

Pozicionálás szenzorhálózatokkal egy naprendszerbeli égitesten

Szeile Aliz¹, Dr. Bacsárdi László^{1,2}, Dr. Huszák Árpád¹

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék

² Nyugat-magyarországi Egyetem, Informatikai és Gazdasági Intézet, Sopron

Napjainkban egy-egy naprendszerbeli égitest felszíni vizsgálatára költséges űreszközöket készítenek és küldenek. A jövőben azonban elképzelhető, hogy néhány nagyon drága eszköz helyett nagyszámú olcsóbb mérőeszközt juttatnak el egy-egy bolygó vagy kisbolygó felszínére, amelyek autonóm módon mozogva végeznek méréseket és juttatják el az eredményeiket egy földi irányítóközpontba. Jelen cikkben azt vizsgáljuk, hogy egy szenzorokból álló hálózat mozgása hogyan oldható meg anélkül, hogy megszakadna a kapcsolat az egyes szenzorokkal, illetve különböző körülmények (például egy porvihar) milyen hatást gyakorolnak egy ilyen hálózatra.

1. Szenzorhálózatok egy távoli égitesten

A bolygók felszínének feltérképezésében nagy segítséget nyújthatnak a szenzorok, szenzorhálózatok. A szenzorok olyan eszközök, amelyek különböző fizikai jelenségek megfigyelésére képesek (pl. hőmérséklet, fény, páratartalom) és a mért adatokat továbbítani tudják egy speciális eszköz, a nyelő felé. Ezáltal az égitest felszínén végbement mérések eredményeit a nyelő össze tudja gyűjteni és képes lehet továbbítani a Föld felé.

A szenzorhálózatok nagy darabszámú egyszerű szenzor egységből álló, autonóm működésre képes elosztott számítógépes hálózatok. Az érzékelő egységekből kifolyólag megfigyelő, adatgyűjtő funkciót valósítanak meg, esetenként adatfeldolgozó és analízis feladatokra is képesek. Az alkalmazás költséghatékonyságát növeli, hogy a szenzor elemei olcsón előállíthatók, ugyanakkor gondot okozhat az erőforrás utánpótlása. Pl. egy bolygó felszínére elhelyezett szenzorhálózat esetében a szenzorok nem rendelkezhetnek nagy nap-elemmel, illetve akkumulátorral/generátorral. Ezért fontos a lehető legkisebb energiafelhasználásra való törekvés. A hatékonyságot növelheti, hogy ha néhány szenzor képes nagy energiatartalékok tárolására. Tipikusan ezek a nyelő szenzorok, amelyek alkalmasak kell legyenek a kommunikációra nem csak a szenzorokkal, hanem a Föld felé is, műholdak segítségével. Mivel a szenzorhálózaton belül vezeték nélküli hálózati összeköttetés van jelen a szenzorok között, így könnyű azok mozgatása, ami két szempontból hasznos [1]. Egyrészt a kezdetben le nem fedett területekre is kerüljenek szenzorok, illetve a szenzorok adott területen belüli egyenletes eloszlását könnyebb legyen fenntartani. Másrészt pedig a szenzorhálózat megfelelő összetételével egy hatékony alkalmazás jöhet létre a felszíni vizsgálatokhoz. A továbbiakban egy általunk feltételezett szenzorhálózatot mutatunk be, majd ezen a szenzorhálózaton egy saját szimulációs programmal elvégzett vizsgálatokat és eredményeit szemlél-tetjük.

2. A pozicionálás nehézsége

A pozicionálás igen nagy jelentőséggel bír a szenzorhálózatok alkalmazásánál, főleg egy égitest vizsgálatánál. Elengedhetetlen, hogy ismerjük a mérések pontos helyzetét, hiszen például ha vizet keresünk, vagy talajmintákat vizsgálunk, az eredmények pozíciója szükséges a további kalkulációkhoz.

2.1 A kialakított szenzorhálózat alapvető felépítése

A mérési környezettel kapcsolatban nagyon sok kérdés vetődik fel, melyeket figyelembe kell venni a feltételezett szenzorhálózat kialakítása során. A szenzorhálózatok több lehetséges felépítésének vizsgálata után arra jutottunk, hogy az alább felsorolt szempontok a legfontosabbak számunkra [2, 3, 4, 5].

Egy bolygón mérhető adatok

Egy bolygó felszínén többfajta adatot eredményező vizsgálat végezhető. Fontos meghatározni, hogy ezeknek az adatoknak mennyire kell naprakésznek lenniük. Pl. víz keresésénél, vagy talajminta vizsgálatánál nem okoz gondot, ha a mért adat csak később jut el a Földre, attól még ugyanúgy érvényes marad. Ezzel szemben, ha pl. hőmérsékletet mérünk, akkor fontos, hogy az eredmény időben megérkezzen. Ezen kívül meg kell adni, hogy periodikusan, folytonosan, vagy esemény hatására történjenek a mérések [6]. Olyan szenzorhálózatot választottunk, ahol az adatok sokáig érvényesek, és a mérések periodikusan valósulnak meg.

Műholdak igénybevétele

A műholdak igénybevétele teszi lehetővé, hogy az égitest felszínén mért adatok eljuthassanak a Földre. Ha több műholdat használunk, akkor biztosított az állandó lefedettség, ugyanakkor ez nagyon költséges és sok helyen kivitelezhetetlen. Ezért a hálózatunkban csak kevés műhold alkalmazását feltételezzük.

Szenzorok mozgása

A mobilitás meghatározásánál a véletlenszerű és az előre meghatározott pályán való mozgást kombináltuk [7]. A szenzorok kezdetben egy véletlenszerű irányt kapnak, ebbe az irányba kezdenek el mozogni. Ahhoz, hogy a szenzorok egy bolyban maradjanak, és ne szakadjanak le egymástól, a modellünkben kijelöltünk egy biztonsági sávhatárt, amely az y irányú elmozdulásra ad korlátot. Ha eléri valamelyik szenzor ezt a korlátot, akkor az iránya megváltozik. Az irányváltáskor az elmozdulás y koordinátája változik meg, így kisebb lesz az esély a leszakadásra. Leszakadás esetén megszakad a kapcsolat a szenzorral, és elveszítjük az eszközt.

Nagyobb teljesítményű szenzorok a hálózatban

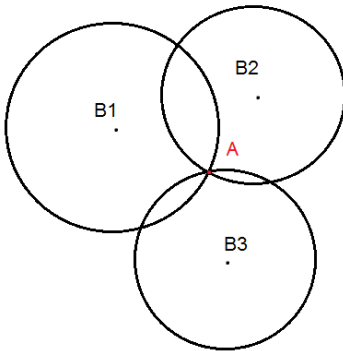
A nagyobb teljesítményű nyelő szenzorokat ezentúl szuperszenzorként fogjuk nevezni. A szuperszenzorok gyűjtik össze a többi szenzortól az adatokat és továbbítják műholdon keresztül a Földre. A működtetésük drágább a műholdakkal való kommunikáció miatt, mint a többi szenzornak, azonban ha megfelelő számban találhatók a hálózatban, akkor sokkal hatékonyabb és hosszú távon gazdaságosabb lesz az alkalmazás, mint nélkülük. A szuperszenzorok is mozognak az egyszerűbb mérésre szánt szenzorokkal együtt, ezáltal biztosítják, hogy mindig rendelkezésre álljanak, ha adatküldésre kerül sor.

Szenzorok közötti kommunikáció

Ha a mérésre szánt szenzorok egymással is képesek kommunikálni (*multi-hop* hálózat), akkor ez jóval költségesebb megoldást kínál, mintha csak a szuperszenzorokkal lehetne megvalósítható (*single-hop* hálózat). Az első esetben több lépésben tudna eljutni az adat a szuperszenzorokhoz, biztosítottabb lenne az összegyűjtésük. A második esetben mindenképp meg kell várnia egy szenzornak, amíg egy szuperszenzor a közelébe ér. Esetünkben ez nem okoz gondot, hiszen a szuperszenzorok is mozognak, ezért a költséghatékonyság szempontjából az utóbbi módszert választottuk.

2.2 Háromszögelés alkalmazása a kialakított szenzorhálózatban

Navigációs műholdrendszer hiányában egy naprendszerbeli égitest felszínén nem használhatók a Földön megszokott, GNSS-alapú (*Global Navigation Satellite System*) módszerek, mint az amerikai GPS vagy az európai Galileo. Ezért a helymeghatározáshoz a háromszögelés módszerét alkalmaztuk (1. ábra) [8, 9, 10]. Ez alapján 3 szenzor helyzetét ismerve meghatározható egy negyedik szenzor pozíciója is, ha ez a szenzor beleesik a másik három hatótávjába, abba a távolságba, amelyen belül még képesek érzékelni egymást.



1. ábra *A háromszögelés szemléltetése*

A *B1*, *B2* és *B3* jelöli az ismert helyzetű szenzorokat, a közepén látható *A* pedig a negyedik szenzor, melynek pozícióját meg akarjuk határozni. A módszer körmetszést alkalmaz. Ha a *B1*, *B2* és *B3* szenzor hatósugara nagyobbak, mint az *A* szenzortól való távolság, akkor alkalmazható a megoldás. *B1*, *B2* és *B3* középpontú és *B1A*, *B2A* és *B3A* sugarú körök megadják az *A* pozícióját. Ebben az esetben a *B1*, *B2* és *B3* szenzor referencia pontnak minősül. Referencia pont egy olyan szenzor, amely segítségével helymeghatározás végezhető. Miután kiszámoltuk az *A* helyzetét, ő is referencia pont lesz. A módszert rekurzívan folytatva az egész szenzorboly helyzete ismert lesz, azzal a feltétellel, hogy nincs leszakadó szenzor. Ha van ilyen, akkor az azt jelenti, hogy nincs olyan három másik referencia pont a bolyban, amely az adott szenzor helyzetét meg tudná határozni. A kezdeti referencia pontok esetünkben lehetnek a szuperszenzorok, hiszen az ő helyzetük mindig ismert, mert képesek kapcsolatot létrehozni a műholdakkal.

2.3 Hibatorlódás

A háromszögelés során a helymeghatározás következtében felléphet némi eltérés a számított és a valós koordináták között. Ez azért van, mert a mérési eredmények nem teljesen pontosak (pl. jelszint ingadozás) és a számítások következtében is előfordulhat minimális kerekítésből adódó eltérés. Kezdetben ez a differencia nagyon kicsi, azonban több lépcsős helymeghatározás esetén a hiba halmozódik és jelentőse válnak.

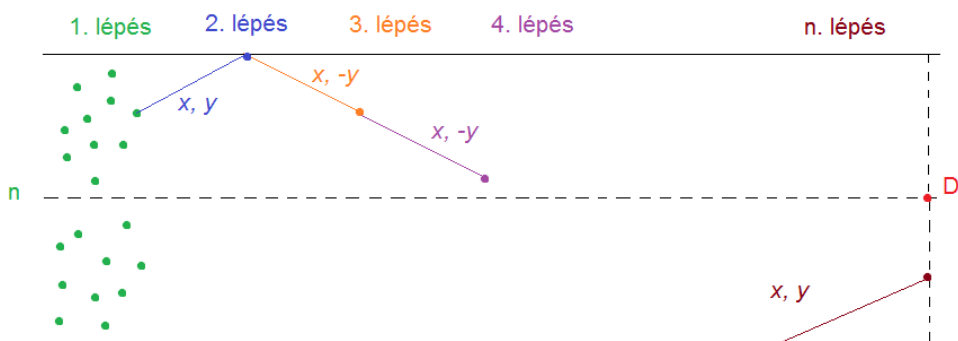
A kezdeti referencia pontokból számított koordináták esetében jelenik meg először a helymeghatározásból adódó hiba. Ezután már a kiszámolt pozíciójú szenzor is referencia pont lesz és a további szenzorok pozíciójának számításakor már az eltéréssel megtoldott eredményt viszi magával. A hiba így továbbterjed és a sokadik számítás után már akkora mértékű lehet, ami gondot is okozhat. Probléma lehet, ha egy szenzor igazából benne van egy szuperszenzor hatótávjában és képes lenne kommunikálni vele, viszont a hibatorlódás miatt ő úgy érzékeli, hogy nincs benne ebben a hatótávban. Ezért nem küldi el neki a mért

adatokat, a kommunikáció tehát elmarad és az eredmények nem kerülnek hozzánk. Ezen okok miatt tartottuk fontosnak a hibatorlódás figyelembevételét és vizsgálatát.

3 A szenzorhálózat szimulálása

3.1 A szenzorok mozgása

A mozgás szimulálásához elmozdulás vektorokat alkalmaztunk. Kezdetben minden szenzor kap egy véletlenszerű számpárt, ami az elmozdulásának lesz az x és y koordinátája. Ezzel a vektorral mozdul el a kiindulási helyzetből és halad tovább egészen addig, amíg el nem éri a meghatározott sávhatárt. Amint eléri az y koordinátája a sáv y koordinátáját, onnantól a mínusz egyszeresére változik, így váltva irányt. Az új elmozdulás vektorral halad tovább mindaddig, amíg újra el nem éri a korlátot. A szenzorboly mozgása egy adott D pont irányába történik. A D ponttal jelöltük ki a vizsgálni kívánt terület egyik határát. Ha valame-lyik szenzor eléri ezt a D pontot (azaz x koordinátája nagyobb vagy egyenlő lesz a D pont x koordinátájával), akkor a szimuláció befejeződik (2. ábra).



2. ábra Egy kiválasztott szenzor mozgása

Az ábrán a zöld pontok (balra) jelölik a bolyban lévő n darab szenzor kiindulási helyét, ebből kiválasztva egyet megfigyelhető annak mozgása az x, y koordinátákkal. A kék pont az első lépés utáni helyzetet mutatja, itt a szenzor eléri a megadott sávhatárt. Ezután az y koordinátája a leírt módon megváltozik és az új iránnyal halad tovább egészen eddig, amíg el nem éri a D pont sávját.

3.2 Kráter és porvihar

Eddig a naprendszerbeli égitest felszínén vagy a felszín felett akadálymentesen közlekedő szenzorokról beszéltünk. A modellünket azonban bővítettük két olyan jelenséggel, amelyek egy ideális helyzethez képest jobban jellemezhetik az égitest felszínén uralkodó valós körülményeket. Egyik a kráter, másik pedig a porvihar jelensége.

Kráter

A kráter esetében felszíni egyenlőtlenséget vizsgáltuk. Mi történik akkor, ha a szenzorboly nem sík terepen halad, útjukba kerül egy mélyedés is? A válaszhoz a szimulációba beépítettünk egy krátert. A szenzorok kapnak egy meredekségi változót, ami azt nézni, hogy aktuálisan sík, leejtős vagy emelkedős terepen haladnak. Attól függően, hogy a szenzor a

kráter melyik részén van, változik a sebessége. Lefelé haladva gyorsabb mozgása lesz, felfelé haladva pedig lelassul. Ez jelentős hatással van a pozicionálás hatékonyságára, hiszen a szenzorok folyamatosan távolodnak illetve közelednek a meredekség változásának hatására.

Porvihar

A porvihar jelensége nem csak a felszínen, hanem a felszín felett haladó szenzorokat is érinti. Ennek hatására megszűnik a kommunikáció a szenzorok között, ellenben a mozgásuk nem marad abba. Egy megadott időintervallumban jelentkezik a vihar, ez alatt az idő alatt a szenzorok helymeghatározása nem működik. Ez problémás lehet, hiszen így nagyobb valószínűséggel válhatnak a szenzorok leszakadókká, túlléphetik a sávhatárt úgy, hogy nem veszük észre. A vihar megszűnése után újra fel kell venni a kapcsolatot egymással, de ez már nehezebb, hiszen sok szenzor veszett el időközben. Ez nem csak az érzékelő eszközök elvesztésével jár, a mért adatokat sem kapjuk meg.

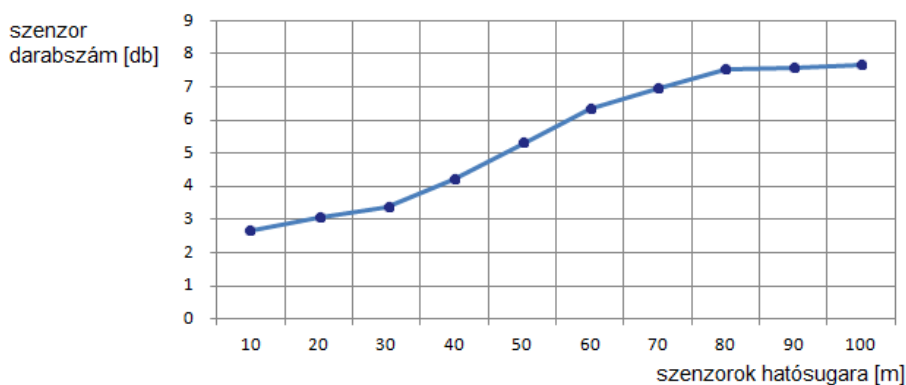
4 A szimulációs vizsgálatok eredményei

Az eddig leírtak egy víziót alkotnak, ami elképzeléseinket mutatja be. A konkrét számításokat első lépésként egy kisebb hálózatra végeztük el, de az elméleti összefüggések így is jól kivehetőek. Terveink között szerepel nagyobb méretű hálózatok vizsgálata is ugyanilyen felépítésben.

A szimulációk során többek között az alábbi paramétereket és alapértelmezett értékeiket vettük alapul, melyeket egyes mérésekben változtattunk: szenzorok száma: 20 db, biztonsági sávok távolsága: 40 m, elmozdulás maximális értéke: 4 m, szenzorok hatótávolsága: 30 m, hiba maximális mértéke: 1 m, D pont (a cél) távolsága: 1000 m.

Szenzorok darabszámváltozása a hatósugár függvényében

Vizsgáltuk, hogy a szenzorok hatósugarának változása miként befolyásolja azoknak a szenzoroknak a darabszámát, amelyek közvetlenül a szuperszenzorokból számíthatók ki (3. ábra).



3. ábra Szuperszenzorokból számolt szenzorok számának változása a hatótávolság függvényében. Szenzor darabszám: szuperszenzorokból kiszámolt helyzetű szenzorok darabszáma átlagolva

Megfigyelhető, hogy minél nagyobb a szenzorok hatótávja, annál nagyobb a vizsgált számosság is. Ennek oka, hogy a szuperszenzorok hatósugara is növekszik és több másik szenzor kerül bele a látómezőjükbe, vagyis egyre több szenzor helyzetét képesek kiszámolni.

Egy stagnálás alakul ki ~80 m hatósugár után, hiszen ennél nagyobb táv esetén már a bolyban szereplő összes szenzor pozíciója kiszámolható a szuperszenzorok segítségével egy lépésben.

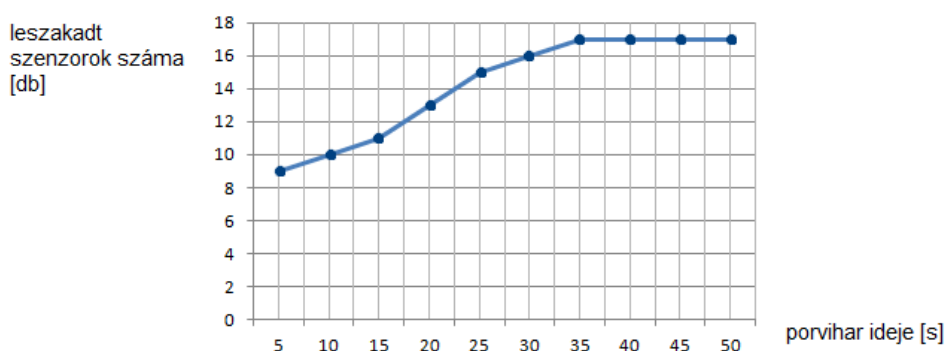
Átlagolt hiba változása a hatósugár függvényében

Vizsgáltuk azt is, hogy a szenzorok hatósugarának változtatása miként befolyásolja az átlagolt hibát. Jelen esetben az átlagolt hiba a valós és a számolt koordináták közötti különbség a szenzorokra átlagolva.

Minél nagyobb a hatósugár értéke, annál kisebb lesz az átlagolt hiba. Ennek az oka az, hogy nagyobb hatótáv esetén több szenzor pozíciója határozható meg a szuperszenzorokból, így kevesebb lépésben torlódik a hiba, a becsült érték pontosabb lesz. Itt is jelen van egy stagnáló érték, hiszen bizonyos nagyságú hatósugárnál már az összes szenzor helyzetét kiszámolhatjuk egy lépésben a szuperszenzorokból, csak egy lépés hibájával tolódik el a koordináták értéke.

Porvihar

Vizsgáltuk azt is, hogyan függ a leszakadó szenzorok száma a porvihar időtartamától (4. ábra).

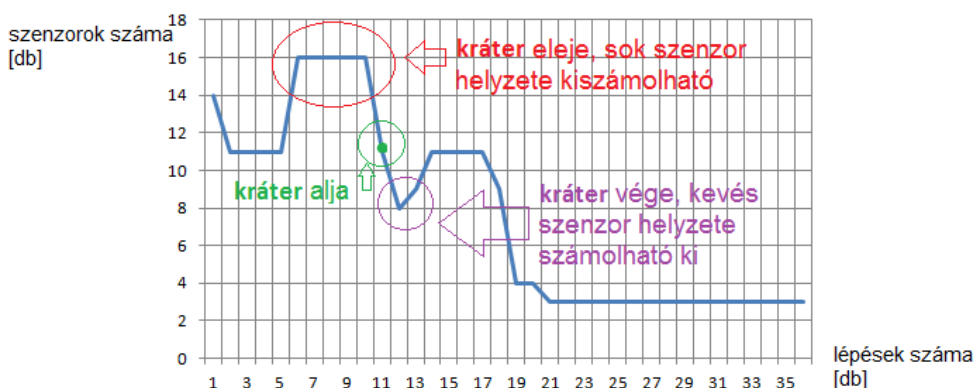


4. ábra A leszakadó szenzorok száma a porvihar idejének függvényében

Leolvasható, hogy minél tovább tart a vihar, annál több szenzor szakad le a bolytól, hiszen több idő alatt egyre nagyobb az esélye a szenzoroknak a leszakadásra. Nem veszik észre, hogy túllépnek a biztonsági sávhatáron, vagy nagyon lemaradnak a bolytól. Egy stagnálás alakul ki ~35 s körül, ennek az oka az, hogy itt már az összes szenzor leszakadt és nem képesek a porvihar ideje után visszaállítani a kapcsolatot.

Kráter hatása a pozicionálás sikerességére

Vizsgáltuk azt is, hogy a kráter jelensége milyen hatással van a szenzorhálózaton belüli helymeghatározásra, milyen mértékben segíti elő, ill. csökkenti annak sikerességét (5. ábra).



5. ábra Szenzorok helyzetének kiszámíthatósága a kráter függvényében.
Lépések száma – x tengely, kiszámolt helyzetű szenzorok száma [db] – y tengely

Megfigyelhető, hogy a kráter hol helyezkedik el, a szenzorok hányadik lépésnél esnek bele. A piros körrel jelzett területen kezdődik a kráter, ahol ugrásszerűen megnő a meghatározható pozíciójú szenzorok száma, hiszen a szenzorok összetorlódnak egy helyre. A zöld körrel jelölt területen van a kráter alja, itt a szenzorok sebessége visszaáll a kráter előtti sebességre. A lilával jelölt rész pedig a kráter vége, az emelkedős részen a szenzorok mozgása lelassul, jobban szétszóródnak és kevésbé esnek bele egymás hatótávjába, így a helymeghatározás lehetősége is csökken.

5. Összefoglalás

A szenzorhálózatok alkalmazása hatékonyabbá teheti a Naprendszer égitestein zajló kutatásokat, ugyanakkor újszerű kihívásokkal és problémákkal szembesít minket egy ilyen jellegű hálózat. Cikkünkben egy kérdésre, a pozicionálásra fókuszáltunk, és elméleti modell mellett szimulációs számításokat végeztünk arra, hogy egy háromszögletesen alapuló pozicionálási megoldás hogyan befolyásolja a szenzorok mozgását. Egyik legjelentősebb problémánkkal foglalkoztunk tovább, a hibatorlódással, aminek nagymértékű jelenléte adatvesztést eredményezhet. Olyan összefüggésekre mutattunk rá, amelyek kellően jellemzik ezt a jelenséget és felhasználhatóak annak korlátozására.

Irodalomjegyzék

- [1] Vincze Z., Vida R. (2007): Mobil eszközök alkalmazása szenzorhálózatokban http://web.tmit.bme.hu/~vida/cv/hiradastechnika_v6.pdf
- [2] Shah R.C., Roy S., Jain S., Brunette W. (2003): Data MULEs: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks. *Proc. IEEE Workshop on Sensor Network Protocols and Applications (SNPA)*, pp. 30–41, Anchorage, AK, USA
- [3] Tong L., Zhao Q., Adireddy S. (2003): Sensor networks with mobile agents. *MILCOM 2003 – IEEE Military Communications Conference*, Vol. 22, No. 1, pp. 688–693, Boston, MA, USA
- [4] Chakrabarti A., Sabharwal A., Aazhang B. (2003): Using predictable observer mobility for power efficient design of sensor networks. *Proc. IPSN'03, Second*

International Workshop on Information Processing in Sensor Networks, pp. 129–145, Palo Alto, CA, USA

- [5] Luo J., Hubaux J.-P. (2005): Joint mobility and routing for lifetime elongation in wireless sensor networks. *Proc. IEEE INFOCOM'05*, pp. 1735–1746, Miami, FL, USA
- [6] Wang G., Cao G., Porta T. (2004): Movement-assisted sensor deployment. *Proc. IEEE INFOCOM'04*, pp. 640–652, Hong Kong
- [7] Butler Z., Rus D. (2003): Event-based Motion Control for Mobile Sensor Networks. *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 2, No. 4, pp. 34–42
- [8] Fang B. (1990): Simple solution for hyperbolic and related position fixes. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol. 26, No. 5, pp. 748–753
- [9] Kanaan M., Pahlavan K. (2004): A comparison of wireless geolocation algorithms in the indoor environment. *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.*, Vol. 1, pp. 177–182
- [10] Sahinoglu Z., Gezici S., Güvenc I. (2008): *Ultra-wideband Positioning Systems*. Cambridge University Press