

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

Passzív radar II. rész

Előző számunkban bemutattuk a passzív radar működésének alapelvét, a cikk II. részében pedig a BME–SZTAKI–BHE Kft. kutatócsoportjának a hazai passzív radar demonstrátorának kifejlesztésében végzett tevékenységét ismertetjük olvasóinkkal.

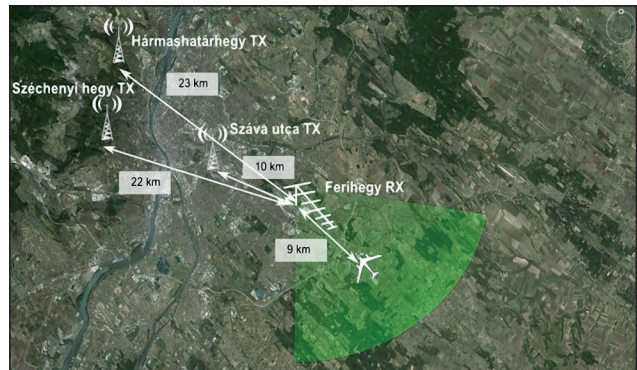
PASSZÍV RADAR HAZAI KUTATÁS-FEJLESZTÉS

A Magyar Honvédség Modernizációs Intézet vezetésével hazai bázison is folynak passzívradar-fejlesztések, amelyek során a BME–SZTAKI–BHE Kft. konzorcium kifejlesztett egy demonstrátor eszközt, amely a fejlesztés jelenlegi fázisában DVB-T megvilágítást alkalmaz.



9. ábra. ALPOK3 passzív radar demonstrátor

10. ábra. DVB-T alapú passzív radar kísérleti mérés



11. ábra. Adótornyok és vevőegység elhelyezkedése Budapest térképén

A 9. ábra a hazai passzív radar demonstrátort mutatja terepi mérés közben a Budaörsi Repülőtéren.

A jelenleg is tartó fejlesztés során, az eszköz működőképességét demonstrálandó, több alkalommal is kísérleti méréseket végeztek. Ezen mérések zömét a budapesti Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér közelében végezték, ahol a le- és felszálló repülőgépekről és környező utakon mozgó gépjárművekről rögzítettek adatokat. A DVB-T megvilágítást a Budapesten üzemelő három adótorny biztosította, ezek az adók a Széchenyi-hegyen, a Hármashatár-hegyen, illetve a Száva utcában találhatóak. A mérési elrendezés térképét a 10. ábra mutatja. A Budapesten

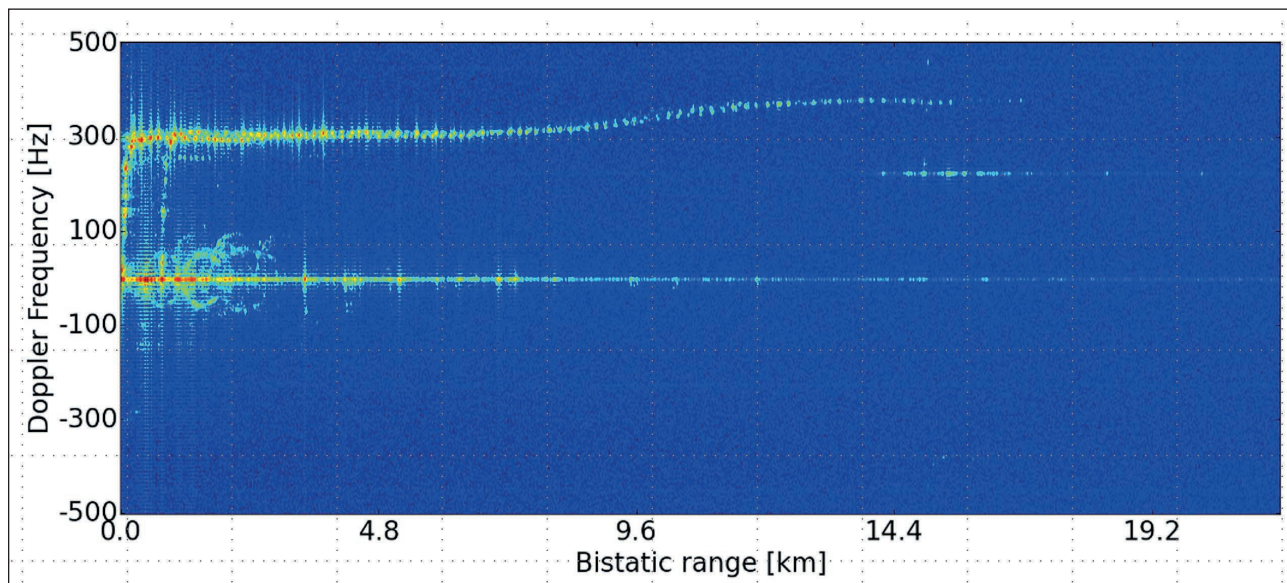
* Egyetemi adjunktus, BME Villamosmérnöki kar Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék ORCID: 0000-0003-0573-2684

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

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

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





12. ábra. DVB-T referenciamérés távolság-Doppler mátrixa végtelen utánvilágítással

üzemelő DVB-T adótornyok egyfrekvenciás SFN üzemmódban működnek.

A tesztelések során a vevőegységet a futópálya végén telepítették, így biztosítható volt a célok kis távolságon történő elhaladása. A mérést a 11. ábra mutatja be.

A fejlesztők számára a mérések során az RD-mátrix volt az alapvető kiindulási produktum. A 12. ábrán egy Ferihegyen leszálló repülőgép RD-mátrixát láthatjuk, végtelen utánvilágítással ábrázolva. Amint az a képen megfigyelhető, a sikeresen detektált cél nyomvonala tisztán látható. A nagy méretű, viszonylag gyors repülőgép detektálása mellett jelentősen kisebb sebességű és reflexiójú célokat is láthatunk, ezek a közeli autótutakon haladó gépjárművek reflexiói.

A passzív radar demonstrátorral elvégzett kísérletek eredményei jól bizonyítják, hogy DVB-T megvilágítás alkalmazásával mind a földfelszíni, mind pedig a légi célok hatékonyan felderíthetőek voltak, továbbá a kapott mérési eredményekkel a megfelelő minőségű klasszifikáció is elvégezhető.

DRÓNFERDERÍTÉS – A PASSZÍV RADAR ALKALMAZHATÓSÁGÁNAK EGY ÚJABB LEHETŐSÉGE

Az elmúlt néhány évben egyre inkább növekvő igény mutatkozik olyan multiszenzoros rendszerek kialakítására, amelyek megbízhatóan képesek felderíteni és azonosítani a légteret használó pilóta nélküli repülőgépeket. Ezen többkomponensű rendszerek egyik potenciális, különleges ké-

pességekkel rendelkező szenzorelemei lehetnek a passzív radarok is. Ennek hátterében a rendszer lehetséges frekvenciahasználati módja áll, amelynek kihasználásával VHF és UHF sávban lehetővé válik a légcsavarral rendelkező eszközök egyedi reflexiók képének azonosítása akár sűrűn lakott, szigorú frekvenciagazdálkodással rendelkező területeken is. A következő szakaszban röviden egy olyan detektálási módszert ismertetünk, amely a vezető anyagból készült propeller forgás közben előállított egyedi reflexiók képén alapul. A felderítés elméleti hátterének ismertetését követően bemutatunk egy kísérleti mérést, amellyel a kifejlesztett többszörös DVB-T alapú passzívradar-rendszer RPAS detektálásra való alkalmasságát demonstráljuk.

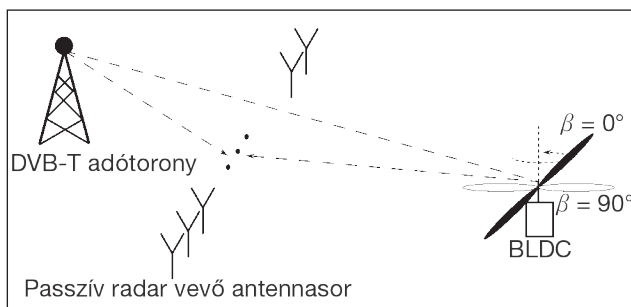
A DRÓNDETEKTÁLÁSI MÓDSZER ELMÉLETI HÁTTERE

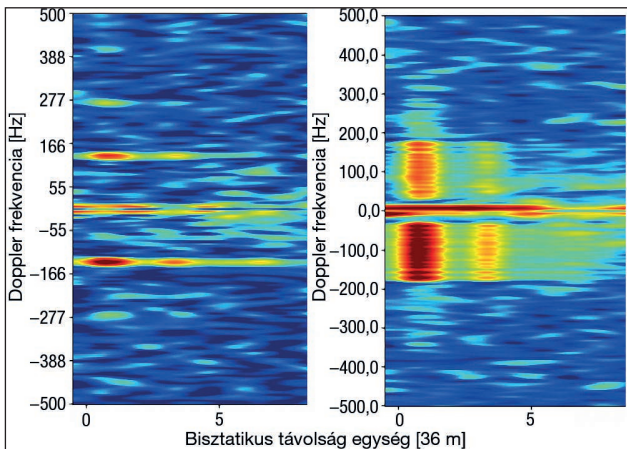
A szakirodalomban széles körben tárgyalt mikro-Doppler hatás leírja, hogy miképpen változik időben a céltárgyon belüli mozgással bíró (pl. propeller) céltárgyak reflektált jele, és így azok Doppler-spektruma. A jelenség tanulmányozása során többen megfigyelték, hogy a mikrohullámú frekvenciákon a helikopterek nagy méretű, elektromosan jól vezető anyagból készült lapátjai forgás közben modulálják a reflektált jelet; a reflektált jel Doppler-spektrumát megfigyelve harmonikus komponenseket azonosítottak, amelyek frekvenciatávolsága arányos a rotor forgási sebességének kétszeresével.

Az effektus végeredményét illetően ehhez igen hasonló, ám fizikai hátterét tekintve a mikro-Doppler hatástól eltérő jelenség zajlik le alacsonyabb frekvenciákon, ahol a légcsvavar fizikai mérete összemérhető a megvilágító jel hullámhosszával. Ekkor ugyanis a mikro-Doppler hatást leíró szórópont modell már nem alkalmazható. Ehelyett azonban korábbi kutatások kimutatták, hogy a kis méretű több rotoros pilóta nélküli repülőgépek reflexiók spektruma az UHF sávban rezonáns modellt felhasználva jól leírható.

A 13. ábrán alkalmazott jelölésrendszerrel összhangban $\beta = 0^\circ$ esetén a megfigyelt légcsvavar a teljes beeső teljesítményt a radar antennarendszerének irányába, $\beta = 90^\circ$ -os állászög esetén pedig azzal párhuzamos irányba sugározza vissza. A forgás következtében az antennarendszer irányába visszasugárzott jel teljesítménye periodikusan

13. ábra. Forgó légcsvavar észlelésének sematikus rajza





14. ábra. RPAS rotor reflexiója a távolság-Doppler mátrixon

változik, amelynek következtében a jel spektrumában harmonikus komponensek jelennek meg. Egy passzív radar egység, amely képes a reflektált jel spektrumának analízisére, azonosíthatja ezeket az egyedi spektrális komponenseket.

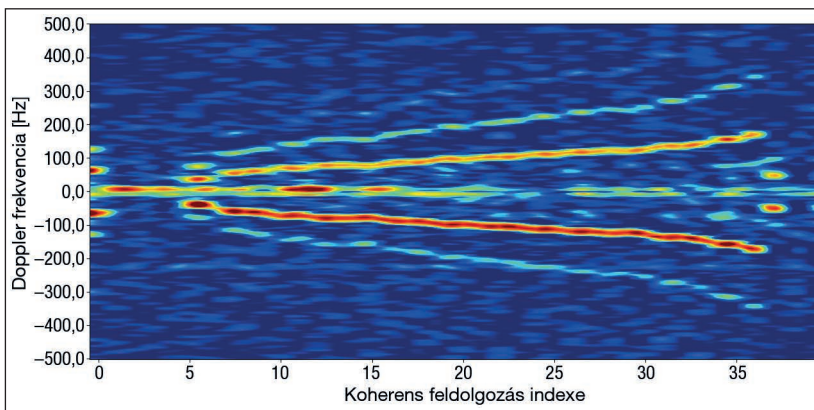
Fontos kiemelni, hogy a tárgyalt jelenség kizárólag a rezonancia frekvenciához közel domináns, és ekkor a legerőteljesebb a reflektált jel is, hiszen a megfigyelt objektum RCS-e ekkor maximális (Mie-régió). Mivel a kereskedelemben nagy számban kapható RPAS eszközök propellere az UHF sávban található DVB-T adások hullámhosszára nézve rezonáns, kézenfekvően adódik a lehetőség a jelenség passzív radarral történő kihasználására. A következő szakaszban egy valós terepi mérésen keresztül mutatjuk be, hogy a fejlesztett passzív rendszer képes a felvázolt detektálási módszer alkalmazásával RPAS felderítésre.

DETEKTÁLÁSI TESZTMÉRÉS

A tesztkísérlet – amelyhez a három 746 MHz-en üzemelő DVB-T adótornyot megvilágító forrásoként használták – a Budaörsi Repülőtéren zajlott. A mérés precíz ellenőrzéséhez egy propeller tesztpadot alkalmaztak, amellyel egy, a méréshez használt propeller távolsága, betekintési szöge és forgásának sebessége is szabályozható volt.

A 14. ábra bal oldalán az ALPOK3 passzív radar által számított Range-Doppler mátrix látható fix propeller forgási sebesség mellett. Oldalán figyeljük meg, hogy az első távolságcellán Doppler-frekvenciában jól azonosíthatók a

15. ábra. Hosszú távú idő – Doppler-frekvencia diagram



légcsavar forgása közben keltett harmonikus spektrális komponensek. A 14. ábra jobb oldalán több, növekvő rotor forgási sebesség méréséből kapott RD mátrix egymásra vetítve látható. Mivel a Budaörsi Repülőtéren két DVB-T adó is érdemben megvilágította a drónt, ezért a geometriából adódóan két különböző úthossz különbség is kialakult. Láthatóan a nagyobb eltéréshez tartozó megvilágítás gyengébb volt a repülőtéren.

Jelölje a 14. ábrán illusztrált Range-Doppler mátrixot a $|\chi(\tau, f)|^p$ függvényt, ahol p a koherensen feldolgozott időintervallum indexét jelöli. Ekkor az adott távolságcellához tartozó Doppler irányú metszetekből készített mátrix $[|\chi(\tau = \tau_0, f)|^0, |\chi(\tau = \tau_0, f)|^1, \dots, |\chi(\tau = \tau_0, f)|^{p-1}]$ a 15. ábrán látható. Ebben a tartományban jól kivehető a légcsavar forgási sebességének időbeli változása.

Összességében a fenti kísérletek alapján kijelenthetjük, hogy a DVB-T alapú passzív radar technológia alkalmas a drónok felderítésére és annak eldöntésére is, hogy ténylegesen drónnal állunk-e szemben és nem madárral. Természetesen a kis méretű drónok felderítése sokkal kisebb hatótávolságú, mint például egy utasszállító repülőgépe, ugyanis egy kis méretű drónradar hatásos keresztmetszete ~ -20 dBm². Elméleti vizsgálataink és az eddigi mérésekkel nyert tapasztalataink alapján ez a felderítési távolság ~ 500 m, optimális megvilágítási feltételek mellett ~ 1 km.

CÉLPONTOK ÉSZLELÉSE, OSZTÁLYOZÁSA, KÖVETÉSE

Passzív radarokkal történő mérések során lehetőség adódik a mérésekből számított Range-Doppler mátrixok/képek, illetve multisztatikus passzív radar – pl. [1] – konfigurációk esetén az előállított Range-Crossrange (RC) mátrixok/képek alapján különféle célpontok képi információkon alapuló észlelésére, osztályozására és követésére is. Ezen módszerek használhatók önmagukban, vagy a jelfeldolgozáson alapuló „klasszikus” detektorok fúziójával is.

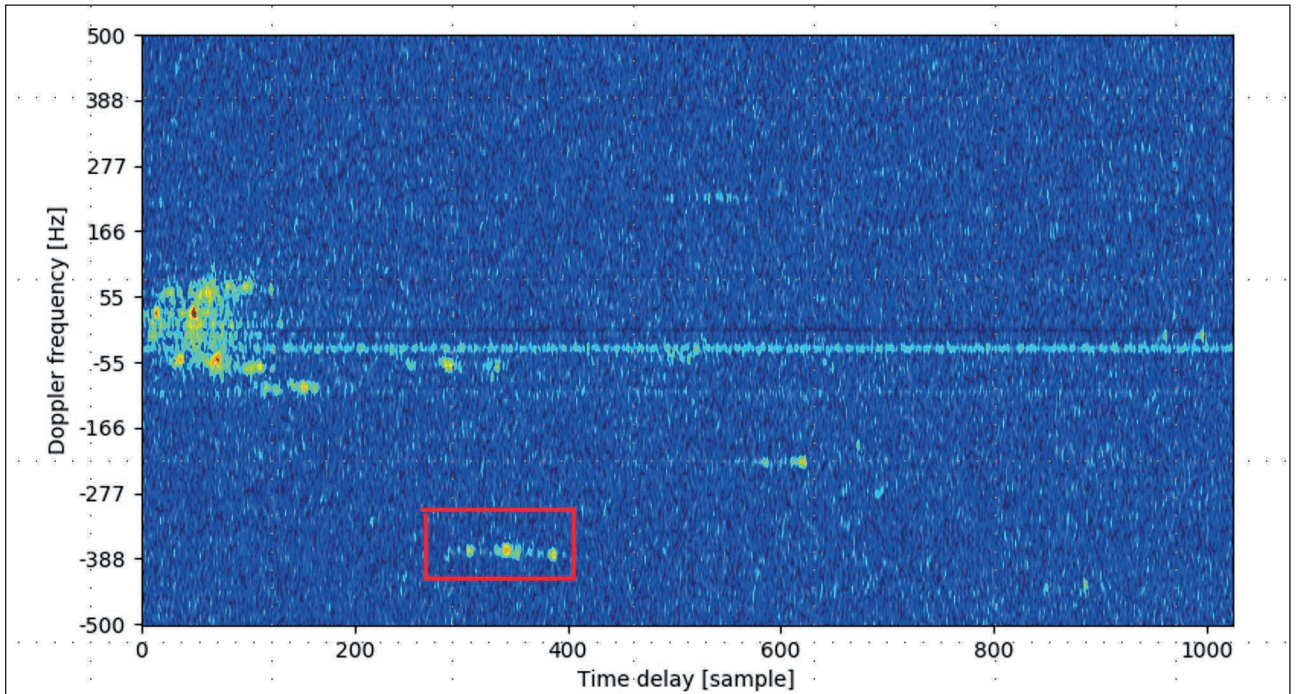
A mérések során keletkező RD, illetve RC képeken (16. ábra, illetve 17. ábra) különféle képi jellemzők alapján lehetőség van célpontregiók kinyerésére. Ilyen módszerek pl. Markov-modell illesztések [2] (18. ábra.) vagy képi jellemzők (pl. kontúr, irányultság, lokális mintázat) szerinti szegmentálásával [3] képesek célpontregiók megadására.

Az RD mátrixok képein lokális szűrési és összefüggő régiókeresési lépésekkel lehetőség nyílik célpontregiók kijelölésére. A lehetséges célpontregiókat ezután gépi tanulás alkalmazó, tulajdonság alapú követési algoritmusokkal képesek leszünk valós időben követni.

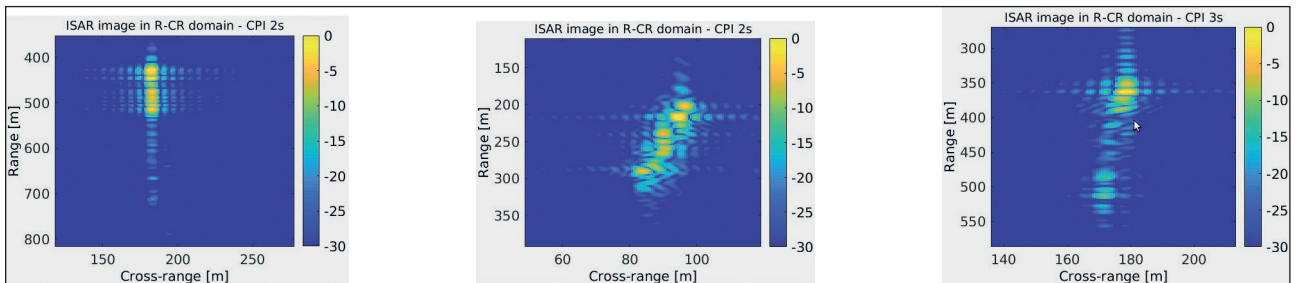
Egy követési algoritmus feladata az is, hogy nem valódi jelzéseket (amelyek nem valós mozgó célpontokról adott visszaverődésekből keletkeztek) időben kiszűrje, vagyis egy célpontkövetési megoldás egyúttal zajszűrőként is működik. Például egy gépi tanuláson alapuló követési algoritmusra [4] épített célpontkövetés és pályabecslés tipikusan hosszasan és stabilan képes egy célpont mozgását követni, míg a nem valódi, vagy zajpontok pályája gyorsan megsemmisül (2. táblázat).

Fontos a célpontészlelések (detekciók) esetén is, lehetőleg még a követés előtt csökkenteni a nem valódi észlelések számát. A 19. ábra egy lokális textúraszűrő elforgatás és skála invariáns

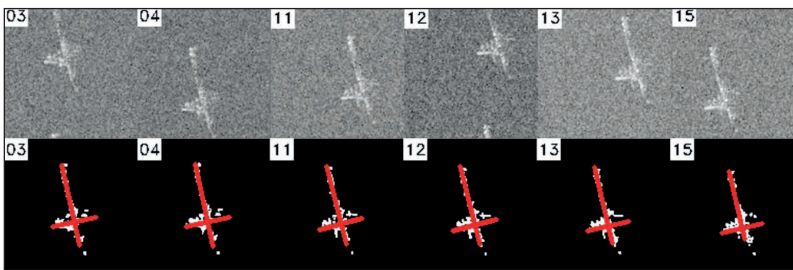




16. ábra. Passzív radar RD mátrixa, piros téglalappal jelölt repülőgép célponttal

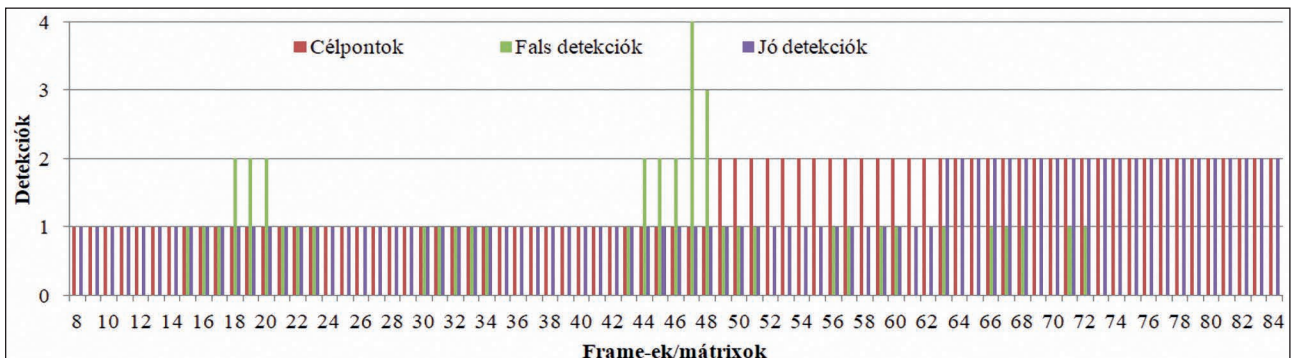


17. ábra. Multisztatikus passzív radar RC mátrixai



18. ábra. Mintaillesztésen alapuló célpont-detektor bemenetei, illetve kimenetei RC-képeken

19. ábra. Jó, illetve téves észlelések aránya egy felvételsorozaton



2. táblázat. Fals (FP) és valódi (TP) célpontok mozgáspályáinak átlagos élettartama a követés során

FP célpont ID	22	24	29	31	38	41	44	53	63	64	89	92	104	123	125
élettartam	7	2	19	4	5	2	3	1	2	1	4	4	4	1	7
átlag	4,40														
TP célpont ID	21	83													
élettartam	69	31													
átlag	50,00														

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	0.8	0.1	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0.1	0
B	0	0.7	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0.2	0.1
C	0.1	0	0.4	0.1	0	0	0.1	0.1	0	0	0.1	0.1
D	0.3	0	0	0.5	0	0	0	0.1	0	0.1	0	0.1
E	0	0	0	0	0.4	0.2	0	0	0.3	0	0	0
F	0	0	0	0	0.1	0.8	0	0	0.1	0	0	0
G	0	0	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0	0.2
H	0	0.1	0	0	0	0	0.1	0.6	0	0.2	0.1	0.1
I	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0.9	0	0	0
J	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8	0.1	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0.8	0.1
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.8

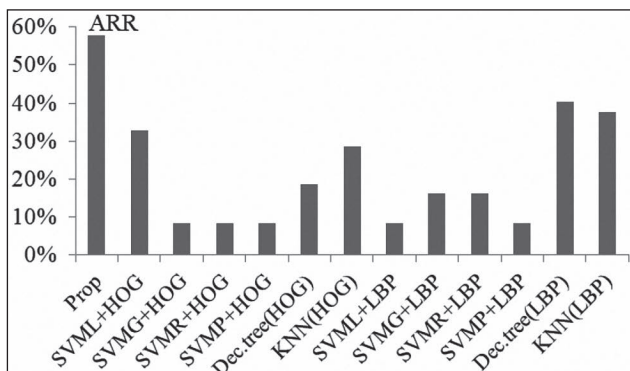
20. ábra. Osztályozási konfúziós mátrix

leírón [5] alapuló észlelési megoldás jó, illetve fals észleléseinek arányát mutatja egy felvételen. Általában elkerülhetetlenek a fals jelzések, ezért robusztus algoritmusok a detekciós és követési lépések fúziójával érnek el stabilabb működést.

Passzív radar felvételeiből számított képekből kinyert célpontok osztályozására is folynak kutatási munkák. A 20. ábra és a 21. ábra az általunk kidolgozott osztályozási megoldás [3] konfúziós adatait szemlélteti 12 osztály (A-L) esetén, illetve összehasonlítást ábrázol egyéb, szintén képi jellemzőkön alapuló osztálybecslési lehetőségekkel.

Ezen kutatás-fejlesztési irányok azt mutatják, hogy létezik valós és használható lehetőség passzívradar-mérések képi nézőpontú feldolgozására, mind detekciós, mind követési vagy osztályozási célból. Természetesen számos

21. ábra. Összehasonlítás egyéb, képi jellemzőkön alapuló osztálybecslési lehetőségekkel (A „Prop” oszlop jelöli a szerzők által kidolgozott módszert)



továbbfejlesztésre és jelentős robusztusság-növelésre is van lehetőség, amelyek felderítése állandó célja a területen folyó kutatásoknak.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Magyar Honvédség Modernizációs Intézetnek a passzív radar kutatás-fejlesztési munkájuk támogatásáért.

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] Bunkóczi Sándor, Papp Tamás. „Bisztatikus passzív rádiolokáció.” *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.)