

ÉRZÉKELŐRENDSZEREK HATÉKONYSÁGÁNAK NÖVELÉSE A NANO- ÉS KOMMUNIKÁCIÓS TECHNOLÓGIÁKBAN

Tézisfüzet a Ph.D. disszertációhoz

Hegyi Barnabás

Témavezető:

Dr. Levendovszky János

a Magyar Tudományos Akadémia doktora

és

Dr. Csurgay Árpád

a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagja



Pázmány Péter Katolikus Egyetem
Információs Technológiai Kar
Multidiszciplináris Műszaki Tudományok Doktori Iskola

Budapest 2008

1. Bevezetés

Az információs technológia fejlődésének első hullámát a 80-as évek személyi számítógép ipara képviseli, mely a 70-es években kidolgozott olcsó mikroprocesszor technológiára épült. A 80-as években kifejlesztett olcsó távközlési technológiákon alapuló internet- és mobilkommunikációs ipart a fejlődés második hullámával azonosítják. A harmadik hullámot az „érzékelők forradalmának” szokás nevezni, amely az összes elképzelhető mesterséges érzékelő- és beavatkozó eszköz tömeges és olcsó előállítását takarja. Ezeket az eszközöket számítástechnikai- és kommunikációs eszközökkel kombinálva új termékek és új szolgáltatások jelennek meg az elkövetkezendő évtizedekben, amelyek alapvetően módosítják majd eddigi élet- és munkakörülményeinket.

Munkám során ezen érzékelőrendszerek hatékonyságának növelését tűztem ki célul két, egymástól eltérő vonatkozásban. Téziseimben egyfelől az alagútdióda és a hozzácsatolt nanoantenna alkotta THz-es és infravörös szenzor érzékenységének javítására tettem javaslatot, másfelől a vezeték nélküli érzékelőhálózatok elemei közötti energiahatékony kommunikációra adtam megoldásokat.

Nagysebességű, hűtetlen, CMOS-kompatibilis, többsávós THz-es és infravörös érzékelők

Technológiai motiváció

Világszerte egyre növekvő igény mutatkozik a rendkívül gyors, többsávós, THz-es és infravörös kamerák és az általuk vett képek valós idejű feldolgozása iránt. Erre a feladatra kiválóan alkalmas az az – emlősök retináját utánzó – érzékelőprocesszor, melyet a celluláris hullámszámítógép (cellular nonlinear network – CNN) chip és a felületére integrált érzékelőtömb alkot. Ennek megfelelően az alkalmazandó érzékelőkkel szemben támasztott követelmények a következők: nagy sebesség (>1000 kép/másodperc); szobahőmérsékleten való működőképesség (CMOS technológiákkal való integrálhatóság); kis méret (érzékelőtömbbe való integrálhatóság); spektrumszelektivitás.

Eddigi eredmények és nyitott kérdések

A jelenlegi infravörös és THz-es tartományban működő vevőket illetően a fotondetektoros vevők [7] rendkívül alacsony hőmérsékletet igényelnek, így nem integrálhatók a CMOS technológiákkal, míg a termikus elven működő bolométerek [7] lassúak és nem spektrumszelektívek. Ezzel szemben a nanoantennából és alagútdiódából felépített detektoros rádióvevők [8] a fenti négy követelmény mindegyikének eleget tesznek. Ezen szenzorok egyedüli gyengesége azok alacsony érzékenysége.

Tézisek hozzájárulása a területen

Téziseim első csoportjának eredményei az említett szenzor érzékenységének javításához kapcsolódnak az alkalmazott alagútdióda konstrukciója vonatkozásában.

***Vezetéknélküli érzékelőhálózatok energiahatékony
kommunikációja***

Technológiai motiváció

A technológiai előrejelzések szerint a vezetéknélküli érzékelőhálózatok komplexitása az elkövetkezendő évtized végére meghaladhatja az Internet komplexitását. E hálózatok – könnyű kiépíthetőségük révén – olyan új, mindenütt jelenlévő szolgáltatásokat biztosítanak majd, mint a távgyógyászat vagy az egészségügyi- és szociális távellátás [18]. A vezetéknélküli szenzorhálózatok jelentős mértékben javíthatják az eddig hagyományos módon nyújtott szolgáltatások hozzáférhetőségét, minőségét és nem utolsósorban költséghatékonyágát.

Az alkalmazott vezetéknélküli szenzorhálózatok elemei azonban – szemben a hagyományos ad hoc hálózatok elemeivel – tipikusan korlátos kommunikációs-, feldolgozó-, tárolási- és energiabeli kapacitással rendelkeznek. (A Crossbow MICA2 típusra például ezek a kapacitások rendre 76,8 kbit/s, kb. 7MIPS, 500 kB és 4Ah értékűek [9]). Ebből adódóan a tradicionális hálózati protokollok nem alkalmazhatók közvetlenül a vezetéknélküli érzékelőhálózatokban, hiszen azok – egyebek mellett – nem optimálisak

energiafogyasztás szempontjából. A vezeték nélküli érzékelő-hálózatokban alkalmazott kommunikációs eljárások kialakításakor tehát elsődleges szempont a hálózat élettartama.

Eddigi eredmények és nyitott kérdések – „Energiahatékony csomagtovábbítási protokollok”

A hálózat élettartama egyfelől úgy optimalizálható, hogy a hálózat elemeinek kommunikációra fordított energiafogyasztását minél inkább kiegyenlítjük, hiszen ezzel a leggyorsabban lemerülő elem élettartamát növeljük. Ez többek között az alkalmazott csomagtovábbítási protokoll helyes megválasztásával érhető el. Heinzelman és munkatársai [9] klaszterekre bontják a hálózatot: a klaszter elemei a klaszterfejnek küldik el csomagjaikat, amiket ezután a klaszterfej továbbküld a távoli bázisállomásnak. A hálózat működése során aztán a klaszterekfejek periodikus újrasorsolásával próbálják kiegyenlíteni a hálózati elemek fogyasztását. Tan és munkatársai [11] a vezeték nélküli szenzorhálózatot gráfként reprezentálják, melynek csúcsai a hálózati elemek, egy adott él súlyát pedig az összekötött két hálózati elem közötti kommunikációhoz szükséges energia, valamint a két elem maradék energiája alapján határozzák meg. Ebben a gráfban szabályos időközönként egy minimális feszítőfát keresnek, és a hálózati elemek e fa mentén továbbítják az érzékelt információt a bázisállomás felé. Az eddigi energiakiegyenlítő útvonalválasztó és csomagtovábbítási protokollok kivétel nélkül determinisztikus forgalmi modellen alapszanak, vagyis azt feltételezik, hogy a hálózati elemek

periodikusan kívánják eljuttatni az általuk érzékelt paramétereket a bázisállomásnak. Számos gyakorlati alkalmazás esetében azonban az érzékelt adatok továbbításának szükségességét véletlen események váltják ki. Ilyenek például a céltárgyak követését szolgáló alkalmazások, ahol a hálózati elemek csak akkor továbbítanak csomagot a hálózatba, ha egy céltárgy az érzékelési tartományukon belülre kerül. Ennek következtében elengedhetlenné válik az útvonalválasztó és csomagtovábbítási protokollok optimalizálásának véletlen forgalmi modellekre való kiterjesztése.

Tézisek hozzájárulása a területen

Téziseim második csoportjának eredményei energiafogyasztás szempontjából optimális, sztochasztikus csomagtovábbítási eljárások. Munkámban a csomagtovábbítási eljárások optimalizálását kiterjesztettem arra az esetre, amikor a forgalmi modell sztochasztikus, az élettartam definíciója valószínűségi értelmezésű és a hálózat elemek modellje sorbanállási rendszer. Ezek segítségével az élettartam növelhető.

Eddigi eredmények és nyitott kérdések – „Kooperatív kommunikációs eljárások orvosbiológiai alkalmazásokban”

A hálózati elemek élettartama az ún. kooperatív kommunikációs eljárások [12] alkalmazásával is növelhető. Ezeket az eljárásokat a vezeték nélküli átviteli közeg azon tulajdonsága hívja életre, hogy abban az információt hordozó fizikai jelek jellemzően a tér nem egy, hanem számos pontjába eljutnak. Ily módon egyfelől az adó által közölni kívánt információ megfejtésekor több vevő egymással

együttműködve megbízhatóbb döntést hozhat, másfelől pedig a vevők együttműködése révén az adóteljesítmény csökkenthető egy adott megbízhatósági kritérium teljesítése mellett.

Az implantátumok és a testtől távolabb elhelyezett adóvevő-eszközök közötti kommunikációt – mint rádiós összeköttetést – eddig csak hagyományos, nemkooperatív összeköttetésekre vizsgálták. Johansson [13] egy beteg által hordozott implantátum és egy külső bázisállomás közötti rádiócsatorna teljesítőképességét határozta meg beltéri környezetre vonatkozóan. A többutas terjedés valamint az emberi test hullámterjedésre gyakorolt hatását fading tartalékok alkalmazásával vette figyelembe. Megválaszolatlan marad tehát a kérdés, hogy kooperatív kommunikációs eljárások alkalmazásával vajon javítható-e a beültetett eszköz és a külvilág közötti összeköttetés teljesítőképessége.

Az irodalomban fellelhető, vezeték nélküli implantátumokkal kapcsolatos hullámterjedési modellek [14][15][16] egyrészt döntő többségükben determinisztikusak, másrészt a test belseje és a külvilág közötti rádiócsatornát érő különböző hatásokat – a többutas terjedést vagy a test hatását az iránykarakterisztikára és a polarizációra vonatkozóan – egymástól elkülönülten vizsgálják. Ahhoz azonban, hogy feltárjuk és felbecsüljük a kooperatív kommunikációs eljárásokban rejlő lehetőségeket a fenti célkitűzéseknek megfelelően, az implantátum és a külvilág közötti rádiócsatornának egy véletlen és kompakt modelljére van szükségünk.

A kooperatív kommunikációs eljárások teljesítőképességére hatással van az az eljárás is, melynek alapján az adó és a vevő kommunikációját segítő jeltovábbító partnereket kiválasztjuk. Mostanáig az elosztott partnerválasztás problémáját – valamint annak átlagos időigényét és sikertelenségének valószínűségét – csak egyetlen partner kiválasztásának esetében vizsgálták [17]. Mindazonáltal elképzelhetők olyan helyzetek is, amikor további jeltovábbító partnerek kiválasztásával és alkalmazásával az adott kooperatív kommunikációs eljárás teljesítőképessége tovább növelhető. A disszertáció többek között ilyen helyzeteket is megvizsgál.

Tézisek hozzájárulása a területen

A harmadik téziscsoport eredményei a fentieknek megfelelően a következők: (1) az implantátum és a külvilág közötti rádiócsatorna egy plauzibilis véletlen modellje; (2) egy kooperatív kommunikációs eljárás, melynek teljesítőképessége az előbbi modell alapján határozható meg. A teljesítőképesség analízis megmutatta, hogy a javasolt eljárás alkalmazásával a vezeték nélküli implantátum élettartama jelentősen növelhető. A téziscsoport továbbá tartalmaz egy elosztott, több jeltovábbító partner kiválasztására alkalmas eljárást is, mely egyéb – más célokra használt – kooperatív kommunikációs hálózatokban is hasznosítható.

2. Vizsgálati módszerek

A tézisek első csoportjában az alagútdiódák áram-feszültség karakterisztikájának vizsgálatok a kvantummechanika és a klasszikus elektrodinamika alapvető eredményeit alkalmaztam. A karakterisztika egyes pontjainak kiszámítások egy egyszerű kvantumtranszport modellt használtam, mely az egyelektron hullámfüggvény térben változó potenciálmeneten való szóródásán alapul. Az „alagútagási” valószínűség numerikus meghatározások az időfüggetlen Schrödinger-egyenlet térben diszkrétizált formáját oldottam meg, melyhez az úgynevezett quantum transmitting boundary method (QTBM) eljárás adta határfeltételeket alkalmaztam. Az érzékenység javítására tett javaslataim alapján a Notre Dame-i egyetem (USA) Nanofabrication Facility laboratóriumában kísérletek indultak meg a kettős szigetelőréteggel rendelkező fém-szigetelő-fém alagútdiódát alkalmazó érzékelő előállítására és bemérése céljából.

A második téziscsoport kidolgozások a vezeték nélküli szenzorhálózatot sorbanállási hálózatként modelleztem. Ennek megfelelően a különböző csomagtovábbítási eljárások teljesítőképességének kiértékelésekor a sorbanállás-elmélet alapvető eredményeit használtam fel. A csomagtovábbítási protokollok paramétereit a szimulált lehűtés néven ismert kombinatorikus optimalizációs eljárás segítségével optimalizáltam. A két eszköz közös vonása, hogy mindkettő a sztochasztikus folyamatok, közelebbről a Markov-láncok elméletére épül. A különböző eljárások

teljesítőképességének meghatározására levezetett összefüggéseket számítógéppel, numerikusan értékeltem ki.

A téziseim harmadik csoportjában javasolt eljárások teljesítőképességének megállapításakor a vezeték nélküli kommunikáció alapvető – és bizonyos esetekben speciális – modelljeire támaszkodtam a zaj- és elektromágneses hullámterjedési jelenségek, valamint a vezeték nélküli berendezések működését illetően. A felhasznált analitikus összefüggéseket azok összetettsége, továbbá az involvált nagyszámú véletlen változó miatt numerikusan, sztochasztikus mintavételezés (Monte Carlo szimulációk) segítségével értékeltem ki.

	Alkalmazott apparátus
1. téziscsoport	Kvantummechanika, elektrosztatika
2. téziscsoport	Sorbanállás-elmélet, sztochasztikus optimalizálás, Markov-láncok
3. téziscsoport	Elektromágneses hullámterjedési modellek, Monte Carlo szimulációk

1. táblázat A vizsgálatok során alkalmazott apparátusok

3. Új tudományos eredmények

I. Téziscsoport: Kettős szigetelőréteggel rendelkező fém-szigetelő-fém dióda jósági tényezőjének vizsgálata.

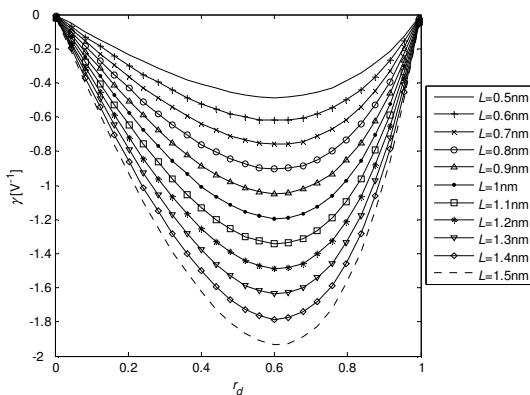
(A szerző kapcsolódó publikációi: [3][6].)

A detektoros rádióvevők érzékenysége egyenesen arányos a detektorként használt dióda jósági tényezőjével. Ez utóbbi a dióda áram-feszültség karakterisztikája második és első deriváltjának a hányadosa. A sorrendben fém, szigetelő és fém rétegek alkotta dióda és a hozzá csatolt nanoantenna egy miniatűr detektoros rádióvevőt képez, amelyet reményeink szerint a THz-es és infravörös tartományokbeli elektromágneses sugárzás érzékelésére tudunk majd használni. A téziscsoport eredményei e szenzor érzékenységéhez kapcsolódnak.

I.1. Az egyelektron Schrödinger egyenlet és a hozzátartozó QTBM határfeltételek felhasználásával meghatároztam a kettős szigetelőréteggel rendelkező fém-szigetelő-fém dióda jósági tényezőjének változását a szigetelő rétegek vastagsága, a fém-szigetelő kilépési munkák, valamint a szigetelők dielektromos állandója függvényében.

A jósági tényező változását a szigetelő rétegek teljes vastagsága (L), a vastagságok aránya (r_d), a fém-szigetelő kilépési munkák átlaga, azok aszimmetriája, valamint a szigetelők dielektromos állandója arányának függvényében számítottam ki. Az

eredmények többek között megmutatták, hogy a vastagságok aránya döntő módon befolyásolja a jósági tényező nagyságát (1. ábra). A technológiában elterjedt alumínium-dioxid és szilícium-dioxid szigetelők esetén az optimális vastagságarány kb. 0,6-nek adódott, melynek megvalósíthatósága még pár nm-es teljes vastagság esetén is bízhatóan tűnik.



1. ábra A jósági tényező ($2m$) változása a vastagságok aránya (r_d), valamint a teljes vastagság (L) függvényében

I.2. Összehasonlítottam a szimpla- és a kettős szigetelőréteggel rendelkező fém-szigetelő-fém dióda jósági tényezőjét és megmutattam, hogy az utóbbi jósági tényezője akár egy nagyságrenddel nagyobb lehet az előbbiéénél.

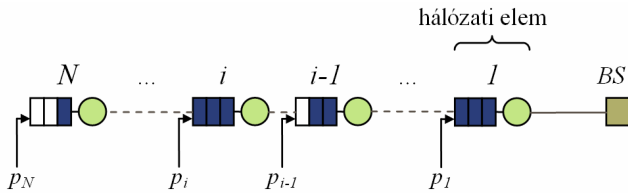
Az összehasonlításakor abból indultam ki, hogy a dióda ellenállása mint tervezési paraméter előre megadott. A jósági tényező maximumát mindkét diódatípus esetében az áramkörü technológiában tipikus és megvalósítható paraméter értékek

mellett kerestem. Vizsgálataim megmutatták, hogy a kettős szigetelőréteggel rendelkező fém-szigetelő-fém dióda alkalmazásával az alagútdióda és a hozzá csatolt nanoantenna alkotta szenzor érzékenysége – a szigetelők dielektromos állandójának különbözőségének köszönhetően – legalább egy nagyságrenddel, tehát jelentős mértékben növelhető ahhoz a hagyományos megoldáshoz képest, amikor a dióda csak egy szimpla szigetelőréteget tartalmaz.

II. Téziscsoport: Energiatudatos protokollok optimalizálása egydimenziós hálózati topológia esetén.

(A szerző kapcsolódó publikációi: [2].)

Egy vezeték nélküli érzékelőhálózat elemei tipikusan korlátozott energiával rendelkeznek, mely az időmúlásával elfogy, és a szóbanforgó hálózati elem megszűnik működni. Az érzékelt adatokat egy bázisállomás (base station – BS) gyűjti össze, melynek a hálózat elemei közvetlen vagy közvetett úton, több más hálózati elem közreműködésével juttathatják el adataikat (2. ábra). A csomagtovábbítási stratégia megválasztása döntő módon befolyásolja a hálózati elemek energiafogyasztását, és ilyen módon a hálózat élettartamát. A téziscsoport eredményei a maximális élettartamot elérő protokollok kifejlesztéséhez kapcsolódnak.



2. ábra Hálózati topológia

Vizsgálataim a következő csomagtovábbítási protokollokat foglalták magukban. A láncprotokoll esetében az i -edik hálózati elem minden esetben az $i-1$ -ediknek, míg a rövidzár protokoll esetén minden esetben a BS-nek, vagyis a nulladik hálózati elemnek továbbítja a csomagot. A „véletlen rövidzár” működése (3. ábra) során minden hálózati elem adott valószínűséggel sorsol a csomag adott szomszédhoz való továbbítása és a bázisállomáshoz történő küldése között. (a_i annak a valószínűsége, hogy a csomag a szomszédhoz továbbítódik.) Végül a „tetszőleges előreküldés” protokoll esetében egy adott hálózati elem a láncban bármilyen előtte lévő elemnek küldheti a csomagot véletlen sorsolás alapján. (a_{ij} annak a valószínűsége, hogy az i -edik hálózati elem a $j-1$ -ediknek küldi a csomagot, $j \leq i$.)

A hálózat élettartama többféleképpen definiálható. Vizsgálataim során akkor tekintettem a hálózatot „életben levőnek”, ha minden eleme működőképes volt. Mivel a csomagok az egyes hálózati elemeken véletlenszerűen generálódnak és azokról – a „véletlen rövidzár” és „tetszőleges előreküldés” protokollok esetében – véletlenszerűen továbbítódnak, a hálózati elemek maradék energiája is valószínűségi változó. Következésképpen a hálózat élettartama is csak valószínűségi értelmezésben definiálható. Utóbbi mennyiség

munkámban az a legkisebb Ψ (diszkrét) időtartam, amely elteltével a hálózat $e^{-\alpha}$ -nál nagyobb valószínűséggel lemerül:

$$\Psi = \min \left\{ K \mid P \left(\min_i c_i(K) \leq 0 \right) > e^{-\alpha} \right\},$$

ahol $c_i(K)$ az i -edik hálózati elem maradék energiája a K időpillanatban.

II.1. Kiterjesztettem a lánc- valamint a rövidzár protokoll vizsgálatát buffer nélküli esetről bufferelt esetre, ahol a csomagküldési mechanizmust Markov-láncokkal modelleztem, levezettem a stacionér eloszlást és ezek alapján kvantitatív leírását adtam az élettartamnak.

A fenti definíció alapján annak a valószínűsége, hogy a hálózat K (diszkrét) idő alatt működésképtelenné válik,

$$P(K) = 1 - \prod_{i=1}^N \sum_{k=0}^{\lfloor C/\tilde{g}_i \rfloor} \binom{K}{k} \left(1 - \pi_0^{(i)} \right)^k \left(\pi_0^{(i)} \right)^{K-k},$$

ahol N a hálózati elemek száma, C a kezdeti energiájuk, \tilde{g}_i a csomagküldés energiaszükségletének várható értéke az i -edik hálózati elem esetén, míg $1 - \pi_0^{(i)}$ annak a valószínűsége, hogy az i -edik hálózati elem csomagot küld. A hálózat élettartama a 4. ábrán vizsgált esetben 102%-nak adódott a rövidzár protokoll esetén a láncprotokollhoz képest.

II.2. Az előző protokollokat kiterjesztettem a „véletlen rövidzár” esetre és levezettem az optimális (a_1, a_2, \dots, a_n) vektort, amely azon sorsolás valószínűségét adja, amely az energiafogyasztást minimalizálja, illetve a leghosszabb élettartamot eredményezi.

A „véletlen rövidzár” protokoll működését a 3. ábra mutatja. Annak a valószínűsége, hogy a j -edik hálózati elem generálódott csomag az ábrán látható útvonalat járja be,

$$P = (1 - a_j) \prod_{k=j}^{i-1} a_k .$$

Az \mathbf{a} vektorra vonatkozó optimalizációs probléma

$$\mathbf{a}_{\text{opt}} = \arg \max_{\mathbf{a}} \Psi(\mathbf{a})$$

alakot ölti. [A diszkrét idejű esetben a következő két kényszer mellett optimalizáltam az élettartamot: (i) a maximális csomagvesztési arány nem haladhat meg egy bizonyos küszöbértéket; (ii) az átlagos csomagkésleltetésnek egy megadott érték alatt kell maradnia.] A hálózat élettartama a „véletlen rövidzár” protokoll esetében 272%-nak adódott a lánctprotokollhoz képest, ami a II.1. tézisben ismertetett protokollok által biztosított élettartamot jelentős mértékben meghaladja.

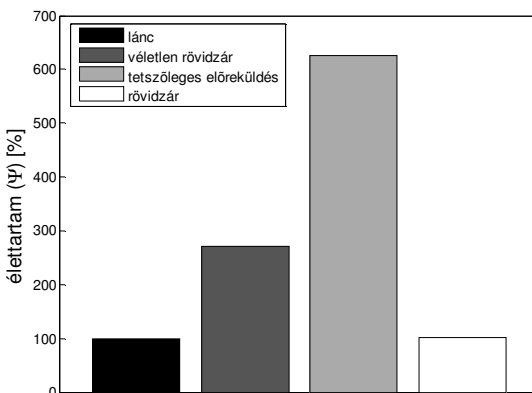
csomagjaikat. Ily módon a hálózati elemek energiafogyasztása kiegyenlítődik, és gyakorlatilag egyszerre merülnek le.

Összehasonlító teljesítőképesség analízis

A különböző protokollokat energiafogyasztás szempontjából összehasonlítottam és következő rangsorra jutottam (2. táblázat, 4. ábra). A 4. ábrán látható eredményeket egyenközű topológia esetén nyertem.

Protokoll	helyezés
„tetszőleges előreküldés”	1
„véletlen rövidzár”	2
lánc	3-4
rövidzár	3-4

2. táblázat A különböző csomagtovábbítási protokollok rangsora



4. ábra A különböző csomagtovábbítási protokollok teljesítőképessége

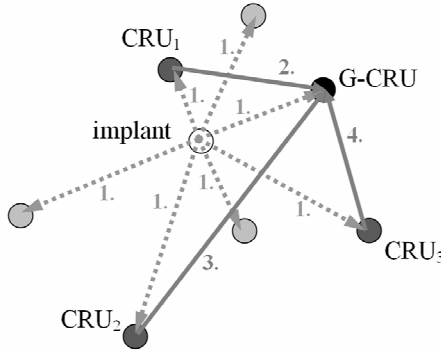
*III. Téziscsoport: Kooperatív kommunikációs eljárások
orvosbiológiai alkalmazásokban*

(A szerző kapcsolódó publikációi: [1][4][5].)

A vezeték nélküli átviteli közeg jellemző tulajdonsága, hogy az információt hordozó fizikai jelek az adótól nemcsak a vevőhöz, hanem a tér több más pontjába is eljuthatnak. A jelenség káros hatásai mellett (interferencia) jótékonyakkal is rendelkezik. A gyakorlatban sokszor energia szűkében lévő adó által elsugárzott energiát ugyanis ily módon hatékonyabban használhatjuk fel. Ha a jelek a vevőn kívül a szóbanforgó kommunikációs hálózat több eleméhez is eljutnak, akkor e hálózati elemek az általuk vett jeleket a vevővel megosztva, tehát azzal kooperálva növelhetik az információátvitel megbízhatóságát az adó és a vevő között. A téziscsoport eredményei ehhez az alap gondolathoz kapcsolódnak.

Az általam vizsgált kooperatív kommunikációs hálózati elrendezés, „forgatókönyv” esetében egyetlen helyiséget tekintek. Ebben a helyiségben foglal helyet az orvosi implantátumot a testében hordozó beteg. Az implantátum által közvetített adatsomagot több, a helyiség különböző pontjain elhelyezett, vezeték nélküli kooperatív (adó)vevőegység (cooperative receiver unit – CRU) is fogadja. Ezután a CRU-k közül együttműködés céljából – elosztott vagy centralizált módon – kiválasztunk néhányat, melyek később továbbítják az általuk vett jeleket az ún. gateway CRU-nak (G-CRU). Végül G-CRU detektálja az eredeti, vagyis az implantátum által kisugárzott adatsomagot, majd azt a hagyományos hálózatokon

(pl. GSM, 3G, internet, stb.) keresztül elküldi a szolgáltatói központba (5. ábra).



5. ábra A javasolt kooperatív kommunikációs eljárás

Az irodalomban elosztott időzítők módszere néven ismert eljárás esetében a kiválasztási eljárás kezdetén a potenciális jeltovábbító partnerek a kiválasztási kritérium szerinti „pontszámukkal” arányosan állítják be időzítőjük kezdeti értékét. Ezután a kiválasztási folyamatban résztvevő hálózati elemek a közös hozzáférésű rádiócsatornát hallgatják, miközben időzítőik elkezdenek visszafelé számolni. Amint valamelyik potenciális jeltovábbító partner időzítője lejár, az adott hálózati elem egy rövid impulzust sugároz a rádiócsatornán jelezve a többi résztvevőnek, hogy a jeltovábbító partner kiválasztódott és a kiválasztási folyamat lezárult.

III.1. Megalkottam a test belsejét és a külvilágot összekötő kommunikációs csatornának egy véletlen és kompakt modelljét az eddigi, vezeték nélküli orvosi implantátumokkal kapcsolatos hullámterjedési vizsgálatok eredményei alapján. Ezt felhasználva megmutattam, hogy az implantátum élettartama kooperatív kommunikációs eljárások alkalmazásával jelentősen megnövelhető.

Az irodalombeli eredmények alapján a többutas terjedést illetően Rice fading modellt, míg az implantátum iránykarakterisztikája tekintetében egy tengelyesen szimmetrikus, csonkolt log-normál eloszlású karakterisztikát alkalmaztam. Ezek paramétereit az irodalomban közölt munkák eredményei alapján becsültem meg. Vizsgálataim során a szobában elhelyezett kooperatív vevőegységek pozícióját, valamint a beteg (vagyis az implantátum) helyét és orientációját valószínűségi változónak tekintettem. A jeltovábbítás módját illetően azt a megoldást alkalmaztam, amikor az együttműködésre kiválasztott CRU-k az általuk vett analóg jelet egymást követve továbbítják a G-CRU-nak. Miután a G-CRU a közvetett úton érkező csomagokat az általa közvetlenül vett csomaggal kombinálja, az eredő csomag jel-zaj viszonyát – a jeltovábbító CRU-k közötti optimális adóteljesítmény-kiosztás mellett – az alább kifejezés adja:

$$SNR_{\text{res}} = \frac{P_1}{\sigma_n^2} |h_{1,G\text{-CRU}}|^2 + \sum_{i=1}^{n_1} \frac{B_{\delta_i}}{C_{\delta_i}} - \left(\sum_{i=1}^{n_1} \frac{\sqrt{B_{\delta_i}}}{C_{\delta_i}} \right)^2 \left(1 + \sum_{i=1}^{n_1} C_{\delta_i}^{-1} \right)^{-1}$$

ahol

$$B_i = C_i \cdot \frac{P_1}{\sigma_n^2} |h_{1,CRU_i}|^2,$$

$$C_i = \frac{P_{CRU} |h_{CRU_i,G-CRU}|^2}{P_1 |h_{1,CRU_i}|^2 + \sigma_n^2},$$

$$n_1 = \arg \max_{1 \leq k \leq n} \sqrt{B_{\delta_{n_1}}} g(k),$$

$$g(k) = \left(\sum_{j=1}^k C_{\delta_j}^{-1} \sqrt{B_{\delta_j}} \right)^{-1} \left(1 + \sum_{j=1}^k C_{\delta_j}^{-1} \right)$$

és

$$B_{\delta_1} \geq B_{\delta_2} \geq \dots \geq B_{\delta_n}, \{\delta_1, \dots, \delta_n\} \equiv \{1, \dots, n\}.$$

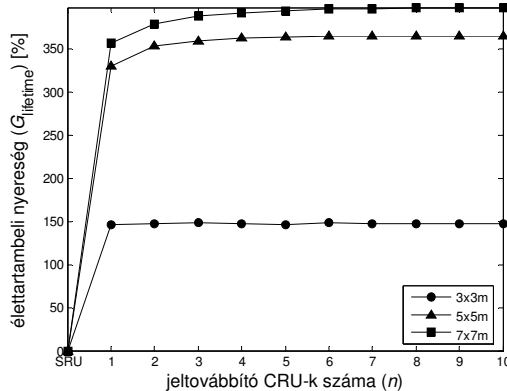
A formulákban szereplő változók közül P_1 az implantátum adóteljesítménye, n és P_{CRU} a jeltovábbító CRU-k száma illetve összes adóteljesítménye, σ_n^2 a vevőzaj szórásnégyzete, $h_{X,Y}$ pedig az X és Y hálózati elemeket összekötő rádiócsatorna erősítése. Modellemben – a legkorszerűbb, alacsonyfogyasztású adóvevőkre jellemző szám adatokkal együtt – egy realiztikus energiafogyasztási modellt is beépítettem. Az implantátumot és külvilágot összekötő kommunikációs csatornával kapcsolatban a

$$P(SNR_{res}(P_1) < SNR_{req}) \leq P_{out}$$

megbízhatósági kritérium teljesülését írtam elő, ahol SNR_{req} az előírt jel-zaj viszony, míg P_{out} a megengedett kimaradási valószínűség. A hagyományos, nemkooperatív összeköttetés esetében a testen kívül elhelyezkedő vevőegység (single receiver

unit – SRU) pozícióját azonosnak vettem a kooperatív összeköttetés esetében vizsgált legközelebbi CRU pozíciójával.

Vizsgálataim megmutatták, hogy a javasolt kooperatív kommunikációs eljárás segítségével az implantátum adóteljesítménye jelentős mértékben csökkenthető. Az eljárások alkalmazása ilyen módon – figyelembe véve az alkalmazott energiafogyasztási modellt is – az implantátum élettartamának számottevő meghosszabbodását is eredményezhetik (6. ábra). Az analízis során vizsgált két különböző partnerválasztási kritérium közül a bonyolultabb esetében mind az implantátum és a CRU, mind a CRU és a G-CRU közötti rádiócsatorna erősítése figyelembe vételre kerül, míg az egyszerűbb esetében csak az implantátum és a CRU közötti csatorna erősítése meghatározó. Számításaim megmutatták, hogy a modellben alkalmazott paraméterek konkrét értékei mellett a CRU-k közötti egyenletes adóteljesítmény-kiosztást az egyszerű kiválasztási kritériummal együtt alkalmazva a vizsgált kooperatív kommunikációs eljárás teljesítőképessége gyakorlatilag ugyanolyan jó, mint abban az esetben, amikor az optimális teljesítmény-kiosztást a bonyolultabb kiválasztási kritériummal kombináljuk.



6. ábra Az élettartambeli nyereség a jeltovábbító CRU-k számának függvényében

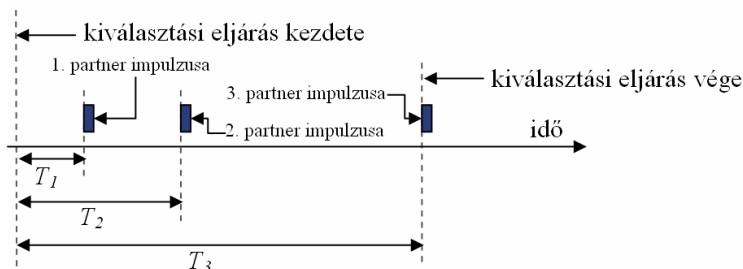
III.2. Az elosztott időzítők módszerén alapuló és egyetlen jeltovábbító partner kiválasztására alkalmas eljárás alapján levezettem egy több jeltovábbító partner kiválasztására alkalmas eljárást. Megmutattam, hogy a torzító függvény megválasztása alapvető módon befolyásolja az eljárás teljesítőképességét, valamint hogy kis partnerszám esetén az eljárás átlagos időigénye jóval kisebb, mint a rádiócsatorna gyakorlatban tapasztalható koherenciaideje.

Az eljárást úgy terjesztettem ki több jeltovábbító partner kiválasztására alkalmas eljárássá, hogy a folyamatban résztvevők egészen addig aktívak maradnak, illetve a folyamat addig nem zárul le, amíg a rádió csatornán egy előre megadott számú impulzus „el nem hangzott”. Ez a szám megegyezik a

kiválasztandó jeltovábbító partnerek számával (7. ábra). Mivel a gyakorlatban az az idő, amely ahhoz szükséges, hogy a hálózati elemek vételi módból adási módba kapcsoljanak, véges, előfordulhat, hogy, miközben az egyik résztvevő éppen ezt a kapcsolást végzi, egy másiknak lejár az időzítője. Ez azt eredményezi, hogy mindkét fél ugyanazt a szerepet tételezi fel magáról, tehát a kiválasztási folyamat sikertelenül zárul. A sikertelen kiválasztás eseménye a

$$\bigcup_{i=1}^n (T_{i+1} - T_i < c)$$

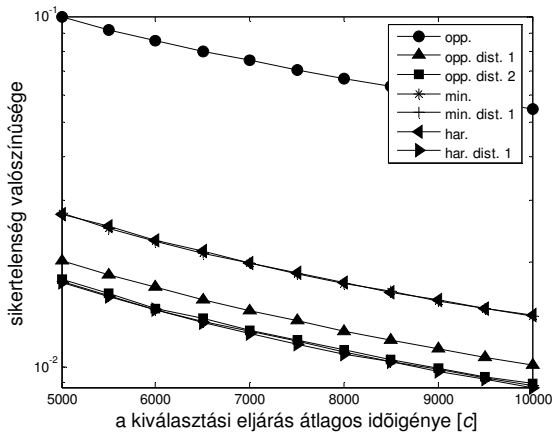
alakban fejezhető ki, ahol T_i az i -edik legalacsonyabb kezdeti időzítő-érték, n a kiválasztandó partnerek száma, c pedig a vételi módból adási módba történő kapcsoláshoz szükséges idő. A torzító függvény a kiválasztási kritérium által meghatározott érték reciprokát az időzítő kezdeti értékévé alakítja át.



7. ábra A partnerválasztási algoritmus ($n=3$)

Monte Carlo szimulációk segítségével különböző kiválasztási kritériumok és torzító függvények mellett meghatároztam a folyamat sikertelenségének valószínűségét a folyamat időigénye várható értékének függvényében. Az eredményeket $n=9$ esetére a

8. ábra mutatja. A c paraméter értéke a gyakorlatban – viszonylag jobb hardverek esetén – kb. $1 \mu\text{s}$. A vizsgálatok során azt kaptam, hogy a vizsgált kiválasztási kritériumok mindegyike esetében a torzító függvény alkalmas megválasztásával az eljárás átlagos időigénye – kisszámú partner esetén (<10) – jóval elmarad a rádiócsatorna tipikus koherencia idejétől (100ms), miközben a folyamat sikertelenségének valószínűsége egy, a gyakorlatban elfogadható érték alatt marad (1%).



8. ábra A kiválasztási eljárás sikertelenségének valószínűsége az eljárás átlagos időigénye függvényében

4. Az eredmények felhasználási területe

A gyors, „több színben látó”, THz-es és infravörös kamerák elsősorban gyorsan mozgó céltárgyak felismerésére és azonosítására, valamint gyorsan lejátszódó kémiai és biológiai folyamatok megfigyelésére alkalmazhatók.

Az energiatudatos csomagtovábbítási protokollok a vezeték nélküli szenzorhálózati alkalmazások széles körében – példának okáért az intelligens otthon (pl. NETVOX Smart House System), a mechanikai szerkezetek állapotát megfigyelő (pl. Sensametrics Wireless Structure Monitoring), a környezeti paramétereket monitorozó (pl. Advanced Sensor Technologies Root Zone Intelligence System), a szeizmikus aktivitást észlelő alkalmazásokban – használhatók.

A harmadik téziscsoport kooperatív kommunikációs eljárásai elsősorban olyan távgyógyászati vagy egészségügyi- és szociális távellátási alkalmazásokban (pl. BIOTRONIK Home Monitoring [18]) hasznosíthatók, melyekben a testbe ültetett vezeték nélküli érzékelők energiaellátása korlátos és energiaforrásaik újratöltése nem lehetséges. Ilyen implantátumok például a szívritmus-szabályozók és cardioverter defibrillátorok (pl. Biotronik Philos II DR-T pacemaker és Lumax DR-T ICD). Az eljárások jól alkalmazhatók továbbá olyankor is, amikor az beültetett érzékelők – pl. induktív csatolás útján – újratölthetők. Ezekben az esetekben az újratöltések gyakorisága jelentősen csökkenthető, mely nyilvánvaló módon javíthatja az eszközt hordozó személy életminőségét.

5. Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt szeretném megköszönni témavezetőim, *Dr. Levendovszky János* és *Dr. Csurgay Árpád* professzor urak állhatatos segítségét, támogatását és gondos irányítását. Hálás vagyok továbbá *Dr. Roska Tamás* professzor úrnak, a Doktori Iskola vezetőjének, aki

mindvégig biztosította a munkámhoz szükséges elengedhetetlen feltételeket.

Köszönetet mondok *Dr. Wolfgang Porod* professzor úrnak, aki lehetővé tette számomra, hogy egy gyümölcsöző nyarat töltssek el a University of Notre Dame Centre for Nano Science and Technology kutatóközpontjában. Hálás vagyok Notre Dame-i közvetlen kollégámnak, *Rakos Baláznak*, aki megosztotta velem a nanotechnológiában szerzett tapasztalatait. Köszönöm *Csurgay Ildikó* vendégszeretét és anyai gondoskodását, melyben a Notre Dame-i első hetem során részesített. Köszönetet mondok továbbá *Karacs Kristófnak*, aki nagy segítségemre volt kinti életem megkezdésekor. Köszönet illeti *Rácz Zoltánt* a Notre Dame-i tartózkodásom alatt nyújtott támogatásáért.

Köszönöm legközelebbi munkatársaimnak, *Matyi Gábornak*, valamint a *Wireless Sensor Networks* kutatócsoport tagjainak az értékes eszmecseréket és a hasznos tanácsokat.

Szintén hálával tartozom doktorandusz társaimnak, különösen *Bankó Évának*, *Benedek Csabának*, *Cserey Györgynek*, *Ercsey-Ravasz Máriának*, *Füredi Lászlónak*, *Gaurav Gandhinak*, *Gyimesi Gergelynek*, *Harczos Tamásnak*, *Iván Kristófnak*, *Miháltz Mártonnak*, *Giovanni Pazienzának*, *Soós Gergelynek*, *Szálka Zsoltnak*, *Tar Ákosnak*, *Tibold Róbertnek*, *Vásárhelyi Gábornak*, *Veres Józsefnek*, *Weiss Bélának* és *Zeffler Tamásnak* mindennemű segítségükért és az együtt töltött élménydús percekért.

Hálás vagyok továbbá *Bércesné Novák Ágnesnek* és *Takács Györgynek*, akik megosztották velem sokéves tapasztalataikat a közösen oktatott tárgyak tanítása során.

Külön köszönöm *Haraszti Isvánné*, *Csókási Anna*, *Adorján Livia* és *Tihanyi Judit* emberségét és adminisztrációs kérdésekben nyújtott segítségét. Köszönettel tartozom továbbá a *Tanulmányi Osztály*, a *Dékáni Hivatal*, a *Gondnokság*, a *Gazdasági Osztály*, a *Könyvtár*, a *Portaszolgálat* munkatársainak valamint a *rendszergazdáknak* és a *takarítóknak*, akik az évek során biztosították a munkámhoz nélkülözhetetlen feltételeket.

Külön köszönettel és hálával tartozom *Áginak*, aki mindvégig bátorított és hitt bennem. Végül, de nem utolsósorban köszönöm *családom* és *barátaim* szeretetét és folyamatos támogatását.

Kutatásaimat a következő programok támogatták.

- Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok (OTKA), T-38345 számú program;
- Office of Naval Research (ONR), Multidisciplinary University Research Initiative (MURI) egy programja;
- Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok (OTKA), NI61101 számú program;
- Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatal (NKTH), Mobil Innovációs Központ 2.1.3 számú program.

6. Publikációk

Folyóiratokban

- [1] **B. Hegyi**, J. Levendovszky, “Energy balancing cooperative diversity for wireless sensor networks,” *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, 2008; 1: pp. 524–543.
- [2] **B. Hegyi**, J. Levendovszky, “Optimal statistical energy balancing protocols for wireless sensor networks,” *WSEAS Transactions on Communications*, 2007; 6: pp. 689–694.
- [3] **B. Hegyi**, Á. Csurgay, W. Porod, “Investigation of the nonlinearity properties of the DC I-V characteristics of metal-insulator-metal (MIM) tunnel diodes with double-layer insulators,” *Journal of Computational Electronics*, 2007; 6: pp. 159–162.
- [4] **B. Hegyi**, J. Levendovszky, “Enhancing the performance of medical implant communication systems through cooperative diversity,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications Special Issue on Wireless and Pervasive Communications for Healthcare*, elbírálás alatt.

Konferenciákon

- [5] **B. Hegyi**, J. Levendovszky, “Efficient, distributed, multiple-relay selection procedures for cooperative communications”, in *Proc. International Symposium on Wireless Pervasive Computing 2008*, May 7-9 2008, Santorini, Greece, pp. 170–174.
- [6] **B. Hegyi**, Á. Csurgay, W. Porod, “Investigation of the nonlinearity properties of the DC I-V characteristics of metal-insulator-metal (MIM) tunnel diodes with double-layer insulators”, *11th International Workshop on Computational Electronics*, May 25-27 2006, Vienna, Austria.

7. A témához kapcsolódó irodalom

Nagysebességű, hűtetlen, CMOS-kompatibilis, többsávós infravörös és THz-es érzékelők

- [7] J. D. Vincent, “Fundamentals of infrared detector operation and testing,” *John Wiley & Sons*, New York – Chichester – Brisbane – Toronto – Singapore, 1989.
- [8] A. Sanchez, C. F. Davis, Jr., K. C. Liu, and A. Javan, “The MOM tunneling diode: theoretical estimate of its performance at microwave

and infrared frequencies,” *Journal of Applied Physics* 1978, 49: pp. 5270–5277.

Energiatudatos csomagtovábbítási protokollok

- [9] MPR-MIB Users Manual, <http://www.xbow.com>.
- [10] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, “Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks,” *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000; vol.2: pp. 10.
- [11] H. O. Tan, I. Korpeoglu, “Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks,” *Sigmoid Record* 2003; 32: pp. 66–71.

Kooperatív kommunikációs eljárások orvosi biológiai alkalmazásokban

- [12] J. N. Laneman, G. W. Wornell, “Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks,” *IEEE Transactions on Information Theory* 2003; 49: pp. 2415–2425.
- [13] A. J. Johansson, “Performance of a radio link between a base station and a medical implant utilising the MICS standard,” *Proc. 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2004; vol. 3: pp. 2113.
- [14] A. J. Johansson, “Wireless communication with medical implants: antennas and propagation,” *Ph.D. dissertation, Department of Electrosience, Faculty of Engineering, Lund University, Lund, Sweden*, 2004.
- [15] W. G. Scanlon, J. B. Burns, N. E. Evans, “Radiowave propagation from a tissue-implanted source at 418 MHz and 916.5 MHz,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 2000; 47: pp. 527–534.
- [16] A. Alomainy, Y. Hao, Y. Yuan, Y. Liu, “Modelling and characterisation of radio propagation from wireless implants at different frequencies,” *Proc. 9th European Conference on Wireless Technology*, 2006; pp. 119.
- [17] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, A. Lippman, “A simple cooperative diversity method based on network path selection,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 2006; 24: pp. 659–672.

Egyéb irodalom

- [18] BIOTRONIK Home Monitoring, <http://www.biotronik.de>.