



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VILLAMOSMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
MÉRÉSTECHNIKA ÉS INFORMÁCIÓS RENDSZEREK TANSZÉK

Rezonátor alapú jelfeldolgozás szenzorhálózatokban

Orosz György

Doktori (PhD) értekezés tézislevele
2012

Témavezető:
Konzulensek:

Dr. Péceli Gábor
Dr. Péceli Gábor, dr. Sujbert László

2012 Orosz György
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék
1117 Budapest, XI. Magyar Tudósok körútja 2.
I. épület E317. szoba
Tel: (1) 463 3597, Fax: (1) 463 4112,
Email: orosz@mit.bme.hu

1. Előzmények és célkitűzések

Napjainkban egyre szélesebb körben alkalmazunk elosztott jelfeldolgozó rendszereket. Ezekben a jelérzékelés és -feldolgozás térben szétválik, és közöttük jellegzetesen valamilyen megosztott csatornán hálózati adatátvitelt alakítanak ki. Ezen architektúra előnyei a részegységek jelvezetékekkel történő közvetlen összekötésével szemben [Math05, Zamp08]:

- rugalmas felépítés,
- könnyű telepíthetőség,
- egyszerű skálázhatóság.

A dolgozat célja az ilyen, hálózati kommunikáció segítségével csatlakoztatott érzékelőket tartalmazó visszacsatolt jelfeldolgozó rendszerek vizsgálata. Kutatásaim fókuszában az elsősorban periodikus jelek feldolgozására hatékonyan alkalmazható, úgynevezett rezonátor alapú struktúrák állnak [Pec86]. Ezen belül is főként a visszacsatolásban dinamikus rendszert tartalmazó rezonátoros struktúrával foglalkozom [Sujb97], amely periodikus zavarjelek hatékony kompenzálására alkalmas szabályozási körnek tekinthető.

A hálózaton keresztül visszacsatolt rendszerek kutatását egyetemi tanulmányaim során az aktív zajcsökkentés és a szenzorhálózatok területén szerzett tapasztalataim alapozták meg. Az aktív zajcsökkentés olyan alkalmazás, ahol a cél különböző akusztikus zavarjelek kioltása hangszórókból kiadott úgynevezett ellenzaj segítségével. Az akusztikus zajok egy része jelentős periodikus összetevőket tartalmaz, így a rezonátor alapú struktúrák alkalmazása kézenfekvő [Sujb97]. Mivel az elnyomandó zajt érzékelő mikrofonok a térben elosztottan helyezkednek el, így felmerül a vezeték nélküli adattovábbítás igénye is. A szenzorhálózatok [Bur09] erre a célra, mint kifejezetten jelérzékelésre és -továbbításra kifejlesztett rendszerek, kézenfekvő megoldást kínálnak. Habár a dolgozatban közölt eredményeim kidolgozása során jelentős szerepet játszottak az aktív zajcsökkentés által támasztott igények és a szenzorhálózatok által kínált lehetőségek viszonyai, mindazonáltal az eredmények nem korlátozódnak sem a szenzorhálózatokra, sem az aktív zajcsökkentésre, hanem általános hálózati adattovábbítás esetén is érvényesek. A rezonátor alapú struktúrákon kívül érintem az LMS (Least Mean Square) alapú algoritmusok alkalmazását is [Wid96], amelyek bizonyos szempontból hasonlóságot mutatnak a rezonátor alapú struktúrákkal.

A rezonátor és LMS alapú eljárások egyik közös jellemzője, hogy úgynevezett jelmodell alapú jelfeldolgozást valósítanak meg: a potenciálisan előforduló jelekre felállítanak egy jelmodellt, és a struktúrájuk ennek megfelelően került kialakításra. A rezonátor alapú struktúrák periodikus, míg az LMS alapú eljárások sztochasztikus jelmodellt feltételeznek.

A szenzorhálózatok feltörekvő technológiaként és a várhatóan egyre olcsóbb, tömegterméknek számító hálózati eszközei miatt ígéretesnek tűnnek mint a hálózati jelérzékelésre felhasználható rendszerek. Szenzorhálózatok gyűjtőnév alatt említjük általában azon rendszereket, amelyek több, valamilyen fizikai mennyiség érzékelésére alkalmas, egymással megosztott csatornán kommunikációra képes, intelligens egységből épülnek

föl [Bur09]. A szenzorok közötti kommunikáció általában vezeték nélküli, rádiós csatornán történik. A processzorral ellátott intelligens eszközök képesek önálló működésre, valamint alapvető vezérlési és feldolgozási feladatok végrehajtására.

A szenzorhálózatok kifejlesztésekor fő szempont a gazdaságos gyártás és üzemeltetés, valamint az alacsony energiafogyasztás volt, így az erőforrásaik általában korlátozottak. A valós idejű rendszerek által támasztott szigorú követelmények a szűkös erőforrások miatt nem mindig engedik meg a szenzorhálózatok által nyújtott tervezői szabadság teljes kihasználását (például nagyméretű ad-hoc hálózatok kialakítása), mindazonáltal a szenzorhálózatok által kínált lehetőségek még bizonyos megszorítások mellett is ígéretessé teszik valós idejű, visszacsatolt rendszerekben történő felhasználásuk vizsgálatát. A szűkös erőforrások miatt azonban számos megoldandó technikai és tudományos kérdés vizsgálata szükséges.

Mivel a vizsgált rendszerekben a hálózat a valós idejű visszacsatoló ág szerves részét képezi, így jelenléte alapvetően befolyásolja a teljes rendszer működését, és számos kérdést vet fel. Ezek közül kiemelten fontos [Math05, Zamp08]:

- az elosztott jelérzékelés és jelfeldolgozás,
- a korlátozott adatátviteli sebesség,
- az adatvesztés.

Dolgozatomat ezen három fő témakör köré szerveztem: megvizsgálom a hálózati adatátvitel hatását a jelfeldolgozó algoritmusokra, és különböző módszereket javaslok a problémák megoldására. Habár a fenti problémakörökkel bármely hálózati jelátvitel alkalmazása esetén szembesülünk, szenzorhálózatok esetében a szűkös erőforrások miatt fokozottan számolni kell velük.

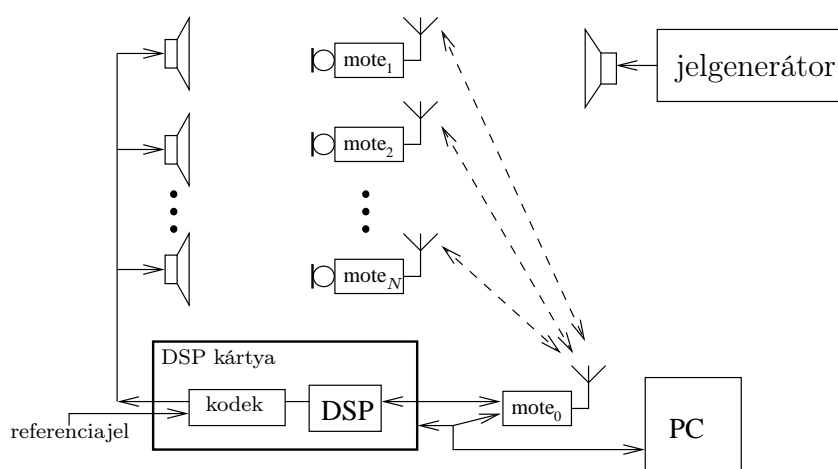
Manapság a valós idejű, hálózaton keresztül visszacsatolt rendszerek (NCS: Networked Controlled Systems) vizsgálata intenzív kutatási terület, eredményeimmel ezen kutatásokhoz járulok hozzá.

2. Vizsgálati módszerek

A kutatással kapcsolatos munkám a következő módon strukturálható:

- Tapasztalatok gyűjtése egy mintarendszer megvalósítása kapcsán.
- Elméleti eredmények kidolgozása:
 - Létező algoritmusok vizsgálata hálózati adattovábbítás esetén.
 - Új algoritmusok kidolgozása a hálózati adattovábbításhoz igazodva.

2.1. A kutatás gyakorlati módszere



1. ábra. Vezeték nélküli tesztkörnyezet.

A problémakörben történő gyakorlati tapasztalatszerzésem az 1. ábrán látható vezeték nélküli aktív zajcsökkentő rendszer kiépítésével történt. A rendszerben vezeték nélküli szenzorok ($mote_1 \dots mote_N$) valósítják meg az elnyomandó zaj érzékelését. A szenzorhálózat egy nagyteljesítményű jelfeldolgozó (DSP) kártyához kapcsolódik, amely a szenzoroktól érkező adatok fúzióját követően kiszámítja és kiadja a hangszórókra az úgynevezett ellenzajt, amely a mikrofonok pozíciójában minimalizálja a zajteljesítményt. A szenzorhálózat és a jelfeldolgozó egység közötti kapcsolatot egy bázisállomás teremti meg ($mote_0$).

Egy aktív zajcsökkentő rendszer olyan szabályozási körnek tekinthető, amelyben cél a nulla hibajel (nulla zajszint) elérése. A visszacsatolás az akusztikus rendszeren keresztül valósul meg. A szenzorok közvetlenül a zaj és az ellenzaj szuperpozíciójaként kialakuló hibajelet érzékelik.

A rendszer tervezése és megvalósítása során tapasztalatot szereztem a vezeték nélküli adattovábbítással kapcsolatban, és megismerkedtem a vezeték nélküli szenzorhálózati elemek által nyújtott lehetőségekkel. A gyakorlati tapasztalatok segítettek az elméleti kutatások célkitűzéseinek megfogalmazásában.

2.2. A kutatás elméleti módszerei

A hálózaton keresztül visszacsatolt valós idejű rendszerek kutatásának terén kétféle megközelítéssel találkozhatunk [Plo04]:

- 1) Algoritmusok vizsgálata és optimalizálása, figyelembe véve a hálózat hatását.
- 2) A hálózat tervezése a jelfeldolgozó rendszer igényeit figyelembe véve.

A kétféle megközelítés, egymással párhuzamosan fejlődve, a rendszer két kritikus pontját igyekszik optimalizálni, kölcsönösen figyelembe véve a követelményeket. A dolgozat eredményeinek többsége az 1)-es számú témakörbe sorolható, tehát a jelfeldolgozási algoritmusok tervezése és analízise kerül előtérbe: a hálózat által felszínre hozott problémákat a jelfeldolgozás eszközeivel igyekszem megoldani és analizálni.

A dolgozatban a következő három nagy problémakörbe csoportosítottam a megoldandó feladatokat:

Jelérzékelés és jelátvitel. A jelérzékelés és a jelátvitel a jelfeldolgozási lánc első szintjeként fontos szerepet játszik a rendszertervezésben. Az elosztott jelérzékelés és jelfeldolgozás miatt fellépő késleltetés súlyos problémákat okozhat, a változó mértékű késleltetés akár stabilitási problémákhoz is vezethet.

A témával kapcsolatban a dinamikusan visszacsatolt rezonátoros algoritmus [Sujb97] munkában megtalálható stabilitási feltételeit kihasználva kiszámítom, hogy mekkora maximális elcsúszás engedhető meg az érzékelő és feldolgozó egységek ütemezésében.

A felmerülő stabilitási problémákat az egységek szinkronizálásával oldottam meg. Felmértem a lehetséges alternatívákat, és az 1. ábrán látható struktúrának megfelelően kétlépcsős szinkronizációs eljárást dolgoztam ki: egyrészt a szenzorok és a bázisállomás, illetve a bázisállomás és a jelfeldolgozó egység között.

Kétféle rendszer szinkronizációs kérdésével foglalkoztam: vizsgáltam egy hagyományos elrendezést, amelyben a szenzorok a nyers mintákat továbbítják, illetve egy elosztott rezonátoros rendszert, amelyben a szenzorok előfeldolgozást végeznek, és a jel Fourier-együtthatóit továbbítják. Az elosztott jelfeldolgozás segítségével egyrészt elérhető bizonyos mértékű adatredukció, másrészt a lokális adatfeldolgozás miatt például növelhető a rendszer adatvesztéssel szembeni robusztussága.

A szinkronizációs algoritmusok működésének helyességét és a stabilitásra vonatkozó számításokat mérésekkel is ellenőriztem.

Kis sávszélességű kommunikációs csatorna. Mivel valós idejű rendszerekben adott mennyiségű adat továbbítására korlátozott idő áll rendelkezésre, így a kommunikációs csatorna sávszélessége szigorú korlátot jelent a rendszertervezés során [Bai07]. A kommunikációs csatornák sávszélessége a szabványok, az ár és a fogyasztás által meghatározott, így a korlátok enyhítése gyakran az intelligens szenzorok számítási kapacitásának kihasználásával történik. A számítási

kapacitást kihasználva a szenzorok elvégezhetnek bizonyos előfeldolgozást vagy adattömörítést.

A szenzorokon végzett lokális adatredukcióra az úgynevezett hibaelőjel elvet ajánlottam. Az elv mind dinamikusan visszacsatolt rezonátoros struktúra, mind FxLMS algoritmus esetén alkalmazható. A hibaelőjel alapú algoritmusok az adaptív szűrők területén a számítási igények csökkentésére régóta használt eljárások [Ger84], de dinamikusan visszacsatolt struktúrák esetén alkalmazásuk még nem ismert. Az elv egyszerű: a szenzor csupán az általa érzékelt hibajel előjelét továbbítja, így reális számítások alapján is elérhető legalább 50%-os sáv-szélességigény csökkenés a kommunikációs overheadeket is figyelembe véve.

Az algoritmus analitikus vizsgálata során támaszkodtam a hibaelőjeles algoritmusok analízisének alapvető lépéseire [Ger84], és kiterjesztettem azokat dinamikusan visszacsatolt struktúrákra. A hibaelőjeles algoritmusok jellegzetes tulajdonsága, hogy ideális esetekben sem képesek nulla hibát elérni, és általában lassú a konvergenciasebességük. Az állandósult állapotbeli hiba és a beállási idő kompromisszumos úton egy úgynevezett konvergenciaparaméter segítségével állítható be. Ezen hátrányokat enyhítendő egy olyan eljárást dolgoztam ki, amely a szenzor által érzékelt átlagos hibaszint alapján a konvergenciaparaméter adaptív hangolásával gyorsítja a beállást, és ideális esetben nulla hibaszintet is képes biztosítani.

Adatvesztés. Valós idejű rendszerekben az alapvetően bizonytalan kommunikáció miatt az adatvesztés elkerülhetetlen az adatok továbbítására fordítható véges időkorlát miatt. Dolgozatomban szükséges, illetve elégséges feltételeket adok meg arra nézve, hogy a rezonátor alapú algoritmusok állapotváltozói milyen adatvesztési mintázatok esetén konvergálnak az adatvesztés nélkül elérhető optimális értékükhöz.

A feltételeket először zajmentes esetre a rezonátoros alapstruktúrára fogalmazom meg, majd kiterjesztem őket zajos megfigyelések, valamint dinamikus visszacsatolás esetére is. Zajos megfigyelések esetén az állapotváltozók konvergenciáját várható értékben vizsgáltam [Wid96]. Dinamikus visszacsatolás esetén az adaptív szűrők vizsgálatában elterjedt kvázistacioner közelítést alkalmaztam, amely a konvergenciaparaméter kis értéke mellett ad érvényes eredményt [Wid96].

A szükséges feltétel megfogalmazásához a lineáris rendszerek megfigyelhetőségi feltételét alkalmazom [Astr90]. Az úgynevezett véges beállású rezonátoros alapstruktúra adatvesztés esetén végzett konvergenciavizsgálatát az adatvesztés nélküli esetre vezetem vissza, kihasználva az állapotátmeneti mátrixok [Pec86] munkában bemutatott speciális tulajdonságait.

A rezonátoros struktúrák állapotváltozóinak adatvesztés esetén való konvergenciáját a mátrixsorozatok konvergenciájának módszerével vizsgáltam [Rozsa91].

3. Új tudományos eredmények

1. Tézis

Szenzorhálózaton keresztül dinamikusan visszacsatolt, rezonátor alapú rendszerekben olyan jelérzékelési és jelátviteli eljárásokat dolgoztam ki, amelyek biztosítják a rendszer stabilitását. Kialakítottam egy olyan tesztrendszert, amely alkalmas a szenzorhálózat segítségével visszacsatolt valós idejű, adaptív algoritmusok gyakorlati vizsgálatára.

- 1.1. Egyszerű mintavételező és mintatovábbító szenzorok esetén megoldást adtam a mintavételezés szinkronizálására, és meghatároztam, hogy a dinamikusan visszacsatolt rezonátoros struktúra esetén a szinkronizált állapothoz képest mekkora maximális időbeni elcsúszás engedhető meg a mintavételi és jelfeldolgozási időpontok között a stabilitás biztosításához.
- 1.2. Bemutattam az elosztott, rezonátor alapú jelérzékelés szinkronizációs mechanizmusát, és meghatároztam, hogy szinkronizáció hiányában mennyi ideig marad stabil a visszacsatolt rendszer.

Kapcsolódó publikációk: [6, 1]



2. Tézis

Kifejlesztettem az úgynevezett hibaelőjeles dinamikusan visszacsatolt rezonátoros struktúrát. A hibaelőjeles algoritmus segítségével csökkenthető a rendszer visszacsatoló ágában továbbítandó adatok mennyisége.

- 2.1. A struktúra paramétereit és a visszacsatolásban lévő dinamikus rendszer impulzusválasza alapján felső korlátot adtam a visszacsatolt rendszer által állandósult állapotban elért hiba abszolút középértékére.
- 2.2. Bebizonyítottam, hogy az impulzusválaszban található késleltetést ismerve általában szűkebb felső korlát adható a hiba abszolút középértékére.
- 2.3. Alsó korlátot adtam a rendszer beállási idejére.
- 2.4. Kifejlesztettem a javított konvergenciatulajdonságokkal rendelkező hibaelőjeles rezonátoros struktúrát, és elégséges feltételt adtam a rendszer konvergenciájára. Az algoritmus a konvergenciaparaméter folyamatos hangolásával lehetővé teszi adott hibaszint elérését kisebb beállási idő mellett.

Kapcsolódó publikáció: [7]



3. Tézis

Kifejlesztettem az úgynevezett hibaelőjeles FxLMS algoritmust. A hibaelőjeles algoritmus segítségével csökkenthető a rendszer visszacsatoló ágában továbbítandó adatok mennyisége.

- 3.1. Az algoritmus paramétereit és a visszacsatolásban lévő dinamikus rendszer impulzusválasza alapján felső korlátot adtam a visszacsatolt rendszer által állandósult állapotban elért hiba abszolút középértékére.
- 3.2. Bebizonyítottam, hogy amennyiben a referenciajel Gauss-eloszlású, és az impulzusválasz késleltetést nem tartalmazó része monoton csökkenő, akkor az impulzusválaszban található késleltetést ismerve szűkebb felső korlát adható a hiba abszolút középértékére.
- 3.3. Alsó korlátot adtam a rendszer beállási idejére.
- 3.4. Kifejlesztettem a javított konvergenciatulajdonságokkal rendelkező hibaelőjeles FxLMS algoritmust, és elégséges feltételt adtam a rendszer konvergenciájára. Az algoritmus a konvergenciaparaméter folyamatos hangolásával lehetővé teszi adott hibaszint elérését kisebb beállási idő mellett.

Kapcsolódó publikáció: [2]



4. Tézis

Szükséges, illetve elégséges feltételeket adtam arra nézve, hogy adatvesztés esetén a rezonátor alapú struktúrák állapotváltozói konvergálnak-e az adatvesztés nélkül elérhető optimális értékekhez. A feltételek az adatvesztés paramétereit és a rezonátoros struktúrák beállítása alapján értékelhetők ki.

- 4.1. Szükséges feltételt adtam a rezonátor alapú megfigyelő konvergenciájára.
- 4.2. Bebizonyítottam, hogy a 4.1. feltétel egyenletes rezonátorelhelyezkedés és véges beállású megfigyelő esetében elégséges is.
- 4.3. Általános rezonátorelhelyezkedés esetén többfajta elégséges feltételt adtam a megfigyelő konvergenciájára.
- 4.4. A 4.1. és 4.3. altézisben megfogalmazott feltételeket kiterjesztettem a dinamikus visszacsatolt rezonátor alapú struktúrára. A 4.3. altézisben adott feltételeket a konvergenciaparaméter kellően alacsony értéke mellett bizonyítottam be.

Kapcsolódó publikáció: [3]

4. Az eredmények hasznosítása

A dolgozatban közölt eredmények felhasználhatók minden olyan rendszer tervezésénél és analízisének, ahol a cél periodikus zavarhatások megszüntetése, és a zavaró jelről gyűjtött információk továbbítása hálózat segítségével történik. A sávszélesség csökkentésére felhasznált úgynevezett hibaelőjel elv és annak továbbfejlesztett változata akár sztochasztikus zavarójelek esetén is alkalmazható.

A bemutatott szinkronizációs eljárások nemcsak visszacsatolt rendszerek esetén használhatók, hanem az adatgyűjtés és -feldolgozás szinkronitását megkövetelő mérőrendszerekben is.

Az adatvesztésre vonatkozó eredmények szintén alkalmazhatók olyan mérőrendszerek esetén is, ahol cél a valós idejű Fourier-analízis, és az adatgyűjtés során a mintafolyam tartalmazhat hiányzó adatokat. A bemutatott tételek segítségével elemezhetők azok az esetek, amelyek veszélyesek a rezonátor alapú rendszerek konvergenciájára nézve, illetve lehetővé teszik olyan feltételek felállítását, amelyek garantálják, hogy a rezonátor alapú struktúrák állapotváltozói az optimális értékekhez konvergálnak.

A vizsgálatokhoz kiépített tesztrendszer szerepet kap a tanszéki oktatásban az elosztott jelfeldolgozó rendszerek vizsgálata területén egy-egy részfeladat bemutatásán és vizsgálatán keresztül.

Az értekezés témakörében készült publikációk

Nemzetközi folyóiratcikkek

- [1] Gy. Orosz, L. Sujbert, G. Péceli, „Synchronization and sampling in wireless adaptive signal processing systems,” *Periodica Polytechnica-Electrical Engineering*, vol. 54, no. 1-2, pp. 59–70, 2010.
- [2] Gy. Orosz, L. Sujbert, G. Péceli, „Adaptive filtering with bandwidth constraints in the feedback path,” *Signal Processing Elsevier*, vol. 92, no. 1, pp. 130–138, Jan. 2012.
- [3] Gy. Orosz, L. Sujbert, G. Péceli, „Analysis of resonator-based harmonic estimation in case of data loss,” *IEEE Transactions of Instrumentation and Measurement*, közlésre elfogadva.

Hazai folyóiratcikkek

- [4] Orosz Gy., „Aktív zajcsökkentő rendszerek megvalósítása szenzorhálózattal,” *Elektronet*, XV. évf., 5. szám, pp. 16-19, 2006.

Nemzetközi konferenciatickek

- [5] L. Sujbert, K. Molnár, Gy. Orosz, L. Lajkó, „Wireless sensing for active noise control,” *Proc. of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Sorrento, Italy, April 24-27., 2006., pp. 123–128.
- [6] Gy. Orosz, L. Sujbert, G. Péceli, „Testbed for wireless adaptive signal processing systems,” *Proc. of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf.*, Warsaw, Poland, 1-3 May 2007., pp. 123–128.
- [7] Gy. Orosz, L. Sujbert, G. Péceli, „Spectral observer with reduced information demand,” *Proc. of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conf.-I2MTC 2008*, Victoria, Canada, 12-15 May, 2008., pp. 2155–2160.

Hazai konferenciatickek

- [8] Gy. Orosz, „Analysis of the sign-error FxLMS algorithm,” *Proc. of the 16th PhD Mini-Symposium of the Department of Measurement and Information Systems*, Budapest, Hungary, Feb. 2, 2009., pp. 56–59.
- [9] Gy. Orosz, „Introduction to sign-error spectral observer,” *Proc. of the 15th PhD Mini-Symposium of the Department of Measurement and Information Systems*, Budapest, Hungary, Feb. 4-5, 2008., pp. 16–19.

- [10] Gy. Orosz, L. Sujbert, G. Péceli, „'Real' signal processing with wireless sensor networks,” *Proc. of Regional Conference on Embedded and Ambient Systems-RCEAS 2007*, Budapest, Hungary, Nov. 22-24, 2007., pp. 141–148.
- [11] Gy. Orosz, „Testbed for wireless adaptive signal processing systems,” *Proc. of the 14th PhD Mini-Symposium of the Department of Measurement and Information Systems*, Budapest, Hungary, Feb. 5–6, 2007, pp. 96–97.

Hivatkozások

- [Astr90] K. J. Åström, B. Wittenmark, *Computer Controlled Systems, Theory and Design*, 2nd ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1990.
- [Bai07] J. Baillieul, P. J. Antsaklis, „Control and communication challenges in networked real-time systems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 9–28, Jan. 2007.
- [Bur09] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari, R. Verdone, „An overview on wireless sensor networks technology and evolution,” *Sensors*, vol. 9, no. 9, pp. 6869–6896, Aug. 2009.
- [Ger84] A. Gersho, „Adaptive filtering with binary reinforcement,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. IT-30, no. 2, pp. 191–199, Mar. 1984.
- [Math05] M. Mathiesen, G. Thonet, N. Aakwaag, „Wireless ad-hoc networks for industrial automation: current trends and future prospects,” *Proceedings of the IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic, July 4-8, 2005., pp. 89–100.
- [Pec86] G. Péceli, „A common structure for recursive discrete transforms,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-33, no. 10, pp. 1035–1036, Oct. 1986.
- [Plo04] N. J. Ploplys, P. A. Kawka, A. G. Alleyne, „Closed-loop control over wireless networks,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 24, no. 3, pp. 58–71, Jun. 2004.
- [Rozsa91] Rózsa Pál, *Lineáris Algebra és Alkalmazásai*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1991
- [Sujb97] L. Sujbert, „Periodikus zavarhatások csökkentésének aktív módszerei,” PhD disszertáció, Budapesti Műszaki Egyetem, Magyarország, 95 p., 1997.
- [Wid96] B. Widrow, *Adaptive Inverse Control*, Prentice-Hall, Inc., 1996.
- [Zamp08] S. Zampieri, „Trends in networked control systems,” *Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, July 6-11, 2008., pp. 2886–2894.