

Seller Rudolf* – Pető Tamás** – Dudás Levente*** – Kovács Levente****

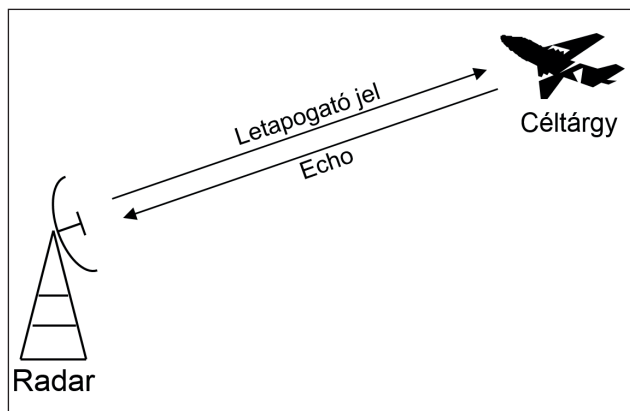
Passzív radar

I. rész

A PASSZÍV RADAR ALAPGONDOLATA

A RADAR egyaránt jelent egy mérési eljárást és magát az eszközt, ami ezt megvalósítja. A radar egy betűszó, aminek feloldása: RAdio Detection And Ranging (rádióérzékelés és távmérés). A radar elvét az 1930-as években dolgozták ki és a II. világháborúban már rendszerbe állítva alkalmaztak radarberendezéseket.

A radar alapötlete igen egyszerű: elektromágneses energiát sugároz ki, és a különböző reflektáló objektumokról visszaverődve detektálja azt a radarba. A célról visszaérkező jel a kisugárzotthoz képest számos paraméterében megváltozik.



1. ábra. A radarmérés alapelrendezése

Ha azonosítjuk a céltárgy okozta változásokat, akkor megkapjuk a radarral mérhető céltárgy-paramétereket. A radar általánosságban a célszög, radiális távolság és radiális sebesség paramétereit tudja közvetlenül mérni, amelynél a célszög mérése részben az antenna térbeli szűrő tulajdonságán keresztül valósítható meg.

A visszavert jel, folyamatként értelmezett, mélyebb elemzésével lehetőség nyílik további információ szerzésére is a céltárgyról, amely felhasználható később a céltárgy kategorizálására, később osztályba sorolására (klasszifikáció).

A klasszikus berendezések az ún. aktív radarok, amelyek esetében a legfontosabb jellemző, hogy az elektromágneses kisugárzást a radar maga kelti, egy beépített adóberendezés alkalmazásával. Ez egy kézenfekvő megoldás, hiszen a kisugárzott elektromágneses hullám erőssége, iránya, vivőfrekvenciája és modulációja (spektruma) így jól kézben tartható, és a radar konkrét alkalmazásának megfelelően megválasztható. Azonban a módszernek katonai alkalmazási szempontból hátrányai is vannak, ez hívta életre a passzív radar koncepcióját már a XX. század második felében.

A passzív radar rendszerek (Passive Coherent Location – PCL) a hagyományos elven működő aktív radarokkal ellentétben a célok felderítéséhez nem sugároznak ki megvilágító jelet, hanem erre a környezetben már eleve meglévő forrásokat használják fel. Az esetek többségében ezek a megvilágító jelek valamilyen műsorszóró vagy telekommunikációs adótól származnak. A passzív radar szempontjából ezeket az adókat megvilágító forrásoknak nevezzük (az angol szakkifejezés – Illuminator of Opportunity (IO) – kifejezőbb, jelenleg elterjedt magyar megfelelője még nincs). Mivel ezek a források a radar működtetőjétől függetlenek, így a felderítésben résztvevő adó- és vevőegységek térben szeparáltak, tehát biszztatikus vagy multisztatikus radar elrendezésről beszélhetünk. A passzív biszztatikus radarok (PBR) működését sematikusán a 2. ábra mutatja be.

Az ábrán is jól látható, hogy a passzív radar vevőberendezésébe a megvilágító források sugárzása több úton jut el: egyrészt közvetlenül (ez az ún. referencia csatorna), másrészt – reflektáló céltárgy jelenlétében – erről visszaverődve is (utóbbi az ún. felderítő csatorna).

A működési elvnek megfelelően a véges terjedési sebéségből és a geometriai elrendezésből adódóan a különböző úton haladó jelkomponensek eltérő időben érkeznek

ÖSSZEFOGLALÁS: 2017 őszén zárult le a hároméves MAPIS kutatás-fejlesztési projekt, amely az Európai Védelmi Ügynökség égisze alatt, öt nemzet részvételével foglalkozott a képalkotó passzív radar hadszíntéri alkalmazásával. A nemzetközi konzorcium kilenc résztvevője között nagyvállalatok és neves akadémiai intézetek találhatók. Ebben a cikkben bemutatjuk a passzív radar alapelvét, áttekintést adunk a MAPIS-projekt fő célkitűzéseiről és eredményeiről, valamint bemutatjuk a magyar résztvevők – a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, MTA SZTAKI, BHE – kutatócsoportjának tevékenységét a hazai passzív radar demonstrátor kifejlesztésében. A MAPIS-projektre épülő hazai passzív radar demonstrátor projekt 2019. május végén zárult.

ABSTRACT: The three-year MAPIS R&D project under the aegis of the European Defence Agency with participation of five nations terminated in autumn 2017. The project studied the battlefield application of the passive imaging radar. There were large companies and well-known academic institutes among the nine participants of the international consortium. This article describes the basic principle of the passive radar; gives an overview of the main objectives and results of the MAPIS project, and presents the activities of the group of the Hungarian participants – the Budapest University of Technology and Economics, the Institute for Computer Science and Control of the Hungarian Academy of Sciences, BHE – in developing the domestic passive radar demonstrator. The passive radar demonstrator project based on the MAPIS project was completed at the end of May 2019.

KULCSSZAVAK: PCL, IO, TDOA, DoA, STASP, ISAR, DVB-T, RPAS, klasszifikáció

KEY WORDS: PCL, IO, TDOA, DoA, STASP, ISAR, DVB-T, RPAS, classification

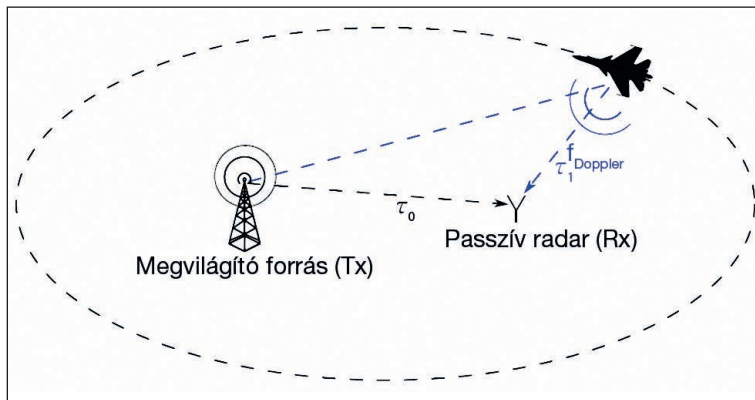
* Egyetemi adjunktus, BME Villamosmérnöki kar Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék ORCID: 0000-0003-0573-2684

** BME. ORCID: 0000-0002-4848-9031

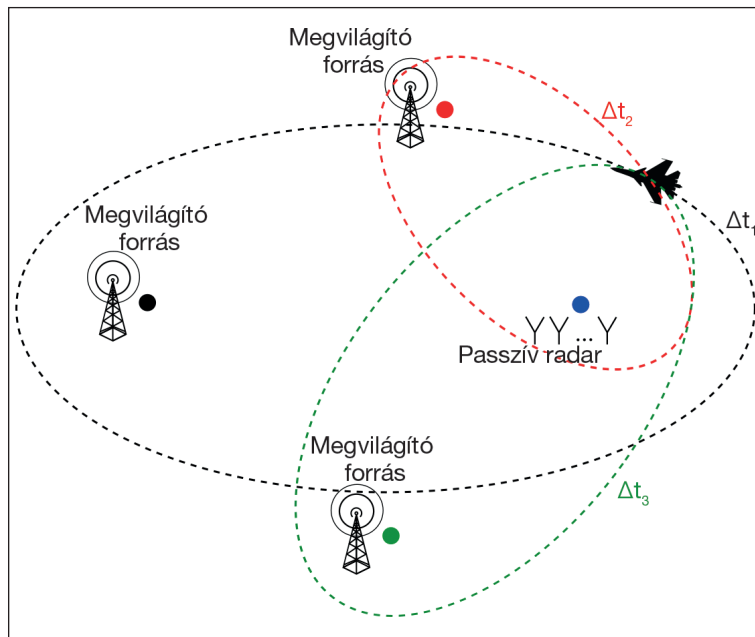
*** Egyetemi tanársegéd, BME Villamosmérnöki kar Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék.

**** Ph.D. tudományos főmunkatárs, kutató, SZTAKI. ORCID: 0000-0001-7792-4947

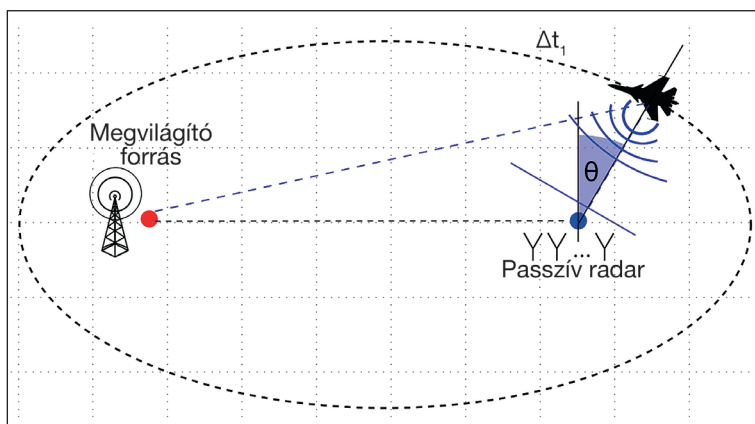




2. ábra. Bisztatikus radar geometria



3. ábra. Céltárgy pozíciójának meghatározása több illuminátor esetében



4. ábra. Céltárgy hiányzó pozíciójának meghatározása irányméréssel

meg a vevőegységhez. Amennyiben a radar képes észlelni és elkülöníteni a reflektált jelet, majd meghatározni a beérkezési időkülönbséget $\Delta t = \tau_1 - \tau_0$, úgy az adó és a vevő pozíciójának az ismeretében meghatározhatunk a 3D térben egy ellipszoidot, amely kijelöli az észlelt cél lehetséges helyét. A méréssel meghatározott ellipszoid minden pontjára az R_b bisztatikus távolság állandó.

$$R_b = \frac{L - (R_t - R_r)}{c}$$

Az összefüggésben L jelöli a fővonal menti távolságot, R_t az adótorony és a céltárgy közötti távolságot, R_r a céltárgy és a vevő közti távolságot, c pedig a fénysebességet. Mivel az így elvégezhető méréssel a cél pozíciója nem egyértelmű, a tényleges koordináták meghatározásához vagy több bisztatikus párra vagy a radar vevőantennájára beérkező reflektált jel hullámfrontjának azimut és elevációs beesési szögeinek mérésére van szükség.

Az első esetet, a céltárgy pozíciójának meghatározását több illuminátor esetében a 3. ábra illusztrálja. Három adótorony és egy vevő felhasználásával három időkülönbséget határozhatunk meg: Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 , amelyekből ezután felrajzolhatjuk a bisztatikus ellipszoidokat. Így a beérkezési időkülönbségek mérési eredményeiből (TDOA) a céltárgy pozíciója meghatározható. A módszer használata megköveteli, hogy egy időben (közel azonos időben) mindhárom adótoronytól megfelelő megvilágítást kapjunk és így legyen érvényes detekcióink.

Amennyiben csak egy megvilágító forrásunk van, akkor a hiányzó irányparaméter mérésére más elvet kell alkalmaznunk. Ebben az esetben a kézenfekvő megoldás az iránybecslő antennarendszer alkalmazása, amely lehetővé teszi a céltárgyról reflektált jel beérkező hullámfrontjának a radarhoz képesti iránybecslését. Ezt az esetet a 4. ábra szemlélteti. A cél pontos pozíciójának meghatározása így Δt_1 időkülönbség mérésből és az elevációs és az azimutszögek (β , φ) méréseiből tevődik össze. Ennek a mérési elvnek a gyakorlati alkalmazásához azonban szükség van egy olyan többcsatornás vevőegységre, amely képes az antennarendszerről érkező jeleket koherens módon venni.

A céltárgyról reflektált jel az időkéseleltetésen túl Doppler-eltolódást is szenved a céltárgy adótoronyhoz, illetve vevőhöz képesti mozgásából adódóan. A Doppler-eltolódás mértéke a cél mozgásának irányvektorától, amit a bisztatikus mérési elrendezésben a β és a δ szögekkel jellemezünk. A β bisztatikus szöveget az adóállomás – céltárgy – radar vevő háromszöggel adjuk meg, míg a δ szöveget a sebességvektor és bisztatikus szög szögfelezője között értelmezzük az 5. ábra szerint.

Ezen paraméterek felhasználásával a Doppler-eltolódást kiszámíthatjuk a következő összefüggéssel:

$$f_b = \frac{2v}{\lambda} \cos \frac{\beta}{2} \cos \delta,$$

ahol v a céltárgy sebességének abszolút értékét, λ pedig a megvilágító jel hullámhosszát jelöli. A cél mozgásából adódó Doppler-eltolódás fontos szerepet játszik a detektálásban, ugyanis ezáltal a céltárgyról reflektált jel elkülöníthetővé válik az álló célokról visszaérkező, zero Doppler-frekvenciával rendelkező reflexióktól.

A radar működésének megértéséhez, a mérési elvet követően a továbbiakban fókuszál-

junk a reflektált jel észleléséhez szükséges jel-feldolgozási eljárás működésére, a főbb sarokpontokra.

DETEKCIÓ

A detektáláshoz a legegyszerűbb esetben kizárólag két különböző úton terjedő jelet veszünk figyelembe. Ezen út közül az egyik a közvetlen úton terjedő jel, a másik pedig a repülőgépről reflektált jel. A reflektált jel a közvetlen úton terjedő jelhez képest τ időkéscsleltetéssel érkezik meg és a repülőgép mozgása miatt a fentiekben részletezetteknek megfelelően f_d Doppler-eltolódást is szenved.

Ha $s_t(t)$ -vel a céltárgyról visszaérkező jelet, míg $s_{ref}(t)$ -vel a megvilágító adó jelét – amit referencijelnek tekintünk – jelöljük és tudjuk, hogy a céltárgyról visszaérkező jel csillapo-dást, időkéscsleltetést és Doppler-frekvencia eltolást szenved a referencijelhez képest, akkor mérés során az így módosult echót keressük az $s_t(t)$ jelben.

A konvencionális radarban, ahol a vizsgáló jel mindig ugyanaz, a feladat viszonylag egyszerű. Esetünkben azonban a vizsgáló jel mindig az aktuális adásfolyam, így az időkéscsleltetés és a Doppler-frekvencia kinyerése jelentősen összetettebbé válik. Ezért az alábbi eljáráshoz fordulunk: tételezzük fel, hogy a céltárgyhoz τ időkéscsleltetés és f_d Doppler-csúszás tartozik. Ennek a céltárgynak az esetében a referencijel a következőképpen módosul (eltekintve az amplitúdó csökkenéstől): $s_{ref}(t - \tau)e^{j2\pi f_d t}$, vagyis ez a jel fog a legjobban hasonlítani a céltárgyról visszaérkező echóra. A hasonlóság mérésére a komplex függvényekre értelmezett skaláris szorzatot alkalmazzuk: $\langle s_t(t), s_{ref}(t - \tau)e^{j2\pi f_d t} \rangle$. Az így felírt kifejezés szelektíven a τ időkéscsleltetéssel és az f_d Doppler-csúszással rendelkező objektumot mutatja, továbbá amplitúdója még arányos lesz az objektum reflexiós képességével (RCS). Ezek után nincs más dolgunk, mint a τ és az f_d által kifeszített síkon letapo-gatni az $s_t(t)$ jelet.

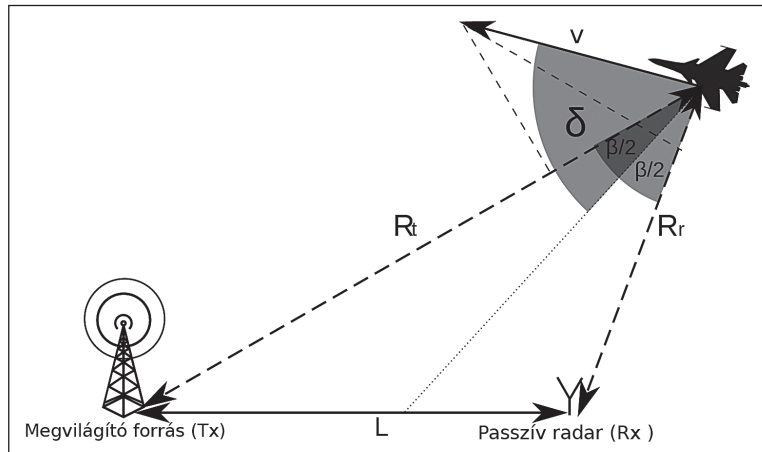
A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy a τ és az f_d felbontási raszter által meghatározott mátrix minden egyes cellájára elvégezzük a skaláris szorzást, aminek a képlete:

$$\chi(\tau, f_d) = \langle s_t(t), s_{ref}(t - \tau)e^{j2\pi f_d t} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} s_t(t) s_{ref}^*(t - \tau) e^{-j2\pi f_d t} dt$$

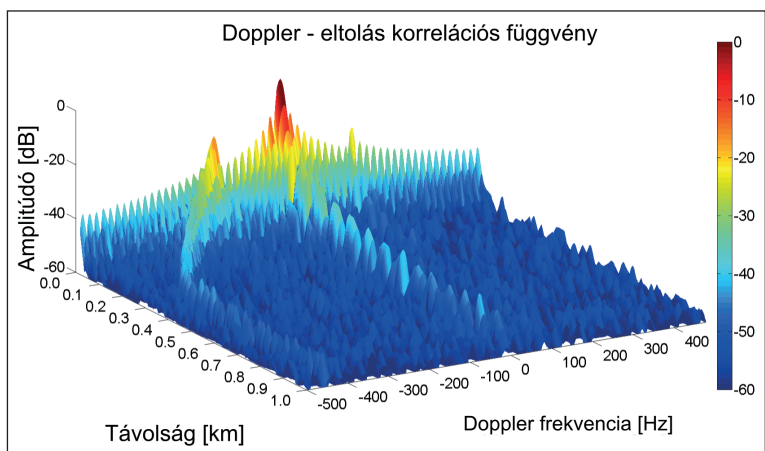
A τ időkülönbség a távolság különbségnek felel meg, míg az f_d a bisztatikus sebességnek. Ennek okán a felbontással diskretizált $\chi(\tau, f_d)$ -t, mint 2D mátrixot Range-Doppler (RD) vagy Range-Velocity (RV) mátrixnak hívják.

Fontos ismételtlen megjegyezni, hogy a kifejezésben az $s_t(t)$ és az $s_{ref}(t)$ jelek egyaránt változnak, ezért a folyamatos mérésük szükséges.

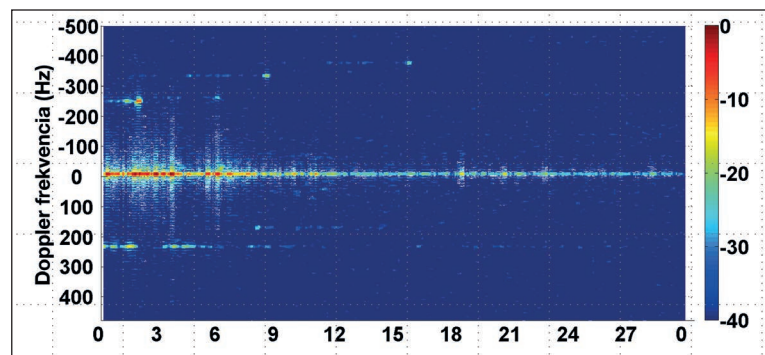
Példaképpen a 6. ábra egy szimulált felszálló repülőgép képét mutatja a kiértékelt távolság



5. ábra. Bisztatikus Doppler-frekvencia értelmezése



6. ábra. Szimulált felszálló repülőgép képe a távolság-Doppler-mátrixon



7. ábra. Leszálló repülőgép valós mérésű képe a Range-Doppler mátrixon

– Doppler (RD) mátrixon végtelen utánvilágítással, míg a 7. ábrán egy valós mérésünk RD megjelenítése látható. Ez utóbbi mérésen jól láthatóak a zero Dopplerrel rendelkező földi állócélok, amelyek reflexiója tipikusan jelentősen nagyobb, mint a légi objektumoké.

IRÁNYMÉRÉS

2D radar esetében tipikusan az azimutszög mérését kell még megvalósítanunk. Mivel passzív radar esetében a forgó antenna alkalmazása kerülendő (nem elégséges a céltárgyon töltött idő), ezért antennarendszerral kell dolgoznunk, amely azimutmérés esetén egy vízszintesen elhelyezett antennaszor. Az iránybecslésnél (DoA) az adaptív algoritmusok a hatékonyabbak. Ilyen algoritmusok például: CAPON, MUSIC,



MEM, TN algoritmusok. Azonban amennyiben elevációban is mérni akarjuk a céltárgy irányát, már antennarács alkalmazása, de minimálisan még egy vertikálisan elhelyezett antennasor alkalmazása válik szükségessé.

MEGVILÁGÍTÓ FORRÁSOK

Az alkalmas megvilágító jel megtervezésére, illetve jelen esetben kiválasztására minden radar alapú távérzékelő rendszerben fontos figyelmet fordítani. Mivel a passzív radar környezetében a jelalak megtervezésére nincs lehetőségünk, így a rendelkezésre álló források közül az adott alkalmazáshoz minél inkább megfelelőbbeket érdemes kiválasztanunk. Az alkalmazható jelforrások listáját és alkalmazásunk szempontjából azok fontosabb paramétereit az 1. táblázat összegzi.

A megfelelő illuminátor kiválasztásának fontos szempontja a használt adásteljesítmény, ugyanis ez fogja megszabni a megvilágított tartomány nagyságát. Emellett jelentős szereppel bír a kisugárzott jelhez használt modulációs eljárás, illetve a felhasznált sávzélesség. Mindkettő hatással van a megvilágító jel bizonytalansági függvényének alakjára, és így az elérhető távolságfelbontásra is.

Az 1-es táblázatban feltüntetett EIRP értékek tipikusak, a tényleges értékek ettől eltérőek. A távolság-felbontás értékei megegyeznek az ekvivalens monosztatikus távolságfelbontással. A valós környezetben elérhető bisztatikus távolság-felbontás ettől a valóságban alkalmanként eltér az éppen aktuális mérési elrendezéstől függően.

A MEGVILÁGÍTÓ FORRÁS KIVÁLASZTÁSA

A passzív radarok kialakítása során alapvetően olyan megvilágító forrást keresünk, amely folytonos sugárzás mellett, tartalomtól függetlenül képes nagy sávzélességű zajszerű megvilágítást biztosítani, emellett pedig elegendően nagy teljesítménnyel és kis irányítottsággal rendelkezik a földi és légi célok szimultán nagy tartományú megvilágításához.

A földfelszíni műsorszóró és hírközlő jeleket megvizsgálva megállapíthatjuk, hogy kizárólag az FM, a DAB és DVB-T jelek rendelkeznek azokkal a képességekkel, amelyek elengedhetetlenek nagy hatótávolságú légi célok felderítéséhez.

Az FM alapú rendszerek kiépítése jó kompromisszum lehet a hatékony felderítést és a rendszerköltségeket figyelembe véve, azonban a gyenge távolságfelbontás és a bizonytalansági függvényen megjelenő nagy melléknyaláb-szintek miatt a DAB vagy a DVB-T jel ennél jobb választást jelent. További gyengesége az FM jelnek, hogy sávzélessége – és ennek következtében a mérés távolsági felbontása – tartalomfüggő. Magyarországon a DAB hálózatot jelenleg csak Budapesten építették ki kísérleti jelleggel, ezért a telepíthetőséget is figyelembe véve, széleskörű alkalmazhatóságot biztosító megvilágító forrásként történő alkalmazása nem ajánlott. A DVB-T jel ezzel ellentétben rendkívül jó ellátottsággal rendelkezik Magyarországon. A kisugárzott jel elegendően nagy teljesítménnyel és sávzélességgel rendelkezik ahhoz, hogy néhányszor 10 km-es hatótávolságon belül akár légi, akár földfelszíni célok felderítéséhez hatékonyan felhasználható legyen. Az alkalmazott OFDM modulációs technikának köszönhetően pedig az alacsony melléknyaláb szint is biztosított. A kis melléknyaláb szint a mérés közeli, RCS-ben jelentősen különböző céltárgyak megkülönböztethetősége miatt fontos.

Az FM jelnek a modulációból adódóan jelentős negatívumai vannak, azonban a nagy teljesítményű, kevésbé irányított műsorszórás jó megvilágítási feltételeket biztosít. Bár léteznek kedvezőbb paraméterekkel rendelkező megvilágítások is, az FM műsorszórás kihasználásával nagy mértékben növelhetjük e rendszerek megbízhatóságát és hatékonyságát. Az FM műsorszórás nagy penetrációja miatt további előnyként jelentkezik a frekvencia-diverzitás és a bisztatikus mérési párok számának megnövekedett volta.

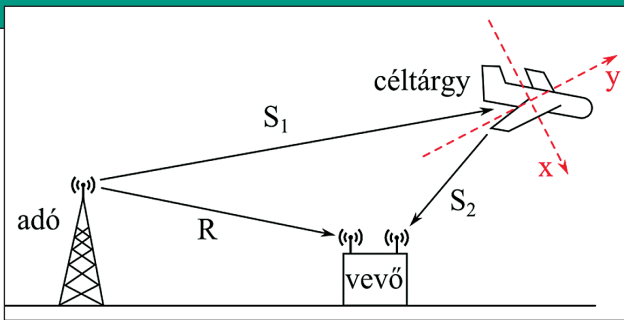
Meg kell még említenünk, hogy kizárólag földfelszíni célok felderítéséhez az LTE jel is lehet ígéretes választás. A megvilágításból – jellegeből adódóan – közepes, néhány km-es hatótávolságon belül valósíthatunk meg hatékony felderítést.

MEGVILÁGÍTÓ FORRÁSDIVERZITÁS

A passzív radarok egyik rendkívüli jelentősége a különböző frekvenciákon elérhető, különböző irányokból történő megvilágítások szimultán kihasználásának lehetőségében rejlik. Egy nagy magasságban haladó légi célt jelenleg több frekvenciában diverzítív VHF sávú FM adó, több UHF sávú DAB és DVB-T adó, valamint műholdas Ku sávú DVB-S és

1. táblázat. Megvilágító források, fontosabb paraméterek

Megvilágító forrás	Frekvenciasáv (MHz)	Tipikus adóteljesítmény (EIRP)	Sávzélesség (MHz)	Elérhető távolságfelbontás	Hatótávolság
FM rádió	88–108	10 kW–100 kW	~0,15	~1km	~100 km
DAB	174–240	1 kW–10 kW	1,5	100 m	~50 km
DVB-T	480–800	1 kW–100 kW	7,6	20 m	~50 km
DVB-S	10 700–12 700	100 W–1 kW	27-30	10 m	–
GSM	900 / 1800	10 W	0,2	750 m	~2 km
UMTS	2100	100 W–1 kW	5	30 m	–
LTE	800 / 3500	20–69 W	1,4 - 20	100 m – 7,5 m	–
WiFi	2400	0,1 W	11/20	13 m / 7,5 m	~100m
GNSS	1600 MHz	300 W–500 W	5	30 m	~500 m



8. ábra. Az ISAR alapelve

L sávú GPS jelek is megvilágítják. A különböző frekvenciákon történő megvilágítás felhasználásával, a céltárgy-frekvencia szelektív reflexiós képességeiből felmerülő detektálási nehézségeket feloldhatjuk.

Emellett a több, különböző bisztatikus mérési geometriákból adódóan az elemi mérésből számított céltárgy-pozíció és -sebesség paramétereiket nagyobb pontossággal határozhatjuk meg.

Egy több elemből álló passzív radar rendszer kezdeti lépése lehet a meglévő DVB-T megvilágítást felhasználó radar kiegészítése FM rádió alapú detektorral. Ezen rendszerrel – annak ellenére, hogy az FM rádió műsorszórás csak gyenge térbeli felderítési paramétereiket képes biztosítani – a detektált célok hozzávetőleges pozíciója felhasználható a nagyobb felbontást biztosító DVB-T alapú rendszerekhez a céltárgy zónájának kijelölésére.

KÉPALKOTÁS

A céltárgyak pusztán detektálásán és pozíciójának becslésén túl – ahogyan azt fentebb említettük – a radarmérés alapján, képalkotás segítségével lehetőség van a céltárgyak méretének és alakjának a becslésére. A képalkotás matematikai leírása igen bonyolult, de a fizikai háttere könnyen felvázolható a következőképpen. Képzeljünk el egy céltárgyat, amely mozog a radarhoz képest (pl. egy repülőgép, amely egy DVB-T adó által kisugárzott hullámokat veri vissza; a passzív radar vevői pedig ugyancsak rögzítettek). A mozgó céltárgy egyes pontjairól visszaverődő hullámok más-más úthosszal ($S_1 + S_2$) haladnak, így eltérő késleltetést szenvednek. A késleltetési idők eltérése alapján tehát a céltárgy különböző távolságra lévő pontjai megkülönböztethetők (y koordináta). A céltárgy mozgása során – nagyon speciális pályáktól eltekintve – az adó és a vevő számára változó szög alatt látszik, következésképpen az y tengelyre merőleges x irányban, az álló antennákhoz képest más-más sebességgel mozognak a pontjai. Ez a Doppler-eltolódás változását okozza, amely alapján az x tengely mentén is felbontást érhetünk el. E két effektust szimultán kihasználva az xy síkban egy kétdimenziós kép állítható elő a céltárgyról. A képalkotási eljárás lényegét tekintve megegyezik az ISAR technikával.

A passzív radar nem igényel adóberendezést, nem tartalmaz nagy teljesítményű erősítőt, így jellemzően kisebb az energiaigénye, mit egy aktív radarnak. Emellett nem terheli a környezetet újabb elektromágneses sugárzással, hanem a már eleve jelen lévő elektromágneses környezetet használja ki. Végül hadászati szempontból kiemelkedő előny, hogy kisugárzott hullámok híján a passzív radarberendezés elektromágneses módszerekkel gyakorlatilag nem deríthető fel. Érdekes terület a passzív radar zavarása (ECM), a zavaró jellel interferáljuk vagy elfedjük az alkalmazott illuminátor jelét. Az interferencia – a passzív radar STASP (Space-time adaptive processing – téridős adaptív feldolgozó) képességének köszönhetően – érdemben kiszűrhető. Amikor azonban a jammer szintje erős, akkor a

STASP már nem nyújt hatékony megoldást. Ez esetben a passzív radar felismeri, hogy erős jammerrel van dolga, aminek természetesen be tudja mérni az irányát is. Ekkor a radar stratégiát vált, vagyis nem a jammer elnyomására koncentrál, hanem a jammert felveszi a felhasznált illuminátorok közé és így tovább javítja a felderítés minőségét. Az esetek többségében így a jammer alkalmazása a passzív radar ellen kontraproduktív.

A passzív radar alapkoncepciójának viszonylagos egyszerűsége ellenére, még a fenti előnyös tulajdonságok mellett is csak a közelmúltban teremtődtek meg a gyakorlati alkalmazásának és elterjedésének a műszaki előfeltételei. Egy hatékony passzív radarban nagy sávzélességű digitális vevőkre van szükség, amelyek igen magas bitsebességgel szolgáltatják a mérési adatokat, következésképpen a jelfeldolgozás is nagy számítási kapacitású digitális célhardvereket igényel. A STASP számítási kapacitás igénye olyan nagy, hogy az alkalmazott GPU-k teljesítményfelvétele tipikusan eléri a kW-os szintet. Az alkalmazhatóság másik kulcsa, a megfelelő megvilágító források megjelenése és elterjedése (elsősorban a DVB-T adást szem előtt tartva) szintén az utóbbi néhány évtized terméke.

(Folytatjuk)

FORRÁSOK

- [1] Capria, Amerigo, Elisa Giusti, Christian Moscardini, Michele Conti, Dario Petri, Marco Martorella, and Fabrizio Berizzi. "Multifunction Imaging Passive Radar for Harbour Protection and Navigation Safety." *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 32, no. 2 (2017): pp. 30–38. <https://doi.org/10.1109/maes.2017.160025>;
- [2] Benedek, C., and M. Martorella. "Ship Structure Extraction in ISAR Image Sequences by a Markovian Approach." *IET International Conference on Radar Systems (Radar 2012)* (2012). <https://doi.org/10.1049/cp.2012.1615>;
- [3] Manno-Kovacs, Andrea, Elisa Giusti, Fabrizio Berizzi, and Levente Kovacs. "Image Based Robust Target Classification for Passive ISAR." *IEEE Sensors Journal* 19, no. 1 (2019): pp. 268–276. <https://doi.org/10.1109/jsen.2018.2876911>;
- [4] Babenko, B., Ming-Hsuan Yang, and S. Belongie. "Robust Object Tracking with Online Multiple Instance Learning." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 33, no. 8 (2011): pp. 1619–1632. <https://doi.org/10.1109/tpami.2010.226>;
- [5] Guo, Zhenhua, Lei Zhang, and David Zhang. "Rotation Invariant Texture Classification Using LBP Variance (LBPV) with Global Matching." *Pattern Recognition* 43, no. 3 (2010): pp. 706–719. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2009.08.017>;
- [6] Bunkóczy Sándor, Papp Tamás. „Bisztatikus passzív rádiólokáció.” *Repüléstudományi Közlemények, Különszám II.* (2001): pp. 187–194.;
- [7] Szökrényi Zoltán. „A radar mint a légtér valós idejű információforrásának szenzora.” *Bolyai Szemle* 25. évfolyam, 4. szám (2016): pp. 80–100.;
- [8] Szülő Ádám. „Passzív radarrendszer a légi felderítésben – WAMLAT.” *Repüléstudományi Közlemények* 24. évf. 2. szám (2012): pp. 706–717.;
- [9] Pető Tamás, Dudás Levente, Seller Rudolf. „DVB-T alapú passzív radar.” *Repüléstudományi Közlemények* 26. évf./ 2. szám (2014): pp. 489–498.

(Illusztrációk a szerzők gyűjteményéből.)