

Nagyfrekvenciás rádióösszeköttetések fading és interfading időtartamának digitális modellezése és alkalmazásai csillapítás idősorok előállítására

PhD értekezés téziszülete

Készítette:
Csurgai-Horváth László

Témavezető:
Dr. Bitó János



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

2010.

Bevezetés

A Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszéken (BME-HVT) 1997 óta üzemel egy olyan mérőrendszer, amely 13-80 GHz-es frekvenciatartományban működő rádióösszeköttetések csapadék által befolyásolt hullámterjedési viszonyainak vizsgálatát szolgálja. A folyamatosan bővülő adatgyűjtő hálózat állandóhelyű földi rádióösszeköttetések vételi jelszint adatait, valamint számos meteorológiai jellemzőt mér és rögzít. Az elmúlt több mint tíz év alatt jelentős mennyiségű adat gyűlt össze, amely a hullámterjedési vizsgálatok, kutatások és modellezések számára szolgál kiindulási pontként.

Ezek a mérési adatok különösen alkalmasak a nagyfrekvenciás rádióösszeköttetések vizsgálatára, elemzésére, többféle statisztikai jellemző megállapítására valamint az olyan modellalkotási feladatokban, ahol hosszú mérési idősorokból kell megállapítani a modellparamétereket.

A mérőrendszer által rögzített különféle meteorológiai adatok szintén jól felhasználhatóak a kutatási munka során, mivel a vizsgált föld-föld összeköttetések tapasztalható fading jelenségek elsődleges okai a meteorológiai tényezők, elsősorban az eső, amely a milliméteres hullámhossz-tartományban jelentős csillapítást okoz.

Disszertációm központi kérdésköre a fenti mérőrendszer adataira támaszkodva digitális modellek alkotása a fading és az interfading időtartam eloszlásfüggvényeinek meghatározására, majd ezek alkalmazása mesterséges csillapítás idősorok előállítására. A földi pont-pont összeköttetések túl megalkottam egy többszörös terjedéssel és árnyékolással terhelt L-sávú földi mozgó műholdas (LMS) rádiócsatorna fading és interfading időtartam modelljét is, továbbá az erre épülő csillapítás idősor generálási módszereket. Mindezen túlmenően foglalkoztam még a kód csillapító hatásával is a V sávban (40-75 GHz), kifejlesztettem egy ködsűrűség meghatározására alkalmas mérőberendezést és kidolgoztam a műszer kalibrációs eljárását a V sávú rádiófrekvenciás mérések alapján.

Irodalmi áttekintés

A csapadékkal terhelt rádiócsatorna hullámterjedési viszonyainak átfogó megismerésére elsősorban [1]-re támaszkodtam, a többszörös terjedés fading jelenségeinek statisztikai leírását pedig a [3]-ben leírtak alapján foglaltam össze. A mérnöki gyakorlatban alkalmazható legkorszerűbb számítási eljárásokat, modelleket és a hozzájuk tartozó paramétereket az ITU (International Telecommunication Union) vonatkozó ajánlásai tartalmazzák. Az ITU-R P.530 [6] a föld-föld összeköttetések, az ITU-R P.618 [7] a föld-műhold összeköttetések csillapítás-viszonyainak számítására szolgáló eljárásokat adják meg. Az ezekben említett módszerek alkalmasak - az egyéb csillapító hatások mellett - az eső okozta csillapítás hosszú időre vonatkoztatott eloszlásfüggvényének közelítésére. Az alkalmazott összefüggések nagyrészt empirikus jellegűek és alkalmasak bizonyos mértékig a lokális, földrajzi helyzet okozta eltérések figyelembe vételére is. Az Európai Bizottság COST 235 [34] programjának összefoglaló tanulmánya szintén fontos forrásra volt számomra a milliméteres hullámhosszúságú földi hullámterjedés tanulmányozásához.

A fading jelenségek dinamikájának kérdéskörével és modellezésével az ITU-R P.1623 [10] ajánlás foglalkozik a föld-műhold csatorna vonatkozásában.

A digitális csatornamodellek és idősor generátorok alapvető összefoglalása található [32]-ben, amely mind leír, mind generatív típusú eljárásokat is ismertet. A digitális műholdas kommunikáció átfogó műve [35]. A SatNEx (Satellite Communications Network of Excellence) FP7 program, melyben a BME-HVT is részt vett, egy összefoglaló kézikönyvben [4] jelentette meg számos jelentős európai kutatóhely hullámterjedéssel kapcsolatos eredményeit.

A csillapítás idősorok stationaritás-vizsgálata során [12] valamint [16]-[20] munkákra támaszkodtam elsősorban. A struktúrafüggvényrel történő vizsgálati módszereket [21] alapján implementáltam csillapítás idősorokra. A fading és interfading időtartam folyamatoknak, mint felújítási

folyamatoknak az elemzését [13]-[14], továbbá a variációs együtthatók [22] szerinti definíciója alapján végeztem. A Markov folyamatok és Markov láncok elméletére vonatkozóan [13] és [23] irodalmakra hivatkoztam elsősorban. A csatornamodellezésben jelenleg is elterjedt Markov modelleket először [29]-[31]-ben írták le, ezek szolgálták alapul további kutatási munkámhoz.

Célkitűzések

Az ITU-R, mint a rádiófrekvenciás tervezési ajánlások irányadó szervezete csupán a föld-műhold csatorna fading időtartamának statisztikai modellezésére ad iránymutatást. Sem földi, sem LMS összeköttetésekre vonatkozóan nem állapít meg eljárást, az interfading időtartam modellezése pedig egyik csatornatípus esetén sem megoldott. Mindezek motiválták a fading és interfading időtartam Markov láncokra épülő, digitális modellezési eljárásának kidolgozására. A megfelelő modelltípus kiválasztását azonban meg kellett előznie a modellalkotás alapjául szolgáló mért csillapítás idősorok elemzése. Ennek érdekében a stacionaritást, a felújítási folyamatokkal való kapcsolatot, valamint a Markov-tulajdonságot és rendűséget vizsgáltam meg, amelyek az első tézis-csoportban kerültek összefoglalásra.

A fenti elemzések elvégzése után a Fritchman-féle diszkrét idejű és diszkrét állapotú Markov-láncot alkalmasnak találtam a fading és az interfading időtartam eloszlásfüggvényeinek digitális modellezésére. A második tézis-csoport a modellparaméterezéssel és a paraméterek küszöbszint-függését leíró egyenletek meghatározásával foglalkozik. Ezen túlmenően egy olyan megoldást is kidolgoztam, amellyel egyesíthető a fading és az interfading időtartam modellje.

A fading és interfading időtartam modelljei a küszöbszint-függést leíró egyenletek felhasználásával lehetőséget nyújtanak szintetikus csillapítás idősorok előállítására is. Ezzel a témakörrel foglalkozik a harmadik tézis-csoport, amelyben ismertetem az általam kidolgozott többféle idősor-generálási módszert.

A földi mikrohullámú ellátóhálózatok kapacitásának növelése egyre időszerűbb kérdés. A V-W sávban azonban fokozottabban jelentkezik a levegőben köd formájában lebegő folyékony víz által okozott csillapítás. Az LWC (Liquid Water Content) közvetlen mérésére alkalmas az az optikai reflexiós elven működő készülék, amelynek kifejlesztését és kalibrációs eljárását a disszertáció utolsó fejezetében, mint a témához szorosan kapcsolódó gyakorlati alkalmazást ismertetem.

Kutatási módszerek

- Irodalomkutatást végeztem a fading jelenségek digitális modellezése és a mesterséges idő-sor-előállítás témakörében (folyóiratok, szakkönyvek, IEEE Explore).
- Analitikus módszerekkel vizsgáltam a földi és mozgó műholdas rádiócsatornák csillapítás idősorainak gyenge stacionaritását, a digitális fading és interfading időtartam folyamatokat mint felújítási folyamatokat, valamint ezeknek a folyamatoknak a Markov-rendűségét.
- Szimulációval vizsgáltam többféle Markov modell által generált digitális fading és interfading időtartam folyamatot és azok kapcsolatát a felújítási folyamatokkal.
- Regressziós eljárás alkalmazásával mért adatokból paramétereztem Markov modelleket, majd analitikusan megadtam a modellparaméterek általános számítási alakját.
- Modelljeim érvényességét azok első és másodrendű statisztikáinak a mérési adatok statisztikáival történő összevetésével ellenőriztem. A szintetikus idősorok előállítási módszereit hosszú idejű számítógépes szimulációkkal teszteltem.
- Számítógépes adatfeldolgozás, adatbázis-kezelés és megjelenítés; valamint a konkrét mű-szertervezés és kivitelezés során a szélsőséges körülmények között üzemelő berendezésekre vonatkozó tervezési ismeretek alkalmazása képezte a kutatás gyakorlati részét.

Új tudományos eredmények

1. Téziscsoport: Fadinggel terhelt rádiócsatorna csillapítás idősorainak vizsgálata

Elemeztem a földi rádiócsatorna eső okozta, illetve a földi mozgó műholdas csatorna többutas terjedés okozta fading jelenségeit annak érdekében, hogy a második téziscsoportban ismertetésre kerülő fading dinamika modellek kiválasztásának helyességét bebizonyítsam.

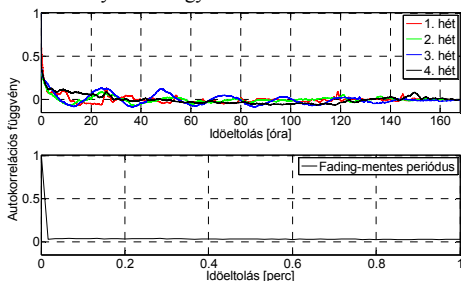
Első lépésként mind az állandóhelyű, mind az LMS rádiócsatorna csillapítás idősorainak stationaritását vizsgáltam meg az autokorrelációs függvény, a várható érték, és a struktúrafüggvény segítségével. Ezt követően a felújítási folyamatokkal való kapcsolatot elemeztem a variációs együtthatók kiszámításával. Itt foglalkoztam az egyes Markov-láncok által generált folyamatokkal, mint felújítási folyamatokkal és azok tulajdonságainak kiértékelésével. A téziscsoportot végül a diszkrét állapotterű fading folyamatok, mint Markov-láncok rendjének meghatározása zárja.

1.1 altézis: Többféle eljárással is megvizsgáltam földi, milliméteres hullámhossztartományban üzemelő, eső okozta fadinggel terhelt, valamint L sávú földi mozgó műholdas (LMS) rádiócsatornák csillapítás idősorainak stationaritását. Megállapítottam, hogy a vizsgált fading folyamatok gyengén stationárius folyamatok. További vizsgálatokkal kimutattam, hogy modellezés szempontjából indokolt lehet a tisztán fading-mentes valamint a fadinggel terhelt szakaszok elkülönítése, amely alátámasztja a kombinált Markov modellek későbbi alkalmazásának a helyességét. [S1] [S2] [S7] [S40]

A különböző típusú fadinggel terhelt rádiócsatornákon a csillapítás értéke általában valamilyen véletlen folyamat szerint változik. Ha ezt a folyamatot egy sztochasztikus modellel szeretnénk

szimulálni, a modellparaméterek csak akkor határozhatóak meg egyértelműen az eredeti folyamat alapján, ha annak statisztikai tulajdonságai időben állandóak. Dolgozatomban a csillapítás idősorok gyenge stationaritását vizsgáltam meg a rendelkezésemre álló LMS illetve földi mért adatokból. Az autokorrelációs függvény alkalmas eszköz annak eldöntésére, hogy a fading folyamat egymást követő mintái milyen időeltolási értéket meghaladóan függetlenek egymástól. Ez például esőcsillapítás esetén néhány óra, míg a tisztán fading-mentes szakaszokon ennél lényegesen rövidebb idő. Ez a számítás a várható érték időbeli állandóságának vizsgálatához szolgáltatta azt az időtartamot, amely a mozgó átlagoláshoz szükséges. Az eredmény kiértékeléséhez a Wald-Wolfowitz runs tesztet alkalmaztam, amely mintaelemek mediánhoz viszonyított eltéréseinek véletlenszerűségét vizsgálja. Ezen teszt alapján a várható érték nem bizonyult állandónak, de mivel a „run”-ok száma igen alacsony volt az N és N értékeihez képest, ezért a gyenge stationaritás vizsgálatát a Kolmogorov-féle struktúrafüggvényrel is elvégeztem.

Egy $r(t)$ sztochasztikus folyamat τ időeltolástól függő $D_r(\tau)$ struktúrafüggvénye a következő várható érték: $D_r(\tau) = E\{[r(t+\tau) - r(t)]^2\}$, melyet az autokorrelációs függvény $\tau=0$ esetén vett $R_r(0)$ értékével normalizálva, a $D'_r(\tau) = D_r(\tau)/R_r(0)$ érték 2-höz konvergál stationer folyamatok esetén.

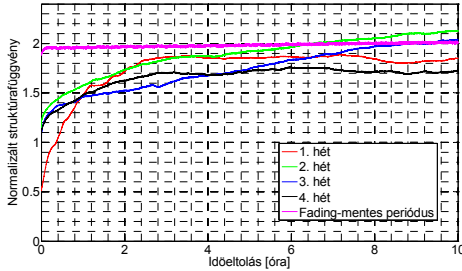


HU11-en mért csillapítás idősorok autokorrelációs függvénye

HU11-en mért csillapítás idősorok autokorrelációs függvénye. Ez például esőcsillapítás esetén néhány óra, míg a tisztán fading-mentes szakaszokon ennél lényegesen rövidebb idő. Ez a számítás a várható érték időbeli állandóságának vizsgálatához szolgáltatta azt az időtartamot, amely a mozgó átlagoláshoz szükséges. Az eredmény kiértékeléséhez a Wald-Wolfowitz runs tesztet alkalmaztam, amely mintaelemek mediánhoz viszonyított eltéréseinek véletlenszerűségét vizsgálja. Ezen teszt alapján a várható érték nem bizonyult állandónak, de mivel a „run”-ok száma igen alacsony volt az N és N értékeihez képest, ezért a gyenge stationaritás vizsgálatát a Kolmogorov-féle struktúrafüggvényrel is elvégeztem.

Egy $r(t)$ sztochasztikus folyamat τ időeltolástól függő $D_r(\tau)$ struktúrafüggvénye a következő várható érték: $D_r(\tau) = E\{[r(t+\tau) - r(t)]^2\}$, melyet az autokorrelációs függvény $\tau=0$ esetén vett $R_r(0)$ értékével normalizálva, a $D'_r(\tau) = D_r(\tau)/R_r(0)$ érték 2-höz konvergál stationer folyamatok esetén.

Ezt a számítást a vizsgált csillapítás idősrora elvégezve megállapítható, hogy a folyamat teljesíti-e a gyenge stationaritás kritériumait. A kiértékelés során az autokorrelációs függvény által mutatott beállási időt meghaladó időeltolási értékeknél tekintetem a struktúrafüggvény értékeit meghatározónak a stationaritás szempontjából. A módszer mind LMS, mind földi pont-pont összeköttetés esetén alkalmazhatónak bizonyult.



HU11 összeköttetésen mért csillapítás idősrók struktúrafüggvénye

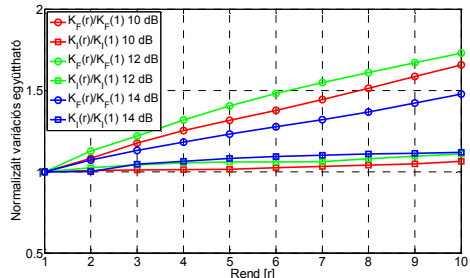
Markov modellek későbbi alkalmazásának a helyességét. Ezen modellek a fading folyamat makroszkopikus jellegét egy kétállapotú Markov-lánccal, mikroszkopikus struktúráját pedig egy összetettebb modellel állítják elő.

1.2 altézis: Beveztem a digitális fading és interfading időtartam folyamatokat (DFD és DIFD), majd az ebből származtatható többszörös DFD és DIFD folyamatokat. Mind LMS, mind földi rádiócsatornák esetében a rendelkezésre álló mérések alapján megvizsgáltam ezen folyamatok kapcsolatát a felújítási folyamatokkal. Megállapítottam, hogy a többszörös DFD folyamat egyik csatorna esetében sem felújítási folyamat valamint pozitívan korrelált, míg a többszörös DIFD folyamat mind a többutas terjedés, mind az eső okozta csillapítás esetén felújítási folyamat. [S23] [S24]

Ebben az altézisben a fading folyamatnak egy olyan absztrakcióját képeztem, amely egy adott küszöbszinten bináris fading/nem-fading folyamatként tekinthető. Ezt digitális fading illetve interfading időtartam folyamatnak neveztem el. Definiáltam továbbá a többszörös digitális fading és interfading időtartam folyamatokat (magasabb rendű folyamatok), majd megvizsgáltam, hogy ezen folyamatok felújítási folyamatot alkotnak-e. A számításokat a variációs együtthatók segítségével végeztem el, amely definíció szerint a folyamat szórásnégyzetének az azonos $p = Pr(e_i = 1)$

esemény-valószínűségű BSC csatorna szórásnégyzetével történő normalizálása után kapható meg.

Amennyiben a DFD valamint a DIFD folyamatok normalizált variációs együtthatói a rend függvényében növekednek vagy csökkennek, a folyamat pozitívan vagy negatívan korrelált és nem tekinthető felújítási folyamatnak. A rendtől független konstans érték pedig



DFD és DIFD normalizált variációs együtthatói (LMS, város)

felújítási folyamatra utal. Számításaim szerint a többszörös DFD folyamatok mind LMS, mind földi csatorna esetén pozitívan korreláltak, nem felújítási folyamatok, míg a többszörös DIFD folyamatok felújítási folyamatot alkotnak. A fading és az interfading időtartam digitális modellezését generatív típusú Markov modellekkel oldottam meg, amely a második téziscsoport témája. A megfelelő típusú modell kiválasztása azonban szükségessé tette a modellek felújító tulajdonságának az elemzését, ami a következő altézisben került kifejtésre.

1.3 altézis: Szimuláció segítségével megvizsgáltam többféle, a csatornamodellezésben használatos Markov-láncot annak eldöntésére, hogy az általuk generált többszörös DFD és DIFD folyamatok felújítási folyamatoknak tekinthetők-e. Ez alapján választottam ki a Fritchman-modellt, mint a fading és interfading időtartam modellezésre legalkalmasabb típust. [S23] [S24]

A Gilbert, Gilbert-Elliott valamint az általános Fritchman-féle Markov modelleket szimuláció segítségével megvizsgáltam és megállapítottam, hogy az általuk generált DFD illetve DIFD folyamatok mikor alkotnak felújítási folyamatokat. Az eredmények alapján az egyszerűsített Fritchman-modell választottam a következő indokok szerint:

- A Fritchman-modell felújító tulajdonsága megegyezik mind az LMS, mind a földi rádiócsatornák többszörös DFD és DIFD felújítási folyamataival.
- A Fritchman-modell széles körben elterjedt a rádiócsatornák burst típusú hibafolyamatainak modellezésében, amely nagy hasonlóságot mutat a DFD és DIFD folyamatokkal.
- Mind a Gilbert, mind a Gilbert-Elliott modell átranzformálható Fritchman-modellé, annak egyszerűsített változataiként foghatók fel.

1.4 altézis: Kiszámítottam az eső okozta fading csillapítás, valamint az LMS csatorna többutas terjedés általi fading csillapítás folyamatának, mint Markov-láncnak a rendjét. Megállapítottam, hogy mindkét esetben alacsony rendű a folyamat, ezzel bebizonyítottam, hogy az elsőrendű Markov-lánc csillapítás idősorok szintetikus előállítására jó közelítéssel alkalmazható. [S19] [S22]

A modellválasztás további szempontja az is, hogy a Markov-lánccal modellezni kívánt folyamat milyen rendű. Ehhez a vizsgálathoz a Bartlett és Hoel által javasolt [24]-[25] Chi-négyszet próbát végeztem el annak eldöntésére, hogy egy adott mintasorozat r -ed rendű Markov-láncnak tekinthető-e.

Megállapítottam, hogy mind LMS, mind esőcsillapítással terhelt földi csatorna esetében mind a fadinggel terhelt periódusok, mind a fading-mentes (szcintillációt tartalmazó) periódusok folyamatai jó közelítéssel elsőrendű Markov folyamatok. A téziscsoport eredményeit felhasználva ezért elsőrendű, Fritchman-féle Markov láncot alkalmazok a fading és az interfading időtartam modellezésére.

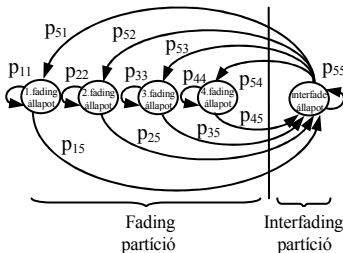
2. Téziscsoport: Fading és interfading időtartam Markov modellezése

A második téziscsoporthoz kapcsolódó munkámban a stacionaritás, a felújítási folyamatok és a Markov-tulajdonság vizsgálatára vonatkozó eredményeim alapján kiválasztott Fritchman-típusú Markov-lánc fading és interfading időtartam modellezésre való alkalmazását ismertetem.

Megmutatom, hogy Fritchman típusú Markov-lánccal jól modellezhető a fading és az interfading időtartam eloszlásfüggvénye. Megadom a modellek küszöbszint-függésének kifejezésére szolgáló

egyenleteket, amelyek alkalmassá teszik majd azokat szintetikus idősorok előállítására is. Ezen túlmenően a kétféle modell egyesítésére is bemutatok egy általam kifejlesztett eljárást.

2.1 altézis: Megmutattam, hogy a Fritchman-féle particionált Markov-lánc alkalmas az eső és a többutas terjedés fading és interfading időtartam eloszlásainak modellezésére. Meghatároztam azokat az összefüggéseket, amelyek analitikusan megadják a modellparaméterek küszöbszinttől való függését. Ezzel lehetővé tettem a tetszőleges szinthez tartozó eloszlások kiszámítását, amely alkalmassá teszi ezen modelleket mesterséges csillapítás idősorok előállítására is. [S8] [S9] [S33] [S34] [S37] [S38] [S39]



Az első téziscsoport vizsgálatai alapján a Fritchman-féle elsőrendű, diszkrét állapotú és diszkrét idejű Markov láncot választottam a fading és az interfading időtartam eloszlásának modellezésére.

A modell 4/1 állapotú particionált Markov lánc, ahol a partíciókban való tartózkodás valószínűsége analitikusan kifejezhető, és a fading illetve interfading időtartam komplex eloszlást adja meg. A modellparaméterek az u.n. gradiens eljárással a mért idősorok fading illetve interfading

időtartamának komplex eloszlásfüggvényeiből meghatározhatók. Az eljárás az eloszlásfüggvények lineáris regresszióján alapul, melynek során a regressziós egyenesek egyenleteiből kapjuk a Markov lánc állapotátmeneti valószínűségeit.

Megvizsgáltam továbbá a modellparamétereknek a fading illetve interfading időtartam számításánál alkalmazott küszöbszintektől való függését, és megállapítottam, hogy a $p(K)=aK^c+b$ alakú exponenciális egyenlettel ez a szintfüggés kifejezhető. Mind LMS, mind földi összeköttetésekre meghatároztam a paraméterszámításhoz szükséges a , b és c konstansokat. Ezzel olyan általános, küszöbszinttel paraméterezhető fading és interfading időtartam modellt készítettem, amely lehetővé teszi mesterséges csillapítás idősorok előállítására is.

2.2 altézis: Kidolgoztam egy új számítási módszert a fading és az interfading időtartam modellek egyesítésére, melynek segítségével egyetlen modell képes mindkét folyamat eloszlásfüggvényeinek leképezésére. Az egyesített modell érvényességét a szimulált és a mért fading és interfading időtartam eloszlások összehasonlításával végeztem el. [S35] [S36]

Ebben az altézisben a fading és az interfading időtartam modelljeinek az egyesítésére adok egy eljárást. Eredményül egy 4/4-es Fritchman modellt kaptam, amely mindkét típusú másodrendű statisztikát eredményesen modellezi. Az egyesített modell állapotátmeneti valószínűségeinek a meghatározására a különálló modellek stacioner állapotvalószínűség értékeinek felhasználásával történő súlyozást alkalmaztam. A modelltől számított fading és interfading időtartam statisztikák jól közelítik a mért adatsorok hasonló statisztikáit, amely így az egyesített modell érvényességét bizonyítja.

3. Téziscsoport: Csillapítás idősorok szintetikus előállítása Markov modellek felhasználásával

Ebben a téziscsoportban a fading és interfading időtartam általam megalkotott modelljeinek a szintetikus csillapítás idősorok előállításában történő alkalmazásait taglalom.

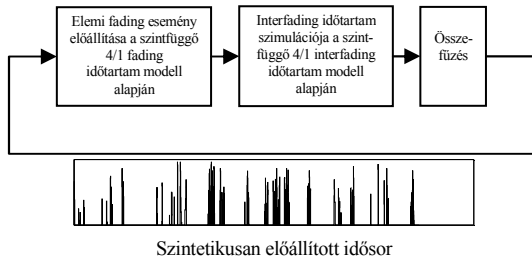
Háromféle módszert dolgoztam ki mesterséges csillapítás idősorok előállítására:

- Tisztán a fading és interfading időtartam modellek alapján történő idősor-generálás.
- A kétállapotú fading/nem-fading modell és a szintfüggő fading időtartam modell kombinálásából adódó eljárás.
- A szélességi és szélirány Markov modellezésén alapuló, az esőcellák kétdimenziós véletlen bolyongásos mozgási szimulációjára épülő csillapítás idősor generátor.

3.1 altézis: Kidolgoztam a fading és interfading időtartam eloszlásfüggvényeinek küszöbszinttel paramétrezhető modelljeire épülő csillapítás idősor generátort. Kifejlesztettem egy, a fading időtartam komplexens eloszlásából történő elemi fading esemény előállítási módszert. [S27] [S31] [S32]

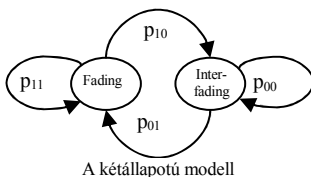
Mivel a fading illetve az interfading időtartam eloszlásfüggvényeit a második téziscsoport eredményei alapján tetszőlegesen megválasztható küszöbszinten tudom modellezni, ez lehetővé teszi a szintetikus csillapítás idősorok előállítását is. Ebben az eljárásban a fading időtartam modell segítségével elsőként egy elemi fading eseményt állítok elő, amely definícióim szerint a rádiócsatorna csillapítás idősorának olyan szakasza, ahol a csillapítás egymás utáni mintavételi időpontokban vett A_i értékei az A_M fading-mentes értékhez viszonyítva monoton növekvők, majd egy maximumhelyet elérve monoton csökkennek.

Két elemi fading esemény közötti időtartam szimulációjára az interfading időtartam modelljét alkalmaztam. Egymás után fűzött fading eseményekből és fading-mentes periódusokból tetszőleges hosszúságú idősor állítható össze, melynek a csillapítás eloszlása a számítások szerint jól közelíti a mérési adatok eloszlását.

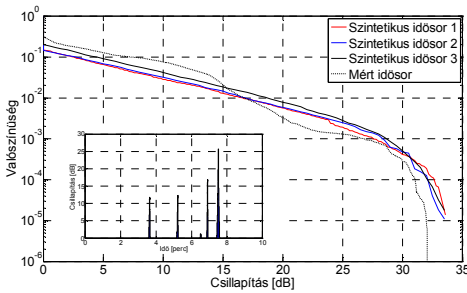


3.2 altézis: Kidolgoztam egy olyan csillapítás idősor generátort, amely egy kétállapotú fading/nem-fading eseményeket előállító Markov modellre és a fading időtartam modellre épül. Eljárást dolgoztam ki a kétállapotú Markov-lánc paramétereinek meghatározására a fading időtartam modell alapján. [S27] [S30]

Az első altézisben ismertetett módszert továbbfejlesztettem oly módon, hogy a fading/nem-fading periódusokat egy kétállapotú Markov-lánccal szintetizáltam, majd az így meghatározott idősorban elemi fading eseményekkel töltöttem fel a fadinges szakaszokat. Ezzel a módszerrel a fading folyamatban jelenlévő csomósodás realizztikusabban reprezentálható, mint az előző megoldás esetén. A kétállapotú fading/nem-fading modell paramétereinek a meghatározására a szakirodalomban ismert eljárásoktól eltérő, új módszert javasoltam, ami a fading időtartam szintfüggő Markov modelljére épül. A kétállapotú modellt annak két független paramétere már teljesen meghatározza. Ilyen a Z_F fading valószínűség, melyet a fading időtartam komplexens eloszlásfüggvé-



nyének modelljéből számítottam ki, valamint a p_{10} átmeneti valószínűség, ami a Fritchman modellből analitikusan kifejezhető. Ezek után a kétállapotú Markov lánc állapotátmeneti valószínűségei kiszámíthatóak, és a modell segítségével bináris fading/nem-fading sorozat állítható elő.



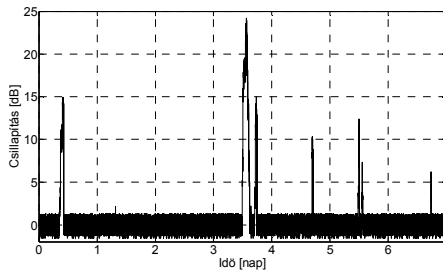
Szintetizált és mért LMS csillapítás idősor CCDF-je tízperces idősor mintasorozattal

Az ábrán az LMS csatorna fading időtartam modellje segítségével generált idősorok három különböző realizációja, valamint az ugyanolyan hosszúságú mért csillapítás idősor eloszlásfüggvénye látható.

Emellett a szintetikus csillapítás idősor egyik realizációjának tízperces mintája is ábrázolásra került.

3.3 altézis: Megmutattam, hogy a szcintilláció eredményesen modellezhető egy olyan rejtett Markov modellel, melynek felparaméterezése szűrt Gauss-i fehérzajból a Baum-Welch algoritmussal történik. Bemutattam, hogy a szcintilláció és a szintetikus csillapítás idősor szuperpozíciójával létrehozott idősor csökkenti az elsőrendű statisztikák alacsony csillapítási szinteken jelentkező hibáját. [S2] [S29]

A légköri turbulenciák által okozott kismértékű, gyors csillapítás-ingadozást, a szcintillációt az eddig bemutatott eljárások nem modellezték. Ennek a hatásnak a szimulációjára egy Baum-Welch [41] algoritmussal felparaméterezett rejtett Markov modellt javasoltam. A modell paraméterek megállapítását egy 0.1 Hz levágási frekvenciájú, negyedrendű Butterworth szűrővel szűrt Gauss-i fehérzajból végeztem el, majd a mért és a szintetikus szcintillációs idősor statisztikai egyezését spektrális sűrűségfüggvényeiknek az összehasonlításával ellenőriztem. Az így előállított idősor szuperonálható a 3.1 vagy a 3.2 altézisben ismertetett módszerrel előállított fadinggel terhelt csatorna mesterséges idősoraira.

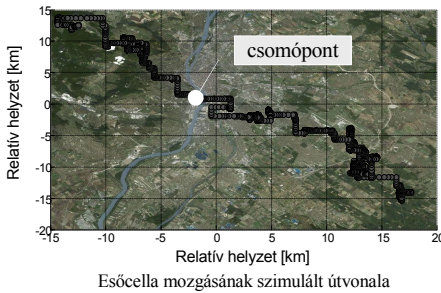


Szcintillációt tartalmazó mesterséges csillapítás idősor, földi összeköttetés

3.4 altézis: Kidolgoztam az esőcellák síkbeli mozgásának Markov modellezésén alapuló csillapítás idősor generátort. Eljárást dolgoztam ki a modell paramétereinek a mért szélesség és szélirány adatok alapján történő kiszámítására. Megmutattam, hogy az esőcellák méret és esőintenzitás adatai kinyerhetők a fading időtartam modell által számított eloszlásfüggvényekből és a mért esőintenzitás eloszlásból. Bebonyítottam, hogy ezzel a módszerrel csillag topológiájú rádióhálózaton eredményesen modellezhetőek az egyes összeköttetések közötti

lokális eltérések is. Példát mutattam arra, hogy a mesterséges esőcsillapítási idősorok más fizikai paraméterekkel rendelkező összeköttetések idősoraivá transzformálhatók, amivel az idősor előállítás általános felhasználási lehetőségét bizonyítottam. [S4] [S6] [S17] [S20] [S25] [S28]

Földi pont-pont rádióösszeköttetések csillapítás idősorainak az esőcellák mozgásának szimulációján alapuló előállításával foglalkozik ez az altézis. Az esőcellák mozgási sebességét, valamint a mozgás irányát egy-egy diszkrét idejű, véges állapotterű Markov-lánc vezérli, melyeknek a paramétereit meteorológiai mérések alapján határoztam meg. Az egyes cellák alakját a milánói műszaki egyetemen kifejlesztett EXCELL modell [33] segítségével szimuláltam, míg a cellák méretét a fading időtartam modellből, az esőintenzitás csúcsértékét pedig az éves esőintenzitás statisztikából állapítottam meg. A szimuláció hosszú idejű, éves statisztikák generálására alkalmas oly módon, hogy több esőcellát futtatunk át a vizsgált



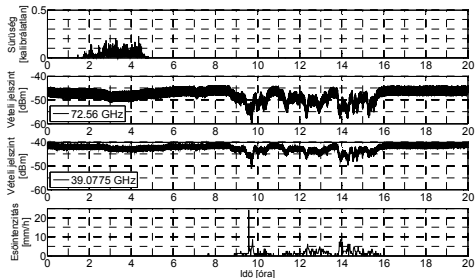
tereprés fölött. A pillanatnyi szakaszcsillapítást a szakaszon vett integrál adja meg:

$$A_L = \int_0^L k R_n^\alpha(x_n, y_n) dl$$

Ennek értéke a pontbeli esőintenzitás, a frekvencia és a polarizáció függvénye, amelyek a szimuláció során ismert változók. Mivel a cellamozgások és cellaméretük éves statisztikákon alapulnak, a kapott csillapítási idősor eloszlása jól közelíti a mért eloszlást. A módszer különösen alkalmas csillag topológiájú ellátóhálózaton az azonos középpontú, de eltérő irányú, szakaszhosszúságú és frekvenciájú összeköttetések közötti eltérések kimutatására, továbbá másodrendű statisztikák generálására is.

A kutatási munkából eredő gyakorlati alkalmazás

A disszertáció témaköréhez szorosan kapcsolódnak, ugyanakkor azon némileg túl is mutatnak a V-W sávhoz (40-110 GHz) kötődő kutatásaim. Ezekben a sávokban már jól megfigyelhető hatással, a kód okozta hullámterjedési jelenségekkel továbbá a kód sűrűségének mérésére alkalmas készülék kifejlesztésével foglalkoztam. Az itt elért elsősorban gyakorlati, alkalmazás jellegű eredményeim nem csak rádiófrekvenciás, hanem szabadtéri optikai összeköttetések csillapítás modellezésénél is felhasználhatók.



Kód sűrűség, vételi jelzint 72.56 és 39.07 GHz-en és az esőintenzitás

A mobilhálózatok iránti egyre nagyobb sebességi igények az ellátóhálózatok frekvenciáját a V-W sávok irányába tolják el. Ennek következtében azonban egy további időjárás elem, a köd hatása sem hagyható immár figyelmen kívül a hullámterjedési számítások elvégzése során. Ennek a jelenségnek a detektálása, továbbá kvantitatív mérése a hagyományos meteorológiai eszközökkel nem oldható meg. Az úgynevezett jelenidő szenzorok ugyan alkalmasak köd detektálására, de nem szolgáltatnak megfelelő adatokat tényleges csillapítási számításokhoz. Ezért a ködsűrűség mérésére alkalmas, optikai elven alapuló mérőműszert készítettem, amely elősegíti a hullámterjedési modellezés magasabb frekvenciákra való kiterjesztését, továbbá új összefüggések felderítését. A köd és a felhők okozta csillapítással az ITU-R P.840 [39] ajánlás foglalkozik. Mivel 2009 óta egy 72.56 GHz-es földi összeköttetés is beintegrálásra került a tanszéki mérőrendszerbe, kiszámítottam, hogy a vonatkozó ajánlás szerint ezen az összeköttetésen a köd milyen csillapító hatással bírhat. Kidolgoztam a műszerek azt a kalibrációs módszerét is, amelyet a V-sávú mikrohullámú összeköttetésen mérhető csillapítás segítségével végeztem el annak érdekében, hogy a készüléket alkalmassá tegyem közvetlenül a levegő pillanatnyi folyékony víz tartalmának mérésére. A műszer segítségével jól elkülöníthetőek az eső illetve a köd által okozott fadíngek. A kalibrációhoz, vagyis a mért ködsűrűség értékeinek LWC [mg/m³]-be történő konverziójához szükséges konstans meghatározásához a V-sávú összeköttetés mért csillapítás adatait használtam fel. Az LWC közvetlenül mért értékeiből számított rádiófrekvenciás csillapítás jól közelíti a tényleges csillapítást, ami a berendezés helyes működését igazolja. [S3] [S5] [S10] [S14] [S15] [S16] [S18] [S26]

A kutatási eredmények hasznosulása és további kutatási irányok

A disszertációmban ismertetett eredményeket több nemzetközi és hazai kutatási együttműködés keretében publikáltam, illetve azok összefoglaló tanulmányaiban vagy az együttműködés eredményeképpen kiadott könyv alakjában is megjelentek.

Ezek közül a következő projekteket szeretném kiemelni: Broadwan, (Broadband services for everyone over fixed wireless access networks, 2003-2006), SatNEX, (European Satellite Communications Network of Excellence, 2004-2009), MARCH, (Multilink Architecture for Multiplay Services, 2008-), Gigabit, (Gigabit radio link networks, 2009-), valamint a Pannon GSM-el való több mint 10 éve tartó együttműködés.

A COST IC0802 (Propagation Tools and Data for Integrated Telecommunication, Navigation and Earth Observation Systems) program 2008-ban indult és 2012-ben fejeződik majd be. Ebben az együttműködésben a földi mikrohullámú és optikai hullámterjedéssel foglalkozó munkacsoportok által végzett kutatásokban veszek részt. E nemzetközi projektnek többek között az egyik fő célja új ajánlások kidolgozása, illetve a meglévők továbbfejlesztése az ITU-R számára. Ebben a munkában felhasználhatóak lesznek majd a V-sávú illetve az FSO tartomány vizsgálata során elért eredményeim. További kutatási munka végzésére meghívást kaptam a University of Northumbria (Newcastle, UK) egyetemre, ahol a szabadtéri optikai terjedés szimulációs kamrában történő vizsgálatával foglalkozom majd előreláthatólag 2010 őszén.

A V-sávú hullámterjedési vizsgálatok és a hozzá kapcsolódó készülékfejlesztési munkák során igen jó kapcsolat alakult ki a grazi műszaki egyetem szabadtéri optikai terjedéssel foglalkozó munkacsoportjával is. Az általam kifejlesztett ködsűrűség-mérő műszer segítségével folyamatos méréseket végeznek, és az eredményeket FSO modelljeik továbbfejlesztésében használják. Számos közös publikációnk született a témában.

Az egyetemi oktatás során számos szakdolgozatot, diplomatervet illetve TDK dolgozatot konzultáltam, melyeknek a témája szintén kapcsolódott kutatásaimhoz. Kidolgoztam a csapadékkal terhelt rádiócsatornák modellezését bemutató laboratóriumi gyakorlatot, melynek során számos villamosmérnök hallgató megismerkedhet a téma alapjaival.

Saját publikációk listája

Könyvfejezet

- [S1] L. Csurgai-Horvath, F. Cornet, F. Lacoste, C. Riva, A. Martelucci, G. Blarzino, L. Castanet, L. Feral, N. Jeannin, J. Lemorton: "Atmospheric effects: Space Variations of Rain Attenuation In: Laurent Castanet (ed.) Influence of the Variability of the Propagation Channel on Mobile, Fixed Multimedia and Optical Satellite Communications", Shaker, 2008. Chapter 2.4.
- [S2] L. Csurgai-Horváth, J. Bitó: "An Investigation of the Applicability of Fade Duration Markov Model in Attenuation Time Series Synthesis for Multipath Fading Channel", In: Frigyes István (ed.) Advances in mobile and wireless communications – views of the 16th IST Mobile and Wireless Communication Summit. Springer, 2008. pp. 165-184.

Folyóirat

- [S3] M. S. Awan, L. Csurgai-Horvath, S. S. Muhammad, E. Leitgeb, F. Nadeem, M. S. Khan: "Characterization of Fog and Snow Attenuations for Free-Space Optical Propagation", Journal of Communications, Vol. 4., No. 8., pp. 533-545, 2009.
- [S4] B. Héder, L. Csurgai-Horváth, J. Bitó: "Adaptive Terminal to Base Station Assignment in BFWA Systems", IEEE Communications Letters, Vol. 13., Issue 8., pp. 588-590, 2009.
- [S5] M. S. Awan, R. Nebuloni, C. Capsoni, L. Csurgai-Horváth, S. S. Muhammad, E. Leitgeb, F. Nadeem, M. S. Khan: "Prediction of Drop Size Distribution Parameters for Optical Wireless Communications through Moderate Continental Fog", International Journal of Satellite Communications and Networking (elfogadva)
- [S6] Csurgai-Horváth László: "Rain Attenuation Time Series Synthesis with Simulated Rain Cell Movement", Periodica Polytechnica-Electrical Engineering, (elfogadva)
- [S7] Csurgai-Horváth László, Bitó János: "Rain attenuation time series synthesis with combined Markov models for microwave terrestrial links", International Journal of Mobile Network Design and Innovation, Vol. 2. No. 3/4, pp. 216-222, 2007.
- [S8] Csurgai-Horváth László, Bitó János: "Multipath Propagation Fade Duration Modeling of Land Mobile Satellite Radio Channel", Journal On Communications, (Híradástechnika, selected papers in English), Vol. LXII/7, pp. 22-26, 2007.
- [S9] Csurgai-Horváth László, Bitó János: "Fading időtartam modellezés műholdas földi mozgó rádiócsatormán", Híradástechnika, Vol. LXII/3, pp. 19-23, 2007.

Tanulmány, projekt beszámoló

- [S10] L. Babits, T. Tanem, T. Tjelta, I. Frigyes, T. O. Breivik, J. Bitó and L. Csurgai: "Gigabit radio link potential role in Telenor's and Pannon's networks", Research Note, 2009. (belső használatra)
- [S11] L. Csurgai-Horváth, J. Bitó: "Activities at BME for millimeter band terrestrial radio connections and FSO", COST IC0802 MCM2 meeting, 04-06 November, Toulouse, France, 2009.
- [S12] L. Csurgai-Horváth, J. Bitó: "A simple fog density measurement device and its application in attenuation calculation", COST IC0802 MCM3 meeting, 26-28 April, Athens, Greece, 2010.
- [S13] I. Frigyes, L. Csurgai-Horváth: "Gbit/sec wireless via Free-Space Optics and E-band radio", COST IC0802 MCM3 meeting, 26-28 April, Athens, Greece, 2010.

Konferencia cikk

- [S14] L. Csurgai-Horváth, János Bitó: "Fog attenuation on V band terrestrial radio and a low-cost measurement setup", Future Network & Mobile Summit 2010, 16 - 18 June 2010, Florence, Italy (elfogadva)
- [S15] I. Frigyes, L. Csurgai-Horvath: "Free-Space optics and E-band radio: Complementary techniques for Gbit/sec Wireless", IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2010, Sydney, Australia, 18/Apr/2010-21/Apr/2010, paper #01-03-03.
- [S16] I. Frigyes, L. Csurgai-Horvath: "From Gigabit to Multi-Gigabit: mm Waves in Mobile Networks' Backhaul", IEEE Globecom 2009, International Workshop on Multi-Gigabit MM-Wave and Tera-Hz Wireless Systems, Hawaii, USA, 30/Nov/2009-04/Dec/2009, paper #2.
- [S17] László Csurgai-Horváth, János Bitó: "First and second order statistics of synthetic rain attenuation time series", ICT Mobil Summit 2009, Santander, Spain, 10/Jun/2009-12/Jun/2009. paper #101.
- [S18] M. S. Awan, L. Csurgai Horvath, E. Leitgeb, R. Nebuloni, P. Brandl, F. Nadeem: "Transmission of high data rate optical signals in fog and snow conditions", Wireless VITAE, Aalborg, Denmark, 17/ May/2009-20/May/2009, pp. 702-706.
- [S19] László Csurgai-Horváth, János Bitó: "Testing the Markov Property of Rain Fading on Millimeter Band Terrestrial Radio Link", EUCAP 2009, Berlin, Germany, 23/Mar/2009-27/Mar/2009. pp. 2901-2905.
- [S20] L. Castanet, L. Csurgai-Horváth, F. Lacoste, C. Riva, U. Fiebig, A. Martelucci, A. D. Panagopoulos, T. Javornik, N. Jeannin, E. Leitgeb, P. Thompson, V. Pastoriza: "Channel modelling activities related to atmospheric effects in the SatNEx project", EUCAP 2009, Berlin, Germany, 23/Mar/2009-27/Mar/2009, pp. 1697-1701.
- [S21] Csurgai-Horváth László, Héder Balázs, Bitó János, Frigyes István: "Applicability of the 50-90 GHz frequency bands in feeder networks", EUCAP 2009, Berlin, Germany, 23/Mar/2009-27/Mar/2009, pp. 336-340.
- [S22] Csurgai-Horváth László, Bitó János: "Testing the Markov Property of the Multipath Fading Process", International Workshop on Satellite and Space Communications 2008, Toulouse, France, 01/Oct/2008-03/Oct/2008, pp. 97-101.
- [S23] Csurgai-Horváth László, Bitó János: "Renewal Properties of Rain Fade and Interfade Duration on Radio Links", ICT Mobil Summit 2008, Stockholm, Sweden, 10/Jun/2008-12/Jun/2008, paper #70.
- [S24] Csurgai-Horváth László, Bitó János: "Renewal Properties of Fade and Interfade Duration on Land Mobile Satellite Channel", ASMS 2008. Bologna, Italy, 26/Aug/2008-28/Aug/2008, CD proceedings.
- [S25] Csurgai-Horváth László, Bitó János: "Modeling of Coherent Rain Cells Movement Affecting Terrestrial Radio Links", 2nd JA 2310 SatNEx Workshop. München, Germany, 17/Apr/2008-18/Apr/2008, paper #15.
- [S26] Babits László, Csurgai-Horváth László, Héder Balázs, Bitó János, Frigyes István: "Az 50-90 GHz frekvenciasávok alkalmazása ellátó hálózatokban", 16. Távközlési és Informatikai Hálózatok Szeminárium és Kiállítás. Zalakaros, Magyarország, 15/Oct/2008-17/Oct/2008, pp. 94-103.
- [S27] L. Csurgai-Horváth, B. Héder, J. Bitó: "Markov Models for Radio Links and Their Application in Attenuation Time Series Synthesis", First JA 2310 SatNEx Workshop. Toulouse, France, 05/Feb/2007-08/Feb/2007. (csak előadás)
- [S28] Csurgai-Horváth László, Bitó János: "Spatial Markov Model of Fade Duration on Terrestrial Radio Links", 2nd European Conference on Antennas and Propagation: EuCAP 2007, Edinburgh, UK, 11/Nov/2007-16/Nov/2007, pp. 593-594.

- [S29] Csurgai-Horváth László, Bitó János: “Scintillation Time Series Synthesis for Satellite Links with Hidden Markov Model”, 2007 International Workshop on Satellite and Space Communications, Salzburg, Austria, 12/Sep/2007-14/Sep/2007, pp. 22-25.
- [S30] Csurgai-Horváth László, Bitó János, Hercz János: “Rain Attenuation Time Series Synthesis with Combined Two-State and Hidden Markov Models for Microwave Terrestrial Links”, 12th Microcoll Conference. Budapest, Hungary, 14/May/2007-16/May/2007, pp. 113-116.
- [S31] Csurgai-Horváth László, Bitó János: “Attenuation Time Series Synthesis for Land Mobile Satellite Links”, 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit, Budapest, Hungary, 01/Jul/2007-05/Jul/2007, paper #292.
- [S32] Csurgai-Horváth László, Bitó János: “Attenuation Time Series Generator with Markov Model of Fade and Interfade Durations”, Loughborough Antennas and Propagation Conference, Loughborough, UK, 02/Apr/2007-03/Apr/2007, pp. 105-108.
- [S33] Singliar R, Din J, Csurgai L, Tharek AR, Horváth P, Bitó J: “Comparison of 38 GHz Rain Fade Dynamics between Malaysia and Hungary“, 15th IST Mobile and Wireless Summit. Myconos, Görögország, 04/Jun/2006-08/Jun/2006, paper #851.
- [S34] Héder B, Csurgai-Horváth L, Bitó J: “Markov Modeling of First and Second Order Statistics of Land Mobile Satellite Fading”, Broadband Europe Conference (BBEurope'06). Geneva, Switzerland, 11/Dec/2006-14/Dec/2006, www.bbeurope.org
- [S35] Csurgai-Horváth László, Bitó János: “Land Mobile Propagation Fade Duration Modeling by Markov Chains”, 2006 International Workshop on Satellite and Space Communications, Madrid, Spain, 14/Sep/2006-15/Sep/2006, pp. 242-246.
- [S36] Csurgai-Horváth László, Bitó János: “Joint Modeling of Fade and Interfade Duration on Radio Connections Applying Markov Chain”, The European Conference on Antennas and Propagation EuCAP 2006, Nice, France, 06/Nov/2006-10/Nov/2006, paper #350086.
- [S37] Csurgai-Horváth László, Bitó János: “Fade Duration Modeling of Terrestrial Links Applying Markov Chain”, Loughborough Antennas and Propagation Conference, Loughborough, UK, 11/Apr/2006-12/Apr/2006, pp. 457-460.
- [S38] Csurgai-Horváth László, Bitó János: “Fade Duration Modeling of Satellite Links Applying Markov Chain”, 3rd Advanced Satellite Mobile Systems Conference. Herrsching am Ammersee, Germany, 29/May/2006-31/May/2006, pp. 76-83.
- [S39] Csurgai-Horváth László, Bitó János: “Fade Duration Modeling with Partitioned Markov Model”, ESA Wave Propagation Workshop 2005: Propagation Modelling and Measurements for SatCom and SatNav Systems, Noordwijk, Netherland, 23/Nov/2005-25/Nov/2005, paper #34.
- [S40] Singliar R, Héder B, Csurgai-Horváth L, Fiebig U C, Perez-Fontan F, Bitó J: “Comparison of Rain Attenuation Models of Satellite Communication Channels Based on Measured Point Rain Intensity”, IADAT-tcn International Conference on Telecommunications and Computer Networks (IADAT-tcn'04), San Sebastian, Spain, 01/Dec/2004-03/Dec/2004, pp. 161-165.

Irodalomjegyzék a téziszületehhez

- [1] M.P.M. Hall, L.W. Barclay and M.T. Hewitt: "Propagation of Radiowaves", Institution of Electrical Engineers, 1996.
- [2] L. Boithias: "Radio Wave Propagation", McGraw-Hill, 1987.
- [3] J. Proakis: "Digital Communications", McGraw-Hill, 1989.
- [4] Laurent Castanet (Ed.): "Spatial Variations of Propagation Impairments" in: "Influence of the Variability of the Propagation Channel on Mobile, Fixed Multimedia and Optical Satellite Communications", The SatNEx E-book, Shaker Publishing, Germany, 2008.
- [5] ITU-R Rec. P.372-10: "Radio noise", ITU, 2009.
- [6] ITU-R Rec. P.530-13: "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems", ITU, 2009.
- [7] ITU-R Rec. P.618-10: "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems", ITU, 2009.
- [8] ITU-R Rec. P.837-5: "Characteristics of precipitation for propagation modelling", ITU, 2007.
- [9] ITU-R Rec. P.838-3: "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods", ITU, 2005.
- [10] ITU-R Rec. P.1623-1: "Prediction method of fade dynamics on Earth-space paths", ITU, 2003-2005.
- [11] E. Lutz, D. Cygan, M. Dippold, F. Dolainsky, W. Papke : "The Land Mobile Satellite Communication Channel-Recording, Statistics, and Channel Model", IEEE VT-40, 1991, pp. 375-386.
- [12] A. Papoulis: "Probability, Random Variables and Stochastic Processes", McGraw-Hill, 3rd edition, 2001.
- [13] L. Kleinrock: "Queueing Systems. Volume 1: Theory", 1st edition, Wiley, 1975.
- [14] Györfi L., Györi S., Pintér M.: "Tömegkiszolgálás informatikai rendszerekben", Műegyetemi Kiadó, 2005.
- [15] L. Breiman: "Probability", Society for Industrial Mathematics, Reprint edition 1992.
- [16] H. von Storch, F. W. Zwiers: "Statistical Analysis in Climate Research", Cambridge University Press, 2003.
- [17] Bendat J, Piersol A.: "Random data: Analysis and measurement procedures", New York, John Wiley & Sons, 1971.
- [18] Box, G.E.P., G.M. Jenkins, and G.C. Reinsel: "Time Series Analysis: Forecasting and Control", Third edition, Prentice Hall, 1994.
- [19] Hamilton, J.D.: "Time Series Analysis", Princeton University Press, 1994.
- [20] O.D. Anderson (ed.): "Time Series Analysis: Theory and Practice 1.", North-Holland, 1982.
- [21] R. H. Clarke: "A statistical theory of mobile radio reception", Bell Syst. Tech. J., vol. 47, 1968, pp. 957-1000.
- [22] J.-P.A. Adoul: "Error Intervals and Cluster Density in Channel Modeling", IEEE Trans. Inform. Theory, vol. IT-20, Jan. 1974, pp. 125-129.
- [23] D. Isaacson, R. Madsen: "Markov Chains Theory and Applications", J. Wiley, 1976.
- [24] M.S. Bartlett: "The Frequency Goodness of Fit Test for Probability Chains", Cambridge Philosophical Proceedings, 1951, vol. 47, pp. 86-94.
- [25] P. G. Hoel: "A Test for Markoff Chains", Biometrika, vol. 41, 1954, pp. 430-433.
- [26] Erwin Kreyszig: "Advanced Engineering Mathematics", Wiley, 1993.
- [27] T.W. Anderson, L.A. Goodman: "Statistical Inference about Markov Chains", Ann. Math Statistics, Vol. 28, Nr. 1., 1957, pp. 89-110.

-
- [28] V. I. Tatarskii: "Wave Propagation in a Turbulent Medium", McGraw-Hill, New York, 1961.
- [29] E.N.Gilbert: "Capacity of a Burst-Noise Channel", Bell Syst. Tech. J., vol. 39, Sep.1960, pp. 1253-1265.
- [30] E.O.Elliott: "Estimates of Error Rates for Codes on Burst-Noise Channel", Bell Syst. Tech. J. vol 42, 1963, pp. 1977-1997.
- [31] B. D. Fritchman: "A binary channel characterization using partitioned Markov chains", IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 13, Apr. 1967, pp. 221-227.
- [32] L. Kanal, A. Sastry: "Models for Channels with Memory and Their Applications to Error Control", Proceedings of the IEEE, vol. 66. no.7, July 1978, pp. 724-744.
- [33] C. Capsoni, F. Fedi, C. Magistroni, A. Paraboni, A. Pawlina: "Data and theory for a new model of the horizontal structure of rain cells for propagation applications", Radio Sci., Vol. 22/3, 1987, pp. 395-404.
- [34] COST 235: "Radiowave propagation effects on next generation fixed-services terrestrial telecommunications systems", Technical report, European Commission, EUR 16992 EN, Final Report, 1996.
- [35] Giovanni E. Corazza (Ed.): "Digital Satellite Communications", Springer, 2007.
- [36] COST 255: "Radiowave propagation modelling for SatCom services at Ku-band and above", Final Report, ESA, Noordwijk, 2002.
- [37] COST 280: "Propagation Impairment Mitigation for Millimetre Wave Radio Systems", <http://www.cost280.rl.ac.uk>
- [38] ITU-R P.676-8 Recommendation: "Attenuation of atmospheric gases", ITU, Geneve, Switzerland, 2009.
- [39] ITU-R P.840-4 Recommendation: "Attenuation due to clouds and fog", ITU, Geneve, Switzerland, 2009.
- [40] ITU-R P.833-6 Recommendation: "Attenuation in vegetation", ITU, Geneve, Switzerland, 1992-2007.
- [41] L. R. Rabiner: "A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition", Proceedings of the IEEE, vol. 77, no. 8, Feb. 1989.

Csurgai-Horváth László
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék
1111 Budapest, Goldmann Gy. tér 3.
Tel.: (1) 463-3685, Email: laszlo.csurgai@hvt.bme.hu