

Adaptív jelfeldolgozó eljárások vizsgálata

Ph.D. értekezés tézisei

Simon Gyula

okleveles villamosmérnök

Témavezető: Dr. Péceli Gábor
a műszaki tudományok doktora

Budapesti Műszaki Egyetem
Műszer- és Méréstechnika Tanszék

1996

1. Előzmények és célkitűzések

A digitális jelfeldolgozás hardver és szoftver eszközeinek fejlődésével a környezet változásait követni tudó, alkalmazkodni és tanulni képes adaptív eljárások már kommersz, hétköznapijainkban alkalmazott eszközökben is egyre nagyobb számban jelennek meg. A digitális jelfeldolgozó processzorok teljesítmény/ár viszonyának javulásával egyre nagyobb bonyolultságú adaptív algoritmusok valósidejű mérés technikai alkalmazása válik lehetővé elérhető áru eszközök felhasználásával.

A gyakorlati alkalmazások készítői azokat az eljárásokat preferálják, amelyek jól kézbe tarthatók és a hatékonyság, valamint a „megbízhatóság” szempontjából egyaránt kedvezőek. Ez utóbbi jellegzetesen az eljárás stabilitásával, ill. konvergenciájával kapcsolatos kérdéseket veti fel. A bonyolult, nemlineáris viselkedést produkáló adaptív algoritmusok esetében ezek a kérdések a témakör „nehéz” kérdései közé tartoznak, az eljárások konvergencia-tulajdonságait gyakran csak tapasztalati úton sikerül meghatározni.

A fennálló problémák elemzése alapján célul tűztem ki olyan új algoritmusok és vizsgálati módszerek kidolgozását, amelyek lehetővé teszik tervezést segítő megfontolások és eljárások létrehozását a mérés technikai gyakorlat számára fontos modellillesztési, ill. jelkövetési feladatok esetében.

A dolgozat első vizsgált problémaköre az alulmodellezésből eredő, jellegzetesen multimodális hibafelülettel jellemezhető illesztési feladatok konvergencia kérdéseit öleli fel gradiens alapú algoritmusok esetére. Az alulmodellezés problémája gyakran felmerül modellillesztési feladatok megoldása során. Egyes esetekben cél a modell fokszámának alacsonyan tartása, illetve ilyen peremfeltételek melletti optimális becslő előállítás, máskor az alulmodellezés egyszerűen fizikai kényszer (túl nagy, esetleg végtelen fokszámú rendszerek modellezése esetén). Mindkét esetben a becslőt előállító eljárás meg kell küzdjön a pontatlan modellezésből eredő problémákkal.

A modellillesztési feladatok kedvelt, alacsony számítási komplexitású, egyszerű és jól kézbe tartható algoritmusai a gradiens alapú keresési módszereken alapulnak. A szemléletes fizikai tartalommal bíró, ún. Output Error megközelítés [SS82] egy olyan L_2 térben definiált hibafelületen történő keresést valósít meg, melynek globális minimumhelye az adott fokszámú modell kimeneti hibateljesítményét minimalizáló paraméterkészletet szolgáltatja.

Sajnos a hibafelület gyakran multimodális, így a gradiens keresés a kezdeti feltételektől függően más és más szuboptimális megoldásokat szolgáltathat. Egy másik kedvelt megközelítési mód, az ún. Equation Error módszer [Shy89] kiküszöböli ugyan a lokális minimumokat, de ennek becslője torzított.

Az ismert gradiens alapú algoritmusok tanulmányozása után célul tűztem ki olyan algoritmus kifejlesztését, amely ötvözve az ismert algoritmusok kedvező tulajdonságait, képes a multimodális hibafelületen való keresésre a lokális minimumba való konvergálás esélyének csökkentésével.

Az értekezés második nagy problémaköre a változó alapharmonikus frekvenciájú periodikus jelek mérés technikájához kapcsolódik. Ezek a módszerek kiemelt fontosságúak a legkülönbözőbb rezgésdiagnosztikai vizsgálatokban, továbbá a nagy pontosságú, kalibrációs célú ipari frekvenciás mérőrendszerekben.

A hagyományos, Fourier transzformáción alapuló spektrumbecslő eljárások – a becslési eljárásokba épített jelmodell egyszerűsége miatt – nem képesek változó, ismeretlen frekvenciájú jelek spektrumának igen nagy pontossági igényeket kielégítő mérésére. A probléma megoldásának egy lehetséges módja olyan becslési eljárások tervezése, amelyek képesek az ismeretlen alapharmonikus frekvencia pontos meghatározására, valamint ennek alapján a Fourier transzformáció alkalmas pozíciókban való számítására. A feladat megoldására optimális eszköznek kínálkozik az adaptív Fourier analízátor (AFA) [Nagy92]. Az algoritmus számos ipari célú berendezésben bizonyította kitűnő sebességi és pontossági tulajdonságait, valamint robusztusságát. A konvergencia-tulajdonságok elméleti vizsgálata azonban eddig még nem vezetett eredményre.

Az AFA algoritmus vizsgálata során szerzett kedvező tapasztalatok alapján célul tűztem ki a struktúrában és az adaptációs mechanizmusban rejlő továbbfejlesztési lehetőségek vizsgálatát, valamint olyan változatok létrehozását, amelyek lehetővé teszik a konvergencia-tulajdonságok analizését.

2. Vizsgálati módszerek

Az elvégzett kutatások az irodalomból ismert eljárások áttanulmányozása alapján új algoritmusok és vizsgálati módszerek kidolgozását jelentették

A négyzetes kimeneti hibafelület jól kézbentartható hibakritériumot ad a modellillesztési feladatok során. Lehetőséget ad továbbá nagyon egyszerű és robusztus gradiens alapú keresési algoritmusok definiálására. Az irodalomban alapvető fontosságú az ún. Output Error (OE) algoritmus, amely a négyzetes kimeneti hibafelület minimumát keresi. Az algoritmus jól használható, amennyiben a hibafelület nem tartalmaz lokális minimumokat. A másik alapvető megközelítési mód legegyszerűbb képviselője az Equation Error (EE) algoritmus, amely nem a kimeneti hibafelületet minimalizálja ugyan, de egyes esetekben a kapott minimumhely megegyezik a kimeneti hibafelület minimumhelyével. Sajnos az OE hibafelület unimodalitásának, valamint az EE hibafelület torzításmentességének feltételei a gyakorlatban ritkán teljesülnek. Vizsgálataimhoz az alulmodellezés gyakori esetéből indultam ki, amely okozhatja a kimeneti hibafelület multimodalitását, valamint az EE hibafelület torzítását.

Az irodalomban alulmodellezett estekre is tárgyalt algoritmusok tanulmányozása során új leírási módot adtam ezen algoritmusok keresési eljárásainak tárgyalására. Minden, nem valódi kimeneti hiba-gradienst használó algoritmushoz hozzárendelhető egy olyan „fiktív hibafelület”, amely segítségével az algoritmus keresési eljárása egy egyszerű, az adott fiktív hibafelületen történő gradiens keresés segítségével jellemezhető. Ily módon az algoritmusok konvergencia-tulajdonságai visszavezethetők a hozzárendelt fiktív hibafelület tulajdonságaira. A fiktív hibafelületeket általánosítva definiáltam a dinamikus fiktív hibafelületeket, amelyek szélesebb variációs lehetőséget nyújtanak.

Meghatároztam azokat az elvárásokat, amelyek a statikus, illetve dinamikus fiktív hibafelületek globális konvergenciáját garantálják. Ezek alapján lehetőség nyílt egy olyan algoritmus kidolgozására, amely az OE és EE hibafelületek kombinálásából hozza létre saját dinamikus fiktív hibafelületét. Az algoritmus hibafelülete szemléletes módon, alakját gumiszőnyeg-szerűen változtatva úszik át az EE hibafelületből az OE hibafelületbe.

Az új CGA algoritmust alacsony fokszámú szimulációs példákon keresztül összehasonlítottam olyan algoritmusokkal, amelyeket az irodalomban alulmodellezett esetekre is

javasolnak. Az eredmények tanúsága szerint a CGA még olyankor is képes volt a globális konvergencia biztosítására, amikor a „majdnem globálisan konvergens” tulajdonságú algoritmusok tévedtek.

A javasolt algoritmus globális konvergencia-tulajdonságát egy egyszerű esetre sikerült elméleti úton is bebizonyítani.

A dolgozat másik nagy témakörének vizsgálata az AFA algoritmus struktúrájának és adaptációs mechanizmusának elemzését, valamint ezek különböző módosításainak vizsgálatát foglalja magában.

Az AFA algoritmus adaptációs mechanizmusa a bemenő jel alapharmonikusát igyekszik megragadni. Az algoritmus elemzésekor nyilvánvalóvá vált, hogy a konvergencia-tulajdonságok romlásáért nagyrészt a bemenő jelnek azon nem alapharmonikus komponensei felelősek, amelyek az adaptációt vezérlő jelbe szűrődnek. Ezen vezérlő jel jel/zaj-viszonyának javulása az algoritmus konvergencia-tulajdonságainak javulását vonja maga után. A struktúra egyes csatornáinak sávszűrőként való felfogása hatékony segédeszköznek bizonyult a probléma leírására. Ezért az elrendezés módosításának olyan lehetőségeit vizsgáltam, amelyek képesek az adaptációt vezérlő jel javítására a hozzá tartozó csatorna megfelelő átalakításával.

A hagyományos DFT alapú jelfeldolgozás körében ismert ablakozási módszerek vizsgálata alapján megmutattam, hogy ezek egyszerű módon alkalmazhatók az adaptív struktúra változó alappontjainak esetére is. Létrehoztam az ablakfüggvények segítségével működő adaptív Fourier-analizátort. A tulajdonságok vizsgálata során kiderült, hogy tetszőleges bemenő jelek esetén az ablakozás szükségessé teszi a struktúra fokszámanak növelését, ami az algoritmus ablakozással elért sebesség-növekedését visszaveti.

A módosítás másik irányát a rekurzív DFT számítására használt rezonátoros struktúrában rejlő lehetőségek jelölték ki. Megvizsgáltam a FIR beállítás lehetőségeit, valamint ennek hatását az adaptív algoritmusokra. Kidolgoztam a Lagrange-interpolációs eljárás általánosításaként az Hermite-alapú adaptív struktúrát, meghatároztam ennek kedvező alakját és paramétereinek származtatási módját. Megvizsgáltam az implementációs szempontból fontos számítási komplexitás kérdését, alternatív megoldást javasoltam a nagy számítási terhelés csökkentésére.

A FIR struktúrák adaptációs mechanizmusának blokkos végrehajtásával létrehoztam a blokk-adaptív Fourier analízátorokat. A módosítás számítási nyereséget von maga után, valamint lehetővé teszi a FIR beállításban rejlő előnyök kihasználását az adaptációs mechanizmus leírására.

A struktúra állapotváltozó-trajektóriáinak elemzése után egy bemenő jelmodell felállításával elégséges feltételeket tudtam megfogalmazni bizonyos konvergencia-tulajdonságok teljesülésére. Ezek alapján konstruktív módszert dolgoztam ki a blokk-adaptív algoritmusok konvergencia-tartományának, valamint a megfelelő blokkhosszúságnak meghatározására.

A kidolgozott leírási mód a hagyományos stabilitás-elméleti módszerekkel együtt hatékony eszköznek bizonyult az algoritmusok stabilitási tulajdonságainak elemzésére mind zajmentes esetben, mind zavarok jelenlétében. Ez utóbbi kérdéskör vizsgálatát sztochasztikus és periodikus zavarok esetén is elvégeztem, meghatároztam a zavar hatására maradó hibák becslőit is.

A javasolt algoritmusok kipróbálását és összehasonlítását MATLAB környezetben végeztem. A konvergencia-tulajdonságok elemzésére kidolgozott módszerhez számítógépes kiértékelési módot adtam, amelyhez elkészítettem a MATLAB alatt futó programokat is. Ennek segítségével a blokk-adaptív struktúrák esetén sikerült megmutatni az ablakozás, valamint az Hermite-alapú struktúra előnyeit.

3. Az új tudományos eredmények összefoglalása

1. Tézis. Multimodális hibafelületek esetére új megközelítési módot javasoltam gradiens alapú algoritmusok tárgyalására. Új algoritmust javasoltam, amely egyes egyszerű esetekben bizonyíthatóan globálisan konvergens, míg bonyolultabb esetekben a szimulációs vizsgálatok tanúsága szerint megnöveli a lokális minimumok elkerülésének esélyeit.

- a) Definiáltam a statikus és dinamikus fiktív hibafelületek fogalmát, valamint megadtam azokat az elvárásokat, amelyek teljesülése esetén az ilyen fiktív hibafelület biztosíthatja a gradiens keresés globális konvergenciáját.
- b) Rámutattam, hogy a fiktív hibafelület fogalmának bevezetésével egységes keretben tárgyalhatók mindazon gradiens alapú algoritmusok, amelyek a multimodális kimeneti (OE) hibafelület minimalizálását tűzik ki célul, de a beépített kereső eljárások nem a kimeneti hibafelülethez tartozó gradiens értékét használják.
- c) Új dinamikus fiktív hibafelületet használó algoritmust definiáltam (kompozit gradiens algoritmus, CGA). Az algoritmus erősen alulmodellezett esetekben jobb tulajdonságokat mutat, mint az eddig ismert algoritmusok. Bebizonyítottam az algoritmus globális konvergenciáját egy alacsony fokszámú esetre.

A tézis szemléletes tárgyalásmódot ajánl mindazon gradiens alapú algoritmusok esetére, amelyek a kimeneti-hiba jellegű mennyiség minimalizálását tűzik ki célul, amikor a hibafelület maga lokális minimumokkal terhes. A lokális minimumok létrejötte az igen gyakori alulmodellezés miatt valós veszélyt jelent az egyszerű struktúrájú, „rövidlátó” gradiens algoritmusokra. A hagyományos gradiens alapú algoritmusok legjobb tulajdonságokat felmutató ismert változatai is a problémának csak közelítő megoldását adják. A javasolt új algoritmus a szimulációs eredmények szerint biztató eredményeket ad olyan erősen kiélezett esetekben is, amikor más ismert algoritmusok hibáznak. Az algoritmus globális konvergenciáját csak igen egyszerű esetekre sikerült elméletileg bizonyítani.

2. Tézis. Megadtam a periodikus jelek mérésére szolgáló adaptív Fourier-analizátor algoritmus lehetséges kiterjesztéseit egyrészt a hagyományos spektrumbecslési eljárások, másrészt a struktúra által ajánlott speciális módszerek irányában.

- a) Megvizsgáltam a frekvenciatartománybeli ablakozás lehetőségeit nem egyenletes elhelyezkedésű alappontok esetén az ablakfüggvények koszinuszfüggvények összegeként definiált osztályára. Megadtam az általánosított ablakfüggvények együtthatóinak származtatásának módját. Definiáltam az ablakfüggvényeket használó adaptív Fourier-analizátor (WAFA) algoritmust. Ráműtattam, hogy az ablakfüggvények alkalmazása egyrészt az amplitúdóbecslés pontosságát növeli, másrészt módosítja az adaptív algoritmus konvergencia-tulajdonságait. Ráműtattam, hogy az adaptációt irányító jelkomponens jel/zaj-viszonyának javulása bizonyos esetekben szélesebb konvergencia-tartományt és gyorsabb konvergenciát eredményezhet.
- b) Megvizsgáltam a struktúra FIR beállításának feltételeit, illetve ennek hatását a konvergencia-tulajdonságokra. Megadtam a Lagrange és Hermite interpoláción alapuló struktúrák véges impulzusválaszú adaptív változatának algoritmusait (LAFA, HAFA). Meghatároztam a rezonátoros Hermite-struktúra paramétereinek számítására szolgáló analitikus összefüggéseket a pólusok tetszőleges elhelyezkedése és multiplicitása esetére.
- c) A véges impulzusválaszú struktúrákból származtattam a blokk-adaptív algoritmusokat (BAFA, WBAFA, HBAFA). Ráműtattam, hogy a blokkos működtetés egyrészt lehetővé teszi a számítási komplexitás csökkentését, másrészt ezáltal lehetővé válik az algoritmusok konvergenciájának elméleti analízise is.

A tézis bemutatja a nagy gyakorlati fontossággal bíró adaptív Fourier-analizátor algoritmus struktúrájában rejlő új lehetőségeket. A strukturális, illetve algoritmikus szintű átalakítások segítségével létrehozhatók kedvezőbb konvergencia-tulajdonságú algoritmusok kiélezett üzemi körülményekre (pl. igen magas felharmonikus-tartalom), másrészt egyes módosítások lehetővé teszik az algoritmusok elméleti szintű elemzését is.

3. *Tézis. Konstruktív módszert dolgoztam ki blokk-adaptív Fourier-analizátor struktúrák analizisére, melynek segítségével konvergencia-tulajdonságokat garantáló tervezési összefüggések fogalmazhatók meg.*

- a) A bemenőjel spektrumburkolója egy felső becslőjének előzetes ismeretében elégséges feltételeket fogalmaztam meg arra, hogy a BAFA algoritmus frekvenciabecslőjének hibája az adaptációs lépések során csökkenjen. Ennek alapján módszert adtam a bemenő frekvencia és a kezdeti frekvenciabecslő olyan tartományának meghatározására, ahol a frekvenciabecslő abszolút monoton módon konvergál a pontos frekvencia-értékhez. Módszert adtam továbbá a konvergencia-tartományt definiáló feltételek számítógépes kiértékelésére véges rács felett. Tervezési összefüggéseket fogalmaztam meg az algoritmus blokkhosszúságát definiáló paraméterének meghatározására.
- b) Zajmentes bemenőjel esetre bebizonyítottam, hogy az algoritmus frekvenciabecslője a fenti tartományon exponenciálisan stabil. Ez alapján módszert adtam a frekvenciabecslő konvergencia-sebességének worst-case becslésére. Bebizonyítottam továbbá, hogy a BAFA algoritmus amplitúdóbecslői egyenletesen aszimptotikusan stabilak.
- c) Megmutattam, hogy a zajmentes esetre javasolt analízis-módszer egyszerűen kiegészíthető olyan esetekre is, amikor a bemenő jel zavaró (zaj-, vagy nem modellezett periodikus) komponenseket tartalmaz. Megadtam a konvergencia-tartományt definiáló összefüggéseket zavarhatások jelenlétében. Rámutattam, hogy a zavarok egyrészt csökkentik a konvergencia-tartomány méretét, másrészt a becslők maradó hibáját idézik elő.
- d) Bebizonyítottam, hogy zavarhatások jelenlétében a BAFA algoritmus totálisan stabil. Megadtam a zavarok hatására fellépő maradó frekvencia-hiba, valamint az amplitúdóbecslők hibájának egy *worst-case* becslését a zavarhatások függvényében.
- e) Megmutattam, hogy a javasolt analízis módszer valamennyi blokk-adaptív algoritmus esetére (WBAFA, HBAFA) egyszerűen továbbvihető. Az analízis módszer alkalmazásával megmutattam, hogy a blokk-adaptív struktúrák esetén a konvergencia-tartomány valóban előnyösen módosítható az ablakozás (WBAFA), illetve a többszörös pólusú struktúrák (HBAFA) segítségével.

A tézisben javasolt analízis módszer segítségével lehetővé válik olyan algoritmusok tervezése, amelyek stabilitási tulajdonságai jól definiált üzemi körülmények között garantálhatók. A gyakorlatban sikerrel alkalmazott AFA algoritmus módosításával – csekély számítási

komplexitás növekedés árán – az eredeti algoritmus kedvező sebességi és pontossági tulajdonságait megőrizve ezen tulajdonságok egyúttal tervezhetővé és garantálhatóvá is váltak. Bár a konkrét analízis módszer kifejezetten az adaptív Fourier-analizátorok vizsgálatára lett kifejlesztve, az eljárás alapgondolata minden olyan adaptív struktúra elemzésének lehetőségét is kínálja, ahol a szakaszonkénti *dead-beat* üzemeltetés az adott struktúra megfelelő átalakításával megoldható.

4. Az eredmények hasznosítása

A javasolt modellillesztési eljárás alkalmazható minden olyan esetben, ahol az ismeretlen rendszer és az illesztett rendszer közti fokszámkülönbség multimodális hibafelületet hoz létre. A javasolt algoritmus mintájára újabb fiktív hibafelületeket használó eljárások hozhatók létre fokszámredukciót végrehajtó becslési eljárások számára. A javasolt eljárás tulajdonságainak vizsgálata zajos közegben, illetve nem fehér spektrumú bemenőjel estére még nem megoldott.

A periodikus jelek mérésére használt AFA algoritmus igen nagy jelentőségű alkalmazás-technológiai szempontból. A javasolt módosítások lehetővé teszik egyrészt szélsőségesebb körülmények közötti alkalmazását, másrészt a blokk-adaptív struktúrák esetén már a tervezési fázisban meghatározhatók a konvergencia-tulajdonságok, illetve ezek a megfelelő blokkhosszúsággal a szükségleteknek megfelelően beállíthatók. Így olyan alkalmazásokban, ahol adott, lehetőleg minél szélesebb üzemi tartományban garantált működésre van szükség, az új algoritmusok alkalmazása indokolt.

A javasolt konvergencia-analízis módszer valamennyi blokk-adaptív Fourier-analizátor struktúra esetén alkalmazható, valamint az általánosítás lehetősége fennáll más adaptív algoritmusok esetére is.

Hivatkozások:

- [SS82] T. Söderström and P. Stoica, „Some Properties of the Output Error Method,” *Automatica*, Vol. 18., No. 1, pp. 93-99, Jan. 1982.
- [Shy89] J. J. Shynk, „Adaptive IIR Filtering,” *IEEE ASSP Magazine*, Vol. 6, No. 2, pp. 4-21, Apr. 1989.
- [Nagy92] F. Nagy, „Measurement of Signal Parameters using Nonlinear Observers,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, Vol. IM-41, pp. 152-155, Feb. 1992.

5. Az értekezés témakörében készült publikációk

Referált folyóiratok:

- [1] Gy. Simon and G. Péceli, "A New Composite Gradient Algorithm to Achieve Global Convergence." IEEE Trans. Circuits Syst. II, vol. 42, pp. 681-684, Oct. 1995.
- [2] Gy. Simon and G. Péceli, "Convergence Properties of an Adaptive Fourier Analyzer." IEEE Trans. Circuits Syst. II, elfogadva.

Referált konferencia-kiadványok:

- [3] Gy. Simon and G. Péceli, "Adaptive Filtering with Fictitious Error Surfaces to Achieve Global Convergence." in Proc. 5th IFAC Symposium, Budapest 1995, pp. 159-164.
- [4] G. Péceli and Gy. Simon, "Generalization of the Frequency Sampling Method." IEEE Instrumentation and Measurement Conference, Brussels, Belgium, June 1996, pp. 339-343.

Egyéb konferenciák és szimpóziumok:

- [5] Gy. Simon, "Efficient Implementation of Recursive Methods." 1st Workshop on Antinoise, Delft 1993, pp. 1-17.
- [6] Gy. Simon, "The LMS Algorithm Family," 2nd Workshop on Antinoise, Budapest 1993, pp. I-1.1-16.
- [7] Simon Gyula, "Rekurzív algoritmusok elemzése: Az LMS algoritmus és módosítási." XXIX. Ipari Elektronikus Mérés és szabályozás szimpózium, Balatonszéplak 1993, pp. 153-167.
- [8] Gy. Simon, "The LMS Algorithm Family," Proceedings of the 1994 Mini-Symposium, TUB DMIE, Budapest 1994.