

Alkalmazásorientált EMC/EMI dekompozíciós eljárás és interferencia - elimináló módszer

Írta:

DROTÁR ISTVÁN

Okleveles Villamosmérnök

Témavezető:

PROF. DR. KUCZMANN MIKLÓS, D.SC.

Egyetemi tanár

Széchenyi István Egyetem, Automatizálási Tanszék



PH.D. DOKTORI TÉZISEK

SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM
INFRASTRUKTÚRÁLIS RENDSZEREK MODELLEZÉSE ÉS FEJLESZTÉSE
MULTIDISZCIPLINÁRIS MŰSZAKI TUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

Győr

2022

1 Felvetés

Az elektromágneses kompatibilitás (electromagnetic compatibility, EMC) és elektromágneses interferencia (electromagnetic interference, EMI) témája különböző szempontokból érinti a műszaki rendszereket, egyrészt interdiszciplináris szinten, másrészt a megvalósítás különböző fázisaiban. Ezért az EMC/EMI területén végzett munka a tevékenységek széles skáláját öleli fel, mint pl. tanácsadás és támogatás egy projekt során vagy a képzés és a szabványosítás, amelyek alapvetően nem az EMC/EMI-re jellemző feladatokat jelentenek, mindazonáltal fontos szerepet játszanak. Végül pedig vannak olyan tevékenységek, amelyek technikai jellegűek, mint például a kísérleti és gyakorlati, valós körülmények közötti mérések vagy a numerikus szimulációk.

Az EMC/EMI terület egyik legfontosabb tevékenysége maga az EMC/EMI-elemzés, mivel adott fizikai környezetben nagyszámú, különböző célú és specifikációjú rádióberendezésnek kell működnie, a rádiófrekvenciás spektrum minél hatékonyabb kihasználása mellett, egymás észrevehető zavarása nélkül. Ez egy olyan helyzet leírását és vizsgálatát jelenti, amelyben fizikai mechanizmusok káros elektromágneses interferenciát okozhatnak. Ezért az EMC-elemzés általános fogalomnak tekinthető adott környezetben egy általános zavarettel kapcsolatban (a különféle megközelítések vagy módszerek alkalmazása, annak ellenőrzése, bizonyítása vagy értékelése érdekében), hogy az állandóan jelen lévő elektromágneses zavarok kezelése biztosítva van-e.

1.1 A numerikus szimulációs módszerek spektruma

Az EMC/EMI problémák egy része feloldásának egyik eszköze a szimuláció, amelyre numerikus módszerek nagy választéka létezik [2-11]. Mindegyik megközelítésnek megvannak a maga sajátos előnyei, és a konkrét problémára való kiválasztás a probléma körülményeitől függ, például a nemlinearitás figyelembevételének szükségességétől vagy a szélessávú elemzés szükségességétől. Ezért fontos, hogy a módszer kiválasztása előtt előzetesen meghatározzuk a modell célját.

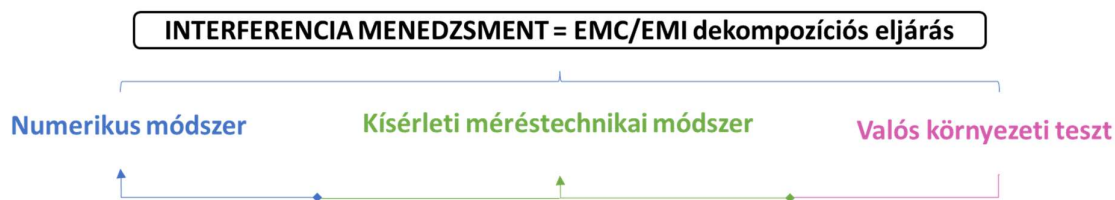
Alapvetően megállapítható, hogy az elmúlt évek során a numerikus módszerek folyamatosan fejlődtek, és szinte minden EMC vagy EMI eset kezelhető ilyen szimulációkkal. Előfordulhat azonban, hogy a kiválasztott módszer nem képes egy interferenciaeset minden aspektusának vizsgálatára, és több különböző módszert kell alkalmazni. A fennmaradó kihívást gyakran az

jelenti, hogy meg kell találni a legmegfelelőbb és leghatékonyabb módszert egy konkrét probléma kezelésére, és meg kell találni a módszer felhasználóbarát megvalósítását, akár kísérleti, akár valós mérés technikai módszereket bevetve, azokkal kiegészülve.

1.2 Kísérleti mérések, mérés technika

A legújabb biztonsági fenyegetések, a növekvő órajel sebességek, a zsúfolt frekvenciaspektrum és a nyomtatott áramköri lapokon lévő nagyobb eszközsűrűség miatt az elektronikus rendszerek EMC/EMI-elemzése nagyon fontossá vált az elmúlt években [15].

Ezen okok miatt a nemzetközi szabályozó szervek bizonyos EMC/EMI előírásokat hoztak létre mind a kereskedelmi, mind a nem polgári felhasználásra [1]. Ezek az előírások meghatározzák az elektronikus eszközök EMI-kibocsátásának határértékeit, valamint a közeli rendszerekből származó EMI-vel szembeni érzékenységet. Ha egy termék nem felel meg ezeknek az EMC/EMI előírásoknak, az a problémás alkatrészek felkutatásának fáradságos hibakeresését eredményezi. Következésképpen a tervezés utáni javítások és néha a termék teljes újratervezése szükséges. Ezek a tényezők késleltetik a termék piacra lépését és gazdasági veszteséget okoznak a gyártóknak. Ezért kívánatos, hogy olyan mérés technikai eszközökkel is rendelkezünk (1. ábra), amelyek hatékonyan és pontosan képesek az EMC/EMI-elemzést elvégezni.



1. ábra Az általam felállított EMC/EMI dekompozíciós protokoll fő elemei az interferencia-elimináció eléréséhez. Kutatási tevékenységem során ezen lépések kerülnek részletezésre.

2 Alkalmazott módszerek a komplex elektronikus rendszerek EMC/EMI-elemzéséhez

A numerikus szimulációk hatékony módszert jelentenek az interferenciaproblémák vizsgálatára. Az utóbbi időben képességük elérte azt a szintet, amely lehetővé teszi a kereskedelmi műszaki projektek végrehajtása során a gyakorlatban felmerülő problémák kezelését. Mindazonáltal a numerikus szimulációk alkalmazásához és a szimulációs programok felhasználásához számos kihívás kapcsolódik. Egy különleges feltétel az EMC/EMI-problémák és a rendszer egyéb műszaki szempontjai vagy peremfeltételei közötti kölcsönhatásokból adódik. Az ilyen kölcsönhatások programokon belüli figyelembevétele várhatóan a mindennapi ipari munkára alkalmas, nagyobb teljesítményű programokhoz vezet és egyúttal új megfontolás szerinti vizsgálat, elemzési eljárást tesz szükségessé (dekompozíciós protokoll).

2.1 Az EMC/EMI tesztkamrák wavelet-alapú modellezése

A gyakran változó, különböző méretű vizsgálandó eszközök esetében előnyös lehet egy olyan modell, amelyben az adaptivitás beépített tulajdonság. A wavelet-alapú differenciálegyenlet-megoldók képesek adaptivitást biztosítani [12,13,14]: ha a megoldás nem elég pontos, a már meglévő megoldásokhoz új felbontási szintek adhatók hozzá, így javítva az eredményt.

Dolgozatomban ezért bemutatásra kerül a wavelet-elmélet, a wavelet-alapú differenciálegyenlet-megoldó módszerek és a FAC tesztkamrákban megjelenő állóhullámok megoldójának egydimenziós előfutára.

2.2 FAC kamrák 3D FEM modellezése –validációs módszeren keresztül

A mai elektronikus eszközök sok alkatrészt tartalmaznak, köztük processzorokat, FPGA-kat (Field-Programmable Gate Array, a felhasználás helyén programozható logikai kapumátrix), tápegységeket és nagysebességű kommunikációs buszokat. Mindezek az alkatrészek azonban viszonylag alacsony feszültség szinten működnek, ezért gyakran válhatnak elektromágneses interferencia áldozatává. Ennek egyik forrása a nagysebességű adatátvitel. Ezen okok miatt a megfelelő szintű EMC/EMI-t támogató elektronikus eszközök egyik része az elektromágneses

árnyékolás, amelynek minőségét az árnyékolás hatékonysága (Shielding Effectiveness, SE) kifejezése írja le. Léteznek szabványok az *SE* mérésére, de ezek a szabványok nem tartják tiszteletben a jelenlegi tendenciát - az eszközméretetek csökkenését.

A kérdés az, hogyan lehet mérni ilyen esetben az *SE*-t:

- a mérőantenna mérete a hullámhossztól függ, és ezt az antennát az árnyékoló burkolatok belsejében kell elhelyezni,
- ha ez nem lehetséges, numerikus vagy analitikus módszereket lehet alkalmazni.

A numerikus módszerek itt jól használhatók, mert a modell geometriája könnyen változtatható.

2.3 Kísérleti mérés

A szimulációs módszerek és szoftverek használata egyre fontosabbá válik a tesztelési idő és a fejlesztési költségek csökkentése miatt. A megfelelő szimulációs eredmények eléréséhez fejlett modellekre és szoftveres eszközökre van szükség. A szimuláció kiértékelése és a modell finomhangolását követően létrehozható az első prototípus, amelyen vizsgálatok végezhetők. A szimulációs és mérési eredmények összehasonlítása után több lehetőség is van [10]:

- tovább hangoljuk a modellt, hogy a termék az elvártaknak megfelelő paraméterekkel rendelkezzen;
- modell teljes átdolgozása (abban az esetben, ha a szimulációs és mérési eredmények drasztikusan eltérnek egymástól);
- ha a mért eredmények megfelelő mértékben közelítenek az elvártakhoz, akkor a modell véglegesítése.

A konkrét terméken, berendezésen kívül vizsgálati módszereket, modelleket is lehet kidolgozni szimulációs környezetben. Ezeket a módszereket és modelleket pedig később mérés technikai módszerekkel lehet pontosítani, validálni.

Ezzel a folyamattal jelentősen csökkenthető a prototípus verziók és a szükséges mérések száma, amely jelentős erőforrás megtakarítást realizál a fejlesztőknek.

Tekintve a célt és a fent említett lehetőségeket az elméleti- és szimulációs módszereket kísérleti mérésekkel/mérés technikai módszerekkel célszerű kiegészíteni, amelyek egy megfelelő (akkreditált) környezetben a hatályos direktívák, az azok alá tartozó szabványok, továbbá a reprodukálhatóság és a minőségirányítási rendszer peremfeltételei miatt az eredmények hitelességét biztosítják.

3 EMC/EMI dekompozíciós protokoll megfeleltetése numerikus- és kísérleti mérés technikai környezetben

Kutatási tevékenységem egyik feltevése, hogy létezik közös metszete a szimulációs technika és a kísérleti mérések módszertanának. Közös alkalmazásával előáll egy olyan állapot, amely során a két módszer eredményeiben azonosság áll elő. Ennek eredménye megmutatkozhat egyrészt a kutatási- és fejlesztési folyamatok lépcsőfokainak rövidítésében, másrészt pontosabb céleredmény érhető el a két módszertan azonos eredményeinek köszönhetően az így végzett fejlesztés, tervezése során.

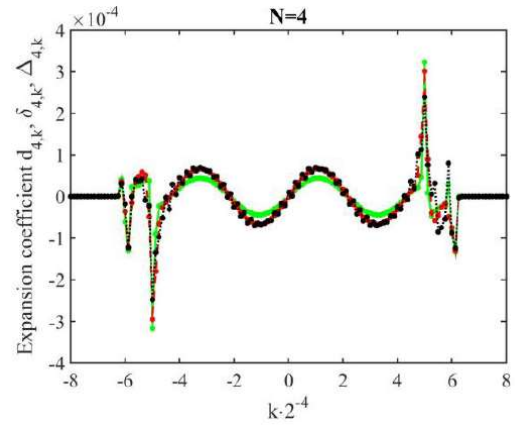
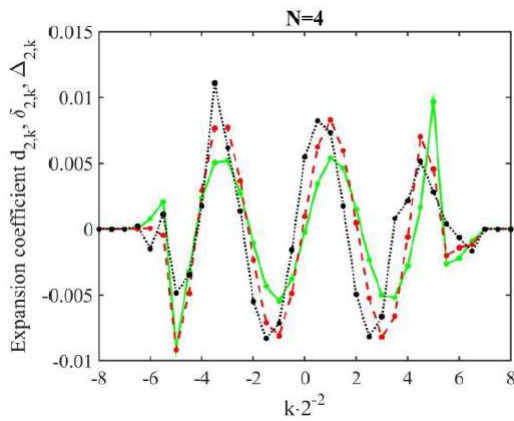
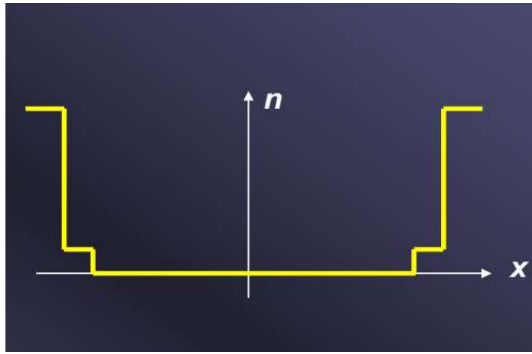
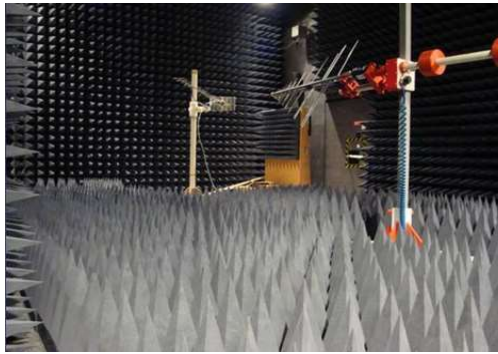
Bemutatok egy új, saját fejlesztésű EMC/EMI elemzési protokollt, annak első két lépését és eredményeinek egymással való megfeleltetését. A stabil elméleti és gyakorlati alapra felépített protokoll esetén a megfeleltetéstől azt várom, hogy mind a numerikus módszertani eredmények, majd az arra épített ellenőrző-, kísérleti- és akkreditált környezeti „validációs„ mérések eredményei korreálnak egymással. Ezzel bizonyítani tudom a kapcsolódó tézisem.

3.1 Eredmények összegzése

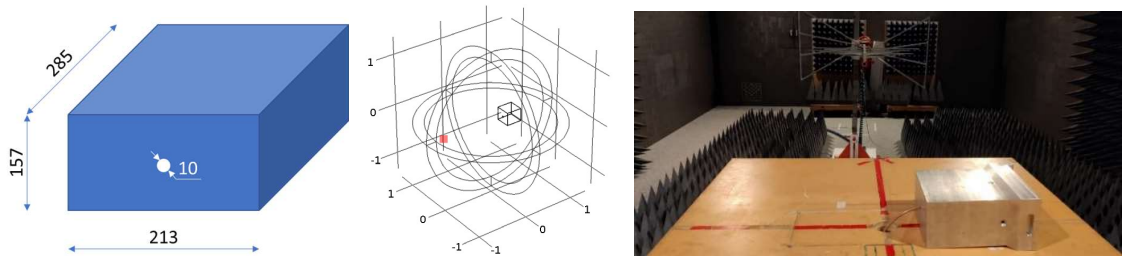
A bemutatott eredményeim azt mutatják, hogy az egyszerűsített wavelet alapú megközelítés jó megközelítést nyújt egy FAC kamra teljesítményének becslésére (2. ábra).

Ezt a megközelítést az akkreditált környezettel való összehasonlítással validáltam. A kísérleti méréseket a győri Széchenyi István Egyetem akkreditált Rádiófrekvenciás Vizsgáló Laboratóriumának teljesen reflexiómentesített mérőkamrájában végeztem, amely az antenna és a vizsgált eszköz közötti 3 m-es távolságban végzett mérések mérőeszköze.

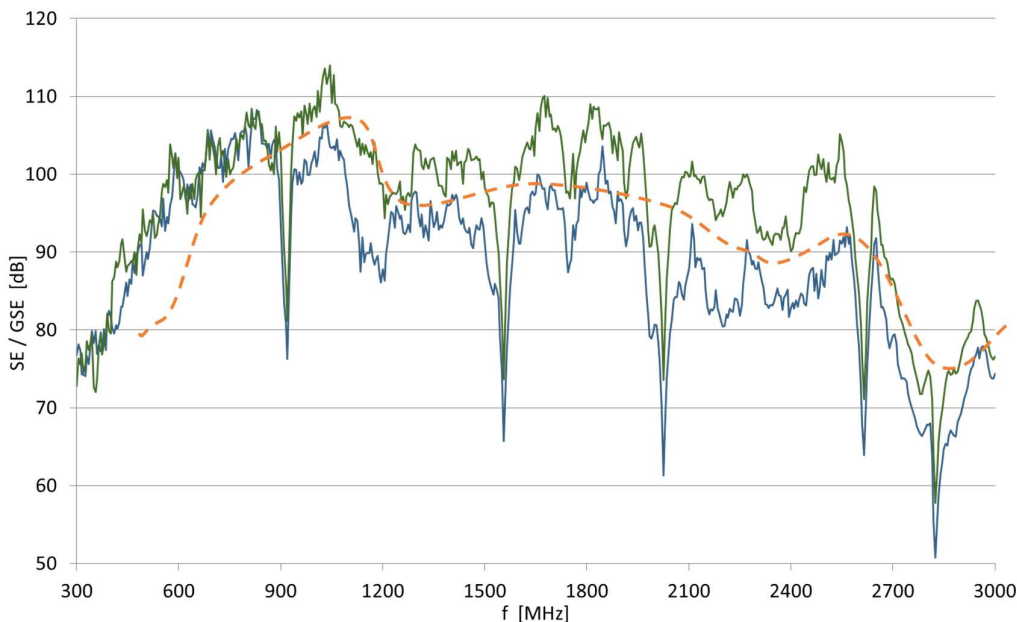
A mért teljesítménnyel való összehasonlítás megmutatta, hogy a megközelítés érvényes a téglalap alakú FAC kamrák teljesítményének előrejelzésére. Kisebb helyiségek esetében az eredmények a mért eredményekkel összehasonlítva rendkívül konzervatívnak tűnnek.



2. ábra A 4. módus sajátfüggvényeinek (d_{mk} , zöld vonal), az első előrejelzés (δ_{mk} , piros szaggatott vonal) és a második előrejelzés (Δ_{mk} , fekete szaggatott vonal) együtthatói $m=2$ és $m=4$ felbontási szintekre. A k eltolási indexet úgy skáláztam, hogy az együtthatók pozíciója a valós térben a ψ_{mk} hullámvonal támaszának elejével találkozzon. Tetszőleges egységek. A kamra térfogata az adott dimenzióban 10 egység (-5-től 5-ig), az 1 egység vastag fedő abszorbens réteg permittivitása 3, míg a fémfal a -6 alatti és a 6 egység feletti térbeli pozíciókban 10000 permittivitással van modellezve [22]



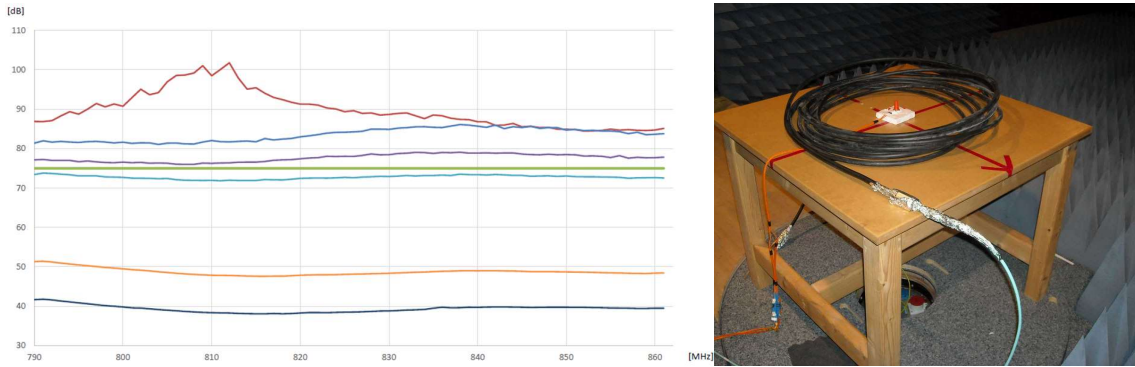
3. ábra (bal) Az árnyékoló burkolati modell méretei milliméterben; (jobb) a FEM-modell területe. A gerjesztő forrás a piros ponton van elhelyezve, a burkolat a modell ellentétes oldalán helyezkedik el. + SE kísérleti mérés a FAC-ban



4. ábra A mért SE (zöld vonal), a 3D modell szimulált (kék vonal) és teoretikus (szaggatott vonal) GSE eredményeinek összehasonlítása.

A szimulációs eredményeket kísérleti mérésekkel ellenőriztem és kerestem annak igazolását, hogy a dekompozíciós protokoll alkalmazható és a numerikus vs. kísérleti mérés megfeleltetés, közelítés megteremthető és realis alternatívát jelent ez EMC/EMI elemzési gyakorlatban. Szabványos és akkreditált környezet által megkövetelt validált módszertant alkalmaztam a FAC ban végzett kísérleti mérés során (4.ábra). A kísérleti mérés az általános SE-elméleten alapult (azonban az elektromos térszonda méretei nem elhanyagolhatóak), amelynek eredménye, hogy a dekompozíciós EMC/EMI elemzési protokoll általam felállított első két lépésőjének (numerikus módszertan, kísérleti mérés technika) egymással történő megfeleltetése és közelítése visszaigazolásra került a teoretikus számítás, a szimulált és kísérleti mérések eredményei alapján.

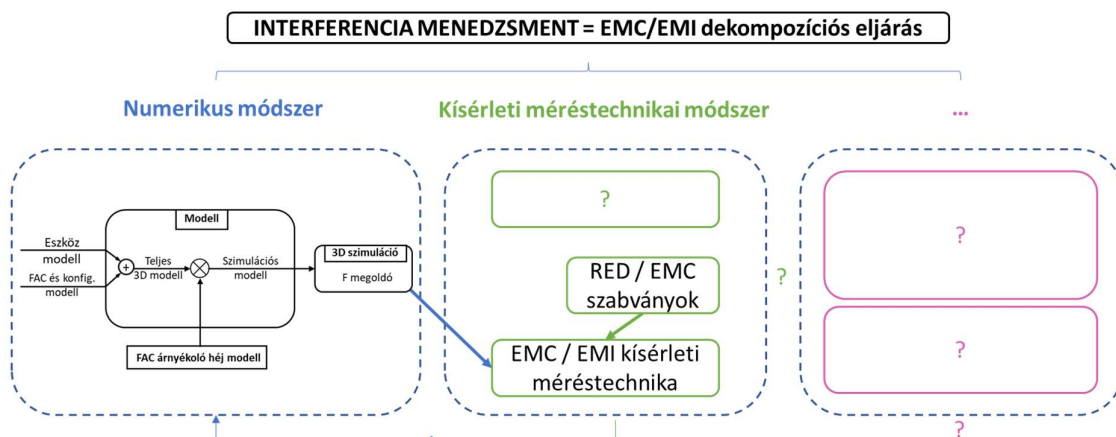
Az elvi visszaigazolás objektív ellenőrzését leginkább a valós környezeti mérések adják vissza, ezért gyakorlati mérésekkel vizsgáltam (5. ábra), hogy egy adott EMC szabvány (EN 50083-2) előírásait alapul véve hogyan változnak a távközlési gyakorlatban használt kábelek- és passzív elosztók árnyékolási hatékonyságának mért eredményei a szimulációs és kísérleti eredményekhez képest. Mindezeket a vizsgálatokat különböző állapotok mellett megismételtem (szakadt kábelek, sérült multicapek és nem megfelelően rögzített lezárások) egy EMC/EMI zavartatással terhelt környezetben.



5. ábra Multitap SE. Piros vonal a referenciakábel SE-je, a kék vonal a multitap SE-je megfelelően zárt kimenetekkel, a lila vonal egy nyitott hozzáférési kapuval, a ciánkék: szimulált, numerikus eredmény SE-je, a narancssárga vonal lazán zárt hozzáférési kapukkal és a fekete vonal az összes lazán lezárt kimenettel. A zöld vonal az EN 50083-2 szabvány szerinti határérték (bal). Méri elrendezés (jobb). [23]

Mivel mind a kábeltelevíziós, mind a mobilhálózati szolgáltatók számára fontos a zavartalan működés, közös érdekük, hogy rendszereiket úgy fejlesszék, hogy a másik fél szolgáltatásai is megfelelően működhessenek. Ennek egy megfelelő alapja lehet a dekompozíciós eljárásom használata, amely erőforrás megtakarítást eredményezhet a feladat és az elvégzéséhez szükséges időtartam csökkenésével, mivel az eredmények egyértelműen bizonyítják, hogy a kutatási tevékenységem során felállított protokoll lépései ennek megfelelnek.

A numerikus modellezés és a kísérleti vizsgálati eredmények kvázi azonos eredményt adnak, amelyekből a megfelelő következtetések levonhatók, mivel egyúttal igazolják vissza egymás megfelelőségét. Az ebben a kutatási tevékenységben bemutatott adatok növelik a bizalmat a szimulációs és kísérleti mérési módszertan közös alkalmazására ezáltal bizonyos esetekben történő kiváltására (dekompozíció). A protokoll jelen lépéseit a 6. ábra szemlélteti, amely egyúttal felveti a bővítési lehetőséget is.



6. ábra Általán felállított lépcsőzetes EMC/EMI dekompozíciós protokoll első két lépése az interferencia elimináció eléréséhez a kutatási tevékenységem eredményei alapján.

4 Vezeték nélküli összeköttetés tervezése EMC/EMI dekompozíciós protokoll alkalmazásával a távközlési gyakorlatban

Az 1. Tézisben elért eredményeimre alapozva felmerül pár gyakorlati kérdés:

- A távközlési gyakorlat során az EMI interferencia terhelt környezetben egy vezeték nélküli összeköttetés tervezése során alkalmazható-e a dekompozíciós eljárás a kommunikáció stabilitásának növelésére?
- A teoretikus, kísérleti mérési és a valós ipari környezeti felhasználás esetén elérhető-e minél nagyobb mértékű interferencia elimináció?
- Közelíthetőek-e teoretikus, kísérleti mérési eredmények az ipari alkalmazás során? Felhasználható-e a valós környezetben mért eredmények a protokoll megfelelőségének javítására, így az EMI terheltség csökkentésére és az interferencia elimináció növelésére?

Alkalmazott kutatásom ezen szakaszában ezekre a kérdésekre keresem a választ és a lehetséges megoldásokat, lehetőség szerint a dekompozíciós protokoll folyamatára bővítésével.

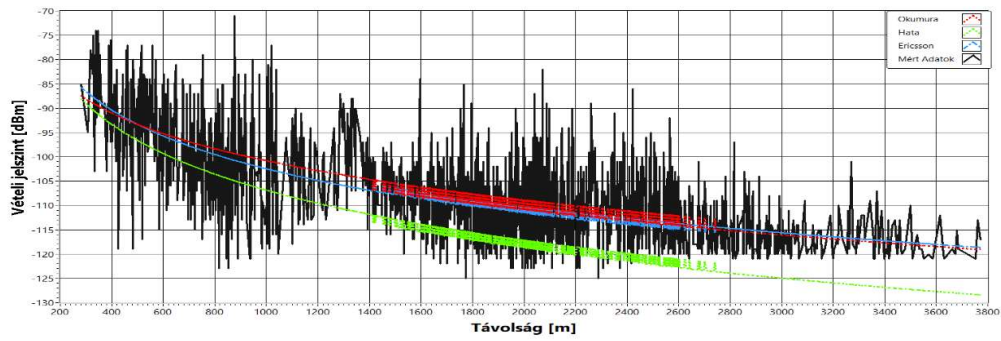
Ezért felállítottam egy test-setup-ot és készítettem egy prototípus eszközt, amellyel tesztelni tudom a különböző frekvenciasávok vezeték nélküli összeköttetéseit, annak minőségi paramétereit, és összemérhetem a szimulációval, számított térerősség adatokkal, illetve a mért, valós adatokkal. Az összehasonlítás eredményeként egy korrekciós állandót várok, amivel pontosabbá tehetem a szimulációt, és viszonylag kevés adattal pontos lefedettség tervezhető.

A elméleti, szimulált és a mért eredmények összehasonlításának vizsgálatát két jelentős, nagy felhasználószámú, kellő mértékben EMI terhelt frekvenciasávon végeztem el:

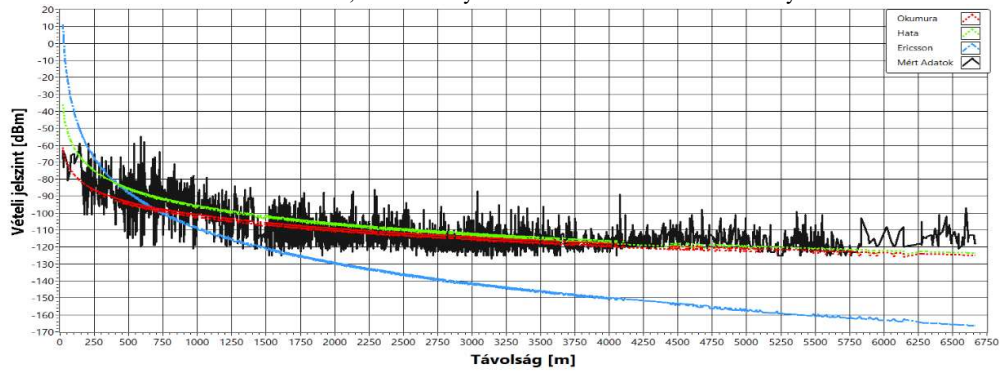
- 868 MHz,
- 3,5 GHz.

Kifejezetten a 3,5 GHz-es frekvenciasávra koncentráltam, ugyanis hazánkban itt kerültek telepítésre az első 5G hálózatok, és az empirikus hullámterjedési modelleket még nem használják a 3,5 GHz-es frekvenciasávban, ezzel egyúttal az empirikus hullámterjedési modellek alkalmazhatóságát is vizsgáltam.

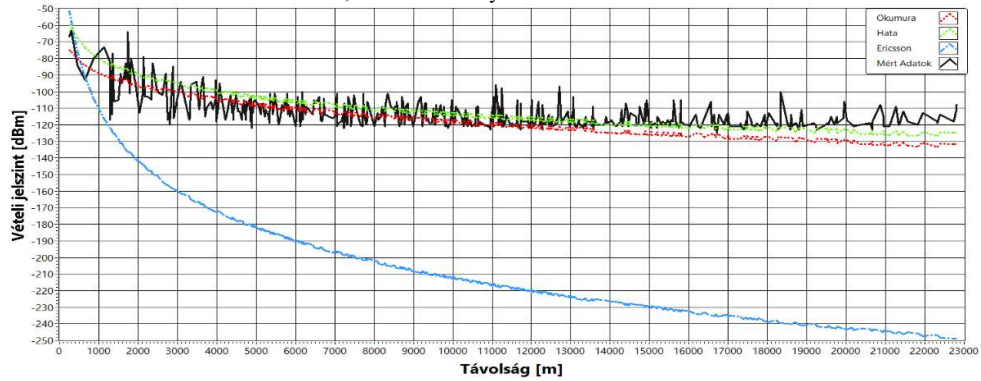
4.1 Eredmények összegzése



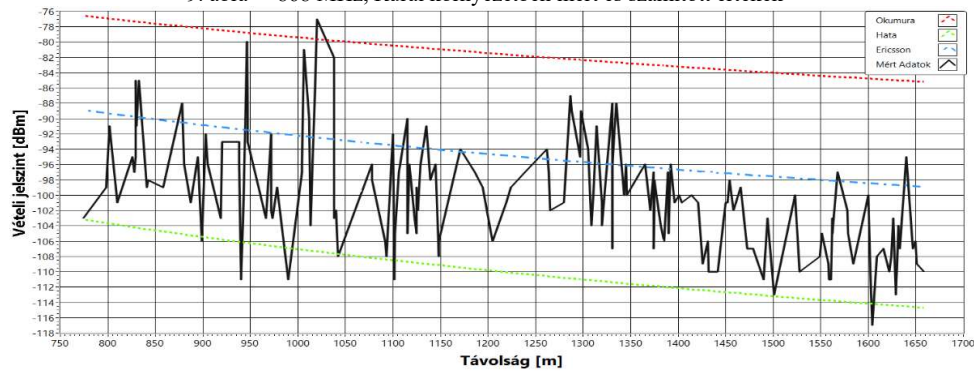
7. ábra 868 MHz, Urban környezetben mért és szimulált eredmények



8. ábra 868 MHz, Suburban környezetben mért és számított értékek



9. ábra 868 MHz, Rural környezetben mért és számított értékek



10. ábra 3,5 GHz, Rural környezetben mért és számított értékek

	Okumura	Hata	Ericsson 9999
Átlag eltérés [dB]	0,32	-7,27	-0,37
Eltérés szórása [dB]	6,08	6,1	6,05

1.táblázat 868 MHz, Urban környezetben kalkulált átlagos eltérés és szórás értékek [dB]-ben kifejezve az egyes hullámterjedési modellek alkalmazásától függően

	Okumura	Hata	Ericsson 9999
Átlag eltérés [dB]	-1,35	2,1	-22,01
Eltérés szórása [dB]	6,75	7,35	13,84

2.táblázat 868 MHz, Suburban környezetben kalkulált átlagos eltérés és szórás értékek [dB]-ben kifejezve az egyes hullámterjedési modellek alkalmazásától függően

	Okumura	Hata	Ericsson 9999
Átlag eltérés [dB]	-3,86	1,24	-92,95
Eltérés szórása [dB]	5,73	7,03	25,014

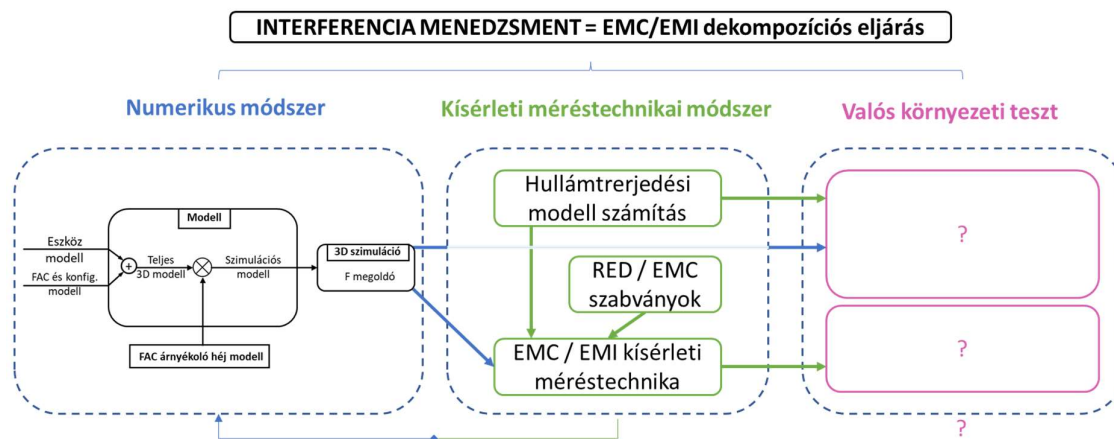
3.táblázat 868 MHz, Rural környezetben kalkulált átlagos eltérés és szórás értékek [dB]-ben kifejezve az egyes hullámterjedési modellek alkalmazásától függően

	Okumura	Hata	Ericsson 9999
Átlag eltérés [dB]	18,51	-9,88	5,33
Eltérés szórása [dB]	6,53	6,45	6,48

4.táblázat 3,5 GHz, Rural környezetben kalkulált átlagos eltérés és szórás értékek [dB]-ben kifejezve az egyes hullámterjedési modellek alkalmazásától függően

Megállapítottam, hogy a kísérleti méréssel és szimulációs modellekkel számított adatok alapján az empirikus hullámterjedési modellek megfelelő módon használhatók hullámterjedési szimulációkhoz, hálózatok tervezéséhez abban az esetben, ha csak kevés adat áll rendelkezésre (7-10. ábra). A különböző hullámterjedést befolyásoló környezeti viszonyok jelentős mértékben megváltoztathatják a hullámterjedési módokat, aminek következtében a modellek alap paramétereinek használata mellett pontatlan eredményeket kapnánk, ezért szükséges egy korrekciós érték meghatározása (1-4. táblázat).

A dekompozíciós lépések tovább részletezhetők (11. ábra).



11. ábra Általán felállított lépcsőzetes EMC/EMI dekompozíciós protokoll első két lépése az interferencia elimináció eléréséhez a kutatási tevékenységem eredményei alapján

5 Eredmények technológiai implementálása

Alkalmazott kutatási módszertan utolsó lépése egyben a dekompozíciós protokoll utolsó lépése is, azaz implementálni az eddigi módszertant és kutatási eredményeimet a valóságos fizikai környezetben, különböző ipari felhasználási esetekben, mint state-of-the-art technika és mint az alkalmazott kutatás legfőbb missziója.

Ahhoz, hogy a mobil kommunikációs hálózaton biztonságkritikus szolgáltatásokat tudjunk irányítani és működtetni, a hálózat stabilitása és a megfelelő lefedettség elengedhetetlen. Ilyen use-case-k esetén a felhasznált eszközök duplex kommunikációját redundáns kapcsolattal tudjuk biztosítani vagy a korai tervezés során figyelembe vett minél több eljárás biztosításával.

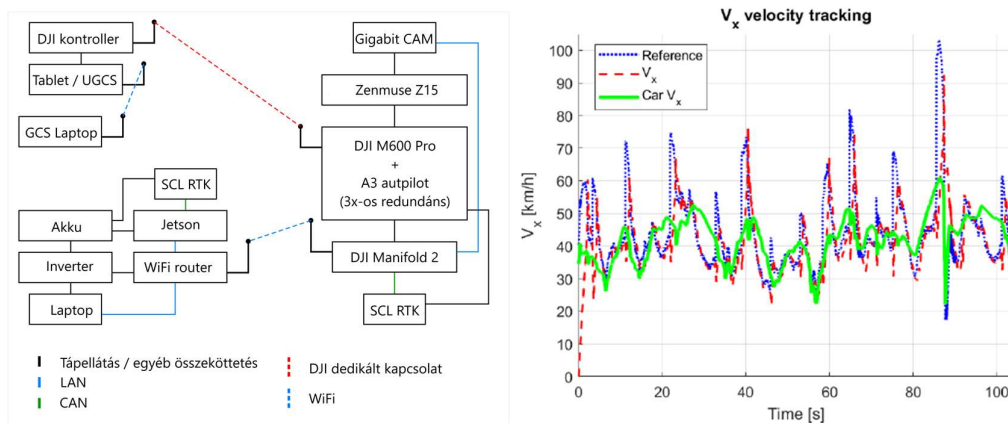
A modern pilóta nélküli légitánc (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) alkalmazások és távoli járműirányítás esetén egyaránt fontos a stabil és zavartatástól mentes vezeték nélküli hálózati infrastruktúra kialakítása és a kommunikáció maximális rendelkezésre állása, skálázhatósága melletti stabilitása. Az alacsony késleltetés és magas adatátviteli kapacitás segítségével könnyedén továbbíthatók magas felbontású képadatok és egyéb szenzorok által gyűjtött információk, amelyek segítségével tovább növelhető az emberi cselekvőképesség. Az alkalmazás megbízható működtetéséhez szükséges kommunikációs technológia monitorozása az EMI terhelt környezetben ezért elengedhetetlen.

A hálózati paraméterek interferencia-mentességének vizsgálata fontos, ezért az ehhez kidolgozott mérési módszer kiválóan alkalmazható drónok segítségével, így egyszerűsítve és gyorsítva a mérési és alkalmazási folyamatokat.

Végül egy egyedi lehetőségen keresztül vizsgáltam a dekompozíciós módszertan alkalmazhatósági sokszínűségét. Ez az egyedi lehetőség nem más volt, mint egy lézer-célpont kölcsönhatási kísérlet EMP behatás mellett.

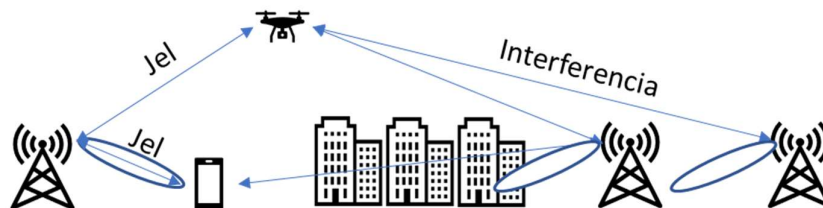
5.1 Eredmények összegzése

Az előfutár UAV rendszer use-case kidolgozása esetén is jól látható a járművek közötti kommunikációs és autonóm jármű vezérléshez szükséges kommunikációs hálózatok stabilitása és interferencia mentes alkalmazása (12. ábra).



12. ábra Forerunner UAV use-case hardveres rendszere és kritikus kommunikációs csatornái (bal) és az X test sebességének követése az M600-zal a kocsival együtt, mint eredmény (jobb). [24]

Ez elmondható a BVLOS alkalmazások esetén is, hiszen a pilóta látóhatárán túl vezérelve vagy az eszköz teljesen autonóm módon képes a repülési irány tartására és az ad-hoc jellegű manőverezésre. A biztonságos vezeték nélküli kommunikációs csatornák kiépítésével a másodperc tört része alatt is magabiztosan tudnak gépek automatizáltan egymással beszélgetni emberi beavatkozás nélkül is. Az elvárt stabilitáshoz azonban a hálózat üzemeltetőire komoly feladat hárul, hiszen folyamatos ellenőrzést és karbantartást igényelnek ezek a rendszerek. A hálózat ellenőrzésével nem csak a föld közeli, de a magasabb légréteg vizsgálatára is szükség van. Ehhez kialakított mérési eljárás bebizonyította, hogy a jelenleg üzemeltetés alatt álló cellák a földfelszínre célozzák meg, amely nem alkalmas UAV alkalmazásokhoz szükséges stabil kapcsolat kiépítésére (14. ábra). A légréteg vizsgálatokat érdemes elvégezni nagyvárosi, városi és vidéki környezetben, mivel ezeken a területeken a mobil bázisállomások sűrűsége jelentősen eltér és változhat a drónok mobil kommunikációs környezete is.

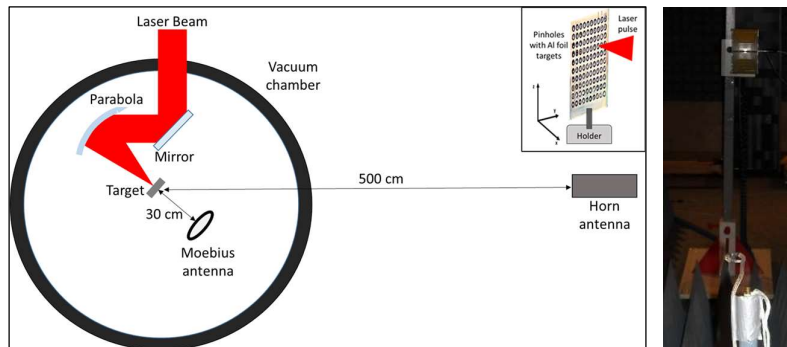


13. ábra UAV BVLOS és Drive-test kommunikációs kihívás koncepciója

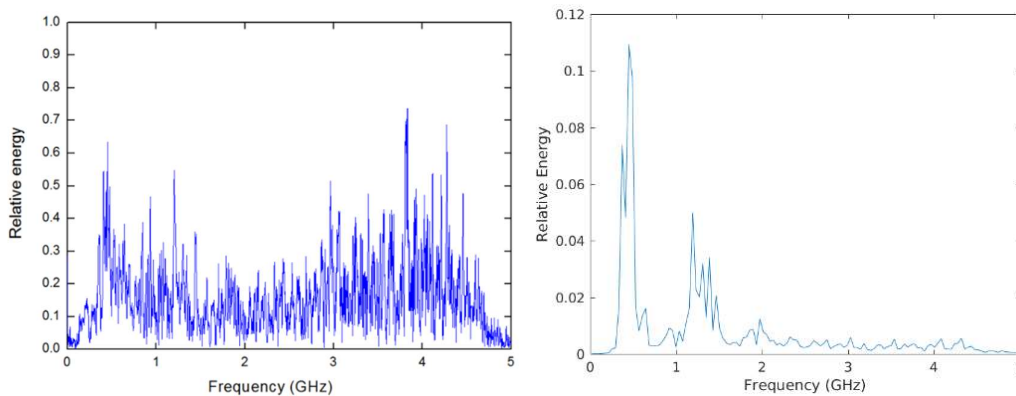


14. ábra UAV alapú Drive-test test-setup egyedi felfogató szerkezettel és az SNR mérés eredménye [25]

A nagy intenzitású lézer-célpont kölcsönhatási kísérletek során a nagy teljesítményű elektromágneses impulzus (EMP) megzavarhatja a mérések megfelelő elvégzését. Az EMP hatása nemcsak a vákuumkamrában, hanem a céltárgy területén (Target Area, TA) is jelen van, és veszélyeztetheti az összes detektor és elektronikus eszköz használatát. A nagy intenzitású lézer-célpont kölcsönhatási kísérletek során a vákuumkamrán kívüli elektromágneses impulzusokat jellemeztem. A céltárgy területén a mikrohullámú jelek amplitúdója és spektruma jól megkülönböztethető a kölcsönhatási kamrában lévő jelektől, amint azt a kísérleti eredmények is mutatják (15. és 16. ábra). Emellett az eredmények jobb értelmezéséhez végelem (FEM) szimulációk használhatók eszközként.

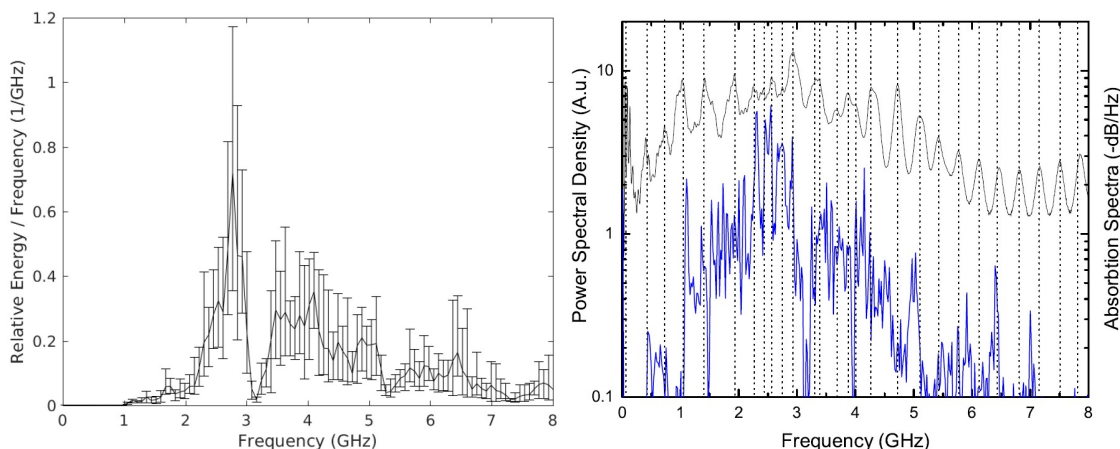


15. ábra A kísérlet elrendezése (EMP hatása a lézer-célpont kölcsönhatási kísérletben). [16, 18]



16. ábra A jel spektruma a kölcsönhatási kamrában (bal) és azon kívül (jobb). [18]

Az EMP befolyásolja a kábelek, csatlakozók és eszközök zajos háttérét, így az elektronikus berendezések működésében vezetett zavart okozhat, ami egy klasszikus EMC/EMI problémakör. A berendezések sérülékenységének (EM szempontból) kockázati szintje nagyon magas, amikor nagy lézerpulzus-energiákkal vagy nagy ismétlési frekvenciájú rezsimekkel foglalkozunk, hiszen egyszerre okozhat zavartatást sugárzottan és vezetett módon számukra.



17. ábra (bal) 6 felvételen átlagolt EMP-spektrum. (jobb) (fekete vonal) A céltárgy prediktált elnyelési spektruma. (kék vonal) A lézercélpont felett elhelyezett szondával mért kísérletileg kapott frekvencia spektrum. [16]

Az EMC/EMI dekompozíciós modell technológiai implementálása során vizsgáltam a jelen kor kulcsfontosságú technológiák egyes felhasználási esetein keresztül, hogy a modellben meghatározott lépcsőfokokkal, azok folyamat ellenőrzésével, és a meghatározott esetleges korrekciós értékek alkalmazásával miként gyorsíthatóak a vezeték nélküli összeköttetések és használandó végfelhasználói eszközök (legyen az egy hétköznapi okostelefon, reptetendő drón vagy autonóm jármű) működtetésének biztonsága. Az egyes felhasználási esetekben alkalmazott predikciók (elméleti kalkulációk, szimulációk), kísérleti mérés technika és a valós környezetben végzett gyakorlati alkalmazási vizsgálatok során kapott eredmények összevetése, egyúttal az EMC/EMI dekompozíciós modell lépcsőfokainak végigkövetése minden esetben bizonyította, hogy a létrehozott dekompozíciós módszer helyes, így a megbízhatóság és stabilitás csökkenése nélkül jelentősen gyorsítható a vezeték nélküli összeköttetések vagy a végfelhasználói berendezések üzemeltetésének vagy magának az eszköznek a tervezése, miközben az EMC/EMI hatás maximálisan kiegyensúlyozott és kezelt.

6 Új tudományos eredmények összefoglalása és kitekintés

6.1 1. Tézis

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [18, 22, 23]

Az elektromágneses interferenciával terhelt környezetben a felhasználók jelentős volume növekedése új megfontolás szerinti EMC/EMI-analízist tesz szükségessé. Az eljárás hatékonyságának növelésére felállítottam egy EMC/EMI dekompozíciós protokollt. Bizonyítottam, hogy a numerikus eljárások hatékony módszert jelentenek az EMC/EMI interferenciaproblémák vizsgálatára a teljesen reflexiómentesített mérőtér szimulációs modellalkotásán keresztül, amely eredményeket az akkreditált mérés technikai környezettel való összehasonlítással validáltam.

- (a) Az egyszerűsített wavelet alapú megközelítés kellően pontos eredményt nyújt egy teljesen reflexiómentesített mérőtér mérési bizonytalanságának becslésére, így az alkalmas a teljesen reflexiómentesített mérőtérben végzett kísérleti mérések predikciós kiváltására.
- (b) Az árnyékolási hatékonyság vizsgálati módszerrel összevetett numerikus számítási eljárás és a kísérleti mérés technikai eljárás az EMC/EMI analízis során egymáshoz korreláló eredményt adnak egy 2 m-nél nem nagyobb lineáris méretű árnyékolt felület esetén. Az egymásnak megfelelő eredmények igazolják a dekompozíciós EMC/EMI elemző protokoll első két lépésének párhuzamosíthatóságát és/vagy egymás kiváltásának lehetőségét a rendelkezésre álló erőforrás hatékony felhasználására és ezáltal az interferencia elimináció predikciós tervezésének alkalmazására és annak gyorsítására.
- (c) A szimulációs eredményeket kísérleti mérésekkel ellenőriztem és azt tapasztaltam, hogy a dekompozíciós protokoll alkalmazható a numerikus eljárás és kísérleti mérés közelítésére. Az eredmények egymásnak történő megfeleltetése visszaigazolást nyert és reális alternatívát jelent ez EMC/EMI elemzési gyakorlatban.

6.2 2. Tézis

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [17, 20]

Bebizonyítottam, hogy a gyakorlati mérési és az elméleti kalkulált adatok korrelációjának meghatározásával létrehozható egy korrekciós állandó, amely alkalmas a prediktív hullámterjedési modellek hiányosságainak kiküszöbölésére, a modellek hangolására. Megállapítottam, hogy az így hangolt empirikus hullámterjedési modellek eredményesen használhatók valós körülmények közötti felhasználási esetek előzetes tervezésére, prediktálására. Ennek eredményeként az EMC/EMI dekompozíciós eljárást kibővítettem egy hullámterjedési számítási eljárással, amelyet a korrekciós tényezők felhasználásával kísérleti és gyakorlati mérés technikai módszerrel validáltam az alábbiak szerint:

- (a) Igazoltam, hogy az így kapott dekompozíciós protokoll használatával tervezett vezeték nélküli kommunikációs technológiát alkalmazó hálózat esetén csökkenthető az EMI hatás és fokozható az interferencia elimináció hatékonysága.
- (b) Kísérleti és gyakorlati mérés technikai módszerekkel ellenőrző méréseket végeztem a szimulációs modellel számított értékek és a mérési eredmények különbségének eliminálására. A mért és számított értékek különbségének szórás értékével képeztem egy $K_7L_{diff} = 7 [dB]$ mértékű korrekciós fading tartalékot az empirikus hullámterjedési modellek optimalizálására és a modellek minőségének javítására, amellyel a fading jelenségek okozta jelszint ingadozás és interferenciás viszony feloldható.

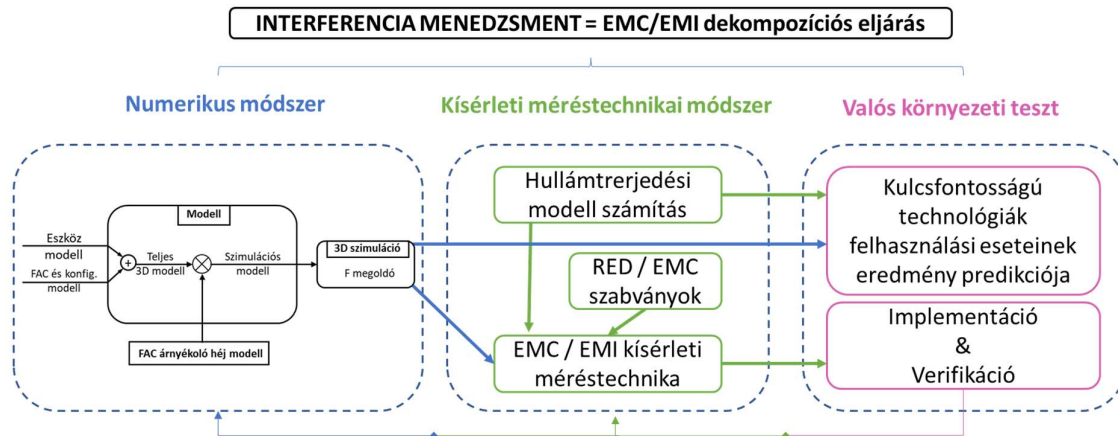
6.3 3. Tézis

A tézishoz kapcsolódó publikációk: [16, 19, 21, 24, 25]

Az EMC/EMI dekompozíciós modell technológiai implementálása során vizsgáltam a jelen kor kulcsfontosságú technológiák egyes felhasználási esetein keresztül, hogy a dekompozíciós modellben meghatározott lépcsőfokokkal, azok folyamat ellenőrzésével miként gyorsíthatók a vezeték nélküli összeköttetések és az alkalmazott végfelhasználói eszközök működtetés biztonsága. Az egyes felhasználási esetekben alkalmazott predikciók (elméleti kalkulációk, szimulációk), kísérleti mérés technika és a valós környezetben végzett gyakorlati alkalmazási vizsgálatok során kapott eredmények összevetése, egyúttal az EMC/EMI dekompozíciós modell lépcsőfokainak végigkövetése minden esetben bizonyította, hogy a létrehozott dekompozíciós módszer helyes, így a megbízhatóság és stabilitás csökkenése nélkül jelentősen gyorsítható a vezeték nélküli összeköttetések vagy a végfelhasználói berendezések üzemeltetésének vagy magának az eszköznek a tervezése, miközben az EMC/EMI hatás maximálisan kiegyensúlyozott és kezelt.

- (a) Megállapítottam, hogy a felhasználási esetek sikeres végrehajtása miatt a hullámterjedési modell, a szimuláció, a kísérleti és a tapasztalati mérés technikai eredmények közelíthetőek és egymásnak megfeleltethetőek. A létrehozott dekompozíciós EMC/EMI protokoll- és interferencia elimináló módszer egyértelműen alkalmazható az ipari, piaci gyakorlat során, akár folyamatában, akár predikciós eljárásként a technológiai felhasználási esetek megvalósíthatóságának ellenőrzésére és visszaigazolására interferencia terhelt közeget feltételezve, amely különösen fontos szerepet kap a technológia intenzív vezeték nélküli távközlési rendszerek eszköz és felhasználó számának mennyiség növekedését tekintve.
- (b) Javaslatot tettem a vezeték nélküli kommunikációs technológiát használó rendszerek interferencia elimináció és EMC/EMI problémakörének feloldására. A tapasztalati és alkalmazási esetek visszaigazolták a javasolt EMC/EMI dekompozíciós eljárás megfelelőségét, amely alapján kijelenthető, hogy kidolgoztam egy, a vezeték nélküli kommunikációs technológiát használó rendszerek interferencia elimináció és EMC/EMI problémakörének feloldására szolgáló dekompozíciós eljárást.

Az eljárás egyszerűsített blokkvázlata az 19. ábra szerinti.



19. ábra Általam felállított lépcsőzetes EMC/EMI dekompozíciós protokoll az interferencia elimináció eléréséhez

6.4 Kitekintés

A disszertációban leírt alkalmazott kutatások az önálló eredményeken túl egyben új alkalmazott- és alapkutatási irányokat nyitottak meg, ahol a komplex vezeték nélküli kommunikációs rendszereknél jelentkező EMC/EMI problémakör hatékony megoldására alkalmazható hullámterjedési- és numerikus modell fejlesztése a cél. A tárgyalt szimulációs környezet jó alapot biztosít ezekhez a kísérletekhez, az akkreditált kísérleti környezet és a valós modellek pedig a szimulációban jelentkező korlátok feloldására kiválóan alkalmasak.

7 Irodalomjegyzék

- [1] C. R. Paul, Introduction to Electromagnetic Compatibility. New York: John Wiley & sons, Inc., 1992.
- [2] R. Azaro, S. Caorsi, M. Donelli, and G. L. Gragnani, "A circuital approach to evaluating the electromagnetic field on rectangular apertures backed by rectangular cavities," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-50, no. 10, pp. 2259–2266, Oct. 2002.
- [3] H. H. Park and H. J. Eom, "Electromagnetic penetration into a rectangular cavity with multiple rectangular apertures in a conducting plane,," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 42, pp. 303–312, Aug. 2000.
- [4] J. M. Jin and J. L. Volakis, "A finite element boundary integral formulation for scattering by three-dimensional cavity-backed apertures,," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 39, pp. 97–104, Jan. 1991.
- [5] S. Tanabe, N. Nagano, T. Itoh, Y. Murata, and S. Mizukawa, "3D-FEM analysis for shielding effects of a metallic enclosure with apertures,," in *Intention IEEE Symp. EMC'96*, Santa Clara, CA, USA, Aug.19-23, 1996, pp. 375–380.
- [6] W. P. C. Jr., L. Pinchon, and A. Razek, "Analysis of the coupling of an incident wave with a wire inside a cavity using an fem in frequency and time domains,," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. EMC-44, no. 3, pp. 470–475, Aug. 2002.
- [7] S. Benhassine, L. Pinchon, and W. Tabbara, "An efficient finite-element timedomain method for the analysis of the coupling between wave and shielded enclosure,," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 38, no. 2, pp. 709–712, Mar. 2002.
- [8] D. M. Hockanson, J. L. Drewniak, T. H. Hubing, and T. P. VanDoren, "Application of the finite-difference time-domain method to radiation from shielded enclosures,," in *Proc. IEEE International Symp. EMC'96*, vol. 1, New York, NY, Aug.22-26, 1994, pp. 375–380.
- [9] G. Cerri, R. D. Leo, V. M. Primiani, and M. Righetti, "Field penetration into metallic enclosures through slots excited" *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 36, no. 2, pp. 110–116, May 1994.
- [10] K. P. Ma, J. L. Drewniak, T. H. Hubing, and T. P. V. Doren, "A comparison of an ftdt thin slot algorithm and method of moments for modeling slots near corners,," in *IEEE International Symposium on EMC*, Santa Clara, CA, USA, Aug.19-23, 1996, pp. 386–390.
- [11] D. Yau and M. V. Shuley, "Numerical analysis of an aperture coupled rectangular dielectric resonator antenna using a surface formulation and the method of moments,," *IEE Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 146, no. 2, pp. 105–110, Apr. 1999.
- [12] Pan, G. (2003). *Wavelets in electromagnetics and device modeling*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience.
- [13] J. Pipek, Sz. Nagy, „An Economic Prediction of Refinement Coefficients in Wavelet-Based Adaptive Methods for Electron Structure Calculations”, *J. Comput. Chem.*, Vol. 34, p. 460-465, (2013).
- [14] Sz. Nagy, J. Pipek, „An economic prediction of the finer resolution level wavelet coefficients in electronic structure calculations”, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, Vol. 17, pp. 31558-31565 (2015)
- [15] European Commission „The Blue Guide ont he implementation of EU products rules 2016”, *Official Journal of the European Union*, 2016

7.1 Saját publikációk jegyzéke

- [16] Nelissen Kwinten; Liszi Mate; De Marco Massimo; Ospina Valeria; Drotar Istvan; Gatti Giancarlo; Kamperidis Christos; Volpe Luca; Characterisation and Modelling of Ultrashort Laser-Driven Electromagnetic Pulses SCIENTIFIC REPORTS (2045-2322): 10 1 Paper 3108. 8 p. (2020)
- [17] Istvan Drotar; Balázs Lukács; Peter Prukner; Empiric electromagnetic wave propagation models in the 3.5 GHz frequency band In: 12th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2021), Online kiadás: IEEE, pp 115-118 (2021)
- [18] De Marco Massimo; Volpe Luca; Gatti Giancarlo; Liszi Mate; Drotar Istvan; Kamperidis Christos; Nelissen Kwinten; Propagation of Laser-Driven Electromagnetic Pulses in Laser Target Areas; 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE pp 802-806 (2019)
- [19] Nagy M; Bauer P; Hiba A; Gáti A; Drotár I; Lattes B; Kisari Á; The Forerunner UAV Concept for the Increased Safety of First Responders; Proceedings of the 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems; SciTePress, pp 362-369 (2021)
- [20] Drotar Istvan; Lukacs Balazs; Kuczmann Miklós; LoRaWAN Network Performance Test; ACTA TECHNICA JAURINENSIS (1789-6932 2064-5228): 13 4 pp 268-280 (2020)
- [21] Kwinten Nelissen; Mate Liszi; Massimo De Marco; Valeria Ospina; Istvan Drotar; Giancarlo Gatti; Christos Kamperidis; Luca Volpe; Characterisation and Modelling of Ultrashort Laser-Driven Electromagnetic Pulses; Konferencia-előadás; Szegedi Egyetem (2019)
- [22] Drotár István; Liszi Máté; Nagy Szilvia; Prukner Péter; On Wavelet Based Modeling of EMC Test Chambers : Economic Prediction of the Refined Expansion Coefficients. ICEST 2017 - LII. INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON INFORMATION, COMMUNICATION AND ENERGY SYSTEMS AND TECHNOLOGIES : Proceedings of Papers; Publishing House, Technical University of Sofia, pp 105-108 (2017)
- [23] Drotár István; Liszi Máté; Nagy Szilvia; Prukner Péter; Measurement of the Shielding Effectiveness of Passive Cable Television Elements; ICEST 2017 - LII. INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON INFORMATION, COMMUNICATION AND ENERGY SYSTEMS AND TECHNOLOGIES : Proceedings of Papers; Publishing House, Technical University of Sofia, pp 101-105 (2017)
- [24] Antal Hiba, Peter Bauer*, Mihaly Nagy, Erno; Simonyi, Adam Kisari, Gergely István Kuna, István Drotár; Software-in-the-loop simulation of the forerunner UAV system; Conference: 11th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles. (2022)
- [25] Olivér Takács; Tamás Kovács; István Drotár and György Wersényi; Technical Feasibility and Design Challenges of Unmanned Aerial Vehicle based Drive Testing on Cellular Networks; Proceedings of the 1st IEEE Int. Conference of Internet of Digital Reality