

Ph.D. Értekezés Tézisei

KAOTIKUS ADATÁTVITELI RENDSZEREK ANALÍZISE

Kis Gábor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

Témavezető:
dr. Kolumbán Géza
a műszaki tudomány kandidátusa

Budapest
2003

Bevezetés

Annak ellenére, hogy a determinisztikus nemlineáris dinamikus rendszerekben fellépő kaotikus jelenségek véletlenszerű, látszólag szabálytalan viselkedést mutatnak, a részletes analízis megmutatja, hogy a kaotikus jel alakját a rendszer dinamikája határozza meg. Klasszikus értelemben egy dinamikus rendszer állandósult állapota egyensúlyi állapottal és periodikus, vagy kváziperiodikus mozgással jellemezhető. Ezzel szemben a káosz a nemlineáris determinisztikus rendszerek olyan állandósult állapota, amely nem tartozik a fenti kategóriák egyikébe sem [PC89].

A kaotikus rendszereket a kezdeti feltételekre való nagyfokú érzékenység jellemzi, ami matematikailag a következőt jelenti. Legyen adott egy J intervallum, és f függvény, amelyre $f : J \rightarrow J$. Ekkor az f függvény érzékeny a kezdeti feltételekre x -ben, ha van olyan $\epsilon > 0$, hogy bármely $\delta > 0$ esetén létezik egy y pont J -ben és egy n pozitív egész szám, amelyre

$$|x - y| < \delta \quad \text{és} \quad |f^{[n]}(x) - f^{[n]}(y)| > \epsilon$$

Gyakorlati szempontból ez azt jelenti, hogy két, különböző kezdeti feltételből indított trajektória divergál és korrelálatlanná válik tetszőlegesen közeli kezdeti feltételek esetén is.

Emellett a kaotikus jelek, illetve rendszerek mérnöki szempontból fontos tulajdonságai a következők [PC89, Che99]:

- Nagyfokú érzékenység a rendszer paramétereinek megváltozására. Két, majdnem azonos paraméterekkel rendelkező kaotikus rendszer esetén két, azonos kezdeti feltételből indított trajektória divergál akkor is, ha a paraméter értékek közti eltérés tetszőlegesen kicsi.
- E két tulajdonság következménye az, hogy a kaotikus rendszerek viselkedése csak rövid időtartamra jósolható meg.
- A kaotikus trajektóriák és kimenőjelek korlátosak.
- A kaotikus jelek teljesítmény-sűrűség spektruma széles frekvenciasávot fed le.
- Egy végtelen hosszúságú kaotikus jel átlaga, teljesítménye és teljesítmény-sűrűség spektruma időinvariáns.
- A kaotikus jelek tetszőleges frekvenciasávban, tetszőleges teljesítménnyel, egyszerű áramkörökkel generálhatók.

Fenti tulajdonságai miatt a kaotikus jelek előnyösen használhatók az adatátvitelben akár mint az átvinni kívánt információt hordozó jelek, akár mint a szórt spektrumú rendszerek spektrumkiterjesztő jelei. A kaotikus modulációs eljárások lényege, hogy az átvinni kívánt információt közvetlenül egy kaotikus, azaz szélessávú jelre képezzük le. Ezért a kaotikus adatátviteli rendszerekkel egy új típusú, egyszerű felépítésű szórt spektrumú rendszer valósítható meg. A szélessávú kisugárzott jel miatt ezek a rendszerek nem érzékenyek a többutas terjedés miatt fellépő szelektív fadingre.

A kutatás előzményei és célkitűzései

A kaotikus jelek adatátviteli alkalmazásainak feltárása során a következő témakörökben kezdődtek kutatások:

- adatátviteli rendszerek titkosítása,
- kaotikus jelek alkalmazása spektrumkiterjesztő kódként a hagyományos szórt spektrumú adatátviteli rendszerekben,
- analóg és digitális modulációs rendszerek.

Az első években a kaotikus modulációs eljárások területén folyó kutatások a koherens analóg és digitális vevőkre koncentráltak. E munka során számos megoldást publikáltak a kaotikus szinkronizációra (a kaotikus vivő visszaállításának egyik módja), [CP91, CO93, Has95, SCC97, WC94]. A szinkronizációs módszerek analízise azonban azt mutatta, hogy ezek az eljárások nagyon érzékenyek a csatornazajra és a torzításra [CY00]. E probléma elkerülésére számos olyan eljárást javasoltak, amelyekben nincsen szükség a kaotikus jelek szinkronizációjára [ASG00, KKC97, KKC98, KK00, STV00].

A digitális kaotikus modulációs módszerek a következő három kategóriába sorolhatók:

- Heurisztikus alapon kidolgozott eljárások, amelyek nem kezelhetők a hagyományos hírközlésemélet eszközeivel. Ilyen módszer például az inverz rendszer [FHS96], vagy a kaotikus maszkolás [ea92].
- Azok a modulációs eljárások, amelyekben a kisugárzott jelet generáló kaotikus rendszer ismeretét felhasználva végezzük a demodulációt. Ekkor a demoduláció a kaotikus rendszer dinamikájának ismeretén alapul [HS00, MF00, Sch98].
- Olyan modulációs módszerek, amelyek esetében a digitális információt közvetlenül kaotikus jelekre, azaz a kaotikus bázisfüggvényekre képezzük le. Egy ilyen eljárás például a kaotikus kapcsolat [KKJK02], amely a kaotikus billentyűzés [DKH93] egyik típusa.

A heurisztikus úton kidolgozott modulációs módszereket szimulációval analizálták. Az eredmények azt mutatták, hogy ezen adatátviteli rendszerek hibaaránya messze elmarad a hagyományos rendszerekétől.

Azok a módszerek, amelyek a kaotikus rendszer dinamikájának ismeretén alapulnak, ennél jobb hibaarányal rendelkeznek, azonban még ez is jelentősen rosszabb a hagyományos rendszerekkel elérhető hibaaránynál. Ráadásul, a hibaarány kismértékű csökkentése is sokkal bonyolultabb demodulátort igényel.

A kaotikus bázisfüggvények alkalmazásán alapuló módszerek hasonlóságot mutatnak a hagyományos modulációs eljárásokkal. Az ilyen rendszerek hibaaránya ezen analógia alapján vezethető le.

Az első módszert, melyben egy koherens vevőt használtak, 1992-ben jelentették meg, és káoszbillentyűzésnek (chaos shift keying, CSK) nevezték el [PCK⁺92]. A következő években több heurisztikus alapon kidolgozott rendszert publikáltak [FHS96, HGO93, SK95, WC93, Yan95]. 1995-ben az IEEE ISCAS konferencián hangzott el egy összefoglaló ezekről a módszerekről [Has95]. Az első híradástechnikai megközelítésnek megfelelő modulációs eljárás az 1996-ban Kolumbán Géza és Vizvári Béla által publikált differenciális káoszbillentyűzés (differential chaos shift keying, DCSK) volt [KVSA96]. A DCSK moduláció optimalizált változata a frekvenciamodulált differenciális káoszbillentyűzés (FM-DCSK) [KKJK98]. Később a hagyományos hírközlésemélet [KKC97, KKC98, KK00] és a statisztikai analízis [AGS98, ASG00, SGK⁺00, STV00] módszereit alkalmazták a kaotikus adatátviteli rendszerek esetére. Ennek eredményeként meghatározták a hagyományos modulációs eljárások kaotikus megfelelőit, és elméleti szempontból osztályozták a korrelátoros vevőt használó rendszereket [Kol00]. A legfrissebb eredmények több, összefoglaló publikációban olvashatók [Ken00, KRS00].

A kaotikus adatátviteli rendszerek legfontosabb jellemzői az alábbiak szerint foglalhatók össze. A kaotikus adatátvitel fő alkalmazása a beltéri rádió összeköttetések és a vezeték nélküli lokális hálózatok (WLAN), ahol a hírközlés korlátját nem a vevő bemenetére redukált zaj, hanem a többutas terjedésből származó szelektív fading jelenti. A probléma megoldható a kisugárzott jel sávszélességének kellő mértékű kiterjesztésével.

A kaotikus modulációs rendszerekben az átvinni kívánt digitális információt közvetlenül egy szélessávú kaotikus jelre képezzük le úgy, hogy a kisugárzott jel sávszélessége jóval meghaladja

az adatátvitelhez szükséges minimális sávszélességet, azaz az adatátviteli sebesség reciprokának kétszeresét. Ebben az értelemben a kaotikus adatátvitel a szórt spektrumú hírközlés egy speciális tulajdonságokkal bíró változatát jelenti. A kaotikus adatátviteli rendszerek előnyei a következők:

- mivel kaotikus jelek igen egyszerű és jó hatásfokú áramkörökkel tetszőleges frekvenciasávban és tetszőleges teljesítményszintek mellett generálhatók, a kaotikus modulációs eljárásokkal olcsó és kis fogyasztású szórt spektrumú adatátviteli rendszerek valósíthatók meg,
- az FM-DCSK modulációs eljárás nem igényel lineáris hírközlő csatornát,
- az FM-DCSK rendszer alkalmas tiszta „0” és „1” sorozatok átvitelére is, azaz nincs szükség scrambler áramkörre,
- a hagyományos szórt spektrumú rendszerekhez hasonlóan, a kisugárzott modulált jel széles-sávúsága miatt a kaotikus adatátviteli rendszerek üzemképesek maradnak még akkor is, ha a többutas terjedés miatt a rádiócsatornában igen nagy csillapítású, szelektív fading lép fel, és
- a kisugárzott jel alacsony teljesítménysűrűsége miatt a kaotikus adatátviteli rendszerek kis-mértékű interferenciát okoznak a velük egy sávban működő, keskenysávú rendszerekben.

A kaotikus modulációs eljárásokkal tehát igen egyszerű felépítésű szórt spektrumú rendszerek valósíthatók meg. Természetesen az egyszerűségnek ára van, a kaotikus modulációs rendszerek az alább felsorolt hátrányokkal rendelkeznek:

- mivel kellően robusztus kaotikus szinkronizációs eljárás jelenleg nem ismeretes, ezért a megépített kaotikus adatátviteli rendszerekben leginkább differenciálisan koherens detekciót alkalmaznak. Ez az eljárás igen robusztus detektort eredményez, viszont a szinkronizáció hiánya miatt feldolgozási nyereség nem érhető el vele és a hibaaránya is rosszabb a koherens rendszerekénél,
- ugyancsak a kaotikus szinkronizáció megoldatlansága vezet oda, hogy ezekkel a kaotikus adatátviteli rendszerekkel alapesetben többszörös hozzáférésű rendszerek nem valósíthatók meg. Azonban egyéb módszerek alkalmazásával, például a Walsh-függvények ortogonalitásának kihasználásával, egy korlátozott mértékű többszörös hozzáférés biztosítható.

Összefoglalásként elmondható, hogy a kaotikus modulációs eljárásokkal igen egyszerű, olcsó, jó hatásfokú és robusztus, de a hagyományos szórt spektrumú rendszereknél kevesebb szolgáltatást nyújtó berendezések valósíthatók meg.

A kaotikus adatátviteli rendszerek területén folyó kutatások két nagy nemzetközi projekt keretében folytak. Az Amerikai Hadsereg Kutatóintézete (U.S. ARO) egy Multidisciplinary University Research Initiative (MURI) Program elindítását kezdeményezte 1998-ban [LZC96, dig98]. Időközben egy, az Európai Unió által finanszírozott „Innovative Signal Processing Exploiting Chaotic Dynamics” (INSPECT) elnevezésű Esprit Open FET projekt is elindult 1997-ben [inn01]. Mindkét projekt célja a fenti elvárások vizsgálata, tehát a káosz adatátviteli alkalmazási lehetőségeinek feltárása volt. Az INSPECT projektben hét európai egyetem kutatócsoportjai működtek közre a következő célok megvalósítása érdekében:

- kaotikus jelsorozatok alkalmazása spektrumkiterjesztő kódként hagyományos szórt spektrumú rendszerekben,
- egy vezeték nélküli digitális kaotikus adatátviteli rendszer megtervezése és megépítése, és
- kaotikus jelek felhasználása digitális képek vízjelezésére.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemet a Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék Kaotikus Rendszerek Csoportja képviselte az INSPECT projektben. A csoport feladatai a megépített kaotikus adatátviteli rendszerhez kapcsolódtak:

- a modulációs eljárás kidolgozása,
- az adatátviteli rendszer hibaarányának meghatározása különböző terjedési viszonyok között,
- a rendszer adó- és vevő berendezésének megtervezése,
- a rádió rendszer rendszertervének elkészítése, és
- egy nagysebességű szimulátor kifejlesztése a rendszer- és áramkörtervezés támogatására.

Az INSPECT Projekt 2001-ben sikeresen lezárult. Mivel az FM-DCSK rendszer rendkívül robusztus, és a legjobb hibaarányal rendelkezik, ezért csoportunk ezt az eljárást javasolta megvalósításra. A munka során meghatároztuk a rendszer adójának és vevőjének felépítését. Rendszer-szintű terveink alapján a 2,4 GHz-es ISM sávban működő FM-DCSK rádiót a Helsinki University of Technology kutatócsoportja építette meg. Az FM-DCSK modulátor integrált áramkörös verzióját a Centro Nacional de Microelectrónica (Sevilla) tervezte és valósította meg.

Csoportunk tagjai közül én voltam felelős a következő részfeladatokért:

- többszörös hozzáférésű és többszintű FM-DCSK rendszer kidolgozása,
- kaotikus modulációs rendszerek komplex kisfrekvenciás ekvivalensének meghatározása,
- nagysebességű szimulátor megvalósítása a kisfrekvenciás ekvivalens modell alapján,
- az FM-DCSK rendszer részletes szimulációja: a hibaarány kiszámítása különböző terjedési körülmények között,
- a vevő rendszerterve, a vevő paramétereinek meghatározása.

Mivel kutatásaim szorosan kapcsolódtak a projektben elvégzett feladatokhoz, ezért doktori munkám fő célkitűzései az alábbiak voltak. Egyik fő célom a többszörös hozzáférésű és a többszintű FM-DCSK rendszer különböző megvalósítási lehetőségeinek vizsgálata volt, mivel ez a szolgáltatás alapkövetelmény a vezeték nélküli lokális hálózatokban. Mivel a megépítendő modulációs rendszer kiválasztásakor elméleti eredmények még nem álltak rendelkezésre, ezért az egyes módszerek összehasonlító analízisét szimulációval kellett elvégeznünk. Ezért a másik célom egy nagysebességű szimulátor megírása volt, amely a hibaarány kiszámítására alkalmas. Azért, hogy a szimulációs idő jelentősen csökkenjen, meg kellett határoznom a különböző kaotikus modulációs rendszerek komplex kisfrekvenciás ekvivalens modelljeit. A szimulátorral a kiválasztott FM-DCSK rendszert kellett részletesen analizálnom a beltéri rádió rendszerekre és vezeték nélküli lokális hálózatokra jellemző terjedési körülmények között. Az FM-DCSK vevő tervezésekor a célom az volt, hogy a rendszer biztonságosan megépíthető legyen. A vevő rendszertervét úgy alakítottam ki, hogy megvizsgáltam az egyes paraméterek hatását a hibaarányra, és a maximálisan megengedhető megvalósítási veszteséget valamint a rendszer bonyolultságát figyelembe véve határoztam meg az egyes rendszerparaméterek értékét.

Doktori munkámat a BME Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszékén végeztem. A kaotikus adatátviteli rendszerek analízise során számos, a méréstechnikában is felmerülő jelfeldolgozási problémával találkoztam. E problémák megoldásakor nagy segítségemre volt a Sch-nell László szerkesztésében a BME-MIT tanszék oktatói által kidolgozott méréstechnika tankönyv [Sch94], különösen annak a mérési adatok feldolgozásáról [Dob94] és a jelanalizátorokról [Kol94] írt fejezetei.

A kaotikus adatátviteli rendszerek egyik alkalmazási területe a beltéri rádió rendszerek, ahol a mobil hírközéshez hasonlóan a fading jelenti a fő problémát. Ezért a kaotikus rendszerek analízise során figyelembe vettem a BME Híradástechnikai Tanszékén Pap László által összefoglalt, mobil hírközléssel kapcsolatos eredményeket [Pap99].

A kaotikus modulációs rendszerek vizsgálatakor áttekintettem a hagyományos modulációs eljárások főbb jellemzőit. Ehhez többek között a BME Szélessávú Hírközlő Rendszerek Tanszékén oktató Frigyes István által írt könyvet használtam, amely a digitális mikrohullámú adatátvitel elméletét és gyakorlati kérdéseit tárgyalja [FSV80].

Doktori munkám közvetlen előzményei témavezetőmnek, Kolumbán Géának a kaotikus adatátvitel területén elért eredményei voltak. Mivel az általa javasolt FM-DCSK modulációs eljárás [Kol02] került megvalósításra az INSPECT projektben, kutatásaim során nagyrészt ezen modulációs módszer vizsgálatával foglalkoztam. Az FM-DCSK modulátorban a bázisfüggvényeket oly módon állítjuk elő, hogy egy frekvenciamodulált kaotikus jelet kombinálunk az első két Walsh függvényvel. Az így generált bázisfüggvények ortonormáltak. A vevőben egy differenciálisan koherens demodulátorral, azaz a két szegmens korrelációjának előjele alapján végezzük a demodulációt. Az FM-DCSK rendszer hibaaránya a következőképpen fejezhető ki [Kol00]:

$$BER = \frac{1}{2^{BT}} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) \sum_{i=0}^{BT-1} \frac{\left(\frac{E_b}{2N_0}\right)^i}{i!} \sum_{j=i}^{BT-1} \frac{1}{2^j} \binom{j+BT-1}{j-i} \quad (1)$$

ahol E_b a kisugárzott RF jel energiáját, N_0 a csatornazaj teljesítmény-sűrűség spektrumát, B a fél RF sávszélességet, T pedig a bitidőt jelöli. Munkám során számos elméleti eredményt az (1) egyenlet felhasználásával vezettem le.

Kutatásaim másik fontos közvetlen előzménye a kaotikus modulációs eljárások Fourier analízátoros leírása [KLS03], amelyet az FM-DCSK rendszerre kidolgozott energia detektor levezetésekor használtam. A Fourier analízátoros leírás azon a felismerésen alapul, hogy a detektor a vett jelet csak a $(0, T]$ időtartományban, azaz a bitidőben figyeli meg. Következésképpen a kisugárzott jelet egy T periódusidejű periodikus jellé lehet alakítani a jel ismétlésével. Ha a bázisfüggvények Fourier együtthatói teljes pontossággal nem ismertek a vevőben, akkor a demodulációt nem koherens módon végezhetjük el. Ennek megvalósítása az általánosított maximum likelihood (GML) döntés alkalmazása. Ebben az esetben a vett jelnek az egyes bázisfüggvények által meghatározott alterekben mérhető energiája alapján végezzük a demodulációt. A döntő áramkörben azon bázisfüggvényhez tartozó szimbólum mellett döntünk, amelynek alterében nagyobb energia mérhető.

A kutatás módszertana

Habár a kaotikus jeleket determinisztikus rendszerek generálják, a kezdeti feltételekre való nagyfokú érzékenységük miatt értékük csak rövid időre jósolható meg. Ezért a kaotikus jelek vizsgálatakor a szakirodalomban korábban bevezetett sztochasztikus jelmodellt használtam [Sch94].

A sztochasztikus jelmodell segítségével számítottam ki a kaotikus jel várható értékét, varianciáját, auto- és keresztkorrelációs függvényét. Két különböző kezdeti feltételből indított végtelen hosszúságú kaotikus jel keresztkorrelációja nulla értékű. Azonban a véges hosszúságú jelek csak közelítőleg korrelálatlanok.

Az irodalomból ismert bináris FM-DCSK modulációs rendszer esetén az ortogonalitást a kaotikus jelek és az első két Walsh függvény kombinációja biztosítja [Kol02]. Ezt a megközelítést használtam fel a többszintű, illetve a többszörös hozzáférésű FM-DCSK rendszerek kidolgozásakor. A FM-DCSK modulációt általánosítva a kaotikus jelet az első M Walsh függvényvel kombinálva egy M elemű ortonormált jelkészletet hoztam létre. Ez a jelkészlet egy M szintű modulációs rendszer, vagy többszörös hozzáférés esetén $M/2$ bináris adatátviteli csatorna megvalósítására alkalmas. A jelek ortogonalitása miatt szinkronizált esetben M növelésével nem romlik a rendszerek hibaaránya.

Megmutattam azt is, hogy a véges hosszúságú kaotikus jelek korrelálatlanságán alapuló többszörös hozzáférésű rendszerekben a felhasználók számának növelésével romlik a hibaarány.

A modulációs eljárások a megfigyelési jel, azaz a döntő eszköz bemenőjelének meghatározásával analizálhatók, és így hibaarányuk is levezethető [Hay94]. A Walsh függvényeken alapuló

többszintű és többszörös hozzáférésű FM-DCSK rendszereket ezzel a módszerrel vizsgáltam. Levezettem a megfigyelési jel képletét, és azt összehasonlítottam a bináris FM-DCSK rendszerre, illetve az egy felhasználó esetére levezetett megfigyelési jel képletével. A megfigyelési jelek összetevőinek analízisével megállapítottam, hogy ezek a jelek a paraméterek alkalmas megválasztása esetén ekvivalensek egymással. Mivel egy felhasználó esetére a bináris FM-DCSK rendszerre, ismert a hibaarány kifejezése, ezért ezen ekvivalencia alapján meg tudtam határozni a többszintű, illetve többszörös hozzáférésű FM-DCSK rendszerek hibaarányát is.

A különböző kaotikus modulációs eljárásokat szimulációval vizsgáltam. Ha a szimulációt direkt módon, nagyfrekvenciás jelekkel végezzük, akkor a szimuláció mintavételi frekvenciáját rendkívül nagyra kell választanunk. A szimulációs idő lecsökkenthető a komplex kisfrekvenciás ekvivalens modell használatával. Ebben a modellben minden rádiófrekvenciás jelet annak komplex burkolójával helyettesítünk [Ric82]. Az így levezetett komplex kisfrekvenciás modell az eredeti RF modellel ekvivalens, viszont a szimuláció lényegesen kisebb mintavételi frekvenciát igényel.

Mivel a szimulátor a diszkrét időtartományban működik, ezért minden blokkot a diszkrét ekvivalensébe transzformáltam. A szűrők esetében ezt a bilineáris transzformációval végeztem el. A szimulátorban a csatornazajt a hírközlő rendszerek vizsgálatakor alkalmazott additív fehér Gauss-zajjal modelleztem. A szimulátort Matlab környezetben valósítottam meg, a nagyobb számításigényű függvényeket pedig C nyelven írtam meg.

A megvalósított FM-DCSK rendszert részletesen analizáltam a többutas terjedés figyelembevételével, beltéri rádió rendszerekre és vezeték nélküli lokális hálózatokra jellemző terjedési viszonyok esetére. A szimulációkat standard, a Personal Communication Services (PCS) Joint Technical Committee (JTC) által javasolt csatornamodellek segítségével végeztem [PL95].

A vevő berendezés tervezésekor az egyes paraméterek értékét úgy határoztam meg, hogy megvizsgáltam azok hatását a hibaarányra. Levezettem a megfigyelési jel képletét frekvenciahiba esetére, és ez alapján állapítottam meg, hogy a frekvenciahiba által okozott hibaarány-romlás rövidebb bitidővel csökkenthető. Levezettem a megfigyelési jel varianciájának képletét a korrelátorok mintavételi frekvenciájának függvényében, és ez alapján közelítő kifejezést adtam a hibaarányra. A levezetés során feltételeztem, hogy a megfigyelési jel Gauss-eloszlású, ami csak közelítőleg érvényes. A kvantálás hatását a szakirodalomból ismert kvantálási zajjal [Sch94] modelleztem, és ennek segítségével vezettem le a hibaarány közelítő képletét.

A közelítő elméleti eredményeket minden esetben szimulációval ellenőriztem.

Tézisek

I. tézis: Az FM-DCSK modulációs eljárás továbbfejlesztése

Az FM-DCSK adatátviteli rendszer egyik lehetséges alkalmazási területe a vezeték nélküli lokális hálózatok, ahol követelmény a többszörös hozzáférés biztosítása. Számos alkalmazásban az adatátviteli sebesség növelése végett többszintű modulációs eljárásokra van szükség. Mindkét feladat megoldható megfelelő számosságú, lehetőleg ortonormált jelkészlet kialakításával.

I/1. A kaotikus jelek ortogonalitását kihasználó FM-DCSK jelkészletet és detektor elrendezést dolgoztam ki többszörös hozzáférés megvalósítására (az értekezés 4.1. fejezete, a szerző kapcsolódó publikációi: [10], [32])

Az általam javasolt módszer alapja az, hogy a kaotikus jelek autokorrelációs függvénye lecsengő jellegű, illetve két különböző kezdeti feltételből indított végtelen hosszúságú kaotikus jel ortogonális. Ezt felhasználva az egyes felhasználók által kisugárzott jel szegmentálásával olyan jelkészletet hoztam létre, amelynek az elemei megközelítőleg ortogonálisak.

Az FM-DCSK vevő módosításával az így kialakított jelkészlet demodulációjára alkalmas detektor struktúrát javasoltam. A jelkészlet elemeinek közelítő ortogonalitása miatt minden vevő a neki megfelelő adó jelére érzékeny.

Az (1) kifejezést felhasználva levezettem a javasolt rendszer hibaarányát.

$$BER = \frac{1}{2^{BT}} \exp \left(\frac{-E_b}{2N_0 + \frac{1}{B} \sum_{u=2}^U P_{s_u}} \right) \sum_{i=0}^{BT-1} \frac{1}{i!} \left(\frac{E_b}{2N_0 + \frac{1}{B} \sum_{u=2}^U P_{s_u}} \right)^i \sum_{j=i}^{BT-1} \frac{1}{2^j} \binom{j+BT-1}{j-i} \quad (2)$$

ahol U a felhasználók számát, P_{s_u} pedig az u -ik felhasználó által kisugárzott jel teljesítményét jelöli. Megmutattam, hogy e módszer hátránya az, hogy a felhasználók számának növelésével megnő az interferencia szintje a csatornában, a hibaarány pedig leromlik. A csatornák közti interferencia oka az, hogy a véges hosszúságú kaotikus jelek nem ortogonálisak.

I/2. Ortonormált jelkészletet alakítottam ki kaotikus jel és a Walsh függvények kombinálásával (3.3.1. fejezet, [6], [40])

A véges hosszúságú kaotikus jelek csak közelítőleg ortogonálisak, ezért a fenti rendszerben U növelésével nő a hibaarány. A bináris FM-DCSK modulációs eljárás esetén a két bázisfüggvény ortogonális, az ortogonalitást az első két Walsh függvény biztosítja. Ezért az FM-DCSK moduláció általánosításaként egy M elemű ortogonális bázisfüggvény-rendszert javasoltam, amelyben egy kaotikus mintafüggvényt az első M Walsh függvénnyel kombinálva generáljuk a bázisfüggvényeket. Az így kialakított bázisfüggvény-rendszer segítségével vagy egy M szintű modulációt alkalmazó adatátviteli rendszer konstruálható, vagy egy többszörös hozzáférésű rendszer valósítható meg $U = M/2$ felhasználó számára.

I/3. A kaotikus bázisfüggvények visszaállításán alapuló koherens detektort dolgoztam ki a többszörös hozzáférésű FM-DCSK rendszerhez (4.2.1. fejezet, [6])

A többszörös hozzáférésű FM-DCSK rendszerhez az ortogonális bázisfüggvények visszaállítására alkalmas eljárást javasoltam. A vevő a visszaállított kaotikus bázisfüggvények alapján koherens módon végzi a demodulációt.

Levezettem a megfigyelési jel képletét, és ez alapján megmutattam, hogy a felhasználók számának növelésével minden FM-DCSK csatorna hibaaránya csökken. Ennek oka a bázisfüggvény-

visszaállító blokkban végrehajtott átlagolás zajcsökkentő hatása.

I/4. Energia detektort dolgoztam ki többszintű és többszörös hozzáférésű FM-DCSK rendszerek számára (3.3.2. fejezet, [40])

A GML döntési szabályból kiindulva, a kaotikus modulációs eljárások Fourier analízátoros leírását felhasználva az FM-DCSK jelek detekciójára alkalmas energia detektort javasoltam. Megmutattam, hogy bináris esetben az energia detektor hibaaránya megegyezik a differenciálisan koherens FM-DCSK detektor hibaarányával, többszintű esetben pedig jobb a hibaarány. Többszintű esetben a nyereség abból származik, hogy a detekció nem bitenként, hanem M bitből álló szimbólumonként megy végbe. Az (1) egyenlet felhasználásával összefüggést adtam a detektor hibaarányára:

$$BER = \frac{1}{2^{2BT/M}} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) \sum_{i=0}^{2BT/M-1} \frac{\left(\frac{E_b}{2N_0}\right)^i}{i!} \sum_{j=i}^{2BT/M-1} \frac{1}{2^j} \binom{j+2BT/M-1}{j-i} \quad (3)$$

II. tézis: Nagysebességű szimulátor megvalósítása kaotikus adatátviteli rendszerek vizsgálatára, az FM-DCSK rendszer hibaarányának meghatározása beltéri rádió csatornák esetén

Az INSPECT Projekt keretében megépítésre került FM-DCSK rendszer megtervezéséhez egy rendszerszintű, a hibaarány számítására alkalmas nagysebességű szimulátort fejlesztettem ki. A nagy szimulációs sebesség elérése érdekében meghatároztam a kaotikus adatátviteli rendszerek komplex kisfrekvenciás ekvivalens modelljét.

Az általam megvalósított FM-DCSK szimulátor nem egy lépésben, hanem több iterációban számolja a hibaarányt. Elméleti úton becslést adtam az egy iterációban átküldött jelsorozat hosszára.

A szimulátor segítségével részletesen megvizsgáltam a megépítendő FM-DCSK rendszert. Standard csatornamodellek felhasználásával meghatároztam a hibaarányt vezeték nélküli lokális hálózatokban és beltéri rádió rendszerekben érvényes terjedési körülmények között.

II/1. Meghatároztam a kaotikus adatátviteli rendszerek komplex kisfrekvenciás ekvivalens modelljét (5.1. fejezet, [3], [4], [7], [22], [29], [30], [31], [41], [42])

A hagyományos adatátviteli rendszerek komplex kisfrekvenciás modelljei ismertek ugyan, de nem alkalmazhatók direkt módon a kaotikus rendszerekre. Az értekezés 2. fejezetében kerülnek bemutatásra az alábbi kaotikus modulációs eljárások: CSK+AM/DSB-SC, COOK+AM/DSB-SC, DCSK+AM/DSB-SC, DCSK+FM, és FM-DCSK. Az analitikus jelmodell megközelítést alkalmazva levezettem ezen rendszerek komplex kisfrekvenciás ekvivalensét. Az RF vivő eltávolítása miatt a kisfrekvenciás ekvivalens modell alkalmazása nagyságrendekkel lecsökkenti a szimulációs időt.

II/2. Meghatároztam az FM-DCSK szimulátorban egy iterációban átküldött jel hosszúságát (5.2.3. fejezet, [7], [24], [27], [29], [30], [31])

A megvalósított FM-DCSK szimulátor iteratív úton számolja a hibaarányt. Mivel a kaotikus jelet generáló rutin viszonylag lassú, nem generálunk le új kaotikus jelet minden iteráció számára, hanem mindig ugyanazt a frekvenciamodulált kaotikus jelet használjuk.

Az egy iterációban átküldött kaotikus FM jelnek elegendően hosszúnak kell lennie ahhoz, hogy egy végtelen hosszúságú jelet reprezentáljon, azaz a jel véges hossza ne okozzon hibát a hibaarány

számításában. Az átküldött jelet akkor tekintjük elegendően hosszúnak, ha teljesítmény-sűrűség spektruma kis hibával közelíti a végtelen hosszú jel spektrumát. A kérdés a többutas terjedés esetén számított hibaaránynál fontos, mert ekkor a spektrum alakjától függ a hibaarány.

Meghatároztam a teljesítmény-sűrűség spektrum becslés átlagos négyzetes hibájának maximumát frekvenciamodulált kaotikus jelre:

$$\epsilon_{max} = \frac{2}{\Delta f T_e} + 0.052 \left(\frac{\Delta f}{B} \right)^4 \quad (4)$$

ahol Δf a becslésnél alkalmazott sáváteresztő szűrő sávzélességét, T_e pedig az egy iteráció alatt átküldött jel hosszát jelöli. A Δf sávzélesség értéke a többutas terjedést leíró csatorna karakterisztikájától függ, és beltéri rádiócsatornák esetén $\Delta f \leq 74.77$ kHz. Az átlagos négyzetes hibát 0.002 értékben maximalizálva az egy iterációban átküldendő jel hossza $T_e = 13.375$ ms-ra adódik.

II/3. Meghatároztam az FM-DCSK rendszer hibaarányát WLAN és beltéri rádiós alkalmazásokban (5.4. fejezet, [3], [4], [7], [25], [26], [31], [35], [44], [45])

Vezeték nélküli lokális hálózatokban és beltéri rádiós összeköttetésekben az adatátvitel korlátját a többutas terjedés következtében fellépő szelektív fading jelenti.

Az általam kifejlesztett FM-DCSK szimulátor és a WLAN csatornamodell [AB00, HW01], illetve a Personal Communication Services (PCS) Joint Technical Committee (JTC) által kidolgozott beltéri rádiós csatornamodellek [PL95] alapján meghatároztam az INSPECT FM-DCSK rendszerrel ezen terjedési viszonyok közt elérhető hibaarány értékét.

Az additív Gauss-zajos csatornához képesti hibaarány-romlás átlagos értékeit az alábbi táblázatban foglaltam össze a legrosszabb terjedési viszonyok (csatornacsillapítás ≥ 100 dB) esetére.

Csatorna típusa	Átlagos hibaarány-romlás
WLAN	4.8 dB
Irodaépület	8.3 dB
Lakóépület	6.8 dB
Raktárépület	9.8 dB

Ezen szimulációkkal megmutattam, hogy az FM-DCSK rendszer kellően robusztus ahhoz, hogy az felhasználásra kerüljön WLAN és beltéri rádió rendszerekben.

III. tézis: Az INSPECT FM-DCSK vevőberendezés rendszerterve, a vevő rendszerparamétereinek meghatározása

A tézis az INSPECT Projekt keretében megépített FM-DCSK rádió vevőjének rendszertervét tartalmazza. A rendszer az INSPECT konzorcium döntése alapján az Intersil által forgalmazott PRISM II chipset felhasználásával került megvalósításra [Int99].

A tervezés fő kérdése az volt, hogy hogyan valósítható meg az FM-DCSK vevő elvi blokkvázlata a rendelkezésre álló PRISM II áramkörökkel. Megmutattam, hogy az FM-DCSK detektor áttanszformálható egy olyan ekvivalens detektorba, ami már megvalósítható a fenti chipset segítségével.

A tervezés további lépéseiben a vevő fő paraméterei kerültek meghatározásra. Megvizsgáltam a rendszer működését fázis- és frekvenciahiba fellépte esetén. Meghatároztam a korrelátorok

mintavételi frekvenciáját és az A/D átalakító felbontását.

III/1. Az elvi FM-DCSK detektort áttranszformáltam oly módon, hogy megvalósítható legyen a PRISM II chipset felhasználásával (6.2. fejezet, [3], [4], [7], [22], [29], [30], [31], [41], [42])

A PRISM II chipset segítségével vezeték nélküli lokális hálózatok adó-vevőjét valósíthatjuk meg. A chipset vevője egy szuperheterodin architektúrán alapul, amely egy megbízható megoldást ad az FM-DCSK vevő megvalósítására. A PRISM II analóg része egy kvadratúra keverőben végződik, amely előállítja a vett jel kvadratúra komponenseit. Ezeket a jeleket digitalizálva végezzük el a demodulációt.

Az FM-DCSK detektor elvi blokkvázlata egy rádiófrekvenciás korrelátorból és egy döntő eszközből áll. Ezen blokkvázlat áttranszformálásával megmutattam, hogy a demoduláció közvetlenül megvalósítható a PRISM II által generált kvadratúra komponensekkel.

III/2. Meghatároztam a fázis- és frekvenciahiba hatását (6.3.1. fejezet)

Mivel az FM-DCSK rendszerben a demoduláció a vivő visszaállítása nélkül történik, ezért az adóban és vevőben lévő oszcillátorok frekvenciájának eltéréséből származó fázis- és frekvenciahiba lerontja a hibaarányt. Levezettem a megfigyelési jel képletét együttes fázis- és frekvenciahiba esetére. Bebizonyítottam, hogy a megfigyelési jel értékére kizárólag a frekvenciahiba van hatással. Megmutattam továbbá, hogy a megfigyelési jel, s így a hibaarány is a $\Delta\omega T$ szorzattól függ, azaz a frekvenciahiba hatása csökkenthető a bitidő csökkentésével.

III/3. Meghatároztam a korrelátorok mintavételi frekvenciáját (6.3.2. fejezet)

Az FM-DCSK vevő tervezésének egyik fontos kérdése a digitális korrelátorok mintavételi frekvenciájának megválasztása. Közelítő kifejezést adtam a rendszer hibaarányára a mintavételi frekvencia függvényében:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{E_b f_{corr}}{\sqrt{2 \operatorname{Var}[z]}} \right) \quad (5)$$

ahol f_{corr} a korrelátorok mintavételi frekvenciája. A megfigyelési jel varianciája a következőképpen számítható

$$\operatorname{Var}[z] = \sum_{h=-\frac{N_s}{2}+1}^{\frac{N_s}{2}} \left(\frac{N_s}{2} - |h| \right) \left([R_{s_I}(h) + R_{s_Q}(h)] [2R_{n_{I_f}}(h) + R_{n_{I_f}}(h - N_s/2) + R_{n_{I_f}}(h + N_s/2)] \right. \\ \left. + 2(R_{n_{I_f}}(h))^2 + 2R_{n_{I_f}}(h + N_s/2)R_{n_{I_f}}(h - N_s/2) \right) \quad (6)$$

ahol $R_{s_I}(h)$ és $R_{s_Q}(h)$ a kisugárzott jel kvadratúra komponenseinek autokorrelációs függvényei, $R_{n_{I_f}}(h)$ pedig a szűrt zaj fázisban lévő komponensének autokorrelációs függvénye. Az elméleti eredmények alapján a mintavételi frekvenciát 20 MHz-re választottam.

III/4. Meghatároztam a kvantáló felbontását (6.3.3. fejezet, [33], [34])

Mivel a vett jel kvadratúra komponenseit digitalizáljuk, a másik fontos kérdés a kvantáló felbontásának alkalmas megválasztása. A kvantálás hatását a szakirodalomból ismert kvantálási zajjal [Kol94] modelleztem. E modell alapján és az (1) egyenletet felhasználva közelítő kifejezést

adtam az FM-DCSK rendszer hibaaarányára:

$$BER = \frac{1}{2^{B_{eq}T}} \exp\left(-\frac{E_b}{2(N_0 + N_{0q})}\right) \sum_{i=0}^{B_{eq}T-1} \frac{\left(\frac{E_b}{2(N_0 + N_{0q})}\right)^i}{i!} \sum_{j=i}^{B_{eq}T-1} \frac{1}{2^j} \binom{j + B_{eq}T - 1}{j - i} \quad (7)$$

ahol

$$\frac{E_b}{N_0 + N_{0q}} = \frac{E_b/N_0}{1 + 2(E_b/N_0/T + 2B)/(3 \cdot 4^{R_r} f_{corr})}$$

és

$$B_{eq} = \frac{1 + 2(E_b/N_0/(2BT) + 1)/(3 \cdot 4^{R_r})}{1/B + 4(E_b/N_0/(2BT) + 1)/(3 \cdot 4^{R_r} f_{corr})}$$

továbbá R_r a kvantáló felbontását, f_{corr} pedig a mintavételi frekvenciát jelöli. Ezen eredmények alapján a kvantáló felbontását 6 bitre választottam.

A kutatási eredmények gyakorlati alkalmazása

Doktori munkám során elért eredményeim nagy része közvetlenül felhasználásra került az INSPECT projektben, a kaotikus adatátviteli rendszer tervezése és megépítése során [inn01]. Az általunk elkészített rendszerterv alapján az FM-DCSK rádiót a Helsinki University of Technology és a Centro Nacional de Microelectrónica (Sevilla) csoportjai építették meg. A megvalósított rádió fő paraméterei a következők:

- adatátviteli sebesség: 500 kbit/sec
- vivőfrekvencia: 2,474 GHz (ISM frekvenciasáv)
- teljes RF sávszélesség: 17 MHz
- hibaaarány: $E_b/N_0 = 14,5$ dB esetén 10^{-3}
- szuperheterodin vevőarchitektúra

Az FM-DCSK rendszerben a kisugárzott jel szélessávú és teljesítmény-sűrűség spektruma alacsony szintű; ezért ez a rendszer jól alkalmazható az ISM sávokban működő beltéri rádió rendszerekben. Újdonsága miatt az FM-DCSK adatátviteli rendszer 1999-ben nemzetközi szabadalmi védeltséget kapott [KKKJ99].

Az első tézisben bevezetett többszintű és többszörös hozzáférésű FM-DCSK rendszerek a beltéri rádió rendszerekkel szemben támasztott követelményekre adnak megoldást. A javasolt megoldások fő előnyei, hogy a hibaaarány a szintek, illetve a felhasználók számának növelésével csökken, és a módosított modulátor és demodulátor blokkok könnyen megvalósíthatók.

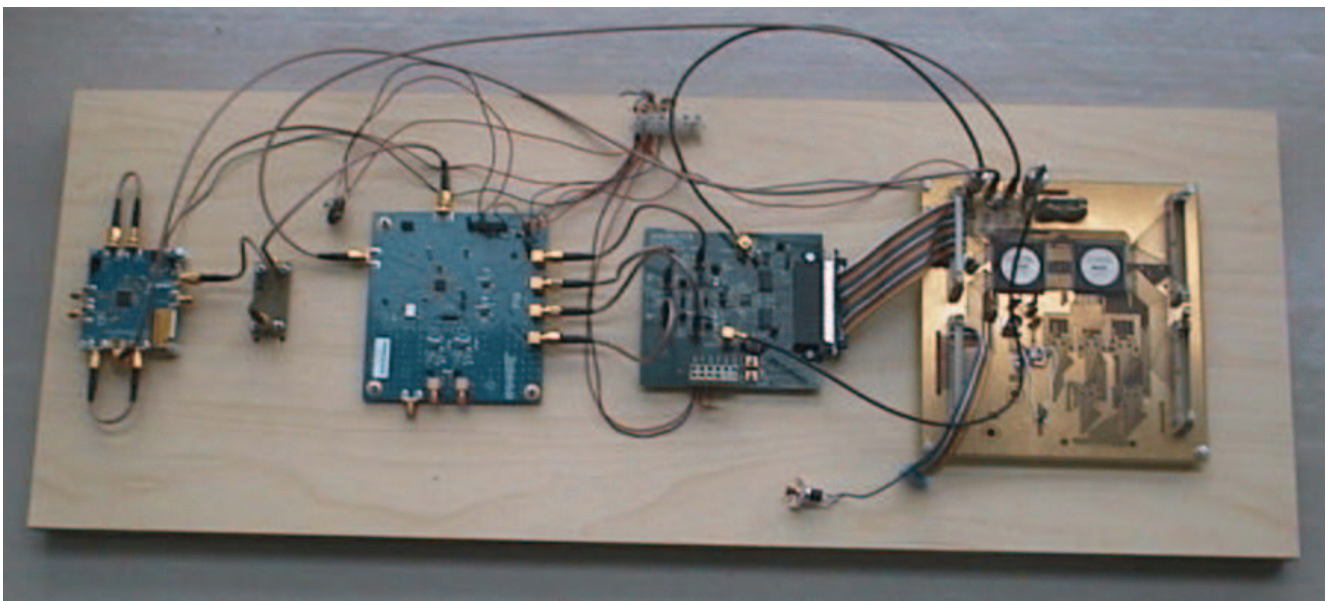
A különböző kaotikus modulációs eljárások komplex kislekvenciás ekvivalens modelljeit közvetlenül felhasználtam a szimulátor megvalósításakor. A kislekvenciás modelleknek köszönhetően a kifejlesztett szimulátor rendkívül gyors, egy közepes teljesítményű PC-n 500 bit/sec sebességgel működik.

A második tézisben szereplő szimulátor a projekt minden fázisában fontos szerepet játszott. Szimulációval analizáltuk és hasonlítottuk össze az egyes modulációs módszereket a megvalósítandó eljárás kiválasztásakor. A megvalósított FM-DCSK rendszert szimulációval teszteltük különböző paraméter értékekkel és különböző terjedési viszonyok között. A szimulációk és elméleti eredmények alapján határoztuk meg a megépítendő rendszer paramétereit. Többutas terjedés esetére nem álltak rendelkezésünkre elméleti összefüggések a hibaaarány meghatározására, ezért szimulációkkal mutattam meg, hogy az FM-DCSK rendszer elegendően robusztus ahhoz, hogy beltéri rendszerekben használható legyen. A szimulátor egy módosított változatát alkalmazta az INSPECT

projektben részt vevő sevilla-i csoport az általuk kifejlesztett integrált áramkör tesztelésére. A szimulált eredmények egy részét a megépített rendszeren elvégzett mérések is igazolták.

A disszertáció harmadik tézise az FM-DCSK vevő tervezésével, a fő paraméterek meghatározásával foglalkozik. A vevő berendezést az általam javasolt struktúrával és paraméter értékekkel építették meg. A vevő rádiófrekvenciás áramkörei, az RF keverő, és a kvadratúra KF keverők az Intersil PRISM II chipset elemeivel kerültek megvalósításra. A középfrekvencián működő csatornaszűrőt egy felületi hullámszűrő valósítja meg. A demodulációt az analóg-digitális átalakítás után két, FPGA áramkörökkel megvalósított digitális korrelátor végzi. A megépített áramkörökben az általam meghatározott mintavételi frekvencia és bitszám értéket alkalmazták.

Az általam megtervezett vevőt Prof. Veikko Porra vezetésével a Helsinki University of Technology kutatócsoportja építette meg; a vevő fényképe az 1. ábrán látható. A megépített FM-DCSK rádió az ECCTD konferencián került bemutatásra 2001-ben.



1. ábra. A Helsinki University of Technology által megépített INSPECT FM-DCSK rádió rendszer vevője.

Publikációk jegyzéke

Nemzetközi referált folyóiratcikkek

- [1] G. Kolumbán, G. Kis, Z. Jákó, and M. P. Kennedy, „FM–DCSK: A robust modulation scheme for chaotic communications,” *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E81-A, no. 9, pp. 1798–1802, Oct. 1998.
- [2] G. Kis and Z. Jákó, „Noise reduction in DCSK modulation schemes,” *Journal of Signal Processing, Special Section on Nonlinear Signal Processing*, vol. 4, no. 1, pp. 71–78, January 2000.
- [3] M. P. Kennedy, G. Kolumbán, and G. Kis, „Chaotic modulation for robust digital communications over multipath channels,” *Invited tutorial in the Special Issue of Int. J. Bifurcation and Chaos*, vol. 10, no. 4, pp. 695–718, 2000.
- [4] M. P. Kennedy, G. Kolumbán, G. Kis, and Z. Jákó, „Performance evaluation of FM–DCSK modulation in multipath environments,” *IEEE Trans. Circuits and Systems–Part I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 47, no. 12, pp. 1702–1711, Dec. 2000.
- [5] Z. Jákó and G. Kis, „Application of noise reduction to chaotic communications: A case study,” *IEEE Trans. Circuits and Systems–Part I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 47, no. 12, pp. 1720–1725, Dec. 2000.
- [6] G. Kolumbán, M. P. Kennedy, Z. Jákó, and G. Kis, „Chaotic communications with correlator receiver: Theory and performance limit,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 5, pp. 711–732, May 2002.

Külföldön kiadott könyvfejezet

- [7] G. Kolumbán, M. P. Kennedy, and G. Kis, „Performance evaluation of FM–DCSK,” in *Chaotic Electronics in Telecommunications*, M. P. Kennedy, R. Rovatti, and G. Setti, Eds., pp. 185–220. CRC Press LLC, Florida, 2000.

Nemzetközi szabadalom

- [8] M. P. Kennedy, G. Kolumbán, G. Kis, and Z. Jákó, „Binary digital communication system using a chaotic frequency-modulated carrier,” *Irish patent number: S80913*, granted on June 1 1999.

Nemzetközi konferencia kiadványban megjelent idegen nyelvű előadások

- [9] G. Kolumbán, A. Hasegawa, T. Endo, and G. Kis, „Direct signal generation for chaos communication and chaotic measurement by analog PLL,” in *Proc. IEEE–ISCAS’97*, Hong Kong, June 9–12 1997, vol. II, pp. 901–904.
- [10] G. Kolumbán, M. P. Kennedy, and G. Kis, „Multilevel Differential Chaos Shift Keying,” in *Proc. NDES’97*, Moscow, Russia, June 26–27 1997, pp. 191–196.

- [11] G. Kolumbán, M. P. Kennedy, and G. Kis, „Determination of symbol duration in chaos-based communications,” in *Proc. NDES'97*, Moscow, Russia, June 26–27 1997, pp. 217–222.
- [12] G. Kolumbán, M. P. Kennedy, and G. Kis, „Performance improvement of chaotic communications systems,” in *Proc. ECCTD'97*, Budapest, Hungary, Aug. 30–Sept. 3 1997, pp. 284–289.
- [13] G. Kolumbán, G. Kis, M. P. Kennedy, and Z. Jákó, „FM-DCSK: A new and robust solution for chaotic communications,” in *Proc. NOLTA'97*, Honolulu, USA, Nov. 29–Dec. 2 1997, pp. 117–120.
- [14] M. P. Kennedy, Z. Jákó, G. Kis, and G. Kolumbán, „Chaotic communications systems for unlicensed radio applications,” in *Proc. NOLTA'97*, Honolulu, USA, Nov. 29–Dec. 2 1997, pp. 120–124.
- [15] Z. Jákó, G. Kis, G. Kolumbán, and M. P. Kennedy, „Design of large signal set for DCSK modulation,” in *Proc. Sixth IEE Conference on Telecommunications*, Edinburgh, UK, March 29–Apr. 1 1998, pp. 44–48.
- [16] G. Kis, Z. Jákó, M. P. Kennedy, and G. Kolumbán, „Chaotic communications without synchronization,” in *Proc. Sixth IEE Conference on Telecommunications*, Edinburgh, UK, March 29–Apr. 1 1998, pp. 49–53.
- [17] M. P. Kennedy, G. Kolumbán, G. Kis, and Z. Jákó, „Recent advances in communicating with chaos,” in *Proc. IEEE-ISCAS'98*, Monterey, USA, May 31–June 3 1998, vol. IV, pp. 461–464.
- [18] G. Kolumbán, M. P. Kennedy, G. Kis, and Z. Jákó, „FM-DCSK: A novel method for chaotic communications,” in *Proc. IEEE-ISCAS'98*, Monterey, USA, May 31–June 3 1998, vol. IV, pp. 477–480.
- [19] G. Kis, „Required bandwidth of chaotic signals used in chaotic modulation schemes,” in *Proc. NDES'98*, Budapest, Hungary, July 16–18 1998, pp. 113–117.
- [20] G. Kis and G. Szabó, „Optimization of decision thresholds for M-ary DCSK modulation,” in *Proc. NDES'98*, Budapest, Hungary, July 16–18 1998, pp. 185–187.
- [21] N. Lorenzo, M. P. Kennedy, G. Kolumbán, and G. Kis, „A comparison of the noise performance of Pecora-Carroll and H synchronization,” in *Proc. NDES'98*, Budapest, Hungary, July 16–18 1998, pp. 249–252.
- [22] G. Kolumbán and G. Kis, „Performance evaluation of FM-DCSK modulation scheme,” in *Proc. NOLTA'98*, Le Regent, Crans-Montana, Switzerland, Sept. 14–17 1998, pp. 81–84.
- [23] G. Kis and G. Kolumbán, „Constraints on chaotic oscillators intended for communications applications,” in *Proc. NOLTA'98*, Le Regent, Crans-Montana, Switzerland, Sept. 14–17 1998, pp. 883–886.
- [24] G. Kis, „Fast simulator for analysis of chaotic communications systems,” in *Proc. IWK'98*, Ilmenau, Germany, Sept. 21–24 1998, vol. I, pp. 38–43.
- [25] M. P. Kennedy, G. Kolumbán, and G. Kis, „Application of chaotic modulation in multipath environments,” in *Proc. COST 254*, Neuchatel, Switzerland, May 5–7 1999, p. 13.

- [26] M. P. Kennedy, G. Kolumbán, and G. Kis, „Simulation of the multipath performance of FM–DCSK digital communications using chaos,” in *Proc. IEEE–ISCAS’99*, Orlando, USA, May 30–June 2 1999, vol. IV, pp. 568–571.
- [27] G. Baldwin, M. P. Kennedy, G. Kis, and G. Kolumbán, „FM–DCSK radio system simulator,” in *Proc. ISSC’99*, NUI Galway, Ireland, June 24–25 1999, pp. 425–432.
- [28] G. Baldwin and G. Kis, „Quantification of intersymbol interference effects in an RF FM–DCSK system,” in *Proc. NDES’99*, Ronne, Bornholm, Denmark, July 15–17 1999, pp. 169–172.
- [29] G. Kis and G. Baldwin, „Modeling and simulation issues in RF chaotic communications,” in *Proc. NDES’99*, Ronne, Bornholm, Denmark, July 15–17 1999, pp. 173–176.
- [30] G. Kis and G. Baldwin, „Efficient FM–DCSK radio system simulator,” in *Proc. ECCTD’99*, Stresa, Italy, Aug. 29 – Sept. 2 1999, pp. 884–887.
- [31] G. Kolumbán, G. Kis, M. P. Kennedy, and G. Baldwin, „Ultra-fast simulator developed in MATLAB environment to evaluate multipath performance of FM–DCSK RF system,” in *Proc. ICECS’99*, Paphos, Cyprus, Sept. 5–8 1999, vol. III, pp. 1725–1729.
- [32] Z. Jákó, G. Kis, and G. Kolumbán, „Multiple access capability of the FM–DCSK chaotic communications system,” in *Proc. NDES’2000*, Catania, Italy, May 18–20 2000, pp. 52–55.
- [33] M. P. Kennedy and G. Kis, „Elaboration of system specification for a WLAN FM–DCSK telecommunications system,” in *Proc. NDES’2000*, Catania, Italy, May 18–20 2000, pp. 160–164.
- [34] G. Kis, „Evaluation of interference performance of FM–DCSK communications system,” in *Proc. NDES’2000*, Catania, Italy, May 18–20 2000, pp. 204–207.
- [35] G. Kolumbán and G. Kis, „Multipath performance of FM–DCSK chaotic communications system,” in *Proc. IEEE–ISCAS’2000*, Geneva, Switzerland, May 28 – 31, 2000, vol. IV, pp. 433–436.
- [36] Z. Jákó and G. Kis, „On the effectiveness of noise reduction methods in DCSK systems,” in *Proc. IEEE–ISCAS’2000*, Geneva, Switzerland, May 28 – 31, 2000, vol. IV, pp. 437–440.
- [37] G. Kis, „Performance of fast and slow chaotic frequency hopping modulation in WLAN applications,” in *Proc. ISSC’2000*, NUI Dublin, Ireland, June 29–30 2000, pp. 149–156.
- [38] M. P. Kennedy, G. Kis, and Z. Jákó, „Optimum receivers for CSK and DCSK,” in *Proc. NOLTA’2000*, Dresden, Germany, September 17–21 2000.
- [39] Z. Jákó, D. Fournier-Prunaret, V. Guglielmi, and G. Kis, „Non-redundant error correction in FM–DCSK chaotic communications systems,” in *Proc. ECCTD’01*, Espoo, Finland, Aug. 28 – 31 2001, vol. II, pp. 193–196.
- [40] G. Kolumbán and G. Kis, „Reception of M -ary FM–DCSK signals by energy detector,” in *Proc. NDES’03*, Scuol, Switzerland, May 18–22 2003, pp. 133–136.

Magyar nyelvű konferencia előadások

- [41] G. Kis, „Development of communication system model for FM–DCSK modulation,” in *Proc. 5th PhD Mini–Symposium*, DMIS TUB Budapest, Hungary, Feb. 4–5 1998, pp. 14–15.
- [42] G. Kis, „FM–DCSK moduláción alapuló kaotikus adatátviteli rendszer modellje és analízise (Low-frequency model and analysis of FM–DCSK chaotic communication system),” in *Proc. Kandó Kálmán Műszaki Főiskola XV. Tudományos Ülésszak*, Budapest, Hungary, May 7–8 1998, pp. 87–92.
- [43] G. Kolumbán, G. Kis, and Z. Jákó, „Kaotikus adatátviteli rendszerek (Data transmission using chaotic carriers),” in *Proc. Kandó Kálmán Műszaki Főiskola XV. Tudományos Ülésszak*, Budapest, Hungary, May 7–8 1998, pp. 81–86.
- [44] G. Kis, „Performance of FM–DCSK communication system for multipath radio channel,” in *Proc. 6th PhD Mini–Symposium*, DMIS TUB Budapest, Hungary, Feb. 3–4 1999, pp. 40–41.
- [45] G. Kis, „Evaluation of multipath and interference performance of FM–DCSK chaotic communications system,” in *Proc. 7th PhD Mini–Symposium*, DMIS TUB Budapest, Hungary, January 27–28 2000, pp. 18–19.

Hivatkozások a fenti publikációkra

Az összes ismert idegen hivatkozások száma: 52

A Science Citation Index szerinti összes hivatkozások száma (beleértve az önhivatkozásokat is): 41

A Science Citation Index szerinti hivatkozások között az idegen hivatkozások száma: 16

Irodalomjegyzék

- [AB00] R. L. Abrahams and W. R. Bomstad. Multipath performance of a direct sequence 2.4 GHz 11 Mb WLAN PCMCIA assembly with diversity antennas. Technical report, Intersil Corporation, <http://www.intersil.com/design/prism/papers/>, 2000.
- [AGS98] A. Abel, M. Götz, and W. Schwarz. Statistical analysis of chaotic communication schemes. In *Proc. IEEE–ISCAS’98*, volume IV, pages 465–468, Monterey, USA, May 31–June 3 1998.
- [ASG00] A. Abel, W. Schwarz, and M. Götz. Noise performance of chaotic communication systems. *IEEE Trans. Circuits and Syst. I*, 47(12):1726–1732, December 2000.
- [Che99] G. Chen. Chaos, bifurcations, and their control. In J. G. Webster, editor, *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, pages 194–218. Wiley, New York, 1999.
- [CO93] K. M. Cuomo and A. V. Oppenheim. Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications. *Phys. Rev. Lett.*, 71(1), July 1993.
- [CP91] T. L. Carroll and L. M. Pecora. Synchronizing chaotic circuits. *IEEE Trans. Circuits Syst.*, 38(4):453–456, April 1991.

- [CY00] C. C. Chen and K. Yao. Stochastic calculus based numerical evaluation and performance analysis of chaotic communication systems. *IEEE Trans. Circuits and Systems—Part I: Fundamental Theory and Applications*, 47(12):1663–1672, Dec. 2000.
- [dig98] Digital Communication Devices based on Nonlinear Dynamics and Chaos. Multidisciplinary University Research Initiative (FY1998, Topic #13) sponsored by: Army Research Office, Department of Defense, 1998. URL address „<http://rfic.ucsd.edu/chaos/>”.
- [DKH93] H. Dedieu, M. P. Kennedy, and M. Hasler. Chaos shift keying: Modulation and demodulation of a chaotic carrier using self-synchronizing Chua’s circuits. *IEEE Trans. Circuits and Syst. II*, 40(10):634–642, October 1993.
- [Dob94] T. P. Dobrowiecki. *Jelek és rendszerek mérés-technikája (L. Schnell Editor)*, chapter Mérési adatok feldolgozásának alapvető módszerei. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1994. in Hungarian.
- [ea92] A. V. Oppenheim et al. Signal processing in the context of chaotic signals. In *Proc. IEEE-ICCASP’92*, volume IV, pages 117–120, 1992.
- [FHS96] U. Feldmann, M. Hasler, and W. Schwarz. Communication by chaotic signals: The inverse system approach. *Int. J. Circuit Theory Appl.*, 24:551–579, 1996.
- [FSV80] I. Frigyes, Z. Szabó, and P. Ványai. *Digitális mikrohullámú átviteltechnika*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980. in Hungarian.
- [Has95] M. Hasler. Engineering chaos for secure communication systems. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 353(1710):115–126, 1995.
- [Hay94] S. Haykin. *Communication Systems*. John Wiley & Sons, New York, 3rd edition, 1994.
- [HGO93] S. Hayes, C. Grebogi, and E. Ott. Communicating with chaos. *Phys. Rev. Lett.*, 70(20):3031–3034, May 1993.
- [HS00] M. Hasler and T. Schimming. Chaos communication over noisy channel. *Int. J. Bifurcation and Chaos*, 10(4):719–735, April 2000.
- [HW01] K. Halford and M. Webster. Multipath measurement in wireless LANs. Technical report, Intersil Corporation, <http://www.intersil.com/design/prism/>, October 2001. File Number AN9895.1.
- [inn01] Innovative Signal Processing Exploiting Chaotic Dynamics (INSPECT). Esprit #31103 Open FET Programme sponsored by the European Union, 1997–2001. URL addresses „www.cordis.lu/esprit/src/31103.htm” and „www.mit.bme.hu/research/chaos/projects.html”.
- [Int99] Intersil Corporation. *PRISM II Chip Set Overview 11MBPS SiGe*, February 1999. File Number AN9837, <http://www.intersil.com/design/prism/>.
- [Ken00] Special issue on noncoherent chaotic communications, Guest Editors: M.P. Kennedy and G. Kolumbán. *IEEE Trans. Circuits and Systems—Part I: Fundamental Theory and Applications*, 47(12), Dec. 2000.

- [KK00] G. Kolumbán and M. P. Kennedy. The role of synchronization in digital communication using chaos—Part III: Performance bounds for correlation receivers. *IEEE Trans. Circuits and Systems—Part I: Fundamental Theory and Applications*, 47(12):1673–1683, December 2000.
- [KKC97] G. Kolumbán, M. P. Kennedy, and L. O. Chua. The role of synchronization in digital communications using chaos – Part I: Fundamentals of digital communications. *IEEE Trans. Circuits and Systems—Part I: Fundamental Theory and Applications*, 44(10):927–936, Oct. 1997.
- [KKC98] G. Kolumbán, M. P. Kennedy, and L. O. Chua. The role of synchronization in digital communication using chaos—Part II.: Chaotic modulation and chaotic synchronization. *IEEE Trans. Circuits and Systems—Part I: Fundamental Theory and Applications*, 45(11):1129–1140, Nov. 1998.
- [KKJK98] G. Kolumbán, G. Kis, Z. Jákó, and M. P. Kennedy. FM–DCSK: A robust modulation scheme for chaotic communications. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, E81-A(9):1798–1802, Oct. 1998.
- [KKJK02] G. Kolumbán, M. P. Kennedy, Z. Jákó, and G. Kis. Chaotic communications with correlator receiver: Theory and performance limit. *Proceedings of the IEEE*, 90(5):711–732, May 2002.
- [KKKJ99] M. P. Kennedy, G. Kolumbán, G. Kis, and Z. Jákó. Binary digital communication system using a chaotic frequency-modulated carrier. *Irish patent number: S80913*, granted on June 1 1999.
- [KLS03] G. Kolumbán, F. C. M. Lau, and M. Small. A new description of chaotic waveform communications: The Fourier analyzer approach. In *Proc. ECCTD'03*, volume III, pages 241–244, Cracow, Poland, September 1-4 2003.
- [Kol94] I. Kollár. *Jelek és rendszerek mérés technikája (L. Schnell Editor)*, chapter Jelanalizátorok. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1994. in Hungarian.
- [Kol00] G. Kolumbán. Theoretical noise performance of correlator-based chaotic communications schemes. *IEEE Trans. Circuits and Systems—Part I: Fundamental Theory and Applications*, 47(12):1692–1701, Dec. 2000.
- [Kol02] G. Kolumbán. *Kaotikus jelek adatátviteli alkalmazása: Lehetőségek és elvi korlátok*. MTA, Budapest, 2002. Akadémiai doktori értekezés, in Hungarian.
- [KRS00] M. P. Kennedy, R. Rovatti, and G. Setti, editors. *Chaotic electronics in telecommunications*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2000.
- [KVSA96] G. Kolumbán, B. Vizvári, W. Schwarz, and A. Abel. Differential chaos shift keying: A robust coding for chaotic communication. In *Proc. NDES'96*, pages 87–92, Seville, June 1996.
- [LZC96] J. Lavery, J. Zavada, and M. Ciftan. Toward a new digital communication technology based on nonlinear dynamics and chaos. Strategic Assessment Report, U.S. Army Research Office, Research Triangle Park, NC, November 1996.

- [MF00] G. M. Maggio and O. De Feo. T-CSK: A robust approach to chaos-based communications. In *Proc. NDES'2000*, pages 37–41, Catania, Italy, May 18–20 2000.
- [Pap99] L. Pap. *A mobil hírközlés alapjai, elektronikus jegyzet*. BME, Budapest, 1999. in Hungarian.
- [PC89] T. S. Parker and L. O. Chua. *Practical Numerical Algorithms for Chaotic Systems*. Springer Verlag, New York, 1989.
- [PCK⁺92] U. Parlitz, L. O. Chua, Lj. Kocarev, K. S. Halle, and A. Shang. Transmission of digital signals by chaotic synchronization. *Int. J. Bif. Chaos*, 2:973–977, 1992.
- [PL95] K. Pahlavan and A. H. Levesque. *Wireless Information Networks*. Wiley, New York, 1995.
- [Ric82] S. O. Rice. Envelopes of narrow-band signals. *Proceedings of the IEEE*, 70:692–699, 1982.
- [SCC97] J. A. K. Suykens, P. F. Curran, and L. O. Chua. Master-slave synchronization using dynamics output feedback. *Int. J. Bif. Chaos*, 7(3), 1997.
- [Sch94] L. Schnell. *Jelek és rendszerek mérés-technikája*. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1994. in Hungarian.
- [Sch98] J. Schweizer. The performance of chaos shift keying: Synchronization versus symbolic backtracking. In *Proc. IEEE-ISCAS'98*, volume IV, pages 469–472, Monterey, USA, May 31–June 3 1998.
- [SGK⁺00] W. Schwarz, M. Götz, K. Kelber, A. Abel, T. Falk, and F. Dachselt. Statistical analysis and design of chaotic systems. In M. P. Kennedy, R. Rovatti, and G. Setti, editors, *Chaotic electronics in telecommunications*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2000.
- [SK95] J. Schweizer and M. P. Kennedy. Predictive Poincaré control. *Phys. Rev. E*, 52(5):4865–4876, November 1995.
- [STV00] M. Sushchik, L. S. Tsimring, and A. R. Volkovskii. Performance analysis of correlation-based communication schemes utilizing chaos. *IEEE Trans. Circuits and Syst. I*, 47(12):1684–1691, December 2000.
- [WC93] C. W. Wu and L. O. Chua. Transmission of digital signals by chaotic synchronization. *Int. J. Bif. Chaos*, 3(6):1619–1627, 1993.
- [WC94] C. W. Wu and L. O. Chua. A unified framework for synchronization and control of dynamical systems. *Int. J. Bif. Chaos*, 4(4):979–998, 1994.
- [Yan95] T. Yang. Recovery of digital signals from chaotic switching. *Int. J. Circuit Theory Appl.*, 23(6):611–615, 1995.

