

Szüllő Ádám¹

PASSZÍV RADARRENDSZER A LÉGI FELDERÍTÉSBEN – WAMLAT²

A hagyományos légi felderítés esetén szükséges megvilágító jel használata számos problémát vethet fel. Katonai alkalmazás esetén a legfőbb probléma a felderítő radar észlelhetősége, míg polgári esetben az elfoglalt frekvenciasáv költségvonzata. Technikai nehézségeket okozhat a szükséges nagy jelteljesítmény előállítása is. Passzív esetben ezen problémák nem jelentkeznek, hiszen a radarrendszer ebben az esetben csupán „hallgatózik”. Egy ilyen rendszer rádió felderítési módszerekkel nem észlelhető, nem okoz interferenciát más rendszerekben, továbbá rugalmasan telepíthető, a tisztán vételi üzemmód miatt nem szükséges engedélyeztetés. A cikkben bemutatott rendszer multilaterációs technika segítségével teszi lehetővé egy nagyobb területen elszórt vevők (WAMLAT – Wide Area Multilateration) által gyűjtött fedélzeti transzponder jelek alapján polgári repülőgépek pozíciójának mérését. A multilaterációs technika időmérésen alapul, ezért minden egyes vételi helyen szükséges nagy pontosságú szinkronizáció biztosítása. A kifejlesztett órajel generátor részegység a GPS rendszerhez történő szinkronizáció által képes mind frekvenciában, mind fázisban szinkron órajelet biztosítani az időmérés céljából az egyes vételi helyeken.

PASSIVE DISTRIBUTED RADAR SYSTEM FOR AIR SURVEILLANCE - WAMLAT

Classical air surveillance radars have a major problem which is the necessity of the exciter source. In a military application the signal source prohibits the radar system to stay hidden, while in the civil case it has an obligatory frequency allocation fee. Passive radar systems are only listening, so they will not interfere with other systems, and can not be detected by ELINT. This article presents a multilateration based system, which makes possible detection and positioning of aerial vehicles by distributed receivers (WAMLAT - Wide Area Multilateration). This technique is based on time measurement, therefore it is necessary to keep the receivers in synchronous state. The article also demonstrates a developed GPS based oscillator, which can provide precise phase synchronous clock signal at every receiver station.

BEVEZETÉS

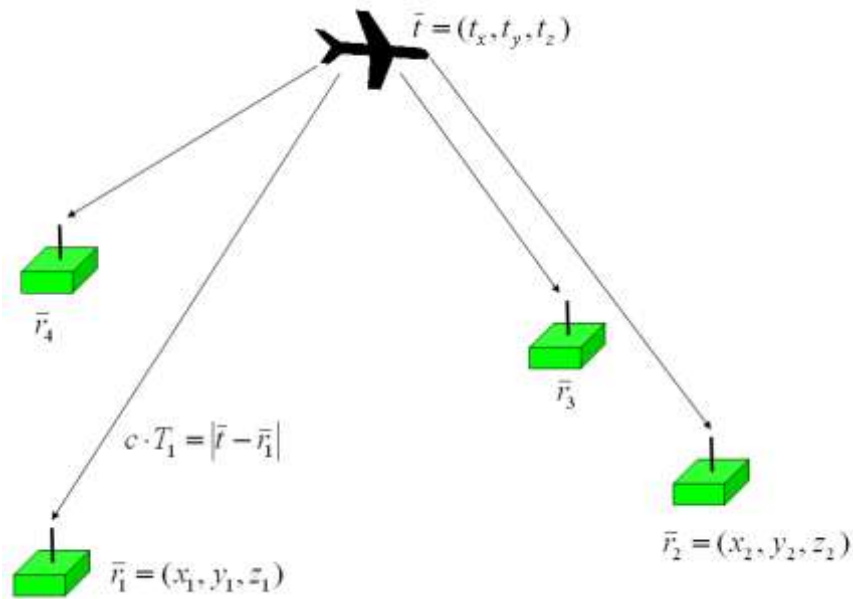
A BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék Mikrohullámú Távérzékelés laboratóriuma egy multilaterációs radarrendszer kifejlesztésére vállalkozott. A projekt újszerűsége következtében több részterületen intenzív kutatási és fejlesztési tevékenységet igényel. A multilaterációs radarrendszer egy elosztott, a rendszerre vonatkoztatott abszolút idő mérésén alapuló mérőrendszer. Az egyes, földrajzilag szétszórt mérési pontokon szükséges egy nagy pontosságú, egymáshoz szinkronizált órajel források biztosítása. A kiépítendő rendszer nagy terület lefedését célozza meg (WAMLAT), ezért nem célszerű vezetékes órajel szétosztó hálózat kiépítése. A bemutatott megoldás a GPS műholdak vétele alapján állítja elő a nagy pontosságú, szinkronizált órajelet.

¹ BME, Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék Mikrohullámú Távérzékelés Laboratóriuma; szullo@mht.bme.hu

² Lektorálta: Dr. Ludányi Lajos ny. okl. mk. alez; főiskolai tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, ludanyi.lajos@uni-nke.hu

MULTILATERÁCIÓ

A multilaterációs technika használata feltételezi a több vevőállomás általi vételt, azaz a jelforrást egyszerre legalább (egy későbbiekben meghatározott) minimális számú vevő érzékeli (multisztatikus vétel – 1. ábra), valamint ezen jelforrás és a mérőrendszer közötti függetlenséget. Ez utóbbi feltétel annak a következménye, hogy a multilateráción alapuló pozíció mérési eljárás esetén nem ismert a mérendő jelforrás jelindítási ideje. Ezen ismeretlen paraméter következtében nem használható a hagyományos radarrendszerek esetén mért TOA³ érték(ek). Az egyes állomások által vett jelek beérkezési idejének (a rendszer egészére vonatkoztatott abszolút idő alapján) precíz mérése lehetővé teszi az egyes állomások közötti TDOA⁴ értékek meghatározását, amely adathalmaz a megfelelő algoritmus segítségével átalakítható a jelforrás tényleges pozícióját jól közelítő eredménnyé.



1. ábra Multisztatikus vétel

A vett jelek beérkezési ideje a rendszer abszolút idejéhez viszonyítottan kerül meghatározásra, az egyes időkülönbségek számítása az egyik tetszőlegesen kiválasztott állomáshoz viszonyítottan történik.

$$c \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ T_{diff,1} \\ T_{diff,2} \\ \dots \\ T_{diff,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\vec{t} - \vec{r}_0| - |\vec{t} - \vec{r}_0| \\ |\vec{t} - \vec{r}_1| - |\vec{t} - \vec{r}_0| \\ |\vec{t} - \vec{r}_2| - |\vec{t} - \vec{r}_0| \\ \dots \\ |\vec{t} - \vec{r}_N| - |\vec{t} - \vec{r}_0| \end{bmatrix} \quad (1)$$

A TDOA értékek és a keresett pozíció közti kapcsolatot egy nemlineáris egyenletrendszer (1)

³ TOA - Time of Arrival - A jel indítása és vétele között eltelt idő.

⁴ TDOA - Time Difference of Arrival - Az egyes vételi helyeken mért jelekhez hozzárendelt abszolút idők különbsége

adja meg, ahol az $\mathbf{r}_n$ helyvektorok az egyes vételi állomások térbeli pozícióját, míg $\mathbf{t}$ helyvektor a jelforrás pozícióját adják meg. Geometriailag az egyenletrendszer az egyes időkülönbségek és hozzá tartozó helyvektor párok által meghatározott forgás-hiperbolidok metszéspontjára vezet.

Lineáris egyenletrendszerre vezető megoldás [1][2]

A multilaterációs elvből származó nemlineáris összefüggések ellenére, megadható egy lineáris egyenletrendszer alapú leírás (2), mely a hagyományos matematikai eszköztár segítségével megoldható. A nemlineáris összefüggések ebben az esetben az egyenletrendszer egyes paramétereiben jelennek meg.

$$0 = xA_n + yB_n + zC_n + D_n \quad (2)$$

Az (2) egyenlet N darab vevőt feltételezve N-2 fokú egyenletrendszert ad meg (3).

$$\begin{bmatrix} -D_2 \\ -D_3 \\ -D_4 \\ \dots \\ -D_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{N-1} & B_{N-1} & C_{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3)$$

A (tetszőlegesen megválasztott) $n=0$ és $n=1$ indexű vevő referenciaként szolgál az (3) egyenletrendszer paramétereinek (4), (5), (6), (7), valamint ezen paraméterek segédparamétereinek (8), (9) megadásában.

$$A_n = \frac{2x_n}{c \cdot T_{diff,n}} - \frac{2x_1}{c \cdot T_{diff,1}} \quad (4)$$

$$B_n = \frac{2y_n}{c \cdot T_{diff,n}} - \frac{2y_1}{c \cdot T_{diff,1}} \quad (5)$$

$$C_n = \frac{2z_n}{c \cdot T_{diff,n}} - \frac{2z_1}{c \cdot T_{diff,1}} \quad (6)$$

$$D_n = c \cdot T_{diff,n} - c \cdot T_{diff,1} - \frac{x_n^2 + y_n^2 + z_n^2}{c \cdot T_{diff,n}} + \frac{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}{c \cdot T_{diff,1}} \quad (7)$$

$$c \cdot T_{diff,n} = R_n - R_0 \quad (8)$$

$$R_n = |\bar{\mathbf{t}} - \bar{\mathbf{r}}_n| \quad (9)$$

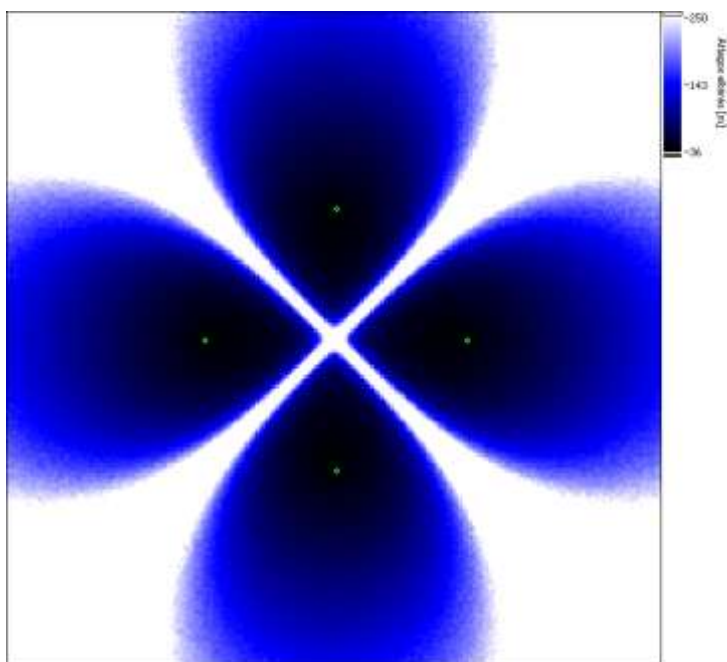
A multilateráción alapuló pozíció meghatározás a közel síkbeli vevő elrendezés következtében nem alkalmas magassági érték meghatározására. Ennek következtében a továbbiakban csak a kétdimenziós, síkbeli pozíció meghatározására korlátozódik a vizsgálat. Kétdimenziós pozíció meghatározás esetén az egyenletrendszer (3) alapján belátható, hogy legalább 4

vevő szükséges a pozíció meghatározásához. További megfigyelési pontokat felhasználva javul a multilateráció pontossága.

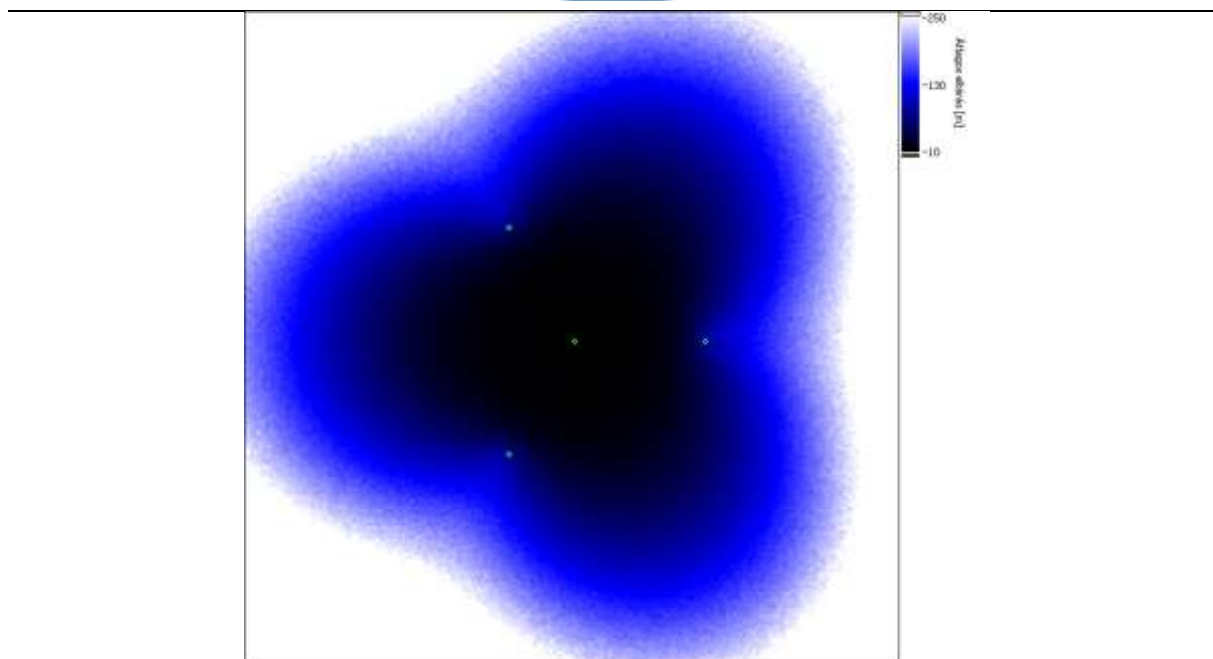
Radarrendszer geometriai elrendezésének hatása

A multilateráció vizsgálata Monte Carlo szimulációs módszerrel lett elvégezve. A szimulációkra jellemző a 100 x 100 km-es vizsgálati terület, a vevők e területen belül kerültek elhelyezésre. A céltárgy magassága minden esetben a vevők síkja felett 10 km-rel volt. A 2. ábra esetén látható egy maximálisan szimmetrikus, minimális számú, négyvevős elrendezés pozíciómérési hiba térképe. Az ábrán látható zöld pontok a vevők helyzetét jelölik. A szimuláció során az egyes vevők időmérését 30 ns szórású, egymással független fehérzaj terheli. A sötétebb színek kisebb pozíció mérési hibát, míg a világosabb színekkel jelölt területeken a pozíciómérés pontossága jelentősen rosszabb a geometriai elrendezés következtében. A hiba jellemzése a tényleges pozíciótól mért abszolút eltérés, mint valószínűségi változóra számolt szórás alapján történik. A vevők által meghatározott négyzet oldalfelező merőlegesei mentén észlelt jelentős pozíciómérési bizonytalanság az elrendezés szimmetria tulajdonságaira vezethető vissza. Geometriailag belátható, hogy az egyenes mentén elhelyezkedő céltárgy esetén az ehhez közelebbi (egyenesre szimmetrikus) vevő pár által meghatározott hiperbola, valamint a céltárgytól távolabbi vevő pár által kijelölt görbe nagy távolságon "együtt fut" ezért metszéspontjuk meghatározása rendkívül bizonytalan.

A 3. ábra esetén látható a négyvevős optimális elrendezés pozíciómérési hibatérképe, azonos időmérési bizonytalansággal, azonos területű, az elrendezés köré felvehető körrel. Az ábra alapján megállapítható, hogy gyakorlatilag a vevők által meghatározott területen belül elhelyezkedő céltárgyak pozíciójának mérése lehetséges kielégítő pontossággal.



2. ábra Minimális számú vevő szimmetrikus elrendezése esetére szimulált pozíciómérési hiba

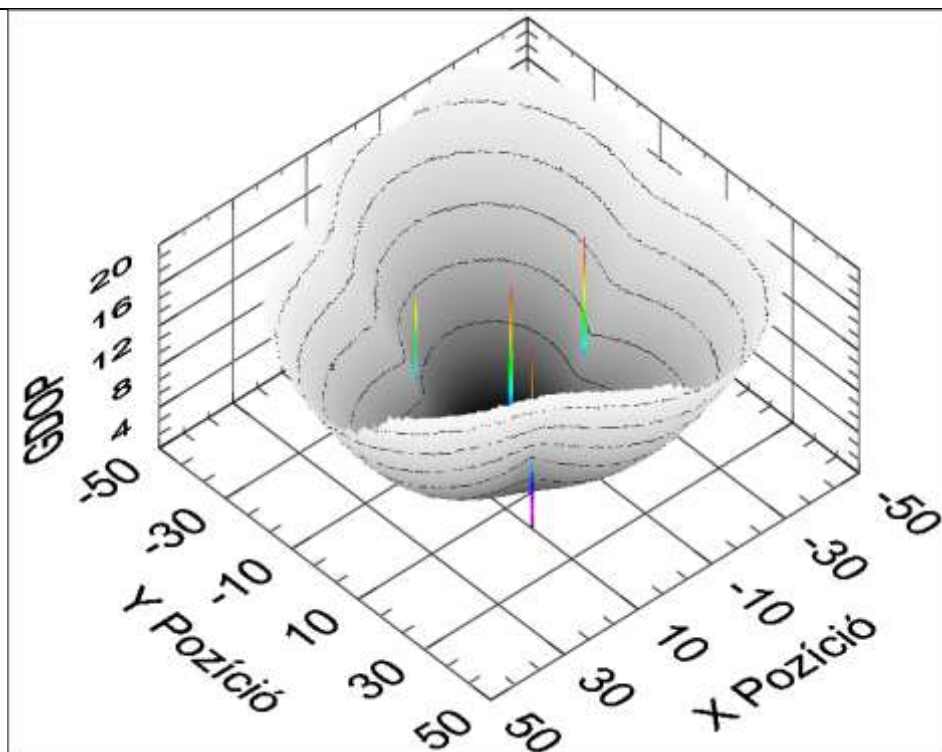


3. ábra Minimális számú vevő optimális elrendezése esetére szimulált pozíciómérési hiba

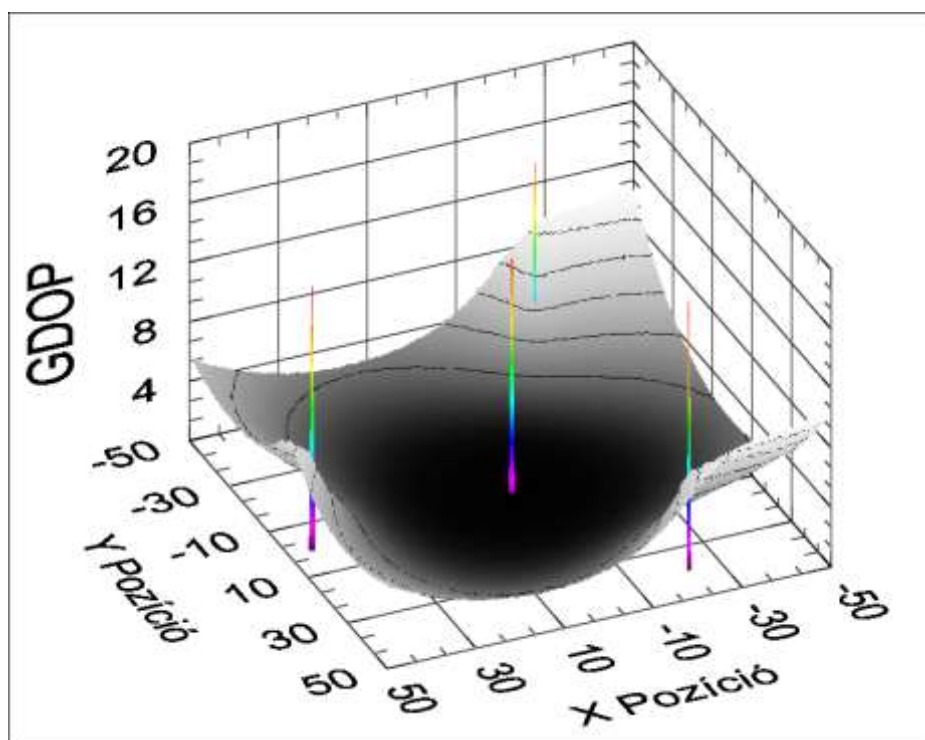
A 2. ábra és 3. ábra esetén a szimuláció egy konkrét értékű időmérési bizonytalanságot tételez fel. Egy tetszőleges geometriájú vevőelrendezés jellemzése nyilván nem függhet a vevők pozíciómérési bizonytalanságától. Erre a célra megfelel a GDOP⁵ elnevezésű, dimenzió nélküli arányszám. A GDOP értéke egy adott pontban az ennél a helyvektornál fellépő pozíciómérési bizonytalanság és az időmérési bizonytalanság pozícióra történő átváltása hányadosaként számítható. A multilateráció nemlineáris összefüggései miatt nem teljesül a GDOP érték időmérési bizonytalanság nagyságától való függése, azonban utóbbi néhány nagyságrend széles-ségű tartományában a közel lineáris hibaterjedés következtében ezen függés elhanyagolható.

A 4. ábra alapján megállapítható, hogy a vevőállomások által lefedett területtől távolodva rohamosan romlik a pozíciómérés pontossága.

⁵ GDOP – Geometric Dilution of Precision – a geometriai elrendezésből származó mérési pontosság romlás nagysága



4. ábra Minimális számú vevő optimális elrendezése esetére szimulált pozíciófüggő GDOP diagram



5. ábra 4 vevő optimális elrendezése nagyobb területen; szimulált pozíciófüggő GDOP diagram

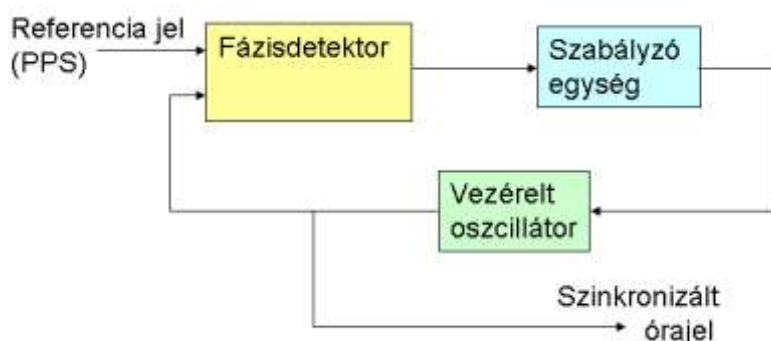
A 4. ábra és 5. ábra összevetése alapján belátható, hogy a vevők által meghatározott terület nagyságát növelve a pozíciómérési pontosság nem romlik. Ennek következtében a vételi zóna nagyságát csupán a vevőállomások hatótávolsága korlátozza.

Az előző fejezet alapján megállapítható, hogy a pozíciómérés pontosságát elsősorban az egyes állomásokon történő időmérés pontossága határozza meg. A multilaterációs rendszer működésének tehát alapvető fontosságú feltétele az egyes vételi állomások helyi óráinak együttfutása. A flexibilis és gyors telepítést, valamint a vételi helyek közötti távolságot figyelembe véve nem építhető ki vezetékes (optikai/réz) órajel elosztó hálózat (mely jelentős költségvonzattal is járna). Mikrohullámú átviteli lánc alkalmazása az engedélyeztetési vonzata és (katonai szempontból) felderíthetősége miatt kerülendő. Az atomóra alapú GPS⁶ rendszer bevonása lehetővé teszi teljesen passzív vevőállomások létrehozását.

A GPS rendszer nagy pontosságú időalapja egy GPS vevőn keresztül a PPS⁷ jelkimeneten érhető el. Ez egy nagy pontosságú, a GPS rendszer időalapjának másodpercéhez szinkronizált 1 Hz ismétlési frekvenciájú impulzus sorozat. Legnagyobb hátránya, hogy jelentős zajjal terhelt, az ideális időhöz képest jelentős szórással (jitter) bír. Ennek következtében szinkronizációs alapként történő felhasználása során megfelelő szűrési módszereket kell alkalmazni.

GPSDO

A GPS által szinkronizált oszcillátorokat angol terminológia szerint GPSDO⁸-nak nevezik. Általános felépítésükre jellemző a zárt szabályozási hurok (6. ábra).



6. ábra Szabályzási kör általános blokkvázlata

A kifejlesztett szinkronizált órajelet biztosító eszköz egy teljesen digitális megoldás. Ebben az esetben a fázisdetektor, a szabályzó, valamint a vezérelt oszcillátor is digitális módon kerül megvalósításra. A digitális oszcillátor az NCO⁹ technika segítségével – kellő bitfelbontás esetén – rendkívül nagy frekvencia és fázis felbontást képes biztosítani. Lévéen a teljes szabályzási kör numerikusan van megvalósítva, a PPS jel véletlenszerűségét leszámítva teljesen determinisztikus működést biztosít. Az elérhető stabilitásnak, és pontosságnak csak a lokális oszcillátor stabilitása szab gátat. A szinkronizált órajelet az NCO numerikus értékeiből DDS¹⁰ technika segítségével lehet előállítani (7. ábra).

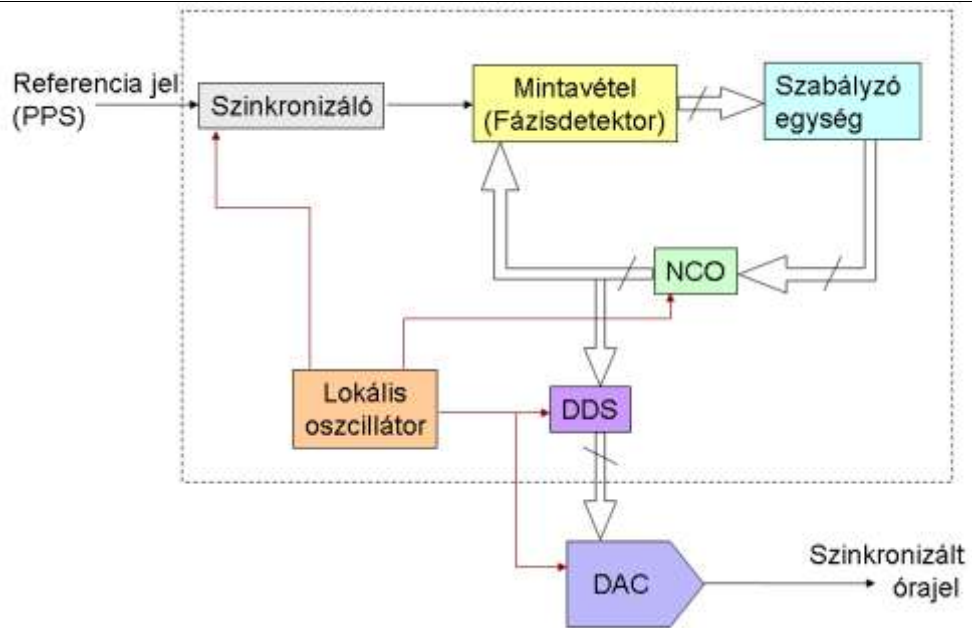
⁶ GPS – Global Positioning System – Globális Helymeghatározó Rendszer

⁷ PPS – Pulse Per Second – másodpercenkénti impulzus

⁸ GPSDO – GPS Disciplined Oscillator – GPS stabilizált oszcillátor

⁹ NCO – Numerically Controlled Oscillator – Numerikusan hangolt digitális oszcillátor

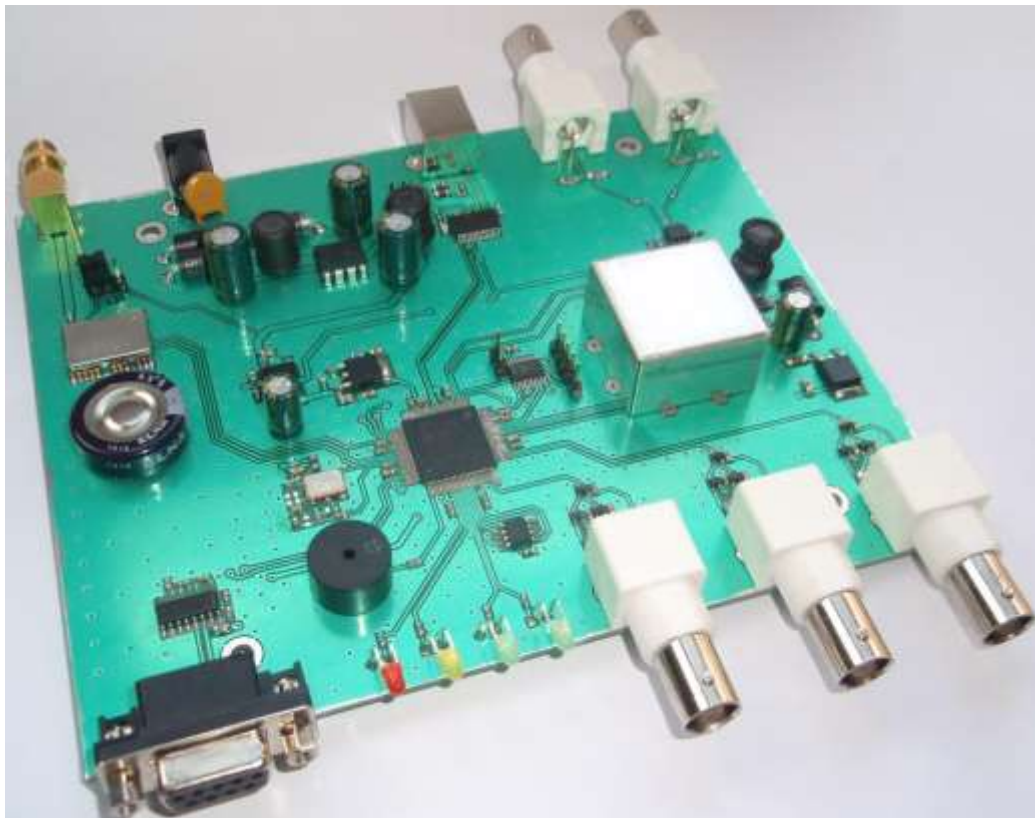
¹⁰ DDS – Direct Digital Synthesizer – Direkt digitális szintézer



7. ábra Teljesen digitális GPSDO blokkvázlata

Kísérleti eszköz

Az elérhető pontosság és stabilitás valós körülmények közti mérése érdekében egy GPSDO eszköz került kifejlesztésre (8. ábra), két példányban. A két példányra az egymással történő összehasonlítás miatt van szükség. A GPS vevő egy általános célú modul.

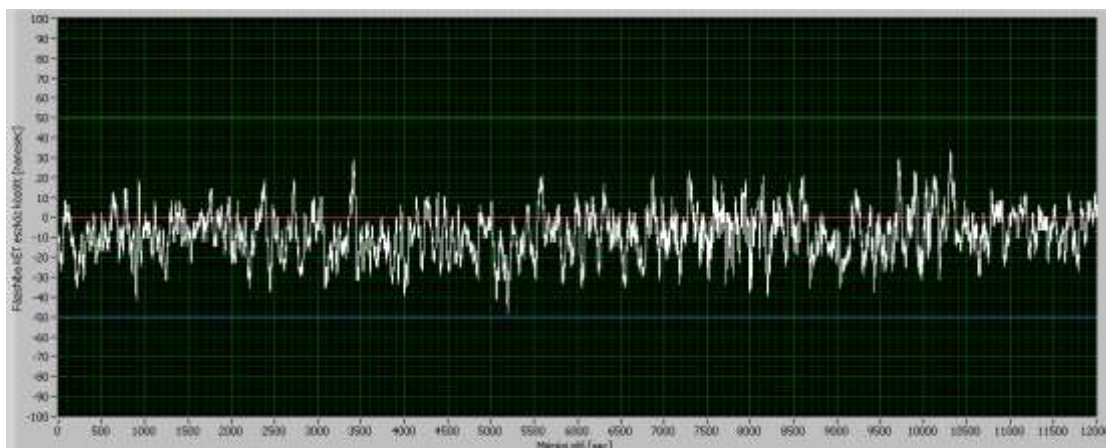


8. ábra GPSDO eszköz

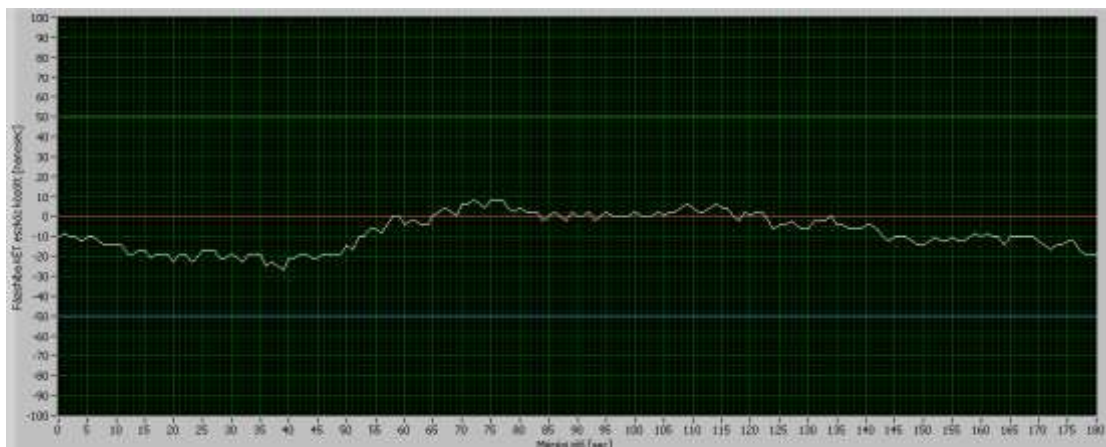
Az eszköz egy 10 MHz frekvenciájú referencia órajelet, valamint egy ezzel szinkron 1 Hz ismétlési frekvenciájú PPS jelet állít elő. Ez utóbbi a GPS PPS jelének jelentősen zavarcsúrt változatának tekinthető. Az abszolút idő meghatározását a soros portokon elérhető szabványos GPS NMEA¹¹ üzenetek, a PPS jel, valamint a 10 MHz frekvenciájú referencia órajelet együttesen teszi lehetővé.

Mérési eredmények

A minősítő mérés a két GPSDO eszköz PPS jelei közti fázishiba (időhiba) másodpercenkénti mérése alapján lett elvégezve (9. ábra , 10. ábra).



9. ábra Fázishiba (ns skálázás) másodpercenkénti mintavételezéssel, 12000 másodperc



10. ábra Fázishiba diagram egy részlete, 180 másodperc

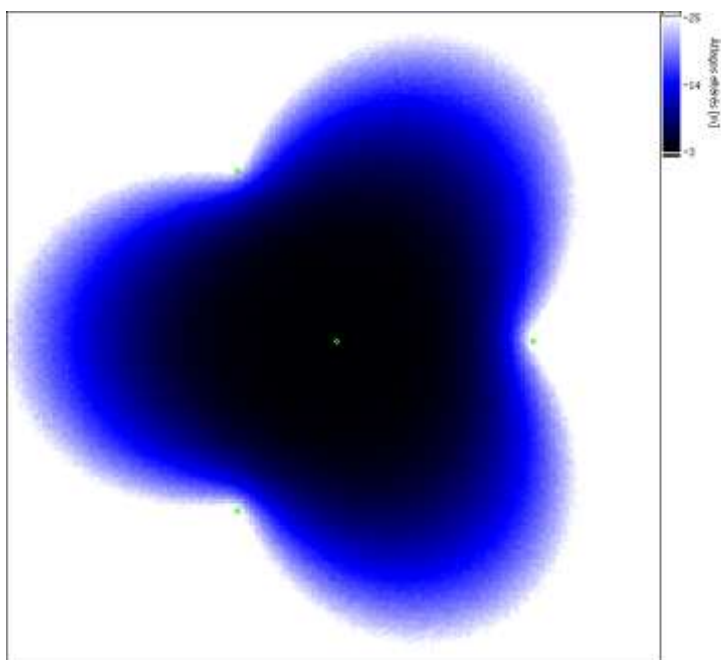
Hosszú távon a két eszköz között 14 ns szórással jellemezhető fázishiba figyelhető meg, amely szórással azonban rövidtávon jelentősen kisebb. Feltételezve a két eszköz fázishibáinak függetlenségét, egy eszközre vonatkoztatva az egyes előállított órajelek fázishibája 10 ns szórással.

Eredmény értékelése

A minősítő mérés alapján 10 ns szórással időmérési hibát feltételezve a pozíciómérés pontossága a 4 vevős, optimális elrendezés esetén a vételi állomások által meghatározott területen be-

¹¹ NMEA – National Marine Electronics Association – szabványos kommunikációs protokoll

lül 25 méter alatti szórással jellemezhető (11. ábra).



11. ábra 10 ns szórású időmérési hiba hatása a pozíciómérés pontosságára

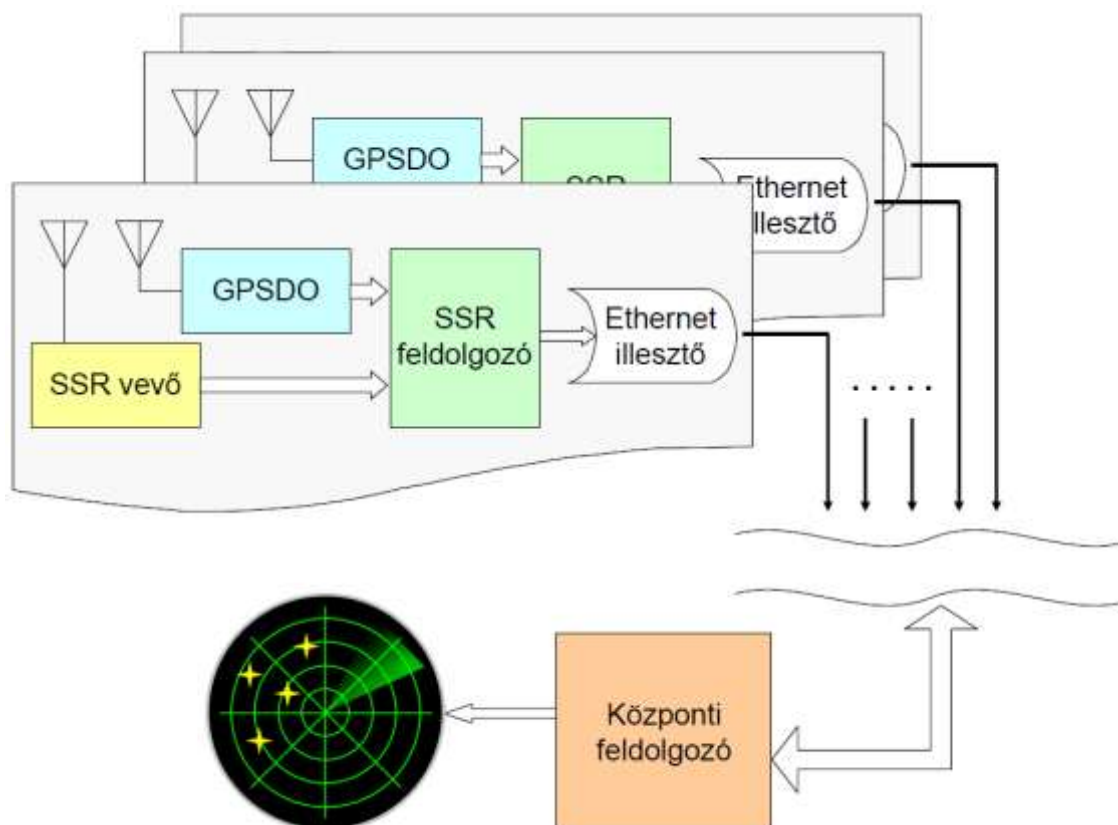
A mérési eredmények és a szimuláció alapján megállapítható, hogy több min 99%-os valószínűséggel a pozíciómérés hibája kisebb, mint 75 méter. Hasonlóképpen a 100 méternél kisebb hiba már „négykilences” konfidenciával jellemezhető. A szimuláció mindazonáltal nem számol az egyéb, járulékos időmérési pontosságot rontó tényezőkkel.

WAMLAT

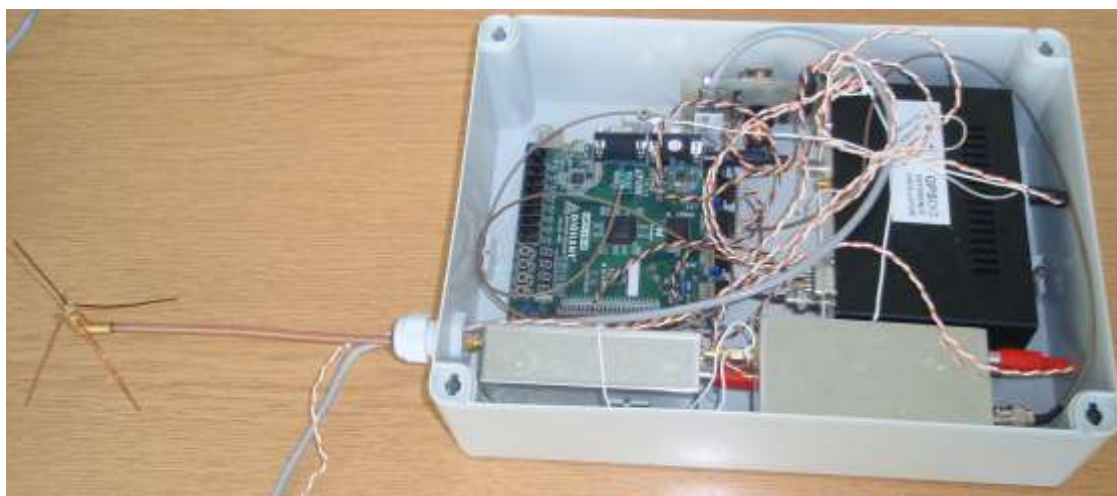
A kiépítésre kerülő WAMLAT rendszer multilaterációs technika segítségével polgári légi eszközök pozícióinak meghatározását tűzi ki célul. Az egyes járművek fedélzetén megtalálható SSR¹² transzponderek által sugárzott jelcsomagok vétele által lehetséges az egyes járművek térbeli és időbeli szeparációja. A transzponder a hagyományos, ún. Mode-A és Mode-C válaszokat alkalmazza az SSR rendszerben identifikáció és magassági adatok megadására. Külső szemlélő számára ezen két válasz megkülönböztetése nem lehetséges, csak az SSR radar kérdező jele ismeretében lehetséges elkülönítésük. A multilaterációs rendszer szempontjából ez nem okoz hátrányt, hiszen csupán az egyes vételi állomásokon szükséges az egyes válaszjelek kvázi szimultán vétele és egymástól történő elhatárolhatósága, valamint egyértelmű detekciója. Az SSR rendszer továbbfejlesztéseként jelent meg a transzponderek Mode-S üzemmódja, mely egy jóval fejlettebb struktúrájú, egyedi azonosítást lehetővé tevő adatcsomagokat használ fel a repülőgép felderítésére. A Mode-S üzemmód legnagyobb előnye multilaterációs szempontból az ún. Acquisition Squitter, mely a transzponder nagyjából másodpercenkénti automatikus jelzését jelenti. A viszonylagosan magas ismétlési gyakoriság hasznos a multilaterációs radarrendszerben történő alkalmazása során. [3]

¹² SSR – Secondary Surveillance Radar – szekunder radar

A pilot rendszer egyes vételi állomásai az SSR válaszjelek frekvenciájára hangolt antennákkal és detektorokkal érzékelik a beérkező jeleket. Digitalizálás után a lokális feldolgozó egység szeparálja és azonosítja az egyes válaszokat, ezekhez egyedi azonosítót, valamint a helyi GPSDO segítségével időbélyeget rendel. Az ily módon jelentősen redukált adatmennyiséget egy Ethernet csatló segítségével az Interneten keresztül (titkosított módon) juttatja el a központi feldolgozó egységhez. Ezen központi egység végzi el a beérkező adatok összevetése alapján a multilaterációs pozíciósámítást, mely eredményt a rendeltetési helyére juttatja (12. ábra).



12. ábra WAMLAT rendszer blokkvázlata



13. ábra A WAMLAT rendszer egy vevőállomása

A cikkben bemutatott rendszer a polgári légi irányítás számára teremt egy alternatívát, azonban a multilaterációs elv, valamint a rendszer egy nagy része alkalmas katonai célból történő felhasználásra is. Az SSR válaszjel feldolgozó egység kiváltható más, ismert tulajdonságú jelek vételére alkalmas egységgel. A vevőállomások és a központi feldolgozó között meglévő elegendően szélessávú adatátviteli út megléte esetén, szélessávú vevők által vett jelek feldolgozási fázisát a központi állomásra áthelyezve lehetővé válik előre nem ismert tulajdonságú jelek alapján történő multilateráció alapú, a jelforrásra vonatkozó pozíció mérése.

A rendszer kibővíthető félaktív üzemmódra váltással. Ebben az esetben egy, a rendszertől független megvilágító forrás használatával az egyébként rádióforgalmat mellőző céltárgy is érzékelhetővé válhat. Erre a célra már meglévő jelforrások (például TV/rádió adó) is felhasználhatóak. További lehetőség egy saját telepítésű feláldozható jelforrás használata, mely megsemmisítése esetén akár egy máshol elhelyezett hasonló eszköz veheti át szerepét.

A félaktív üzemmód esetén akár lopakodó képességű céltárgyak is detektálhatók válhatnak, hiszen ezen képességű repülőgépek visszaverési tulajdonságaira jellemző a towareflekszió, azaz az ezeket megvilágító forrás jeleit nem a forrás irányába verik vissza, hanem attól elfelé.

ÖSSZEFOGLALÁS

A kifejlesztett eszközök lehetővé teszik egy, a hagyományos radarfelderítéstől független felderítő hálózat kiépítését. A rendszer a GPS alapú szinkronizálásnak köszönhetően a kellően jó pontosság mellett gyorsan és flexibilis módon telepíthető. A konkrét rendszer ugyan csak az SSR válaszjelek vétele alapján a polgári légi járművek (valamint békeidőben katonai repülőgépek) nyomon követését teszi lehetővé, azonban a vételi állomások vevő egységeinek cseréjével lehetővé válik a rendszer kiterjesztése más emittált jelek alapján történő bemérésre.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] BUCHER, Ralph – MISRA, D.: A synthesizable low power VHDL model of the exact solution of three dimensional hyperbolic positioning system, VLSI Design 15(2), 507–520, 2002.
- [2] FANG, B.T. – Simple solutions for hyperbolic and related position fixes, IEEE Trans. Aerosp. Elect. Systems 26(5), 748–753, 1990
- [3] POTIER, Eric – TSG: Manual on Multilateration Surveillance, ICAO, Montreal, 2007.