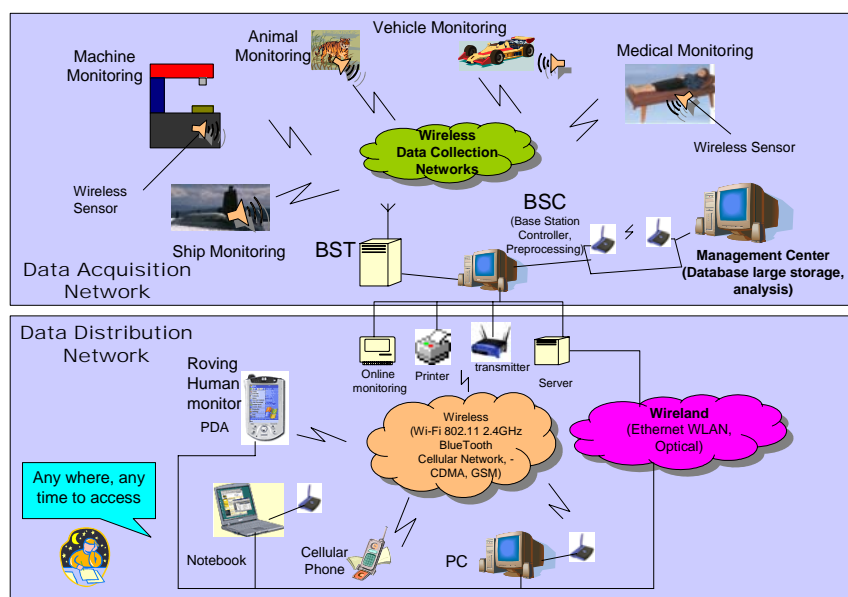


Új algoritmusok a vezeték nélküli szenzoriális kommunikációhoz

Levendovszky János, MTA doktora, egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Napjaink kommunikációs technológiáinak a fejlődését a következő elvárások motiválják: (i) minél nagyobb adatátviteli sebesség elérése; (ii) előírt megbízhatóság és minőség biztosítása az adatátvitel során; (iii) mindenhol való jelenlét; és (iv) mobilitás. Ezen igényeket a jelenlegi technológiák mellett csak korlátozott erőforrásokkal lehet kielégíteni. Például a mobil, vagy szenzoriális eszközök kis mérete miatt az adóteljesítmény limitált, amely a zajos rádiócsatornán megbízhatatlan átvitelt eredményez, illetve az adattovábbításra rendelkezésre álló rádióspektrum erősen korlátozott jellege nem támogatja a nagy adatátviteli sebességet. Ezért az erőforrások szűkössége miatt a jelenlegi kommunikációs rendszerek alapkérdése a következő: *hogyan lehet a teljesítőképességet algoritmusok segítségével növelni?*

Ez a kérdés még pregnansabban jelenik meg az informatika fejlődésének harmadik hullámában, amelyet az olcsón és tömeges formában elérhető érzékelők elterjedése miatt „szenzoriális forradalomnak” is szoktak nevezni. Ezen alkalmazásokban egy szenzorokból álló adatgyűjtő hálózat juttatja el az érzékelt mennyiségeket a bázisállomásra, ahonnan hagyományos internet alapú vagy egyéb hálózaton kerülnek szétesztásra a megfigyelések további feldolgozás céljából. Egy ilyen rendszer működését az alábbi ábra demonstrálja.



1. sz. ábra: Adatgyűjtés és adat szétesztás globális méretekben

Az erőforrások korlátozottsága főleg a szenzorokból álló adatgyűjtő hálózatra érvényes [1,2], hiszen itt a rendelkezésre álló energia nem nyerhető egy központi energiaforrásból, illetve a szenzorok nem tölthetők újra. Ezért nagy kihívás olyan új kommunikációs protokollok és algoritmusok kutatása, amelyek a limitált erőforrások hatékony kihasználására és adott teljesítőképesség elérésére képesek.

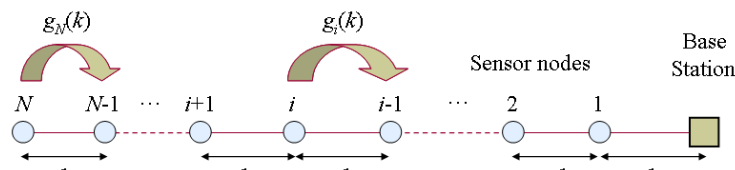
A modell és nyitott problémák

A frekvenciagazdálkodás miatti keskenysávú rádiócsatorna nagyon érzékeny a többutas terjedésből fakadó torzításokra. Ráadásul a csatornaállapot az idő függvényében változhat, amelyről nincs apriori ismeret a kommunikációs felek számára. Ezért alapvető kérdés olyan adaptív csatornaki egyenlítő algoritmusok

kidolgozása, amelyek - az adatátvitel megbízhatóságának biztosítása érdekében - egy előre ismert tanulóhalmaz (néhány vevőben is ismert leadott információs bit hatásra megfigyelt vett jel a vételi oldalon) alapján képesek a csatorna „megtanulására” és torzításainak a kompenzálására. Ezen kérdéskör a digitális kommunikáció kezdeteitől ismert [3,4], azonban az eredmények főleg csak a négyzetes hiba és a csúcstorzítás minimalizálásán alapuló kiegyenlítő algoritmusokra vonatkoztak [3]. Nyitva maradt az a probléma, hogyan lehet olyan algoritmusokat kidolgozni, amelyek a négyzetes hiba helyett a kommunikáció minősége szempontjából sokkal fontosabb bithibavalószínűséget minimalizálja. Ez a kérdéskör a hagyományos lineáris adaptív algoritmusok helyett nemlineáris algoritmusok kifejlesztését igényli. Másrészt a fenti módszerek alkalmazásához tanulóhalmazra van szükség. Mivel az időben változó csatorna miatt ezt gyakran kell ismételni, ez súlyos adatátviteli sebességbeli csökkenéshez vezethet a csomagkapcsolt hálózatokban. Ezért előtérbe került az ún. „vak” tanulási algoritmusok kutatása, amelyek képesek az ismeretlen csatorna identifikációjára tanulóhalmaz nélkül, csak a vételi jeleket megfigyelve. Matematikailag ez a sztochasztikus approximációs feladatok egy új osztályához vezet, amelyek konvergenciájára eddig még nincs általános bizonyítás.

A vezeték nélküli szenzoriális hálózatot egy két dimenziós gráf reprezentálja, amelynek csomópontjaiban a szenzorok állnak, amelyek véges energiával rendelkeznek és a bázisállomáshoz szeretnék az érzékelt adatokat eljuttatni rádiókommunikáció segítségével. Az adatok - a szenzorok által felhasznált adóteljesítménytől függően - vagy szenzorról szenzorra továbbadva, vagy akár direkt módon is eljuthatnak a bázisállomásra. A hálózat egy véletlen gráffal modellezhető, ahol mindegyik él egy valószínűségi változó (az adatátvitel sikerességének valószínűsége két node között az adóteljesítménytől és távolságtól, valamint a kurrens csatornaállapottól függ). Kérdés, hogyan lehet ebben a gráfban optimális (minimális energiafogyasztáshoz kapcsolódó) útvonalakat találni, illetve az adattovábbítás sorrendjét, hogyan lehet optimalizálni.

Ezen a gráfon egy adott útvonalat egy egydimenziós lánc topológiával is le tudunk írni, az alábbi ábra szerint.



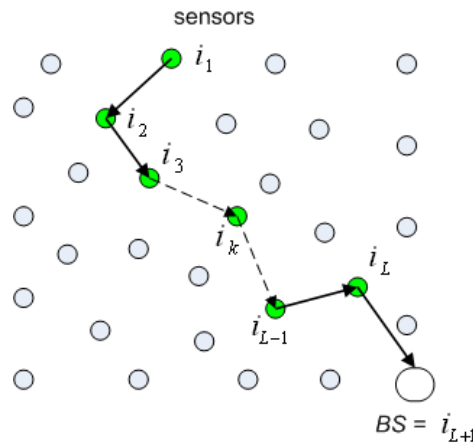
2. sz. ábra: Szenzoriális adattovábbítás egy lánc topológián

Az energiahatékony kommunikáció, ilyenkor azon küldési stratégia $\mathfrak{R}_{opt} = \{i_1, i_2, \dots, i_L\}$ meghatározását (azon node-ok kijelölését) jelenti, amelyek részt vesznek a forrás adatainak a továbbításban a bázisállomás felé. Ha csak láncban küldenénk adatokat, akkor a szomszédokra irányuló, kis távolságú adattovábbítás miatt, minden node látszólag keveset fogyaszt, ugyanakkor a bázisállomáshoz legközelebbi node merül le leghamarabb, hiszen, minden távolibb node adatainak a továbbításban is részt vesz. Ezért ez a probléma egy kombinatorikus optimalizálási feladathoz vezet, megoldásként olyan küldési stratégiát eredményezvén, amely az egyenletes lemerülést garantálja. Ehhez a szenzorokon generált forgalom statisztikai jellemzése, valamint az energiafogyasztás farokeloszlásának a becslése szükséges.

A fenti feladat általánosítása a 2D topológiára (lásd 3. sz. ábra) egy olyan optimális útvonal $\mathfrak{R}_{opt} = \{(i_1, i_2), (i_2, i_3), \dots, (i_{L-1}, i_L)\}$ megtalálása, amely minimalizálja az adattovábbításhoz szükséges összenergiát, ugyanakkor garantálja a megbízhatóságot (az adatok szenzorról szenzorra továbbítva előírt valószínűséggel érik el a bázisállomást). Ez a következő kényszeres optimalizálási feladathoz vezet

$$\mathfrak{R}_{opt} : \min_{\mathfrak{R}} \sum_{l=1}^L G_{i_l i_{l+1}} ; P(\text{sikeres adatérkezés a BS re}) = \prod_{l=1}^L \exp \left\{ \frac{-d^\alpha \Theta \sigma_Z^2}{G_{i_l i_{l+1}}} \right\} \geq 1 - \varepsilon, \text{ ahol } G_{i_l i_{l+1}} \text{ az } i_l \text{ node-ról az } i_{l+1}$$

indexű node-ra történő adatátvitel energiáját, illetve $\exp \left\{ \frac{-d^\alpha \Theta \sigma_Z^2}{G_{i_l i_{l+1}}} \right\}$ a $G_{i_l i_{l+1}}$ energiájú adatátvitel sikerességének a valószínűsége.



3. sz. ábra: Vezetéknélküli szenzoriális hálózat ahol az információ az i_1 node-ból a bázisállomás felé kerül továbbításra többi szenzor közreműködésével

Ez a feladat azért tér el a klasszikus gráfoptimalizálási feladatokról, mert nemcsak az útvonal, hanem egyúttal a gráf éleihez rendelt mértékek (energiák) optimalizálására is szükség van, amivel a kényszerfeltételt szeretnénk teljesíteni.

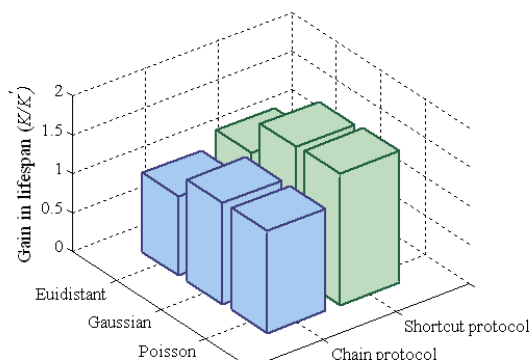
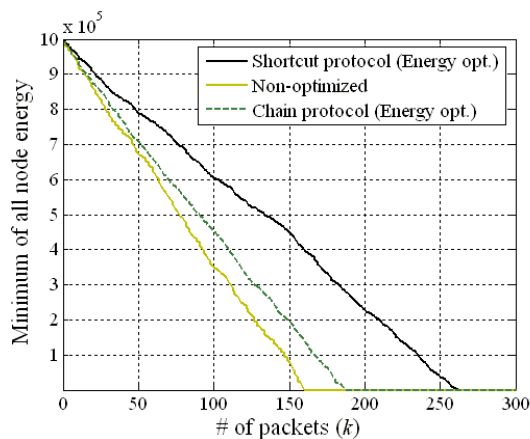
Eddig elért kutatási eredmények és teljesítőképességük

Az eddigi kutatások során a Műegyetem Híradástechnika tanszékén a Leuveni Katolikus Egyetem matematika tanszékével közösen sikerült olyan új kiegyenlítő algoritmusokat kifejleszteni, amelyek képesek a bithibavalószínűség minimalizálására [5,8]. A probléma exponenciális komplexitású megoldását statisztikai mintavételezéssel, illetve nemlineáris sztochasztikus approximációval sikerült polinomiális időben megoldhatóvá tenni [5]. Másrészt sikerült új, „vak” kiegyenlítő algoritmusokat kidolgozni, illetve ezek valószínűségben való konvergenciáját a Kushner Clark tétel élesítésével bizonyítani [7,12,13]. Ezekkel az eredményekkel tanulóhalmaz nélkül is nagyon rossz minőségű csatornán előírt megbízhatóságú kommunikáció valósítható meg. Például a spektrális kihasználtság jelenlegi értékét sikerült majdnem megduplázni ezekkel az algoritmusokkal, amelyek adott adatátviteli sebességű szolgáltatás implementálását nagy spektrum megtakarítással teszik lehetővé.

A szenzoriális hálózatokhoz kapcsolódó kutatások során az összehangolt farokeloszlását sikerült a nagy eltérések elméletéből ismert statisztikus sáv szélesség Kelly által bevezetett fogalmánál tovább általánosítani [7,9]. Így a farokeloszlás becslése alapján a randomizált küldési stratégia optimalizálható és segítségével nagy élettartam növekedést sikerült elérni [6,9,10].

Az általánosabb, kényszeres útvonalkeresési problémát vizsgálva egy speciális linkmértéket alkalmazva sikerült bizonyítani, hogy az adott megbízhatóságot garantáló minimális energiafogyasztású útvonal polinomiális időben megtalálható például a Bellman-Ford algoritmussal [14].

A fenti eredményekkel a vezeték nélküli szenzoriális hálózatok élettartama jelentősen növelhető, a klasszikus útvonalkereső protokollokhoz képest. A javulást az alábbi ábrák mutatják. A 3. sz. ábrán a véletlen az optimálisan sorsolt véletlen rövidzár stratégia alapján elért élettartam növekedés látható a hagyományos egy-ugrásos, vagy lánctovábbításhoz képest. A 4. sz. ábra a kényszeres optimalizálás alapján meghatározott útvonalon elért élettartam növekedést mutatja a szenzorok különböző, véletlen elhelyezkedése esetén.



3. sz. ábra Élettartam növekedés a véletlen rövidzár protokollal

4. sz. ábra Élettartam növekedés előírt megbízhatóságú útvonal kereséssel

A numerikus eredmények is azt mutatják, hogy az új módszerekkel jelentős (majdnem kétszeres) élettartam növekedés érhető el.

Az eredmények jelentősége és további kutatási irányok

Az eddigi eredmények fontos hozzájárulásokat nyújtanak a sávszélesség- és energiakritikus alkalmazások esetén, amelyeknél az élettartam, illetve a rendelkezésre álló rádióspektrum mérete kritikus faktor. Így lehetővé válik a spektrálisan hatékony adattovábbítás, valamint a betegekben implantált szenzorok egészségügyi monitorozása, környezeti folyamatok felügyelete, állatfajok migrációjának nyomonkövetése is, ahol a szenzorok feltöltésére nincs lehetőség, ezért az élettartam növelése alapvető fontosságú. Az eredmények kihatását a következő táblázat mutatja:

<i>Eredmény</i>	<i>Teljesítőképesség növekedés</i>	<i>Alkalmazás</i>
Új adaptív kiegyenlítő algoritmusok	Spektrális kihasználtság: 0.42 bit/sec/Hz -ről megnövelve 1.18bit/sec/Hz -re	Sávtakarékos mobil és szenzori hálózati kommunikáció
Randomizált adattovábbítási stratégiák optimalizálása vezeték nélküli szenzor hálózatokban	Majdnem 60%-os élettartam növekedés	Energiahatékony szenzori kommunikáció, hosszú élettartam implantált szenzoroknál (kevesebb számú műtéti beavatkozás)
Adott megbízhatóságú, de energiában minimális útvonalkeresés szenzoriális hálózatokban	Előírt megbízhatóság (pl. a csomagvesztés 1% alatt) majdnem 200 %-os élettartam növekedés	Természeti és egyéb folyamatok hatékony monitorozására

Az idevágó kutatások kiterjeszthetők arra az esetre, amikor a hálózat élettartamát nem az átlagos összenergia farokeloszlásának alapján, hanem a leggyorsabban lemerülő node élettartamával azonosítjuk. Sajnos ekkor a gráfoptimalizálási feladat nem ún. „additív”, hanem „bottleneck” típusú mértékeken alapul. Ebben az esetben továbbra is nyitott kérdés a polinomiális időben történő optimalizálás, amely szükséges lenne a szenorhálózat önszervezéséhez. Másrészt további hatékonyak, adaptív algoritmusokra van szükség a rádiócsatorna csatorna még hatékonyabb kiegyenlítése végett, amely kooperáló stratégiák alapján képes működni.

Irodalomjegyzék

- [1] Huseyin Ozgur Tan, Ibrahim Korpeoglu. Power Efficient Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks. *ACM SIGMOD Record* 32 (4): 66-71., December, 2003
- [2] C.Y. Chong and S.P. Kumar.. Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges. *IEEE Proceedings*: 1247–1254, August, 2003
- [3] J.G. Proakis. *Digital Communications*, McGrawHill, 1995.
- [4] A. Goldsmith and S. Wicker. Design challenges for energy-constrained ad hoc wireless networks. *IEEE Wireless Communications Magazine* 9: 8–27., August, 2002.
- [5] J. Levendovszky, L. Kovács and E.C. van der Meulen, "Minimum probability of error based equalization algorithms for fading channels", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 2007., Part I, pp. 1-12, doi: 10.1155/2007/14683
- [6] J. Levendovszky, B. Hegyi: “Optimal statistical energy balancing protocols for wireless sensor networks”, *WSEAS Transaction on Communications*, Issue 5. Vol.6., May 2007 pp.. 689- 695
- [7] J. Levendovszky, L. Kovacs, EC. Van der Meulen: “A novel blind channel equalization algorithm minimizing the peak distortion in DS-CDMA systems”, *WSEAS Transaction on Communications*, Issue 2. Vol.6., February 2007 pp. 289- 295
- [8] J. Levendovszky, A. Olah: “Statistical sampling based equalization algorithms for fading channels and multiuser detection”, *WSEAS Transaction on Communications*, Issue 5, Vol. 5, May 2006, ISN 1109-2742, pp. 656-665
- [9] J. Levendovszky, Cs. Orosz: “Generalized statistical bandwidth for optimal resource management”, *WSEAS Transaction on Communications*, Issue 10, Vol. 5, October 2006, ISN 1109-2742, pp. 1863-1869;
- [10] J. Levendovszky, A. Fancsali: "Real-time call admission control for packet switched networking by cellular neural networks", *IEEE, Transaction on Circuits and Systems-I*, 2004, Vol. 51, pp. 1172-1183
- [11] J. Levendovszky: "Adaptive statistical algorithms in network reliability analysis", *Performance Evaluation - Elsevier*, Vol. 48, 2002, pp. 225-236
- [12] J. Levendovszky, E.C. van der Meulen: “Nonparametric detection by feedforward neural networks”, *Neural Network World*, Vol. 6., pp.929-957, 2000.
- [13] J. Levendovszky, W. Mommaerts, and E.C. van der Meulen, E.C.: "Hysteretic Neural Networks for global optimization of quadratic forms", *Neural Network World*, 1992, Vol. 2, No. 5, pp. 475-496
- [14] J. Levendovszky, M. Molnar P. Legesdrun: “QoS routing with uncertain link state information”, *Proc. of INOC07*, Spa, Belgium, April, 2007