



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

PhD. téziszfüzet

Komplex átviteli csatornák becslése

Szerző:

Csuka Barna

Villamosmérnök M.Sc.

Témavezető:

Dr. Kollár Zsolt

Docens

Budapest

2021

Jogtulajdonos: © Csuka Barna, 2021

Minden jog fenntartva. Jelen tézis vagy tézisfüzet egyetlen egy része sem használható fel a szerző írásos engedélye nélkül.

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék*

H-1117 Budapest XI., Magyar Tudósok körútja 2., I épület

E-mail: csuka{at}mit.bme.hu

1 Előzmények és célkitűzések

Manapság, a 21. század első felében a villamosmérnöki tudományok egyik legjobban kutatott témája az elektromágneses hullámokon alapuló vezeték nélküli kommunikáció. Eleinte a 20. század során hangátvitelre használták ezen hullámokat, ami később képátvitellel egészült ki. Az ezredforduló óta exponenciálisan fejlődik a telekommunikáció, és jelenleg ugyan még csak az ötödik generációs technológiai szabványt (5G) vezetik be, de már a hatodik generációt (6G) is vizionálják és tervezik. Az 5G hálózatok 10-szer több készüléket tudnak kiszolgálni az előző, negyedik generációhoz (4G) képest, ezért azáltal, hogy szenzorokat, autókat háztartási gépeket is tudunk már a hálózatra csatlakoztatni, lehetővé vált az Internet of Things (IoT) koncepció kialakítása. Továbbá a csatlakoztatott szenzorok nagy száma és az általuk használt biztonsági eljárások lehetővé tették azt is, hogy biztonságkritikus helyeken is alkalmazzunk ilyen hálózatokat, mint pl. az egészségügyben, vagy az iparban.

Azonban sajnos a vezeték nélküli átvitel kevésbé robosztus a vezetékeshez képest. Utóbbi esetben, amennyiben az összeköttetés nem sérül, általában csak a beszűrődő zajt kell figyelembe venni. Ezzel szemben, ha vezeték nélküli az összeköttetés, további torzítások jelennek meg, mint pl. a többutas jelterjedés. Ez a következő módon modellezhető: az adó és a vevő között több átviteli út van: egy direkt és több indirekt. Ezeknek a hosszuk eltérő lehet, így a késleltetésük is eltérő, ami időbeli eltérést okozhat a beérkező hullámok között a vevő oldalán. Ezen felül az utak csillapítása is eltérő lehet, így különböző jelerősség mérhető a vevőnél. Ez a jelenség a csatorna impulzusválaszával írható le, ahol az együtthatók amplitúdói a jelerősséggel, míg a fázisai a késleltetéssel arányosak.

Ezen körülmények figyelembe vétele miatt az átviteli csatornát meg kell határoznunk, hogy a fellépő hatásokat ki tudjuk küszöbölni, amihez rendszeridentifikációt kell végeznünk. A megfigyelt rendszert egy jellel gerjesztjük, ami általában zaj vagy véletlen fázisú szinuszok kompozíciója szokott lenni (ún. multiszinusz). E jelek használatával és a rendszer válaszána mérésével a rendszer frekvenciaválasza becsülhetővé válik. Egy másik megközelítés az időtartománybeli becslés: ebben az esetben a megfelelő vizsgálójelet alkalmazva megfigyelhető a rendszer impulzusválasza. Amennyiben egy vezeték nélküli csatorna átvitelét kell azonosítani, akkor ezek a konvencionális módszerek nem alkalmazhatóak, mivel az adó és a vevő között akár több ezer kilométeres távolság is lehet, így a gerjesztő- és a vett jel nem figyelhető meg egyszerre. Így a vevőnek ismernie kell a kibocsátott jelet, hogy annak alapján csatornabecslést tudjon végezni. Mivel a korábban említett jelek paraméterei véletlenszerűek, olyan szekvenciákat kell sugározni, amelyek hasonlóak a korábban leírtakhoz. Ugyan ezek a szekvenciák kvázi véletlen jelnek tűnnek, de egy előre definiált sémát követnek, így a vevő is ismeri őket, ezáltal a csatornabecslés elvégezhető.

A tézisemben a csatornabecslésnek a következő két aspektusát vizsgáltam: először a Golay-szekvenciákat mutattam be és elemeztem [1], majd pedig egy csatornabecslési eljárásokat ismertettem részletesen: a Wiener-szűrő csúszóablakos kiértékelését, ami Kraker megoldásán alapszik [2, 3].

1.1 Golay-szekvenciákon alapuló csatornabecslés

Ha adott az N hosszúságú $\mathcal{G}_A[n] = (\mathcal{G}_A[0], \mathcal{G}_A[1], \dots, \mathcal{G}_A[N-1])$ szekvencia, akkor a nem periódikus autokorrelációs függvénye az alábbi módon írható fel:

$$\mathcal{R}_A[n] = \sum_{i=0}^{N-1-n} \mathcal{G}_A[i] \cdot \mathcal{G}_A[i+n] = \mathcal{G}_A[n] * \mathcal{G}_A[n]. \quad (1)$$

Amennyiben (1)-hez hasonlóan definiáljuk a \mathcal{G}_B szekvenciát is, akkor \mathcal{G}_A és \mathcal{G}_B komplementis Golay-szekvencia, ha:

$$\mathcal{R}_A[n] + \mathcal{R}_B[n] = \begin{cases} 2N & n = 0 \text{ esetben,} \\ 0 & 0 < n < N \text{ esetben.} \end{cases} \quad (2)$$

Legyen $h_{\text{ch}}[n]$ az átviteli csatorna impulzusválasza, továbbá $x_{\text{tr}}[n]$ egy diszkrét jel. Ebben az esetben a vett jel a következő lesz:

$$x_{\text{rec}}[n] = h_{\text{ch}}[n] * x_{\text{tr}}[n]. \quad (3)$$

Ahhoz, hogy a vevő a kiküldött adatokat helyesen kapja meg, az impulzusválasz hatásait meg kell becsülni és kompenzálni kell. Tegyük fel, hogy az átvitel zajmentes, és az x_{tr} kiadott jel egy \mathcal{G}_A szekvencia. Ekkor az x_{rec} vett jel a (3) alapján az alábbi módon fejezhető ki:

$$x_{\text{rec}}[n] = h_{\text{ch}}[n] * \mathcal{G}_A[n]. \quad (4)$$

Ha ezt a jelet egy Golay-szűrővel korreláltatjuk (1) [4, 5], és utána hozzáadjuk a soron következő $x_{\text{rec}}[n]$ -hez, amikor \mathcal{G}_B lett küldve, a következő eredményt kapjuk:

$$y[n] = h_{\text{ch}}[n] * (\mathcal{G}_A[n] * \mathcal{G}_A[n] + \mathcal{G}_B[n] * \mathcal{G}_B[n]) = h_{\text{ch}}[n] * (\mathcal{R}_A[n] + \mathcal{R}_B[n]) \quad (5)$$

ahol $y[n]$ a szűrő kimenetét jelöli. Helyettesítsük (2)-t (5)-be, ekkor a csatorna impulzusválasza a következő lesz:

$$h_{\text{ch}}[n] = \frac{y[n]}{2N}. \quad (6)$$

Az időtartománybeli megközelítés mellett megmutattam azt is, hogy ez a becslés frekvenciatartományban is elvégezhető a csatorna frekvenciaválaszának kiértékelésével. Ehhez a számításhoz hosszabb szekvenciákat (\mathcal{G}_U és \mathcal{G}_V) alkalmaztam az IEEE 802.11ad szabvány [6] alapján. \mathcal{G}_U alkalmazásával (4) a következő módon általánosíthatjuk:

$$x_{U,\text{rec}}[n] = h_{\text{ch}}[n] * \mathcal{G}_U[n]. \quad (7)$$

Ha a (7)-t Fourier-transzformáljuk, akkor átrendezés után a következőt kapjuk:

$$H_{\text{ch}}[m] = \frac{X_{U,\text{rec}}[m]}{\mathcal{G}_U^{\text{DFT}}[m]}. \quad (8)$$

Miután ezeket a számításokat a \mathcal{G}_V szekvenciára is elvégeztük (7) ill. (8) alapján, az látható, hogy máris két becslés adott a csatorna $H_{ch}[m]$ frekvenciaválaszára, melyek átlagolhatóak. Ez a becslés egy kedvező megoldás, mivel a Fourier-transzformáció alapvetően szükséges a moduláció miatt (pl. OFDM-átvitel), így ez az egység már adott egy vevőben, míg a Golay-szűrő egy olyan extra modul lenne, amelyet másra nem használunk.

A frekvenciatartománybeli becslés további előnye, hogy hasonlóan a csatornabecsléshez, a kompenzáció is elvégezhető mindkét tartományban. Az időtartománybeli kompenzáció a (3)-ban bemutatott konvolúció inverze, a dekonvolúció. Tekintve, hogy ez a művelet instabil lehet, és jelenleg még nyitott kérdés, hogy hogyan lehet stabilizálni, ezért a kompenzációt frekvenciatartományban célszerű elvégezni.

1.2 Wiener-szűrő hatékony kiértékelése

Az adaptív szűrés alapötlete a következő: hangoljuk a szűrő $\mathbf{h}[n]$ együtthatóit, így az $\mathbf{y}[n]$ kimeneti jel és a referenciajel közötti hiba minimalizálható. Ez a szűrő egy lineáris és időinvariáns szűrővel modellezhető, amelynek egy K elemű, véges hosszúságú impulzusválasza van. Végeredményben $\mathbf{X}[n]$ bemenet esetén az adaptív szűrő kimenete az alábbi formában írható fel mátrixos alakban, ha egy N elemet tartalmazó megfigyelési ablakot használunk:

$$\mathbf{y}[n] = \mathbf{X}[n] \mathbf{h}[n]. \quad (9)$$

A $\mathbf{h}[n]$ szűrőegyütthatók $\hat{\mathbf{h}}_{\text{opt}}[n]$ optimális beállítása megadható a legkisebb négyzetek módszerével az alábbi számítással, amit Wiener-Hopf egyenletként ismerünk [7]:

$$\hat{\mathbf{h}}_{\text{opt}}[n] = \mathbf{R}^{-1}[n] \mathbf{p}[n] \quad (10)$$

ahol $\mathbf{R}[n]$ a bemeneti jel autokorrelációs mátrixa, míg $\mathbf{p}[n]$ a be- és a kimeneti jel keresztkorrelációs vektora.

A csúszóablakos kiértékelés egy hatékony algoritmuson alapszik, amellyel a frissített autokorrelációs mátrix inverze, az $\mathbf{R}^{-1}[n+1]$ kiszámolható. Ezt a megoldást először Kraker ismertette. Az \mathbf{R} autokorrelációs mátrix és az \mathbf{R}^{-1} inverzének az almátrixaira alkalmazott jelöléseket az 1. ábra mutatja. Ezeket felhasználva az alábbi módon írható fel az autokorrelációs mátrix inverze [2]:

$$\mathbf{R}^{-1}[n+1] = \begin{pmatrix} b_{11,r}^{-1} & -b_{11,r}^{-1} \mathbf{b}_{21}^T \mathbf{B}_{22}^{-1} \\ -\mathbf{B}_{22}^{-1} \mathbf{b}_{21} b_{11,r}^{-1} & \mathbf{B}_{22}^{-1} + \mathbf{B}_{22}^{-1} \mathbf{b}_{21} b_{11,r}^{-1} \mathbf{b}_{12}^T \mathbf{B}_{22}^{-1} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Eredetileg a klasszikus Gauss–Jordan-eliminációt használták az inverzióhoz, amelynek $\mathcal{O}(K^3)$ a komplexitása. Jelenleg a Coppersmith–Winograd-algoritmus – és annak némileg optimalizált változatai – nyújtják a legkisebb $\mathcal{O}(K^{2.376})$ komplexitású módszert egy $K \times K$ mátrix invertálására. Ezzel szemben, miután le lett vezetve, a csúszóablakos kiértékelés komplexitása mindössze négyzetesen aránylik K -hoz, így $\mathcal{O}(K^2)$ komplexitás érhető elő. Továbbá a tényleges számítási igény még tovább csökkenthető, ha kihasználjuk azt, hogy egy autokorrelációs mátrix szimmetrikus, ezért elégséges, ha a számításokat csupán a mátrix felére nézve végezzük el.

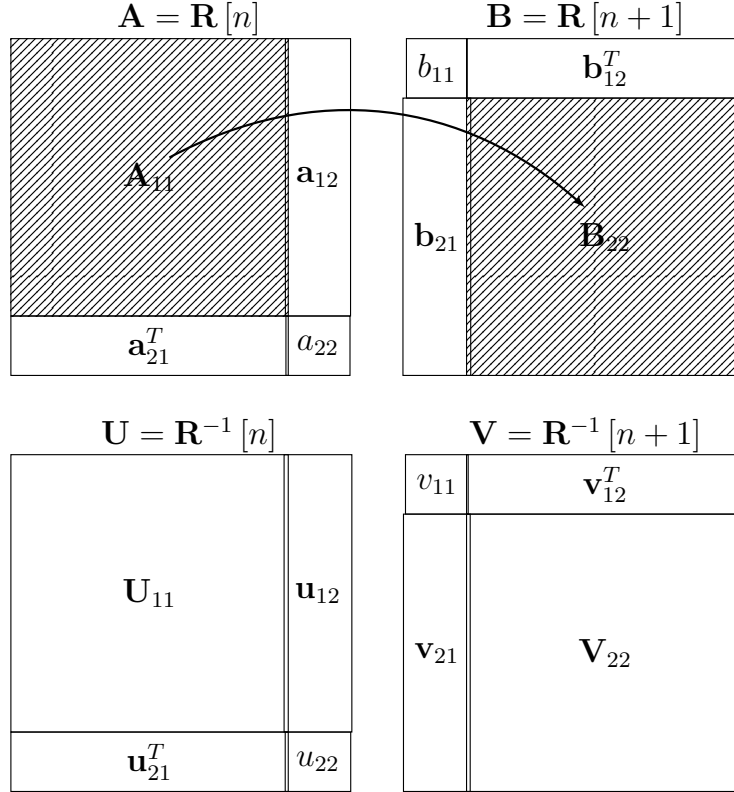


Figure 1: \mathbf{R} autokorrelációs mátrix és \mathbf{R}^{-1} inverzének struktúrája

1.3 Komplex értékű identifikációs eljárások

Manapság az IQ-modulációk jelentősége egyre növekszik, mivel magasabb átviteli sebességet és nagyobb spektrális hatékonyságot kínálnak. Amennyiben adott két, egymástól független jelforrás, akkor ezek egy jellé adhatóak össze koszinuszos és szinuszos vívőhullámok alkalmazásával. Ha a jelforrásokat úgy tekintjük, mint egy komplex számnak a valós ill. képzetes része, akkor ez a modell felírható és felhasználható komplex értékű aritmetikai egységek felhasználásával. Épp ezért a tézisemben megmutattam, hogy a klasszikus csatornabecslési eljárások hogyan terjeszthetők ki a komplex jelek esetére is.

Ezen kibővített algoritmuson alkalmazása esetén a számítási idő kritikussá válik, ugyanis a komplex számításokat vissza kell vezetni valósakra, ami megnöveli a futásidőt. Ezért az algoritmusok komplexitását is megvizsgáltam, és megmutattam, hogy a növekedés ellenére még a valós számításokkal azonos nagyságrendű lesz a komplexitásuk.

2 Vizsgálati módszerek

Kutatásom legfőbb célja az volt, hogy megvizsgáljam és implementáljam azokat az eljárásokat, amelyeket az előző fejezetben ismertettem; továbbá, hogy összevegyem őket további jelfeldolgozási eljárásokkal, amelyek ezekhez a módszerekhez kapcsolódnak, ezeknek az alternatívái lehetnek.

2.1 Szimulációs környezet

A kutatási éveim alatt egy szoftvercsomagot írtam MATLABban, ami egy szimulációs környezetet tartalmaz mindazon algoritmusok vizsgálatára, melyeket a disszertációmban használtam (vagy legalább megemlítettem). A program különböző modulokból áll, és egy átviteli lánc teljes működését bemutatja kezdve az adatgenerálástól egészen a vevőoldali adatfeldolgozásig. Összehasonlítva a küldött és a fogadott adatokat ill. jeleket különböző minőségi mérőszámok határozhatóak meg. A szoftverem funkcionalitása három fő részre bontható:

- Implementáltam az IEEE 802.11ad szabvány egyvívós átviteli módját, hogy megvizsgáljam a Golay-szekvenciákat. A modulban egy adó, egy átviteli csatorna szimulátor és egy vevő található.
- Egy adaptív szűrőt készítő modult is írtam, amely a Wiener-Hopf egyenleten alapul. Itt mind a konvencionális, mind pedig a csúszóablakos eljárásokat elkészítettem.
- Végül pedig – habár nem került említésre a disszertációmban – további kutatási célokra egy kvantálási modult készítettem, hogy a különböző, kis felbontású architektúrák viselkedését vizsgálni tudjam. Ezzel kideríthető, hogy hogyan működnek a különböző algoritmusok, ha korlátozott a numerikus pontosság.

3 Új tudományos eredmények - Tézisek

I. tézis: Golay-szekvenciákon alapuló csatornabecslési algoritmusok kiterjesztése

Megvizsgáltam a Golay-szekvenciákat, melyek olyan speciális szekvenciák, amiket adatátviteli rendszerekben csatornabecslésre lehet alkalmazni. Bebizonyítottam, hogy az eredeti időtartománybeli megoldás komplex értékű csatornák esetén is alkalmazható a Golay-szűrő együtthatóinak módosítása után. Továbbá megmutattam, hogy ez a megközelítés kiterjeszthető négy blokkra is abban az esetben, ha az IEEE 802.11ad szabvány csatornabecslési mezőjét alkalmazzuk. Új eljárásként bemutattam egy frekvenciatartománybeli csatornabecslési eljárást a Fourier-transzformáció alkalmazásával. Végül azt is megmutattam, hogy ez a javasolt módszer hasonló bithiba-arányt ér el, mint a konvencionális, időtartománybeli megoldás, amennyiben folytonos átvitelt alkalmazunk.

I-1. altézis: Meghatároztam a Golay-szűrő komplex értékű együtthatóit, hogy az időtartománybeli becslés IQ-jelekre is elvégezhető legyen.

I-2. altézis: Megmutattam, hogy a 802.11ad szabvány alapján végzett csatornabecslés során négy párból is számolható átlag, amennyiben a csatorna impulzusválasza rövidebb az alkalmazott Golay-szekvenciáknál.

I-3. altézis: Bevezettem a frekvenciatartománybeli csatornabecslést. Megmutattam, hogy folytonos átvitel esetén ugyanolyan teljesítményt lehet vele elérni, mint az időtartománybeli becsléssel.

(Bővebben a disszertációban: 2.3.2. fejezet, 2.3.3. fejezet és 2.4. fejezet)

A tézishez tartozó publikációk: J1, J2, C1, C2, C3, C4.

II. tézis: RSC4BI-algoritmus optimalizálása

Megvizsgáltam az A. Kraker által bemutatott, a korrelációs mátrix blokkonkénti invertálására szolgáló rekurzív algoritmust (RSC4BI), amellyel a Wiener-Hopf egyenlet csúszóablakos módon kiértékelhető. Bebizonyítottam, hogy az új módszernek alacsonyabb a számításgénye, mint a konvencionális eljárásoknak, ezért ez egy célszerű megoldás a csúszóablakos Wiener-szűrő használata során. Levezettem és összehasonlítottam az RSC4BI két számítási módszerét: a diadikus szorzaton és a permutáción alapulót. Továbbá a felére redukáltam az eljárás komplexitását kihasználva azt, hogy a bemeneti mátrix mindig szimmetrikus, ebből fakadóan elég csupán a főátló feletti háromszög-részt használni a számítások során.

II-1. altézis: Meghatároztam, hogy melyik számítási eljárással – a diadikussal vagy a permutációssal – célszerűbb az autokorrelációs mátrix és a keresztkorrelációs vektor frissítése a Wiener-Hopf egyenlet kiértékelése során. A kedvező algoritmus a szűrő hosszától (K) és a csúszóablak méretétől (N) függ.

II-2. altézis: Bebizonyítottam, hogy az RSC4BI-algoritmus számítási komplexitása $\mathcal{O}(K^2)$, míg a konvencionális invertálás legalább $\mathcal{O}(K^{2,37286})$ műveletet igényel. A javasolt eljárást implementáltam, verifikáltam és összehasonlítottam a teljesítményét a konvencionális megoldásokkal MATLABban illetve beágyazott mikrovezérlőn.

II-3. altézis: Fejlesztettem az RSC4BI-algoritmust, és megmutattam, hogy a számítások során elég a felső háromszög-részt használni, mert a bemeneti mátrix szimmetrikus. Továbbá ismertettem egy jobb eljárást, amely a számítások során újrahasznosítja a már kiszámolt eredményeket így csökkentvén a szükséges számítások számát.

(Bővebben a disszertációban: 3.3. fejezet és 3.4. fejezet)

A tézishez tartozó publikációk: J3.

III. tézis: RSC4BI-algoritmus kiterjesztése komplex jelekre

Általánosítottam A. Kraker RSC4BI-algoritmusát, hogy akkor is előálljanak a Wiener-szűrő együtthatói, ha komplex jeleket alkalmazunk. Tekintve, hogy egy autokorrelációs mátrix és az inverze mindig hermitikus, az autokorrelációs mátrix inverzének a főátlójának elemeiből a számítás utolsó lépéseként eltávolítottam a képzetes részt. Ez a lépés stabilizálja az algoritmust, és kivédi azt, hogy a képzetes rész kerekítési hibája akkumulálódjon. Ezenfelül megvizsgáltam ennek a bővített algoritmusnak a komplexitását. Megmutattam, hogy továbbra is négyzetesen arányos a szűrő hosszával, azonban a valóshoz képest 3-5-ször nagyobb a műveletigény, mivel a komplex számok összeadása és szorzása további számításokat igényel.

III-1. altézis: Kibővítettem A. Kraker algoritmusát komplex jelekre, hogy az autokorrelációs mátrix invertálása továbbra is kiértékelhető legyen csúszóablakos formában. Megmutattam, hogy az autokorrelációs mátrix inverzében a főátló elemei nem tisztán valósak az algoritmus kerekítési hibája miatt, ezért a képzetes részt el kell távolítani, hogy stabilizálódjon az eljárás.

III-2. altézis: Bebizonyítottam, hogy az algoritmus komplexitása továbbra is négyzetesen arányos a szűrő hosszával, amennyiben komplex jeleket alkalmazunk, azonban a valós esethez képest 3-5-ször nagyobb lesz a tényleges műveletigény.

(Bővebben a disszertációban: 4.2. fejezet és 4.3. fejezet)

4 Eredmények alkalmazása és kitekintés

A Golay-szekvenciák alkalmazása különböző paraméterbecslési célokra nagyon előnyös 3G illetve 4G rendszerek esetén; továbbá ígéretes megoldás lehet az 5G és a 6G hálózatok esetén is. Egy koncepció kidolgozása során a következő szempontokat érdemes figyelembe venni, ha Golay-szekvenciákat alkalmazunk: egyszerű generálás, kiváló auto- és keresztkorrelációs tulajdonságokat, idő- ill. frekvenciatartománybeli feldolgozás, időben elosztott algoritmusok alkalmazhatósága. A Golay-szekvenciákon alapuló csatornabecslési eljárások mind idő-, mind pedig frekvenciatartományban elvégezhetőek, továbbá a bemeneti jelet nem kell valós értékre korlátozni, mivel komplex adatok is jól kezelhetőek. Amennyiben Fourier-transzformációt használunk, akkor ki tudjuk használni a már adott egységeket, nincs szükség további aritmetikai egységek alkalmazására, mint az időtartománybeli esetben.

Feltéve, hogy az átviteli csatorna egy FIR-szűrővel modellezhető, az impulzusválasz Wiener-Hopf egyenlettel is becsülhető. A megoldáshoz az autokorrelációs mátrixot kell invertálni, ami egy kritikus lépés a feldolgozás során. Folytonos kiértékelés esetén alkalmazható Kraker metódusa, az RSC4BI-algoritmus, ami a csúszóablakos kiértékelés során hatékonyan, mindössze $\mathcal{O}(K^2)$ megadja a mátrix inverzét. Miután kiterjesztettem az eljárást komplex jelek kezelésére is, a módszer akkor is egy hatékony alternatíva lehet, ha IQ-átvitelt alkalmazunk.

A disszertációban bemutatott kutatások nem teljesek, egy fő kérdést nem vizsgáltam: a kvantálás hatását. Tekintve, hogy az eszközeink szinte mindig digitálisak, a bejövő jeleket egy ADC-vel digitalizálni kell, emiatt a felbontástól függően csak egy adott értékkészlete lehet a jelnek. A ma elérhető ADC-k esetén a felbontás fordítottan arányos a konvertálási idővel, emiatt nagy frekvenciás jeleket csupán 8, 10 bites felbontással tudunk digitalizálni. Így fontossá válik a kérdés, hogy az algoritmusok mennyire immúnisak a kvantálási hibára. Ha ez a tolerancia elég nagy, akkor a bitek számát csökkenthetjük mindaddig, amíg egy optimális értéket el nem érünk. Ez a csökkentett felbontás teszi lehetővé, hogy miközben növeljük a konvertálási sebességet, csökkenteni tudjuk a felbontást, így csökkentve a szükséges ADC árát.

5 PhD. disszertációhoz kötődő publikációk

5.1 Folyóiratcikkek

- J1 B. Csuka and Zs. Kollár. Software and Hardware Solutions for Channel Estimation based on Cyclic Golay Sequences. *Radioengineering*, 25(4):801–807, December 2016. Impact factor: 0.944
- J2 B. Csuka and Zs. Kollár. R-DFT-based Parameter Estimation for WiGig. *Periodica Polytechnica - Electrical Engineering and Computer Science*, 61(2):224–230, May 2017
- J3 A. Kraker, B. Csuka, and Zs. Kollár. Sliding Window Evaluation of the Wiener-Hopf Equation. *Radioengineering*, 29(2):365–375, June 2020. Impact factor: 1.077

5.2 Konferenciatickek

- C1 B. Csuka and Zs. Kollár. R-DFT-based Channel Estimation in 802.11ad Systems (Original title in Hungarian: R-DFT alapú csatornabecslés a 802.11ad rendszerekben). In *Mesterpróba 2015*, pages 8–14, 2015
- C2 B. Csuka and Zs. Kollár. Parameter Estimation in 802.11ad Systems (Original title in Hungarian: Paraméterbecslés 802.11ad rendszerekben). In *HTE MediaNet 2015 Konferencia szemle: Diákszekció*, pages 8–14, 2015
- C3 B. Csuka, I. Kollár, Zs. Kollár, and M. Kovács. Comparison of Signal Processing Methods for Calculating Point-by-point Discrete Fourier Transforms. In *26th International Conference Radioelektronika*, pages 52–55, 2017
- C4 M. Kovács, B. Csuka, and Zs. Kollár. Effects of Quantization on Golay Sequence based Channel Estimation. In *27th International Conference Radioelektronika*, pages 52–55, 2017

Hivatkozások

- [1] M. J. E. Golay. Complementary series. *IRE Transactions on Information Theory*, 7(2):82–87, April 1961
- [2] A. Kraker. Separation of the correlation matrix of the input signal into four blocks to evaluate inversion recursively for optimised adaption of filter coefficients generated by the Wiener-Hopf equation; 'Rsc4bi-algorithm' (Original title in German: Rekursive Aufteilung der Eingangssignal-Korrelationsmatrix in vier Blöcke zum Zweck rekursiver Inversion als Verfahren zur optimalen Adaption eines Filters nach der Wiener-Hopfgleichung; 'Rsc4bi-Algorithmus'), 2006. Siemens Internal Research Report
- [3] A. Kraker, B. Csuka, and Zs. Kollár. Sliding Window Evaluation of the Wiener-Hopf Equation. *Radioengineering*, 29(2):365–375, June 2020. Impact factor: 1.077
- [4] S. Z. Budišin. Efficient pulse compressor for Golay complementary sequences. *Electronics Letters*, 27(3):219–220, 1991
- [5] P. G. Donato, M. A. Funes, M. N. Hadad, and D. O. Carrica. Optimised Golay correlator. *Electronics Letters*, 45(7):380–381, March 2009
- [6] IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems Local and Metropolitan Area Networks – Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications – Amendment 3: Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band. *IEEE Std 802.11ad-2012 (Amendment to IEEE Std 802.11-2012, as amended by IEEE Std 802.11ae-2012 and IEEE Std 802.11aa-2012)*, March 2012
- [7] C. H. Lee and L. H. Lai. Retrieval of 3D Trademark Based on Discrete Fourier Transform. In *Lecture Notes in Electrical Engineering*, pages 620–627, 2018
- [8] O. Turovsky. Estimates of the Carrier Frequency of the Signal received by the Satellite Communication system in Package mode. In *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, pages 3223–3228, 2020