

Szüllő Ádám¹ – Seller Rudolf²

VALÓS IDEJŰ MULTILATERÁCIÓ – WAMLAT PILOTRENDSZER³

A cikkben bemutatott passzív radarrendszer a multilaterációs technika segítségével képes minden olyan légi jármű valós idejű detekciójára és pozíciójának nyomon követésére, amely rendelkezik fedélzeti transzponderrel. A radarrendszer a szekunder radarok által használt transzponder jelek késleltetési idejéből állapítja meg a repülőgép pozícióját anélkül, hogy megzavarná annak rendeltetésszerű 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. A valós idejű feldolgozás segítségével előben lehet követni a repülőgépeket a kialakított weboldalunkon. A feldolgozó rendszer a jövőbeli bővíthetőséget figyelembe véve készült el, tervezésénél fontos szempont volt a nagyfokú rugalmasság és skálázhatóság.

REAL-TIME MULTILATERATION - WAMLAT DEMO

The presented passive radar system is capable of detecting and tracking each aircraft in real time, 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). The multilateration principle is based on accurate time measurement, the synchronization is provided by a subsystem based on GPS receiving, with success. Real-time processing allows live data to be shown on webpage. The main design considerations were flexibility and scalability.

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 TOA⁴ 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 TDOA⁵ értékek meghatározását, amely adathalmaz a megfelelő algoritmus segítségével átalakítható a jelforrás tényleges pozícióját jól közelítő eredménnyé.

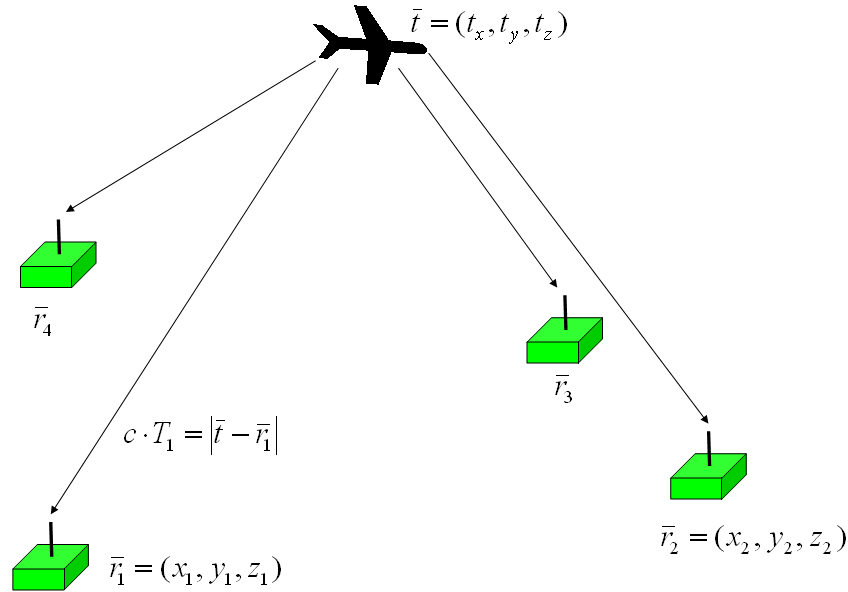
¹ BME, Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék Mikrohullámú Távérzékelés Laboratóriuma; szullo@mht.bme.hu

² BME, Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék Mikrohullámú Távérzékelés Laboratóriuma; seller@mht.bme.hu

³ Lektorálta: Prof. Dr. Makkay Imre ny. ezredes, egyetemi tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Tanszék, drmi48@gmail.com

⁴ TOA - Time of Arrival - A jel indítása és vétele között eltelt idő.

⁵ TDOA - Time Difference of Arrival - Az egyes vételi helyeken mért a jelekhez hozzárendelt abszolút idők különbsége



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.

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

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-hiperboloidok 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.

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

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

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

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

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

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

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.

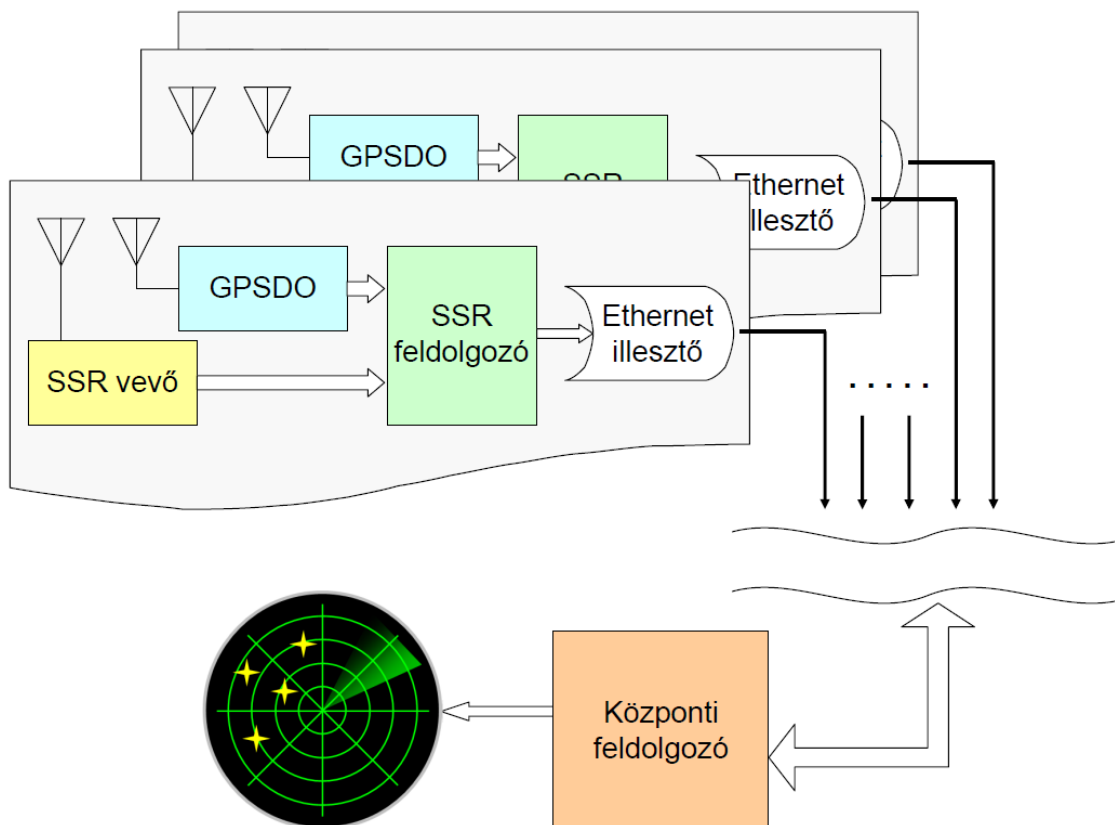
WAMLAT RENDSZER [5]

A kiépítésre került WAMLAT rendszer multilaterációs technika segítségével polgári légi eszközök pozícióinak meghatározását tűzte ki célul. Az egyes járművek fedélzetén megtalálható SSR⁶ 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

⁶ SSR – Secondary Surveillance Radar – szekunder radar

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 jelzését jelenti. 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 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 (3. ábra). [4]



3. ábra Rendszer blokkvázlat

SSR vevő

A transzponderek által kibocsátott jelek vétele egy speciális, erre a célra kifejlesztett mikrohullámú 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.

GPSDO⁷

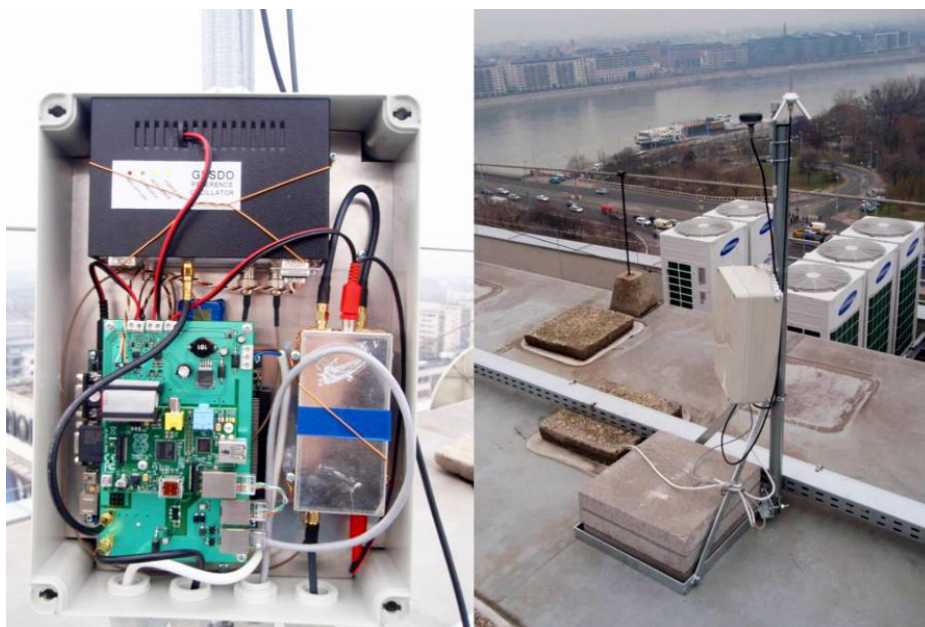
Az előzőek alapján ismert, hogy a multilaterációs mérés feltételezi az egyes vevőállomások szinkronizációját. Az egyes állomások közötti távolság miatt egy szinkronizációs összeköttetés kiépítése gazdaságilag nem kifizetődő. A költségvonzat és pontosság alapján a leghatékonyabb megoldás a GPS rendszer 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 PPS⁸ jelkimenet segítségével biztosítja; ez egy másodpercenkénti impulzus, mely átlagosan nagy pontosságú a koordinált világidőhöz (UTC) képest.

SSR feldolgozó

Az SSR vevő által szolgáltatott komparált értékeket a vevőben elhelyezett digitális rendszer dolgozza fel. A vevő komparált kimenetének nagysebességű mintavételezése által előáll egy folytonos, bináris 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. Az üzeneteket egyik esetben sem dekódoljuk.

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



4. ábra Vevőállomás (BME E épület)

⁷ GPS Disciplined Oscillator

⁸ Pulse Per Second – másodpercenkénti impulzus



ETHERNET ILLESZTŐ

A rendszer rugalmasságának növelése érdekében az egyes állomások Ethernet illesztői jelentős változáson estek át. A korábbi gyakorlattal ellentétben nem a központi feldolgozó csatlakozik az egyes vevőkhöz, hanem azok csatlakoznak a központi feldolgozóhoz. Az új megoldásnak köszönhetően nem kell tudni az egyes állomások IP címeit, mely a korábbi megoldás esetén problémákat okozott, tekintve, hogy a legtöbb internet szolgáltatás dinamikus IP cím kiosztást alkalmaz, így az IP címek időről időre megváltoznak. A korábbi megoldás másik hátránya is megszűnt, azaz, mivel általában egy lokális hálózaton keresztül valósul meg a kapcsolat, a feldolgozóból kiinduló kapcsolódási kísérletek engedélyezéséhez úgynevezett port-nyitást kellett létrehozni a lokális hálózat határrétegén (általában ez egy router).

Az új megoldás segítségével szinte konfiguráció mentesen a hálózatra lehet kötni a vevőállomásokat. Elmondható, hogy ahol van megfelelő sebességű internet kapcsolat, ott az eszköz gyorsan telepíthető, gyakorlatilag elegendő az UTP kábelt a routerhez/switchhez csatlakoztatni, és bekapcsolni az állomást.

Az Ethernetes illesztést jelenleg egy bankkártya méretű mikroszámítógép valósítja meg. Ezen eszköz végzi el a lokális hálózathoz való csatlakozáshoz szükséges protokollok végrehajtását, valamint a központi feldolgozóhoz való csatlakozást. Amennyiben nincs kiépült kapcsolat, az állomás periodikusan próbálkozik csatlakozni a központhoz. Amikor létrejött a kétirányú kapcsolat, nem csak a mérési adatok feltöltésére van lehetőség, hanem a központból történő vezérlésre, paraméterállításra vagy akár szoftverfrissítésre is. A mikroszámítógépen nagy megbízhatóságú operációs rendszer fut, ezen felül több védelmi elem is beépítésre került a megbízhatóság növelésére. A mikroszámítógép ezen felül felügyeli és monitorozza a vevőállomás többi részegységét, méri a tápellátás állapotát, valamint a hőmérsékletet is.

KÖZPONTI FELDOLGOZÓ ÉS WEBSZERVER

Ahogy már említve volt, a fő tervezési szempontok a nagyfokú rugalmasság és a jövőbeli bővíthetőséget figyelembe vevő skálázhatóság. Emiatt a feldolgozó szoftver több - részfeladatok szerint szétosztva - program modulból áll.

Szoftver komponensek:

- vevőmodulok;
- előfeldolgozó modul;
- fő feldolgozó modul;
- felügyeleti modul;
- megjelenítő modul;
- webszerver.

Vevőmodul

Ezen szoftverkomponens végzi el egy állomás bejövő kapcsolódási kérelmének feldolgozását, valamint a kapcsolat felépülése után az adatok vételét és részleges dekódolását. A kinyert ada-



tokat az előfeldolgozó modulnak küldi el. Több vevőállomás lekezelése érdekében a vevőállomások számával megegyező számban párhuzamosan fut több ilyen modul. Program szinten ezek megegyeznek, csupán paraméterezésükben térnek el egymástól. Emiatt a rendszer további vevőállomások általi bővítése könnyen kivitelezhető.

Előfeldolgozó modul

A vevőállomások által küldött adatokat összegyűjti a vevőmodulokból, és továbbítja – immár összefogva – a fő feldolgozó modul felé.

Fő feldolgozó modul

A vevőállomások által vett adatokban intenzív kereséssel megkeresi a feltételezhetően egy jelcsoomaghoz tartozó mérési értékeket, majd a vevőállomások által küldött korrekciós tényezővel javítja az időmérés pontosságát. Az egyes - feltételezett - jelcsoomagokra elvégzi a multilaterációs algoritmust, mely többszálú végrehajtás segítségével optimálisan használja ki a rendelkezésre álló erőforrásokat. A kapott eredmények alapján a hibás eredményeket kiszűri, az elfogadhatónak vélt eredményeket továbbítja a megjelenítő modul felé.

Kutatási célokból az ADS-B üzenetekből kinyerhető GPS koordináták és az ezen üzenetekre elvégzett multilaterációs pozícióbecslés eredményét külön fájlba kiírja a fő feldolgozó modul. Ezzel számszerűsíteni lehet a multilateráción alapuló módszer pontosságát.

Felügyeleti modul

Folyamatosan monitorozza az egyes szoftverkomponensek állapotát.

Megjelenítő modul

Ezen modul végzi el a fő feldolgozó modul által szolgáltatott pozícióbecslési eredmények megjelenítését. Jelenlegi állapotban a mérési pontokon felül a vevőállomások helyei, valamint néhány objektum, úgy mint Budapest határvonala, a Duna Budapesten belüli szakasza valamint a Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér futó- és guruló pályáinak körvonala kerül megjelenítésre. Utóbbiak vektorgrafikus módon vannak tárolva és kirajzolva. A térkép skálázása a vevőállomások pozíciói alapján történik, az alkalmazott vetület távolságtartó. Az alkalmazott skálázási módszer miatt egy jövőbeli rendszerbővítésre a megjelenítő automatikusan fog alkalmazkodni.

A kirajzolt eredményeket másodpercenként képfájlba kiírja, így az felhasználható webes megjelenítéshez is. A megjelenítő több utánvilágítási idejű eredményt generál, amelyek közül a weboldalon lehet választani.

Webszerver

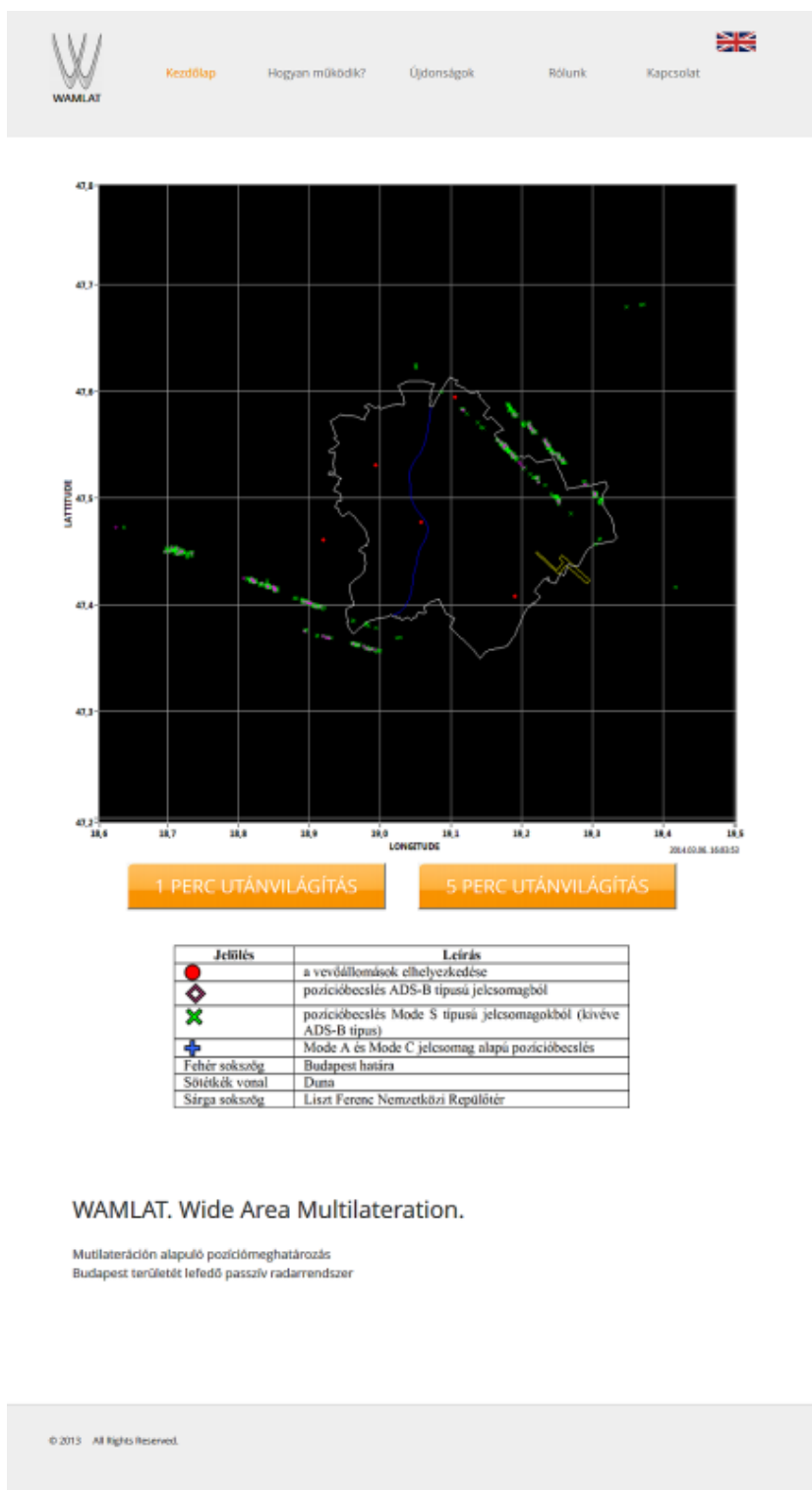
A radarrendszer által előállított mérési eredmények valós-idejű elérését a webszerver teszi lehetővé. A legegyszerűbb esettől eltérően az alkalmazott megoldás több fizikai számítógépet használ a felhasználók felől érkező terhelés megosztására. Külön számítógép felel a változó tartalom - jelenleg a különféle utánvilágítási idejű radarképek - szolgáltatásáért, míg egy másik szolgáltatja a többi webes tartalmat (statikus képek, html fájlok).

A szerver struktúra is a nagyfokú rugalmasságot figyelembe véve került kialakításra, igény esetén könnyen skálázható, melyre a várható látogatószám növekedése esetén lehet szükség.



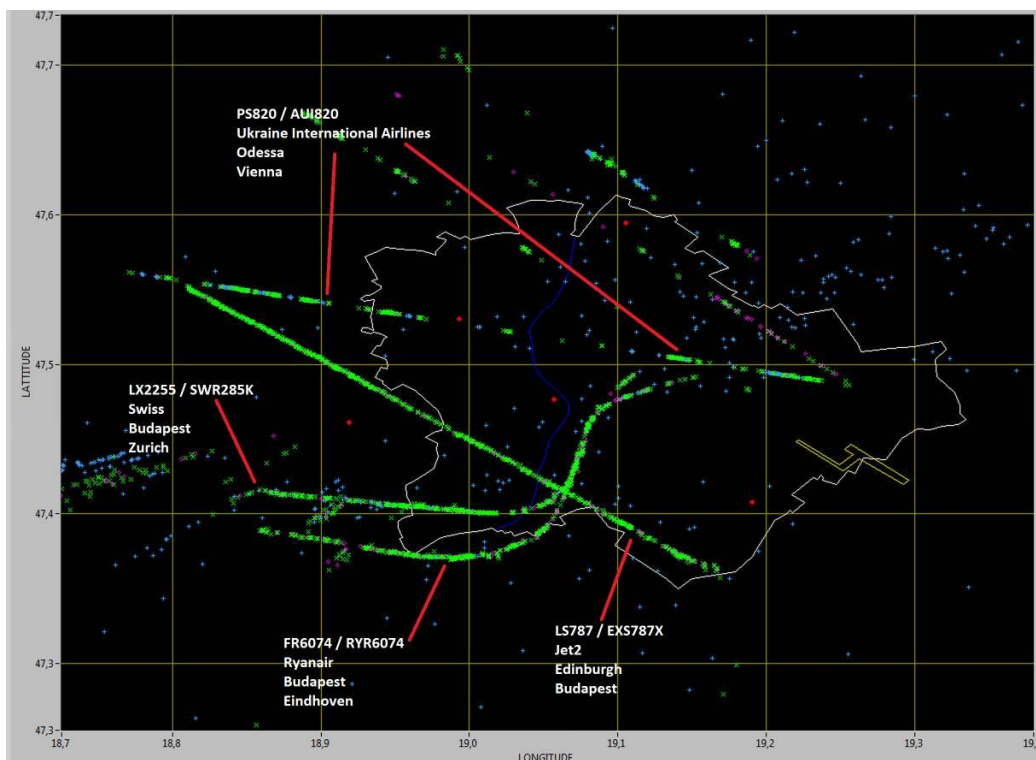
EREDMÉNYEK

Az 5. 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 weboldal további lapjain többek között rövid leírás érhető el a rendszer működéséről.

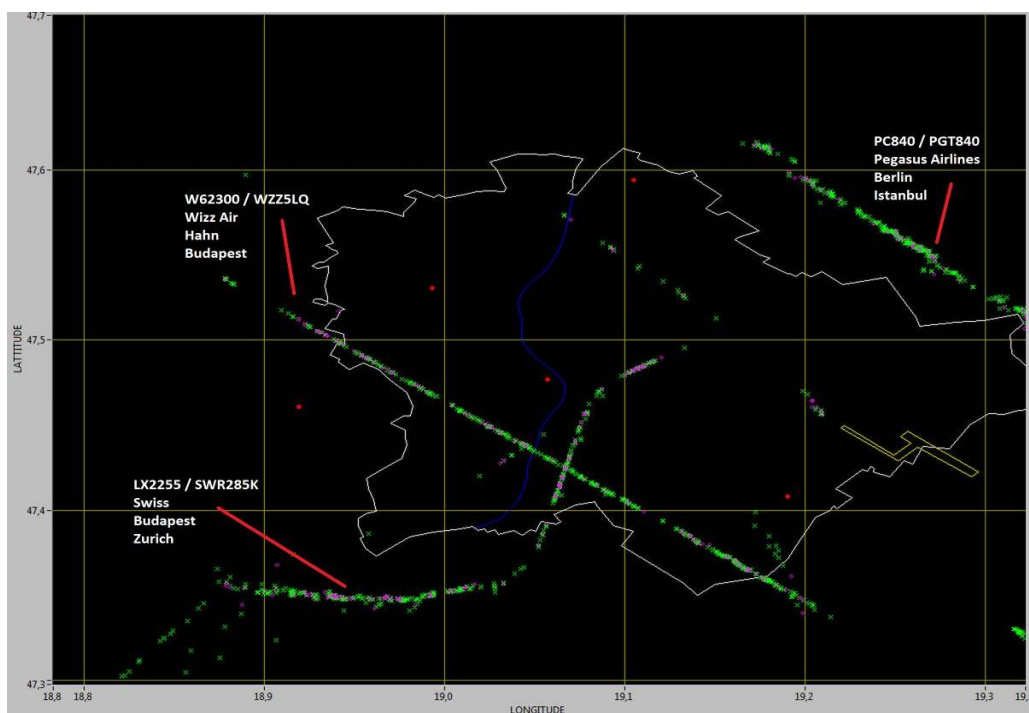


5. ábra Weblap kezdőoldala

A 6. ábrán látható két felszálló és két áthaladó repülőgép pályája. A járatok adatai a méréssel párhuzamosan a <http://www.flightradar24.com/> weboldal segítségével kerültek megállapításra. A világoskék pontok a Mode-A és Mode-C jelek alapján becslést jelölnek. 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.

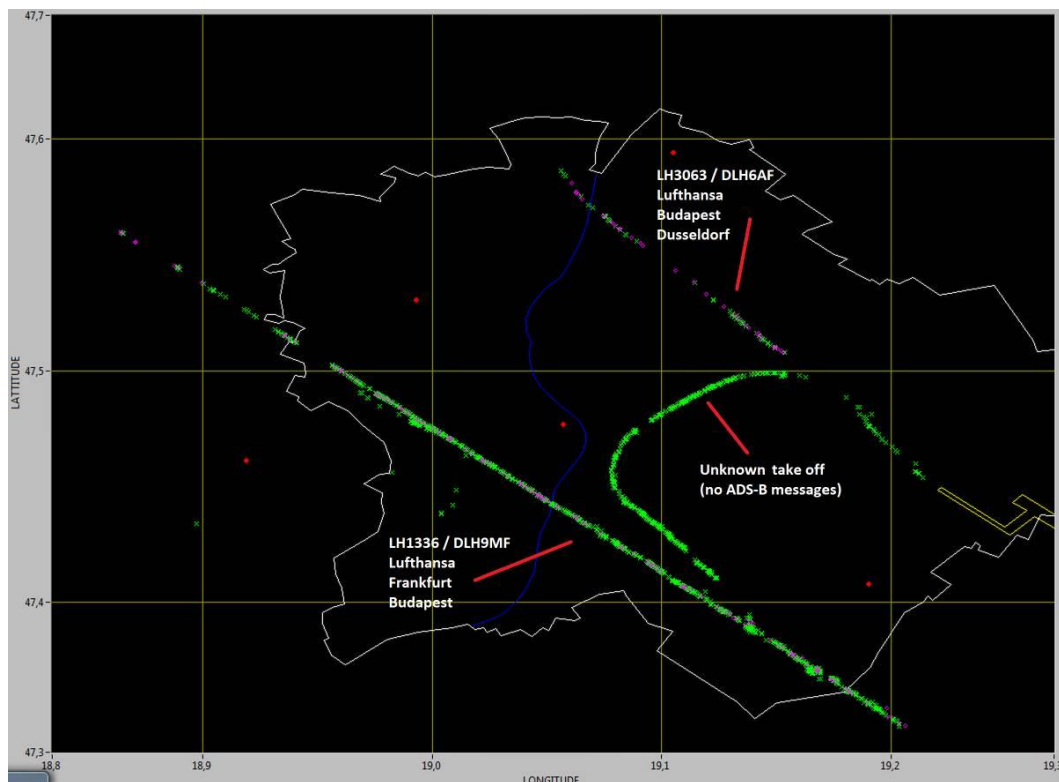


6. ábra Felszálló és átreplő járatok



7. ábra Mode-S üzeneteken alapuló multilateráció

A 7. ábrán csak a Mode-S típusú válaszüzeneteken alapuló multilaterációs pozícióbecslés eredménye látható. A járatok adatai a már említett weboldal segítségével kerültek meghatározásra.

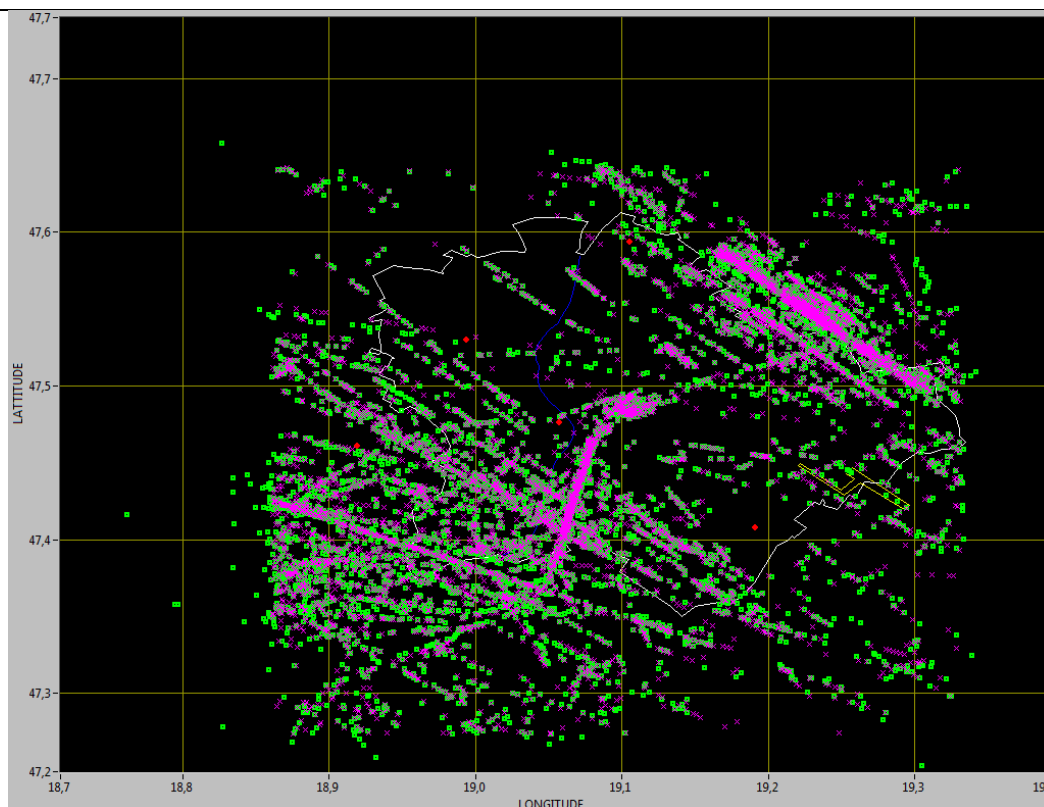


8. ábra Azonosítatlan légi jármű

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 8. 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 9. ábrán látható. A lila pontok az ADS-B típusú üzenetekből dekódolt pozíciókat jelentik, míg a zöld pontok az ezen üzenetekből, 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.



9. ábra Hosszú távú mérés

ÖSSZEFOGLALÁS

Az eredmények alapján belátható, hogy a WAMLAT rendszer jó korrelációt mutat a független forrásból (ADS-B üzenetek) származó adatokkal. A rendszer alkalmas lehet a légiforgalmi irányítás számára kiegészítő adatok szolgáltatásával. Egy jövőbeli rendszer alacsony költségű komponensekből építhető fel, mely az egész országot képes lefedni.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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

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 2002/15(2), pp. 507–520.
- [2] FANG, B.T. Simple solutions for hyperbolic and related position fixes. IEEE Trans. Aerosp. Elect. Systems 1990/26(5), pp. 748–753.
- [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, pp. 706–717.
- [5] SZÜLLŐ ÁDÁM Multilateráció a gyakorlatban - WAMLAT pilotrendszer. Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2013/2, pp. 700–709.