

Opponensi vélemény
Fodor Gábor Akadémia Doktora disszertációjáról
Pap László
2018

1. Adatok:

- Szerző:
Fodor Gábor
- A disszertáció címe:
"Channel Estimation and Receiver Design in Single- and Multiuser Multiantenna Systems"

2. Bevezetés

Az elmúlt években a modern vezeték nélküli telekommunikációs technológiák fejlődését leginkább az állandóan növekvő forgalom és az adatkommunikációs igények bővülése határozta meg. A létező fejlődési trendek legfőbb mozgatója az internet szolgáltatások folyamatos bővülése és a gépek és szenzorok közötti kommunikáció egyre szélesebb körű elterjedése. Ebben a fejlődésben egyre nagyobb szerepet játszanak a sok bemenetű/sok kimenetű (MIMO) többantennás rendszerek. A mobil kommunikációs rendszerek általános fejlődése során, a MIMO megoldások számos új szolgáltatásban és technológiában is fontos szerepet játszanak. Ilyenek a vezeték nélküli lokális számítógép-hálózatok (LAN), a szenzorhálózatok, a testen hordozható eszközök (BAN), stb. Várhatóan szerepük a jövőben egyre fontosabbá válik, így a téma korszerű, sőt a szakterületen a mai nemzetközi kutatás-fejlesztés fókuszában van, különös tekintettel a mobil rendszerek ötödik generációjára, az 5G-re. A szolgáltatások fejlesztésekor minden rendszerfejlesztő és szolgáltató egyre nagyobb adatátviteli sebességet, nagyobb spektrális hatékonyságot és flexibilisebb szolgáltatásokat kíván megvalósítani. A disszertációban közölt eredmények ehhez a kutatási irányhoz járulnak hozzá igen színvonalas és a gyakorlat számára is fontos eredményekkel.

A disszertáció ebben a problémakörben elsősorban a MIMO rendszerek tervezési kérdéseivel foglalkozik, ezen belül is a pilotjeleket felhasználó csatornabecslő módszereket elemzi. A pilotjelek küldése lehetővé teszi az állandóan változó csatornaállapot becslését, és módot ad arra, hogy a csatornát kiegyenlítsük. A pilotjel alkalmazása azonban erőforrásokat igényel, és mindenképpen egyensúlyt kell teremteni az adatátvitelre s a csatornakiegyenlítésre fordított erőforrások között.

A disszertációban a szerző olyan matematikai modellek kidolgozását tűzte ki célul, amelyek pontosan leírják pilot- és adatjelek arányának és eloszlásának a hatását a MIMO és MU-MIMO rendszerek teljesítőképességére, és arra törekedett, hogy az általa elért eredményeket a gyakorlati tervezésben és a szabványosítási folyamatban is alkalmazni lehessen. A szerző emellett arra is koncentrált, hogy a feladatokra lehetőleg zárt alakú, áttekinthető és könnyen kezelhető megoldásokat adjon, ugyanakkor a modellek lehetőleg jól közelítsék a gyakorlatban előforduló helyzeteket. A disszertációban alkalmazott

elméleti és szimulációs módszerek jól illeszkednek a szakterület színvonalas nemzetközi fórumaiban alkalmazott megközelítésekhez. A disszertációban a szerző öt téziscsoportban fogalmazta meg eredményeit, ezek az alábbiak:

- A pilot-adat teljesítményarány felhasználása egyfelhasználós rendszerekben;
- Minimális átlagos négyzetes hibájú (MMSE) vevő tervezése a csatornaállapot hibás becslése esetén;
- Az egyfelhasználós rendszerek teljesítőképességének a függése a pilot-adat teljesítményaránytól, az antennaszámtól és az antennák közötti korrelációtól;
- A sokfelhasználós rendszerek spektrális hatékonyságának az elemzése legkisebb négyzetes hibájú (LS) és legkisebb átlagos négyzetes hibájú (MMSE) csatornabecslés esetén;
- A pilot- és adatjelek közötti erőforrás megosztás mellett a sokfelhasználós MIMO rendszerek teljesítmény jellemzőinek (az adatszimbólumok négyzetes hibája, spektrális hatékonyság) a vizsgálata abban az esetben, ha a bázisállomás antennái, illetve a MS-BS irányú csatornák korreláltak.

A disszertációban alkalmazott analízismódszerek elsősorban a valószínűség számítás, a matematikai statisztika, a mátrixalgebra, a kvadratikusan optimalizálás és a speciális integrálszámítás eredményeire támaszkodnak. Az eljárások igen magas színvonalúak, absztrakciós szintjük kiemelkedő. Az alábbiakban az egyes tézisek sorrendjében értékelem a disszertáció eredményeit.

3. Az eredmények értékelése

A disszertáció két bevezető részből, öt érdemi fejezetből, az eredmények alkalmazási lehetőségeit ismertető fejezetből és a tézisek összefoglalójából áll. Az egyes érdemi fejezetek végén az olvashatóságot nagyban segítő függelékek találhatók, amelyek az adott fejezetben kimondott vagy felhasznált matematikai állítások igazolását foglalják össze. Minden téziscsoport előtt a szerző olyan eredményeket közöl, melyeket az érintett tézisekben felhasznál. Ezek a bevezető eredmények önmagukban is színvonalas megállapításokat és modellezési módszereket tartalmaznak.

A 3. (az első érdemi) fejezetben a szerző a pilot-adatjel teljesítmény arány hatását vizsgálja N_r számú korrelálatlan csatornás (ennyi vevőantennát használó) egyfelhasználós rendszerekben. Az I. Téziscsoportban alkalmazott fogalmak (a pilotjel modellje, a csatornaállapot torzítatlan becslésének ($\hat{h}$) formalizálása és a zaj és a csatornaállapot leírására használt $\mathbf{C}$, $\mathbf{D}$ és $\mathbf{Q}$ kovariancia mátrixok definiálása után a szerző az I. tételben zárt formában megadja a vett adatszimbólumok átlagos négyzetes hibáját, amely a vett jel teljesítményének, a pilot-adatjel arányának, az antennák számának és a vevő bemenetén mérhető jel-zaj viszonyának a függvénye. A tételben elért eredmények színvonalasak, és jól írják le az egyfelhasználós, több antennás rendszerek viselkedését több korrelálatlan Rayleigh fadingses csatorna esetén. A zárt alakú megoldáshoz a jelölt az $E_{in}(n, z)$ standard integrálfüggvényt használta.

A tétel állítását új tudományos eredménynek fogadom el.

Kérdések az I. Téziscsoporttal kapcsolatban:

- Van-e hasonló eredmény abban az esetben, ha az egyes részcsatornáknak van LOS terjedési komponens is, azaz a fading például Rice vagy Nakagami típusú?
- A csatornaállapot leírására használt körkörös szimmetrikus nulla várható értékű Gauss eloszlású komplex valószínűségi változó alkalmazásának van-e annál erősebb indoka, hogy ebben az esetben a rendszer statisztikai kezelése egyszerűbb.
- A tézis fő eredményében, az hogyan értelmezhető, hogy az $MSE \ d = b = 0$ esetén éppen egységnyi?

A 4. fejezetben a szerző a MU-MIMO rendszerek optimális (MSE) vevőstruktúráját adja meg csatornabecslési hiba esetén. A II. Téziscsoport két altézisből áll. Az első altézisben a szerző definiálja a G_k^* optimális vevővektort, és megadja annak zárt alakú megoldását, a második altézisben pedig a szerző zárt alakban határozza meg az így felépített vevőben az adatszimbólumok átlagos négyzetes hibáját. A vizsgált rendszerben a mobil állomások τ_p számú ortogonális pilot szekvenciákat használnak, a vevő antennáinak a száma most is N_r , ami nagyobb vagy lényegesen nagyobb a felhasználók K számánál.

Minkét altézis eredményeit új tudományos eredménynek fogadom el.

Kérdések a II. Téziscsoporttal kapcsolatban:

- Mi annak a hatása a rendszer működésére, illetve az elemzésre, hogy ha a $K \ll N_r$ feltétel nem teljesül?
- Mi a mértéke a $K \ll N_r$ feltételnek, azaz milyen mértékűnek kell lenni a jóval kisebb relációnak, van-e ennek egyáltalán becsülhető értéke?
- Miért kell teljesülni a $K \leq \tau_p$ feltételnek, miért nem elegendő az egyenlőség?

Az 5. fejezetben a szerző az egyfelhasználós SU-MIMO rendszerekkel foglalkozik abban az esetben, ha a vevőoldali antennák, illetve az azokhoz tartozó csatornák korreláltak (III. Téziscsoport). A cél most is a vett szimbólumok MSE értékének meghatározása a pilot-adatjel teljesítmény arányának, az antennák számának és az antennakorrelációnak a függvényében. A tézisben használt terminológiák és jelölések áttekintése során a jelölt a mátrixok szinguláris felbontásának a módszerét vezeti be, amellyel a csatornák közötti áthallás miatt kialakult csatornaközi korreláció hatását kezelni lehet.

A tézis alapvető eredménye a vett szimbólumok átlagos négyzetes hibájának (MSE) a meghatározása, amelyet összetett matematikai manipulációk alkalmazásával a szerző improprius integrálok felhasználásával, lényegében zárt alakban ad meg.

A tézist új tudományos eredménynek elfogadom.

Kérdések a III. Téziscsoporttal kapcsolatban:

- Van-e olyan korrelált csatornarendszer, olyan korrelációs mátrix, amely esetében az itt bemutatott módszer nem vagy nehezen alkalmazható, mivel az extrém hibákhoz vezethet?

Az 6. fejezetben a szerző a sokfelhasználós MIMO rendszerek spektrális hatékonyságát elemzi akkor, ha a felhasználók a rendelkezésre álló erőforrásokat pilot- és adatjelek

között osztják meg és a bázisállomási vevő legkisebb négyzetes hibájú (LS), vagy legkisebb átlagos négyzetes hibájú (MMSE) csatornabecslést alkalmaz.

A IV. Téziscsoporthoz két tézis tartozik:

- Az első altézisben a szerző a Meijer G-függvény felhasználásával zárt formulát ad az LS csatornabecslést alkalmazó rendszer $\bar{S}_{LS}$ átlagos lehetséges spektrális hatékonyságára.
- A második altézisben ugyanezt a feladatot oldja meg MMSE csatornabecslés esetén.

Megjegyzendő, hogy a tézisekben megadott spektrális hatékonyság csak a Shannon féle kapacitás közelében lenne elérhető, azaz csak aszimptotikusan közelíthető meg. Sőt tudjuk azt is, hogy az $E_b/N_0 \rightarrow \ln(2)$ esetén ugyan elérhető az abszolút Shannon korlát, de ebben az esetben a spektrális hatékonyság nullához tart, ahol E_b az egy bithez tartozó átlagos energia. Ez arra utal, hogy a korlátozott teljesítmény mellett a csatorna kapacitását csak a sáv szélesség növelésével lehet növelni, ami az effektív spektrális hatékonyságot értelemszerűen csökkenti.

A téziseket új tudományos eredményként elfogadom. Az eredmények különösen fontosak a legkorszerűbb vezeték nélküli kommunikációs rendszerekben, ahol a spektrális hatékonyság növelése alapvető cél. A jelölt ezekkel az eredményekkel, magas szinten járult hozzá a szakterület fejlődéséhez. Egyetlen elütés jellegű hibára bukkantam ebben a fejezetben: a (9.4) egyenlet után a $q = c(1 - c/r)$, kifejezés értelmezhetetlen egy második zárójel nélkül (ez a hiba a téziszfüzetben is fellelhető).

Kérdések a IV. Téziscsoporttal kapcsolatban:

- A tézisekben értelmezett spektrális hatékonyság hogyan használható tényleges diszkrét értékkészletű modulációs rendszerek esetén, ahol a csatorna kapacitás a jel-zaj viszony függvényében monoton nő, de a növekedés határozottan korlátozott, mert a kapacitás aszimptotikusan egy határozott értékhez tart, amit a diszkrét értékkészlet számossága határoz meg?
- A tézisekben kiszámolt spektrális hatékonyság – az eredmények vitathatatlan elméleti jelentőségén túl – milyen feltételek mellett alkalmazható a gyakorlati rendszerek minősítésére?

Az 7. fejezetben a szerző olyan sokfelhasználós MIMO rendszereket vizsgál, ahol a felhasználók a rendelkezésre álló erőforrásokat pilot- és adatjelek között osztják meg, és a vizsgált teljesítményjellemzők: az adatszimbólumok négyzetes hibája (MSE) és a spektrális hatékonyság, és ahol az MS-BS irányú csatornák korreláltak. A vizsgálatban a kovariancia mátrixok szinguláris transzformációját alkalmazva a problémákat a szerző visszavezeti olyan $\{\omega_i\}$ változóvektor kezelésére, amelynek a kovarianciamátrixa diagonális, és ennek felhasználásával zárt formulákat ad a fent említett teljesítményjellemzőkre.

Az V. Téziscsoporthoz három tézis tartozik:

- Az első altézisben a szerző a feladatot általános esetben oldja meg, feltételezve, hogy $|\omega_i|^2$ exponenciális eloszlású, $\lambda_i = 1/\xi_i^2$ paraméterű valószínűségi változó.
- A második altézisben az előbbi megoldás egy speciális esetét vizsgálja, amikor minden nem zérus értékű $\lambda_i = 1/\xi_i^2$ különbözik egymástól.
- A harmadik altézisben a szerző a feladatot egy igen speciális esetben oldja meg a standard exponenciális integrálfüggvény és a Meijer féle G-függvény felhasználásával.

4. Az eredmények felhasználása

A disszertáció 8. fejezetében a szerző részletesen foglalkozik az eredmények alkalmazási területeivel. Az eredményeket szabadalmak is védik és több nemzetközi kutatási projektbe is felhasználták. Ezek közül is kiemelkedik az uniós METIS projekt, melynek fő célja az 5G mobil rendszerek technológiájának a kutatása és a szabványosítás előkészítése. Ezen kívül a disszertáció tézisei igen fontos szerepet játszanak az Ericsson cég szimulációs szoftver csomagjaiban és a cég által a 3GPP-hez benyújtott szabványosítási javaslatokban.

Ezek mellett a szerző új kutatási területeket is kijelölt a jövőbeli tudományos vizsgálatok számára.

5. Összefoglalás és javaslat

- A disszertációban tárgyalt témák fontosak és időszerűek a mobil kommunikációs rendszerek következő generációjának fejlesztése és szabványosítása szempontjából.
- A disszertáció eredményei tudományos értelemben erősek, néhány eredmény jelentősége kiemelkedő.
- A disszertáció minden tézise úttörő munka, és a teljes anyag hozzájárulást jelent a terület fejlődéséhez.
- A disszertációban alkalmazott matematikai módszerek kiemelkedően színvonalasak, elsősorban a mátrixalgebra, a valószínűség számítás és a speciális függvények felhasználása területén.
- A disszertáció felépítése jó, a benne alkalmazott matematikai módszerek példamutatóan színvonalasak, és jól szolgálják a szerző által kitűzött komplex és nehéz feladatok megoldását.
- A disszertáció nyelve korrekt, elütési hiba szinte nincsen benne.
- A szerző a disszertáció téziseit színvonalas nemzetközi folyóiratokban publikálta.
- **A téziseket változtatások nélkül új tudományos eredményeknek fogadom el.**
- **Ezek alapján javaslom a disszertáció elfogadását és az MTA Doktora cím odaítélését.**

Budapest, 2018. 09. 30.

Pap László
Az MTA rendes tagja