- [21] Manning T. *Microwave Radio Transmission Design Guide*. Artech House, Norwood, 2009.
- [22] International Telecommunication Union, *ITU-R P. 1546-5, Method for point-to-point-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz*. ITU, 2013.
- [23] HCM Agreement, Annex 5, 3.
- [24] HCM Agreement, Annex 5, Appendix 3.
- [25] Petz D., Lángné L. M., *Matematika III*. Oktatási segédanyag, BME Matematikai Intézet, Budapest, 2000.
- [26] <http://pf-prg.hu/trafo/eov-szelve-1.php?mod=-1> (utolsó látogatás: 2014. augusztus 19.)

A. Függelék

Matlab-scriptek

A.1. topo_gen.m

```
%Topográfia generálása pszeudorandom normál-eloszlású számokkal  
%és Gauss-szűrő segítségével  
  
clear;  
clc;  
  
N = 100; d = 100000;  
h_avg = 200;  
cx = 2e4; cy = 2e4;  
  
x = linspace(-d/2,d/2,N); y = linspace(d/2,-d/2,N);  
[X,Y] = meshgrid(x,y);  
  
f = h_avg .*rand(N,N);  
w = exp(-((2*abs(X)/cx)+(2*abs(Y)/cy)));  
  
TOP0 = 2*d/N/sqrt(cx*cy)*ifft2(fft2(w).*fft2(f));  
  
ref_min = min(min(TOP0));  
  
for i = 1:size(TOP0,1)  
    for j = 1:size(TOP0,2)  
        TOP0(i,j) = TOP0(i,j) - ref_min;  
    end  
end  
  
surf(X,Y,TOP0);  
shading interp;  
  
dlmwrite('X',X); dlmwrite('Y',Y); dlmwrite('TOP0',TOP0);
```

A.2. hcm_script.m

```
%HCM-megállapodás javítási lehetősége  
%a földi mozgószolgálat vonatkozásában  
tic;  
clear; clc;  
%Topográfia  
% load('X'); load('Y'); load('TOP0');  
  
adatb=fopen('U0605.HDD','r');  
fseek(adatb,80986,'bof');  
  
for i = 1:641  
    for j = 1:961
```

```

        A_=(fread(adatb,1,'uint16','b'));
        A(i,j)=uint16(A_/256)+256*(A_-uint16(A_/256)*256);
    end
end
A = double(A);
n = 1;
l = 1;
for i = 1:size(A,1)
    for j = 1:size(A,2)

        if mod(j,6) == 0 && mod(i,6) == 0

            TOP0(l,n) = A(i,j);
            n = n+1;
        end
    end
    n = 1;
    if mod(i,10) == 0
        l = l+1;
    end
end

x = linspace(-24000,24000,160);
y = linspace(16000,-16000,64);
[X,Y] = meshgrid(x,y);

%Terjedési görbék
load('PC100mhz50t.txt'); load('PC100mhz10t.txt'); load('PC100mhz1t.txt');
load('PC600mhz50t.txt'); load('PC600mhz10t.txt'); load('PC600mhz1t.txt');
load('PC2ghz50t.txt'); load('PC2ghz10t.txt'); load('PC2ghz1t.txt');

%Terepgyenetlenség korrekciós függvényei
load('corr_factor_100mhz.txt'); load('corr_factor_600mhz.txt');
load('corr_factor_2000mhz.txt');

%Teljesítmény
Power_a = 0.2; Power_a_dB = 10*log10(Power_a/1000);

%Terjedési görbék teljesítményhez igazítása
for i = 1:size(PC100mhz50t,1)
    for j = 2:size(PC100mhz50t,2)

        PC100mhz50t(i,j) = PC100mhz50t(i,j)+Power_a_dB;
        PC100mhz10t(i,j) = PC100mhz10t(i,j)+Power_a_dB;
        PC100mhz1t(i,j) = PC100mhz1t(i,j)+Power_a_dB;

        PC600mhz50t(i,j) = PC600mhz50t(i,j)+Power_a_dB;
        PC600mhz10t(i,j) = PC600mhz10t(i,j)+Power_a_dB;
        PC600mhz1t(i,j) = PC600mhz1t(i,j)+Power_a_dB;

        PC2ghz50t(i,j) = PC2ghz50t(i,j)+Power_a_dB;
        PC2ghz10t(i,j) = PC2ghz10t(i,j)+Power_a_dB;
        PC2ghz1t(i,j) = PC2ghz1t(i,j)+Power_a_dB;

    end
end

%Frekvenciaértékek, borderszámítás
f_a = 451.250e6; f_v = 440e6;
coord_line_v = 0;

%Adópont hely szerinti eloszlásának definiálása
tx_point = zeros(size(X));
E_matrix = zeros(size(X));
E_matrix_suly = zeros(size(X));
E_matrix_suly_ketto = zeros(size(X));
sigma_1 = 2000;
sigma_2 = 2000;
m_1 = 1.313e4;
m_2 = -6349;
r = 0.1;

```

```

%Normálás
for i = 1:size(tx_point,1)
    for j = 1:size(tx_point,2)
        tx_point(i,j) = 1 / (2*pi*sigma_1*sigma_2*sqrt(1-r^2))*exp((-1/(2*(1-r^2)))* ...
            ( ((X(i,j)-m_1)^2/sigma_1^2) - (2*r*((X(i,j)-m_1)/sigma_1)*((Y(i,j)-m_2)/sigma_2)) ...
            + ((Y(i,j)-m_2)^2/sigma_2^2)));
        if tx_point(i,j) < 1e-20
            tx_point(i,j) = 0;
        end
    end
end

DENS_max = max(max(tx_point));
tx_point = tx_point./DENS_max;
load('BORDER');

%%
for o = 1:size(tx_point,1)
    for p = 1:size(tx_point,2)
        if tx_point(o,p) > 1e-4

%Adó és vevő koordinátái, antennamagassága
P_a = [X(o,p) Y(o,p)]; P_v = [-5283 -2794 ];
dir_vec = [(P_v(1)-P_a(1)) (P_v(2)-P_a(2))];
norm_vec = [dir_vec(2) -dir_vec(1)];
a_v_distance = sqrt((P_a(1) - P_v(1))^2 + (P_a(2) - P_v(2))^2);
h_ant_a = 10; h_ant_v = 60;

%A-V-egyenes pontjai, adatai
x_dist = linspace(min(min(X)),max(max(X)),2000); n = 1;

for i = 1:length(x_dist)

    y_tmp = ((norm_vec(2) * P_a(2)) + (norm_vec(1) * (P_a(1) - x_dist(i)))) / norm_vec(2);

    if ( sqrt((x_dist(i) - P_a(1))^2 + (y_tmp - P_a(2))^2) <= a_v_distance ) && ...
        ( sqrt((x_dist(i) - P_v(1))^2 + (y_tmp - P_v(2))^2 ) ...
        <= a_v_distance )

        a_v_line_x(n) = x_dist(i);
        a_v_line_y(n) = y_tmp;
        a_v_line_tx_dist(n) = sqrt((P_a(1) - a_v_line_x(n))^2 + (P_a(2) - a_v_line_y(n))^2);
        a_v_line_rx_dist(n) = sqrt((P_v(1) - a_v_line_x(n))^2 + (P_v(2) - a_v_line_y(n))^2);
        n = n + 1;

    end
end

%Effektív antennamagasságok meghatározása
d_i = 1000;
h_m_a = 0; h_m_v = 0; n = 1;
for i = 1:140

    if d_i > max(a_v_line_tx_dist)

        x_coord_a = interp1(a_v_line_tx_dist,a_v_line_x,d_i,'linear','extrap');
        y_coord_a = interp1(a_v_line_tx_dist,a_v_line_y,d_i,'linear','extrap');

    else

        x_coord_a = interp1(a_v_line_tx_dist,a_v_line_x,d_i);
        y_coord_a = interp1(a_v_line_tx_dist,a_v_line_y,d_i);

    end

    if d_i > max(a_v_line_rx_dist)

        x_coord_v = interp1(a_v_line_rx_dist,a_v_line_x,d_i,'linear','extrap');
        y_coord_v = interp1(a_v_line_rx_dist,a_v_line_y,d_i,'linear','extrap');

    else

```

```

        x_coord_v = interp1(a_v_line_rx_dist,a_v_line_x,d_i);
        y_coord_v = interp1(a_v_line_rx_dist,a_v_line_y,d_i);

    end

    if a_v_distance >= 15000 %15 000 m feletti esetek kezelése

        h_m_a = h_m_a + interp2(X,Y,TOPO,x_coord_a,y_coord_a);
        h_m_v = h_m_v + interp2(X,Y,TOPO,x_coord_v,y_coord_v);
        d_i = d_i + 100; n = n + 1;

    elseif a_v_distance < 15000 %15 000m alatti esetek kezelése

        if ( d_i >= (a_v_distance / 15) ) && ( d_i <= a_v_distance )

            h_m_a = h_m_a + interp2(X,Y,TOPO,x_coord_a,y_coord_a);
            h_m_v = h_m_v + interp2(X,Y,TOPO,x_coord_v,y_coord_v);
            d_i = d_i + 100; n = n + 1;

        end

    end

    end
end
h_eff_a = h_ant_a + interp2(X,Y,TOPO,P_a(1),P_a(2)) - (h_m_a / n);
h_eff_v = h_ant_v + interp2(X,Y,TOPO,P_v(1),P_v(2)) - (h_m_v / n);

clearvars h_m_a h_m_v d_i x_coord_a y_coord_a x_coord_v y_coord_v n x_dist

%Terepegyenetlenség meghatározása
for i = 1:length(a_v_line_tx_dist)

    terrain_tx(i) = interp2(X,Y,TOPO,a_v_line_x(i),a_v_line_y(i));

end

if a_v_distance < 10000 %10 km-nél kisebb Tx-Rx-távolság

    delta_h = 0;

elseif ( a_v_distance >= 10000 ) && ( a_v_distance <= 50000 ) %10 km és 50 km között

    terr_max = 0;

    for i = 4500:(max(a_v_line_tx_dist)-4500)

        max_tmp = interp1(a_v_line_tx_dist,terrain_tx,i);

        if max_tmp > terr_max

            terr_max = max_tmp;

        end

    end

    end

    delta_h = abs(0.9*terr_max-0.1*terr_max);

elseif a_v_distance > 50000 %50 km felett

    terr_max = 0;

    for i = 4500:25000

        max_tmp = interp1(a_v_line_tx_dist,terrain_tx,i);

        if max_tmp > terr_max

            terr_max = max_tmp;

        end

    end

end
end

```

```

for i = (max(a_v_line_tx_dist)-25000):(max(a_v_line_tx_dist)-4500)

    max_tmp = interp1(a_v_line_tx_dist,terrain_tx,i);

    if max_tmp > terr_max

        terr_max = max_tmp;

    end

end

delta_h = abs(0.9*terr_max-0.1*terr_max);

end

%Tereptisztasági szög meghatározása, Tx-oldal
theta_tx_rad = 0; n = 1;

for i = 1:length(a_v_line_tx_dist)

    if a_v_line_tx_dist(i) <=16000

        tca_dist(n) = a_v_line_tx_dist(i);
        tca_height(n) = interp2(X,Y,TOPO,a_v_line_x(i),a_v_line_y(i));
        n = n + 1;

    end

end

if tca_dist(1) < tca_dist(length(tca_dist))

    tca_fixed_point = [tca_dist(1) tca_height(1) + h_ant_a];

    for i = 2:length(tca_dist)

        tca_variable_point = [tca_dist(i) tca_height(i)];
        tca_dir_vec = [(tca_variable_point(1)-tca_fixed_point(1)) ...
            (tca_variable_point(2)-tca_fixed_point(2))];
        tca_norm_vec = [tca_dir_vec(2) -tca_dir_vec(1)];

        tca_line_tmp = ((tca_norm_vec(2) * tca_fixed_point(2)) + (tca_norm_vec(1) ...
            * (tca_fixed_point(1) - tca_dist))) / tca_norm_vec(2);

        Indicator = 0;

        for j = 1:length(tca_dist)

            if (tca_height(j) - tca_line_tmp(j)) > 1e-5

                Indicator = 1;

            end

        end

        if Indicator == 0

            tca_line = tca_line_tmp;

        end

    end

elseif tca_dist(1) > tca_dist(length(tca_dist))

    tca_fixed_point = [tca_dist(length(tca_dist)) tca_height(length(tca_dist)) + h_ant_a];

    for i = 1:(length(tca_dist)-1)

        tca_variable_point = [tca_dist(i) tca_height(i)];
        tca_dir_vec = [(tca_variable_point(1)-tca_fixed_point(1)) ...
            (tca_variable_point(2)-tca_fixed_point(2))];

```

```

tca_norm_vec = [tca_dir_vec(2) -tca_dir_vec(1)];

tca_line_tmp = ((tca_norm_vec(2) * tca_fixed_point(2)) + (tca_norm_vec(1) ...
    * (tca_fixed_point(1) - tca_dist))) / tca_norm_vec(2);

Indicator = 0;

for j = 1:length(tca_dist)

    if (tca_height(j) - tca_line_tmp(j)) > 1e-5

        Indicator = 1;

    end
end

if Indicator == 0

    tca_line = tca_line_tmp;

end
end

for i = 1:length(tca_dist)

    if abs(tca_height(i)-tca_line(i)) < 1e-4

        tca_hpont = tca_line(i);
        tca_htav = abs(tca_fixed_point(1) - tca_dist(i));

    end
end

theta_tx_rad = atan( (tca_hpont - tca_fixed_point(2) - h_ant_a) / (tca_htav) );
theta_tx_deg = 360 * (theta_tx_rad / (2*pi));

clearvars tca_dist tca_height tca_dir_vec tca_dist tca_fixed_point tca_hpont ...
    tca_htav tca_line tca_line_tmp tca_norm_vec tca_variable_point Indicator

%Tereptisztasági szög meghatározása, Rx-oldal
theta_rx_rad = 0; n = 1;

for i = 1:length(a_v_line_rx_dist)

    if a_v_line_rx_dist(i) <= 16000

        tca_dist(n) = a_v_line_rx_dist(i);
        tca_height(n) = interp2(X,Y,TOPO,a_v_line_x(i),a_v_line_y(i));
        n = n + 1;

    end
end

if tca_dist(1) < tca_dist(length(tca_dist))

    tca_fixed_point = [tca_dist(1) tca_height(1) + h_ant_v];

    for i = 2:length(tca_dist)

        tca_variable_point = [tca_dist(i) tca_height(i)];
        tca_dir_vec = [(tca_variable_point(1)-tca_fixed_point(1)) ...
            (tca_variable_point(2)-tca_fixed_point(2))];
        tca_norm_vec = [tca_dir_vec(2) -tca_dir_vec(1)];

        tca_line_tmp = ((tca_norm_vec(2) * tca_fixed_point(2)) + (tca_norm_vec(1) ...
            * (tca_fixed_point(1) - tca_dist))) / tca_norm_vec(2);

        Indicator = 0;

        for j = 1:length(tca_dist)

```

```

        if (tca_height(j) - tca_line_tmp(j)) > 1e-5
            Indicator = 1;
        end
    end

    if Indicator == 0

        tca_line = tca_line_tmp;

    end
end

elseif tca_dist(1) > tca_dist(length(tca_dist))

    tca_fixed_point = [tca_dist(length(tca_dist)) tca_height(length(tca_dist)) + h_ant_v];

    for i = 1:(length(tca_dist)-1)

        tca_variable_point = [tca_dist(i) tca_height(i)];
        tca_dir_vec = [(tca_variable_point(1)-tca_fixed_point(1)) ...
            (tca_variable_point(2)-tca_fixed_point(2))];
        tca_norm_vec = [tca_dir_vec(2) -tca_dir_vec(1)];

        tca_line_tmp = ((tca_norm_vec(2) * tca_fixed_point(2)) + (tca_norm_vec(1) ...
            * (tca_fixed_point(1) - tca_dist))) / tca_norm_vec(2);

        Indicator = 0;

    for j = 1:length(tca_dist)

        if (tca_height(j) - tca_line_tmp(j)) > 1e-5
            Indicator = 1;
        end
    end

    if Indicator == 0

        tca_line = tca_line_tmp;

    end
end

end

for i = 1:length(tca_dist)

    if abs(tca_height(i)-tca_line(i)) < 1e-4

        tca_hpont = tca_line(i);
        tca_htav = abs(tca_fixed_point(1) - tca_dist(i));

    end
end

theta_rx_rad = atan( (tca_hpont - tca_fixed_point(2) - h_ant_a) / (tca_htav) );
theta_rx_deg = 360 * (theta_rx_rad / (2*pi));

clearvars tca_dist tca_height tca_dir_vec tca_dist tca_fixed_point tca_hpont ...
    tca_htav tca_line tca_line_tmp tca_norm_vec tca_variable_point Indicator

%Elsőrendű Fresnel-zóna tisztaságának ellenőrzése
for i = 1:length(a_v_line_tx_dist)
    fresnel_terrain(i) = interp2(X,Y,TOPO,a_v_line_x(i),a_v_line_y(i));
end

fresnel_tx_point = [min(a_v_line_tx_dist) interp1(a_v_line_tx_dist,fresnel_terrain, ...
    min(a_v_line_tx_dist))+h_ant_a];
fresnel_rx_point = [max(a_v_line_tx_dist) interp1(a_v_line_tx_dist,fresnel_terrain, ...
    max(a_v_line_tx_dist))+h_ant_v];

```

```

dir_vec = [(fresnel_rx_point(1)-fresnel_tx_point(1)) (fresnel_rx_point(2)-fresnel_tx_point(2))];
norm_vec = [dir_vec(2) -dir_vec(1)];

fresnel_tx_rx_line = ((norm_vec(2) * fresnel_tx_point(2)) + (norm_vec(1) * ...
    (fresnel_tx_point(1) - a_v_line_tx_dist))) / norm_vec(2);

fresnel_clearness_tx = 1; fresnel_clearness_rx = 1;
for i = 1:length(fresnel_terrain)
    if dir_vec(1) >= a_v_line_tx_dist(i)
        r_a = -1.73e4*sqrt((a_v_line_tx_dist(i)*(dir_vec(1)-a_v_line_tx_dist(i)))/(f_a*dir_vec(1)));
        r_v = -1.73e4*sqrt((a_v_line_tx_dist(i)*(dir_vec(1)-a_v_line_tx_dist(i)))/(f_v*dir_vec(1)));
        if fresnel_terrain(i) > (fresnel_tx_rx_line(i) + r_a)
            fresnel_clearness_tx = 0;
        elseif fresnel_terrain(i) > (fresnel_tx_rx_line(i) + r_v)
            fresnel_clearness_rx = 0;
        end
    end
end

clearvars fresnel_terrain fresnel_tx_point fresnel_rx_point dir_vec norm_vec r_a r_v

%Factors to be taken into consideration-táblázat

if (h_eff_a >= 3) && (h_eff_v >= 3)

    use_delta_h = true;
    use_theta_tx_deg = true;
    use_theta_rx_deg = true;
    h_1 = h_eff_a*h_eff_v/10;

elseif (h_eff_a >= 3) && (h_eff_v < 3)

    use_delta_h = true;
    use_theta_tx_deg = true;
    use_theta_rx_deg = true;
    h_1 = h_eff_a*0.3;

elseif (h_eff_a < 3) && (h_eff_v >= 3)

    use_delta_h = true;
    use_theta_tx_deg = true;
    use_theta_rx_deg = true;
    h_1 = h_eff_v*0.3;

elseif (h_eff_a < 3) && (h_eff_v < 3)

    use_delta_h = true;
    use_theta_tx_deg = true;
    use_theta_rx_deg = true;
    h_1 = 1;

elseif (h_eff_a >= 3) && (coord_line_v == 1)

    use_delta_h = true;
    use_theta_tx_deg = true;
    use_theta_rx_deg = false;
    h_1 = h_eff_a*h_ant_v/10;

elseif (h_eff_a < 3) && (coord_line_v == 1)

    use_delta_h = true;
    use_theta_tx_deg = true;
    use_theta_rx_deg = false;
    h_1 = h_ant_v*0.3;
end

%Térerősség szint számítása a HCM megállapodásban előírtak szerint

if fresnel_clearness_tx == 1 || a_v_distance < 1000 || h_1 > 3000

    E = 107 + Power_a_dB - 20*log10((max(a_v_line_tx_dist)-min(a_v_line_tx_dist))/1000);
    PC_dist = PC100mhz50t(:,1);

```

```

elseif h_1 < 0 %Terepakadály

    E = -999;

elseif fresnel_clearness_tx == 0 %Nem tiszta a Fresnel-zóna, ITU-R P.1546

    PC_dist = PC100mhz50t(:,1);

    %Frekvencia meghatározása

    if f_a < 100e6

        f_inf = 100; f_sup = 600; f_interp = true;

    elseif f_a > 2000e6

        f_inf = 600; f_sup = 2000; f_interp = true;

    elseif (f_a > 100e6) && (f_a < 600e6)

        f_inf = 100; f_sup = 600; f_interp = true;

    elseif (f_a > 600e6) && (f_a < 2000e6)

        f_inf = 600; f_sup = 2000; f_inrerp = true;

    elseif f_a == 100e6 || f_a == 600e6 || f_a == 2000e6

        f_interp = false;

    end

    %Távolság meghatározása

    for i = 1:(length(PC_dist)-1)

        d_1 = PC_dist(i);
        d_2 = PC_dist(i+1);

        if a_v_distance / 1000 == d_1

            d_interp = false; d = d_1; d_index = i;

        elseif a_v_distance / 1000 == d_2

            d_interp = false; d = d_2; d_index = i+1;

        elseif ((a_v_distance / 1000) > d_1) && ((a_v_distance / 1000) < d_2)

            d_inf = d_1; d_sup = d_2; d_index_inf = i; d_index_sup = i+1;
            d_interp = true;

        end

    end

    h_1_vec = [10 20 37.5 75 150 300 600 1200];

    for i = 1:(length(h_1_vec)-1)

        h_1_vec_1 = h_1_vec(i);
        h_1_vec_2 = h_1_vec(i+1);

        if h_1 == h_1_vec_1

            h_1_interp = false; h_1 = h_1_vec; h_1_index = i+1;

        elseif h_1 == h_1_vec_2

            h_1_interp = false; h_1 = h_2_vec; h_1_index = i+2;

        elseif h_1 > 1200

```

```

        h_1_inf = 600; h_1_sup = 1200;
        h_1_index_inf = 8; h_1_index_sup = 9; h_1_interp = true;

    elseif (h_1 > h_1_vec_1) && (h_1 < h_1_vec_2)

        h_1_inf = h_1_vec_1; h_1_sup = h_1_vec_2;
        h_1_index_inf = i+1; h_1_index_sup = i+2; h_1_interp = true;

    elseif h_1 < 10

        h_1_interp = true; h_1_index_inf = 2; h_1_index_sup = 2;

    end
end

%A három változóból (d,h_1,f) adódó nyolc különböző eset
%kezelése, 1%-os idővalószínűséggel (bővítési lehetőség!)

if d_interp == false && h_1_interp == false && f_interp == false

    if f_a == 100e6 %100 MHz-es görbék
        E = PC100mhz1t(d_index,h_1_index);
    elseif f_a == 600e6 %600MHz-es görbék
        E = PC600mhz1t(d_index,h_1_index);
    elseif f_a == 2000e6 %2GHz-es görbék
        E = PC2ghz1t(d_index,h_1_index);
    end

elseif d_interp == false && h_1_interp == false && f_interp == true

    if f_inf == 100 && f_sup == 600
        E_inf = PC100mhz1t(d_index,h_1_index);
        E_sup = PC600mhz1t(d_index,h_1_index);
    elseif f_inf == 600 && f_sup == 2000
        E_inf = PC600mhz1t(d_index,h_1_index);
        E_sup = PC2ghz(d_index,h_1_index);
    end

    E = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf);

elseif d_interp == false && h_1_interp == true && f_interp == false

    if f_a == 100e6
        if (h_1 >= 10) && (h_1 <= 3000)
            E_inf = PC100mhz1t(d_index,h_1_index_inf);
            E_sup = PC100mhz1t(d_index,h_1_index_sup);

            E = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(h_1/h_1_inf)/log10(h_1_sup/h_1_inf);
        elseif (h_1 >= 0) && (h_1 < 10)
            d_h = 4.1*sqrt(h_1);
            if (a_v_distance/1000) < d_h
                E = interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),4.1*sqrt(10)) + ...
                    interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),(a_v_distance/1000)) - ...
                    interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),d_h);
            elseif (a_v_distance/1000) >= d_h
                d_sum = 4.1*sqrt(10) + (a_v_distance/1000) - d_h;
                if d_sum <= 1000
                    E = interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),d_sum);
                elseif d_sum > 1000
                    E_inf = PC100mhz1t(77,2);
                    E_sup = PC100mhz1t(78,2);
                    E = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(d_sum/PC_dist(77)) / ...
                        log10(PC_dist(78)/PC_dist(77));
                end
            end
        end
    elseif f_a == 600e6
        if (h_1 >= 10) && (h_1 <= 3000)
            E_inf = PC600mhz1t(d_index,h_1_index_inf);
            E_sup = PC600mhz1t(d_index,h_1_index_sup);

```

```

        E = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(h_1/h_1_inf)/log10(h_1_sup/h_1_inf);
    elseif (h_1 >= 0) && (h_1 < 10)
        d_h = 4.1*sqrt(h_1);
        if (a_v_distance/1000) < d_h
            E = interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),4.1*sqrt(10)) + ...
                interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),(a_v_distance/1000)) - ...
                interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),d_h);
        elseif (a_v_distance/1000) >= d_h
            d_sum = 4.1*sqrt(10) + (a_v_distance/1000) - d_h;
            if d_sum <= 1000
                E = interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),d_sum);
            elseif d_sum > 1000
                E_inf = PC600mhz1t(77,2);
                E_sup = PC600mhz1t(78,2);
                E = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(d_sum/PC_dist(77)) / ...
                    log10(PC_dist(78)/PC_dist(77));
            end
        end
    end
end
elseif f_a == 2000e6
    if (h_1 >= 10) && (h_1 <= 3000)
        E_inf = PC2ghz1t(d_index,h_1_index_inf);
        E_sup = PC2ghz1t(d_index,h_1_index_sup);

        E = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(h_1/h_1_inf)/log10(h_1_sup/h_1_inf);
    elseif (h_1 >= 0) && (h_1 < 10)
        d_h = 4.1*sqrt(h_1);
        if (a_v_distance/1000) < d_h
            E = interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),4.1*sqrt(10)) + ...
                interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),(a_v_distance/1000)) - ...
                interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),d_h);
        elseif (a_v_distance/1000) >= d_h
            d_sum = 4.1*sqrt(10) + (a_v_distance/1000) - d_h;
            if d_sum <= 1000
                E = interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),d_sum);
            elseif d_sum > 1000
                E_inf = PC2ghz1t(77,2);
                E_sup = PC2ghz1t(78,2);
                E = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(d_sum/PC_dist(77)) / ...
                    log10(PC_dist(78)/PC_dist(77));
            end
        end
    end
end
end
elseif d_interp == false && h_1_interp == true && f_interp == true

    if f_inf == 100 && f_sup == 600
        if (h_1 >= 10) && (h_1 <= 3000)
            E_inf = PC100mhz1t(d_index,h_1_index_inf);
            E_sup = PC100mhz1t(d_index,h_1_index_sup);

            E_inf_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(h_1/h_1_inf)/log10(h_1_sup/h_1_inf);
        elseif (h_1 >= 0) && (h_1 < 10)
            d_h = 4.1*sqrt(h_1);
            if (a_v_distance/1000) < d_h
                E_inf_f = interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),4.1*sqrt(10)) + ...
                    interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),(a_v_distance/1000)) - ...
                    interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),d_h);
            elseif (a_v_distance/1000) >= d_h
                d_sum = 4.1*sqrt(10) + (a_v_distance/1000) - d_h;
                if d_sum <= 1000
                    E = interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),d_sum);
                elseif d_sum > 1000
                    E_inf = PC100mhz1t(77,2);
                    E_sup = PC100mhz1t(78,2);
                    E_inf_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(d_sum/PC_dist(77)) / ...
                        log10(PC_dist(78)/PC_dist(77));
                end
            end
        end
    end
end
if (h_1 >= 10) && (h_1 <= 3000)

```

```

E_inf = PC600mhz1t(d_index,h_1_index_inf);
E_sup = PC600mhz1t(d_index,h_1_index_sup);

E_sup_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(h_1/h_1_inf)/log10(h_1_sup/h_1_inf);
elseif (h_1 >= 0) && (h_1 < 10)
    d_h = 4.1*sqrt(h_1);
    if (a_v_distance/1000) < d_h
        E_sup_f = interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),4.1*sqrt(10)) + ...
            interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),(a_v_distance/1000)) - ...
            interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),d_h);
    elseif (a_v_distance/1000) >= d_h
        d_sum = 4.1*sqrt(10) + (a_v_distance/1000) - d_h;
        if d_sum <= 1000
            E_sup_f = interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),d_sum);
        elseif d_sum > 1000
            E_inf = PC600mhz1t(77,2);
            E_sup = PC600mhz1t(78,2);
            E_sup_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(d_sum/PC_dist(77)) / ...
                log10(PC_dist(78)/PC_dist(77));
        end
    end
end

E = E_inf_f + (E_sup_f-E_inf_f)*log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf);

elseif f_inf == 600 && f_sup == 2000
    if (h_1 >= 10) && (h_1 <= 3000)
        E_inf = PC600mhz1t(d_index,h_1_index_inf);
        E_sup = PC600mhz1t(d_index,h_1_index_sup);

        E_inf_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(h_1/h_1_inf)/log10(h_1_sup/h_1_inf);
    elseif (h_1 >= 0) && (h_1 < 10)
        d_h = 4.1*sqrt(h_1);
        if (a_v_distance/1000) < d_h
            E_inf_f = interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),4.1*sqrt(10)) + ...
                interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),(a_v_distance/1000)) - ...
                interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),d_h);
        elseif (a_v_distance/1000) >= d_h
            d_sum = 4.1*sqrt(10) + (a_v_distance/1000) - d_h;
            if d_sum <= 1000
                E_inf_f = interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),d_sum);
            elseif d_sum > 1000
                E_inf = PC600mhz1t(77,2);
                E_sup = PC600mhz1t(78,2);
                E_inf_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(d_sum/PC_dist(77)) / ...
                    log10(PC_dist(78)/PC_dist(77));
            end
        end
    end
end

if (h_1 >= 10) && (h_1 <= 3000)
    E_inf = PC2ghz1t(d_index,h_1_index_inf);
    E_sup = PC2ghz1t(d_index,h_1_index_sup);

    E_sup_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(h_1/h_1_inf)/log10(h_1_sup/h_1_inf);
elseif (h_1 >= 0) && (h_1 < 10)
    d_h = 4.1*sqrt(h_1);
    if (a_v_distance/1000) < d_h
        E_sup_f = interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),4.1*sqrt(10)) + ...
            interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),(a_v_distance/1000)) - ...
            interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),d_h);
    elseif (a_v_distance/1000) >= d_h
        d_sum = 4.1*sqrt(10) + (a_v_distance/1000) - d_h;
        if d_sum <= 1000
            E_sup_f = interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),d_sum);
        elseif d_sum > 1000
            E_inf = PC2ghz1t(77,2);
            E_sup = PC2ghz1t(78,2);
            E_sup_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(d_sum/PC_dist(77)) / ...
                log10(PC_dist(78)/PC_dist(77));
        end
    end
end
end
end

```

```

end

E = E_inf_f + (E_sup_f-E_inf_f)*log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf);

elseif d_interp == true && h_1_interp == false && f_interp == false

    if f_a == 100e6
        E_inf = PC100mhz1t(d_index_inf,h_1_index);
        E_sup = PC100mhz1t(d_index_sup,h_1_index);
    elseif f_a == 600e6
        E_inf = PC600mhz1t(d_index_inf,h_1_index);
        E_sup = PC600mhz1t(d_index_sup,h_1_index);
    elseif f_a == 2000e6
        E_inf = PC2ghz(d_index_inf,h_1_index);
        E_sup = PC2ghz(d_index_sup,h_1_index);
    end

    E = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

elseif d_interp == true && h_1_interp == false && f_interp == true

    if f_inf == 100 && f_sup == 600
        E_inf = PC100mhz1t(d_index_inf,h_1_index);
        E_sup = PC100mhz1t(d_index_sup,h_1_index);
        E_inf_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

        E_inf = PC600mhz1t(d_index_inf,h_1_index);
        E_sup = PC600mhz1t(d_index_sup,h_1_index);
        E_sup_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);
    elseif f_inf == 600 && f_sup == 2000
        E_inf = PC600mhz1t(d_index_inf,h_1_index);
        E_sup = PC600mhz1t(d_index_sup,h_1_index);
        E_inf_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

        E_inf = PC2ghz1t(d_index_inf,h_1_index);
        E_sup = PC2ghz1t(d_index_sup,h_1_index);
        E_sup_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);
    end

    E = E_inf_f + (E_sup_f-E_inf_f)*log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf);

elseif d_interp == true && h_1_interp == true && f_interp == false

    if f_a == 100e6
        E_inf = PC100mhz1t(d_index_inf,h_1_index_inf);
        E_sup = PC100mhz1t(d_index_sup,h_1_index_inf);

        E_inf_h_1 = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

        E_inf = PC100mhz1t(d_index_inf,h_1_index_sup);
        E_sup = PC100mhz1t(d_index_sup,h_1_index_sup);

        E_sup_h_1 = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

    if (h_1 >= 10) && (h_1 <= 3000)
        E = E_inf_h_1 + (E_sup_h_1-E_inf_h_1)*log10(h_1/h_1_inf)/log10(h_1_sup/h_1_inf);
    elseif (h_1 >= 0) && (h_1 < 10)
        d_h = 4.1*sqrt(h_1);
        if (a_v_distance/1000) < d_h
            E = interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),4.1*sqrt(10)) + ...
                interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),(a_v_distance/1000)) - ...
                interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),d_h);
        elseif (a_v_distance/1000) >= d_h
            d_sum = 4.1*sqrt(10) + (a_v_distance/1000) - d_h;
            if d_sum <= 1000
                E = interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),d_sum);
            elseif d_sum > 1000
                E_inf = PC100mhz1t(77,2);
                E_sup = PC100mhz1t(78,2);
                E = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(d_sum/PC_dist(77)) / ...
                    log10(PC_dist(78)/PC_dist(77));
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end

elseif f_a == 600e6
    E_inf = PC600mhz1t(d_index_inf,h_1_index_inf);
    E_sup = PC600mhz1t(d_index_sup,h_1_index_inf);

    E_inf_h_1 = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

    E_inf = PC600mhz1t(d_index_inf,h_1_index_sup);
    E_sup = PC600mhz1t(d_index_sup,h_1_index_sup);

    E_sup_h_1 = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

    if (h_1 >= 10) && (h_1 <= 3000)
        E = E_inf_h_1 + (E_sup_h_1-E_inf_h_1)*log10(h_1/h_1_inf)/log10(h_1_sup/h_1_inf);
    elseif (h_1 >= 0) && (h_1 < 10)
        d_h = 4.1*sqrt(h_1);
        if (a_v_distance/1000) < d_h
            E = interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),4.1*sqrt(10)) + ...
                interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),(a_v_distance/1000)) - ...
                interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),d_h);
        elseif (a_v_distance/1000) >= d_h
            d_sum = 4.1*sqrt(10) + (a_v_distance/1000) - d_h;
            if d_sum <= 1000
                E = interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),d_sum);
            elseif d_sum > 1000
                E_inf = PC600mhz1t(77,2);
                E_sup = PC600mhz1t(78,2);
                E = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(d_sum/PC_dist(77)) / ...
                    log10(PC_dist(78)/PC_dist(77));
            end
        end
    end
end

elseif f_a == 2000e6
    E_inf = PC2ghz1t(d_index_inf,h_1_index_inf);
    E_sup = PC2ghz1t(d_index_sup,h_1_index_inf);

    E_inf_h_1 = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

    E_inf = PC2ghz1t(d_index_inf,h_1_index_sup);
    E_sup = PC2ghz1t(d_index_sup,h_1_index_sup);

    E_sup_h_1 = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);
    if (h_1 >= 10) && (h_1 <= 3000)
        E = E_inf_h_1 + (E_sup_h_1-E_inf_h_1)*log10(h_1/h_1_inf)/log10(h_1_sup/h_1_inf);
    elseif (h_1 >= 0) && (h_1 < 10)
        d_h = 4.1*sqrt(h_1);
        if (a_v_distance/1000) < d_h
            E = interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),4.1*sqrt(10)) + ...
                interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),(a_v_distance/1000)) - ...
                interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),d_h);
        elseif (a_v_distance/1000) >= d_h
            d_sum = 4.1*sqrt(10) + (a_v_distance/1000) - d_h;
            if d_sum <= 1000
                E = interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),d_sum);
            elseif d_sum > 1000
                E_inf = PC2ghz1t(77,2);
                E_sup = PC2ghz1t(78,2);
                E = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(d_sum/PC_dist(77)) / ...
                    log10(PC_dist(78)/PC_dist(77));
            end
        end
    end
end

elseif d_interp == true && h_1_interp == true && f_interp == true

    if f_inf == 100 && f_sup == 600
        E_inf = PC100mhz1t(d_index_inf,h_1_index_inf);
        E_sup = PC100mhz1t(d_index_sup,h_1_index_inf);
    end
end

```

```

E_inf_h_1 = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

E_inf = PC100mhz1t(d_index_inf,h_1_index_sup);
E_sup = PC100mhz1t(d_index_sup,h_1_index_sup);

E_sup_h_1 = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

if (h_1 >= 10) && (h_1 <= 3000)
    E_inf_f = E_inf_h_1 + (E_sup_h_1-E_inf_h_1)*log10(h_1/h_1_inf)/log10(h_1_sup/h_1_inf);
elseif (h_1 >= 0) && (h_1 < 10)
    d_h = 4.1*sqrt(h_1);
    if (a_v_distance/1000) < d_h
        E_inf_f = interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),4.1*sqrt(10)) + ...
            interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),(a_v_distance/1000)) - ...
            interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),d_h);
    elseif (a_v_distance/1000) >= d_h
        d_sum = 4.1*sqrt(10) + (a_v_distance/1000) - d_h;
        if d_sum <= 1000
            E_inf_f = interp1(PC_dist,PC100mhz1t(:,2),d_sum);
        elseif d_sum > 1000
            E_inf = PC100mhz1t(77,2);
            E_sup = PC100mhz1t(78,2);
            E_inf_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(d_sum/PC_dist(77)) / ...
                log10(PC_dist(78)/PC_dist(77));
        end
    end
end

E_inf = PC600mhz1t(d_index_inf,h_1_index_inf);
E_sup = PC600mhz1t(d_index_sup,h_1_index_inf);

E_inf_h_1 = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

E_inf = PC600mhz1t(d_index_inf,h_1_index_sup);
E_sup = PC600mhz1t(d_index_sup,h_1_index_sup);

E_sup_h_1 = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

if (h_1 >= 10) && (h_1 <= 3000)
    E_sup_f = E_inf_h_1 + (E_sup_h_1-E_inf_h_1)*log10(h_1/h_1_inf)/log10(h_1_sup/h_1_inf);
elseif (h_1 >= 0) && (h_1 < 10)
    d_h = 4.1*sqrt(h_1);
    if (a_v_distance/1000) < d_h
        E_sup_f = interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),4.1*sqrt(10)) + ...
            interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),(a_v_distance/1000)) - ...
            interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),d_h);
    elseif (a_v_distance/1000) >= d_h
        d_sum = 4.1*sqrt(10) + (a_v_distance/1000) - d_h;
        if d_sum <= 1000
            E_sup_f = interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),d_sum);
        elseif d_sum > 1000
            E_inf = PC600mhz1t(77,2);
            E_sup = PC600mhz1t(78,2);
            E_sup_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(d_sum/PC_dist(77)) / ...
                log10(PC_dist(78)/PC_dist(77));
        end
    end
end

E = E_inf_f + (E_sup_f-E_inf_f)*log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf);

elseif f_inf == 600 && f_sup == 2000

    E_inf = PC600mhz1t(d_index_inf,h_1_index_inf);
    E_sup = PC600mhz1t(d_index_sup,h_1_index_inf);

    E_inf_h_1 = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

    E_inf = PC600mhz1t(d_index_inf,h_1_index_sup);
    E_sup = PC600mhz1t(d_index_sup,h_1_index_sup);

```

```

E_sup_h_1 = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

if (h_1 >= 10) && (h_1 <= 3000)
    E_inf_f = E_inf_h_1 + (E_sup_h_1-E_inf_h_1)*log10(h_1/h_1_inf)/log10(h_1_sup/h_1_inf);
elseif (h_1 >= 0) && (h_1 < 10)
    d_h = 4.1*sqrt(h_1);
    if (a_v_distance/1000) < d_h
        E_inf_f = interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),4.1*sqrt(10)) + ...
            interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),(a_v_distance/1000)) - ...
            interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),d_h);
    elseif (a_v_distance/1000) >= d_h
        d_sum = 4.1*sqrt(10) + (a_v_distance/1000) - d_h;
        if d_sum <= 1000
            E_inf_f = interp1(PC_dist,PC600mhz1t(:,2),d_sum);
        elseif d_sum > 1000
            E_inf = PC600mhz1t(77,2);
            E_sup = PC600mhz1t(78,2);
            E_inf_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(d_sum/PC_dist(77)) / ...
                log10(PC_dist(78)/PC_dist(77));
        end
    end
end

E_inf = PC2ghz1t(d_index_inf,h_1_index_inf);
E_sup = PC2ghz1t(d_index_sup,h_1_index_inf);

E_inf_h_1 = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

E_inf = PC2ghz1t(d_index_inf,h_1_index_sup);
E_sup = PC2ghz1t(d_index_sup,h_1_index_sup);

E_sup_h_1 = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10((a_v_distance/1000)/d_inf)/log10(d_sup/d_inf);

if (h_1 >= 10) && (h_1 <= 3000)
    E_sup_f = E_inf_h_1 + (E_sup_h_1-E_inf_h_1)*log10(h_1/h_1_inf)/log10(h_1_sup/h_1_inf);
elseif (h_1 >= 0) && (h_1 < 10)
    d_h = 4.1*sqrt(h_1);
    if (a_v_distance/1000) < d_h
        E_sup_f = interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),4.1*sqrt(10)) + ...
            interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),(a_v_distance/1000)) - ...
            interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),d_h);
    elseif (a_v_distance/1000) >= d_h
        d_sum = 4.1*sqrt(10) + (a_v_distance/1000) - d_h;
        if d_sum <= 1000
            E_sup_f = interp1(PC_dist,PC2ghz1t(:,2),d_sum);
        elseif d_sum > 1000
            E_inf = PC2ghz1t(77,2);
            E_sup = PC2ghz1t(78,2);
            E_sup_f = E_inf + (E_sup-E_inf)*log10(d_sum/PC_dist(77)) / ...
                log10(PC_dist(78)/PC_dist(77));
        end
    end
end

E = E_inf_f + (E_sup_f-E_inf_f)*log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf);

end
end
if f_a < 100e6

    f_inf = 100; f_sup = 600; f_interp = true;

elseif f_a > 2000e6

    f_inf = 600; f_sup = 2000; f_interp = true;

elseif (f_a > 100e6) && (f_a < 600e6)

    f_inf = 100; f_sup = 600; f_interp = true;

elseif (f_a > 600e6) && (f_a < 2000e6)

```

```

    f_inf = 600; f_sup = 2000; f_innerrp = true;

elseif f_a == 100e6 || f_a == 600e6 || f_a == 2000e6

    f_interp = false;

end

%Távolság meghatározása

for i = 1:(length(PC_dist)-1)

    d_1 = PC_dist(i);
    d_2 = PC_dist(i+1);

    if a_v_distance / 1000 == d_1

        d_interp = false; d = d_1; d_index = i;

    elseif a_v_distance / 1000 == d_2

        d_interp = false; d = d_2; d_index = i+1;

    elseif ((a_v_distance / 1000) > d_1) && ((a_v_distance / 1000) < d_2)

        d_inf = d_1; d_sup = d_2; d_index_inf = i; d_index_sup = i+1;
        d_interp = true;

    end

end

h_1_vec = [10 20 37.5 75 150 300 600 1200];

for i = 1:(length(h_1_vec)-1)

    h_1_vec_1 = h_1_vec(i);
    h_1_vec_2 = h_1_vec(i+1);

    if h_1 == h_1_vec_1

        h_1_interp = false; h_1 = h_1_vec; h_1_index = i+1;

    elseif h_1 == h_1_vec_2

        h_1_interp = false; h_1 = h_2_vec; h_1_index = i+2;

    elseif h_1 > 1200

        h_1_inf = 600; h_1_sup = 1200;
        h_1_index_inf = 8; h_1_index_sup = 9; h_1_interp = true;

    elseif (h_1 > h_1_vec_1) && (h_1 < h_1_vec_2)

        h_1_inf = h_1_vec_1; h_1_sup = h_1_vec_2;
        h_1_index_inf = i+1; h_1_index_sup = i+2; h_1_interp = true;

    elseif h_1 < 10

        h_1_interp = true; h_1_index_inf = 2; h_1_index_sup = 2;

    end

end

%Korrekciós faktorok használata
%Tereptisztasági szög korrekciós tényezője

if f_inf == 100 && f_sup == 600
    nu = 37.2*theta_tx_rad;
    t_tmp = 20*log10(sqrt((nu-0.1)^2+1)+nu-0.1);
    corr_inf = 9.1-(6.9+t_tmp);
    if theta_tx_deg < 2

```

```

        corr_inf = 0;
    elseif theta_tx_deg > 40
        corr_inf = -35;
    end
    nu = 91.2*theta_tx_rad;
    t_tmp = 20*log10(sqrt((nu-0.1)^2+1)+nu-0.1);
    corr_sup = 13.1-(6.9+t_tmp);
    if theta_tx_deg < 2
        corr_sup = 0;
    elseif theta_tx_deg > 40
        corr_sup = -35;
    end
    if (a_v_distance/1000) <= 16
        corr_inf = corr_inf * (a_v_distance/1000)/16;
        corr_sup = corr_sup * (a_v_distance/1000)/16;
    end

    tca_corr = corr_inf + (corr_sup-corr_inf)/log10((f_a/1e6)/f_inf)*log10(f_sup/f_inf);
elseif f_inf == 600 && f_sup == 2000
    nu = 91.2*theta_tx_rad;
    t_tmp = 20*log10(sqrt((nu-0.1)^2+1)+nu-0.1);
    corr_inf = 13.1-(6.9+t_tmp);
    if theta_tx_deg < 2
        corr_inf = 0;
    elseif theta_tx_deg > 40
        corr_inf = -35;
    end
    nu = 167*theta_tx_rad;
    t_tmp = 20*log10(sqrt((nu-0.1)^2+1)+nu-0.1);
    corr_sup = 17.3-(6.9+t_tmp);
    if theta_tx_deg < 2
        corr_sup = 0;
    elseif theta_tx_deg > 40
        corr_sup = -35;
    end
    if (a_v_distance/1000) <= 16
        corr_inf = corr_inf * (a_v_distance/1000)/16;
        corr_sup = corr_sup * (a_v_distance/1000)/16;
    end

    tca_corr = corr_inf + (corr_sup-corr_inf)/log10((f_a/1e6)/f_inf)*log10(f_sup/f_inf);
end

E = E - tca_corr;

%Terepegyenletlenség korr. tényező meghatározása

dh_vec = corr_factor_100mhz(:,1);
dh_dist = a_v_distance / 1000;

for j = 1:(length(dh_vec)-1)
    dh_1 = dh_vec(j);
    dh_2 = dh_vec(j+1);
    if delta_h == dh_1
        interp_dh = false; dh_index = j;
    elseif delta_h == dh_2
        interp_dh = false; dh_index = j+1;
    elseif delta_h > dh_1 && delta_h < dh_2
        interp_dh = true; dh_inf_index= j; dh_inf = dh_1;
        dh_sup_index = j+1; dh_sup = dh_2;
    end
end

if dh_dist < 10
    dh_corr = 0;
elseif (dh_dist >= 10) && (dh_dist <= 50)
    if f_inf == 100 && f_sup == 600
        if interp_dh == false
            dh_corr_f_inf_d_1 = 0;
            dh_corr_f_inf_d_2 = corr_factor_100mhz(dh_index,2);

            dh_corr_f_sup_d_1 = 0;

```

```

    dh_corr_f_sup_d_2 = corr_factor_600mhz(dh_index,2);

    dh_corr_f_inf = 0 + ((dh_corr_f_inf_d2/40)*(dh_dist-10));
    dh_corr_f_sup = 0 + ((dh_corr_f_sup_d2/40)*(dh_dist-10));

    dh_corr = dh_corr_f_inf + ((dh_corr_f_sup-dh_corr_f_inf)* ...
        log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));
elseif interp_dh == true
    y0inf = 0;
    x0inf = 10;

    y1inf = corr_factor_100mhz(dh_inf_index,2);
    x1inf = 50;

    y0 = y0inf + ((y1inf-y0inf)/(x1inf+x0inf));
    x0 = dh_inf;

    y0sup = 0;
    x0sup = 10;

    y1sup = corr_factor_100mhz(dh_sup_index,2);
    x1sup = 50;

    y1 = y0sup + ((y1sup-y0sup)/(x1sup+x0sup));
    x1 = dh_sup;

    dh_f_inf = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

    y0inf = 0;
    x0inf = 10;

    y1inf = corr_factor_600mhz(dh_inf_index,2);
    x1inf = 50;

    y0 = y0inf + ((y1inf-y0inf)/(x1inf+x0inf));
    x0 = dh_inf;

    y0sup = 0;
    x0sup = 10;

    y1sup = corr_factor_600mhz(dh_sup_index,2);
    x1sup = 50;

    y1 = y0sup + ((y1sup-y0sup)/(x1sup+x0sup));
    x1 = dh_sup;

    dh_f_sup = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

    dh_corr = dh_f_sup + ((dh_f_sup-dh_f_inf)* ...
        log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));
end
elseif f_inf == 600 && f_sup == 2000
    if interp_dh == false
        dh_corr_f_inf_d_1 = 0;
        dh_corr_f_inf_d_2 = corr_factor_600mhz(dh_index,2);

        dh_corr_f_sup_d_1 = 0;
        dh_corr_f_sup_d_2 = corr_factor_2000mhz(dh_index,2);

        dh_corr_f_inf = 0 + ((dh_corr_f_inf_d2/40)*(dh_dist-10));
        dh_corr_f_sup = 0 + ((dh_corr_f_sup_d2/40)*(dh_dist-10));

        dh_corr = dh_corr_f_inf + ((dh_corr_f_sup-dh_corr_f_inf)* ...
            log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));
    elseif interp_dh == true
        y0inf = 0;
        x0inf = 10;

        y1inf = corr_factor_600mhz(dh_inf_index,2);
        x1inf = 50;

        y0 = y0inf + ((y1inf-y0inf)/(x1inf+x0inf));

```

```

x0 = dh_inf;

y0sup = 0;
x0sup = 10;

y1sup = corr_factor_600mhz(dh_sup_index,2);
x1sup = 50;

y1 = y0sup + ((y1sup-y0sup)/(x1sup+x0sup));
x1 = dh_sup;

dh_f_inf = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

y0inf = 0;
x0inf = 10;

y1inf = corr_factor_2000mhz(dh_inf_index,2);
x1inf = 50;

y0 = y0inf + ((y1inf-y0inf)/(x1inf+x0inf));
x0 = dh_inf;

y0sup = 0;
x0sup = 10;

y1sup = corr_factor_2000mhz(dh_sup_index,2);
x1sup = 50;

y1 = y0sup + ((y1sup-y0sup)/(x1sup+x0sup));
x1 = dh_sup;

dh_f_sup = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

dh_corr = dh_f_sup + ((dh_f_sup-dh_f_inf)* ...
    log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));
end
end
elseif dh_dist > 50 && dh_dist < 100
    if f_inf == 100 && f_sup == 600
        if interp_dh == false
            dh_inf = corr_factor_100mhz(dh_index,2);
            dh_sup = corr_factor_600mhz(dh_index,2);

            dh_corr = dh_sup + ((dh_sup-dh_inf)* ...
                log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));
        elseif interp_dh == true
            y0 = corr_factor_100mhz(dh_inf_index,2);
            x0 = dh_inf;

            y1 = corr_factor_100mhz(dh_sup_index,2);
            x1 = dh_sup;

            dh_f_inf = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

            y0 = corr_factor_600mhz(dh_inf_index,2);
            x0 = dh_inf;

            y1 = corr_factor_600mhz(dh_sup_index,2);
            x1 = dh_sup;

            dh_f_sup = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

            dh_corr = dh_f_sup + ((dh_f_sup-dh_f_inf)* ...
                log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));
        end
    elseif f_inf == 600 && f_sup == 2000
        if interp_dh == false
            dh_inf = corr_factor_600mhz(dh_index,2);
            dh_sup = corr_factor_2000mhz(dh_index,2);

            dh_corr = dh_sup + ((dh_sup-dh_inf)* ...
                log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));
        end
    end
end

```

```

elseif interp_dh == true
    y0 = corr_factor_600mhz(dh_inf_index,2);
    x0 = dh_inf;

    y1 = corr_factor_600mhz(dh_sup_index,2);
    x1 = dh_sup;

    dh_f_inf = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

    y0 = corr_factor_2000mhz(dh_inf_index,2);
    x0 = dh_inf;

    y1 = corr_factor_2000mhz(dh_sup_index,2);
    x1 = dh_sup;

    dh_f_sup = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

    dh_corr = dh_f_sup + ((dh_f_sup-dh_f_inf)* ...
        log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));

end
end
elseif dh_dist >= 100 && dh_dist <= 200
    if f_inf == 100 && f_sup == 600
        if interp_dh == false
            dh_corr_f_inf_d_1 = corr_factor_100mhz(dh_index,2);
            dh_corr_f_inf_d_2 = corr_factor_100mhz(dh_index,3);

            dh_corr_f_sup_d_1 = corr_factor_600mhz(dh_index,2);
            dh_corr_f_sup_d_2 = corr_factor_600mhz(dh_index,3);

            dh_corr_f_inf = dh_corr_f_inf_d_1 + ((dh_corr_f_inf_d_2/100)*(dh_dist-100));
            dh_corr_f_sup = dh_corr_f_sup_d_1 + ((dh_corr_f_sup_d_2/100)*(dh_dist-100));

            dh_corr = dh_corr_f_inf + ((dh_corr_f_sup-dh_corr_f_inf)* ...
                log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));
        elseif interp_dh == true
            y0inf = 100;
            x0inf = 200;

            y1inf = corr_factor_100mhz(dh_inf_index,2);
            x1inf = 200;

            y0 = y0inf + ((y1inf-y0inf)/(x1inf+x0inf));
            x0 = dh_inf;

            y0sup = 100;
            x0sup = 200;

            y1sup = corr_factor_100mhz(dh_sup_index,2);
            x1sup = 200;

            y1 = y0sup + ((y1sup-y0sup)/(x1sup+x0sup));
            x1 = dh_sup;

            dh_f_inf = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

            y0inf = 100;
            x0inf = 200;

            y1inf = corr_factor_600mhz(dh_inf_index,2);
            x1inf = 200;

            y0 = y0inf + ((y1inf-y0inf)/(x1inf+x0inf));
            x0 = dh_inf;

            y0sup = 100;
            x0sup = 200;

            y1sup = corr_factor_600mhz(dh_sup_index,2);
            x1sup = 200;

```

```

        y1 = y0sup + ((y1sup-y0sup)/(x1sup+x0sup));
        x1 = dh_sup;

        dh_f_sup = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

        dh_corr = dh_f_sup + ((dh_f_sup-dh_f_inf)* ...
            log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));
    end
elseif f_inf == 600 && f_sup == 2000
    if interp_dh == false
        dh_corr_f_inf_d1 = 100;
        dh_corr_f_inf_d2 = corr_factor_600mhz(dh_index,2);

        dh_corr_f_sup_d1 = 100;
        dh_corr_f_sup_d2 = corr_factor_2000mhz(dh_index,2);

        dh_corr_f_inf = 100 + ((dh_corr_f_inf_d2/40)*(dh_dist-10));
        dh_corr_f_sup = 100 + ((dh_corr_f_sup_d2/40)*(dh_dist-10));

        dh_corr = dh_corr_f_inf + ((dh_corr_f_sup-dh_corr_f_inf)* ...
            log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));
    elseif interp_dh == true
        y0inf = 100;
        x0inf = 200;

        y1inf = corr_factor_600mhz(dh_inf_index,2);
        x1inf = 200;

        y0 = y0inf + ((y1inf-y0inf)/(x1inf+x0inf));
        x0 = dh_inf;

        y0sup = 100;
        x0sup = 200;

        y1sup = corr_factor_600mhz(dh_sup_index,2);
        x1sup = 200;

        y1 = y0sup + ((y1sup-y0sup)/(x1sup+x0sup));
        x1 = dh_sup;

        dh_f_inf = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

        y0inf = 100;
        x0inf = 200;

        y1inf = corr_factor_2000mhz(dh_inf_index,2);
        x1inf = 200;

        y0 = y0inf + ((y1inf-y0inf)/(x1inf+x0inf));
        x0 = dh_inf;

        y0sup = 100;
        x0sup = 200;

        y1sup = corr_factor_2000mhz(dh_sup_index,2);
        x1sup = 200;

        y1 = y0sup + ((y1sup-y0sup)/(x1sup+x0sup));
        x1 = dh_sup;

        dh_f_sup = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

        dh_corr = dh_f_sup + ((dh_f_sup-dh_f_inf)* ...
            log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));
    end
end
elseif dh_dist > 200
    if f_inf == 100 && f_sup == 600
        if interp_dh == false
            dh_inf = corr_factor_100mhz(dh_index,2);
            dh_sup = corr_factor_600mhz(dh_index,2);

```

```

        dh_corr = dh_sup + ((dh_sup-dh_inf)* ...
            log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));
    elseif interp_dh == true
        y0 = corr_factor_100mhz(dh_inf_index,2);
        x0 = dh_inf;

        y1 = corr_factor_100mhz(dh_sup_index,2);
        x1 = dh_sup;

        dh_f_inf = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

        y0 = corr_factor_600mhz(dh_inf_index,2);
        x0 = dh_inf;

        y1 = corr_factor_600mhz(dh_sup_index,2);
        x1 = dh_sup;

        dh_f_sup = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

        dh_corr = dh_f_sup + ((dh_f_sup-dh_f_inf)* ...
            log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));
    end
elseif f_inf == 600 && f_sup == 2000
    if interp_dh == false
        dh_inf = corr_factor_600mhz(dh_index,2);
        dh_sup = corr_factor_2000mhz(dh_index,2);

        dh_corr = dh_sup + ((dh_sup-dh_inf)* ...
            log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));
    elseif interp_dh == true
        y0 = corr_factor_600mhz(dh_inf_index,2);
        x0 = dh_inf;

        y1 = corr_factor_600mhz(dh_sup_index,2);
        x1 = dh_sup;

        dh_f_inf = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

        y0 = corr_factor_2000mhz(dh_inf_index,2);
        x0 = dh_inf;

        y1 = corr_factor_2000mhz(dh_sup_index,2);
        x1 = dh_sup;

        dh_f_sup = y0 + (((y1-y0)/(x1-x0))*(delta_h-x0));

        dh_corr = dh_f_sup + ((dh_f_sup-dh_f_inf)* ...
            log10((f_a/1e6)/f_inf)/log10(f_sup/f_inf));
    end
end
end
end

E = E - dh_corr;

E_matrix(o,p) = E;
if E >= 0
    E_matrix_suly(o,p) = E * tx_point(o,p);
else
    E_matrix_suly(o,p) = E + (E * tx_point(o,p));
end
disp([E_matrix(o,p) E_matrix_suly(o,p)]);
E_matrix_suly_ketto(o,p) = E * tx_point(o,p);
disp([fresnel_clearness_tx a_v_distance]);
end

disp([o p]);
end
end
toc;

```