

Iránymérés adaptív antennarendszerrel

NÉMETH ANDRÁS

ZMNE-BJKMFK, Katonai Távközlési és Telematikai Tanszék,
anemeth@bjkmf.hu

FOLKMANN VIKTOR

Bonn Hungary Electronics Kft.
folkmannv@freemail.hu

Kulcsszavak: mobil távközlés, elektromágneses környezetszennyezés, titkosítás, hullámtan

A mobil távközlésben az előfizetők számának gyors növekedése, a szolgáltatások bővülése és a fokozódó verseny szükségessé teszi új módszerek bevezetését a rendelkezésre álló frekvenciák gazdaságosabb felhasználása érdekében. Ennek leg-
hatékonyabb eszköze lehet az úrkutatásban, valamint a műholdas műsorszórásban már alkalmazott adaptív antennarendsze-
rek alkalmazása. Ezek bevezetése azonban számos kérdést vet fel mind hardver mind szoftver oldalról.

Bevezetés

Az adaptív módszerekkel történő iránymeghatározás fontos szerepet tölthet be a mobil távközlés területén. A bázisállomás egy-egy tűnyalábbal követi a forgalmat bonyolító mobil készülékeket, ezáltal:

1) *A hálózat kapacitása növelhető:* A keskeny nyalábnak köszönhetően csökken az azonos frekvenciát alkalmazó cellákból érkező interferencia. Ez lehetőséget teremt adott területen a frekvenciakihasználtság javítására, ezáltal növelve a kiszolgálható felhasználók számát.

2) *A kisugárzott rádiófrekvenciás energia csökkenthető:* A sugárzás irányának jelentős korlátozásának köszönhetően lényegesen kisebb energia elegendő egy adott távolságra lévő mobilkészülékkel való kapcsolattartáshoz.

3) *Az elektromágneses környezetszennyezés az előző pontban leírtak egyenes következményeként jelentősen csökken.*

Az ilyen rendszereknek azonban nem csak polgári, hanem katonai alkalmazása is lehetséges:

A zavaró rádióadók bemérésére:

Hadszíntéren, az ellenség csapatainak kommunikációját megnehezítendő, gyakran működtetnek zavaró rádióadókat. Ezek hatása csökkenthető oly módon, hogy az antennarendszer karakterisztikájában nullhelyet illesztnek a zavaró források irányára.

Titkosítás:

A rádióforgalom lehallgatása megnehezíthető, ha az adóoldalon egy tűnyalábbal sugározunk a vevő irányába, ezáltal minimálisra csökkentve az egyéb irányokból történő vétel lehetőségét.

Célkövetés:

A hadszíntéren az egyes egységek (repülőgépek, harckocsik, hadihajók, kommandós egységek stb.) rádiócsatornákon keresztül tartják a kapcsolatot egymással és a parancsnokságokkal, azaz rádiófrekvenciás teljesítményt sugároznak ki. Megfelelő adaptív antennarendszerek alkalmazásával mozgásuk követhetővé válik...

A várható eredmények tükrében belátható, hogy az adaptív antennarendszerek kutatása fontos lehet, hiszen alkalmazási lehetőségei – egyéb technológiákat is bevonva (pl. mikrosztríp antennák) – szinte háttérmentes, miközben a várható gazdasági és társadalmi hatásai sem elhanyagolhatók...

Mivel a témával foglalkozó szakirodalmakban és az Interneten sem talákoztunk hasonlóval, úgy döntöttünk, hogy építünk egy kísérleti adaptív iránymérő rendszert a GSM sávra, melynek segítségével a valóságban is vizsgálhatóvá válik az elv alkalmazhatósága, az algoritmusok hatékonysága, továbbá a hullámterjedés tulajdonságaiból adódó anomáliák hatásai. Ez segítséget nyújthat továbbá a felmerülő nehézségek megoldásában, új algoritmusok kidolgozásában és kipróbálásában, korábbi módszerek finomításában...

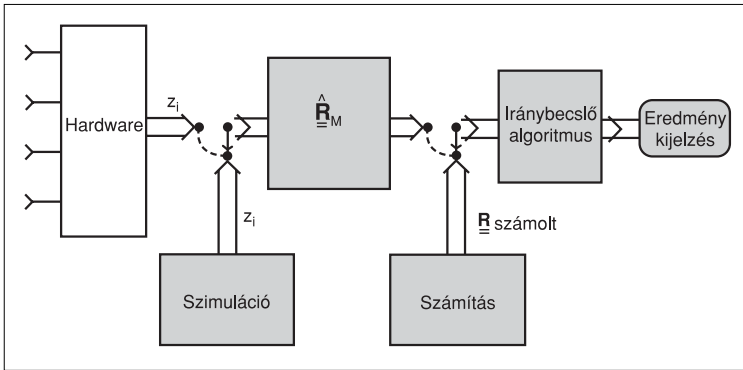
Cikkünkben kapcsolódni kívánunk a Híradástechnika folyóiratban megjelent [6] azonos témájú elméleti áttekintést adó írásához, ezáltal nem kívánunk foglalozni elméleti alapozással, csak a működés szempontjából fontos, a megértéshez szükséges összefüggésekre hívjuk fel a figyelmet.

Szó lesz a rendszert alkotó, adatokat feldolgozó szoftver működéséről, valamint a mérést végző hardver felépítéséről és működéséről továbbá, az elkészült rendszerrel végzett mérések eredményeiről és további lehetőségekről.

Rendszer felépítése és működése

Az általunk készített rendszer esetén a térbeli mintavételezést a 900MHz-es sávban egy négyelemű anten-nasor végzi, ahol az elemek távolsága $\lambda/2$. (A Shannon féle mintavételi tétel térbeli adaptációjának megfelelően ez a maximális távolság, amelynél a spektrumban nem jön létre átlapolódás (időbeli frekvencia – térbeli frekvencia analógia)).

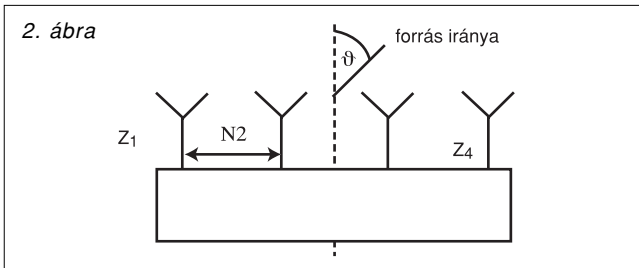
A rendszer blokkvázlata a következő oldalon, az 1. ábrán látható.



1. ábra A rendszer blokkvázlata

Az első blokk tartalmazza a hardvert, melynek kimenetén a mintavételi frekvenciának megfelelő időközönként rendelkezésre állnak az antennarendszer által vett vektorok.

Ezek soros porton keresztül jutnak a PC-be, ahol a szoftver a feldolgozás után grafikusán megjeleníti az eredményt. Az ábrán szürkével jelölt blokkokat szoftveresen valósítottuk meg. A program alkalmas iránymeghatározást végezni számítási modellek, szimuláció valamint valós mérések alapján (a hardver által előállított adatok fogadása, feldolgozása, megjelenítése). Az antennarendszerek elméletének megfelelően egy N-elemű sor iránytényezője felírható egy (N-1)-ed fokú polinommal, ami N-1 nullhelyet jelent a függvényben. Eből következőleg a négyelemű sor maximálisan három irány becslésére alkalmas. A fázisközéppont, az antennarendszer geometriai közepe, míg a mért irány, az ebbe a pontba állított merőlegeshez képesti szögeltérés (2. ábra).



2. ábra

Elsődleges feladatunk mindhárom esetben az autokorrelációs mátrix előállítás, ami definíciószerűen:

$$R = E\{zz^H\} = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k z(t_i)z(t_i)^H$$

ahol $z^T = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4]$ az antennarendszer mintavett vektora, E pedig a halmazátlag jelölése.

Számítási modellel végzett iránymeghatározáskor nem foglalkozunk olyan problémákkal, mint például az egyes források közötti fáziskülönbség, a zaj okozta torzítások, valamint egyéb, terjedésből adódó nehézségek. Úgy tekintjük, hogy az egyes források között nincs fáziskülönbség. A Gaussi zajt csak a teljesítményével vesszük figyelembe, vagyis úgy, mintha végtelen minta alapján lenne átlagolva (szórásnégyzet). Ekkor megte-

hetjük, hogy a forrásokat külön, egymástól függetlenül kezeljük és így végezzük a számításokat. A végén ezeket összegezve kapjuk a tényleges autokorrelációs mátrixot:

$$R = \sum_{i=1}^3 p_i z_i z_i^H + \sigma^2 I$$

ahol p_i az i-edik forrás által előállított teljesítmény a mérés helyén.

Egyetlen forrásra az autokorrelációs mátrix:

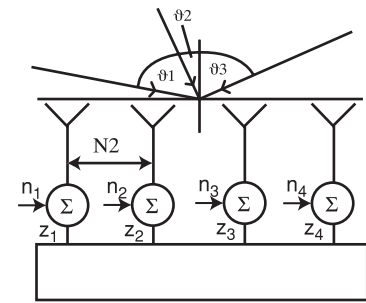
$$R = p \cdot zz^H$$

ahol a z , négyelemű vektor tartalmazza az egyes antennákon jelenlévő fázist:

$$z^H = [e^{-j\pi \cos\theta(1-2.5)} \ e^{-j\pi \cos\theta(2-2.5)} \ e^{-j\pi \cos\theta(3-2.5)} \ e^{-j\pi \cos\theta(4-2.5)}]$$

Szimuláció esetén figyelembe kell venni az additív zajt, valamint azt hogy a gyakorlatban a különböző források jelei nem azonos fázisban érkeznek az antennákra. A rádióadókat modulált jelet sugároznak, így a moduláció okozta fáziseltéréssel is számolni kell. Ezen tényezők modellezéséhez rendelünk minden forráshoz a $[-\pi, \pi]$ tartományon egyenletes eloszlású véletlen fázist, valamint minden antennán jelenlévő jelhez additív eloszlású Gaussi zajt (3. ábra).

3. ábra



A fentiek alapján, három forrás esetén a mintavett vektor az alábbiak szerint alakul:

$$z_1 = \sqrt{p_1} e^{-j(\pi \sin\theta_1(1-2.5)+\phi_1)} + \sqrt{p_2} e^{-j(\pi \sin\theta_2(1-2.5)+\phi_2)} + \sqrt{p_3} e^{-j(\pi \sin\theta_3(1-2.5)+\phi_3)} + \sqrt{n_1}$$

$$z_2 = \sqrt{p_1} e^{-j(\pi \sin\theta_1(2-2.5)+\phi_1)} + \sqrt{p_2} e^{-j(\pi \sin\theta_2(2-2.5)+\phi_2)} + \sqrt{p_3} e^{-j(\pi \sin\theta_3(2-2.5)+\phi_3)} + \sqrt{n_2}$$

$$z_3 = \sqrt{p_1} e^{-j(\pi \sin\theta_1(3-2.5)+\phi_1)} + \sqrt{p_2} e^{-j(\pi \sin\theta_2(3-2.5)+\phi_2)} + \sqrt{p_3} e^{-j(\pi \sin\theta_3(3-2.5)+\phi_3)} + \sqrt{n_3}$$

$$z_4 = \sqrt{p_1} e^{-j(\pi \sin\theta_1(4-2.5)+\phi_1)} + \sqrt{p_2} e^{-j(\pi \sin\theta_2(4-2.5)+\phi_2)} + \sqrt{p_3} e^{-j(\pi \sin\theta_3(4-2.5)+\phi_3)} + \sqrt{n_4}$$

ahol: p_i az i-edik forrás teljesítménye, θ_i az i-edik forrás beesési szöge, ϕ_i az i-edik forrás véletlen fázisa, n az additív zaj teljesítménye.

Adott mintavételi időpontban az egyes antennákon lévő jelek, csak az útkülönbségből adódó fáziskülönbséggel térnek el egymástól. Ehhez szükség van arra a feltevésre, hogy ezen útkülönbség alatt modulációból származó fáziseltérés nincs.

Ezek alapján az adott mintavételi időponthoz tartozó autokorrelációs mátrix a mintavett vektorból számít-

ható, míg a fázishiba átlagolással ejthető ki. A mintaszám növelésének a folyamat változási sebessége szab határt, hiszen a mérés eredményességének feltétele, hogy a mintavételezett folyamat adott stacioner, vagy legalább a mérési folyamat alatt stacionernek tekinthető, azaz kvázi stacioner legyen.

Az M minta alapján becsült autokorrelációs mátrix tehát a következő:

$$\hat{R}_M = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{z}_i \mathbf{z}_i^H$$

Mérés esetén a mintavett vektort a hardver állítja elő, amelyből a mátrix meghatározása a fenti módon történik.

Az autokorrelációs mátrixot kiindulási paraméternek tekintve az írány meghatározást különböző algoritmusok végzik, melyek pontosságban, dinamikatarományban, felbontásban, zavarállóságban térnek el egymástól. Az általunk használt három módszer által becsült spektrum:

$$S_{\text{BARTLETT}}(\omega) = E \{ |\mathbf{s}^H \mathbf{z}|^2 \} = \mathbf{s}^H(\theta) \mathbf{R} \mathbf{s}(\theta)$$

$$S_{\text{CAPON}}(\omega) = \frac{1}{\mathbf{s}^T(\omega) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{s}^*(\omega)}$$

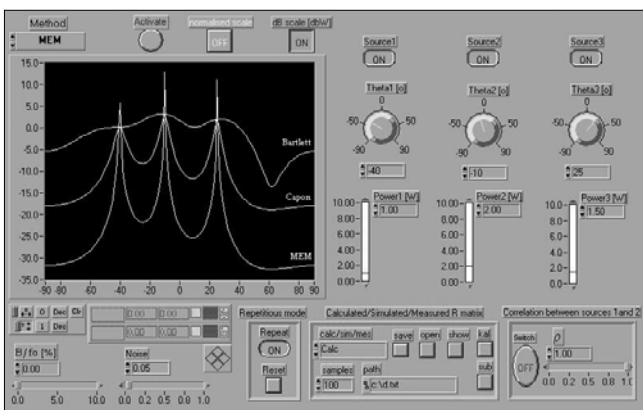
$$S_{\text{MEM}}(\omega) = \frac{1}{|\mathbf{s}^H(\omega) \mathbf{R}^{-\delta}|^2} \text{ ahol } \delta = [10 \dots 0]$$

Az első konvencionális módszer (Bartlett-becslés vagy Fourier-módszer), míg a második és harmadik adaptív algoritmus (Capon vagy MSINR, azaz maximális jel/zaj viszony módszer és MEM, azaz maximális entrópia módszer). Az adaptivitás leegyszerűsítve azt jelenti, hogy az antennarendszer karakterisztikája követi a vizsgált tér változásait. Az algoritmusok tulajdonságairól a későbbiekben még lesz szó.

A szoftver

Szoftverünk tehát a bemutatott rendszerben alkalmas számítás, szimuláción és mérésen alapuló iránybecsléshez szükséges számítások végzésére, az eredmények grafikus megjelenítésére. A kezelőfelület a 4. ábrán látható.

4. ábra



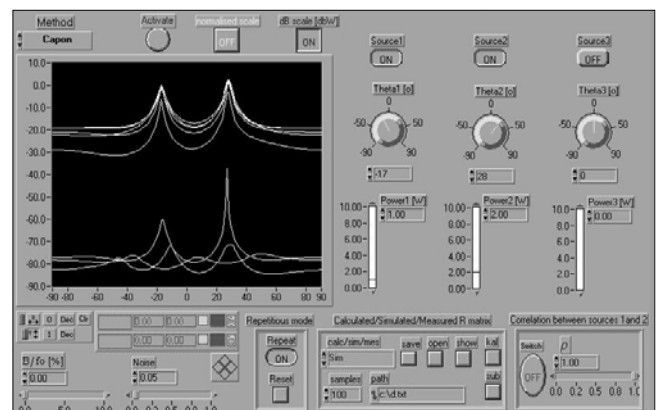
A felhasználó megjelenítheti az eredményeket lineáris, logaritmusos vagy normalizált skálán, továbbá lehetősége van összehasonlítás céljából a görbék egymásra rajzolására, a pontosabb leolvasás elősegítése érdekében pedig markerek használatára. Négy antenából álló rendszer, legfeljebb három irány becslésére alkalmas, így ennyi áll rendelkezésünkre számítás és szimuláció esetén. Ezek iránya és teljesítménye egymástól függetlenül folyamatosan, lineáris skálán beállítható. Szimuláció esetén tetszőlegesen beállíthatjuk a mintaszámot, zajt adhatunk a jelekhez, beállíthatjuk a sáv szélességüket, valamint az első és második forrást korrelálttá tehetjük. Mindhárom üzemmódban (számítás, szimuláció, mérés) a korábban említett algoritmusokkal dolgozhatunk, a kapott eredményeket tárolhatjuk, majd később ismételtelen megjeleníthetjük. A 4. ábrán ezek alapján a következő beállításokat eszközöltük: számítási üzemmód, a források tulajdonságai sorrendben:

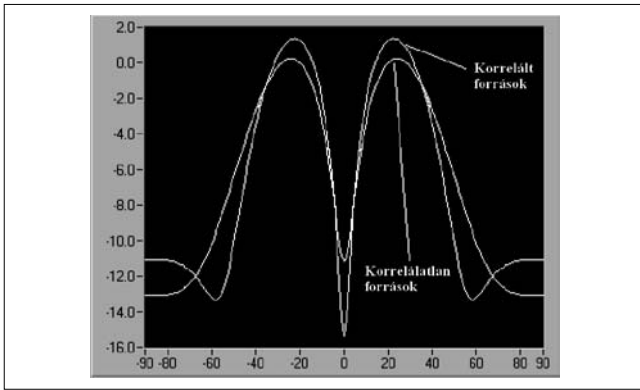
-40°, 1W; -10°, 2W; 25°, 1.5W, mindhárom módszer megjelenítése. A kijelzőn látható a különböző algoritmusok két legalapvetőbb tulajdonsága a dinamika és felbontás. Steril körülmények között tehát az adaptív modellek messze fölülmúlják mindkét paraméterben a konvencionális módszert. Csekély zavarálló képességük miatt azonban gyakorlati körülmények között kevésbé meggyőző eredményt adnak. Az 5. ábra a mintaszám növelésének hatását mutatja be Capon módszer esetén (lentől fölfelé a mintaszám nő). Megállapítható, hogy a megbízható méréshez 100 minta már elegendő. (A mintaszám az átlagolt mérések számát jelenti.)

A korrelált források hatása a 6. és 7. ábrákon figyelhető meg (Bartlett – balra, Capon – jobbra). Megállapítható, hogy míg a Bartlett becslés esetében alig befolyásolja a mérést, addig az adaptív algoritmusok pontossága és dinamikája jelentősen romlik.

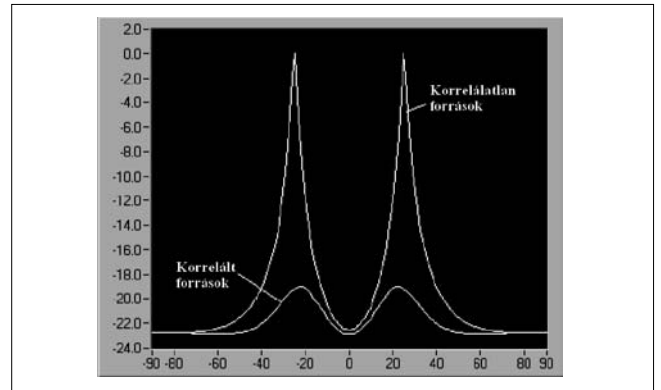
A 8. és 9. ábrán a sáv szélesség hatása vizsgálható ($B/f_0 = 0\%$ és $B/f_0 = 10\%$). Ez alapján szintén az adaptív algoritmusok gyengesége látszik: a Bartlett becsléssel kapott eredmény gyakorlatilag érzéketlen a spektrum kiszélesedésére, a Capon módszer esetén viszont jelentősen csökken a dinamika (6dB).

5. ábra

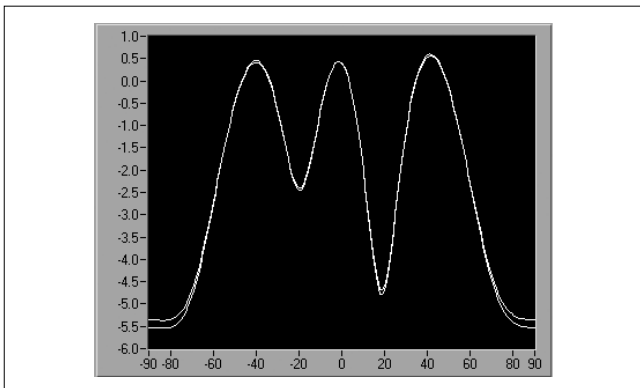




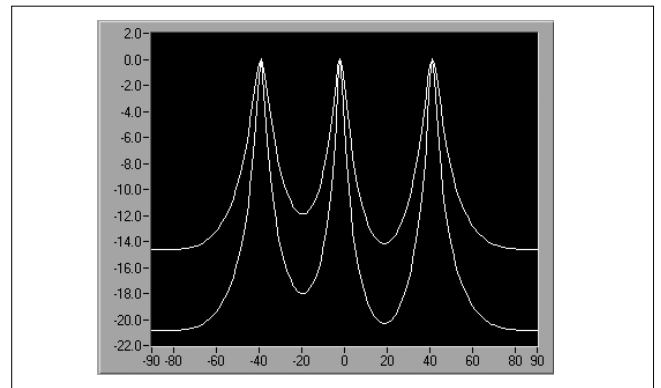
6. ábra: Bartlett



7. ábra: Capon



8. ábra: Bartlett



9. ábra: Capon

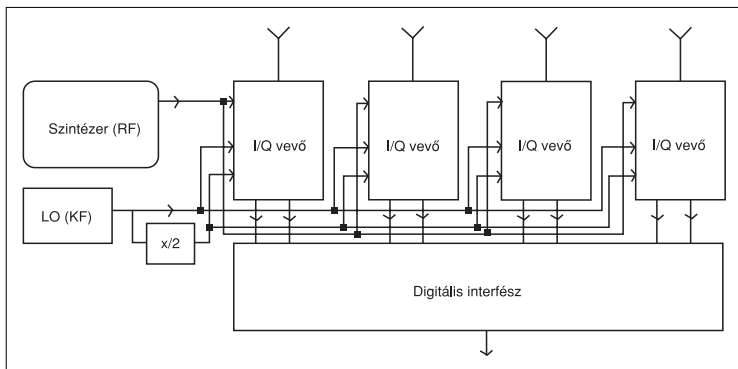
Összességében belátható, hogy az adaptív algoritmusok ideális esetben messze felülmúlják a Bartlett becslést, a valós körülmények azonban jelentősen rontják azok hatékonyságát.

Természetesen végtelen azoknak a beállításoknak a száma, melyek a fenti módon megvizsgálhatók. Célnk ebben a fejezetben csupán az volt, hogy a program működését néhány fontosabb esetet kiragadva bemutassuk.

Hardver

Valós mérések végzéséhez szükségessé vált a mérést végző eszköz megépítése, melynek blokkvázlata a 10. ábrán látható.

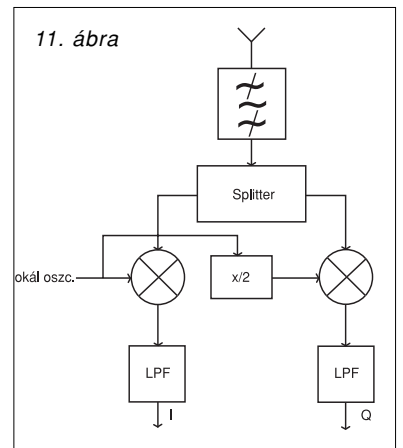
10. ábra: A hardver felépítése



A tervezés alapvető szempontja a programhoz való illeszthetőség volt, tehát négyelemű, lineáris struktúrájú antennarendszert kellett tervezni, ahol az elemek távolsága $\lambda/2$ a 900MHz-es GSM uplink sávban.

A rendszer működése leegyszerűsítve így írható le: az antennák térben mintavételezik az elektromágneses teret, amely valamilyen amplitúdó és fázisképet hoz létre. Ideális esetet feltételezve az egyes antennák kimenetein megjelenő jelek csak fázisban fognak eltérni (úthosszkülönbségből adódó fáziskülönbség). A jeleket a vevők erősítik, keverik, szűrik, előállítják az I és Q csatornákat, melyeket a digitális interfész mintavételez és továbbítja a számítógépnek. A szoftver a hardvertől kapott minták átlagolása után meghatározza a kívánt források irányát. Ez alapján szükségünk volt négy I-Q vevőre, egy lokáljel és egy digitalizáló áramkörre, valamint egy RF szintézerre.

A rendszer alap-eleme tehát az I-Q vevő, melynek elméleti felépítése a 11. ábrán, az I és Q jelek jelentése pedig a 12. ábrán látható.



11. ábra

Működéséről csak annyit, hogy a kimeneten megjelenő I és Q értékek által meghatározott vektor eredőjének hossza a tér nagyságával lesz arányos, míg az I tengellyel bezárt szöge a forrás által előállított tér adott pontbeli fázisát jelenti a lokáloszcillátorhoz képest.

A keverést a valóságban, két fokozatban oldottuk meg, hiszen középfrekvencián a csatornaszűrés és erősítésszabályozás egyszerűbben megvalósítható, továbbá így nyíltak lehetőségünk a RF szintézer segítségével a sáv különböző vivőire történő ráhangolásra.

A második fokozatban a jelet az alapsávba keverjük a digitalizáló áramkör számára. A KF lokáljel előállítása, szétosztása, valamint az RF szintézer jelének szétosztása, egy nyomtatott áramköri lapon valósult meg.

A digitális interfész végzi a nyolc csatorna egyidejű mintavételezését és az adatok továbbítását soros porton keresztül a számítógépbe.

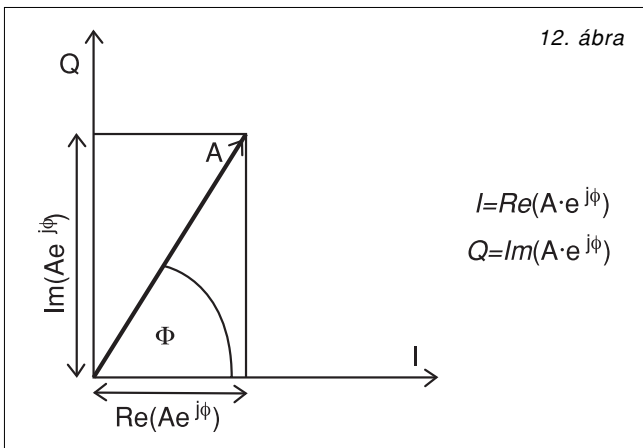
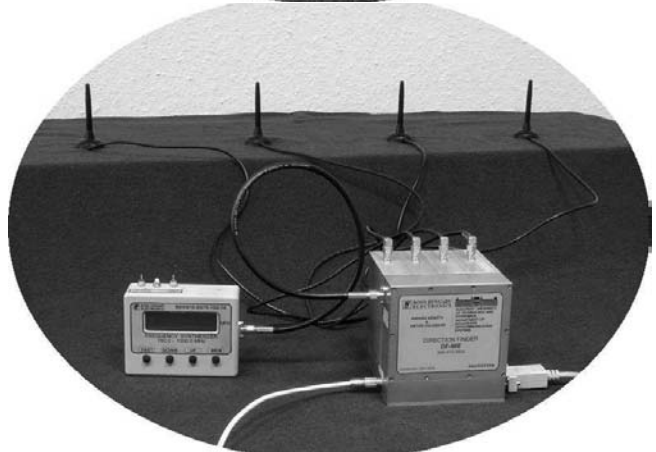
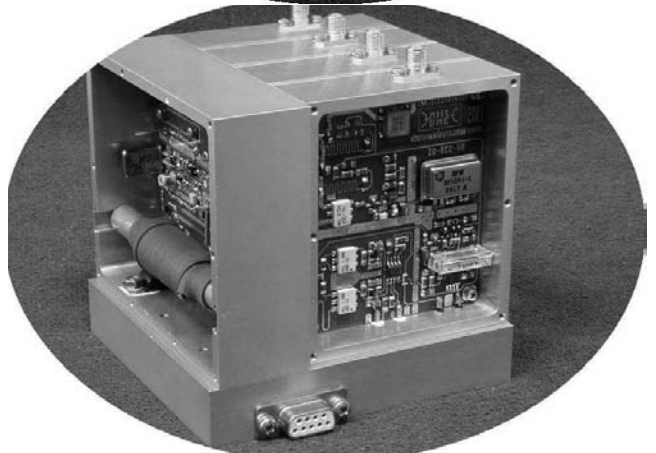
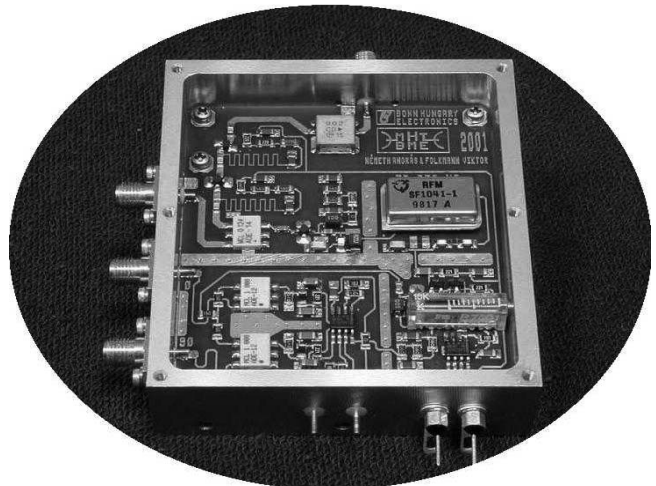
A hardver megépítéséről és beméréséről sok oldalt tele lehetne írni, ehelyett azonban most megelégszünk néhány fénykép közlésével.

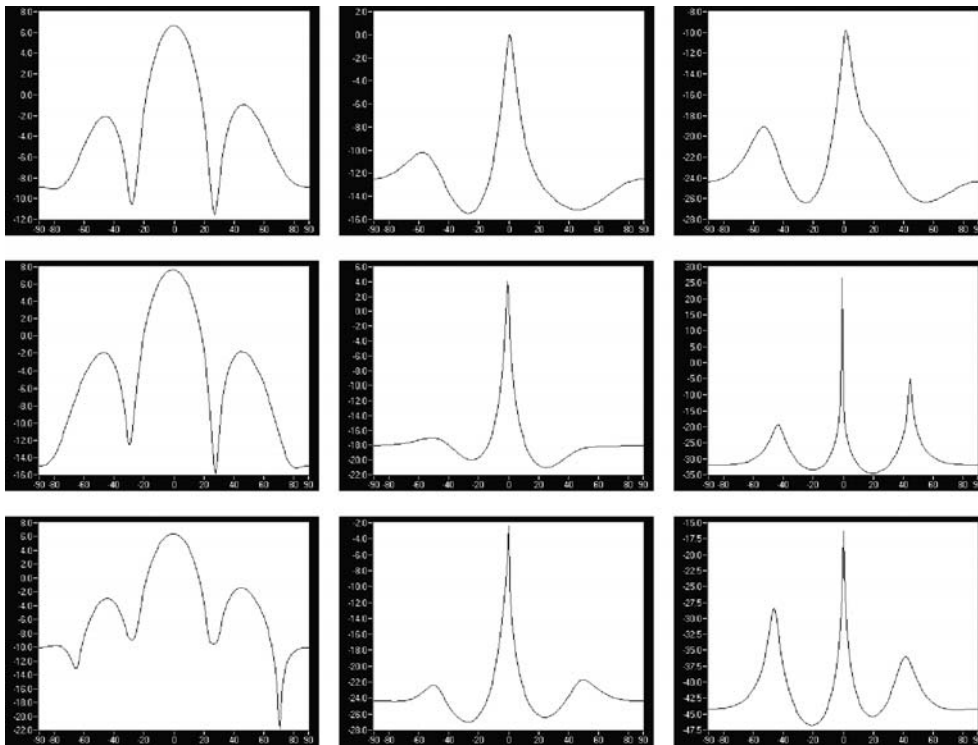
Mérések

A hardver elkészülte és bemérése után megkezdődtek a mérések. A forrás szerepét egy monopol antenna töltötte be, melyet jelgenerátorral gerjesztettünk.

Az első méréseket zárt térben (épületen belül) végeztük, de ezek csupán a rendszer működésének nagyléptékű vizsgálatára voltak alkalmasak. Hiteles mérések csak reflexiómentes környezetben végezhetők, ezért (kvázi) szabadtéri mérést végeztünk. Az így kapott eredmények már jóval meggyőzőbbek voltak, mint az épületen belüli mérések.

Az adóantennát először egy tisztán szinuszos jellel gerjesztettük, majd elvégeztük a méréseket modulált adójellel is. Az eredmények a 13. ábrán láthatók. Az elméletnek megfelelően tapasztalható, hogy moduláció esetén a B/f_0 arány növelésével a mérés dinamikája csökken. FM moduláció esetén a szintcsökkenés annak tudható be, hogy SAW szűrő által meghatározott 200kHz-es sávba a jelteljesítmények csak egy része jut. A hatás itt is a Bartlett-becslésnél érvényesül a legkevésbé, az adaptív módszerek a modulációra is érzékenyebbek.





13. ábra

Az itt megfigyelhető melléknyalábok valószínűleg a még mindig nem ideális mérési körülményeknek köszönhetőek (reflexiók: fák bokrok, egyéb tereptárgyak, interferencia: a mérést a GSM sávban végeztük).

A mérések igazolták az egyes algoritmusok elméletben leírt tulajdonságait. Egyértelműen látszik, hogy az adaptív módszerek igen érzékenyek a valós körülmények közt általában jelenlévő zavaró tényezőkre (elsősorban a reflexiók miatt létrejövő korrelációra). Ezen a későbbiekben úgynevezett korrelációromboló algoritmusokkal lehet segíteni. Az adaptív algoritmusok hatékonyságát szintén nagymértékben befolyásolja a hardver precizitása (az I és Q csatornák közti szint- és fáziskülönbség stb.).

Konklúzió

Cikkünk célja egy, az általunk készített kísérleti iránymérő rendszer bemutatása volt, amely a későbbiekben felmerülő igényekhez igazodva továbbfejleszhető. A rendszer a szakirodalomban és szaksajtóban széleskörűen megtalálható elméleti alapokra épül, ezért a cikk csak minimális elméletanyagot közöl, és megpróbál a rendszer felépítésére, valamint a szimulációs és mérési eredményekre koncentrálni. Az iránymérő rendszerrel eredetileg mobiltelefonok irányát szerettük volna mérni, ez azonban olyan problémákat vetett fel, melyek megoldása meghaladta a rendelkezésre álló lehetőségeinket.

A rendszer a fentiek alapján jelenlegi állapotában kiválóan alkalmas további kísérletek elvégzésére, új algoritmusok kidolgozására, hatékonyságuk vizsgálatára, korlátaik behatárolására, több ilyen rendszer esetén

pedig azok együttműködésének vizsgálatára. A valós alkalmazásokat tekintve az adaptivitásból adódóan az ilyen antennarendszerek felhasználhatóságának elsősorban csak a képzelet szab határt. Technikai korlát az egyes algoritmusok számításiigényének jelentős növekedése az alkalmazott antenna elemszám függvényében, illetve az, hogy az adaptív antennasorok csak $\Theta = \pm 60^\circ$ -os tartományban (a szinusz függvény kvázi-lineáris tartományában) adnak helyes becslést, ezáltal a teljes 360° -os tartomány lefedéséhez három ilyen (pl. mikrosztrip kivételű) antennasorra lenne szükség. A

számításiigény növekedése kiváltképp akkor válik jelentőssé, ha a lineáris antennarendszerek mellett elkezdünk gondolkodni a kettő-, netán háromdimenziós elrendezések alkalmazásának lehetőségén. Összefoglalásként megállapíthatjuk, hogy számtalan olyan terület van, ahol sikerrel lehetne alkalmazni ilyen antennarendszereket, illetve az ezekből felépülő komplexumokat – például mobil bázisállomásként, vagy különböző rádióelektronikai felderítő rendszerekben.

Itt jegyezzük meg, hogy a rendszer önálló laboratórium és diplomatervezés keretében készült a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Szélessávú Hírközlő Rendszerek Tanszékén. A hardver megvalósításához a BONN MAGYARORSZÁG Kft. nyújtott támogatást, melyért ezúton is köszönetet mondunk.

Irodalom

- [1] Alfonso Farina: Antenna-Based Signal Processing Techniques for Systems Artech House, Norwood, 1992.
- [2] Szekeres Béla, Nagy Lajos, Petre Péter: Antennák és hullámterjedés, jegyzet (BME)
- [3] Varga Zoltán: Rádió iránymérés (Diplomaterv) Budapesti Műszaki Egyetem 1999.
- [4] Simonyi Károly, Zombori László: Elméleti villamosságtan Műszaki Könyvkiadó 2000.
- [5] Istvánffy Edvin: Tápvonalak, antennák és hullámterjedés Műegyetemi kiadó 1997.
- [6] Németh Zoltán, Imre Sándor, Balázs Ferenc: Adaptív antennarendszerek Híradástechnika, 2002/5. pp.21–27.