

Szüllő Ádám¹

MULTILATERÁCIÓ A GYAKORLATBAN – WAMLAT PILOTRENDSZER²

A cikkben bemutatott passzív radarrendszer a multilaterációs technika segítségével képes minden olyan légi jármű detekciójára és nyomon követésére, amely rendelkezik fedélzeti transzponderrel. A radarrendszer a szekunder radarok által használt jelekből állapítja meg a repülőgép pozícióját anélkül, hogy megzavarná annak rendeltetés-szerű működését. A kialakított multilaterációs radarrendszer nagy területek lefedését célozza meg (WAMLAT – Wide Area Multilateration), ez, tekintve, hogy a multilaterációs mérési elv időmérésen alapul, kihívásokat állít a szinkronizáció biztosítása elé. Jelen rendszerben a szinkronizmust a GPS műholdak jeleinek vételével sikerül biztosítani. A WAMLAT pilotrendszer a rádiójelek vételével állapítja meg az egyes légi járművek pozícióját, a rendszer teljesen passzív módon működik, nem bocsát ki rádiójeleket, nem zavar más rendszereket. A repülőgépek pozícióinak meghatározásához több, nagy területen elhelyezett vevőállomásra van szükség, melyekkel interneten keresztül tartja a kapcsolatot egy központi feldolgozó; ez állítja elő a mérési eredményt.

MULTILATERATION IN PRACTICE – WAMLAT DEMO

The presented passive radar system is capable of detecting and tracking every aircraft, which has on-board transponder, using multilateration technique. The radar system use the signaling of the secondary surveillance radar to determines the position of the aircraft, without disturbing its normal operation. The radar system is designed to cover large areas (WAMLAT – Wide Area Multilateration). This, considering that the multilateration principle is based on accurate time measurement, set the challenge of the synchronization. In this system, the synchronization is provided by a subsystem based on GPS receiving, with success. The WAMLAT demo system is fully passive by design, does not emit radio signals, therefore it is operating without interfere with other system. The developed radar system uses multiple receiver stations, spreaded in a wide area, the measurement results are generated by a central processing station, which maintains connection with the receiver stations over internet.

MULTILATERÁCIÓ^[4]

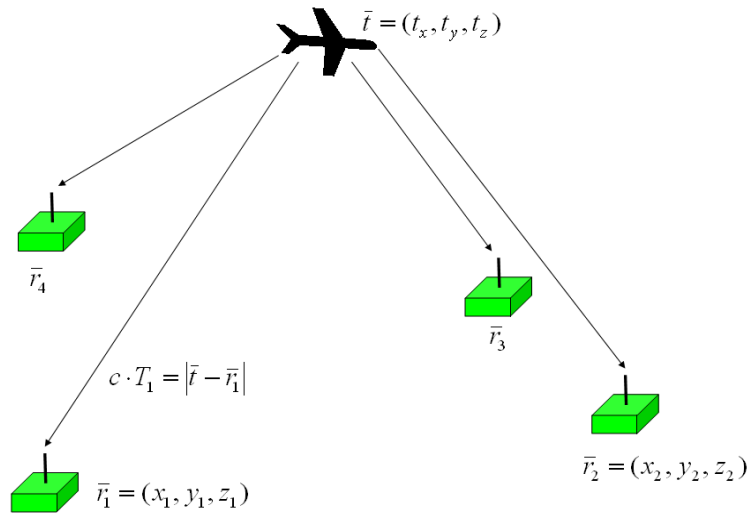
A multilaterációs technika használata feltételezi a több vevőállomás általi vételt, azaz a jelforrást egyszerre legalább (egy későbbiekben meghatározott) minimális számú vevő érzékeli (multisztatikus vétel – 1. ábra), valamint ezen jelforrás és a mérőrendszer közötti függetlenséget. Ez utóbbi feltétel 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 TOA³ érték(ek). Az egyes állomások által vett jelek beérkezési idejének (a rendszer egészére vonatkoztatott abszolút idő

¹ BME, Szelessávú 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 Tanszék, ludanyi.lajos@uni-nke.hu

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

$$c \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ T_{diff,1} \\ T_{diff,2} \\ \dots \\ T_{diff,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |\vec{t} - \vec{r}_0| - |\vec{t} - \vec{r}_1| \\ |\vec{t} - \vec{r}_1| - |\vec{t} - \vec{r}_2| \\ |\vec{t} - \vec{r}_2| - |\vec{t} - \vec{r}_3| \\ \dots \\ |\vec{t} - \vec{r}_N| - |\vec{t} - \vec{r}_0| \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

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

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

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.

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

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

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

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

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

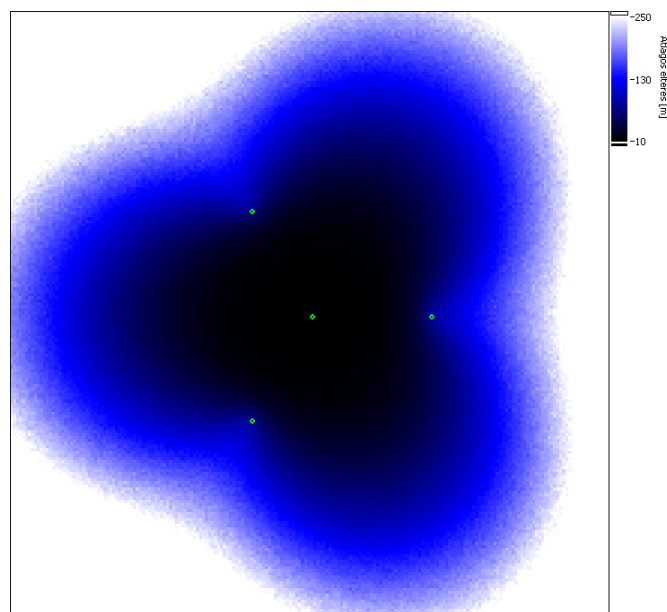
$$R_n = |\bar{t} - \bar{r}_n| \quad (9)$$

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 vizsgálódás. 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^[4]

A multilateráció vizsgálata Monte Carlo szimulációs módszerrel lett elvégezve. A szimulációra 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 a négyvevős optimális elrendezés pozíciómérési hibatérképe. 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 pozíciómérési 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 2. ábra alapján megállapítható, hogy gyakorlatilag a vevők által meghatározott területen belül elhelyezkedő céltárgyak pozíciójának

mérése lehetséges kielégítő pontossággal.



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

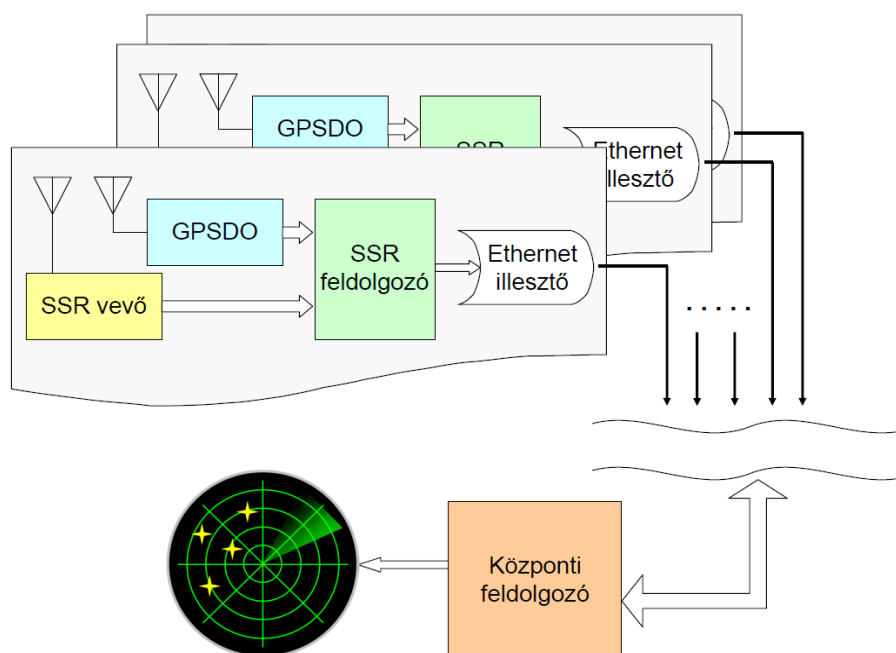
WAMLAT RENDSZER

A kiépítésre került WAMLAT rendszer multilaterációs technika segítségével polgári légi eszközök pozícióinak meghatározását tűzte ki célul. Az egyes járművek fedélzetén megtalálható SSR⁵ 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 jelent. A viszonylagosan magas ismétlési gyakoriság hasznos a multilaterációs radarrendszerben történő alkalmazása során. [3]

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

⁵ SSR – Secondary Surveillance Radar – szekunder radar

pozíciószámítást, mely eredményt a rendeltetési helyére juttatja (3. ábra).^[4]



3. ábra Rendszer blokvázlat

SSR vevő

A transzponderek által kibocsájtott jelek vétele egy speciális, erre a célra kifejlesztett mikro-hullámú eszközzel történik. Az 1090 MHz-es jelekből többfokozatú szűrés-lekeverés során a logaritmikus erősítő által előáll a jel kvázi burkolója, melyet a zajszinthez képest adaptívan komparál, így előáll egy bináris adatfolyam.

GPSDO⁶

Az előzőek alapján ismert, hogy a multilaterációs mérés feltételezi az egyes vevőállomások szinkronizációját. Az egyes állomások közötti távolság miatt egy szinkronizációs összeköttetés kiépítése gazdaságilag nem kifizetődő. A költségvonzat és pontosság alapján a leghatékonyabb megoldás a GPS rendszer által sugárzott rádiójelek vételén alapuló megoldás. Ismert, hogy a GPS atomóra pontosságot követel meg az egyes műholdak fedélzetén, ez a helymeghatározás pontosságának biztosítása végett szükséges. E tény lehetővé teszi, hogy egy GPS vevő nagy pontossággal meghatározhassa a világ-időt.

Egy GPS vevő a nagy pontosságot az úgynevezett PPS⁷ jelkimenet segítségével biztosítja; ez egy másodpercenkénti impulzus, mely átlagosan nagy pontosságú a koordinált világidőhöz (UTC) képest.

A GPSDO a PPS jel alapján előállít egy helyi órajelet, melynek frekvenciája 10 MHz nagyságú. Az egyes vevőállomásokon így előállított helyi órajelek egymással szinkronban vannak.

⁶ GPS Disciplined Oscillator

⁷ Pulse Per Second – másodpercenkénti impulzus

SSR feldolgozó és Ethernet illesztő

Az SSR vevő által szolgáltatott komparált értékeket a vevőben elhelyezett digitális rendszer dolgozza fel. A vevő komparált kimenetének nagysebességű mintavételezése által előáll egy folytonos, 1 bites soros adatfolyam. A mintavételezés 100 MHz feletti sebességgel történik (a mintavételező órajel szinkronban van a GPSDO által biztosított órajellel), ez biztosítja a 10 ns alatti időmérési felbontást. Az egyes SSR üzenettípusok a megfelelő szűrők segítségével kerülnek detektálásra az adatfolyamból. Egy-egy szűrő végzi a Mode-A és Mode-C valamint a Mode-S üzenetek detektálását.

A vett üzenetek azonosítója és a vétel ideje egy bufferbe kerülnek, innen az Ethernet illesztő segítségével jutnak el a központi feldolgozóba.

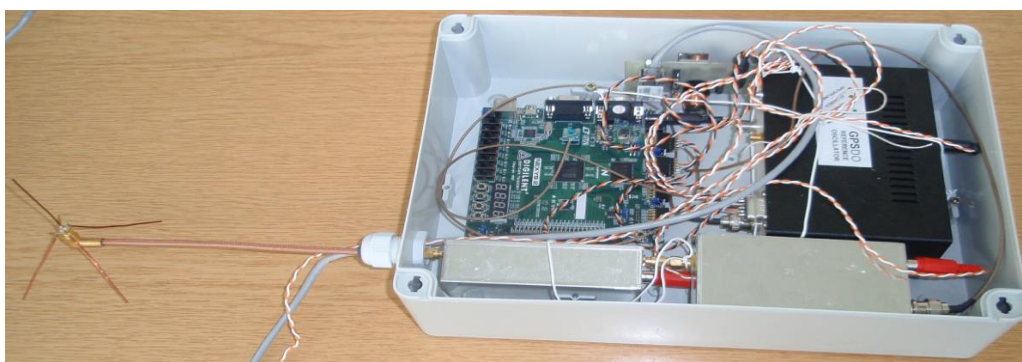
Az egyes vett üzeneteken kívül a GPS vevő által mért koordináták is elküldésre kerülnek, így a multilaterációs technikához előáll az összes szükséges adat, úgy, mint a vevőállomások pozíciója, valamint az egyes vételek időpontja is.

Központi feldolgozó

Az egyes vevőállomások által szolgáltatott adatok egy központi feldolgozóba futnak be. Ez a mérési eredményekből az ismert algoritmus alapján becsli a transzponder pozícióját.

A pontosság növelése érdekében a számításokban felhasznált állomás koordináták egy hosszú ablakozású átlagolással kerülnek meghatározásra. Ezzel nagymértékben csökkenthető a GPS vevők által mért állomáspozíciók szórása.

A multilaterációs algoritmus Descartes koordináta rendszerben megadott pozíciók esetén működik, ezért a vevők pozíciójának szélességi-hosszúsági koordinátás leírása földközpontú Descartes koordináta rendszerbe kerül átírásra. A számítással kapott eredmény az inverz transzformáció segítségével szélességi-hosszúsági leírással kapható meg. Az így kapott mérési koordináták grafikusán megjeleníthetők.



4. ábra Vevőállomás

MÉRÉSI EREDMÉNYEK

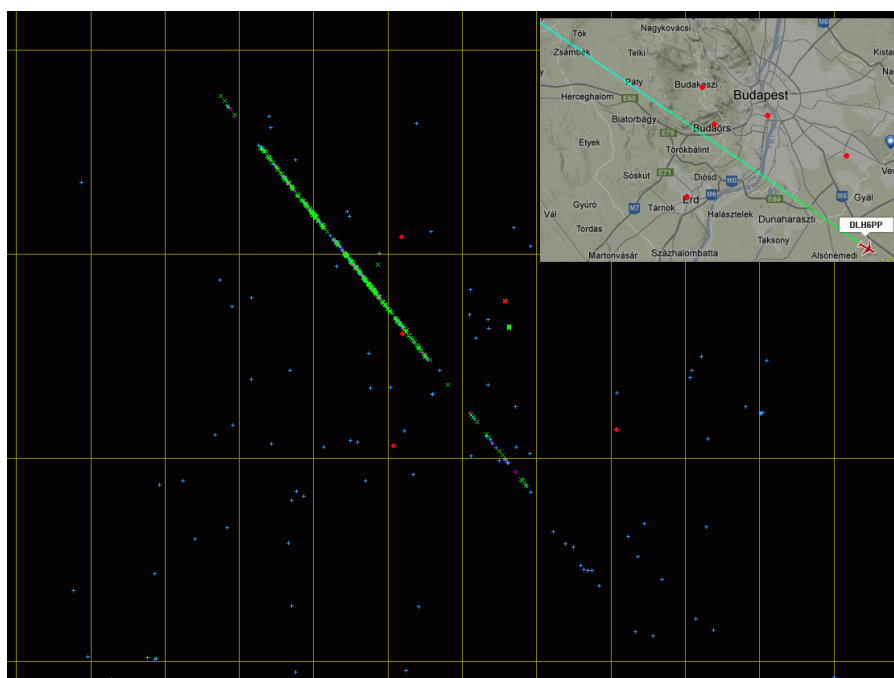
A próbamérések elvégzéséhez 5 vevőállomás került telepítésre. A helyszínek kiválasztása erősen korlátozott volt, ismerősi, munkatársi kapcsolatok alapján végül is Budapest körzetében sikerült elhelyeznünk a vevőket. Az öt állomás Érd, Budaörs, Budakeszi, Budapest 18. kerület, és a BME V2 épületénél kerültek elhelyezésre. Az így kialakult elrendezés geometriailag közel sem az ideális, de lehetővé tette a próbamérések elvégzését.

A mérések során a méréssel párhuzamosan a <http://www.flightradar24.com/>-on is követve voltak a repülőgépek. Ezzel bizonyítható a WAMLAT pilottrendszer működése.

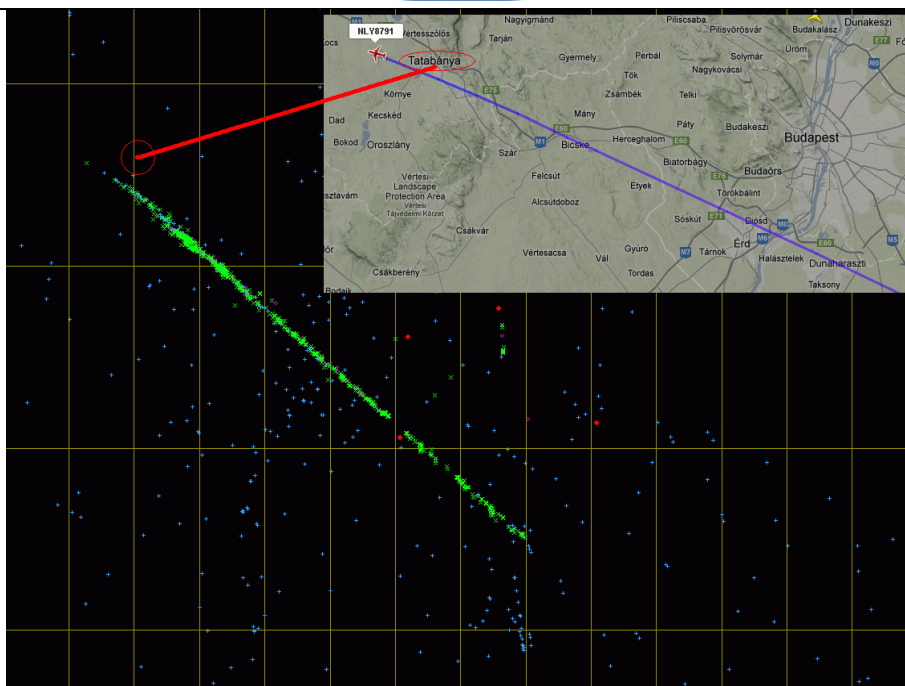
A mérési eredmények néhány ábrán kerülnek bemutatásra, a kombinált, két térképet tartalmazó képeken, a színes térkép a flightradar24.com által párhuzamosan mutatott eredmény. A WAMLAT rendszer által mért koordináták a fekete háttérű térképen kerültek megjelenítésre. A piros pöttyök a vevőállomások tényleges pozíciói (a színes térképen csak közelítőleg). A kék színű jelölések a Mode-A és Mode-C jelek vételéből kerültek meghatározásra. Ezen üzenetek rövid volta miatt, elég sok fals beütés keletkezett egy-egy mérés során. A későbbiekben egy temporális szűrő segítségével kívánunk javítani e problémán. A lila és zöld jelölések a Mode-S jelek vételéből kerültek meghatározásra. Ezek közül a lila jelölésűek az ADS-B squitter típusúak, a zöld jelölésűek az összes többi Mode-S válasz.

A mérési eredmények bemutatásához kiválasztott módszer az átvonulás vagy átvonulások pályáját mutatja be oly módon, hogy néhány perc pozíciómérési eredményeit egy képen jeleníti meg.

A mérési eredményekből levonható, hogy a Mode-S vételből származó pozícióbecslés ad jó megoldást. A Mode-A és Mode-C vétel jelenleg a nagy fals beütésszám miatt nem alkalmazható.



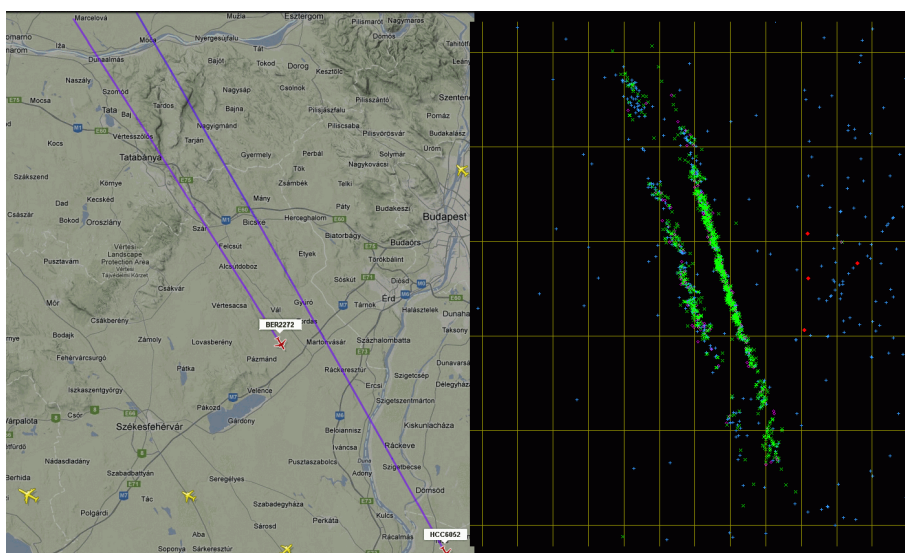
5. ábra Egy átvonulás mérési eredménye. A piros pöttyök a térképen a vevőállomások nem pontos (!) helyei



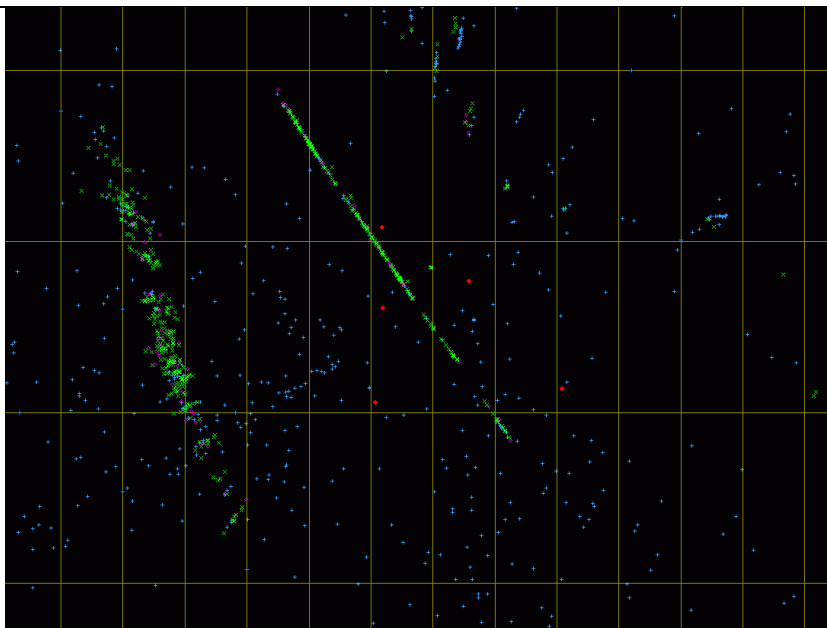
6. ábra Tatabányáig követve

Az egyes állomások közötti távolság az SSR vevők hatótávolságánál (>100 km) jóval kisebb. Ez csökkenti az elméletileg elérhető detektálási zóna méretét. Habár ezen kívül is lehetséges a pozíciómérés, az csak redukált pontossággal végezhető el.

A próbamérések során alkalmazott telepítés az egyes állomások környezeti viszonyai miatt (lakótelepi erkély, családi ház padlás) csupán bizonyos területek lefedését tette lehetővé. Ez Budapesttől déli és keleti irányokba eső területekre korlátozta a megfigyelést. A 6. ábrán láthatóan sikerült egy átrepülő gépet Tatabányáig követni.

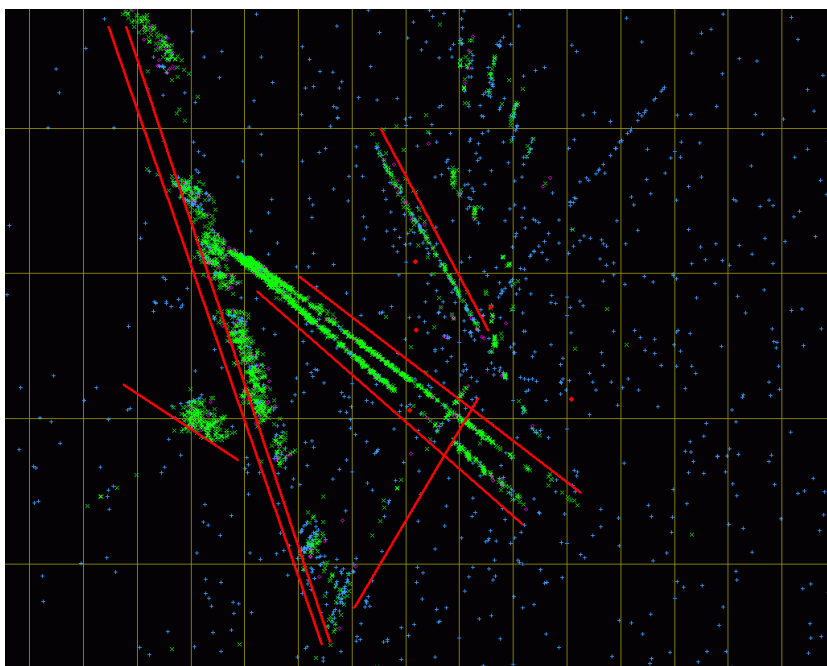


7. ábra Párhuzamos pályák



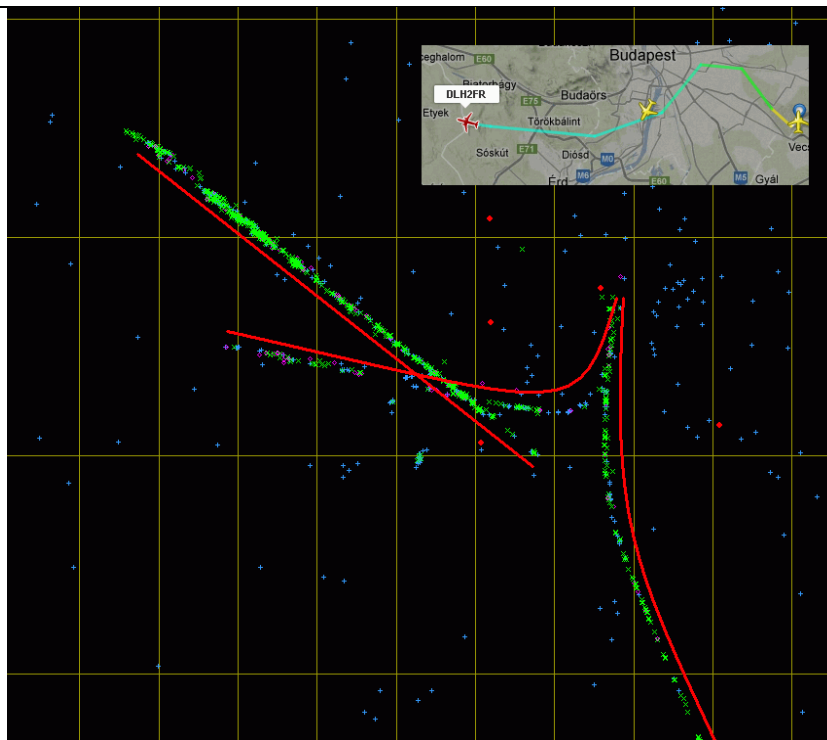
8. ábra Geometria függő mérési szórás

A 8. ábrán látható két közel párhuzamos átvonulás (nem egy időben, hanem egymás után történt). Az ábra közepén látható pálya a vevők által meghatározott zónán belül halad át, a másik attól jóval távolabb. Megfigyelhető, hogy az utóbbi esetén jelentősen megnőtt a pozíciómérés szórása. Ez a szimulációkban kapott eredménnyel összhangban van.



9. ábra Forgalmos negyedóra

A 9. ábrán látható átvonulások egy forgalmos negyedórán kerültek rögzítésre. Az egyes pályák elkülönítését az ismertett weboldal alapján az utólag berajzolt piros vonalak segítik elő. (A piros vonalak kézzel lettek berajzolva, csupán szemléltetési cézzal.)



10. ábra Felszálló és áthaladó gépek pályája

A 10. ábrán látható egy korábbi átrepülés, valamint két, a Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtérrel felszálló, a belváros felett áthaladó gépek pályája.

ÖSSZEFOGLALÁS

A mérési eredmények alapján belátható, hogy a korlátozott telepítési lehetőségek ellenére a WAMLAT pilotrendszer az elvárásoknak megfelelően képes a Mode-S üzemre képes transzponderrel ellátott légi járművek detekciójára, és pozíciójának valós idejű meghatározására. A közeljövőben további képességbővítés várható a Mode-A és Mode-C típusú üzenetek szűrésével, mely várhatóan jelentősen csökkenti a fals beütések számát, így akár ezek is felhasználhatóak lesznek a pozíciók meghatározására.

Már elkészült egy megnövelt pontosságú GPSDO prototípusa, mellyel a WAMLAT rendszer pontossága növelhető.

Igény esetén, alacsony költségvetéssel az ország területét redundánsan lefedő radarrendszer kiépítésére van lehetőség, mellyel növelhető a légi közlekedés biztonsága.

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.
- [4] SZÜLLŐ Ádám: Passzív radarrendszer a légi felderítésben – WAMLAT. Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2012/2, 706-717. o.