Bunkóczi Sándor—Papp Tamás

BISZTATIKUS PASSZÍV RÁDIÓLOKÁCIÓ

H. Hertz 1887-ben állított elő először elektromágneses hullámot, és írta le annak terjedési tulajdonságait. 1900-ban Nikola Tesla próbálta meg először a rádióhullámokat mozgó tárgyak helyzetének meghatározására alkalmazni, de az orosz hadihajók szintén tapasztalták, hogy a rádióhullámok visszaverődnek az útjukba kerülő akadályokról. Az első szabadalmak 1904-ből származnak, így innentől számítják a rádiólokáció történetét. Ezt követően számos országban megindult a kutató-fejlesztő munka, melynek különösen a második világháború adott nagy lendületet. A radarokat hamarosan a gyakorlatban is eredményesen alkalmazták a légvédelemnél, a tüzérségnél és a haditengerészetnél. Az alapelvek kialakulását a technológia fejlődése követte, amely újabb feladatok megoldását tette lehetővé. Napjainkig a radartechnika viharos fejlődésen ment keresztül, azonban a kutatás ma is folytatódik. A 60-as évek klasszikus módszerei mellett a technológia fejlődése, a fejlett digitális jelfeldolgozás és a nagyteljesítményű számítástechnikai eszközök által új alkalmazási területek váltak elérhetővé. Ezek közül jelentősebbnek ítélhetők:

— horizonton túli lokáció;
— bi- vagy multisztatikus radar rendszer;
— méteres és milliméteres hullámsáv alkalmazása;
— multifrekvenciás működés, nagy sávszélesség alkalmazása;
— adaptív jelfeldolgozás stb.

A radar-technika a légvédelem szempontjából a harci lehetőségeket alapvetően befolyásoló tényező. Napjainkban a technikai fejlesztések eredményeként bővült a légi támadóeszközök köre. A repülőgépek és helikopterek mellett az utóbbi időben megjelentek és elterjedtek a távvezérelt és pilótanélküli légi támadóeszközök, valamint a harcászati aerodinamikai rakéták és a harcászati ballisztikus rakéták. Ezen új eszközök hatásos visszaverő felülete igen kicsi, sőt, a hagyományos repülőeszközök fejlesztése is ebbe az irányba halad („STEALTH” technológia).

A légi támadóeszközök hatásos visszaverő felületének rendkívüli csökkenése által a radar-technikában felértékelődött a VHF sáv szerepe, amely elsősorban a következő előnyöknek köszönhető:

— a célok rádió-rezonancia jelenséget mutathatnak, a hatásos visszaverő felületük akár 5—10-szer nagyobb lehet, mint az „S”, és a magasabb sávokban;
— a „lopakodó” technológiával készült repülő eszközök felderíthetők és követhetők;

— önrávezető rakéták építése lényegesen nehezebb, mint magasabb frekvencián üzemelő radarok esetén;
— ugyanakkora légtér ellenőrzése lényegesen olcsóbb, más sávokkal összevetve;
— pontos távolságmérés (a szögkoordináta mérés azonban pontatlanabb, különösen helyszögben, a földfelszínről való visszaverődés következtében).

Általánosan elfogadott elv, hogy a légvédelmi rendszerben alkalmazott különféle rendeltetésű radarok csak akkor lehetnek eredményesek, ha kellő technikai adottságokkal rendelkeznek a minél rejtettebb működéshez. A radarok rejtett működésének technikai megvalósítására számos elv létezik (pl.: adóteljesítmény csökkentés, kiterjesztett spektrumú radarok, a visszavert jelek integrálása, stb.), azonban a legújabb kutatások — annak számos előnye miatt — a bi- ill. multisztatikus radarok irányába is mutatnak.

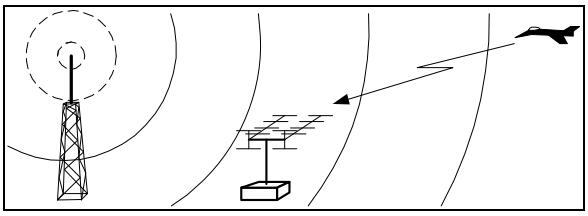
ÁLTALÁNOS ISMERTETÉS

Bisztatikus elrendezésről akkor beszélünk, ha az adó- és vevőantennák távolsága a mérendő távolsághoz képest nem elhanyagolható.

Multisztatikus elrendezés esetén a céltárgy helyét több közös térrészt lefedő vevők jelének együttes feldolgozásával határozzuk meg. Mindkét elrendezés esetén megkülönböztethetünk még aktív (együttműködő) és passzív (nem együttműködő) rendszereket.

Az aktív rendszereknél a primer rádiólokátor adójel paramétereit (indítás, oldal- és helyszög pozíció, vivőfrekvencia, adójel belső modulációja) továbbadja a bi- (multi-) sztatikus rádiólokátor vételi pontnak (pontoknak). Ekkor az adóberendezést a rendszer kívánalmainak megfelelően tervezik.

Passzív rendszereknél az adó- és a vevőpont(ok) között nincs szükség semmilyen szinkronizációra, vagy közvetlen információ átadásra (1. ábra). E rendszernek további előnye, hogy adóként bármely, az adott sávban működő jól használható jelforrás alkalmas (pl. TV, rádió műsorszóró adók akár az ellenség területén is üzemelhetnek).



1. ábra. Passzív bisztatikus radar rendszer

A bisztatikus radar-kutatások kezdetei 1935. februárjáig nyúlnak vissza. Arnold Wilkins vezette azt a kutatást, amely később a Deventry-kísérlet néven vált ismertté. Wilkins a kísérlet során a BBC Deventry-nél található adóját, s attól kb. 20 kilométerrel távolabb saját vevőkocsiját használta arra, hogy sikeresen bemutassa egy tőle 12 km távolságra lévő Heyford-bombázó detektálását.

Az 50-es években átfogalmazták a kezdeti szakasz terminológiáit és elméletét, s a bisztatikus radarokat elsősorban a ballisztikus rakéták adott terület fölötti áthaladásának detektálására alkalmazták. A 80-as években egy „L" sávú monosztatikus radar és két egymástól kb. 40 km távolságra telepített vevő jeleinek koherens feldolgozásával már képesek voltak a céltárgyak helyzetét 4 m, sebességét 0,1 m/s pontossággal meghatározni[1].

A bisztatikus radar-elmélet kutatása az Egyesült Királyságban is folytatódott a 90-es években[2]. A DERA Malvern cégnél, Wilkins kísérleteihez hasonlóan a BBC adóit használták fel megvilágító adóként, míg szenzorként csupán egy Doppler-frekvencia és iránymérő vevőt. Eltérően azonban a 30-as évek eredményeitől, a modern jelfeldolgozásnak és a célútvonal számítási technikának köszönhetően lehetővé vált akár 260 km távolság fölötti célok követése is, az adótól mintegy 150 km távolságra elhelyezkedő vevővel. A következőkben röviden ismertetjük a kísérlet tanulságait.

PASSZÍV BISZTATIKUS RADAR-KÍSÉRLET

A rendszer leírása

A kísérletek során bisztatikus elrendezést alkalmaztak, amely egy adó- és egy vevőberendezést tételez fel, melyek elkülönülten, egymáshoz képest viszonylag nagy távolságra helyezkedtek el. Megvilágító adóként a BBC egyik műsorszóró állomása funkcionált. Mivel a rendszer nem együttműködő típusú, az adó jellel szemben mindössze az volt a követelmény, hogy ismert, és stabil vivőfrekvenciával rendelkezzen.

A rendszer a vevő oldalon a célpályák meghatározásához csupán a visszavert jel irányának és Doppler-frekvencia eltolódásának mérését igényli.

A céltárgyról visszavert jel vétele két, egymással párhuzamos elrendezésű, nyolc-nyolcelemű Yagi-antenna segítségével történik, mely az adott elrendezésben, a vízszintes síkban ± 56° mérési tartományt biztosít. A jelek a továbbiakban

[1] DR. BOZSÓKI István: Korszerű radar technika, Akadémiai Közlemények, 184. szám, ZMKA, Bp., 1991, p. 76.

[2] P.E. Howland: Target tracking using television-based bistatic radar, IEE Proceedings online no. 19990322

két csatornában, alacsony zajú UHF/VHF keverőkön, és digitális NF vevőkön keresztül kerülnek alapsávra. Ezután a mindkét csatornából vett 2 s időtartományú alapsávra lekevert digitális jelcsomagok (idő/doppler minta) gyors Fourier-transzformációs (FFT[3]) eljáráson esnek át, doppler-sebesség meghatározása céljából.

Mivel az FFT jelfeldolgozás komplex spektrumot ad, a két csatorna fáziskülönbsége felhasználható a célirány (Θ) meghatározására:

$$\Theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda \cdot \Delta\Psi}{2\pi \cdot d}\right) \qquad (1)$$

ahol: λ — az adójel hullámhossza;
d — a két vevőantenna közötti távolság;
$\Delta\Psi$ — a két csatorna jele közötti fázis különbség.

Az alkalmazott egyenlet egyértelmű iránymeghatározást tesz lehetővé. A vevőantennák közötti távolságot a mérési pontosság és a kölcsönös csatolás jelenségének figyelembevételével határozták meg.

A következő lépésben történik a célok detektálása, a CA—CFAR[4] algoritmus segítségével, valamint a nem kívánt vivőharmonikusok és zajok elnyomása. Az algoritmus néhány FFT minta alapján zavartérképet állít elő (ez tartalmazza, az ún. fehérzajt, a felhasznált adó vivőjelének harmonikusait, stb.). A nagyszámú hibás céldetektálás elkerülése érdekében úgy állítják be, hogy az FFT minta akkor tartalmaz céljelet, ha a minta átlagos teljesítményszintje legalább 6 dB-lel nagyobb, mint a zavartérkép-teljesítmény átlaga. Ha egy FFT minta nem tartalmaz céljelet, akkor a továbbiakban az a zavartérkép frissítésére kerül felhasználásra. A céljelet tartalmazó FFT minták azonban — melyek az oldalszögön kívül a sebesség információt is tartalmazzák — továbbjutnak a célpálya azonosító áramkörre.

A Doppler-frekvencia és az irány vektorból képezik a plotot. A rendelkezésre álló plot adatokat hozzárendelik a célokhoz. Több önálló plot alapján inicializálják az adott célhoz tartozó útvonalat (tracket). A track-képzésre több eljárás ismert (pl.: g–h szűrő, α–β szűrő, stb.), melyek többnyire a becslési egyenletek konstansaiban különböznek egymástól. A vázolt kísérletben ezt a feladatot egy kétfokozatú Kalman–szűrőn alapuló célpálya azonosító áramkörrel oldották meg. Az áramkör négyféle célpálya-profilt különböztet meg:

---

[3] FFT — Fast Fourier Transformation, Gyors Fourier transzformáció. Olyan eljárás, amellyel egy komplex számsorozat diszkrét Fourier transzformáltja lényegesen kevesebb művelettel számítható ki, mintha azt egyszerűen a definíciós egyenlet alapján számítanánk ki. Az első és még ma is leggyakrabban használt algoritmust, az ún. „radix–2”-t 1965-ben az IBM Thomas J. Watson Kutatóközpont munkatársai fejlesztették ki.

[4] CA—CFAR — Cell averaging constant false alarm rate, távolsági cella jel-átlagoló konstans vaklárma normalizálás

— meg nem erősített;
— törölt;
— megerősített;
— befejezett.

A követőegység az FFT minták alapján elvégzi a célok Doppler-frekvenciájának (céltárgy-sebesség) mérését, majd ezek célonként átlagolt értéke alapján prognosztizálja a következő mérés várható Doppler-értékét, amelyhez egy kaput rendel. Ha a következő plot a kapun belül helyezkedik el, a track a megerősített profilba kerül, egyébként meg nem erősített, törölt, vagy befejezett lesz. Bár az iránymérés eredményei meglehetősen pontatlanok, a célpályák megerősítése során az áramkör ezeket is figyelembe veszi.

A célpályák számítása a következő összefüggések alapján történik[5]:

$$F_d(n) = -\frac{1}{\lambda}\left[\frac{(x_0 + nT\dot{x})\dot{x} + (y_0 + nT\dot{y})\dot{y}}{\sqrt{(x_0 + nT\dot{x})^2 + (y_0 + nT\dot{y})^2}} + \frac{(x_0 + nT\dot{x})\dot{x} - (L - (y_0 + nT\dot{y}))\dot{y}}{\sqrt{(x_0 + nT\dot{x})^2 + (L - (y_0 + nT\dot{y}))^2}}\right] \quad (2)$$

$$\Theta(n) = tg^{-1}\left(\frac{x_0 + nT\dot{x}}{y_0 + nt\dot{y}}\right) \quad (3)$$

ahol: λ — az adójel hullámhossza;
x_0 , y_0 — a cél derékszögű koordinátáinak kezdőértékei;
$\dot{x}$, $\dot{y}$ — a cél sebességének derékszögű komponensei;
T — a mérési időtartam;
L — várható érték.

A mérési egyenletek így önmagukban még nem biztosítják a plotok egyértelmű meghatározását, ill. a track-képzést. A Kalman-szűrő alkalmazásával a célpálya inicializálása érdekében ezeket az egyenleteket illeszteni kell az irány/doppler mintákhoz, melyet a következő nem lineáris összefüggés által valósítottak meg:

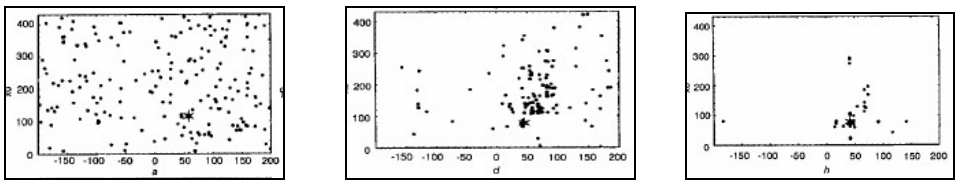
$$J_{LS} = \frac{1}{2}[z - h(x)]^T [z - h(x)] \quad (4)$$

ahol:
z — N-számú irány/doppler mérést tartalmazó mérési vektor;
h(x) — átviteli mátrix.

[5] P.E. Howland: Target tracking using television-based bistatic radar, IEE Proceedings online no. 19990322

Az útvonal (track)-képzés akkor fog helyesen működni, ha a nem lineáris illesztést megvalósító összefüggés minimális értéket vesz fel (J_{LS}). A minimális átlag hiba keresése iterációs eljárás segítségével valósul meg, ahol az állapotvektor, optimális módon keresi a megoldást. A hibakorlát számítások alapján a korrekt inicializáláshoz az iterációk száma 30 körüli.

A kísérletek során a track inicializálást két lépésben valósították meg, melyek közül itt csak az általunk érdekesebbnek tartott ún. genetikai algoritmussal foglalkozunk. A genetikai algoritmusok mindegyikének működése Darwin evolúciós-elméletének analógiáján alapul. Az analógiában az egyedeket jellemző kromoszómák egy sajátos állapotvektorban kerülnek ábrázolásra binárisan $(x, \dot{x}, y, \dot{y})$. Minden egyed rendelkezik az alkalmasság valamilyen fokával, amelyek kiszámítása az egyednek megfelelő állapotvektor helyén a J_{LS}–ben történik. Az algoritmus egy véletlenszerű populációval kezd, majd minden egyes ismétlésnél (iterációnál) egy új populáció fejlődik ki az előzőből. Valamely egyed szaporodásának valószínűsége megegyezik az alkalmasságának fokával. Mindig van azonban egy kis esély a kevésbé alkalmasak fejlődésére is, ami azt okozza, hogy az algoritmus nem fog gyorsan konvergálni. A J_{LS} minimum értéke vélhetően akkor található meg, amikor az azonos jellemzőkkel rendelkező populációk többségbe kerülnek. A kísérletek során az algoritmus eredményei már az 50-edik generációnál megfelelő konvergenciát mutattak.



2. ábra. A genetikai algoritmus működése (1. 19. és 50. iteráció)

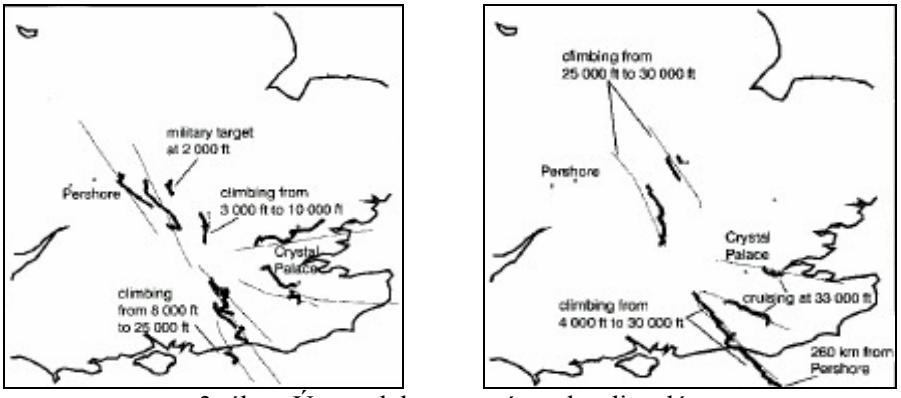
A track-inicializálás második részét itt nem ismertetjük, csupán annyit szeretnénk még megemlíteni, hogy az inicializált trackek fenntartása ún. kiterjesztett Kalman-szűrővel történt.[6]

A kísérlet eredményei

A passzív radart megépítették, és a gyakorlatban is kipróbálták. A mérési eredmények kontrollálásához egy szekundér (SSR/IFF) felderítő radar szolgáltatta az információkat.

[6] EKF: Extended Kalman-filter. Lényegesen gyorsabb, mivel csak egy irány/doppler minta, és egyszerűsített képletek alapján dolgozik.

A 3. ábra a kísérlet során mért eredményeket mutatja (a vastag, folyamatos vonalak a passzív radar, a vékony szaggatott vonalak a kontroll radar által mért trackeket jelentik). Az ábrán az Egyesült Királyság déli részét láthatjuk. A vevő a nyugati részen, Pershore-nél található. A megvilágító adójelek 156 km-rel távolabbról, a Kristal Palace TV adójától származtak ($f_{vivő}$ = 453 MHz).



3. ábra. Útvonalak a passzív radar diszplén

A gyakorlatban azt tapasztalták, hogy a TV-bázisú radar majdnem minden célt detektált a kontroll radar által látottak közül. A legtávolabbi felderítés a vevőtől 260 km-re történt (ez a cél az adótól 100 km-re volt). A felderített és követett célok többsége nagy magasságú volt, de a radar képes volt követni a 3000-ről 10 000 láb magasságra emelkedő célt is. A célok egy része elveszett a vaklárma normalizálás során, ill. a Kalman-szűrőben (a jel bizonytalansága, vagy pontatlan iránybecslés miatt).

A tervezett passzív rendszer teljesítményét sokkal nehezebb kvantitatív jellemzőkkel megadni, mint egy hagyományos radarét. A kísérlet során elért pontosság kisebb, mint ami általában egy monosztatikus radartól elvárható, a megépített bisztatikus radar előállítási költségei azonban lényegesen kisebbek annál.

Hasonló elven működik a Lockheed Martin cég által épített „Silent Sentry” passzív radar is. A mérési tapasztalatok is hasonlóak.

KÖVETKEZTETÉSEK

A P.E. Howland által leírt kísérlet eredményei bizonyítják, hogy a korszerű jelfeldolgozási algoritmusok, alkalmazásával a passzív radartechnika alkalmas a légi célok igen nagy területen való detektálására és követésére. Véleményünk szerint a rendszer előnyei közül kiemelhetők:

— a hagyományos radar rendszerekkel szemben az adó és a vevő között nem igényel semmilyen közvetlen kapcsolatot;

— bármely, megfelelő teljesítménnyel, valamint ismert és stabil frekvenciával rendelkező adó felhasználható (AM, PM, FM stb.);
— a vevő csak néhány kHz sávszélességű, gyorsan áthangolható más adóra, így az aktív zavarással szembeni védelme rendkívül jó;
— a „Stealth" technológiával készült légi járművek felderítésére is alkalmas;
— lehetővé teszi rejtett rádiólokációs terek létrehozását;
— önrávezető rakéták elleni védelme jó;
— előállítási költsége alacsony;
— polgári célokra kiosztott frekvenciasávokban is alkalmazható.

Végkövetkeztetésként megállapítható, hogy az ismertetett technika jól kihasználja a felértékelődött UHF (VHF) hullámtartomány előnyeit, olcsósága és a nagy területről való légi információ biztosítás képessége alapján hatékonyan egészítheti ki a meglévő radar rendszereket.

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] BALAJTI István – HEGYI Miklós: Rádiólokációs rendszerek áttekintése, Haditechnika, Bp., 1992/4, p. 31-35.
[2] DR. BALAJTI István – SIMON Sándor: A radarok fejlesztésének aktuális kérdései, Új Honvédségi Szemle, Bp., 1998/4, p. 138-153.
[3] DR. BALAJTI István – TURAI András: FFT-spektrumanalízis jelentősége a haditechnikai eszközökben, Haditechnika, Bp., 1993/1, p. 8-10.
[4] DR. BALAJTI István – DR. VASS Sándor: Elektronikai védelem, ZMNE, Bp., 2000., 143 p.
[5] DR. BOZSÓKI István: Korszerű radar technika, Akadémiai Közlemények, 184. szám, ZMKA, Bp., 1991, p. 59-81.
[6] P.E. HOWLAND: Target tracking using television-based bistatic radar, IEE Proceedings online no. 19990322
[7] KOVÁCS László (szerk.): Korszerű katonai technológiák a XXI. Században – az új felderítő, elektronikai hadviselési rendszerek koncepciói, ZMNE, Bp., 2000., 311 p.
[8] DR. TAMÁSI Ferenc: Rádiólokátor-technika, Zrínyi Katonai Kiadó – Műszaki Könyvkiadó, Bp., 1986, 418 p.