Válasz Dr. Szederkényi Gábor Professzor úrnak az „Új jelút-kompenzációs eljárások” című MTA doktori értekezés opponensi véleményére

Nagyon köszönöm Szederkényi Gábor Professzor úrnak a disszertáció gondos véleményezését. Köszönöm a tézisek elfogadását és támogató nyilatkozatát a nyilvános vitára bocsáthatóság tekintetében. Köszönöm a kérdéseket, megjegyzéseket, melyekre az alábbiakban igyekszem reagálni.

Opponensi megjegyzés: **1. és 2. fejezet tartalma akár egy közös bevezető fejezetben is összevonható lett volna.**

Válasz: Valóban elegendő lett volna egy részletes bevezető (2. fejezet kibővítve ~7 oldalon). Az első fejezet keretében egy tömörebb, 2 oldalas ismertetést egy fajta „vezetői összefoglalónak” szántam, de logikailag a két fejezet valóban összevonható.

1. Opponensi kérdés/megjegyzés: **A 3. fejezet eléggé hosszú, és az alfejezetek nem pontosan követik a tézispontok beosztását (a mozgásanalízishez tartozó utolsó szakasz az 1.5 altézishez kapcsolódik). A fejezetet arányossági szempontok és a tézisek figyelembe vételével akár ketté is lehetett volna osztani.**

   Válasz: Köszönöm a megjegyzést. Valóban a 3. fejezet a leghosszabb. Ez tartalmazza dekonvolúcióhoz kapcsolódó elméleti összefoglalót, ezen a területen a saját kutatási eredményeimet és azok alkalmazását. Az arányossági szempontok figyelembevételével külön fejezetet kaphatott volna ez a három terület.

   A tézisek és a disszertáció beosztása valóban mutat eltéréseket. A dolgozat szerkesztésénél igyekeztem (a tézisektől függetlenül) logikailag jól felépített struktúrát meghatározni, hogy a téma könnyen követhető legyen. Nem törekedtem a tézispontok és a dolgozat szerkezetének kölcsönösen egyértelmű megfeleltetésére, mert úgy éreztem, hogy ez az olvashatóságát rontotta volna. Az eredmények tézisek szerinti klaszterezése más logika szerint tűnt hatékonynak, mint a frekvenciafüggő hibák kompenzálásának tárgyalási struktúrája.

2. Opponensi kérdés/megjegyzés: **A szerző a 12. oldalon említi, hogy a (15) egyenletben leírt iteratív megoldás konvergenciája csak egy „szűk jelcsoportra" biztosítható. Pontosan milyen jelcsoportról van szó? Alkalmazható lenne-e a (12) regressziós modellre egy rekurzív legkisebb négyzetes (RLS) becslés?**

   Válasz: A mérőrendszer impulzus válasza alapján, illetve átviteli függvénye alapján [1] szerint az eljárás akkor konvergál a naiv inverz szűrőhöz (output error kritérium megoldása), amennyiben biztosítható, hogy

$$Re\{H(f)\} > 0, \forall f - \text{re},$$

   ahol $H(f)$ a $h(t)$ impulzus válasz (súlyfüggvény) Fourier transzformáltja. Ennek biztosítása érdekében szokás a mért jelet konvolválni a súlyfüggvény időben megfordított változatával, mintha a jel egy hipotetikus másik rendszeren is keresztülment volna, és az invertálást a két rendszer eredőjére megvalósítani. Ekkor a módosított mérés a következő lesz:

$$z_{\text{új}}(i) = z(i) * h(-i), \qquad h_{\text{új}}(i) = h(i) * h(-i)$$

Az így módosított jelek kielégítik a konvergencia elégséges feltételét.

A (12)-es regressziós modell formájában valóban hasonlít a rekurzív legkisebb négyzetes (RLS) becslés alapfeladatára, de más a cél. RLS esetén tanítóminták átlagára optimalizálunk, míg az általam vizsgált esetben az egyedi mérés esetén kell a legjobb becslést elérni. Az RLS becslés igényli a tanítómintákat (a mi konkrét esetünkben az ismeretlen gerjesztőjel időtartománybeli lefutását). Ez inverz szűrés esetén alapértelmezésben nem áll rendelkezésre. Természetesen szimulációs mintákon keresztül taníthatjuk az optimális lineáris inverz szűrő súlyfüggvényének együtthatóit, de ez esetben csak a tanítómintákhoz (és zajviszonyokhoz) hasonló esetben fog jó becslést adni. Adaptálhatjuk a rendszert sokféle tanítómintára is, ez esetben azonban – mivel az átlagra tanul – az egyedi esetre nem lesz optimális. Tranziens jelek esetén egy mintaregisztrátumra vonatkoztatott optimumot keresünk, nem a sok mérésre átlagosan jó becslést.

Az RLS algoritmus inverz szűrésre való alkalmazása struktúrájában egy neurális háló egy perceptronjának felel meg, nemlinearitás nélkül, vagyis amikor a perceptron egy lineáris kombinátor. (Az eltérés a kettő között az adaptációs algoritmusban van.)

3. Opponensi kérdés/megjegyzés: **A (64)-(65) egyenletekben szereplő iterációnál van-e arra garancia, hogy minden lépésben csökken a célfüggvény (hiba) értéke? A lokális minimumok megtalálása okozhat-e problémát a konvergenciában?**

Válasz: Analitikusan is sikerült belátni Tyihonov egyik regularizációjára a konvergenciát, és megadni a végállapotot zárt alakban [2]. További regularizáló operátorok esetén ezen iteráció konvergenciáját, illetve szigorúan monoton konvergenciáját (a költségfüggvény minden lépésben csökken) sok mérés és szimuláció pozitívan alátámasztja, de analitikus bizonyítása általános esetben még további kutatást igényel.

A robusztusság növelése érdekében különböző heurisztikák vethetők be. Az egyik lehetőség, hogy korlátozzuk, hogy egy kezdeti becsléshez képest a modellparaméter mennyit vándorolhat az iteráció során. Ez esetben a bemenőjel spektrális modelljére a kezdeti becslést nem a naiv inverz szűrésből származtatjuk, hanem a mért jel spektrumából. Az a tapasztalat, hogy az így nyert regularizációs paraméter becslés elég közel van a végső optimumhoz.

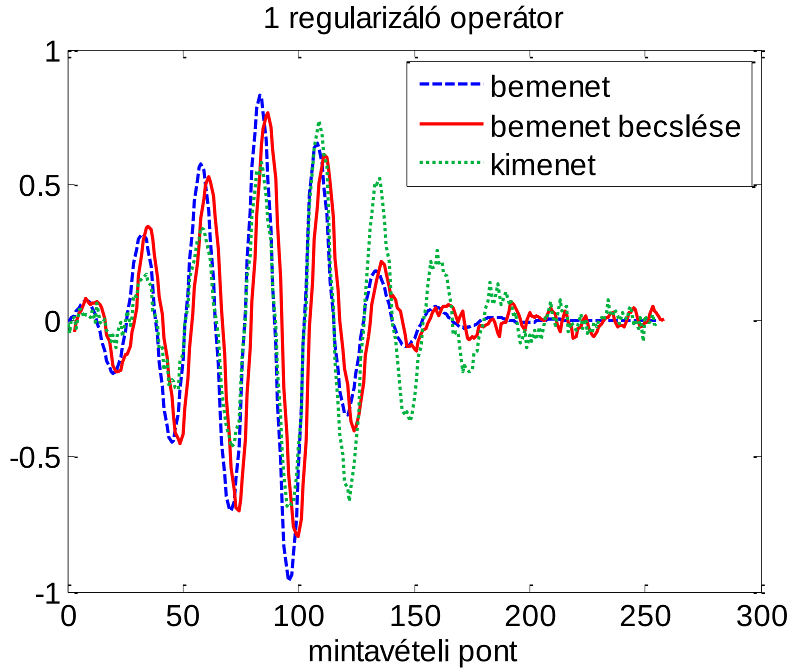
Lokális minimumok megtalálása természetesen problémát okozhat. Az eddigi kísérletek a gyakorlatban sima hibafüggvényre mutattak, egy globális minimummal. Ez azt a sejtést engedi meg, hogy a valóságban előforduló rendszerek és valós fizikai jelek esetén az optimalizálás egyértelmű, de ez még nem bizonyított. Ezen bizonytalanság ellen különböző heurisztikákkal lehet védekezni. Pl. a hibafüggvény letapogatása egy durvább skálán, majd adott küszöbszint alatti hibahelyek környezetében egy finomabb skálán (több potenciális lokális minimumot feltételezve), vagy többször megismételt, különböző kezdő paraméterrel indított optimalizálás.

4. Opponensi kérdés/megjegyzés: **A 15-16. ábrák felirataiban szerepel szaggatott vonal, az ábrákon azonban nincs ilyen.**

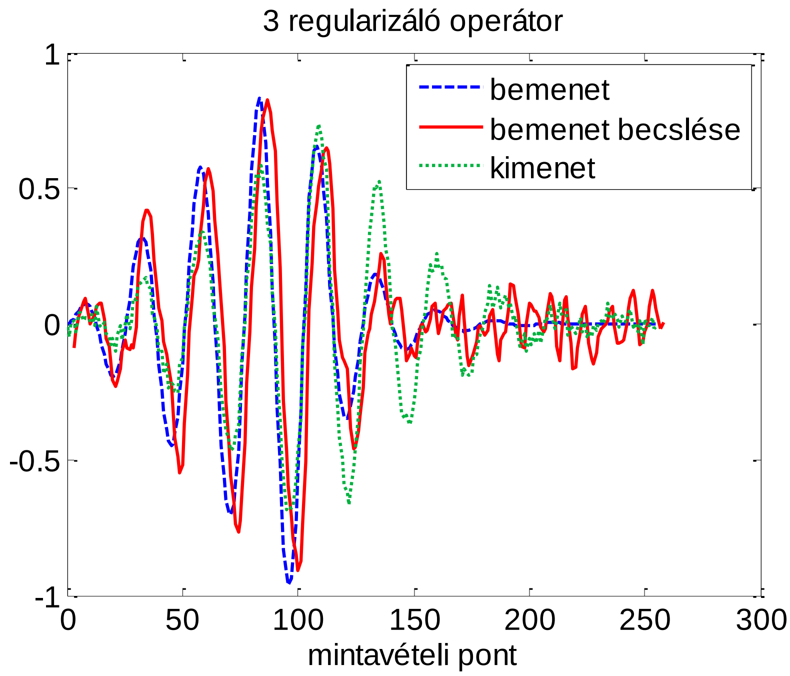
Válasz: Köszönöm az észrevételt. Sajnos ezeknél az ábráknál a pdf konverter az eredetileg szaggatott vonalból egy olyan sűrűn szaggatott vonalat készített, amely a grafikus felbontáson belül már folytonosnak néz ki. Jogos az észrevétel, pdf konverziós hiba az oka.

5. Opponensi kérdés/megjegyzés: **Érdekes lett volna a 18. ábrán is szerepeltetni a kiinduláskor kapott jelet az időtartományban.**

Válasz: Köszönöm a megjegyzést. Ezt most itt pótolom. Látszik, hogy az inverz szűrés a torzítást nagymértékben kompenzálja már 1 regularizáló operátor esetén is (kimenet és becsült bemenet összevetése). Több regularizáló operátorral a hiba tovább csökkenthető.



Inverz szűréssel helyreállított jel 1 regularizáló operátor esetén.
Valódi és becsült bemenőjel (3 mintavett ponttal eltolva, hogy látszódjon a két jel együtt), ill. a zajos és torz kimenet.



Inverz szűréssel helyreállított jel 3 regularizáló operátor esetén.
Valódi és becsült bemenőjel (3 mintavett ponttal eltolva, hogy látszódjon a két jel együtt), ill. a zajos és torz kimenet.

6. Opponensi kérdés/megjegyzés: **A (62), ill. (70) egyenletekben szereplő keresztszorzatok elhanyagolhatóságának felvázolása tudományos eredményként érdekes lett volna az értekezésben akár egy vagy több alkalmazási példa rovására.**

Válasz: Köszönöm az észrevételt. A 100 oldalas szigorú felső korlát nagyon sok esetben kompromisszumokra kényszerített az írás során. Egyrészt minden levezetést praktikus tartalmaznia a műnek, másrészt a kidolgozott algoritmusok szerteágazó alkalmazását és alkalmazhatósági lehetőségét is illik bemutatni. Ezen dilemma mérlegelése során esett hol ez, hol az áldozatul. Maga a kérdéses levezetés kb. 10 oldal terjedelmű. Ez lényeges fejezetek elhagyása árán lett volna csak beilleszthető. Ezért választottam azt a megközelítést, hogy a levezetés lényegi következtetésit az MTA disszertáció függelékében összefoglalom, és megadom a gondolatmenetet, hogy a Kandidátusi disszertációmban bemutatott egydimenziós eset levezetését hogyan lehet általánosítani több paraméteres optimalizálásra. (Az MTMT publikációs adatbázisban a hivatkozott disszertáció elektronikus változata elérhető.)

7. Opponensi kérdés/megjegyzés: **Pontosan milyen szempontok/tulajdonságok állíthatók a (104) egyenletben szereplő P, B, ill. Q_{damp} paraméterekkel?**

Válasz: A paraméterek állítása több szempont alapján történhet. Egyrészt fontos minden a priori információ, ami jel frekvenciájának változási sebességéről, nagyságáról rendelkezésünkre áll. A frekvenciadrift nagyon rövid idejű és kis mértékű változását nem érdemes az AFA-val lekövetni, mert ezt maga a Fourier analizátor a fázishiba korrekciójával kompenzálja. A frekvenciadrift rövid idejű alapvonal driftjét praktikus követni, és a Q_{damp} paraméterrel a szűrés alapvető időállandóját beállítani. Mind a P, mind a B paraméterrel állított mechanizmusok lokális szűrést végeznek a frekvenciabecslőn. Itt a késleltetés ill. számításigény kompromisszum határozhatja meg, hogy melyik paraméterrel érjük el kb. ugyanazt a hatást. A P késleltetés memóriát igényel az utolsó P minta tárolására. A Fourier együtthatók átlagolása (B paraméterrel állítva) számításigényes, memóriát is igényel az utolsó B minta tárolására, de kisebb késleltetéssel elérhető ugyanaz a zajszűrési teljesítmény, mint a késleltetés állításával.

8. Opponensi kérdés/megjegyzés: **Született-e referált publikáció a 4.4 alfejezetben ismertetett eredményekből?**

Válasz: A mintavételezési jitter szinuszillesztésre gyakorolt hatásának leírását a közeljövőben tervezem publikálni. A cikk érdemi része elkészült már.

9. Opponensi kérdés/megjegyzés: **Miből származik a (139) egyenletben szereplő zaj (e), és milyen tulajdonságokat tételezünk fel róla? Ez alapján torzítatlan lesz-e a kapott becslés?**

Válasz: A kérdéses zaj a motor fázisfeszültségeinek mérési pontatlanságából, AD átalakító véges bitszámából származik. (A d ill. q irányú komponenseket a forgó koordinátarendszerben a fentiekből származtatjuk.)

Az $\underline{U}_{mért} = \underline{\underline{W}}\,\underline{P} + \underline{e}$ egyenletrendszer LS megoldása a mátrix Moore-Penrose pszeudo inverzének felhasználását eredményezi, függetlenül $\underline{e}$ tulajdonságaitól. A levezetés során még azt sem kell feltételeznünk, hogy a zavarás sztochasztikus [3].

Ha feltételezzük, hogy a zavarás sztochasztikus, a zaj várható értéke 0, varianciája $var\{e\} = \sigma^2 I$, akkor az LS becslő torzítatlan is egyben. Amennyiben a zaj várható értéke nem nulla, a becslő torzított. A disszertációban hivatkozott alkalmazásban ismereteim szerint a mérési zaj várható értéke ideális esetben nulla. Az AD átalakító azonban a gyártási pontatlanság miatt mindig rendelkezik ofszet hibával, integrális és differenciális nemlinearitással, ami a kvantálási zaj nulla várható értékét elrontja. Ennek mértéke egy nagy bitszámú AD átalakító esetén kicsi, de elvileg torzítást hoz be az LS becslés során.

10. Opponensi kérdés/megjegyzés: **A (140) egyenletben az áramok deriváltjainak nagyon egyszerű közelítései szerepelnek. Javíthat-e a becslés minőségén pontosabb deriváltközelítő eljárás alkalmazása?**

    Válasz: Köszönöm a javaslatot. Az áramok deriváltjaira egy pontosabb közelítő összefüggés biztos, hogy javít a minőségen. Ennek mértékét azonban nem vizsgáltam.

Hivatkozások:

[1] P. Crilly, „A Quantitative Evaluation of Various Iterative Deconvolution Algorithms, ” IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 40, No. 3, 1991, pp. 558-562.

[2] Tamás B Bakó, Tamás Dabóczi, „Improved-Speed Parameter Tuning of Deconvolution Algorithm,” IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT 65:(7) pp. 1568-1576. (2016)

[3] Schnell L., „Jelek és rendszerek méréstechnikája,” 3.5 fejezet, Legkisebb négyzetes hibájú becslők, Műszaki könyvkiadó, 1985.

Budapest, 2018. 12. 03.

Dabóczi Tamás

Dabóczi Tamás