

TDK Dolgozat

Készítette:

Zachár Gergely

Rádióinterferencia alapú hibatűrő objektumkövetés

Készítette:

Zachár Gergely

Mérnök informatikus MSc, II. évfolyam

Témavezető:

Dr. Simon Gyula

egyetemi docens

Pannon Egyetem Műszaki Informatikai Kar
Rendszer- és Számítástudományi Tanszék

2014

Tartalom

1. Bevezetés	1
2. Irodalmi áttekintés	1
2.1. Rádióinterferenciás lokalizáció	3
3. Rádióinterferenciás követés	4
3.1. Rádióinterferometrikus fázistér	4
3.2. Fázisbecslés	10
3.3. Követés egy dimenzióban.....	14
3.4. Követés magasabb dimenziókban	17
3.5. Mérési hibák hatása	17
4. Pozícióbecslés	18
4.1. Egyszerű pozícióbecslő	18
4.2. Önkorigáló pozícióbecslő algoritmus.....	20
5. Megvalósított rendszer	21
5.1. Teszt hardver	22
5.2. Konfigurációk	22
5.3. A mérőeszközök szoftvere.....	23
5.4. Bázisállomás	24
5.5. PC oldali működés.....	25
6. A rendszer működésének folyamata	27
6.1. Beállítás	27
6.2. A mérés folyamata.....	29
7. Mérési eredmények	30
7.1. Zajérzékenység vizsgálat.....	30
7.2. Fázismérések	33
7.3. Objektumkövetés	36
7.4. Objektumkövetés önkorigáló pozícióbecsléssel.....	37
8. Összehasonlító értékelés	38
9. Összefoglalás	42
Irodalomjegyzék.....	44

1. Bevezetés

A lokáció-alapú szolgáltatások fontos építőkövei különféle alkalmazásoknak, többek között felügyeleti eszközöknek, mobil robotoknak vagy számos iparban és ellátási-láncokban használt követési technológiának. Egy objektum helyzetének meghatározására sokféle megoldás létezik, mint például a globális helymeghatározó rendszer (GPS), vagy a beltérben WiFi rádióhullámokat, RFID címkéket vagy olcsó kamerákkal készült képeket felhasználó rendszerek.

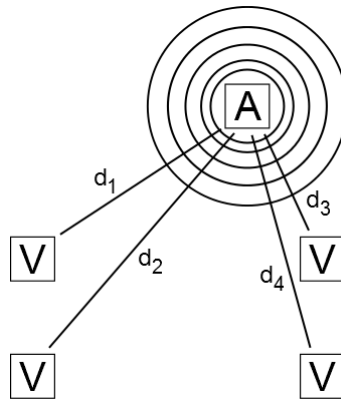
Az alábbi tudományos munkában egy újszerű követési megoldás kerül bemutatásra, ami ismert helyzetű rádió-adó és -vevő eszközök segítségével követ egy mozgó vevőt, annak kiindulási helyzetének ismeretében. Az eljárás a rádió-interferencián alapul; a két adó által gerjesztett interferencia hullámok segítségével következtetni lehet az adók és a két vevő relatív helyzetére, ahol az egyik vevő maga a követett eszköz. Az egymást követő, folyamatos mérések segítségével a rendszer képes követni egy vagy több objektum helyzetét. Az objektum helyzetének pontosabb és robosztusabb meghatározásához kidolgozásra került egy olyan önkorigáló pozícióbecslő algoritmus is, amely redundancia alkalmazásának segítségével lehetővé teszi a hibás vagy hiányzó mérési adatok kezelését.

A tudományos munka újszerűsége a pontos, mindazonáltal olcsó beltéri objektumkövetés megvalósításának lehetősége, mely a jelenlegi megoldásokkal szemben nem igényel speciális vagy költséges hardvert. Ennek ellenére nagy pontossággal képes a követendő objektum helyzetének meghatározására.

A 2. fejezet a kapcsolódó munkákat tekinti át, míg a további fejezetek a kutatás folyamán elkészült rádióinterferenciás követéssel foglalkoznak. Így a 3. fejezetben a rádióinterferenciás követés alapjai kerülnek bemutatásra, többek között a rádióinterferometrikus fázistér és az egydimenziós követés. A 4. fejezet tartalmazza a kidolgozott önkorigáló pozícióbecslő algoritmus bemutatását, mely redundáns mérések segítségével teszi robosztusabbá a követést. Az 5. fejezet a megvalósított tesztrendszerrel foglalkozik, míg a 6. fejezet bemutatja a mérés folyamatát. Végül a 7. fejezetben találhatóak a rendszer működését és hatékonyságát bemutató mérések, valamint a más rendszerekkel való összehasonlítás is.

2. Irodalmi áttekintés

Napjaink legjelentősebb rendszere a kültéri helymeghatározásban a Globális Helymeghatározó Rendszer (GPS), mely néhány méteres pontosságú. Ez a pontosság speciális differenciális módszerekkel akár egy méter alá is csökkenthető. A GPS használatához a vevőknek rálátással kell rendelkezniük a referenciaként használt műholdakra, így a GPS alkalmazhatósága beltérben erősen korlátozott. Beltéri helymeghatározásra sok javasolt, versenyképes megoldás létezik, az akusztikus lokalizációtól a képfeldolgozáson keresztül a rádió-alapú módszerekig, hogy csak párat említsünk.



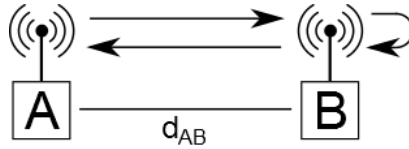
1. ábra: Akusztikus helymeghatározás: ismeretlen helyzetű A adó (hangszóró) lokalizálása ismert helyzetű V vevők (mikrofonok) segítségével. A lokalizáció a hang által megtett d_1 - d_4 út időeltéréseiből számolhatóak.

Az akusztikus (leggyakrabban ultrahangos) módszerek hangimpulzusok terjedési idejének mérésével számolják ki az eszközök közötti távolságokat. A mért távolságok és a jeladók helyzetének ismeretében az objektumok pozíciója megbecsülhető. Az [1]-ben az ismeretlen helyzetű, hangszóróval felszerelt adó eszköz a kibocsátott hangimpulzusok segítségével lokalizálható (1. ábra). Az ismert pozíciókon elhelyezett vevők (mikrofonnal felszerelt eszközök) óráit szinkronizálni kell egymással, majd a beérkező hangimpulzus idejét rögzíteni. A d_1 - d_4 távolságokon a hang eltérő idő alatt terjed, ezért a rögzített időpontok is eltérnek. Ezek páronkénti különbsége és a vevők ismert helyzete alapján az objektum helyzete matematikai módszerekkel már becsülhető.

Alacsony költségű lokalizáció valósítható meg képfeldolgozás segítségével. A [7]-ben bemutatott módszerben grafikus markerekkel jelölnék meg egyes helyeket (pl. egy múzeum fontosabb tárlóit), majd ezekről egy egyszerű kamerás telefonnal készült képek feldolgozásával és egy digitális térkép alapján határozzák meg a helyszínt. Ennél kifinomultabb rendszerekben előzetesen sok képet készítenek az utcákról vagy az épületekről, majd az adatbázisban tárolt és az ismeretlen helyen készült képek összehasonlításával történik a helymeghatározás [8].

A beltéri lokalizációban gyakran használnak rádióhullámokat. A jelerősség alapú mérések két nagyobb csoportra bonthatóak. Az első esetben csak a jelterjedés matematikai modelljeit használják ki [10]. Itt több ismert helyzetű adótól származó jel erősségét (és esetenként fázisát) méri a lokalizálni kívánt eszköz, majd valamilyen matematikai modell alapján becslik a pozíciót. Ezeknek a megoldásoknak komoly hátránya, hogy a jelerősség jelentősen változik a környezet hatására, ezáltal a becslés is pontatlan.

A jelerősség alapú mérések második csoportjában több adót és egy térképet használnak fel, ami tartalmazza a várt jelerősség statisztikai modelljét a különböző adók esetén a tér minden pontjában. Így a vett jelerősség alapján a vevő aktuális pozíciója becsülhető [11]. Ennek a megoldásnak komoly hátránya, hogy az ismeretlen objektum elhelyezkedésének területét előre fel kell térképezni, valamint a környezet változása esetén (pl. szekrények, polcok elmozdítása) a térképezést újra el kell végezni a kívánt pontosság érdekében.



2. ábra: Távfolságmérés a rádióhullámok terjedési ideje alapján: az A adó által küldött rádiójelet a B vevő fogadja és azonnal „visszaküldi” (hardveres segítséggel). Az adó a küldés és a fogadás között eltelt idő alapján kiszámolja a két eszköz közötti távfolságot.

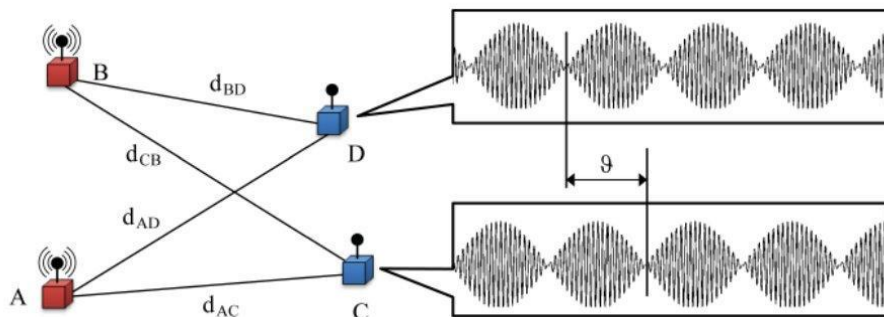
A rádióhullámok terjedési idejét kihasználó távfolságmérést mutat be [3]. A mért páronkénti távfolságok, a többi (pl. akusztikus) távfolságmérésen alapuló módszerhez hasonlóan, felhasználható az eszközök helyzetének becsléséhez. A küldés és (a másik eszköz által „visszaküldött” jel) vétele között eltelt idő (t) arányos a jel által megtett úttal (d_{AB}): $t = 2d_{AB}/c$, ahol c a fénysebesség (lásd a 2. ábrát). A módszer nagy hátránya, hogy a jel terjedési sebessége igen nagy (1 ns alatt 30 cm!), ezért mind az eltelt idő pontos mérése, mind a jel „visszaküldése” hardveres segítséget igényel. Ezen kívül a jel többszörös terjedése, visszaverődése jelentősen megnehezíti a mérést. A pontosság ez esetben növelhető a terjedés idejének és a jel fázisának kombinált mérésével [9]. Egy teljesen eltérő, a rádióhullámok interferenciáján alapuló megoldást mutat be az [5] (részletesen lásd a 2.1. fejezetben).

2.1. Rádióinterferenciás lokalizáció

A rádióinterferenciás lokalizáció [5] célja volt, hogy kis költségű helymeghatározó megoldást nyújtson szenzorhálózatokban olcsó, általánosan használt alkatrészek segítségével. A módszer a magas frekvenciás jelfeldolgozás helyett a rádióinterferenciára támaszkodik és az alacsony frekvenciás interferencia hullámokat dolgozza fel.

Az eljárás a két adó (A és B) által keltett, és a vevőknél (C és D) mérhető interferencia hullámokat használja fel, ahogy az a 3. ábrán látható. Amennyiben az adók által sugárzott frekvenciák közel azonosak ($f_A \approx f_B \approx f$), a kapott interferencia tartalmaz egy alacsony frekvenciájú ($\Delta f = |f_A - f_B|$) burkolójelet is. Ez az alacsony frekvenciás jel az aktuális RSSI (vételi jelerősség) jel, ami a legtöbb rádió adó-vevőn mérhető és lekérdezhető.

A két vevő RSSI jele között mérhető ϑ fáziskülönbségből következtetni lehet a négy eszköz elhelyezkedésére a következő módon [5]:



3. ábra: Rádió-interferenciás fázismérés

$$\vartheta(f) = 2\pi \frac{d_{ABCD}}{c/f} \pmod{2\pi} \quad (1)$$

ahol c a fénysebesség, valamint a d_{ABCD} távolság-négyes a következő definícióval határozható meg:

$$d_{ABCD} = d_{AD} - d_{BD} + d_{BC} - d_{AC} \quad (2)$$

(a távolságok definíciói a 3. ábrán láthatóak). Fontos megjegyezni, hogy a távolság-négyes nem egy általános, tehát párok közötti távolság, hanem lineáris kombinációja a négy eszköz közötti távolságoknak. Az (1)-ben szereplő modulo operátor miatt pedig több lehetséges megoldás is létezik, így egy mérésből a tényleges távolság-négyes nem meghatározható. A bizonytalanság megszüntethető több különböző vivőfrekvencián történő méréssel, tehát különböző $\vartheta(f)$ meghatározásával. Egy diofantoszi egyenlet megoldásával a tényleges d_{ABCD} számolható (lásd [5]), amennyiben nagyon alacsony a fázismérések hibája. Sajnos ez a feltétel igen ritkán teljesül szabályozatlan körülmények között, ahogyan az a 38. ábrán is látható.

A kapott távolság-négyesekből az objektumok helyzete egy genetikus algoritmuson alapuló optimalizáló algoritmus segítségével kiszámítható. Az [5]-ben bemutatott eljáráshoz nagy mennyiségű adat összegyűjtése szükséges (az [5] esetében ez 80 percnyi mintavételt jelentett, de a kisebb mértékű összeállításokat 5 perc késleltetésére becsülték) és a lokalizáció is számításigényes (2 perc számítás az [5]-ben bemutatott mérésben).

A következő fejezet a kutatás során kidolgozott újszerű, szintén rádióinterferencia-alapú követési módszert írja le, ami lehetőséget ad pontos, mindazonáltal olcsó beltéri objektumkövetés megvalósítására, mely a jelenlegi megoldásokkal szemben nem igényel speciális vagy költséges hardvert. Ezen kívül valós időben képes a követendő objektum helyzetének nagy pontosságú meghatározására, valamint kevésbé érzékeny a mérési bizonytalanságokra.

3. Rádióinterferenciás követés

A javasolt módszer nem tiszta lokalizációs, hanem egy követési technika, ahol feltételezzük, hogy a követett objektum kiindulópontja ismert, és az objektum mozgásának követését folyamatos, egymást követő mérésekkel végezzük.

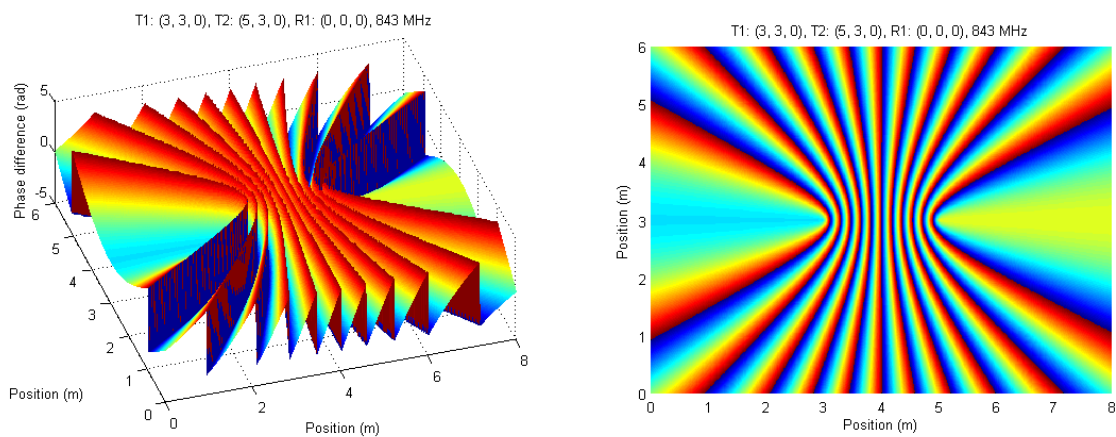
A rendszer rögzített helyzetű referencia eszközöket (adókat és vevőket), valamint tetszőleges számú követett vevőt tartalmazhat. Az egyszerűség kedvéért a továbbiakban csak egy követett eszközzel foglalkozunk, mert a követés triviálisan kiterjeszthető több eszközre is. Elsőként bemutatásra kerül a módszerben központi szerepet játszó interferometrikus fázistér, amit szimulációk segítségével is illusztrálunk. Ezután a fázismérés folyamatát és a fázisbecslő algoritmust, majd az egy dimenziós objektumkövetést ismertetjük. Végül a követés több dimenzióra is kiterjesztésre kerül.

3.1. Rádióinterferometrikus fázistér

A rádióinterferenciás követés megvalósításához két rögzített helyzetű adót (A és B) és egy rögzített helyzetű C vevőt, valamint a követett D vevőt használjuk (lásd az 3. ábrán). Ekkor az A, B, C eszközök helyzete és a használt vivőfrekvencia ismeretében a tér minden egyes pontjában egyértelműen meghatározható a ϑ fáziskülönbség az (1) alapján. A továbbiakban

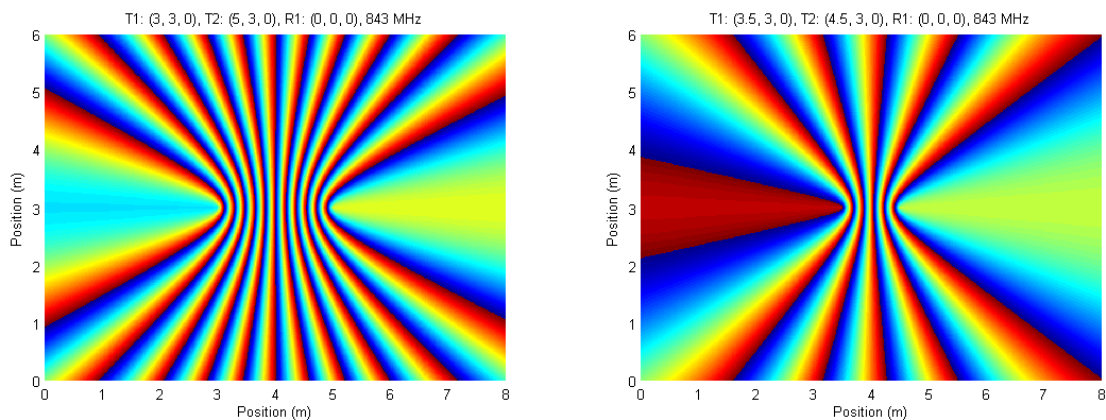
egy adott A, B, C eszköz-hármashoz és f vivőfrekvenciához tartozó ϑ fáziskülönbség értékeket az S síkon *rádióinterferometrikus fázistérnek* (vagy röviden *fázistérnek*) nevezzük. A fázistér minden egyes pontja megfelel az S síkon mozgó D és a C vevő által ideális esetben mért fáziskülönbség értékeknek. A fázistér szemléltetésére egy szimulációs program készült.

A továbbiakban különböző fázistér szimulációk kerülnek bemutatásra. Az ábrák mindegyike egy 8x6 méteres területet ábrázol, ahol az S síkot az $(x, y, 0 \text{ m})$ koordináták definiálják. A viszonyítások alapja egy, az S síkban $(3 \text{ m}, 3 \text{ m}, 0 \text{ m})$ és $(5 \text{ m}, 3 \text{ m}, 0 \text{ m})$ pontban elhelyezett T1 és T2 adókból és a $(0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$ pontban elhelyezett R1 rögzített helyzetű vevőből álló konfiguráció, a használt frekvencia pedig 843 MHz. Ennek az elrendezésnek megfelelő fázistér 3D-s és 2D-s ábrázolása a 4(a) és 4(b) ábrán látható, ahol a z -tengely és a színátmenetek a fáziskülönbség értékeknek felelnek meg.

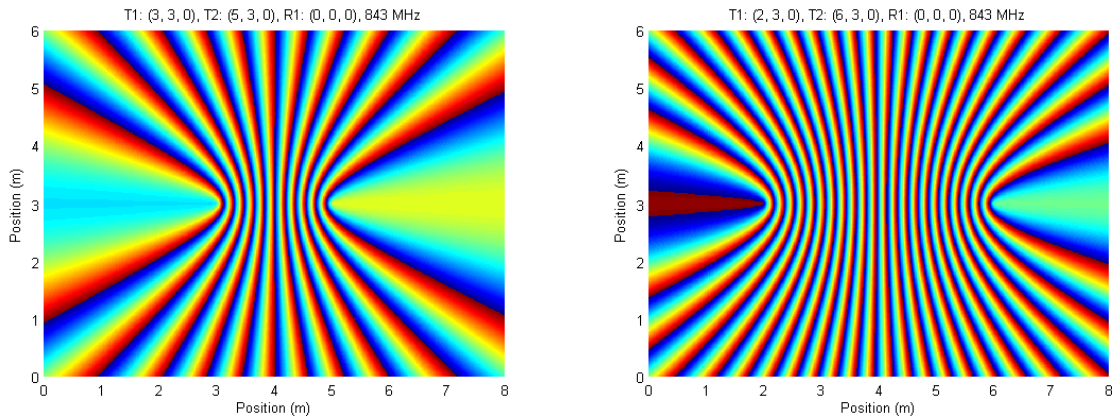


4. ábra: A referencia fázistér (a) 3 dimenzióban és (b) 2 dimenzióban ábrázolva.

A referencia elrendezésben az adók egymástól 2 méterre helyezkednek el. Érdeemes megvizsgálni, mi történik a távolság csökkentése és növelése esetén. A 5. és 6. ábra alapján megfigyelhető, hogy az adók közötti távolság 1 méterre csökkentésével a fázistérben elterülő szintvonalak, tehát a $\vartheta = 2k\pi$ értékeknek megfelelő hiperbolák száma csökken, a távolság 4 méterre növelésével pedig megnő.

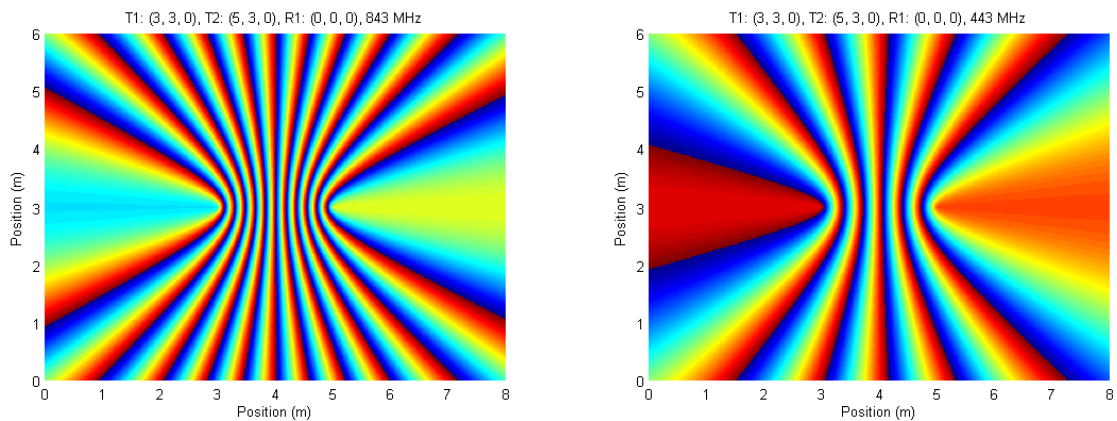


5. ábra: Az adók közötti távolság csökkentése: (a) referencia elrendezés, (b) 1 m távolság az adók között



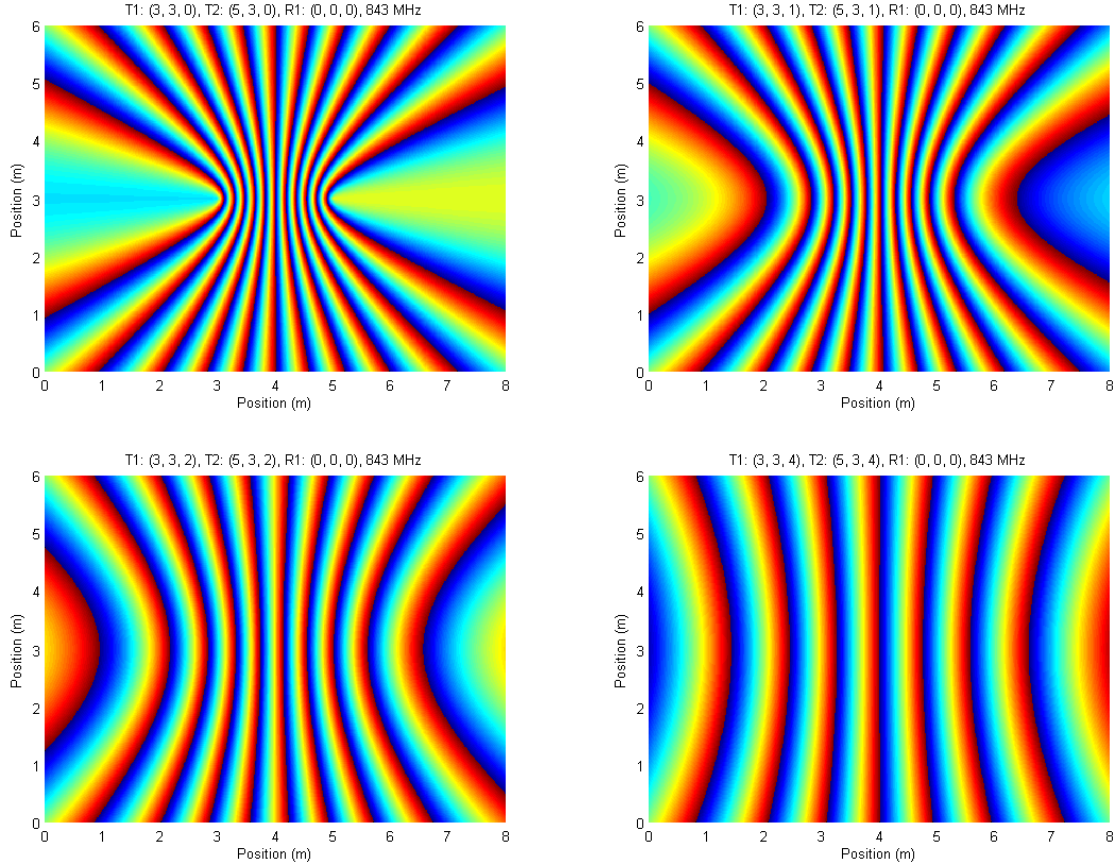
6. ábra: Az adók közötti távolság növelése: (a) referencia elrendezés, (b) 4 m távolság az adók között

A 7. ábrán látható a fázistér változása különböző frekvenciákon. Alacsonyabb frekvencián (443 MHz) a szintvonalak száma csökken, így (az adók távolságának változtatásához hasonló módon) befolyásolható a szintvonalak száma.



7. ábra: A fázistér különböző frekvenciákon: (a) 843 MHz, (b) 443 MHz

A valós felhasználáshoz érdemes megvizsgálni az adók síktól való távolságának hatását is. A 8. ábrán a két (minden esetben egymástól 2 méterre lévő) adó fáziskülönbségei láthatóak a síkról 1, 2 és 4 méterrel felemelve.

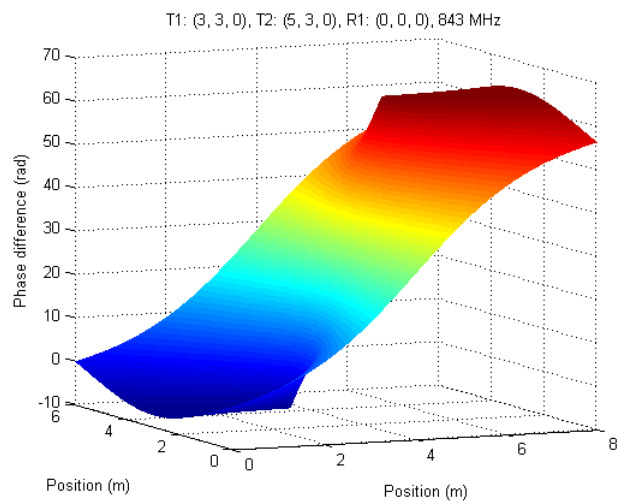


8. ábra: Az adók siktól való távolságának változtatása: (a) referencia elrendezés, 0 méter, (b) 1 méter, (c) 2 méter, (d) 4 méter

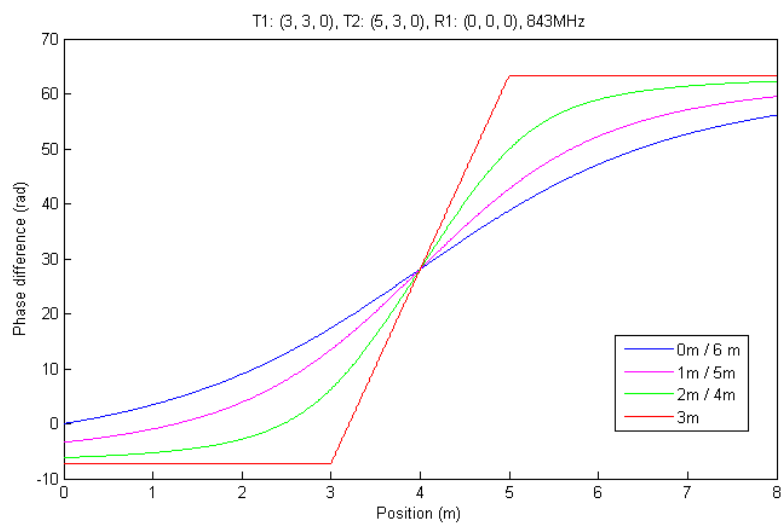
A fáziskülönbséget érdemes vizsgálni az (1)-ben szereplő modulus elhagyásával is:

$$\theta(f) = 2\pi \frac{d_{ABCD}}{c/f}, \quad (3)$$

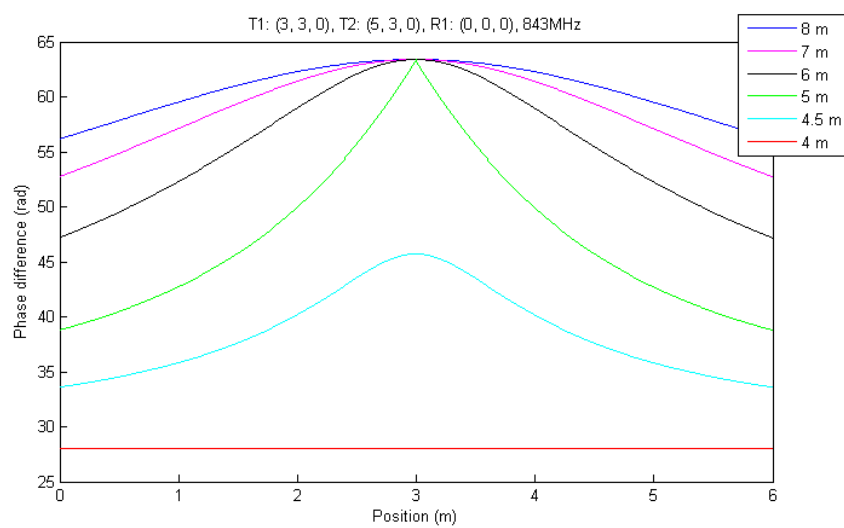
ahol θ az *abszolút fáziskülönbség*. Érdemes megjegyezni, hogy a fázistér definíciója kiterjeszthető erre az esetre is. Ekkor az *abszolút fázistér* 2π -vel való osztási maradéka az eddigi definíció szerinti fázisteret adja. A 9. ábrán szereplő referencia elrendezésen jól látható, hogy a kapott felület a középpontjára szimmetrikus. A jobb megfigyelhetőség kedvéért a 10. ábra a hosszanti metszetet, a 11. ábra a keresztmetszet felső felét mutatja különböző pozíciókban.



9. ábra: A referencia elrendezés abszolút fázistere a modulus elhagyásával.

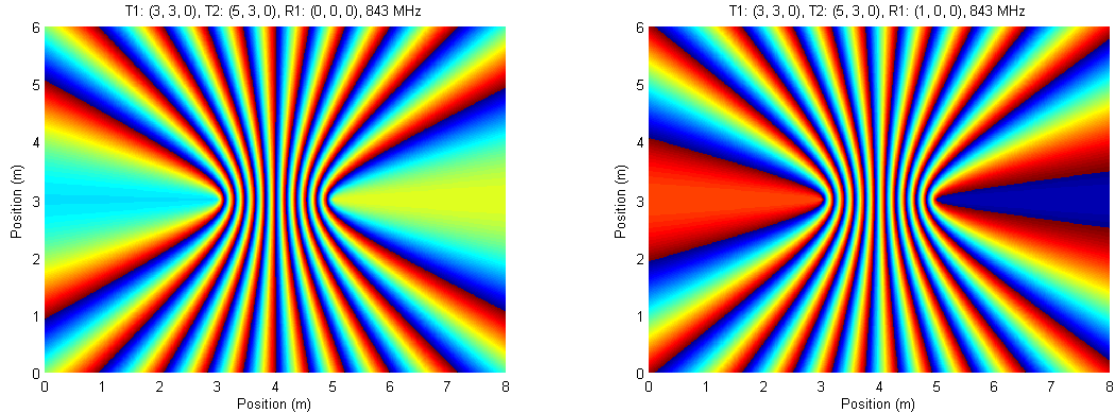


10. ábra: A referencia elrendezés abszolút fázisterének hosszmetsetei



11. ábra: A referencia elrendezés abszolút fázisterének keresztmetsetei

Az eddigiekben csak az adók elhelyezkedése lett megváltoztatva. A 12. ábra bemutatja azt az esetet, amikor az adók helyzete nem változik, csak a rögzített vevőt helyezzük át. A 12. ábrán jól megfigyelhető, hogy a szintvonalak helye ugyan megváltozott, de tetszőleges két pont között mért θ fáziskülönbség eltérés nem, tehát a rögzített vevő helyzete nem befolyásolja az abszolút fázistér felületének alakját.



12. ábra: A fáziskülönbségek változása a rögzített helyzetű vevő elmozdításával

Ez a jelenség az (1), (2) és (3) alapján belátható a következő módon:

$$\theta(f) = 2\pi \frac{d_{AD} - d_{BD} + d_{BC} - d_{AC}}{c/f}, \quad (4)$$

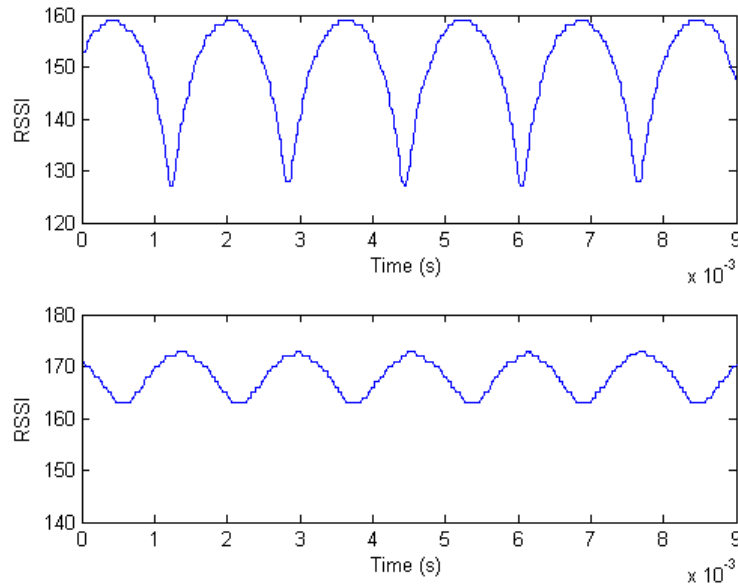
ahol C rögzített vevő helyzete ismert, tehát a d_{BC} és d_{AC} értéke is állandó és ismert, így az egyenlet a következő módon szétbontható és átalakítható:

$$\theta(f) = 2\pi \frac{d_{AD} - d_{BD}}{\frac{c}{f}} + 2\pi \frac{d_{BC} - d_{AC}}{\frac{c}{f}} \quad (5)$$

$$\theta(f) = 2\pi \frac{d_{AD} - d_{BD}}{\frac{c}{f}} + \theta_c \quad (6)$$

Tehát ahogyan az a (6)-ban látható, a rögzített helyzetű vevő csak egy konstans θ_c értékkel változtatja meg az abszolút fáziskülönbség értékét a fázistér minden pontjában. Ennek gyakorlati jelentősége, hogy a követett D eszköz elmozdulása minden esetben ugyanakkora abszolút fáziskülönbség eltérést okoz a C rögzített vevő helyzetétől függetlenül.

3.2. Fázisbecslés



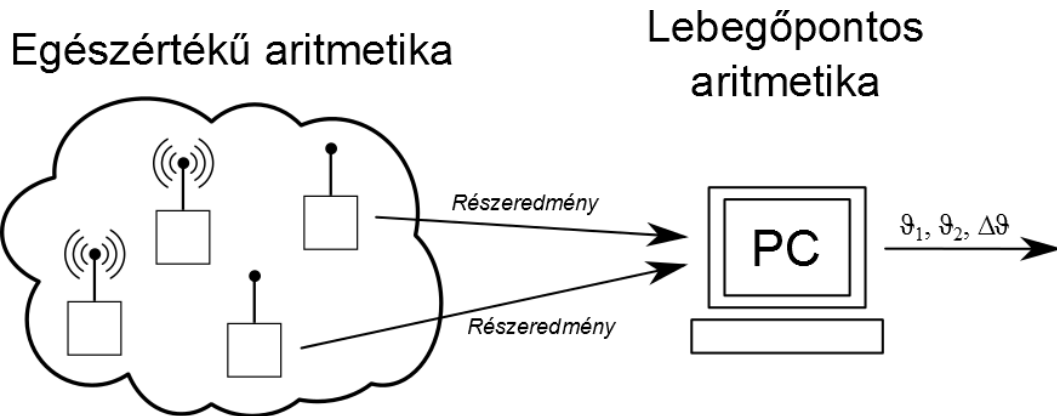
13. ábra: Két tipikus mért jelalak

A rendszer egyik legfontosabb eleme a C és D vevő által vett interferenciajel ϑ fáziskülönbségének meghatározása. A jelenlegi megoldásban egy referencia üzenet szolgál mind a mérés elindítására, mind a vevők szinkronizálására [2]. A mérési parancs után, a vevők elkezdik mintavételezni egy adott ideig a vett interferenciajel RSSI értékeit. A mintavételi idő hossza úgy van meghatározva, hogy a minta tartalmazzon pár teljes periódust (ennek illusztrációja a 13. ábrán, míg egy ténylegesen mért jel a 33. ábrán látható). Mindkét vevő (C és D) megméri a periódus hosszát (L), valamint az időeltérést (I) a mérési parancs és egy a vett jelben lévő referencia pont között. Ekkor a két adó közötti fáziskülönbség már kiszámítható a következőképpen:

$$\Delta\vartheta = 2\pi \left(\frac{l_C}{L_C} - \frac{l_D}{L_D} \right) \pmod{2\pi} \quad (7)$$

Az I és L paraméterek meghatározásához egy olyan algoritmusra volt szükség, ami kielégíti a következő követelményeket:

1. Használható legyen a limitált képességű és erőforrással rendelkező eszközökön: jelen esetben a hardver csupán 8 bites egészértékű adatokkal dolgozik és még hardveres osztásra sem képes.
2. A használt algoritmus legyen kellően gyors: a méréseket a lehető leggyakrabban kell elvégezni a követés folyamatossága és pontossága miatt.
3. Képes legyen a nem szinuszos jelalak feldolgozására: a rádió a mért RSSI értéket logaritmikus skálán adja meg.
4. Az algoritmus legyen kellően robusztus, a kis mértékben torzult jeleket is megfelelően kezelje.



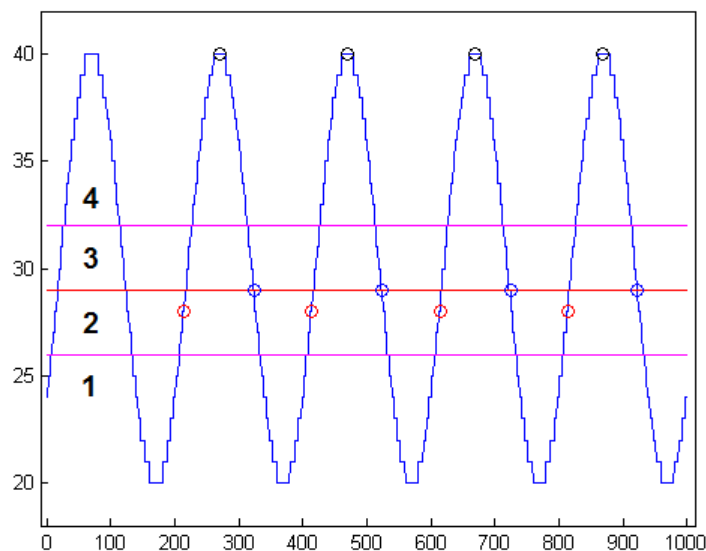
Az alacsony számítási teljesítmény és az egészértékű műveletek csak a jel *előfeldolgozását* teszik lehetővé az eszközökön.

A részeredmények továbbítása kis kommunikációs sávszélességet igényel

A lebegőpontos műveletek és a nagy számítási teljesítmény lehetővé teszi a pontos és gyors *utófeldolgozást* valós időben.

14. ábra: A fázisbecsléshez használt architektúra

A követelményeknek megfelelően egy olyan algoritmus került kidolgozásra, amely figyelembe veszi a mért jel sajátosságait, valamint minimális erőforrást használ fel a beágyazott eszközökön. Az algoritmus egyik fontos vonása, hogy a beágyazott eszközökön csak az egészértékű számításokat végezi el, és a kapott részeredményeket a számítógépre elküldve határozza meg a jel fázisát, kihasználva a lebegőpontos műveletek elérhetőségét. Fontos követelmény még, hogy a részeredmények elküldése kis sávszélességet igényeljen. Ezt a megoldást szemlélteti a 14. ábra.

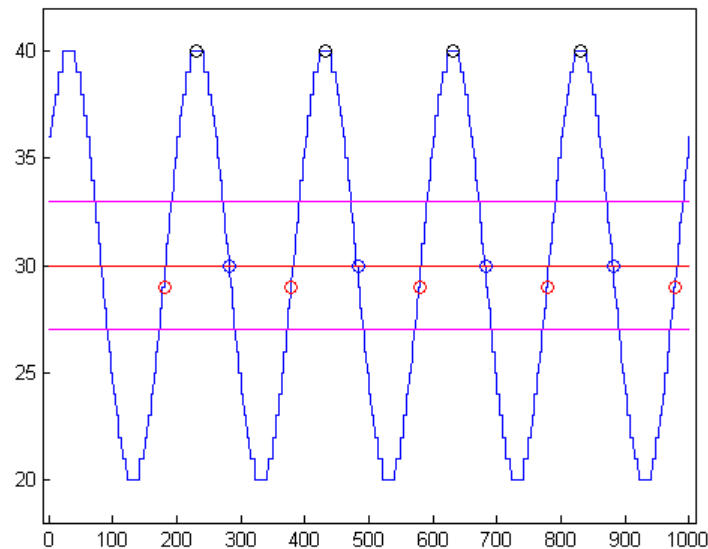


15. ábra: A mért jel (kék vonal) feldolgozása: az átlag piros vonallal, a „nullátmenetek” piros és kék körökkel, míg a maximumhelyek fekete körökkel jelölve

Az algoritmus működése a 15. ábrán látható. Első lépésben meghatározásra kerül a jel átlaga, amit a piros szintvonal szemléltet. Ezek után kiszámoljuk a két, alsó és felső szintvonalat

(lila), az átlagtól egy előre megadott $\pm\Delta$ távolságra. Az algoritmus lényege, hogy a jel csak egy meghatározott sorrendben haladhat az 1, 2, 3, 4-el jelölt területek között. Ez egy állapotgép segítségével került megvalósításra. A jel az 1-es zónából indul, és az állapot váltások minden egyes szintvonal átlépésekor megtörténnek, azonban csak az egyik irányban. Így az állapotgép megköveteli, hogy a jel az 1-2-3-4-3-2-1-... zónák sorrendjében haladjon. Ennek jelentősége, hogy a 2-3 és 3-2 zónákba történő váltás megfelel a (szinuszos jel analógiáját felhasználva) a nullátmeneteknek, míg a szigorú sorrend betartása megakadályozza, hogy a zaj miatt többször oda-vissza lépkedjünk az állapotok között (hiszterézis).

Ha a jel nem az 1-es zónából indul, az állapotgép minden egyes mintánál továbblép, egészen addig, amíg el nem éri a már helyes állapotot. Egy ilyen eset látszik a 16. ábrán. Ennek jelentősége, hogy az algoritmus igen egyszerű marad, a feldolgozás elkezdéséhez nem szükséges semmilyen külön számítás. Hátránya, hogy az első periódust teljes egészében ki kell hagyni a feldolgozásból.



16. ábra: A mért jel (kék vonal) feldolgozása abban az esetben, amikor a jel nem az 1. zónából indul. Megfigyelhető, hogy az első periódus minden esetben kihagyásra kerül.

A 3-2 zóna átmeneteinél (a 15. és 16. ábrákon kék körök) kiszámításra kerülnek a fekete körökkel jelzett maximum helyek is. A maximumhelyeket a két „nullátmenet” közötti felezőpontként definiáljuk és az algoritmus további futása során ezek elhelyezkedését, mint referenciapontokat használjuk fel. Fontos megjegyezni, hogy a „nullátmenetek” nem alkalmasak referenciapontként a jelben, ugyanis a különböző eszközök által rögzített RSSI mérések eltérőek lehetnek és akár különböző jelalakokkal is rendelkezhetnek (ahogyan az a 13. és 33. ábrán is látható), ezért a fáziskülönbségek ilyen mérése jelentős hibákat tartalmazna.

Mivel a pontos hullámhossz- és fázisbecsléshez célszerű a lebegőpontos aritmetika használata, ezért ezek tényleges kiszámítása csak a számítógépen történik meg. A beágyazott eszközökön csak az ehhez szükséges adatok egy részét dolgozzuk fel, a kapott

részeredményeket (a későbbiekben $DSUM$, SUM és NUM paraméterek) küldjük el a számítógépre [14].

A mintavételi időegységekben mért hullámhossz (L) meghatározásához kézenfekvő a referenciapontok távolságának átlagolása. Ennek megadásához az eszközök kiszámítják az egymás után következő pontok különbségének összegét, ami a $DSUM$ paraméter lesz, azaz:

$$DSUM = \sum_{i=2}^n P_{ref}(i) - P_{ref}(i-1) = P_{ref}(n) - P_{ref}(1), \quad (8)$$

ahol n a maximumhelyek száma és P_{ref} a referenciapontok időbeli távolsága a mérés elejétől. Ekkor a következő képlettel a hullámhossz megállapítható, ahol a $NUM = n$:

$$L = \frac{DSUM}{NUM-1} \quad (9)$$

A mért fázis is a referenciapontok segítségével kerül meghatározásra. Kiindulásként tekintsük a mintavétel kezdete és az első maximumhely távolságát. Ez jó közelítéssel megadja a mért fázist, azonban a többi referenciapont is felhasználásra kerül a pontosság növelése érdekében. Első megközelítésként vehetnénk minden referenciapontot és a hullámhossz hányadosának maradékát, majd ezek átlagát, de ehhez mindenképpen lebegőpontos számításokra lenne szükség. Ennek elkerülése érdekében a referenciapontok elhelyezkedése kerül kihasználásra. Legyen a SUM érték a minden referenciapont és a mintavétel kezdete közötti távolság összege:

$$SUM = \sum_{i=1}^n P_{ref}(i) \quad (10)$$

Ekkor azt tapasztaljuk, hogy az első P_{ref} távolság 0-szor, a második 1-szer a harmadik 2-szer, – és így tovább – tartalmazza a hullámhosszt. Azaz a teljes összeg a maximumhelyek számának megfelelő tagból álló számtani sor összegének megfelelő arányban tartalmazza a hullámhosszt. Így megkapható a maximumhelyek átlagos, mintavételtől mért távolsága, a következő módon:

$$l = \frac{(SUM - \frac{(NUM-1)*NUM}{2} * L)}{NUM} \quad (11)$$

Az egyenlet átírásával és leegyszerűsítésével kapható a következő forma:

$$l = \frac{SUM}{NUM} - \frac{DSUM}{2} \quad (12)$$

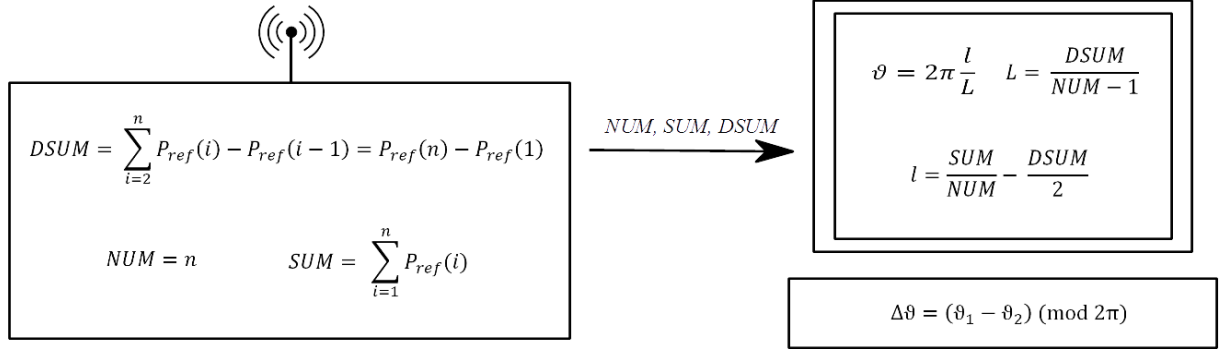
Ez az érték esetenként nagyobb lehet, mint a hullámhossz, mivel az algoritmusban néha csak a második teljes periódustól tudunk számolni, tehát egy hullámhosszal többet. Ehhez szükséges a következő korrekció:

$$l = \begin{cases} l - L, & \text{ha } l > L \\ l, & \text{ha } l \leq L \end{cases} \quad (13)$$

Végül az algoritmus által becsült fázis kiszámolható a következő módon:

$$\vartheta = 2\pi \frac{l}{L} \quad (14)$$

A 17. ábrán látható a számítási feladatok elosztása a számítógép és a beágyazott eszközök között. A lebegőpontos műveletek számítógépen történő elvégzésével nem csak a pontosság és a számítások sebessége növelhető, de a kommunikációhoz szükséges adatmennyiség is csökken. Amennyiben a számítás teljes egészében az eszközön történne a kapott és a számítógépnek elküldendő fázis és frekvencia adatokhoz *float* típust feltételezve 4+4 azaz 8 bájttra lenne szükség. Ezzel szemben a *NUM*, *SUM*, *DSUM* értékek egész típusúként csak 1+2+2 azaz 5 bájtot foglalnak, ami a folyamatos mérések miatt jelentős különbség.



17. ábra: A különböző számítási feladatok elosztása a beágyazott mérőeszköz és a számítógép között

3.3. Követés egy dimenzióban

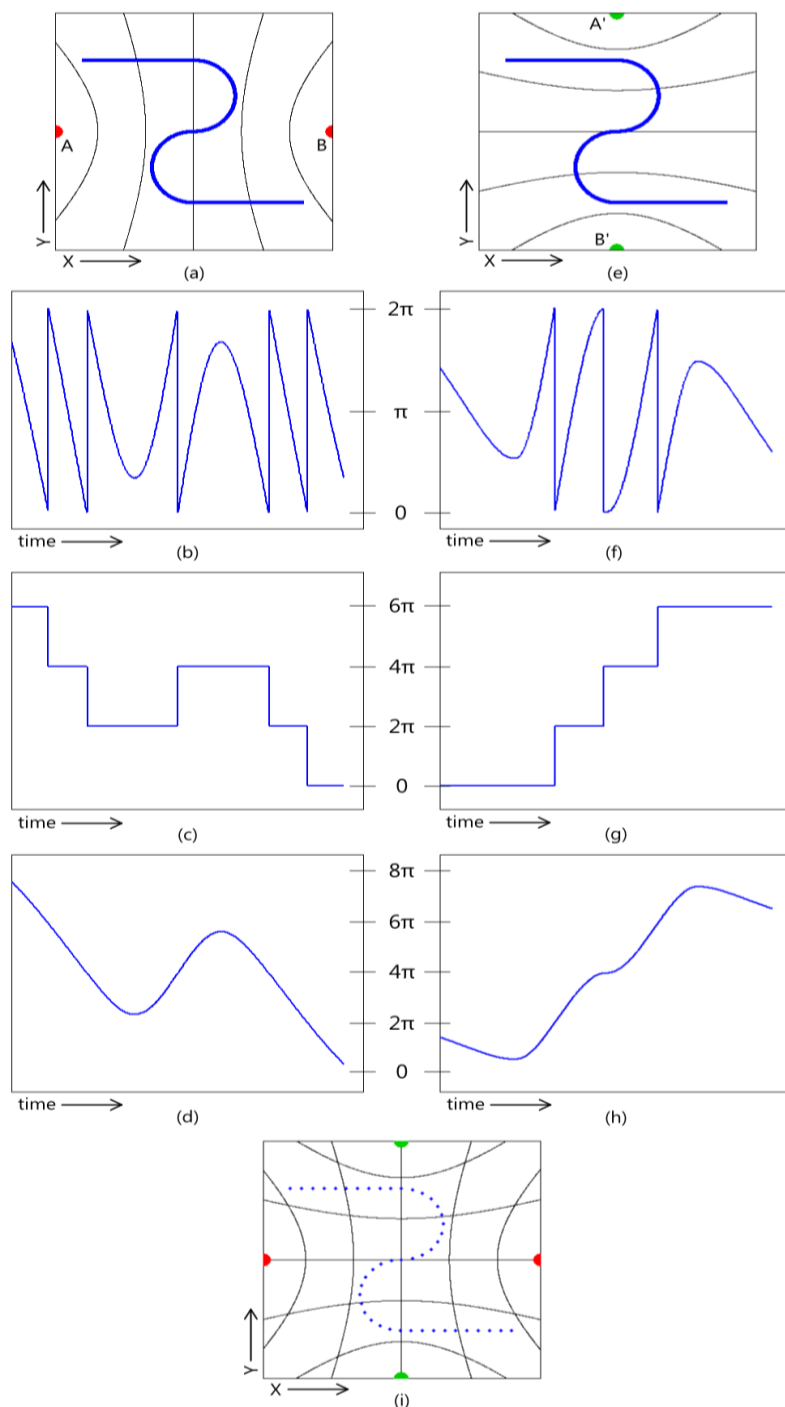
Az egy dimenziós követés megvalósításához két rögzített helyzetű adót (A és B) és egy rögzített helyzetű C vevőt, valamint a követett D vevőt használjuk (lásd az 0. ábrán). Az adók egyetlen vivőfrekvenciát használnak (szemben az [5] több vivőfrekvenciájával), míg a vevők folyamatosan mérik a ϑ fáziskülönbséget. Ebből a d_{ABCD} távolság-négyes számolható. A (2) megoldásainak megfelelően, a D mozgó eszköz elhelyezkedése hiperboloid felületek halmazán megadható, (amik két dimenzióban hiperbolák, ahogyan az a 18. ábrán látható). A ϑ értékének megmérésevel pedig a hozzá tartozó d_{ABCD} távolság-négyes meghatározza a D lehetséges helyzeteit. A 18(a) ábrán, illusztrációs céllal, a $2\pi i$ fáziskülönbséghez tartozó hiperbolák lettek feltüntetve. Érdeemes megjegyezni, hogy (a) egy mérésből nem megállapítható, hogy D melyik lehetséges hiperbolán helyezkedik el (tehát a k paraméter ismeretlen), valamint (b) még az adott hiperbola ismeretében sem meghatározható, hogy D pontosan hol található (hiszen a hiperbolán bárhol elhelyezkedhet).

Feltételezzük, hogy D kiindulási helyzete ismert. Továbbá feltételezzük, hogy az objektum mozgása viszonylag lassú, tehát az egymást követő, folyamatos mérések közötti fáziskülönbség eltérés kisebb, mint π . Ekkor a tényleges hiperboloid kiválasztható a feltételezett folytonosság alapján, felhasználva az előző időpillanatból becsült hiperboloidot a következő módon. Ha a k időpillanatban az ismert fázis φ_k és a mérés $k + 1$ időpillanatban $\varphi_{k+1}(i) = \vartheta_{k+1} + 2\pi i$, akkor a több lehetséges megoldás közül a φ_k értékéhez legközelebbi értéket választjuk:

$$i = \operatorname{argmin} |\vartheta_{k+1} + 2\pi i - \varphi_k| \quad (15)$$

Érdemes megjegyezni, hogy a probléma mögött a jól ismert phase-unwapping probléma áll (lásd például [12]). A 18(b) ábrán a mért fázisok láthatóak a $(0 \dots 2\pi)$ tartományban, a 18(c) ábra esetében a fáziskorrektíós értékek a (15)-nek megfelelően, végül a 18(d) ábrán az eredményül kapott, korrigált fázis lett ábrázolva.

A pontos fázis értékének ismeretében a megfelelő hiperboloid felület meghatározható az (1) és a (2) alapján. Így egy méréssorozat segítségével követhető az a hiperboloid felület, amin a D eszköz elhelyezkedik. Azonban a pontos elhelyezkedés a hiperboloidon továbbra sem ismert, ezért további, egymástól független távolság-négyesek felhasználására van szükség.



18. ábra: Rádióinterferenciás követés rögzített A, B, A', B' adókkal és rögzített $C = C'$ vevőkkel a középpontban (az átláthatóság miatt nincs jelölve), valamint a mozgó D eszközzel. (a) Az A és B adók által létrehozott fázistér ahol a $\vartheta=2k\pi$ értékeknek megfelelő hiperbolák láthatóak. A mozgó objektum pályáját a vastag vonal jelöli. Az objektum kiindulópontját ismertnek feltételezzük. (b) a C és a D eszköz között mért fáziskülönbség értékek, (c) fáziskorrektúrák értékek, (d) korrigált fázis értékek, (e)-(h) független mérés az A' és B' adókkal, (i) követés a két mérés becsült fázis értékeinek felhasználásával. Az objektum becsült pályája pontozott vonallal van feltüntetve.

3.4. Követés magasabb dimenziókban

Ha az A, B, C eszköz hármason kívül egy másik A', B', C' hármas is használunk, akkor már két távolság-négyest (d_{ABCD} és a $d_{A'B'C'D}$) mérhetünk meg, ahogy az a 18(a) és a 18(e) ábrán látható. Érdekes megjegyezni, hogy az A, B, C és az A', B', C' hármasok egyaránt lehetnek fizikailag különböző eszközök, vagy ugyanazon eszközök, de különböző szerepekkel. Például egy ilyen lehetséges megoldás lehet az A'=A, B'=C, és a C'=B.

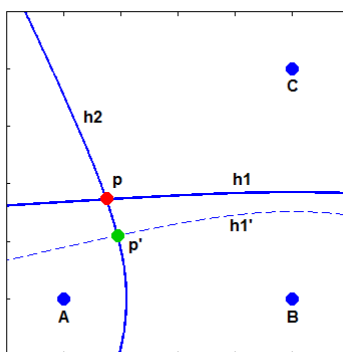
Két távolságnégyes felhasználásával, két független egydimenziós követést lehet egyszerre megvalósítani (lásd 3.3 fejezet). Minden egyes időpillanatban mindegyik követés meghatározza, hogy a D eszköz melyik hiperboloid felületen helyezkedik el. A 18. ábrán a két független követés látható a jobb és a bal oszlopokban.

Természetes módon a D eszköz a két hiperboloid metszéspontjában helyezkedik el, ami két dimenzió esetében kiszámítható, ahogyan az a 18(i) ábrán is látható. Az eszköz helyének meghatározásához három dimenzióban már három független távolság-négyes szükséges, amihez legalább négy rögzített helyzetű eszközt kell alkalmazni, amiből már három független eszköz hármas kiválasztható.

A méréseket időosztásos rendszerben (TDMA) végezzük, ahol az egymást követő időszleteket kiosztjuk minden távolság-négyeshez, tehát minden időszletben két adó ad és hozza létre az interferenciajelet a vevők számára.

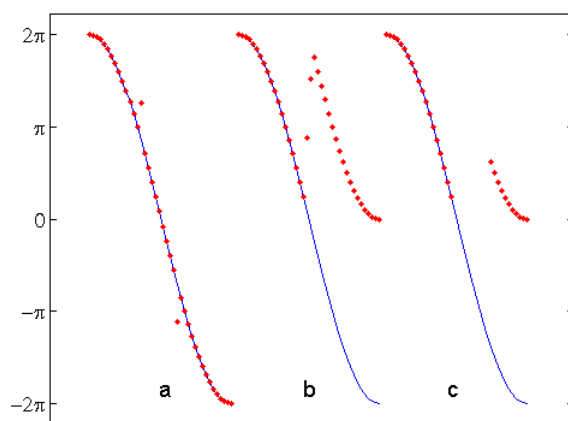
3.5. Mérési hibák hatása

A fázismérés során természetes módon mérési hibák adódhatnak, melyek a pozícióbecslésre is hatással vannak. Az előbbieken bemutatott megoldás két hiperbola metszéspontja segítségével határozza meg az objektum pozícióját. A kis fázismérési hibák természetesen kisebb (zaj-jellegű) eltéréseket okoznak a pozícióbecslőben is. A követetés jellegéből fakadóan azonban a nagyobb fázishibák nagyobb és ráadásul *maradó* hibákat okozhatnak. A 3.4 fejezetben leírt egyszerű követő algoritmus nem képes a fáziskorrekciónál bekövetkező hibák javítására vagy detektálására. Ilyen hiba akkor jöhet létre, ha (15) számítása során – a nagy mérési zaj miatt – helytelen fáziskorrekciós értéket kapunk. Ezáltal az objektum számított elhelyezkedése is hibás lesz, ahogyan az a 19. ábrán látható.



19. ábra: Az objektum becsült helyzete (p) a $h1$ és $h2$ hiperbola segítségével, a B, C és az A, B adók által létrehozott fázistérben. A $h1'$ hiperbola egy hibás fázisbecslés eredménye, ami hibás pozícióbecsléshez vezet (p').

A fázismérések természetes módon tartalmaznak különböző hibákat, ahogyan az a 20(a) ábrán látható. A π értéket meghaladó hibák azonban már megmaradó fáziskorrektációs hibát okozhatnak a 20(b) ábrán látható módon, ahol a kék vonal a valós, míg a piros pöttyök a becsült fázisértékeket mutatják. Hasonlóképpen az alulmintavételezett fázismérések (pl. hiányzó mérések) is hasonló hibákat okozhatnak. Erre mutat példát a 20(c) ábra. Ezek a fáziskorrektációs hibák a hozzájuk tartozó hiperbolákat – és ezáltal az objektum becsült helyzetét is – maradó módon torzítják. Fontos megjegyezni, hogy a hibás fáziskorrektáció pillanatától az objektum helyzete folyamatosan hibás, torzult marad. A probléma megoldásával a következő fejezetben javasolt önkorigáló algoritmusok foglalkoznak.



20. ábra: Különböző fáziskorrektációs hibák: (a) fázismérési (zaj-jellegű) hiba helyes fáziskorrektációval, (b) nagy fázismérési hiba és (c) hiányos vagy alulmintavételezett jel állandó fáziskorrektációs hibát okozva.

4. Pozícióbecslés

A követésnél fellépő mérési hibák miatt az objektum helyzetének meghatározása nem egyértelmű vagy egy fáziskorrektációs hiba miatt akár hibás is lehet. Az előbbire az egyszerű pozícióbecslő, míg utóbbira az önkorigáló pozícióbecslő algoritmus ad egy lehetséges megoldást ebben a fejezetben.

4.1. Egyszerű pozícióbecslő

A többdimenziós követés robosztussága növelhető a mért távolság-négyesek számának, és ezáltal a felhasznált hiperbolák számának növelésével. A kapott redundancia lehetővé teszi a rendszernek a hibás vagy hiányos mérések kezelését.

A hiperbola kiszámolásához használt parametrikus egyenlet a következő:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (16)$$

Érdemes megjegyezni, hogy a ebben az esetben a hiperbola középpontja az origóban van, valamint a fókuszpontok az x-tengelyen helyezkednek el. A valóságban még további eltolást és forgatást kell végezni, de az egyszerűség és az érthetőség kedvéért most eltekintünk ennek tárgyalásától.

Egy adott fáziskülönbséghez (ϑ) a fáziskorrekciós algoritmus és az ismert kiindulási helyzet megadja az i egész értékű paramétert, ekkor egy távolság-négyeshez a következő képlet származtatható (1), (2) és (15) alapján:

$$\frac{\vartheta+2\pi i}{2\pi} = \frac{d_{ad}-d_{bd}+d_{bc}-d_{ac}}{l} \quad (17)$$

ahol l a mérésben használt frekvencia hullámhossza. Az egyenletben szereplő ismert és ismeretlen értékek csoportosításával a következő képlet kapható:

$$\frac{\vartheta+2\pi i}{2\pi} l - d_{bc} + d_{ac} = d_{ad} - d_{bd} . \quad (18)$$

Itt a jobb oldalon felismerhető a hiperbola egyik definíciója, ahol minden egyes pontra igaz a következő egyenlőség:

$$|r_1 - r_2| = 2a, \quad (19)$$

ahol r_1 és r_2 a fókuszpontoktól vett távolság. Így az a paraméter kifejezhető a (18) behelyettesítésével (19)-be:

$$a = \left(\frac{\vartheta+2\pi i}{2\pi} l - d_{bc} + d_{ac} \right) / 2 \quad (20)$$

Érdemes megjegyezni, hogy az a paraméter előjelét még felhasználjuk további számításokban. Mivel a hiperbolák fókuszpontjainak helyzete ismert (ezek az adók aktuális pozíciói), a b paraméter is számolható a következő módon:

$$b = \sqrt{F^2 - a^2}, \quad (21)$$

ahol $2F$ a fókuszpontok közötti távolság. Ezen a ponton az összes szükséges paraméter ismert, ezért a (16) parametrikus egyenletet lehet használni egy adott hiperbola számításához. Például egy adott y koordinátához az x koordináta a következő módon számítható ki:

$$x = \text{sign}(a) * \sqrt{\frac{1+y^2}{F^2-a^2} * a^2} \quad (22)$$

Az objektum helyzetének becsléséhez (több hiperbola segítségével) a következő hibafüggvényt definiáljuk, egy adott (x, y) pontra:

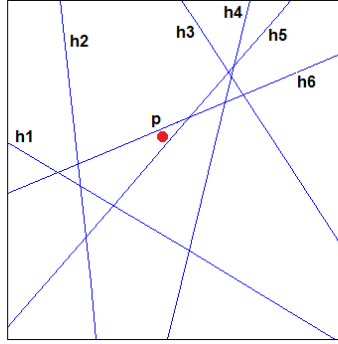
$$\text{err}(x, y) = \sum_{i=1}^n d_i(x, y), \quad (23)$$

ahol d_i a távolság az (x, y) pont és az i -edik hiperbola között.

A becsült (x_e, y_e) pozíciót úgy definiáljuk, mint azt a pontot, ahol a hibafüggvény felveszi a minimum értékét, azaz:

$$(x_e, y_e) = \text{argmin}_{x,y} \text{err}(x, y) \quad (24)$$

A hibafüggvény (23) többek között a pontosság mérésére is felhasználható. A 21. ábrán az objektum p helyzetének becslésére látható egy példa, ahol $h1, h2 \dots, h6$ a mért fáziskülönbségek alapján számolt hiperbolák.



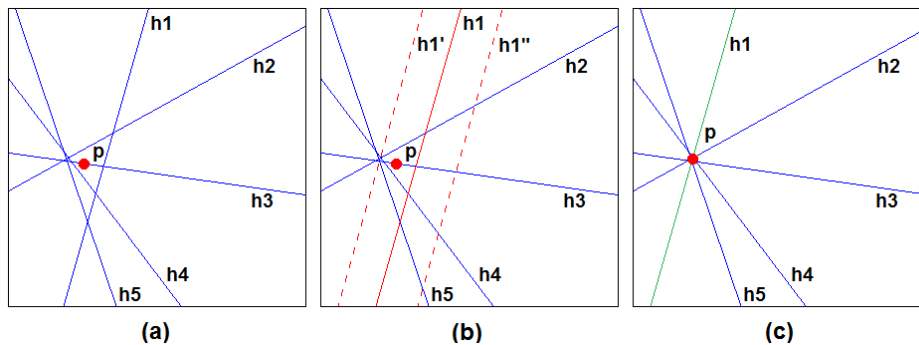
21. ábra: Példa az objektum helyzetének (p) becslésére 6 hiperbola alapján ($h1$ - $h6$).

Bár az egyszerű pozícióbecslő (24) a redundanciának köszönhetően pontosabb eredményeket ad, mint a 3.4 fejezetben bemutatott becslő, de a fáziskorrektúrák hibáit és annak hatásait még nem képes kezelni. A következő fejezetben egy önkorrigáló algoritmus kerül bemutatásra, amely képes felismerni és javítani a fáziskorrektúrából adódó eltéréseket, ezáltal robusztus pozícióbecslést nyújt.

4.2. Önkorrigáló pozícióbecslő algoritmus

Az ebben a fejezetben javasolt önkorrigáló algoritmus egyrészt egy továbbfejlesztett pozícióbecslő, másrészt több hiperbola segítségével képes a fáziskorrektúra hibáit javításra. A megoldás felhasználja (az esetlegesen hibás) korrigált fáziskülönbségeket, de erősen támaszkodik a redundáns mérésekre, ezáltal robusztusabbá téve a rendszert [13].

A feltételezett folytonosságon alapuló fáziskorrektúra (15) esetenként tartalmaz $2k\pi$ nagyságrendű hibákat. Így a fáziskülönbségnek megfelelő hiperbola rossz helyre kerülhet, ezáltal a hiperbola és a követett objektum közötti távolság nagyobb lesz, mint a hibamentes esetben. Ennek megfelelően a hibafüggvény (23) alkalmas a hibás eseteknek felismerésére. Tételezzük fel, hogy a hibás fáziskülönbség mérések száma jelentősen kisebb, mint a helyes méréseké, ekkor a következő algoritmus képes a fáziskorrektúra hibák felismerésére és javítására. Az algoritmus illusztrációja a 22. ábrán, míg pszeudo-kódja a 23. ábrán látható.



22. ábra: Az algoritmus egy elemi lépése: (a) az előző vagy kezdeti $h1$ - $h6$ hiperbolák alapján megbecsüljük az objektum helyzetét (p), (b) kiválasztjuk az ettől legtávolabbi hiperbolát és generáljuk a $\pm 2\pi$ fáziskülönbséghez tartozó $h1'$ és $h1''$ hiperbolákat, (c) amennyiben a hibafüggvény ezek közül bármelyikkel kisebb értéket ad, a hiperbolát véglegesen lecseréljük ($h1' \rightarrow h1$).

Az implementált algoritmus tartalmaz pár korlátozást a sebesség és a pontosság növelése érdekében. A *check_limit* megadja a maximálisan elmozdítható hiperbolák számát. A hibafüggvény értéke pedig alulról van korlátozva a *cost_limit* értékkel; ez alatt nem történik több próbálkozás.

```

1.   $P_0 = \{p_1 \dots p_n\}$  // mért fáziskülönbségek halmaza
2.   $H_{checked} = \{\}$  // ellenőrzött hiperbolák halmaza

3.   $[cost, d_1 \dots d_n] = calculate\_error(P_0)$  // lásd (23), (24)
4.  WHILE  $|H_{checked}| < check\_limit$  &&  $cost < cost\_limit$  DO

5.       $i = \operatorname{argmax}_i (d_1 \dots d_n)$ , where  $i \notin H_{checked}$ 
6.       $P_+ = (P_0 \setminus p_i) \cup p_i + 2\pi$ 
7.       $P_- = (P_0 \setminus p_i) \cup p_i - 2\pi$ 

8.      CHOSE  $P_{new} \in \{P_0, P_+, P_-\}$  FOR WICH  $cost$  IS MINIMAL, WHERE
9.           $[ncost, nd_1 \dots nd_n] = calculate\_error(P_{new})$  // lásd (23), (23)

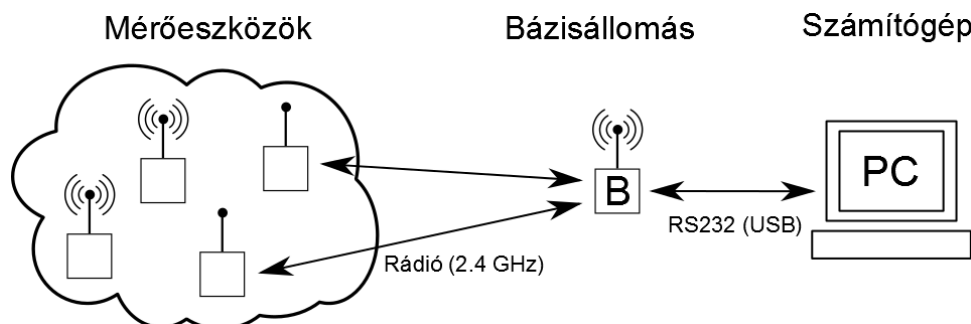
10.      $cost = ncost$ 
11.      $d_1 = nd_1, d_2 = nd_2, \dots, d_n = nd_n$ 
12.      $P_0 = P_{new}$ 
13.      $H_{checked} = H_{checked} \cup i$ 
14. END
15.  $[x, y] = estimate\_position(P_0)$  // lásd (23), (24)

```

23. ábra: Az önkorigáló pozícióbecslő algoritmus pszeudo-kódja.

5. Megvalósított rendszer

Ebben a fejezetben a javasolt megoldáshoz készült tesztrendszer megvalósítása kerül bemutatásra. A felhasznált architektúrát (24. ábra) három részre lehet bontani: A mérőeszközök végzik a tényleges méréseket és a méréshez felhasznált jel kiadását is. Az eszközök és a PC közötti kommunikációért valamint a mérések összehangolásáról a bázisállomás felel, míg a kapott adatokat a PC dolgozza fel és végzi a tényleges követést.



24. ábra: A megvalósított rendszer architektúrája.

5.1. Teszt hardver

A tesztek során speciális, két rádiót tartalmazó, a 25. ábrán látható eszközök lettek felhasználva. Az eszközök az Atmel ATmega128RFA1 mikrovezérlőre épülnek, ami 16 MHz-en üzemel és rendelkezik egy költséghatékony, integrált 2,4 GHz-es adó-vevő modullal is. Ez a rádió felelős a különböző parancsok és a mérési eredmények elküldéséért.

Az eszközök ezen kívül tartalmazznak még egy második rádiómodult is, ami sokféle beállítási lehetőséget kínál. Ez nem csak az adótéljesítmény és a frekvenciasávok (240-480 MHz, 480-930 MHz) kiválasztását teszi lehetővé, hanem lehetőséget biztosít az adófrekvencia finomhangolására is 156,25 Hz-es, illetve 312,5 Hz-es lépésekben. Ez a lehetőség teszi a chipet alkalmassá a rádióinterferenciás mérésekre, mivel úgy hangolható, hogy a két adó által sugárzott frekvencia közel azonos legyen. A jelenlegi tesztrendszerben ez a rádió csak a mérésekre van felhasználva.



25. ábra: A tesztekben használt eszköz

A mérések a 868 MHz-es ISM frekvenciasávon történtek, ahol minden egyes adópár egymáshoz lett hangolva. Az adófrekvencia erősen függ a környezet hőmérsékletétől, ezért a finomhangolást minden esetben el kell végezni a fázismérések előtt, illetve ha a mért frekvencia túlságosan megváltozik. Maga az RSSI jel mérése a rádiómodul megfelelő regiszterének kiolvasásából és a kapott érték egy pufferben történő eltárolásából áll, ami a későbbi frekvencia- és fázisbecsléshez lesz felhasználva (lásd 3.2 fejezetben). A mintavételi sebesség 62.5 kHz, a rögzített minták száma pedig 390. Általában a használt frekvenciakülönbség 700 Hz körüli, ami körülbelül 90 mintát eredményez periódusonként. Ekkora mennyiségű minta már elegendő pontosságú fázisbecslést tesz lehetővé.

5.2. Konfigurációk

A pozícióbecsléshez szükséges hiperbolákat különböző adópárok által létrehozott fázisterekben történő fázismérések alapján lehet meghatározni. Ezért szükséges egy olyan módszer, amely segítségével a létező infrastrukturális és követett eszközök közül kiválasztható az adott méréshez szükséges négy eszköz. Ehhez bevezetésre került az úgynevezett *konfiguráció*, amely alatt egy adott mérési elrendezést és az egyes eszközökhöz rendelt szerepeket értjük. Fontos, hogy ennek meghatározásakor nem vesszük figyelembe a

tényleges elhelyezkedést és a vevőket sem különböztetjük meg, mert ezek ismerete csak a mérések elvégzése után a pozícióbecslésben szükséges.

A következő négy szerepet lehet így megkülönböztetni:

TÉTLENSÉG: Az eszköz tétlen, nincs adás vagy mérés.

MÉRÉS: Az eszköz vevő, tehát mérni fog.

ADÁS1: Az eszköz az adópár első számú tagja.

ADÁS2: Az eszköz az adópár második számú tagja.

Egy konfiguráció tehát az előbbi szerepek hozzárendelése az eszközökhöz. Több konfigurációt egy táblázattal lehet megadni a 26. ábrán látható módon.

	1. eszköz	2. eszköz	3. eszköz	4. eszköz
1. konfiguráció	<i>adás1</i>	<i>adás2</i>	<i>mérés</i>	<i>Mérés</i>
2. konfiguráció	<i>adás1</i>	<i>mérés</i>	<i>adás2</i>	<i>Mérés</i>
3. konfiguráció	<i>mérés</i>	<i>adás1</i>	<i>adás2</i>	<i>Mérés</i>

26. ábra: Példa konfigurációk 4 eszközzel

Ebben az esetben minden konfiguráció egy-egy sornak felel meg. Tehát minden sornak pontosan egy *adás1* és pontosan egy *adás2* szerepet kell tartalmaznia tetszőlegesen sok *mérés* és *tétlenség* mellett.

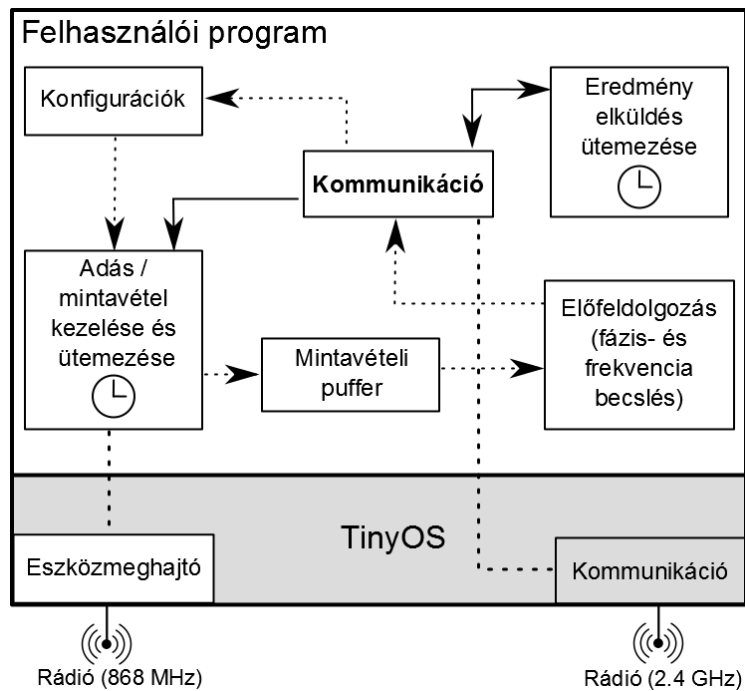
Az oszlopok egy-egy eszköz szerepét tartalmazzák a különböző konfigurációkban. A rendszer működéséhez minden egyes eszközre fel kell tölteni a neki megfelelő listát (oszlopot).

A mérésakor egy adott konfiguráció száma kerül elküldésre. Ekkor minden egyes eszköz kiválasztja a konfiguráció száma alapján az aktuálisan kért működést és végrehajtja az adást/mérést, vagy tétlen marad.

A módszer előnye, hogy a már meglévő konfigurációkban az eszközök száma egyszerűen növelhető (tétlen és mintavételező eszközökkel), ezzel triviális módon megvalósítva több követett eszköz egyidejű mérését.

5.3. A mérőeszközök szoftvere

Az eszközökön futó szoftver TinyOS-ben készült, NESC nyelven, ami egy speciális C alapú nyelv, kifejezetten mikrovezérlők számára. A TinyOS [4] egy szenzorhálózatokhoz készült komponens- és eseményalapú operációs rendszer, mely lehetővé teszi a szoftver modulokba szervezését, ezáltal biztosítva az újrafelhasználhatóságot és az átláthatóbb szoftverfejlesztést.



27. ábra: A mérőeszközökön futó program felépítése.

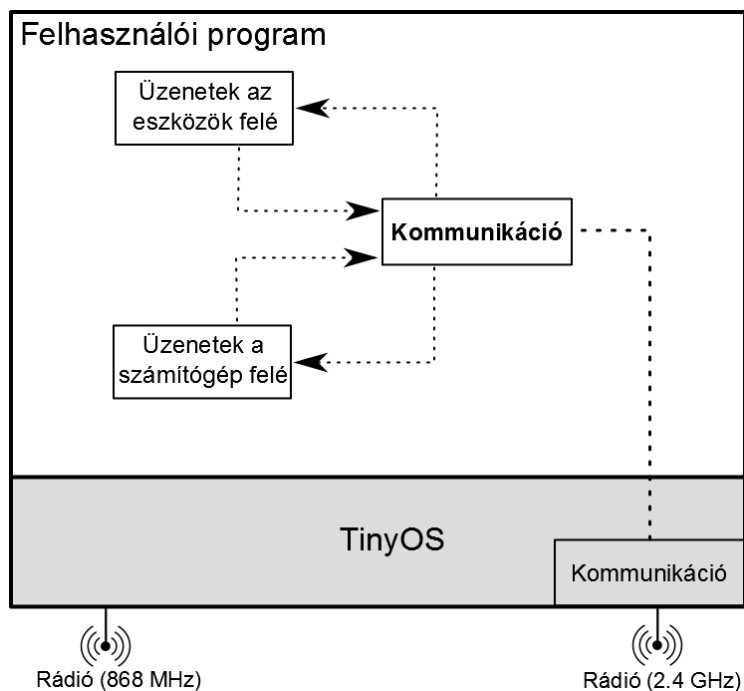
A 27. ábrán látható a mérőeszközökön futó program felépítése, ahol a fehérrel jelölt részek kerültek megvalósításra a kutatás keretein belül, a szürkével jelölt elemek pedig a TinyOS rendszer részét képezik. A szoftver legfontosabb eleme a *kommunikációs* modul. Ez az egység dolgozza fel a számítógéptől a bázisállomáson keresztül érkező üzeneteket, valamint küldi vissza a mérési eredményeket. Az üzeneteken keresztül lehetséges a konfigurációk és a mintavételezés paramétereinek beállítása és a mérés indítása. A méréshez használt rádió kezelését az *eszközmeghajtó* végzi, amely elfedi a hardverhez való hozzáférés részleteit. Így nincs szükség a rádióchiphez való közvetlen hozzáférésre. Érdeemes megjegyezni, hogy a meghajtó program az egyik legkritikusabb eleme a szoftvernek, mert a hardver helytelen kezelése (pl. hibás időzítés, regiszterek hibás kezelése) komoly, esetenként nehezen felderíthető rendellenességeket is okozhat a futás során. Az *adásért és mintavételezésért* felelős modul kommunikál az eszközmeghajtóval. Működését a mintavételezési parancs indítja, majd egy belső időzítő segítségével végrehajtja a kért *konfigurációhoz* tartozó működést, azaz megfelelő időben be- vagy kikapcsolja az adást vagy periodikusan kiolvassa az eszközmeghajtóból a vételi jelerősséget és eltárolja a *mintavételi pufferben*. Ezután az *előfeldolgozó* a puffer tartalma alapján kiszámolja a jel fázisának és frekvenciájának becsléséhez szükséges részeredményeket. A modul működése megegyezik a 3.2 fejezetben bemutatott fázis- és frekvenciabecslő algoritmussal (8, 10 egyenletek) és az ott bemutatott állapotgépet valósítja meg. Végül az eszközön futó szoftver utolsó eleme a kiszámolt *részeredmény elküldését* ütemezi, azaz egy meghatározott időpontban a *kommunikációs* modul elküldi a kapott eredményt.

5.4. Bázisállomás

A bázisállomás hardvere megegyezik a méréshez használt eszközökkel, azzal a különbséggel, hogy a másodlagos rádió nincs használatban. Ennek az egységnek a fő feladata az eszközök és

a számítógép közötti kommunikáció megvalósítása. A bázisállomás és a PC közötti kapcsolatot egy virtuális RS232 szabványú soros port valósítja meg USB-n keresztül.

Működését tekintve a rádión keresztül beérkező csomagokat változatlan formában a PC felé továbbítja a soros vonalon, míg a számítógép felől érkező csomagokat a rádión keresztül elküldi az eszközöknek.

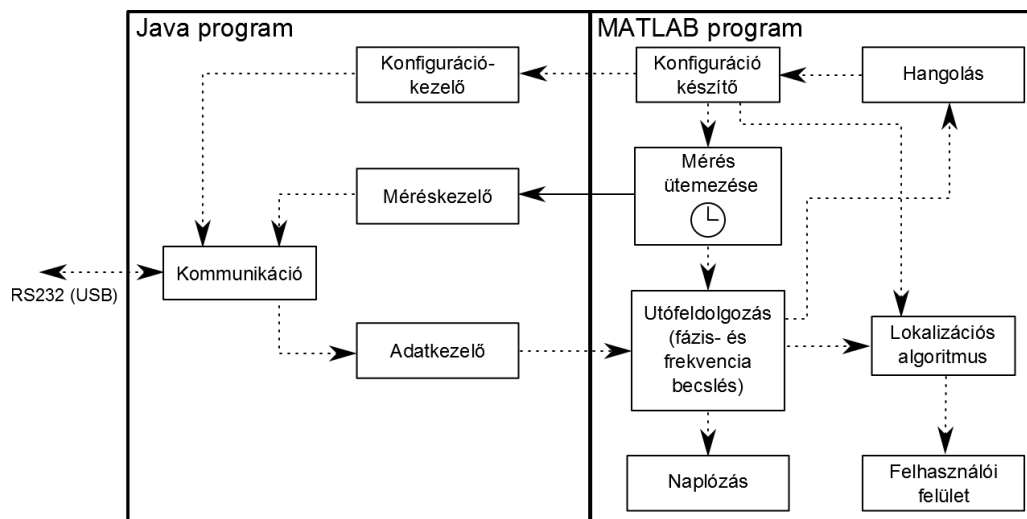


28. ábra: A bázisállomáson futó program felépítése

Az eszközök és a számítógép felől beérkező csomagokat a bázisállomás egy-egy pufferben tárolja, így az adatátvitel később is megtörténhet, elkerülve ezzel a csomagok elvesztését. Ez különösen hasznos például a mérések után nagy mennyiségben beérkező eredményeknél. A bázisállomás másik fontos feladata, hogy mérést indító üzenetet ellássa egy időbélyeggel, ami alapján a mérőeszközök szinkronizálódni tudnak [6].

5.5. PC oldali működés

A számítógép felé az eszközökről jövő adatok feldolgozásáért valamint a mérések vezérléséért is. Működés és felépítés szempontjából a PC oldalon futó programokat kétféle lehet bontani; egyrészt a tényleges számításokat és vezérlést megvalósító MATLAB függvényekre és scriptekre, valamint a sorosporti kommunikációért felelős Java kódra. A PC oldali programok felépítése a 29. ábrán látható.



29. ábra: A feldolgozást végző MATLAB és a kommunikációért felelős Java program felépítése.

A MATLAB programot a működés folyamata szempontjából háromfelé lehet bontani. Az első csoport a mérés beállításához (lásd 6.1 fejezet) szükséges modulok. A *konfiguráció készítő* segítségével lehet megadni az eszközök működését és az ahhoz tartozó különböző paramétereket az egyes konfigurációkhoz (lásd 5.2 fejezet). Az elkészült konfigurációkat felhasználjuk a *mérés ütemezéséhez*, a *lokalizációs algoritmus*hoz, valamint az eszközökbe is innen töltjük fel a beállításokat. A *hangolás*ért felelős modul feladata a mért frekvencia értékek alapján az adók frekvenciabeállításainak kiszámítása. Ezzel biztosítva az interferált jel hullámhosszának megfelelő értéken tartását.

A második csoportba a teljes folyamatban résztvevő egységek tartoznak. A *mérést ütemező* modul feladata, a konfigurációk alapján a mérést indító üzenetek elküldése az eszközöknek, valamint az *utőfeldolgozáshoz* beérkező részeredmények feldolgozásához szükséges információk biztosítása (pl. melyik két eszköz fáziseltérését kell számítani). Az *utőfeldolgozás* valósítja meg a fázisbecslés (lásd 3.2) utolsó lépéseit (7, 9, 11-14 egyenletek), melynek eredményeként megkapjuk a követéshez szükséges fáziskülönbség értékeket. Végül a *naplózás* modul a méréseket rögzíti későbbi felhasználás céljából.

Az utolsó csoportba a *követést és lokalizációt*, valamint a kijelzést megvalósító modulok tartoznak. A *lokalizációs algoritmust* tartalmazó modul valósítja meg a 3.3 fejezetben bemutatott fáziskorrektúrá (15. egyenlet) és a 4.2 fejezetben bemutatott önkorigáló pozícióbecslő algoritmust (23. ábra): a periodikusan beérkező fáziskülönbségek alapján megtörténik a fáziskorrektúra (egydimenziós követés), majd ezek összegzésével az önkorigáló pozícióbecslő algoritmus meghatározza a követett objektum helyzetét és szükség esetén javítja a hibás fáziskülönbségeket. A folyamat utolsó lépéseként a *felhasználói felületen* megjelenik az objektum útvonala.

A számítógépen futó másik szoftver a kommunikációért felelős Java program. Ez a TinyOS-ben megtalálható szabványos sorosporti üzenetkezelésre épít. Segítségével a MATLAB környezeten belül csupán függvényhívásokkal lehetséges a PC és az eszközök közötti kommunikációt kezelni. A *konfigurációkezelő* segítségével lehetséges az elkészített

konfigurációkat üzenetké alakítani és az eszközökre feltölteni. A *méréskezelő* feladata a mérési utasítások eljuttatása a mérőeszközök felé. Végül az *adatkezelő* alakítja át a beérkező részeredményeket tartalmazó üzeneteket a feldolgozáshoz szükséges formára.

6. A rendszer működésének folyamata

A rendszer működésének folyamata két külön részre bontható. Az első beállítási fázisban felkonfiguráljuk az eszközöket, beállítjuk a megfelelő paramétereket, míg a második fázisban történik a tényleges mérés, amikor is periodikusan mérnek az eszközök és megtörténik a küldött adatok feldolgozása.

6.1. Beállítás

A beállítás szakaszában alapvetően két fontos feladatot kell elvégezni: egyrészt a mérési elrendezésnek megfelelő konfigurációk elkészítését és feltöltését, valamint az eszközök behangolását a megfelelő frekvenciára.

A konfigurációk elkészítése MATLAB-ban történik. Elsőként létre kell hozni egy *configuration* objektumot, a következő módon.

```
>> conf = configuration()
```

Ezek után a konfigurációhoz hozzá kell adni a használni kívánt eszközöket, valamint azok alapbeállításait:

```
>> conf.addDevice(12, 0, 7, configuration.IDLE)
>> conf.addDevice(13, 0, 7, configuration.IDLE)
>> conf.addDevice(14, 0, 7, configuration.IDLE)
>> conf.addDevice(15, 0, 7, configuration.IDLE)
```

Itt a 12, 13, 14 és 15-ös eszközök szerepelnek, mindegyik a 0-s csatornát használja és maximális teljesítményen ad (amit a 7 paraméter jelez). Az utolsó paraméter az eszköz alapértelmezett működését határozza meg az eddigi konfigurációkban. Ebben az esetben viszont nincs hatással a működésre, mivel nincs felvitt konfiguráció.

A következő lépésben hozzáadjuk a kívánt konfigurációkat, azaz megadjuk, hogy melyik két eszköz legyen adó. A harmadik paraméter a már létező eszközök viselkedését határozza meg.

```
>> conf.addConfig(12, 13, configuration.SAMPLE)
>> conf.addConfig(14, 15, configuration.SAMPLE)
```

A fenti példa a 12 és a 14-es eszközt állította be első adónak, míg a 13 és 15-ös eszközt második adónak egy-egy konfigurációban. A konfigurációkban szereplő többi eszköz pedig mérni fog (*SAMPLE*).

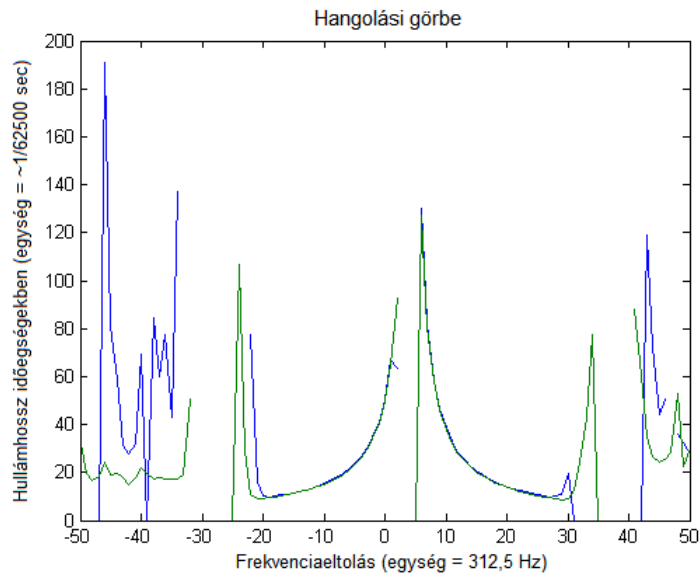
Végül be kell állítani, hogy az egyes eszközök mikor küldjék vissza a mérési eredményeket.

```
conf.setupReply(5,12)
```

A fenti parancs hatására a mérésben résztvevő eszközök a mérés kezdetétől számított 12 ms letelte után 5-5 ms eltéréssel végzik el a küldést. Ezzel elkészültek a kívánt konfigurációk és

beállítások. Utolsó lépésként ezeket fel kell tölteni az eszközökre. Ezután már a rendszer készen áll a mérések elvégzésére, azonban még nincsen megfelelően behangolva.

A hangolás tulajdonképpen már egy mérési folyamat, azzal a különbséggel, hogy az egyes mérések előtt átállításra kerülnek a rádióadók frekvenciái.



30. ábra: Hangolási görbe: a két vevő által mért interferenciajel hullámhossza az egyik adó frekvenciájának folyamatos növelése mellett.

A hangolási folyamat eredményként egy, a 30. ábrán láthatóhoz hasonló grafikont kapunk, ahol az interferált jel hullámhossza látható egyik adó frekvenciabeállításának függvényében. Fontos, hogy a megfelelő hangoláshoz legalább két vevőre van szükségünk.

A grafikonról leolvasható a megfelelő frekvenciaeltolás paraméter. A helyes érték kiválasztásához három szempont figyelembevétele szükséges:

1. Nagy hullámhosszt adó érték kiválasztása: A fázisbecslő algoritmus annál pontosabb értéket ad minél több mintából áll egy periódus, azaz minél nagyobb az interferált jel hullámhossza (de lásd még a 3. pontot).
2. A kiválasztott pontban az összes vevő azonos hullámhosszt mérjen: Mivel a fázisbecslő algoritmus egy bizonyos hullámhossz alatt nem tudja feldolgozni a jelet az eredmény értelmezhetetlen lesz. Ez jól látszik a grafikon két szélén, a véletlenszerű értékeken.
3. A hullámhossz ne haladjon meg egy adott értéket (a példában ~120 egység): Mivel a fázisbecslő algoritmus véges számú mintavételen dolgozik, ezért egy bizonyos (itt kb. 140 egységnyi) hullámhossz fölött már túl kevés periódus fér el a mintavételi pufferbe. Érdekes az elméleti határnál valamivel rövidebb hullámhosszt alkalmazni maximumként, mivel a hőmérsékletfüggés miatt a frekvencia gyorsan változhat.

Ezen szempontok alapján tehát a példában egy olyan hangolási paramétert érdemes választani, ahol minden vevő körülbelül 100 egységnyi hullámhosszt mér.

Jelen esetben ez 7-es offszetnél valósul meg, ahol is a hullámhossz 82 egység. Ezt a beállítjuk a 0-ik konfiguráció első (12-es azonosítójú) adójára.

Ezután a többi konfigurációban is hasonló módon be kell hangolni az eszközöket.

Végül a hangolás befejeztével a rendszer készen áll arra, hogy tényleges méréseket végezzen, tehát hogy folyamatosan meghatározza a fáziskülönbségeket, és megvalósítsa az objektumkövetést.

6.2. A mérés folyamata

Egy-egy konkrét fázismérés legelső lépéseként a PC-ről elküldésre kerül a mérést indító üzenet, amiben meghatározzuk, hogy melyik konfigurációt szeretnénk használni.

Ezután az üzenet eljut a bázisállomásra, ami rádión továbbküldi azt. Az eszközök a vett üzenet beérkezésének időpontját feljegyzik, és a továbbiakban ehhez szinkronizálják a tevékenységeiket. Elsőként minden eszköz meghatározza, hogy milyen szerepe van az aktuális konfigurációban. Ennek megfelelően beállítanak egy-egy órát és a következő tevékenységeket végzik el:

Adás1, Adás2: Az adók egy megadott idő után bekapcsolják a rádiójukat és elkezdnek alapsávi jelet sugározni, majd a meghatározott idő után kikapcsolnak.

Mérés: A vevő egy megadott idő után bekapcsolja a rádióját és elkezdi kiolvasni az RSSI értékeket a megadott mennyiségig.

Tétlen: Az eszköz ebben a konfigurációban passzív, „nem csinál semmit”.

Ezen működéseknek a végrehajtása után, a vevők mintavételi pufferében a vett interferált jel található.

A mintavételezés befejeződését követően azonnal elindul a vevő eszközökön a fázisbecslő algoritmus. Ennek végén a program előkészíti az eredményeket tartalmazó üzenetet.

Az egyes konfigurációkban minden vevőnek meghatározásra kerül egy-egy időpont, amikor az visszaküldi a kiszámolt részeredményeket. Az ehhez szükséges óra is a mérést indító üzenet beérkezésekor kerül beállításra, a konfigurációban meghatározott módon. Amikor ezek lejárnak (minden eszköznél más időpontban, hogy ne legyen ütközés az üzenetek között), az eszköz elküldi az eredményeket tartalmazó üzenetet a bázisállomásnak.

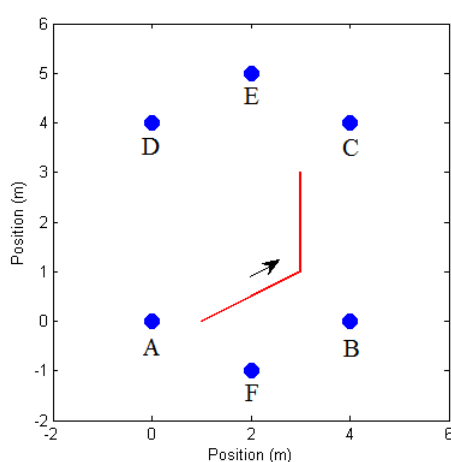
A bázisállomás a vett adatokat továbbküldi a PC-nek és a Java illesztő programon keresztül meghívja a megfelelő MATLAB függvényt. Ebben a pillanatban indul meg az adatok feldolgozása, valamint a fázisok, majd a relatív fázis kiszámítása. Ezután a következő mérés indítása történik a következő konfigurációval. Amikor az összes konfiguráció mérése befejeződött, a rendszer elkezdi a mérésekhez tartozó hiperbolák kiszámítását, majd a pozícióbecslést. Ez a mérési és számítási folyamat periodikusan ismétlődik a teljes követés ideje alatt.

7. Mérési eredmények

Ebben a fejezetben ismertetésre kerül az önkorigáló pozícióbecslő algoritmus zajérzékenység vizsgálata különböző számú konfiguráció és különféle zajszintek mellett, valamint valós fázisméréseket mutatunk be a módszer működőképességének igazolására. Ezen kívül bemutatjuk a megvalósított rádióinterferometrikus követést egy- és több dimenzióban az egyszerű és az önkorigáló algoritmus segítségével.

7.1. Zajérzékenység vizsgálat

Az önkorigáló pozícióbecslő algoritmus zajérzékenysége és hatékonysága szimulációkkal és egy valós méréssel (7.4 fejezet) került ellenőrzésre. A 31. ábrán a teszt elrendezés látható, az A, B, C, D, E és F eszközökkel. A szimulációkban változó mennyiségű additív fáziszaj és változó számú konfiguráció (hiperbola) szerepel.



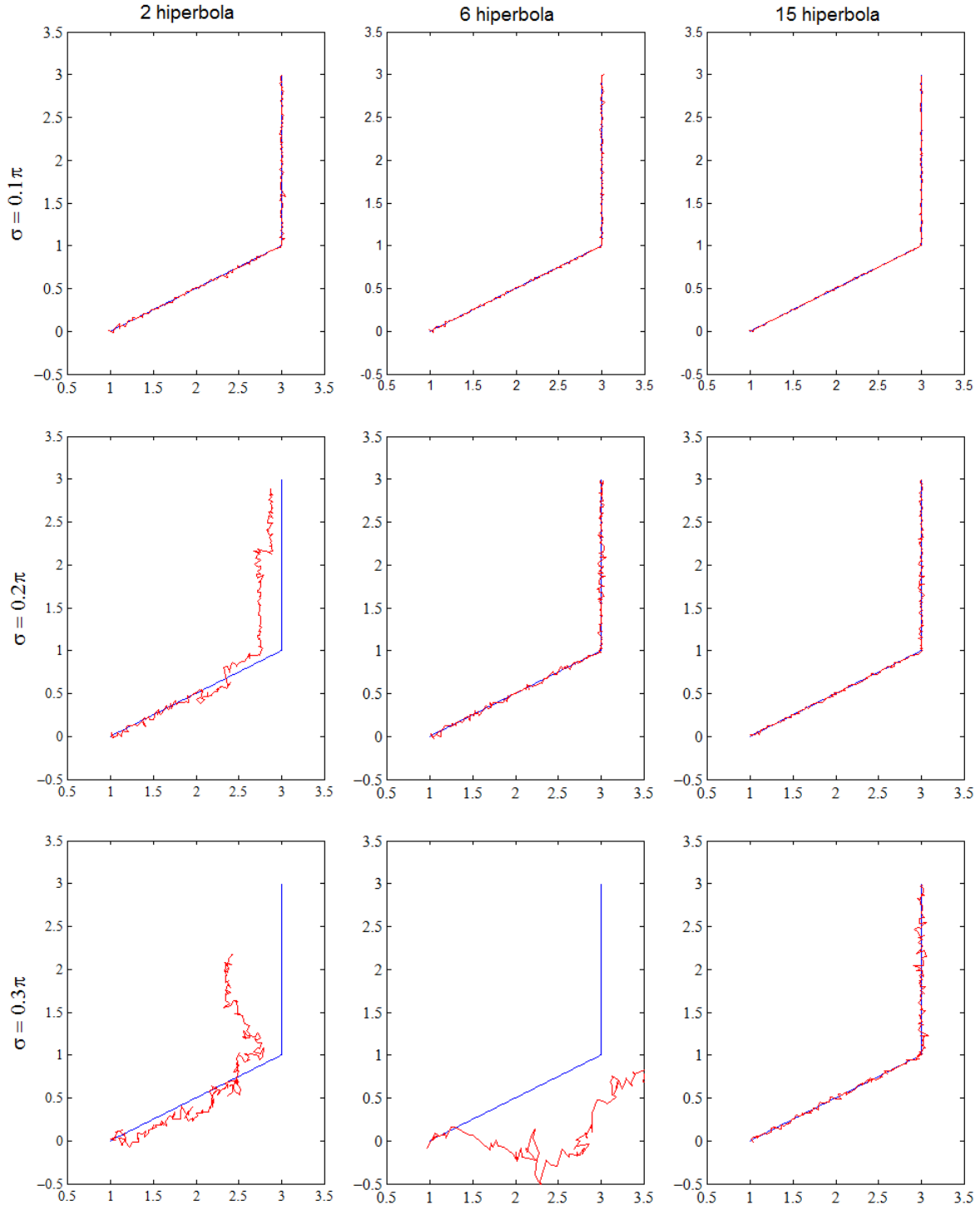
31. ábra: A szimulációban használt 6 eszköz elhelyezkedése (kék pontok). Az objektum útvonalát a piros vonal jelzi.

A szimulációkban három tesztet virtuális fázisméréseit tartalmazzák, 2, 6 és 15 hiperbolával. Az első tesztben az (A, C) és (B, D) eszközök az adópárok, míg a többi esetben az összes lehetséges kombináció felhasználásra került a párok létrehozásához 4 (A, B, C, D) illetve 6 (A, B, C, D, E, F) eszközzel; ezáltal 6 illetve 15 hiperbolát létrehozva. Érdeemes megjegyezni, hogy a 2 hiperbolát felhasználó eset megfelel a 3.4 fejezetben bemutatott egyszerű megoldásnak, azaz a fáziskorrektíós hiba nem felismerhető vagy javítható.

A szimulációkban a követett eszköz egy rögzített útvonalon halad (lásd 31. ábra) és az ideális fáziskülönbség értékek az (1) és (2) alapján számítottak. Az ideális fáziskülönbség értékekhez különböző mennyiségű normális eloszlású véletlen zaj lett hozzáadva. A zajjal terhelt fázismérések a fáziskorrektíós (15), a majd a bemutatott önkorrektíós pozícióbecslő algoritmussal kerültek feldolgozásra.

Az additív fáziszaj eloszlásának vizsgálatára az 7.2 fejezetben található valós mérés került elvégzésre. Ez alapján a normális eloszlású additív fáziszaj jó közelítése a valóságnak.

A szimulációk eredményei a 32. ábrán láthatóak, ahol a piros illetve a kék vonalak jelzik a becstelt illetve a valós útvonalat. Az oszlopok a három konfigurációt mutatják 2, 6 és 15 hiperbolával. A sorokban a növekvő mennyiségű additív fáziszaj hatásai látszanak, $0,1\pi$, $0,2\pi$ és $0,3\pi$ varianciájú zaj esetén.



32. ábra: Szimulációs eredmények különböző tesztesetekre (2, 6, 15 konfiguráció/hiperbola) és növekvő mennyiségű normális eloszlású additív fáziszajra ($0,1\pi$, $0,2\pi$ és $0,3\pi$ szórás).

Ahogy a 32. ábrán látszik, az eredeti algoritmus (2 hiperbola, első oszlop) csak kis zaj esetén ($\sigma = 0,1\pi$) működik jól, míg nagyobb fáziszaj mellett a becsült pozíció jelentősen eltér az ideálistól, köszönhetően a maradó fáziskorrekciós hibáknak. Érdekes megjegyezni, hogy ebben az esetben az önkorigáló pozícióbecslő algoritmus nem használható. Több hiperbola esetén azonban a felhasznált önkorigáló algoritmus jobb eredményeket ad nagyobb mennyiségű zaj mellett is. Ezen kívül látható, hogy növekvő számú hiperbola esetén a becslés is robosztusabb, pontosabb; a legzajosabb ($\sigma = 0,3\pi$) esetben is kielégítően működik 15 hiperbolával.

A szimulációk kvantitatív kiértékeléséhez, minden egyes időpontban kiszámításra került a becsült és az ideális pozíciók közötti eltérés. A lokalizációs hibák szórásai, maximumai és átlagai az 1, 2 és 3. táblázatban találhatóak a különböző konfigurációk és zajszintek esetén. A sárgával jelölt cellákban vagy nem volt fáziskorrekciós hiba, vagy pedig az önkorigáló algoritmus sikeresen javította azokat.

1. táblázat: A szimulációk lokalizációs hibáinak szórásai

	Szórás (m)		
Zaj szórása	2 hiperbola	6 hiperbola	15 hiperbola
0.10π	0.0162	0.0098	0.0086
0.20π	0.1950	0.0251	0.0164
0.30π	0.6771	1.1457	0.0286

2. táblázat: A szimulációk lokalizációs hibáinak maximumai

	Maximum (m)		
Zaj szórása	2 hiperbola	6 hiperbola	15 hiperbola
0.10π	0.0715	0.0302	0.0203
0.20π	0.3301	0.0726	0.0454
0.30π	1.1176	2.3016	0.0905

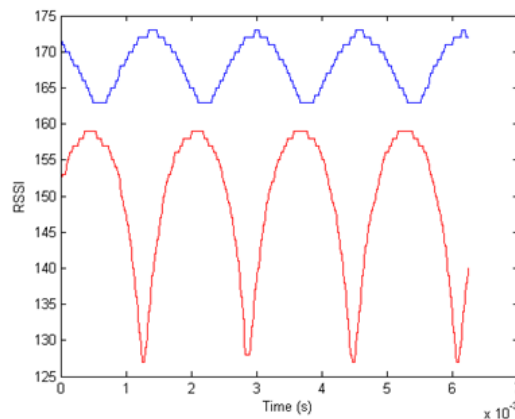
3. táblázat: A szimulációk lokalizációs hibáinak átlagai

	Átlag (m)		
Zaj szórása	2 hiperbola	6 hiperbola	15 hiperbola
0.10π	0.0132	0.0098	0.0073
0.20π	0.1700	0.0217	0.0143
0.30π	0.5931	1.0293	0.0236

Ahogy azt az 1-3 táblázatok mutatják a becslés robosztussága nő a hiperbolák számának növekedésével, mivel több redundáns mérés áll rendelkezésre. Azokban az esetekben, amikor az önkorigáló algoritmus képes a fáziskorrekciós hibák javítására (sárga cellák), a növekvő számú hiperbola hatására csökken a lokalizációs hiba. Érdekes megfigyelni, hogy a működőképes esetekben a lokalizációs hiba jelentősen kisebb, mint a szimulációban használt hullámhossz: (0,34m).

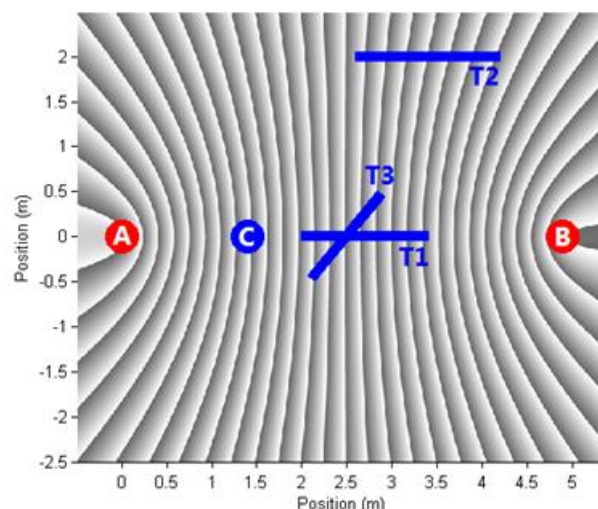
7.2. Fázismérések

A fázismérés folyamatának illusztrálásához nyers RSSI jelek és a kapott mérési eredmények kerültek letöltésre a két szinkronizált vevőből, ahogyan az a 33. ábrán látható. Érdekes megfigyelni, hogy a rádió RSSI kimenete logaritmikus, ezért a kapott burkológörbe sem szinuszos. A rádiók vivőfrekvenciája 868 MHz-re volt állítva, az egyik adó 5937.5 Hz-es elhangolásával. A rádióchipek pontatlansága miatt ez az érték körülbelül 620 Hz-es frekvenciakülönbséget eredményezett. A 33. ábrán az RSSI jelek frekvenciája megfelel ennek az értéknek. A mért fáziskülönbség $\vartheta = 0.92\pi$ volt, ahogyan az az ábrán látható.

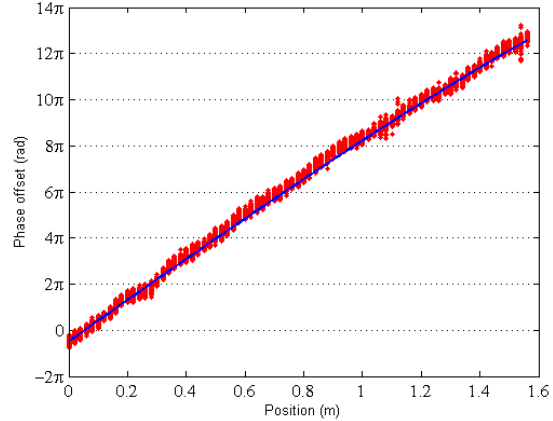
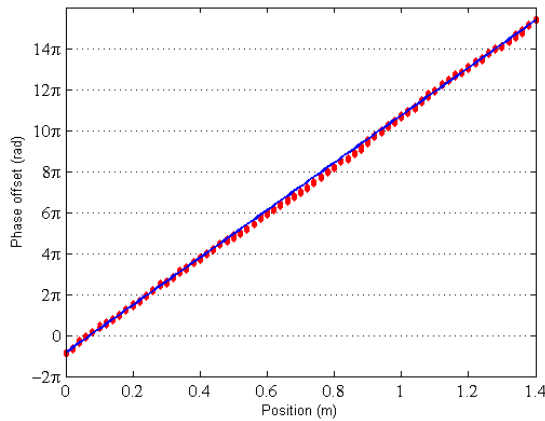
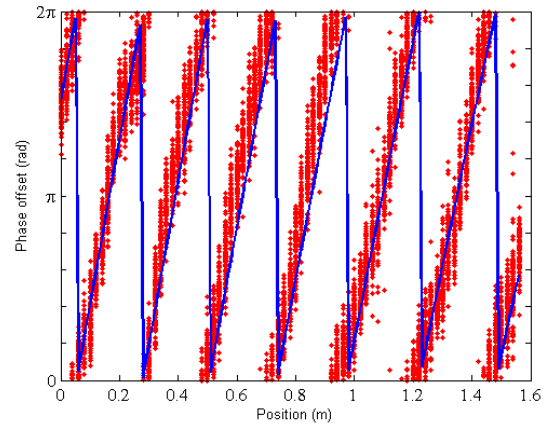
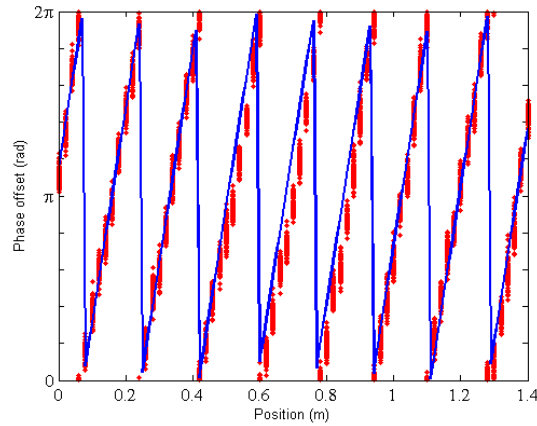


33. ábra: Az interferencia mért RSSI jele két (kék és piros) szinkronizált vevővel. A használt vevő RSSI kimenete logaritmikus.

A következő teszt a fáziskülönbség mérések pontosságának bemutatásához készült. A 34. ábrán látható a teszt elrendezése a két rögzített adóval (A és B), a rögzített C vevővel, valamint a T1, T2, és T3 pálya mentén mozgatott D vevővel. A tesztek a szabadban, egy kertben készültek, ahol az eszközök 1,2 m-rel a föld fölött, egy fa asztalon voltak elhelyezve. A fáziskülönbség mérések az útvonalak mentén 2 cm-es lépésközökben készültek, minden pontban 100 mérés elvégzésével. A méréssorozat alatt a külső zavaró hatások a minimálisra voltak csökkentve (például nem volt mozgás, vagy működő elektromos készülék a közelben).



34. ábra: A fáziskülönbség tesztekhez használt elrendezés rögzített A és B adókkal, a rögzített C vevővel, valamint a mozgó D vevővel. A kék vonalak a mozgó D objektum útvonalait (T1, T2, T3) jelölik. A számított, ideális fázistér a háttérben van ábrázolva.



35. ábra: A T1 útvonalon mért fáziskülönbségek. A kék vonalak az ideális, míg a piros pontok a valós mérések eredményeit mutatják. (a) fáziskülönbség értékek a $0 - 2\pi$ tartományban (b) korrigált fáziskülönbség értékek

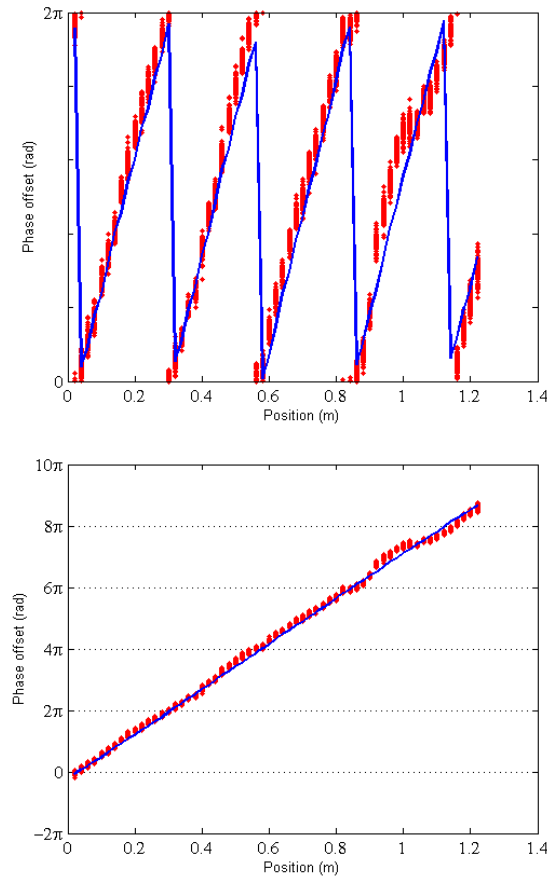
36. ábra: A T2 útvonalon mért fáziskülönbségek. A kék vonalak az ideális, míg a piros pontok a valós mérések eredményeit mutatják. (a) fáziskülönbség értékek a $0 - 2\pi$ tartományban (b) korrigált fáziskülönbség értékek

Az egyes T1, T2, T3 útvonalakon mért eredmények sorban a 35, 36. és 37. ábrán láthatóak. Az ábrákon a mért és a korrigált fáziskülönbség értékek egyaránt fel vannak tüntetve, a kék vonalak az ideális, számolt fáziskülönbségeket, míg a piros pontok a tényleges mért értékeket mutatják. Érdeemes megfigyelni az azonos pontban mért fáziskülönbségek jelentős szórását, annak ellenére, hogy a környezet viszonylag zavarásmentes volt. Szintén fontos megjegyezni, hogy ez a szórás még jóval kisebb, mint π , azaz biztonságosan a korrekciós határ alatt van. Így valóban lehetséges a feltételezett folytonosság alapján a fáziskülönbség korrekciója.

A T1 mérése során a Δf frekvenciakülönbség 892 Hz és 1420 Hz között, a T2 alatt 3472 Hz és 3906 Hz között, végül a T3 során 416 Hz és 1136 Hz között változott. A szórás a T2 esetben volt a legnagyobb, köszönhetően a magas Δf -nek. Fontos megjegyezni, hogy az adók frekvenciája erősen érzékeny a környezet hőmérsékletére, így a Δf értéke gyorsan változott a mérések során.

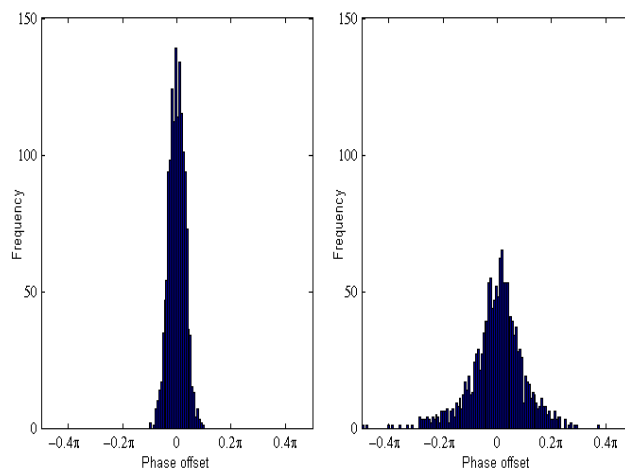
A mérésekben láthatóak a fázistér jelentős, helyi torzulásai is. Ezeken a helyeken a mért fáziskülönbség értékei szisztematikusan eltérnek a számolt, ideális értéktől. Ilyen eset látható

a 35. ábrán 0,8 m körül, illetve a 37. ábrán 1 m körül. Ezek a hibák természetesen pontatlanságot okoznak a követésben is, azonban ezek lokálisak és nem halmozódnak.



37. ábra: A T3 útvonalon mért fáziskülönbségek. A kék vonalak az ideális, míg a piros pontok a valós mérések eredményeit mutatják. (a) fáziskülönbség értékek a $0 - 2\pi$ tartományban (b) korrigált fáziskülönbség értékek

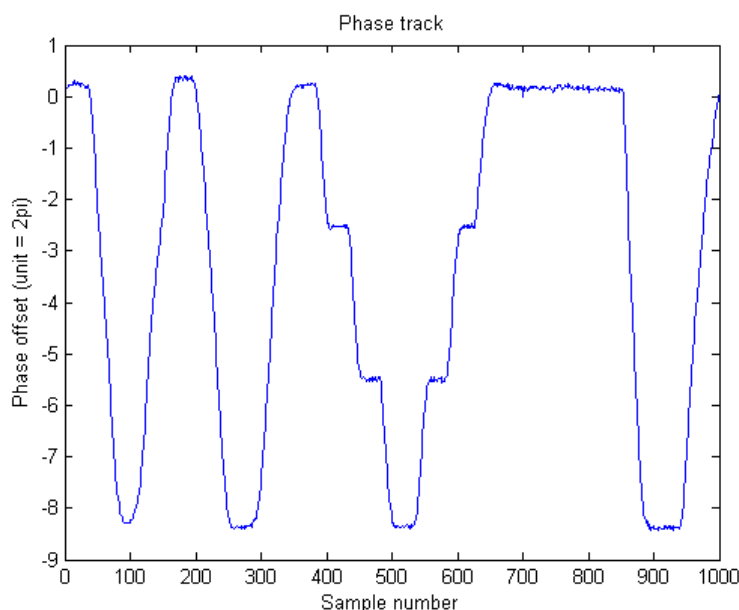
A fáziskülönbség eloszlásának vizsgálata rögzített helyzetű eszközökkel történt. A teszt során a használt interferenciajel frekvenciája $\Delta f = 595$ Hz és 744 Hz között volt. A méréssorozatok minden esetben 1500 fáziskülönbség mérést tartalmaznak. A 38(a) ábrán a zavarásmentes eset, míg a 38(b) ábrán az az eset látható, amikor emberek mozogtak az eszközök körül. A normális eloszlás zavarásmentes környezetben $0,03\pi$ volt, ami $0,09\pi$ -re emelkedett, amikor emberek voltak a mérés területén. A 38. ábrán jól látható, hogy a zajszint mindkét esetben kellően alacsony a megfelelő fáziskorrekcióhoz. De zavarás mellett, két egymást követő mérés között a fázishiba közel kerülhet π -hez.



38. ábra: 1500 fáziskülönbség mérés eloszlása (a) zavarásmentes esetben (b) emberek jelenléte és mozgás esetén

7.3. Objektumkövetés

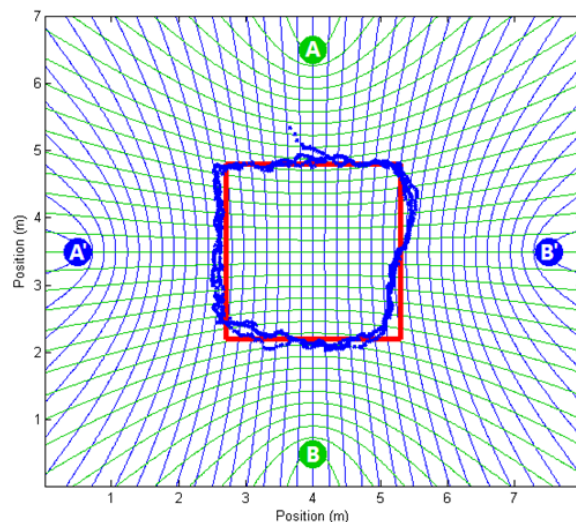
Az elmélet bizonyítására és a bemutatott követés lehetőségeinek ellenőrzésére a következő két kültéri teszt készült. Az első mérés az egydimenziós követést és a fáziskorrekció működését mutatja be. A mérésben használt elrendezés a 34. ábrának megfelelő, tehát a két adó egymástól 4,9 méterre volt, a követett vevő pedig a két adót összekötő egyenesen mozgott, a T1 útvonalon. A mérés alatt a követett objektum az A adótól mért 2 m-től 3,5 m-ig mozdult el, majd visszatért a kiindulópontba. Ezt az útvonalat négyszer tette meg, a 39. ábrán látható eredményeket szolgáltatva (0-350 minták) módon. Ezt követően (350 – 650 minták) a követett D vevő minden 50 cm után megállt mindkét irányban. Ezután a kiindulópontba történő visszaéréskor hosszabb ideig egyhelyben maradt (650 – 850 minták). Érdeemes megfigyelni, hogy a fáziskorrekció helyesen működik, így az objektum egy adott helyzetbe történő visszatérése esetén a korrigált fázis is azonos lesz.



39. ábra: Rádióinterferenciás követés: A követett eszköz a két adó közötti T1 útvonalon négyszer oda-vissza mozgott. A harmadik esetben a mozgás minden 50 cm után megállt.

A második mérésben négy rögzített helyzetű és egy mozgó eszköz lett használva a 40. ábrán látható elrendezésben. A rögzített eszközöknek váltakozó szerepe volt: a páratlan időszelletekben az A és B adó, míg A' a vevő volt, páros időszelletekben pedig A' és B' adó, míg A a vevő volt. A mozgó eszköz minden esetben vevő volt. A mérés a követett eszközt kézben tartva, a 40. ábrán pirossal jelölt négyzeten sétálva történt. A mérést végző személy fentről közelítette meg az útvonalat (a kis, kezdő görbe az ábra felső részén) és három kört tett meg. A 40. ábrán a becsült pozíciókat kék pontok jelzik.

A mérés alatt a 868 MHz-es frekvenciasáv került felhasználásra. Az interferenciajel frekvenciája pedig a rádióadók finomhangolásával az A és B adók esetén $\Delta f_{AB} = 718$ Hz, valamint az A' és B' adók esetén $\Delta f_{A'B'} = 961$ Hz lett. A mérés ütemezésének beállításával másodpercenként 7 pozícióbecslést történt. Fontos megjegyezni, hogy minden egyes új fáziskülönbség mérés egy új pozícióbecsléshez lett felhasználva, tehát nem történt átlagolás vagy másmilyen szűrés a fázismérés adatain. A pontatlanságnak valószínűleg két lehetséges forrása van: (1) a követett objektumot tartó ember nem pontosan követte a kijelölt útvonalat és (2) a fázistér valószínűleg torzult, különösen az útvonal jobb oldalán.



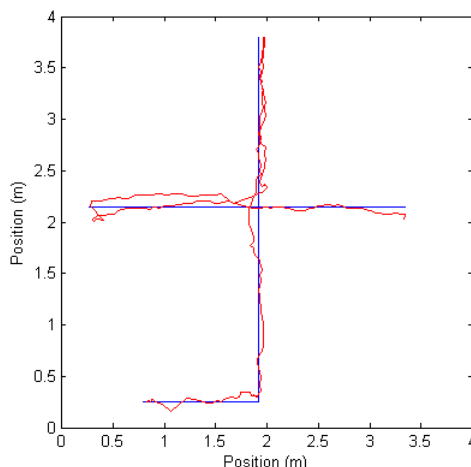
40. ábra: Rádióinterferenciás követés: A, B, A', B' rögzített helyzetű eszközök, periodikusan változó szerepekkel. A mozgó objektum útvonalát a piros négyzet jelöli. A követett eszköz becsült helyzetét a kék pontok jelzik. A számolt, ideális fázistér az A, B adók esetén a zöld, míg az A', B' adók esetén a kék vonalak ábrázolják.

A módszer robusztussága és pontossága megnövelhető redundancia hozzáadásával. Ezt vagy a számításokban (például a fázisbecslések szűrése a fáziskorrekciónál), vagy több távolság-négyes használatával lehet megtenni. Az utóbbi esetben az erre szolgáló önkorigáló algoritmus segítségével a hibás mérések felismerhetőek és javíthatóak (lásd 4.2 fejezet).

7.4. Objektumkövetés önkorigáló pozícióbecsléssel

A bemutatott önkorigáló pozícióbecslő algoritmus működőképességének bemutatására a következő teszt készült. A tesztben egy mozgó objektum követése történt 4 rögzített helyzetű eszköz (és az ezekhez tartozó 6 hiperbola) segítségével. Az eszközök (A, B, C, D)

elhelyezkedése megegyezik az 31. ábrán látható második konfigurációval. A valós és a becsült útvonalak a 41. ábrán láthatóak, kék és piros színnel jelezve. A teszt a szabadban, egy kertben készült, ahol az eszközök 1,25 m-rel a föld fölött helyezkedtek el. A mérés a követett eszközt kézben tartva, a kékkel jelölt kereszten sétálva történt, 60 másodperc alatt. Eközben 325 fáziskülönbség mérést történt minden adópárra (összesen 1950 fáziskülönbség mérés).



41. ábra: A mért útvonal (kék) és az objektum becsült útvonala (piros).

Mivel az útvonal ismert, de a mozgás ideje nem, ezért csak az útvonaltól való eltérés értékelhető a lokalizációs hiba számításánál. Az eltérés maximuma, átlaga és szórása pedig: 0,12m, 0,04m és 0,05m volt a kísérletben.

8. Összehasonlító értékelés

A javasolt módszert érdemes összevetni más lokalizációs megoldásokkal. Ebben a fejezetben különböző szempontok alapján kerül összehasonlításra az interferometrikus követés és az irodalmi áttekintésben olvasható megoldások, amelyek rövid összefoglalása a következőkben (és a 4. táblázatban kivonatolva) olvasható:

Az [1]-ben bemutatott akusztikus lokalizációban a követendő objektum által kibocsátott hangimpulzus beérkezésének idejét rögzítik az ismert pozíciókon elhelyezett vevők. A beérkezés idejének páronkénti különbségéből már pontosan kiszámítható a hangforrás pozíciója.

A [10]-ben leírt megoldás az ismert helyzetű adók (pl. WiFi hozzáférési pontok) térerőssége alapján, matematikai modellekkel határozza meg a követett vevő helyzetét. A jelterjedési modell és a jelerősség alapján következtetni lehet az egyes adók és a vevő közötti távolságra, majd ki kell választani az objektum legvalószínűbb elhelyezkedését a súlyozott tömegközéppontok elve alapján.

Ezzel szemben a [11] egy „térképet” hoz létre statisztikai módszerekkel a követés helyszínének előzetes felmérésével. A statisztikai modell elkészítése a jelerősség mérését jelenti ismert pontokban. A követett objektum helyének meghatározása a kész „térkép” és a mért térerősség összehasonlításával és a legvalószínűbb pont kiválasztásával történik.

A rádiófrekvenciás jel terjedési idejének (fénysebesség!) mérését használja fel a [3], ahol a mérésében az egyik eszköz elküld egy rádiójelet, amit a másik eszköz azonnal „visszaküld”. A jel küldése és visszaérkezése között eltelt idő arányos a két eszköz közötti távolsággal. A módszer működéséhez azonban speciális hardver szükséges a pontos időzítés miatt. A [9]-ben bemutatott eljárás a jel fázisának vizsgálatával pontosabb mérést tesz lehetővé.

Lokalizáció / követés viszonya: Az áttekintésben bemutatott módszerek közös vonása, hogy egy adott objektum követése az objektum sorozatos lokalizációjából áll. Ennek megfelelően a követett eszköz helyzetét bármely pillanatban meg lehet határozni és az egymást követő helymeghatározások adják meg az objektum útvonalát. Ezzel szemben a rádióinterferometrikus követés az objektum helyzetének folyamatos változásaiból képes meghatározni a követett eszköz helyzetét. Ezen tulajdonságából adódik, hogy az objektum kiindulási pozíciója nélkül nem lehetséges a lokalizáció.

Pontosság: Az ultrahangos rendszerek és a rádióinterferometrikus követés közös vonása, hogy megfelelő körülmények között (jól kialakított infrastruktúra) a lokalizáció hibája átlagosan csak néhány centiméter (az [1] esetében ez összemérhető az infrastrukturális eszközök elhelyezkedésének hibájával zavarásmentes környezetben). Ennél kisebb pontosság (átlagosan 1,5-3 m) érhető el a jelerősséget és előzetesen feltérképezett területet használó módszerekkel (a [11] esetében az átlagos hiba 2,1 m, míg 90% valószínűséggel 1,85 m a lokalizációs hiba). A rádióhullámok terjedési idején alapuló eljárások pontossága átlagosan 1-2 méter, de ennél jelentősen rosszabb (>10 m) is lehet olyan helyeken ahol a rádióhullámok erősen szóródnak visszaverődnek. (Az [3]-ban bemutatott mérésekben a maximális hiba beltérben 3,4 m, egy folyósón 5,5 m, míg egy szénbányában akár 18 m is volt.) Az előzetes méréseket nem használó jelerősség alapú módszerek pontossága erősen függ az adott környezettől és megoldástól. Lokalizációs hibájuk a 2-5 métertől akár a zóna alapú helymeghatározásig is terjedhet (például az [10] esetében maximum 3 métert mértek).

Hardver igény / költség: A szabványos rádió adó-vevőket felhasználó eljárások, ahogyan a rádióinterferometrikus követés is, olcsó lokalizációs megoldások, mivel az ezekben használt rádiók kommunikációra is alkalmazhatóak, így az eszköz előállításakor semmilyen speciális alkatrészt vagy plusz költséget nem jelentenek. Ezzel szemben a rádióhullámok terjedési idején alapuló módszerek speciális rádió adó-vevőt és a pontos időmérésre alkalmas hardvert igényelnek, melyek jelenleg drágán beszerezhetőek. Végül az ultrahangos módszerekben használt mikrofonok és hangszórók integrálása az eszközökbe nehezen megoldható, valamint a hangszórók meghajtása sok energiát igényel. Ezeken kívül a mikrofon által rögzített jel feldolgozásához is speciális hardver vagy megfelelő számítási kapacitás szükséges.

Végül érdemes megemlíteni, a rádióinterferometrikus lokalizáció (2.1. fejezet, [5]) és a rádióinterferometrikus követés közötti különbségeket. A lokalizációs eljárás esetében szükséges volt, hogy a fáziszaj minimális legyen, azaz beltérben igen nehezen vagy nem alkalmazható. Ezzel szemben az önkorrigáló pozícióbecslő algoritmus segítségével a követés még nagy zaj mellett is lehetséges, megfelelő számú eszköz használatával. A rádióinterferometrikus lokalizációban az eszközök elhelyezkedésének méréséhez és számításához több száz mérés és akár 80 perc szükséges (becslések szerint ez akár 5 perc alá

is szorítható). Ezzel szemben a rádióinterferometrikus követés esetében adópáronként 1-1 mérés elegendő a működéshez, valamint a számítások komplexitása is kisebb, így akár valós időben is megoldható. Mivel a mérés alapja megegyezik, ezért az elérhető pontosság közel azonos (pár centiméter) nyugvó helyzetben. A rádióinterferenciás követés esetében feltételezzük hogy az objektum mozog, ezért ez a lokalizációs hiba valamivel nagyobb lehet.

4. táblázat: A rádióinterferenciás követés összehasonlítása más módszerekkel.

	Rádióinterferenciás követés	Rádióinterferenciás lokalizáció [5]	Akusztikus lokalizáció [1]	Jelerősség alapú lokalizáció [10]	Jelerősség és térkép alapú lokalizáció [11]	Jelterjedés idején alapuló lokalizáció [3]	Jelterjedés idején és a jel fázisán alapuló lokalizáció [9]
Lokalizáció / követés viszonya	követés ↓ lokalizáció	---	lokalizáció ↓ követés	lokalizáció ↓ követés	lokalizáció ↓ követés	lokalizáció ↓ követés	lokalizáció ↓ követés
Alapvető geometriai modell	hiperbolooid felületek halmaza	hiperbolooid felületek halmaza	hiperbolooid felületek	gömbfelület	gömbfelület	gömbfelület	gömbfelület
Speciális hardver	nincs	nincs	van (nagy fogyasztás)	nincs	nincs	van (drága)	van (drága)
Előzetes mérések	nem szükséges	nem szükséges	nem szükséges	nem szükséges	szükséges	nem szükséges	nem szükséges
Pontosság	pár centiméter	pár centiméter (zavarásmentes környezetben)	pár centiméter (zavarásmentes környezetben)	maximum 3 m	átlagos hiba: 2,1 m 90% valószínűséggel: 1,85 m	beltérben: max. 3,4 m folyósón max.: 5,5 m szénbánya max.: 18 m	maximum: 16 cm

9. Összefoglalás

Jelen tudományos munkában egy újszerű objektumkövetési megoldás került bemutatásra, ami ismert helyzetű rádió-adó és -vevő eszközök segítségével követ egy mozgó vevőt, annak kiindulási helyzetének ismeretében. A javasolt eljárás a rádióinterferencián alapul; két adó által gerjesztett interferencia hullámok segítségével következtetni lehet az adók és két vevő relatív helyzetére, ahol az egyik vevő maga a követett eszköz. Az egymást követő, folyamatos fázismérések segítségével a rendszer képes követni egy vagy több objektum helyzetét. A rendszer fontos jellemzője, hogy az eszközökön rendelkezésre álló rádió adó-vevőn kívül nem igényel semmilyen speciális célhardvert vagy a mérési terület előzetes felmérését, ezáltal olcsó és pontos megoldást nyújt.

A dolgozatban ismertetésre került egy egyszerű fáziskorrekciós módszer, amely lehetővé teszi a mozgó objektum egydimenziós követését. Mivel egyetlen mérési elrendezés csak egy fáziskülönbség értéket – és ezáltal egyetlen hiperboloidot vagy kétdimenziós esetben hiperbolát – határoz meg, szükséges volt a követés kiterjesztése több dimenzióra is. A bemutatott többdimenziós követés már lehetővé teszi egy objektum helyzetének követését.

A fázismérések természetes módon tartalmazzak hibákat is. Dolgozatomban bemutattam ezek lehetséges fajtáit és a fáziskorrekcióra gyakorolt hatásukat. A pontatlan mérések miatt szükséges volt egy olyan pozícióbecslő megalkotása, ami képes az objektum helyzetét zajos mérésekből is meghatározni. A fáziskorrekció hibáiból adódó maradandó eltéréseket azonban ez nem képes kezelni, így a kutatás során létrehoztam egy önkorigáló pozícióbecslő algoritmust, amely egyrészt képes a hibás fáziskülönbségek korrekciójára, másrészt pontosabb becslést ad az objektum helyzetére.

A rendszer működéséhez elengedhetetlen volt egy fázisbecslő megoldás kidolgozása, amely lehetővé teszi a korlátozott erőforrásokkal rendelkező eszközökön a valós idejű fázismérést. A létrehozott módszer fontos jellemzője, hogy a számításokat megosztja az eszközök és az adatokat feldolgozó számítógép között, ezáltal a fázisbecslés pontos és gyors lehet, valamint a felhasznált kommunikációs sáv szélesség is minimális.

A dolgozatban részletesen bemutattam az elméleti eredmények alapján elkészített működő tesztrendszert és azok elemeit, valamint illusztráltam a mérés folyamatát.

A kidolgozott módszer zajérzékenységét szimulációk segítségével vizsgáltam meg, valós méréseken keresztül bemutattam a fázismérések eloszlását különböző mértékű környezeti zavarások mellett, valamint mérésekkel igazoltam a rádióinterferometrius fázistér modelljének valóságát. A dolgozat ezen kívül tartalmaz még különböző valós méréseket egy- és több dimenzióban, illetve az önkorigáló pozícióbecslő algoritmussal készült mérést is.

Végül a dolgozatban összehasonlítottam a kidolgozott rádióinterferometrius követést más módszerekkel különböző szempontok szerint. Ezek alapján elmondható, hogy a bemutatott módszer előnye a nagy (pár centiméteres) pontosság, mindezt speciális vagy drága hardver nélkül, csupán az eszközökön lévő kommunikációra is használható rádió segítségével. A lokalizációs hiba jelentősen kisebb, mint az elterjedt jelerősség alapú módszereknél, ahol ez a

hiba több méteres nagyságrendű. Ezen kívül nem igényel előzetes méréseket vagy „térképezést”. Hátránya, hogy az összehasonlításban szereplő módszerekkel ellentétben nem lokalizációs hanem követési eljárás. Ennek megfelelően szükséges az objektum kezdeti pozíciójának ismerete, valamint több mérési ciklus kimaradása esetén az objektum helye nem meghatározható.

A további lehetőségekről elmondható, hogy az első kültéri kísérletek ígéretesek, azonban a javasolt megoldás használhatósága beltérben további vizsgálatokat igényel, ahol is a visszaverődések és a jel gyengülése (fading) kritikus probléma. A zajérzékenység vizsgálat alapján, megfelelő redundancia alkalmazásával a rendszer pontossága növelhető, valamint a jel időszakos elvesztéséből származó hibák kiküszöbölhetők. Továbbá fejlettebb, az objektum mozgását figyelembe vevő/modellező fáziskorrektív technikákkal a rendszer robusztussága tovább növelhető.

Irodalomjegyzék

- [1] Ajdler, T., Kozintsev, I., Lienhart, R., Vetterli, M. "Acoustic source localization in distributed sensor networks," Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2004, vol.2, pp.1328-1332, Nov. 2004
- [2] Elson, J., Girod, L., and Estrin, D. "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts," SIGOPS Oper. Syst. Rev. Vol. 36, No. SI, pp. 147-163, Dec. 2002.
- [3] Lanzisera, S., Lin, D.T., Pister, K.S.J. "RF Time of Flight Ranging for Wireless Sensor Network Localization," 2006 International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems, pp.1-12, June 2006
- [4] Levis P., and Gay D., "TinyOS Programming,". Cambridge University Press, New York, 2009
- [5] Maroti, M. et al, "Radio Interferometric Geolocation", ACM Third International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 05), San Diego, CA, pp. 1--12, November, 2005.
- [6] Maróti, M., Kusy, B., Simon, G., Lédeczi, A., "The flooding time synchronization protocol, " SenSys '04, pp. 39–49, 2004
- [7] Mulloni, A., Wagner, D., Barakonyi, I., Schmalstieg, D. "Indoor Positioning and Navigation with Camera Phones," IEEE Pervasive Computing, vol. 8, no. 2, pp. 22-31, April-June, 2009
- [8] Ni, K., Kannan, A., Criminisi, A., Winn, J. "Epitomic location recognition," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2008., pp.1-8, June 2008
- [9] Schwarzer, S., Vossiek, M., Pichler, M., Stelzer, A., "Precise distance measurement with IEEE 802.15.4 (ZigBee) devices," 2008 IEEE Radio and Wireless Symposium, pp.779-782, Jan. 2008
- [10] Sharma, N. K. VA Weighted Center of Mass based Trilateration Approach for Locating Wireless Devices in Indoor Environment," MOBIWAC, ACM, pp. 112-115, 2006
- [11] Singh, R., Macchi, L., Regazzoni, CS., Plataniotis, K., " A statistical modelling based location determination method using fusion technique in WLAN," IEEE IWWAN 2005, London, May 2005
- [12] Tribolet, J.M. "A new phase unwrapping algorithm", IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ASSP, Vol. 25, No.2, pp. 170-177, Apr. 1977.
- [13] Zachár, G., Simon G., "Robust Sensor Fusion for Radio Interferometric Tracking," EWSN 2014, Oxford, Feb. 2014.
- [14] Zachár, G., Simon, G., "Robust Phase Estimation for RSSI signals," EWSN 2014, Oxford, Feb. 2014.