



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS
GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

HÁLÓZATI RENDSZEREK ÉS SZOLGÁLTATÁSOK TANSZÉK

Szélessávú illesztések hatékonyságának
javítása és látható fény alapú rendszerek
vizsgálata

Tézisfüzet

Szerző:

Matolcsy Balázs

Villamosmérnök M. Sc.

Társtémavezető:

Gerhátné Dr. Udvary Eszter Ph. D.

egyetemi docens

Társtémavezető:

Dr. Zólogy Attila Imre Ph. D.

c. egyetemi docens

Budapest, 2021

Tézisek és a tézisekhez kapcsolódó publikációk összefoglalása

I. tézis - Az analitikus szélessávú illesztési módszerek vizsgálata és nehézségeinek kiküszöbölése algoritmikus megközelítéssel

Bevezetés

Az analitikus szélessávú illesztési módszerek közül a H. W. Bode és R. M. Fano által kidolgozott szintézis feladat megoldásaként egy alul-áteresztő típusú prototípus illesztő hálózat adódik. Mivel az illesztési feladatok túlnyomórészt sáváteresztő jellegű hálózatok szintézisével foglalkoznak, így az alul-áteresztő prototípus sáváteresztő transzformációjára van szükség. Ezen a ponton az illesztőhálózat tervezőjének két lehetősége adódik a hálózat fizikai megvalósításának tekintetében: koncentrált paraméteres elemekből felépített vagy elosztott paraméterű (tápvonalas) hálózati realizáció. Elosztott paraméterű hálózati realizációk közül az illesztendő impedancia jellegének alapján választhatjuk a párhuzamos tápvonalcsontos illesztési megoldást, vagy a csatolt-vonalas realizációt. Koncentrált paraméterű elemekből felépített hálózatok esetén a hálózatot alkotó reaktáns elemeket párhuzamos, vagy sorba kapcsolt L-C elemekkel szükséges helyettesíteni. Elosztott paraméterű elemekkel megvalósított hálózatokban általában a sáváteresztő hálózatok szintéziséhez impedancia, vagy admittancia invertereket kell alkalmaznunk. Az impedancia és admittancia inverterek azért szükségesek, mert Bode és Fano által kidolgozott illesztési eljárás során a generátor impedanciája előírt és nem az eredeti feladat kiírásának megfelelő. Ezen inverterek megoldják a sáváteresztő transzformációt és egyszersmind a generátor impedanciájának szabad megválasztásának problémáját is. Az inverter szintézis feladatok megoldásának folyamán fény derült egy olyan problémára, amit eddig

a szakirodalom hallgatólagosan elkönyvelt, ez pedig a realizálhatóság kérdése és ennek feltételei, ebben a konkrét illesztési megoldásban. Észrevettem, hogy bizonyos bemeneti inverterparaméterek esetén a végső sáváteresztő hálózat nem eredményez realizálható illesztőhálózatot. Ez a probléma felmerül mind az impedancia, mind az admittancia inverter szintézis esetében. A célom az volt, hogy felkutassam, hogy milyen bemeneti paraméterek esetén kapunk nem realizálható hálózatot, majd ezeket az eredményeket felhasználva adjak egy olyan bemeneti paraméter restriktós szabályrendszert, amit alkalmazva mindig realizálható hálózatot kapunk eredményül. Ezt a szabályrendszert felhasználva lehetőség nyílik egy algoritmikus hálózatkeresési megoldásra is, amely mindössze néhány bemeneti paraméter megadásával képes szolgáltatni egy olyan hálózatot, ami realizálható és megfelel az előírásoknak. Egy ilyen algoritmus implementációját részletesen ismertetem a doktori értekezésemben. A javasolt illesztést megvalósító algoritmus nagymértékben segíti az illesztési feladat hatékony megoldását, ahelyett, hogy kézzel kellene egyenként valamennyi megoldást megvizsgálni, mind illesztési minőség, mind realizálhatósági szempontból.

I/1. altézis - Feltételek az admittancia inverter alapú illesztőhálózatok sikeres realizációjára, rövidre-zárt tápvonalcsonkos illesztőhálózatok esetén

Admittancia inverteres illesztőhálózat szintézist olyan esetekben alkalmazunk, ahol az illesztendő soros R-L-C-ként modellezett lezárást egy előre megszabott frekvenciasávon illesztjük egy tisztán valós bemeneti impedanciájú forráshoz. Ahhoz, hogy mindig realizálható illesztőhálózatot kapjunk eredményül (nem komplex, és nem negatív impedancia értékek), szükséges betartani azokat a paraméter restriktiókat, amelyeket részletesen bemutattam a disszertációban. Elsőként, ha a d paraméterre igaz, hogy: $d > \frac{\delta}{2}$, akkor ebben az esetben biztos, hogy valamennyi illesztőhálózati impedancia érték pozitív és tisztán valós lesz [4, 5, 1]. Ahhoz, hogy a negatív impedancia értékeket is elkerüljük, a következőknek kell teljesülni.

1. Amennyiben $Y_{2,3}$ tisztán valós, $Y_{2,3} > 0$ minden további feltétel nélkül.
2. Amennyiben $d_p < 1$, ekkor $Y_2 > 0$ minden további feltétel nélkül. Azonban, ha $d_p > 1$ akkor $Y_2 > 0$ akkor és csak akkor, ha a szükséges feltétel teljesül, ami:

$$U < \frac{U}{2d_p} + 2 \frac{(d_p - 1)}{d_p} J_{2,3}. \quad (1)$$

3. $Y_3 > 0$ elégséges feltétele a következő:

$$d_p \frac{\delta}{k_{1,2}^2} < \frac{R_L}{\delta D R_g}. \quad (2)$$

I/2. altézis - Feltételek az impedancia inverter alapú illesztőhálózatok sikeres realizációjára, csatolt-tápvonalcsonkos illesztőhálózatok esetén

Párhuzamosan kapcsolt R-L-C hálózattal modellezhető lezárások esetén impedancia inverterek használata szükséges az illesztőhálózatban, ahhoz, hogy tisztán valós forrásimpedanciához sikeresen illesszük a lezárást. Ebben az esetben is elő kell írni azokat a paraméter restriktiókat, amelyek megakadályozzák a nem realizálható illesztőhálózatok szintézisét. A disszertációban bemutatott levezetés alapján, ha $d > \frac{\delta}{2}$, ekkor valamennyi illesztőhálózati impedancia érték tisztán valós. Ez az eredmény összhangban van az admittancia inverteres megoldással is. A negatív illesztőhálózati impedancia értékek elkerüléséhez itt összetettebb feltételrendszert szükséges vizsgálni.

1. $(Z_{0\text{-even}}^a)_{2,3} > 0$ feltétel nélkül teljesül minden $d_p > 0$ értékre.
2. $(Z_{0\text{-odd}}^a)_{2,3} > 0$ esetében három aletetre kell bontani a kérdést:
 - Ha $0 < d_p \leq 1$, akkor $(Z_{0\text{-even}}^a)_{2,3} > 0$.
 - Ha $d_p > 1$ és $U > K_{2,3}$ akkor $(Z_{0\text{-even}}^a)_{2,3} > 0$, ahol $U = R_L \tan(\Theta_1) \frac{\delta}{k_{1,2}^2}$.
 - Ha $d_p > 1$ és $U < K_{2,3}$ és $1 < d_p < \frac{U - 2K_{2,3}}{2(U - K_{2,3})}$ akkor $(Z_{0\text{-even}}^a)_{2,3} > 0$.
3. $(Z_{0\text{-even}}^b)_{2,3} > 0$ feltétel nélkül teljesül minden $d_p > 0$ értékre.
4. $(Z_{0\text{-odd}}^b)_{2,3} > 0$, ha $(Z_{0\text{-even}}^b)_{2,3} > 2 K_{2,3}$.

I/3. altézis - Algoritmus implementáció a Bode-Fano eljárást alkalmazó admittancia inverter alapú illesztőhálózatok automatizált szintéziséhez, felhasználva a realizációs restriktiókat

Önmagában az előbbieken ismertetett realizáció restriktíós szabályok nem segítik aktívan az illesztési eljárást. Egy adott bemeneti paraméterkombináció, amely végeredményben nem realizálható illesztőhálózatot szintetizált kézi beavatkozásra szorul. Ebben az esetben kézi beavatkozással kell a bemeneti paramétereket

változtatni úgy, hogy az előírt restriktióknak és persze az illesztési célnak is megfeleljen az eredmény. Ez a folyamat egy hosszadalmas, többszöri próbálkozáson ciklust eredményez. Ennek az elkerülésére bemutattam egy olyan iteratív algoritmust, amely hatékonyan szűri ki az összes olyan paraméterkombinációt, amely nem realizálható hálózat eredményezne (felhasználva a realizációs restriktiókat) [1]. Enélkül az előzetes szűrés nélkül az paraméterkombinációk iterációja során számos olyan számítást kellene végrehajtani, amely végeredményben nem használható, a realizálhatatlan illesztőhálózat miatt.

Az algoritmusban definiáltam a változtatható bemeneti paramétereket (d_p, r), illetve egy további relatív illesztett sáv szélesség paramétert (b). A b paraméter segíti a tervezés során a megcélzott illesztett relatív sáv szélesség beállítását. Az illesztési feladatok nagy részében az illesztett sáv szélesség és illesztési minőség előre rögzített értékű paraméter. Azonban a Bode-Fano eljárás természetéből kifolyólag előfordulhat olyan eset, hogy egy kisebb illesztett sáv szélességre nincs realizálható megoldás, míg egy magasabb értékre pedig igen. Ez az oka annak, hogy a b paramétert változtathatóként definiáltam az algoritmusban, a kezdeti értéke általában a minimálisan elvárt illesztett sáv szélesség értéke. A javasolt algoritmust MATLAB környezetben implementáltam, és alkalmaztam egy soros R-L lezárás illesztésére, demonstrációs céllal.

A javasolt illesztési algoritmusom segítségével nincs szükség az eddig használt próbálkozáson, ún. *trial-and-error* típusú illesztési a Bode-Fano eljárást alkalmazó illesztési feladatok esetén. Ehelyett elégséges egy célt definiálni (illesztett sáv szélesség, minimális bemeneti reflexió érték maximuma) és az iteratív algoritmus megtalálja a célt teljesítő, realizálható illesztőhálózatot.

I/4. altézis - Kis méretű on-chip antennák illesztése alternatív megoldással

A Bode-Fano eljárás természetesen csak bizonyos esetekben alkalmazható. Olyan illesztési feladatok esetén, amikor a lezárás jósági tényezője magas ($Q > 30$) és a célzott illesztett frekvenciasáv ehhez mérten magas ($b > 1\%$), ekkor a szintézis folyamat nem mindig eredményez realizálható illesztőhálózatot. Olyan lezáró impedanciák esetén, amelyek nem jól karakterizálhatók egy-reaktanciás modellel (single reactance model) a Bode-Fano által bemutatott megoldás nem is alkalmazható. Ez az eset fennáll olyan antennák illesztése során, mint például a kis méretű on-chip antennák (Ultra-small Form Factor On-Chip Antenna). Ilyen kis méretű antennák illesztése esetén nem lehetséges az illesztőhálózat

integrálása az antenna mellé, a hely szűke miatt, így alternatív megoldásra van szükség. Az alternatív illesztési eljárás nem tartalmaz a klasszikus értelemben vett illesztőhálózatot. Az illesztést egy speciális spirál alakzattal és egy beágyazott kerámiastruktúrával alakítottam ki. Egy publikációban bemutattam, hogy ez a megoldás alkalmas a kis méretű antennák illesztettségének javítására, áttételesen az antennák kisugárzott teljesítményének javítására is [2].

II. Tézis - Alternatív zajcsökkentési megoldás a járművek közti látható fényes kommunikáció minőségének javításához

Bevezetés

Az elmúlt néhány évben a látható fényes kommunikáció (Visible Light Communication, VLC) komoly térhódításba kezdett. Egyrészt a félvezető alapú látható fényű világítótestek (lézerek, fényemittáló diódák) elterjedésével, másrészt mivel az 5G hálózati előirányzatokban is szerepel a látható fényes kommunikáció, mint a rádiós kommunikációs rendszer alternatívája. A VLC technológiát egyre több helyen kezdték kísérleti jelleggel alkalmazni például vízalatti alkalmazásokban, vagy járművek közti kommunikációban [6]. A járművek közti kommunikációban a VLC megoldást elősegítette, hogy egyre több modern autóban többszegmenses adaptív LED-es fényforrásokat alkalmaznak. Disszertációmban azt kutattam, hogy miként lehetne javítani a járművek közti VLC alapú kommunikáció zavarérzékenységét, speciális adó-vevő struktúrákkal. Kutatásomban javasoltam egy speciális 2x2-es differenciális, térben szétosztott VLC adó-vevő struktúrát [7]. Elsőként mérési eredményekkel igazoltam, hogy a járművek közti szabadtéri látható fényes csatorna jelentős mértékű, ún. közös módusú zavart tartalmaz, ami ellen védekezni szükséges. Ezek után szimulációs eredményekkel igazoltam, hogy az általam javasolt 2x2-es adó-vevő elrendezés alkalmas a közös módusú zavarok csökkentésére. Végül a szimulációs eredményeket laboratóriumi mérésekkel is alátámasztottam. Ezen kutatási eredményeket publikáltam [3]. Megmutattam, hogy a javasolt megoldásom akkor ad jobb eredményt, mint a konvencionális, ha a járművek távolsága kevesebb, mint 10 méter. Emellett kiemelkedően jó eredményeket mutatott a javasolt megoldásom, mikor a közös módusú zavar teljesítménye jelentős volt a hasznos jel szintjéhez képest.

II./1. Altézis - Közös módusú zavarok a VLC alapú járművek közti kommunikációs csatornán

Elsőként igazolni akartam, hogy a járművek közti látható fényes kommunikációs csatorna közös módusú zavarokkal terhelt, amelyek az esti órákban főként a közvilágítás hatása miatt lépnek fel. Nappali fényviszonyok között természetesen inkább a napfény hatása szokott dominálni. Én az esti órákban vizsgáltam a látható fényes zavarokat. Feltételeztem, hogy a jármű hátsó oldalán elhelyezett

látható fényes vevőkre érkező fényteljesítmény közös módusban terheli mindkét, térben elválasztott vevőt. Két térben elválasztott látható fényes vevő jelét egymásból kivonva (differenciáját képezve) lehetőség nyílik a közös módusú zavarok csökkentésére. Ezt a feltételezést alátámasztottam valós városi környezetben végrehajtott mérésekkel. Méréseim megerősítették tézisem első feltételezését, a differenciális vevőstruktúra segítségével jelentősen csökkent a közös módusú zavar amplitúdója (akár 50%-os csökkenés is észrevehető volt). Így egyrészt a csatorna zavarkomponenseire tett feltevéseim igaznak bizonyultak, másrészt a differenciális vevő-struktúra hatékonyságát is alátámasztottam.

II./2. Altézis - Közös módusú zavarok csökkentésének szimulációs vizsgálata járművek közti látható fényes kommunikáció esetén

A még pontosabb összehasonlítás kedvéért létrehoztam egy matematikai modellt, amely segítségével összehasonlítható a gyakran alkalmazott 2×2 közös módusú adó-vevő (2×2 C-SD) a 2×2 differenciális adó-vevő (2×2 D-SD) struktúrával. Részletesen tanulmányoztam és összehasonlítottam a 2×2 C-SD és a 2×2 D-SD típusú struktúrát egy általam készített MATLAB környezetben implementált szimulációs környezetben. Többféle zajtípus, illetve áthallás esetén is megvizsgáltam a szimulációs környezetben a 2×2 D-SD és a 2×2 C-SD zajcsillapító teljesítményét. Emellett megmutattam a javasolt 2×2 D-SD megoldás legfontosabb előnyeit, hátrányait és alkalmazhatósági határait a szimulációs eredmények segítségével. Szimulációs eredményekkel validáltam a közös módusú zavarkomponensek csillapításának képességét a javasolt 2×2 D-SD módszernek. Megmutattam, hogy a 2×2 D-SD megoldás akkor működik legjobb hatásfokkal, ha a közös módusú zavar közel egyenlő amplitúdóval befolyásolja két vevőt. Illetve megmutattam, hogy akkor érdemesebb a 2×2 D-SD módszert alkalmazni, ha zavarkomponensek nagyságrendileg a hasznos jel jelszint tartományába esnek. Bemutattam, hogy amennyiben a két adó jele közt áthallás lép fel a vevő oldalon, például nagy adó-vevő távolságok esetén, abban az esetben érdemesebb lehet a 2×2 C-SD megoldást választani. A két adó közti áthallás jelentősen rontja az adatátvitel minőségét (bithibaarány) 2×2 D-SD alkalmazása esetén.

II./3. Altézis - A javasolt 2x2 D-SD látható fényes adó-vevő struktúrával megvalósított járművek közti kommunikációs tesztrendszer validációs mérési eredményei laboratóriumi környezetben

Az előzetes szimulációs eredmények alapján megépítettem egy autóipari standardoknak megfelelő 2x2 C-SD és 2x2 D-SD átvitelt megvalósítani képes látható fényes adó-vevő rendszert. Szakítva több korábban publikált munkában látottakkal, olyan fényforrásokat és lámpatesteket alkalmaztam, amelyek az autóipari standardoknak megfelelnek, és nem kizárólag saját építésű fényforrásokat alkalmaznak. A mérési eredmények minősítéséhez álvéletlen bitsorozatokot küldtem át az adó oldalról a vevő oldalra, és a vevő oldalon szemábra segítségével számított jósági tényező (Q) és bithibaarány (BER) segítségével rangsoroltam az eredményeket. Több adó-vevő távolságot is megvizsgáltam 2 és 10 méter közti távolság intervallumban. A mérési eredményeim jól illeszkedtek a matematikai modell alapján elkészített szimulációs környezetben tapasztaltakra. Kisebb adó-vevő távolságok esetén a 2x2 D-SD megoldás teljesített jobban, kiváltképp magas közös módusú zavarszint esetén. Nagyobb távolságok esetén a fényforrások vetítési képe miatt egyre jobban dominált az áthallás hatása, így a differenciális megoldás átviteli minősége romlott. Ennek kiküszöbölésére tettem egy javaslatot, melynek hatásosságát mérési eredményekkel igazoltam. Amennyiben a vevő oldalt ellátjuk térbeli szelektivitást növelő kiegészítővel (lencse, vagy látószög határoló), csökkenthető az áthallás negatív hatása. A látószög határoló megoldás hatásosságát méréssel támasztottam alá.

Folyóiratcikkek

- [1] Balázs Matolcsy és Attila Zólyomy. “Overcoming the Realization Problems of Wideband Matching Networks”. *INFOCOMMUNICATIONS JOURNAL* 10.4 (2019), 31–36. old.
- [2] Balázs Matolcsy és Attila Zólyomy. “Designing an Efficient Ultra Small Form Factor On-Chip Antenna for UHF RFID Application.” *Radioengineering* 29.2 (2019).
- [3] Balázs Matolcsy, Eszter Udvary és Ágoston Schranz. “Common-Mode Noise Reduction with Space-Divided Differential 2x2 VLC for V2V Applications”. *Optical and Quantum Electronics* (2021).

Konferencia publikáció

- [4] Balázs Matolcsy, Attila Zólyomy és Eszter Udvary. “Wideband impedance matching for VCSELs used in Free-Space quantum communication”. *2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE. 2016, 1–4. old.
- [5] Balázs Matolcsy és Attila Zólyomy. “Practical Realization Rules for Wideband Impedance Matching using the Double-Terminated Filter Synthesis Method”. *2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP)*. IEEE. 2018, 1–5. old.
- [6] Tamás Szili, Balázs Matolcsy és Gábor Fekete. “Water pollution investigations by underwater visible light communications”. *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE. 2015, 1–4. old.
- [7] Balázs Matolcsy és Eszter Udvary. “Common-mode Noise Rejection in V2V/V2I Communication Based on Differential VLC Transmission”. *2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. IEEE. 2020, 1–6. old.