

Multilaterációs radarrendszer fejlesztése

Szüllő Ádám*, Seller Rudolf**, Orbán József***

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Szélessávú Hírközlés és Villamosságatan Tanszék, Radarkutató Csoport
(e-mail: szullo@hvt.bme.hu).

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Szélessávú Hírközlés és Villamosságatan Tanszék, Radarkutató Csoport
(e-mail: seller@hvt.bme.hu).

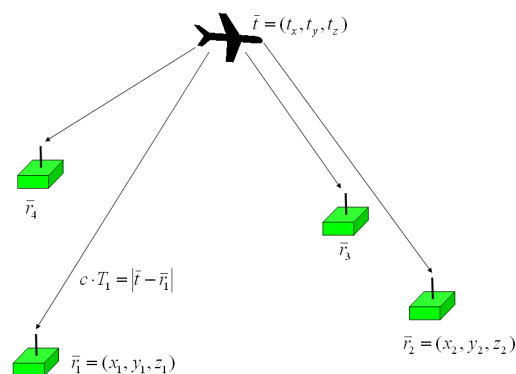
***HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt, Budapest, Magyarország
(e-mail: Jozsef.Orban@hungarocontrol.hu)

Abstrakt: A bemutatott passzív radarrendszer a multilaterációs technika segítségével képes minden olyan légi jármű valós idejű detekciójára és pozíciójának nyomon követésére, amely rendelkezik fedélzeti válaszadóval. A multilaterációs radarrendszer a szekunder radarok által használt transzponder jelek késleltetési idejéből állapítja meg a repülőgép pozícióját anélkül, hogy megzavarná annak rendeltetészerű működését. A kialakított multilaterációs radarrendszer nagy területek lefedését célozza meg (WAMLAT – Wide Area Multilateration). A multilaterációs mérési elv időmérésen alapul, az egyes vevőállomások szinkronizmusát GPS alapú, nagy pontosságú órákkal sikerül biztosítani. Az adatok feldolgozása valós időben történik, a mérési eredményeket egy weboldalon lehet nyomonkövetni.

1. 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 estén mért TOA¹ értékek). Az egyes állomások által vett jelek beérkezési idejének (a rendszer egészére vonatkoztatott abszolút idő alapján) precíz mérése lehetővé teszi az egyes állomások közötti TDOA² értékek meghatározását, amely adathalmaz a megfelelő algoritmus segítségével átalakítható a jelforrás tényleges pozícióját jól közelítő eredményre.

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



1. ábra Multisztatikus vétel

A TDOA értékek és a keresett pozíció közti kapcsolatot egy nemlineáris egyenletrendszer (1) adja meg, ahol az \mathbf{r}_n helyvektorok az egyes vételi állomások térbeli pozícióját, míg \mathbf{t} helyvektor a jelforrás pozícióját határozzák meg. Geometriailag az egyenletrendszer az egyes időkülönbségek és hozzá tartozó helyvektor párok által meghatározott forgáshiperboloidok metszéspontjára vezet.

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

Lineáris egyenletrendszerre vezető megoldás

¹ TOA - Time of Arrival - A jel indítása és vétele között eltelt idő.

² TDOA - Time Difference of Arrival - Az egyes vételi helyeken mért a jelekhez hozzárendelt abszolút idők különbsége

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.

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

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

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

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

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

$$R_n = |\vec{r} - \vec{r}_n| \quad (9)$$

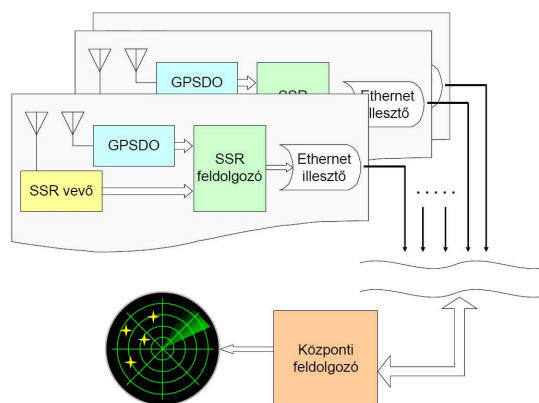
A multilateráción alapuló pozíció meghatározás a közel síkbeli vevő elrendezés következtében nem alkalmas magassági érték meghatározására. Kétdimenziós pozíció meghatározás esetén az egyenletrendszer (3) alapján belátható, hogy legalább 4 vevő szükséges a pozíció meghatározásához. További megfigyelési pontokat felhasználva javul a multilateráció pontossága.

2. WAMLAT RENDSZER

A kiépítésre került WAMLAT rendszer multilaterációs technika segítségével polgári légi eszközök pozíciójának meghatározását tűzte ki célul. Az egyes járművek fedélzetén megtalálható SSR³ válaszadók (transzponder) által sugárzott jelcsomagok vétele által lehetséges az egyes járművek térbeli és időbeli szeparációja. Ez a fajta szekunder válaszadó a hagyományos, ún. Mode-A és Mode-C üzeneteket alkalmazza az SSR rendszerben az azonosítás és a magassági adatok megadására. Külső szemlélő a két választ nem tudja

megkülönböztetni, mivel az csak a szekunder radar kérdező jelének ismeretében lehetséges. 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 adatsomagokat használ fel a repülőgép felderítésére. A Mode-S üzemmód legnagyobb előnye multilaterációs szempontból az ún. Acquisition Squitter, mely a transzponder nagyjából másodpercenkénti automatikus jelzést jelent. A viszonylagosan magas ismétlési gyakoriság hasznos a multilaterációs radarrendszerben történő alkalmazása során.

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 csatoló segítségével az Interneten keresztül (titkosított módon) juttatja el a központi feldolgozó egységhez. Ezen központi egység végzi el a beérkező adatok összevetése alapján a multilaterációs pozíciószámítást, mely eredményt a rendeltetési helyére juttatja (2. ábra).

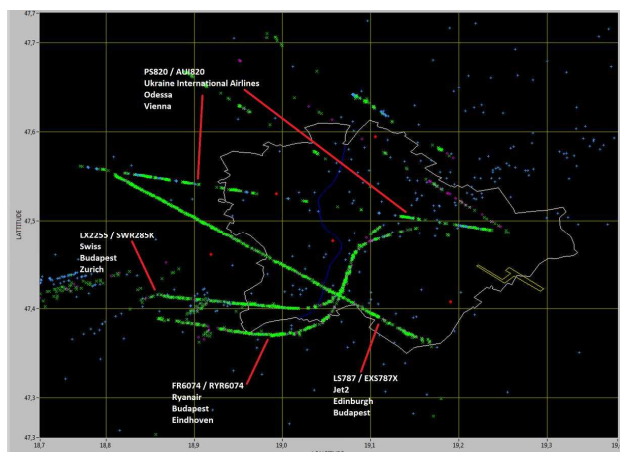


2. ábra Rendszer blokkvázlat

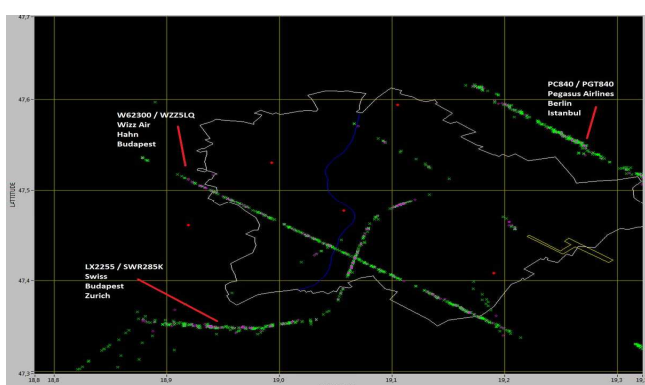
3. EREDMÉNYEK

A 3. ábrán látható két felszálló és két áthaladó repülőgép pályája. A járatok adatai a méréssel párhuzamosan a <http://www.fliht radar24.com/> weboldal segítségével kerültek megállapításra. A világoskék pontok a Mode-A és Mode-C jelek alapján becsült pozíciókat jelölik. Megfigyelhető hogy az így előállt eredmények között meglehetősen magas a fals beütések száma. A zöld pontokkal jelölt, Mode-S alapú multilateráció viszont láthatóan jó eredményt ad.

³ SSR – Secondary Surveillance Radar – szekunder radar

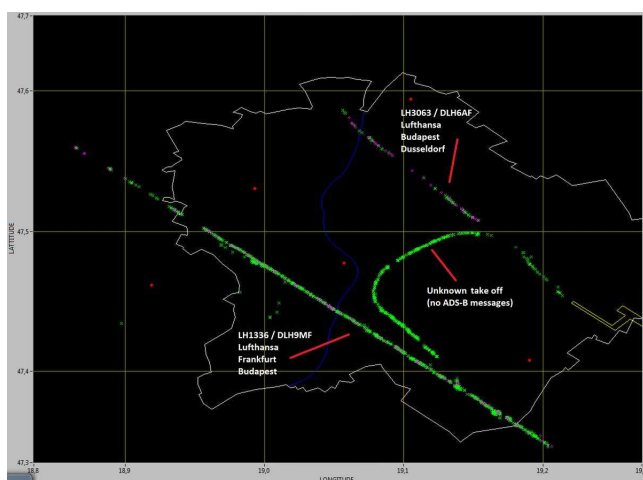


3. ábra Felszálló és átrepülő járatok



4. ábra Mode-S üzeneteken alapuló multilateráció

A 4. ábrán csak a Mode-S típusú válaszüzeneteken alapuló multilaterációs pozícióbecslés eredménye látható. A járatok adatai a már említett weboldal segítségével kerültek meghatározásra.



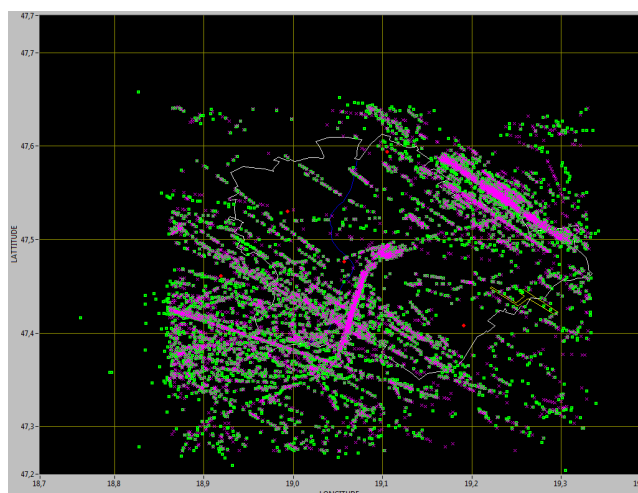
5. ábra Azonosítatlan légi jármű

Az említett <http://www.flightradar24.com/> weboldalon is lehetséges az egyes járatok nyomon követése. Az ott alkalmazott módszer az ADS-B típusú üzenetek dekódolásán

alapul. Ez az üzenet típus a Mode-S üzenetek egy változata, amely tartalmazza a repülőgépek fedélzeti GPS vevői által számolt pozíciókat is. A 5. ábrán látható egy olyan felszálló repülőgép pályája, amely az említett weboldalon egyáltalán nem látszódott, ennek oka pedig az, hogy nem sugárzott ADS-B típusú üzeneteket, míg más típusú Mode-S üzeneteket igen. Emiatt a WAMLAT rendszer sikeresen detektálta, és kirajzolta a multilateráción alapuló pozícióbecslési eredményeket.

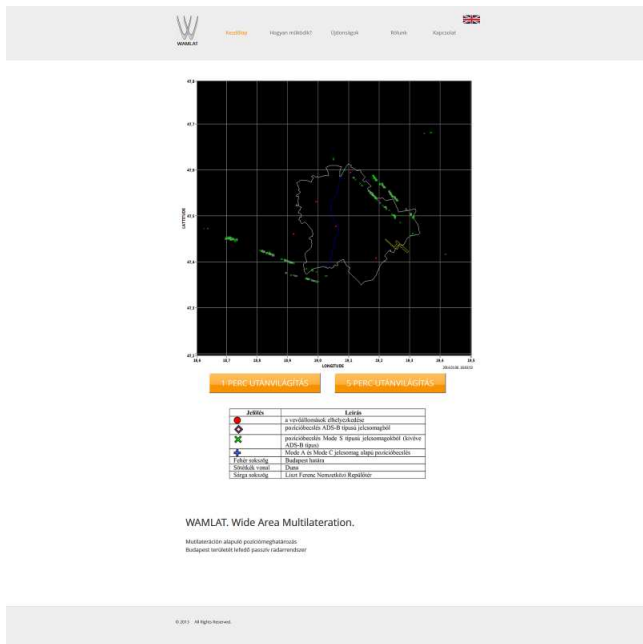
A WAMLAT rendszer pozícióbecslési pontosságának meghatározása egy hosszú távú mérés segítségével lett elvégezve, amely a 6. ábrán látható. A lila pontok az ADS-B típusú üzenetektől dekódolt koordinátákat, míg a zöld pontok az ezen üzenetektől, multilaterációval becsült pozíciókat jelentik. A pozíciómérési hiba alapja ezen mérési pont-párok közötti távolság, melyet a haversine formula segítségével kapunk meg.

A távolságkülönbségek átlaga 330 méterre, míg a medián érték 128 méterre adódott. A két hibaszámítási módszer aránya 2,6:1-hez. Kétdimenziós normális eloszlást feltételezve ez az arány 1,06:1-hez. A hibaértékek eloszlását megvizsgálva néhány outliert találtunk. Ennek valószínűsíthető oka, a fedélzeti GPS által szolgáltatott adatok késleltetéssel kerülnek leküldésre, így azok eltérnek a tényleges pozíciótól. A medián értékből kiindulva a rendszer pontossága nagyjából 150m.



6. ábra Hosszú távú mérés

A 7. ábrán látható a weblap (<http://radarlab.mht.bme.hu/~wamlat/>) kezdőoldalának képernyőmentése (2014.03.06 16:03). A design kialakítása során törekedtünk a letisztult, átlátható kialakításra. A megjelenítésnél 1 és 5 perces utánvilágítási idő választható. A radarkép alatt jelmagyarázat segíti az eligazodást. A weblap további lapjain többek között rövid leírás érhető el a rendszer működéséről.



7. ábra Weboldal

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott radarrendszer a mérési eredmények alapján kellő pontossággal képes légi járművek pozícióját meghatározására. A WAMLAT rendszer által szolgáltatott mérési adatok jó korrelációt mutatnak a független forrásból (ADS-B üzenetek) származó pozíció adatokkal. A webes

felület segítségével valós időben lehet nyomon követni a járműveket. Az alacsony költségű komponensekből felépíthető rendszer alkalmas lehet kiegészítő adatok szolgáltatására a légiforgalmi irányítás számára.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket nyilvánítják A Magyar Közlekedési Mérnökképzésért Alapítványnak a WAMLAT projekt támogatásáért.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Ralph Bucher, D. Misra (2002) *A synthesizable low power VHDL model of the exact solution of three dimensional hyperbolic positioning system*. VLSI Design 2002/15(2)
- B. T. Fang (1990) *Simple solutions for hyperbolic and related position fixes*. IEEE Trans. Aerosp. Elect. Systems 1990/26(5)
- Eric Potier, TSG (2007) *Manual on Multilateration Surveillance*, ICAO, Montreal, 2007.
- Szüllő Ádám (2012) *Passzív radarrendszer a légi felderítésben – WAMLAT*. Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2012/2
- Szüllő Ádám (2013) *Multilateráció a gyakorlatban - WAMLAT pilotrendszer*. Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2013/2