

# Válasz Dr. Pávó József opponensi véleményére

## 1. Bevezetés

Először is szeretném megköszönni Dr. Pávó Józsefnek az időben és nagy alaposággal elkészített bírálatát, ill. a jól átgondolt, inspiráló kérdéseket is. Örömmel olvastam, hogy a Bíráló a tématerületet jelentősnek tartja, és külön köszönöm, hogy munkásságomat iskolateremtő jelentőségűnek tudja be. Egyetértek azzal, hogy eredményeim nemzetközi szinten sokkal nagyobb ismertségre tettek szert, mint hazai szinten, abból kifolyólag, hogy hasonló kutatásokat külföldi egyetemeken végeznek. Itthon leginkább a graduális képzésben sikerült a kutatási tapasztalataimat átadni, vezetésem alatt készült szakdolgozatok, diplomatervek, TDK dolgozatok, ill. a „Zenei jelfeldolgozás” választható tárgy által. Én is reménykedem benne, hogy a jövőben több PhD hallgatóval dolgozhatok együtt a témán. (E tekintetben a BME Villamosmérnöki és Informatikai karán pár éve elindított PhD duplex program mindenképpen nagy segítség, hiszen a doktori képzés általános vonzerejét növeli).

Köszönöm a publikációs tevékenységem pozitív értékelését. A disszertáció megírásakor a 100 oldalas terjedelmi korlát komoly dilemma elé állított a tekintetben, hogy hogyan egyensúlyozzák a megértést segítő bevezető fejezetek és a saját eredményeket tárgyaló fejezetek között. Ennek fényében örömmel olvastam, hogy a bevezető fejezetek nagyban segítettek a Bírálót, ill. azt is, hogy a Bíráló a dolgozatot mind formailag, mind pedig stílusában megfelelőnek tartja.

## 2. A tézisek tartalmi értékelése

A Bíráló felveti, hogy a dolgozat az egyes állítások bizonyítására kevés személtető példát mutat, ugyanakkor ezzel együtt elfogadja az eredmények értékét és jelentőségét.

Véleményem szerint a 6., 8. és 9. fejezet példái illusztratív jellegűek, nem az eljárások bizonyítására szolgálnak, hiszen az itt közölt eredmények helyessége az ábrák nélkül is eldönthető. Ennek megfelelően a több példa iránt felmerült igény leginkább a különböző pólusmeghatározó eljárásokat összehasonlító 7. fejezet tekintetében releváns, és ha jól értem, a Bíráló is a korábbi eljárásokkal történő összehasonlítás tekintetében hiányolja azokat.

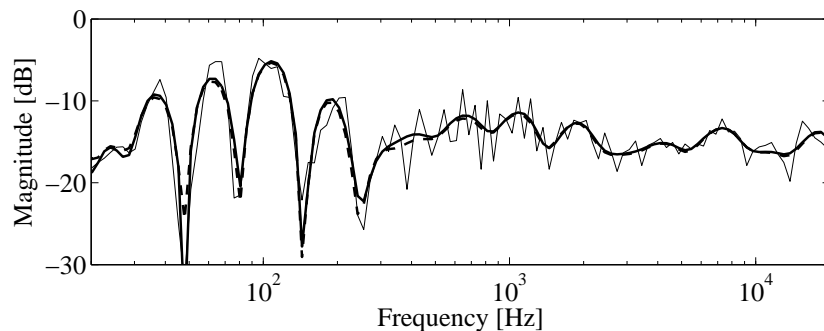
Az irodalomban jellemzően egy-egy gyakorlati példát szoktak felhasználni a hasonló eljárások összevetésére. Én a három gyakorlati példa mellett azért döntöttem egy szintetikus célfüggvény használata mellett is (ld. az értekezés A.5 függeléke), hogy jobban láthatóvá váljanak az egyes eljárások jellegzetességei. Azt gondolom, különösen ezekből a szintetikus példákból látható, hogy a szűrőtervezés hibáinak eloszlása logaritmikus skála mentén sokkal egyenletesebb a korábbi módszereknél. Tehát a példákkal nem csak azt mutatom meg, hogy a javasolt módszerek kisebb hibát eredményeznek, hanem a hibák frekvenciatengely menti eloszlását is, ami véleményem szerint előrevetíti, hogy ez a viselkedés más célfüggvények esetén is fennáll. Az eredmények hihetőségét erősítik maguk az algoritmusok is, hiszen pl. a kétsávós és a custom warping eljárások esetében az, hogy a specifikáció (közel) logaritmikus skálára transzformált változatára tervezek IIR szűrőt (a disszertáció példáiban Steiglitz and McBride [1965] algoritmusával), szintén előrevetíti, hogy a hibát eredetileg lineáris frekvenciaskála mentén minimalizáló szűrőtervezési algoritmus logaritmikus skála mentén lesz minimális hibájú. Ezzel együtt teljes mértékben egyetértek azzal, hogy az eredményeim hihetőségének ilyen módon történő levezethetőségét érdemes lett volna a dolgozatban is hangsúlyozni, ill. azzal is, hogy több tervezési példa a fejezet javára vált volna.

**Bíráló kérdése:** „Hogyan bizonyítható a 6.2.3. szakaszban bemutatott iteratív eljárás konvergenciája?”

Ez valóban érdekes kérdés, de sajnos erre nem sikerült bizonyítást adnom. Az iteratív LS algoritmusokra sajnos jellemző, hogy konvergenciájuk nem bizonyítható, és a mérnöki gyakorlatban alkalmasnak fogadjuk el őket, ha a tapasztalat azt mutatja, hogy konvergálnak. Például a [Jackson 2008] cikk, amely az általam javasolt módszert inspirálta, szintén nem ad bizonyítást a konvergenciára, ill. az  $L_p$  normájú IIR szűrőtervezés iteratíván súlyozott LS algoritmuson alapuló megvalósításának [Vargas and Burrus 2001] konvergenciája sem bizonyított. Érdekesség, hogy a népszerű Steiglitz-McBride algoritmus [Steiglitz and McBride 1965] (stmcb MATLAB utasítás) konvergenciája is csak arra az esetre bizonyítható, amikor a tervezett szűrő fokszáma megegyezik a modellezendő rendszer fokszámával [Stoica and Soderstrom 1981].

Az én esetemben a bizonyítás nehézsége abban áll, hogy az iterációban a specifikáció amplitúdóját változtatlanul hagyjuk, ugyanakkor a fázisát az előző iterációban tervezett szűrő fázisának megfelelően felülírjuk, a fázis számítása pedig nemlineáris művelet.

Ugyanakkor vizsgálataimban az eljárás a gyakorlatban mindig pár lépés alatt konvergált: ennek egyik oka az lehet, hogy bár a megoldást inspiráló [Jackson 2008] cikk nulla kezdőfázist alkalmaz, én az iterációt minimumfázisú specifikációból indítom. Minimálfázisú átviteli függvény a tapasztalatok szerint IIR szűrőkkel kis hibával közelíthető az impulzusválasz szigorúan lecsengő jellege miatt, ellentétben a nulla fázis előírásával, ami akauzális impulzusválasznak felelne meg. Bár a dolgozatban terjedelmi okokból erre nem tértem ki, az általam javasolt eljárás a kellően jó kiindulási fázis miatt már az első iterációnál is kis hibát eredményez, ami a későbbi iterációk során sem változik jelentősen (ld. pl. a [Bank 2011] publikációm 3. ábrája, amit ide is bemásolok, az eredeti ábraalírással együtt).



1. ábra. Magnitude-only parallel filter design: minimum-phase specification (thin line), magnitude response of the first filter  $|H_1(\vartheta)|$  (thick dashed line), and the final filter magnitude response  $|H_{10}(\vartheta)|$  after 10 iterations (thick solid line). (Ábra és ábraalíráás a [Bank 2011] publikációból)

**Bíráló kérdése:** „Matematikailag bizonyítható-e az, hogy a pólusok frekvenciájának logaritmusos válogatása vezet a legjobb approximációhoz?”

Valóban, a dolgozat 6.5 pontjában egyedül az egyenletes póluselrendezés simító hatásának levezetése tekinthető bizonyításnak. A nemegyenletes (és így a logaritmusos) póluselrendezésre vonatkozó következtetés abból a megfigyelésből indul ki, hogy a szűrő frekvenciamenetét a szinuszos vizsgálójelhez közeli frekvenciájú másodfokú tagok határozzák meg, így a frekvenciafelbontást a lokális pólussűrűség alakítja. Ebből a felismerésből következtettem arra, hogy logaritmusos skálán elhelyezett pólusok a célátvitel logaritmusos simítását, így logaritmusos frekvenciafelbontást eredményeznek, ill. ezt szimulációval mutattam meg.

Bár eddig a logaritmusos esetre nem sikerült matematikai bizonyítást adni, nem zárom ki annak lehetőségét, hogy ez megtehető, és egyetértek abban, hogy érdemes ebben az irányban tovább vizsgálni. E tekintetben reményt keltő, hogy a logaritmusos póluselrendezésnek megfelelő simítófüggvény jól közelít

hető az értekezés (6.33) egyenletében leírt

$$S(\vartheta) = C \frac{\sin(2\pi\alpha \log_2(\frac{\vartheta}{\vartheta_0}))}{\vartheta - \vartheta_0},$$

általam tapasztalati úton meghatározott, viszonylag egyszerű logaritmus sinc függvényel.

**Bíráói kérdés:** „Az értekezésben összehasonlítja az egyes póluselrendezési eljárások eredményét egy adott szűrő esetében (7.6. alfejezet), kvalitatív megfontolások alapján elemzi, hogy mely esetekben lehet célszerű egyik, vagy a másik módszer alkalmazása (7.5. alfejezet). Meg lehet-e fogalmazni bármilyen kvantitatív kritériumot arra vonatkozóan, hogy mely szűrő specifikációt milyen póluselrendezésre támaszkodva a leggazdaságosabb megtervezni?”

A 2. tézisben javasolt másik két eljárásához képest a 2.1 altézisben megfogalmazott eljárás egyetlen előnye, hogy minimális számításigénnyel rendelkezik, így a szintén minimális számításigényű, logaritmus skálán előre meghatározott póluselrendezéssel érdemes összehasonlítani. Eddigi tapasztalataim alapján ez az eljárás a logaritmus póluselrendezésnél mindig kisebb hibát eredményezett. (Természetesen a fixen logaritmus póluselrendezésnek is megvan a létjogosultsága, amikor pl. egy sokkal nagyobb fokszámú rendszert szeretnénk egy adott – a pólussűrűséggel pontosan beállítható – simításnak/felbontásnak megfelelően modellezni vagy kompenzálni.)

A Bíráló kérdése tehát leginkább a 2.2 és a 2.3 altézis módszerei, és a korábbi, egyszerű warpolást alkalmazó módszer tekintetében érdekes. Azt gondolom, a kétsávós, és a „custom warping” eljárások nagyon hasonló eredményre vezetnek, a különbség közöttük inkább az, hogy a custom warping algoritmusát tekintve bonyolultabb, de cserébe kevesebb emberi beavatkozást igényel. Tehát tervezési pontosság tekintetében jelentős különbség ezen két általam javasolt módszer és az egyszerű warpolás között mutatható ki. Ahogy a kvalitatív elemzésben írom, az egyszerű warpolás kizárólag akkor hatékony, ha az átviteli függvény érdemi, jelentős változásokat tartalmazó szakasza nem fedi le a teljes hallható frekvenciatartományt. Igazából ezt a jellemzőt lehetne valamilyen módon kvantifikálni. Tapasztalataim szerint ez a helyzet akkor áll elő, ha a teljes hallható frekvenciatartomány tíz oktávjából maximum hat oktáv széles, összefüggő tartományban szükséges az átviteli függvény modellezése vagy kiegyenlítése. Ha ennél szélesebb a modellezendő vagy kompenzálendő tartomány, akkor a kétsávós vagy custom warping eljárásokat érdemes alkalmazni.

Amennyiben ez a tartomány keskenyebb, mint hat oktáv, akkor az egyszerű warpolás is kellően hatékony. Érdemes azonban hozzátenni, hogy vizsgálataim alapján az általam javasolt, bonyolultabb módszerek (kétsávós és custom warping) ebben az esetben sem adnak az egyszerű warpolásnál rosszabb eredményt (ld. pl. a dolgozat 7.10 ábrája), egyszerűen csak nem adnak jobbat annál. Sokkal inkább arról van szó tehát, hogy ha tudjuk, hogy nem kell teljes sávban kompenzálni, mint pl. egy mobiltelefon hangszórója esetén, akkor felesleges a bonyolultabb eljárások alkalmazása.

Ha viszont a specifikáció vizsgálata vagy előzetes információ (pl. a rendszer sáv szélessége) ismerete nélkül is biztonságra szeretnénk törekedni, és nem zavar minket az egyszerű warpolásnál valamivel nagyobb, de még így is elfogadhatóan rövid (ezres szűrőfokszámok alatt tízedmásodperces nagyságrendű) tervezési idő, akkor logaritmus frekvenciatengely mentén adott specifikációk esetén érdemes az általam javasolt eljárásokat választani az egyszerű warpolás helyett, mert azok tapasztalataim szerint mindkét esetben (szűkebb és tágabb tervezési tartomány) megfelelő eredményt adnak.

A Bíráló felveti, hogy a dolgozat (9.13)-as képlete hibát tartalmaz. A képletben  $h(i)$  helyett valóban  $h(M+i)$ -nek kellett volna szerepelnie, a képlet után írt mondatnak megfelelően. A gyakorlatban tkp. annyi történik, hogy az eredeti impulzusválasz első  $M$  mintáját levágjuk (azt a FIR résszel modellezzük), és a megmaradt rész alapján tervezünk fix pólusú párhuzamos szűrőt.

A (9.14) egyenlet alatt szintén elírás található, köszönöm a Bírálónak, hogy ezekre felhívta a figyelmem.

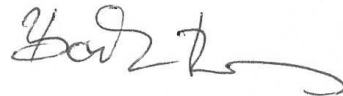
### 3. Összefoglalás

Ismét szeretném megköszönni a Bíráló alapos munkáját, téziseim elfogadását, és azt, hogy véleménye szerint eredményeim megfelelnek az MTA doktori eljárás követelményeinek, ill. hogy javasolja az értekezésem nyilvános vitára bocsátását.

### Hivatkozások

- Bank, B. (2011). Logarithmic frequency scale parallel filter design with complex and magnitude-only specifications. *IEEE Signal Process. Lett.*, 18(2):138–141.
- Jackson, L. B. (2008). Frequency-domain Steiglitz-McBride method for least-squares filter design, ARMA modeling, and periodogram smoothing. *IEEE Signal Process. Lett.*, 15:49–52.
- Steiglitz, K. and McBride, L. E. (1965). A technique for the identification of linear systems. *IEEE Trans. Autom. Control*, AC-10:461–464.
- Stoica, P. and Soderstrom, T. (1981). The steiglitz-mcbride identification algorithm revisited—convergence analysis and accuracy aspects. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 26(3):712–717.
- Vargas, R. A. and Burrus, C. S. (2001). On the design of  $L_p$  IIR filters with arbitrary frequency response. In *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech and Signal Process.*, volume 6, pages 3829–3832, Salt Lake City, Utah, USA.

Budapest, 2022. december 1.



Bank Balázs