



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

Speciális rádiócsatornák modellezése

Ph. D. értekezés téziséfuzete

Horváth Péter

Témavezető:

Dr. Frigyes István emeritus egyetemi tanár
BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

Budapest, 2010

A kutatás előzményei és célkitűzései

A korszerű vezeték nélküli kommunikációs rendszerek fejlesztése napjainkban is a nagyobb sebesség, illetve a nagyobb átviteli megbízhatóság elérését célozza. A hírközlés területén az utóbbi tíz év minden bizonnyal legjelentősebb teljesítménye a több bemenetű, több kimenetű (Multiple Input, Multiple Output, MIMO) átvitel koncepciója [GSsS⁺03, PGNB04]. Néhány év alatt eljutottunk az első információelméleti eredményektől a gyakorlatban is jól használható, szabványosított MIMO eszközök napi használatba vételéig. Ugyanakkor a gyártók, szolgáltatók igyekeznek a költséghatékonyságot is javítani olcsón előállítható, egyszerűen telepíthető és menedzselhető eszközök létrehozásával. Jó példa erre a radio-over-fibre átvitel, amelynek egyik legfontosabb felhasználása a bonyolult és költséges mobil bázisállomások leváltása egyszerű optikai-elektromos-optikai átalakítókkal, ami lehetővé teszi a bázisállomások funkcióinak centralizálását is. A MIMO technikák a felhasználó oldalára állították a korábban egyértelműen károsnak tartott fadinges csatornákat, hatékony alkalmazásukhoz elengedhetetlen a rádiócsatorna jobb megismerése és jellemzése. A rádiós optikai átvitelben viszont komoly korlátozó tényező az elektromos-optikai átalakítás során fellépő nemlineáris torzítás. Ebben a munkában ezen speciális rádiócsatornák jellemzése, modellezése és felhasználása kapcsán elért eredményeimet mutatom be.

A vizsgálat egyik fő területe a műholdas rádiócsatorna vizsgálata. Egyrészt rendszerszintű jellemzése és kapacitásvizsgálata egy, az irodalomban publikált polarizációs modell alapján, valamint a modell lehetőség szerinti kiterjesztése a többantennás csatornára. Másrészt a műholdas beltéri rádiócsatorna depolarizációs jellemzőinek vizsgálata elektromágneses modellező eszköz felhasználásával. A dolgozat második részében tér-idő kódolási eljárásokat vizsgálok, amelyek olyan MIMO csatornában is hatékonyan alkalmazhatók, ahol az antennák nagy irányítottsága miatt a rádiócsatorna nem teljes rangú. A dolgozat harmadik részében a radio-over-fibre átvitelben az átviteli csatornában fellépő egyik legfontosabb probléma, az optikai szakasz által okozott nemlineáris torzítás egyszerű jellemzésére adok meg analitikus összefüggéseket ortogonális frekvenciaosztásos nyálábolást (OFDM átvitelt) feltételezve.

Korábbi mérések [SDB⁺07] során azt tapasztalták, hogy műholdas mobil csatornában a vett jel polarizációja teljesen véletlenszerűvé válik. Az adóoldalon jobbra forgó cirkuláris polarizációt alkalmaztak, a vevőoldalon a vett teljesítmény függetlennek bizonyult a vevőantenna polarizációjától, jobbra vagy balra forgó cirkuláris, vagy függőlegesen polarizált lineáris vevőantenna esetén is azonos eredményeket kaptak. Ebből arra következtethetünk, hogy a többutas terjedés során a környezet elektromágneses szórásának hatására a vett jel – a többutas összetevők szuperpozíciója miatt – „depolarizálódik”. A depolarizáció elsődleges okai a rádiócsatornában található szórókkal történő kölcsönhatások, például a visszaverődések. Korábbi vizsgálatok alkottak erre a jelenségre egy egyszerű modellt is, amely a Stokes-paraméterek felhasználásával meghatározza a vevőoldalon a járulékos teljesítményvesztést, ami az adó- és a vevőoldal polarizációjának véletlenszerűen változó illesztetlenségéből következik.

Műholdas környezetben diverzithatás elérésére különböző lehetőségek vannak.

Térbeli elválasztáson alapuló eljárást csak több műhold bevonásával lehet megvalósítani, mert az egy műholdon elhelyezett antennák jele a nagy adó-vevő távolság miatt gyakorlatilag teljesen korrelált. Hatékony alternatíva lehet az ortogonálisan polarizált antennák felhasználására támaszkodó tér-idő kódolás. Ebben az esetben a műholdon is, a földi állomáson is 2-2, egymáshoz közel elhelyezett és ortogonálisan polarizált antennára építve akár diverziti jellegű, akár térbeli multiplexálás jellegű nyereség elérhető, vagyis körülbelül négyszeres diverzítit, vagy kétszeresére növelhető adatsebességet, vagy a kettő közötti kompromisszumot várhatunk az egyantennás összeköttetéshez képest. Kérdés azonban, hogy a műholdas MIMO csatorna valóban olyan jellemzőkkel bír-e, amelyek ezt a feltevést megalapozhatnák. Erre vonatkozóan azonban az irodalomban nem álltak rendelkezésre eredmények.

Vizsgálták korábban azt is, hogy mi a hatása annak, ha az összeköttetés mindkét végén 3-3, egymásra merőleges elektromos antennát, pl. dipólokat helyeznek el ($n_t = 3, n_r = 3$). Ebben az esetben a környezetben levő közeli szóró objektumok miatt megjelenő longitudinális komponensek azokon az antennákon is vett jelet produkálnak, amelyek az egyenes vonalú terjedés irányába esnek. Ezért úgy vélekedtek, hogy egy ilyen csatorna valódi (3,3)-as MIMO csatorna, és jelentős kapacitásnövekedést lehet ilyen módon elérni a (2,2)-es esethez képest. Később kimutatták, hogy valójában ez az elrendezés a (2,2)-es esethez képest csak marginális (logaritmikus) kapacitásnövekedést képes produkálni.

A vizsgálatom célja ezen a téren a műholdas-földi, egy- és többantennás csatorna jellemzése több szempont alapján: elsődlegesen a csatornakapacitás és az elérhető diverzítirend megállapítása, továbbá elterjedt tér-idő kódolási sémák hatékonyságának vizsgálata. A dolgozatban bemutatok két további, tér-idő kódoláshoz kapcsolódó eredményt is. Ezek közül az első vizsgálat célja olyan módszer kidolgozása volt, amelyben nem egy forrásból származó, de egy időben két útvonalon át (pl. két különböző bázisállomásból vagy két műholdról) továbbított információ hatékonyan tér-idő kódolható. A másik vizsgálat során arra a problémára kerestem megoldást, hogy alkalmazhatók-e nemlineáris modulációs eljárásokhoz a fázismodulált átvitelhez alkotott tér-idő trelliskódok.

A dolgozat harmadik részében az OFDM radio-over-fibre átvitelrel kapcsolatos vizsgálatok célja az optikai szakaszon fellépő nemlineáris torzítás pontos leírása, abból következtetések levonása az átvitelben fellépő hibaarányra. Ebben a tézisben egy gyakran használt modulátor, a Mach-Zehnder-féle interferométer segítségével végzett moduláció és az optikai detekció, mint „rádiócsatorna” tulajdonságait vizsgáltam az ortogonális frekvenciaosztásos nyalábolás (OFDM)-alapú átvitelben. Ismert, hogy az OFDM nagy csúcs-/átlagteljesítmény-viszonya miatt érzékeny a nemlineáris torzításra. A céloom olyan számítás kidolgozása volt, ami alapján tervezhető és optimalizálható a modulátor kivezérlésének változtatásán keresztül a vevőben a jel/torzítás-viszony. További céloom volt ennek a leírásnak az egyszerűsítése, hogy az ne igényelje a bemenő OFDM jel pontos teljesítményspektrumának ismeretét.

Az alkalmazott vizsgálati módszerek

Vizsgálataim során analitikus és szimulációs módszereket egyaránt alkalmaztam. Ahol sikerült, előnyben részesítettem az analitikus eredményeket és a szimulációt ezek verifikálására használtam. Néhány más esetben az eredmények csak szimuláción alapulnak.

A műholdas rádiócsatorna jellemzését alapvetően kétféle módszerrel végeztem. A tanszéken korábban végzett mérések alapján megalkotott egyantennás fizikai-statisztikai jellemzésből kiindulva részletesen megvizsgáltam az ismert modell csatornkapacitásra vonatkozó jellemzőit és az elérhető hibaarányt. Ezekben az esetekben zárt formulák és egyszerű közelítő formulák kidolgozására törekedtem, amelyeket Monte Carlo szimulációkkal ellenőriztem is. A fizikai-statisztikai modell korlátozottan, egyszerűsítő feltevések mellett általánosítható több bemenetű, egy kimenetű csatornára és több bemenetű, több kimenetű csatornára is. Ezt az általánosítást elvégeztem és a modellek jellemzését analitikusan, ill. a MIMO esetben hibaarány-szimulációval elvégeztem.

A beltéri csatorna depolarizáltságával kapcsolatos vizsgálathoz kifejlesztettem egy elektromágneses térszámító programot, amely időtartománybeli végesdifferencia (FDTD) elven alapul. Ennek segítségével jellemeztem a műholdról beltérbe terjedés során kialakuló MIMO csatornát. Az FDTD számítások eredményeinek utófeldolgozási módszerének kidolgozását és a vizsgált jellemzők kiválasztását is elvégeztem.

A speciális tér-idő kódokkal kapcsolatos eredményeket szintén Monte Carlo szimulációkkal támasztottam alá.

A OFDM radio-over-fibre vizsgálatok során az optikai szakasz nemlinearitását leíró összefüggéséből indultam ki, irodalmi adatok alapján. A torzítás által előidézett hibaarány-növekedés meghatározható a kimeneti teljesítménysűrűség-függvény ismeretében. Szintén irodalmi eredmények alapján ismert Bessel-függvények lineárkombinációjaként modellezhető memóriamentes nemlinearitások kimenetén gaussi bemenet mellett a válaszjel teljesítménysűrűségére vonatkozó összefüggés. Ezt az összefüggést alkalmaztam a problémára. Ennek az eljárásnak – az elvárt pontosság megtartása melletti – egyszerűsítését végeztem el azáltal, hogy a gerjesztés teljesítménysűrűség-függvényére analitikusan is könnyen kezelhető közelítést javasoltam. A kapott eredményeket és a javasolt közelítések pontosságát Monte Carlo szimulációval ellenőriztem.

Új tudományos eredmények

I. tézis: Csatornamodellezés műholdról beltérbe történő terjedésnél

I. 1. altézis

A Rayleigh-fadinges csatorna gyakran jól leírja a közvetlen terjedési úttal nem rendelkező rádiócsatornákat. Műholdas környezetben is alkalmazzák különféle csatornamodellek összetevőjeként (pl. Loo-modell, Corazza-modell) A műholdas csatorná-

ban a fading átlagteljesítménye nem tekinthető azonban állandónak, hiszen a műhold mozgása miatt az elektromágneses kölcsönhatások által előidézett depolarizáció, ill. a beesési irányok változása miatt az antennák nyeresége és polarizációs jellemzői is változnak. Irodalomban publikált, elektromágneses megfontolásokon alapuló modell javaslatot tesz a depolarizáció hatásának figyelembe vételére a Rayleigh-fadings csatornában [FMBH05]. A modell alapja a fading átlagteljesítménye eloszlásának meghatározása. A vett jel polarizációjának eloszlása a modellben lehet teljesen véletlen (minden polarizációs állapot egyformán valószínű), illetve feltételezheti, hogy az adóoldalon lineáris polarizáció vevőoldalon is lineáris marad, csak elfordul. Mindkét esetet vizsgáltam ebben a tézisben.

Az irodalomban publikált, műholdas csatornára vonatkozó depolarizált Rayleigh-fadings egy bemenetű, egy kimenetű (SISO) csatorna modellje alapján analitikus formulákat adtam az ilyen csatornák kapacitására, és egyes esetekben a hibaarányra vonatkozó összefüggéseket is megadtam. A SISO modell alapján kidolgoztam a független depolarizált SIMO csatorna modelljét és megadtam a csatornkapacitás formuláját. Szimulációs eredményt mutattam be a teljesen korrelálatlan ill. a teljesen korrelált több-bemenetű, több-kimenetű (MIMO) depolarizált Rayleigh-fadings csatornán elérhető hibaarányra tér-idő blokk-kódok felhasználásával. Az eredeti modell elsősorban az alacsonypályás műholdas összeköttetésben kialakuló csatornát írja le. [1], [2], [3], [4]

A teljesen depolarizált Rayleigh-csatorna jel/zaj-viszony sűrűségfüggvényét meghatároztam:

$$f_{\rho}(\rho) = \frac{1}{\bar{\rho}} E_1 \left(\frac{\rho}{\bar{\rho}} \right), \quad \rho \geq 0, \quad (1)$$

a csatorna ergodikus kapacitása

$$C = \frac{1}{\ln 2 \bar{\rho}} G_{2,3}^{3,1} \left(\bar{\rho}^{-1} \left| \begin{matrix} -1, 1 \\ 0, -1, -1 \end{matrix} \right. \right), \quad (2)$$

ahol $G_{p,q}^{m,n}(\cdot)$ a Meijer-féle G-függvény. Megadtam az ergodikus kapacitás aszimptotikus viselkedését jellemző állandókat is zárt alakban. Felső korlátot és egyszerű numerikus becslést adtam PSK jellegű modulációk hibaarányára a teljesen depolarizált Rayleigh-fadings csatornában.

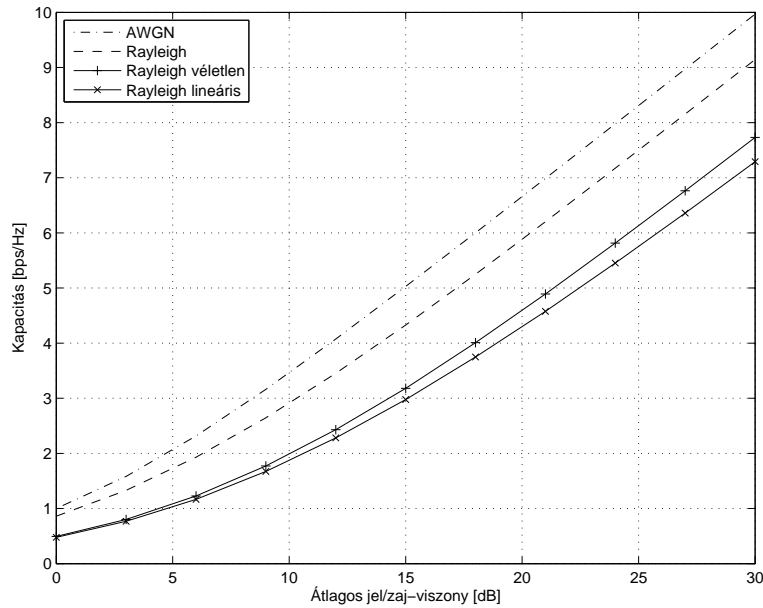
Ha feltesszük, hogy a vett jel polarizációja véletlenszerűvé válik, de lineáris marad, akkor a jel/zaj-viszony sűrűségfüggvénye

$$f_{\rho}(\rho) = \frac{e^{-\rho/\bar{\rho}}}{\sqrt{\pi \bar{\rho} \rho}} \quad \rho \geq 0, \quad (3)$$

a csatorna ergodikus kapacitása pedig

$$C_{\langle pl, 1 \rangle} = \frac{1}{\ln(2)} \left[\pi \operatorname{erfi} \left(\frac{1}{\sqrt{\bar{\rho}}} \right) - \gamma - \ln \left(\frac{1}{\bar{\rho}} \right) - \frac{2}{\bar{\rho}} {}_2F_2(1, 1; 3/2, 2; 1/\bar{\rho}) \right] - 2 \quad (4)$$

ahol $\operatorname{erfi}(\cdot)$ a komplex hibafüggvény, ${}_2F_2(\cdot)$ pedig a hipergeometriai függvény (1. ábra).



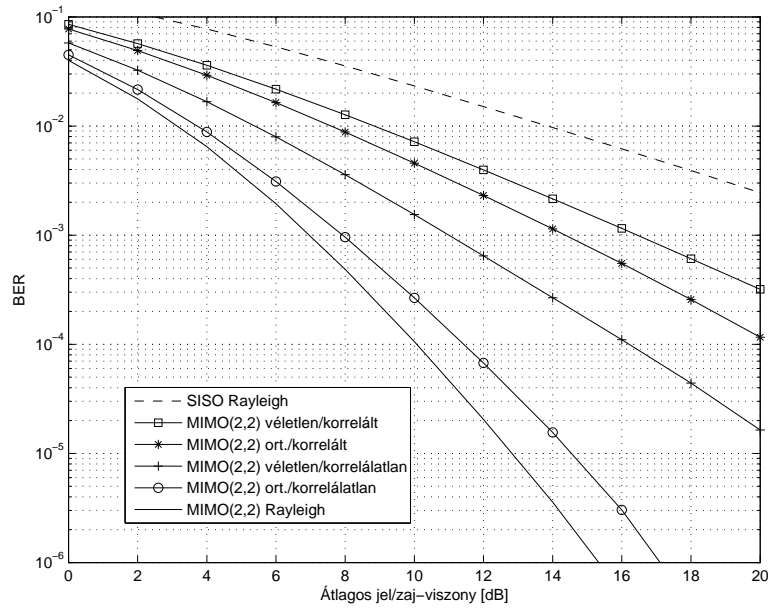
1. ábra. Depolarizált Rayleigh-fadings csatornák ergodikus kapacitása

Az eredményeket szimulációval ellenőriztem.

A modellt kiterjesztettem korrelálatlan vevődiverziti (SIMO) esetre, két vevőantennára sikerült zárt formulát adni a jel/zaj-viszony sűrűségfüggvényére. A modell egyszerű kiterjesztését javasoltam több adós, több vevős esetre, ami a gyakorlatban nagyon fontos eset, hiszen műholdas diverziti elérésére a polarizációdiverziti egyszerűen megvalósítható, szemben a több műholdas diverzitivel. A modell figyelembe veszi az adóantennák közti korreláció szélsőséges eseteit. Monte Carlo szimulációval vizsgáltam az elérhető hibaarányt az adóoldali korreláció különböző szélsőséges értékei mellett, illetve attól függően, hogy a műhold által két ortogonális polarizáción kisugárzott jel megőrzi-e az ortogonalitását a vevőnél, vagy teljesen depolarizálttá válik (2. ábra.)

I. 2. altézis

Ebben és a következő altézisben a geostacionárius műholdról beltérbe terjedés során, kompakt, ortogonálisan polarizált antennák alkalmazása mellett kialakuló MIMO csatorna jellemzése volt a céloom. Hogy a polarizációs jellemzőket az elterjedten használt sugárkövető számításoknál pontosabban meg tudjam határozni, végesdifferencia-alapú térszámítást végeztem. A térszámítást két, ortogonálisan polarizált beeső síkhullámmal kell elvégezni, az eredményt pedig megfelelő utófeldolgozásnak kell alávetni, hogy a térerősségekből a MIMO csatornamátrixokat nyerjük. A csatornamátrixok alapján tudjuk a csatornát rendszerszinten jellemezni.

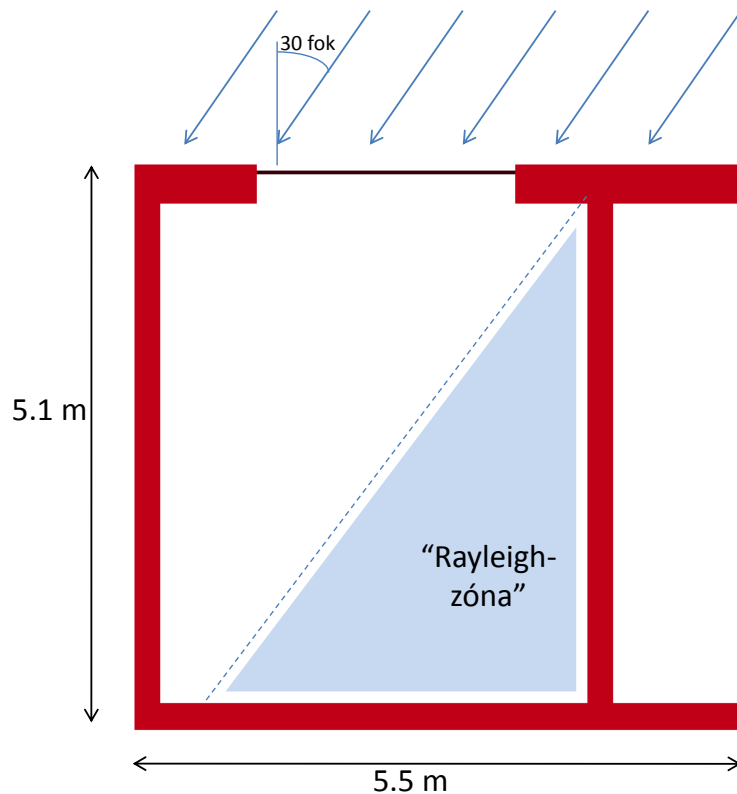


2. ábra. A hibaarányok összehasonlítása MIMO esetekre

Kidolgoztam a számítási eredmények feldolgozásának módszerét, amely lehetővé teszi a csatornakapacitás, illetve az elérhető diverzítási rend meghatározását a megfelelően elvégzett FDTD szimulációk által szolgáltatott időfüggvényekből. A diverzítási rendjét a kölcsönös információból számított kiesési valószínűség és tér-idő kódokkal elérhető hibaarány alapján is vizsgáltam. A vizsgálati módszer mind egymáshoz közeli, egymásra merőleges, lineáris antennák esetére (pl. tri-dipól antenna) esetére alkalmazható. [5], [6], [7], [8]

I. 3. altézis

Elektromágneses szimulációkat végeztem Finite Difference, Time Domain (FDTD) numerikus térszámítási eljárással, így vizsgáltam a műholdról beltérbe történő hullámterjedés polarizációs tulajdonságait. A vizsgálat során egy beltéri környezetben olyan térrészek vizsgálata alapján vontam le következtetéseket a vett jel tulajdonságaival kapcsolatban, ahova a műhold jele legalább kétszeres elektromágneses kölcsönhatás után juthat el (3. ábra).



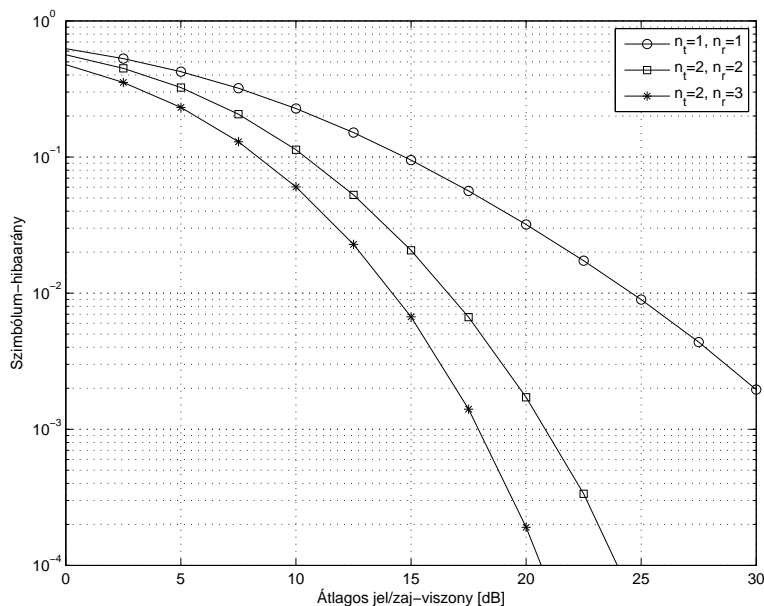
3. ábra. A vizsgált tér x-y metszetének vázlata

FDTD szimulációk alapján megadtam a teljesítménykorrelációs (azonos polarizációs arány, CPR és keresztpolarizációs arány, XPR) jellemzők eloszlását műhold-beltér rádiócsatornában, a vizsgált geometriára. Két, ill. három ortogonális vevőantennát feltételezve vizsgáltam az elérhető csatornakapacitást és a diverziti rendjét. Szimulációkkal igazoltam, hogy az ortogonális polarizációk használatán alapuló MIMO technikák hatásosak a műhold-beltér környezetben: a közvetlen terjedési úttal nem rendelkező helyeken közelítőleg Rayleigh-eloszlású a fading és a csatornakapacitás közelítőleg a kétszeresére növelhető 2-2 antennás elrendezésben. Az eredményekkel alátámasztottam azt is, hogy a földi állomáson 3. (és további) antennák elhelyezése a kapacitást csak kis mértékben növeli, azonban a kis kiesési valószínűségek tartományában a 2-2 antennás eset meghaladó diverzítirend érhető el. (4. ábra) [5], [6], [7], [8]

II. tézis: Eredmények speciális tér-idő kódokkal és kódolási eljárásokkal

II. 1. altézis

A MIMO technikák és a tér-idő kódolási eljárások jelentős többutas terjedéssel sújtott csatornáknál előnyösek, ahol a sok szóró objektum sok útvonalat hoz létre az adó és a vevő között. Ebben az altézisben egy ettől alapvetően eltérő környezetbeli



4. ábra. Átlagos hibaaarány a kiesési kapacitás alapján (SISO(1,1), MIMO(2,2) ill. MIMO(2,3))

alkalmazhatóságát vizsgáltam a tér-idő kódoknak, nevezetesen a milliméteres hullámú, 20...45 GHz körüli frekvenciatartományban üzemelő fix (akár cellás rendszer ellátórendszere, akár cellás) vezeték nélküli rendszerekben. Megmutattam, hogy a tér-idő kódolás elveit erre az esetre is át lehet ültetni, és a tér-idő kódolás alkalmazása előnyökkel járhat ezekben a rendszerekben a hagyományos útvonaldiverziti eljárásokkal szemben. A bemutatott milliméteres hullámú alkalmazás illusztratív példa, a módszernek más alkalmazása is elképzelhető, ahol a terminálok között jellemzően közvetlen rálátásos csatorna alakul ki, az adó- és vevőantennák csak páronként látják egymást.

Az általam javasolt rendszer egyfajta kódolt kooperatív kommunikációs sémának tekinthető, amelyben nem a felhasználói terminálok, hanem a bázisállomások kooperálnak tér-idő kódolás felhasználásával (a kooperatív kommunikációnak ezt a módját kódolt kooperációnak szokás nevezni), vagy más szempontból az útvonaldiverziti általánosításának is tekinthető.

Ebben a környezetben a tér-idő kódolás szerepe eltérő a hagyományostól, és az elérhető nyereség is jóval kisebb. A hagyományos útvonaldiverziti esetén az eltérő útvonalakon átvitt jelek kódolása nem növeli a diverziti útvonalak számát, csak kódolási nyereséget lehet elérni. Az útvonal-diverzitivvel szemben a legfontosabb eltérés, hogy az egyes diverziti-útvonalakat egy entitásként kezeljük. Erre egy lehetőség a tér-idő trelliskódok használata. (A tér-idő blokk-kódok általában nem rendelkeznek önmagukban kódolási nyereséggel.)

A módszer lényege: a központi állomásban (pl. egy bázisállomás-vezérlő jellegű funkcionális egységben) egy $1/n$ kódsebességű tér-idő trelliskódoló n párhuzamos folyamatot produkál a bejövő szimbólumok kódolása révén. Időben a kódsebesség egységnyi, a redundanciát a tértartomány adja, emiatt nincs szükség járulékos sáv szélesség igénybe vételére. Az n antennához tartozó n darab adatfolyamot n kü-

lönböző bázisállomáson keresztül, eltérő útvonalakon továbbítjuk a terminál felé. A vevő a csatorna állapotának (a csatornamátrix elemeinek) ismeretében egy vektoriális Viterbi-algoritmussal dekódolja a vett jelet. A vektoriális Viterbi-dekódoló a trellisdekódolással az optimális kombinálást is megvalósítja.

A mikrohullámú hálózatokban elterjedt útvonaldiverziti (route diversity) általánosított változatát javasoltam, amely az útvonaldiverziti rendszert egy MIMO rendszerként kezeli. Ez a rendszer az antennák sajátosságai miatt „párhuzamos MIMO” rendszer. Megmutattam, hogy az általánosított útvonaldiverziti megvalósítható tér-idő trelliskódok segítségével. Kimutattam, hogy a trelliskódok a párhuzamos MIMO csatornában akkor optimálisak, ha a kódszavak közötti euklideszi távolság a lehető legnagyobb. A módszer hatékonyságát mind Rayleigh-fadings csatornára, mind 38 GHz-es pont-pont rádióösszeköttetések mért csillapítási idősorainak felhasználásával igazoltam. A módszer egyben kódolt kooperatív kommunikációs eljárás. [9], [10], [11], [12], [13]

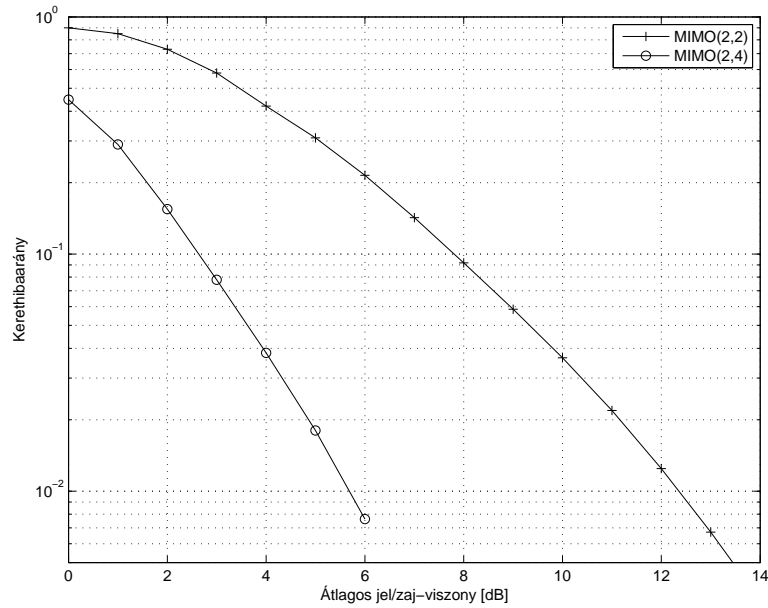
II. 2. altézis

A tér-idő kódokkal kapcsolatos korai kutatásokban a lineáris modulációs rendszereket (PSK, QAM) helyezték előtérbe. A folytonos fázisú modulációkkal (Continuous Phase Modulation, CPM) kapcsolatban csak néhány elméleti eredményt publikáltak. Ebben az altézisben egy konstruktív módszert mutatok be, ami a nemlineáris folytonos fázisú moduláció alapsávi jel impulzus-amplitúdómodulált (PAM) összetevőkre bontásán (az ún. Laurent-féle felbontáson [Lau86]) alapul, és PSK modulációhoz kidolgozott tér-idő trelliskódokkal éri el a diverzitizálást.

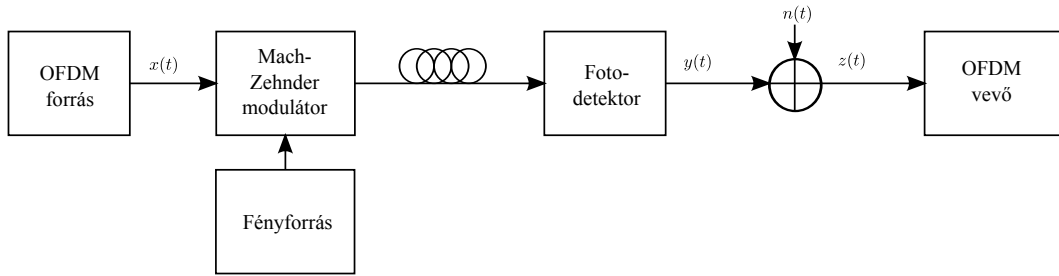
Megmutattam, hogy az eredetileg lineáris modulációkhoz kidolgozott tér-idő trelliskódok használhatók folytonos fázisú modulációkhoz is, úgy, hogy a CPM jellegű modulációk Laurent-féle sorfejtése segítségével visszavezetem a CPM átvitel problémáját a QPSK-hoz kidolgozott tér-idő trelliskódokra. Példaként a legegyszerűbb esetet, az MSK modulációt dolgoztam ki, és szimulációval igazoltam, hogy az antennák számának megfelelően elvárható diverzitinyereség elérhető a módszerrel (5. ábra). [14]

III. tézis: Optikai nemlinearitások az OFDM radio-over-fibre átvitelben

A radio-over-fibre technikával modulált rádiófrekvenciás jelet továbbítanak optikai hordozón. Az optikai szakasz (6. ábra) rádiófrekvenciás ekvivalense, Bessel-függvénnyel leírható amplitúdótorzítás, ismert az irodalomból [HAR02]. Ezt az összefüggést optikai szimulátorral ellenőriztem is. A tézisben analitikus összefüggéseket adtam a nemlineáris szakasz kimenetén a jel teljesítménysűrűségére. A teljesítménysűrűség ismeretében a jel/torzítás viszony meghatározása révén a hibaarány egyszerűen meghatározható.



5. ábra. MSK kerethibaarány Rayleigh-fadinges csatornában



6. ábra. Az átviteli rendszer modellje

III. 1. altézis

Megmutattam, hogy a Bessel-függvénnyel jellemezhető nemlinearitási optikai szakasz torzítási termékei szétválaszthatók és zárt alakban adhatók meg. Analitikus formulát adtam a hasznos jel és a torzítási termékek teljesítménysűrűség-függvényének meghatározására a Mach-Zehnder modulátort alkalmazó átvitelben.

Az optikai szakasz kimenetén a teljesítménysűrűség:

$$S_{yy}(f) = \frac{c_0}{2\sigma^2} S_{xx}(f) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{c_k}{(2\sigma^2)^{2k+1}} [S_{xx}(f) * 1 \cdots * 2k+1 S_{xx}(f)] \quad (5)$$

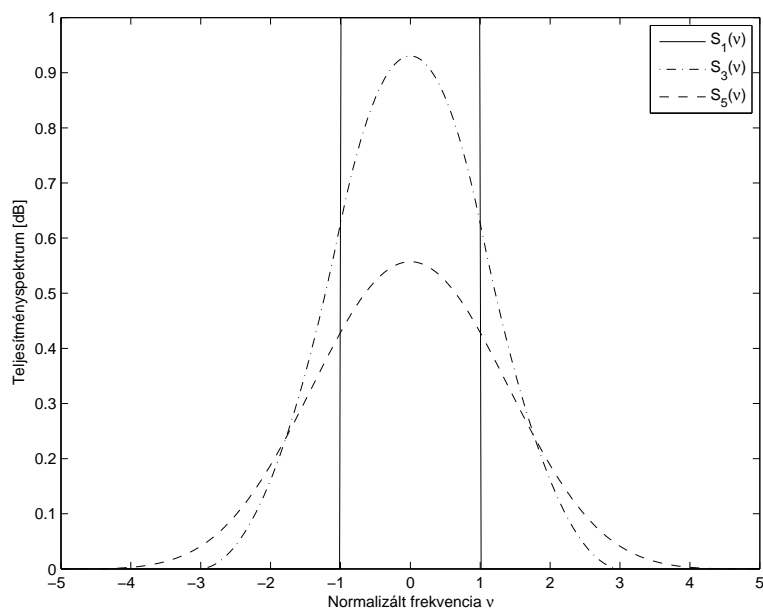
ahol k a torzítási termék indexe, S_{xx} a bemenő jel teljesítménysűrűség-függvénye, $2\sigma^2$ pedig a moduláló jel átlagteljesítménye. Az általam meghatározott c_k együtt-hatók

$$c_k = \frac{1}{(k+1)!k!} \left[2 \left(\frac{\sigma}{\sqrt{2}} \right)^{2k+1} e^{-\left(\frac{\sigma}{\sqrt{2}} \right)^2} \right]^2 \quad (6)$$

alakban írhatók. Feltételezem, hogy a modulátor megfelelő egyenfeszültségű előfeszítést kap, hogy a lineáris tartományában üzemeljen.

III. 2. altézés

Egyszerűen használható, analitikus számításokra is alkalmas, ablakfüggvényes közelítést javasoltam a torzítatlan OFDM jel spektrumának megadására (7. ábra), és ennek felhasználásával zárt formulát adtam a nemlineáris torzítási termékek spektrumburkolójára. Ez a közelítés általánosan is használható hasonló jellegű feladatok megoldására, függetlenül a nemlinearitás pontos formájától.



7. ábra. Az OFDM jel teljesítményspektrumának közelítése ablakfüggvénnyel

Kimutattam, hogy a k -adik torzítási termék teljesítménysűrűség-spektruma:

$$S_k(\nu) = \frac{(2\sigma^2)^l}{2^l(l-1)!} \sum_{m=0}^l (-1)^m \binom{l}{m} (\nu + l - 2m)^{l-1} u(\nu - m), \quad (7)$$

ahol $l = 2k + 1$, $\nu = f/T$ a normalizált frekvencia, és $u(\cdot)$ az egységugrás-függvény.

III. 3. altézés

A III. 2. altézésben leírt közelítés segítségével zárt alakban meghatároztam az optikai szakasz kimenetén megjelenő jel teljes spektrumát és a kimenő jel jel/torzítás-viszonyát. [15], [16], [17]

A teljes jel teljesítménysűrűség-spektruma:

$$S_y(\nu) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k S_k(\nu), \quad (8)$$

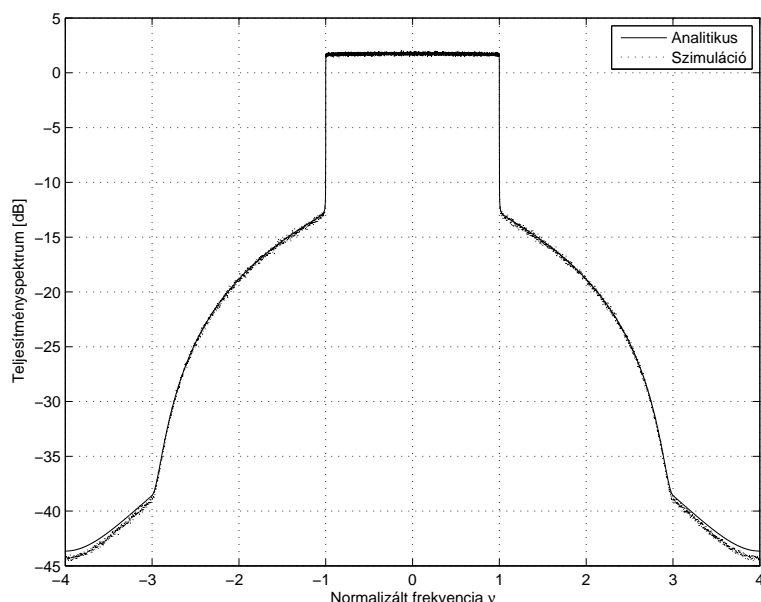
ahol c_k az (6) alapján számítható ki, $S_k(\nu)$ pedig vagy numerikusan a modulált jel teljesítménysűrűségének ismeretében, vagy az általam javasolt (7) közelítés alapján határozható meg (8. ábra).

Ezek segítségével kiszámítható az l normalizált frekvencián elhelyezkedő alvivőre a jel/(zaj + torzítás) viszony:

$$\rho_{\text{eff},l} = \frac{S_u(\nu)}{N_0 + S_d(\nu)} \Big|_{\nu=l}, \quad (9)$$

ahol S_u a hasznos jel, S_d a torzítási termékek, és N_0 a termikus zaj teljesítménysűrűsége. Ez határozza meg az adott alvivőn a hibaarányt, az ismert – modulációfüggő – hibaarány-összefüggésekbe behelyettesíthető, és az összes alvivőre átlagolható.

A formulák segítségével a tervezésben használható görbéket készítettem, amelyek a back-off, mint paraméter függvényében mutatják az elérhető kódolatlan hibaarányt.



8. ábra. A torzított jel teljesítményspektruma analitikusan és szimulációval,
Back-off: 2.15 dB

Az eredmények hasznosulása

Az eredmények nagy részét nemzetközi együttműködés keretében értem el (IST FP5 EMBRACE, IST FP6 BROADWAN, IST FP6 SatNEx), azok kutatási jelentéseiben is megjelentek. A MIMO technikákkal kapcsolatos kutatás folyamatosan beépítésre kerül egyes, az egyetemen oktatott tárgyakba. A polarizációdiverziti vizsgálatok eredményeit közvetve felhasználták mobil hálózatok méretezéséhez, tervezéséhez.

Vezetésem alatt tézisekhez kapcsolódóan hallgatói diplomatervek és TDK dolgozatok is készültek, a II. tézis témájához kapcsolódó TDK dolgozat szerzője OTDK 1. helyezést ért el. Az elért eredményeket nemzetközi folyóiratokban és konferenciákon

publikáltam, publikációimra többen hivatkoztak. A [13] folyóiratcikket a Hírközlési és Informatikai Tudományos Egyesület Pollák-Virág díjjal ismert el.

A bemutatott szimulációs eredményeket nagyrészt saját fejlesztésű szoftvereszközökkel hoztam létre: mind a MIMO-technikákhoz, mind az OFDM-hez kapcsolódó eredmények egy kommunikációs célú C++ elemkönyvtár felhasználásával születtek meg. Az FDTD számításokhoz készült saját szoftvereszközt a Mobil Innovációs Központ által támogatott kutatás keretében hoztam létre, a kódot a tanszéken a továbbiakban is használni fogják önállóan és más eszközök részeként is.

Az OFDM nemlineáris torzulásával kapcsolatos eredményeket egy európai uniós projekt keretében kognitív rádiós eszközök fizikai rétege vizsgálatában és tervezésében is hasznosítjuk.

Tézisekhez kapcsolódó saját publikációk

- [1] N. MORAITIS, P. HORVÁTH, P. CONSTANTINOU, and I. FRIGYES, „On the capacity evaluation of a land mobile satellite system using multiple element antennas at the receiver,” in *3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP2009)*. Berlin, Germany: VDE Verlag GmbH, 23-27 March 2009, p. 5. [Online]. Available: <http://www.vde-verlag.de/data/prcd.php?docid=453152411>
- [2] N. MORAITIS, P. HORVÁTH, P. CONSTANTINOU, and I. FRIGYES, „On the capacity of a SIMO land mobile satellite system: polarized and depolarized received field,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, Átdolgozás alatt.
- [3] P. R. KING, P. HORVÁTH, F. PÉREZ-FONTÁN, I. FRIGYES, and S. STAVROU, „Satellite channel impairment mitigation by diversity techniques,” in *14th IST Mobile and Wireless Communications Summit*, Dresden, Germany, Jun. 2005.
- [4] V. M. KAPINAS, P. HORVATH, G. K. KARAGIANNIDIS, and I. FRIGYES, „Time synchronization issues for quasi-orthogonal space-time block codes,” in *Proc. International Workshop on Satellite and Space Communications IWSSC '07*, 13–14 Sept. 2007, pp. 66–70.
- [5] P. HORVÁTH, G. K. KARAGIANNIDIS, P. R. KING, S. STAVROU, and I. FRIGYES, „Investigations in satellite MIMO channel modeling: Accent on polarization,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2007, p. 10 pages, 2007.
- [6] P. HORVÁTH and I. FRIGYES, „Application of the 3D polarization concept in satellite MIMO systems,” in *IEEE Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06.*, Nov. 2006, pp. 1–5.
- [7] P. HORVÁTH and I. FRIGYES, „Investigation of the polarization properties of satellite channels with multiple antennas,” in *European Conference on Antennas and Propagation*, 2006.

- [8] I. FRIGYES and P. HORVÁTH, „Polarization-time coding in satellite links,” *IEEE Satellite and Space Newsletter*, vol. 15, no. 2, pp. 6–8, April 2005.
- [9] I. FRIGYES and P. HORVÁTH, „Mitigation of rain-induced fading: route diversity vs route-time coding,” in *Twelfth International Conference on Antennas and Propagation, 2003. (ICAP 2003).*, vol. 1, 31 March-3 April 2003, pp. 292–295.
- [10] G. KARAGIANNIDIS, M. BOUSQUET, C. CAINI, S. CIONI, I. FRIGYES, P. HORVÁTH, T. JAVORNIK, G. KANDUS, M. LUGLIO, P. SALMI, M. VÁZQUEZ-CASTRO, and D. ZOGAS, *Digital Satellite Communications*, ser. Information Technology: Transmission, Processing and Storage. Springer, 2007, ch. Diversity Techniques and Fade Mitigation, pp. 313–365, ISBN: 978-0-387-25634-4.
- [11] P. HORVÁTH and I. FRIGYES, „Application of the MIMO concept in millimeter-wave broadband wireless access networks,” *International Journal of Wireless Information Networks*, vol. 11, no. 4, pp. 217–225, October 2004.
- [12] P. HORVÁTH, „A tér-idő kódolás,” *Híradástechnika*, vol. LVIII/1, pp. 9–12, 2003.
- [13] P. HORVÁTH, „Space-time coding – an Introduction,” *Híradástechnika*, vol. LVIII/6, pp. 22–25, jan. 2003, (lektorált).
- [14] P. HORVÁTH and I. FRIGYES, „A space-time coding scheme for mobile CPM systems,” in *Workshop on "Nomadic Data Services and Mobility", tcmc2003*, Graz, 2003.
- [15] P. HORVÁTH and I. FRIGYES, „Effects of the nonlinearity of a Mach-Zehnder modulator on OFDM radio-over-fiber transmission,” *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 10, pp. 921–923, Oct 2005.
- [16] I. FRIGYES and P. HORVÁTH, „OFDM transmission in radio over fiber systems,” in *3rd European NEFERTITI Workshop*, Budapest, Hungary, Sep. 2003.
- [17] I. FRIGYES and P. HORVÁTH, „Fiber radio,” in *Workshop on "Nomadic Data Services and Mobility", tcmc2003*, ser. OVE Series, Graz, Austria, Oct 2003.

Irodalomjegyzék

- [FMBH05] I. FRIGYES, B. G. MOLNÁR, Z. BODNÁR, and Z. HERCZKU, „Antenna gain and polarization effects in wireless links – accent on LEO satellites,” *Space Communications*, vol. 3-4, pp. 199–208, 2005.
- [GSsS+03] D. GESBERT, M. SHAFI, D. SHAN SHIU, P. SMITH, and A. NAGUIB, „From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 3, pp. 281–302, April 2003.

- [HAR02] S. K. H. AL-RAWESHIDY, Ed., *Radio over fiber technologies*. Boston, London: Artech House, 2002.
- [Lau86] P. LAURENT, „Exact and approximate construction of digital phase modulations by superposition of amplitude modulated pulses (AMP),” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 34, no. 2, pp. 150–160, 1986.
- [PGNB04] A. J. PAULRAJ, D. A. GORE, R. NABAR, and H. BÖLCSKEI, „An overview of MIMO communications – a key to gigabit wireless,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 198–218, Feb 2004.
- [SDB⁺07] S. SCALISE, M. A. DÍAZ, J. BITÓ, M. BOUSQUET, L. CASTANET, I. FRIGYES, P. HORVÁTH, A. JAHN, M. KREJCAREK, J. LEMORTON, M. LUGLIO, S. MOROSI, M. NERI, and M. VÁZQUEZ-CASTRO, *Digital Satellite Communications*, ser. Information Technology: Transmission, Processing and Storage. Springer, 2007, ch. Satellite Channel Impairments, pp. 65–115, ISBN: 978-0-387-25634-4.

Idegen hivatkozások

- M. M. SISTO, S. LAROCHELLE, and L. A. RUSCH, „Gain optimization by modulator-bias control in radio-over-fiber links,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, pp. 4974–4982, 2006.
- B. UMASANKAR, A. D. S. JAYALATH, and X. FERNANDO, „Adaptive performance improvement of OFDM radio over fiber systems,” in *Proc. International Symposium on Signals, Systems and Electronics ISSSE '07*, A. D. S. JAYALATH, Ed., 2007, pp. 611–614
- K. P. LIOLIS, A. D. PANAGOPOULOS, and P. G. COTTIS, „Multi-satellite MIMO communications at Ku-band and above: Investigations on spatial multiplexing for capacity improvement and selection diversity for interference mitigation,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2007, 2007.
- L. CHEN, S. WEN, Y. LI, J. HE, H. WEN, Y. SHAO, Z. DONG, and Y. PI, „Optical front-ends to generate optical millimeter-wave signal in radio-over-fiber systems with different architectures,” *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 11, pp. 3381–3387, 2007.
- K. CHAMBERLIN, S. VALCOURT, A. KUN, and B. MCMAHON, „Evaluation of datacasting in the mobile environment,” in *Proc. VTC-2007 Fall Vehicular Technology Conference 2007 IEEE 66th*, S. VALCOURT, Ed., 2007, pp. 159–163.