

Pető Tamás, Seller Rudolf

KORSZERŰ PASSZÍV RADAR TECHNIKÁK

Mára a modern radarok egy jelentős irányvonalát a passzív elven működő nem kooperatív rendszerek képviselik. Ezt első sorban a nagy sávzélességű digitális modulációt alkalmazó megvilágító források elterjedésének és a modern jelfeldolgozó architektúráknak megjelenésének köszönheti. A cikk rövid betekintést nyújt a passzív radarok jelenkori helyzetébe, beleértve a lehetségesen alkalmazható megvilágító forrásokat és azok tulajdonságait. A passzív elven működő radarok létjogosultságát DVB-T forrásjel használatával végrehajtott demonstrációs kísérletekkel igazoljuk.

Kulcsszavak: passzív radar, bisztatikus radar jelfeldolgozás, PBR, PCL, DVB-T

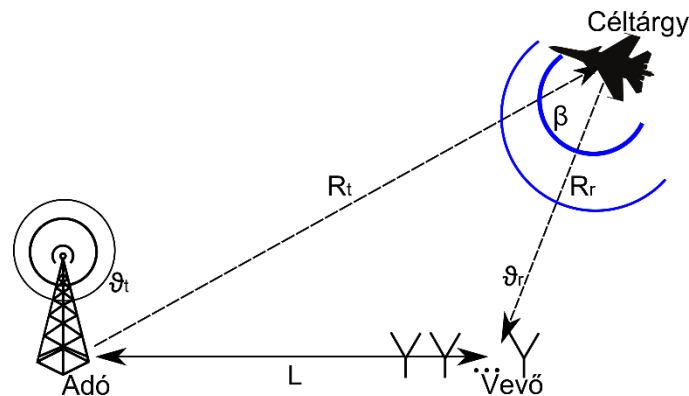
Az elmúlt időszakban a rádiófrekvenciás környezet egyre növekvő kihasználtsága ösztönözte, a modern jelfeldolgozó architektúrák pedig lehetővé tették, hogy a passzív elven működő radar kísérletek egyre jobban az előtérbe kerüljenek. A területen aktívan tevékenykedő kutatócsoportok számos lehetségesen alkalmazható megvilágító forrással hajtottak végre sikeres kísérleteket. Többek között FM, Digital Audio Broadcasting (DAB), Digital Video Broadcasting – Terrestrial (DVB-T), GSM, Long Term Evolution (LTE) és WiFi adásokkal is. Ezek az alkalmazott megvilágító források számos kritériumnak kell, hogy megfeleljenek a nagy hatótávolságú és pontos felderítés eléréséhez. A különböző célra használt forrásokat és az azokkal elérhető felderítési paramétereket a cikk 2. szakaszában részleteiben tárgyaljuk. Egy hatékony rendszer megvalósításához emellett nagy hangsúlyt kell fektetni az alkalmazott jelfeldolgozó algoritmusok kiválasztására és azok megfelelő implementálására is. Míg a hagyományos aktív radarok, előzetesen megtervezett, felderítési szempontból jó paraméterekkel rendelkező adásjellel dolgoznak, addig a passzív rendszerek kénytelenek a rendelkezésre álló megvilágító forrás képességeivel együtt élni. Ez a rendszer számos pontján többlet jelfeldolgozási igényvel jár. A főbb problémák közül néhányat a 3. szakaszban emelünk ki.

A BME Szélessávú Hírközlés és Villamosság-tanszékének Mikrohullámú Távérzékelés Laboratóriumában egy DVB-T alapú többszatornás rendszer került kifejlesztésre. A passzív radar állomás fő céljai közé tartozik a tudományos célú kutatások támogatása és egy demonstrációs platform kifejlesztése. A cikk 4. szakaszában a rendszer főbb egységei és néhány kísérleti eredmény kerül bemutatásra.

PASSZÍV MÉRÉSI ELV

A mérés alapelvét az 1. ábra illusztrálja. Az adótoronyból kisugárzott megvilágító jel a legegyszerűbb esetben két különböző úton éri el a radar vevőegységét. Az egyik a közvetlen jelút, a másik pedig a repülőgépről reflektált jel útja. A két jelkomponens az eltérő távolságokból adódóan különböző időpillanatokban érkezik meg a vevőegységhez, ezen kívül a vevőegységhez képest mozgó célról reflektált jel Doppler eltolást is szenved. A reflektált jel időkésltetése a bisztatikus távolságtól függ (1) szerint, ahol L az adó és vevőegység közti távolság, R_t az adó és a céltárgy közötti távolság, R_r a céltárgy és vevő közötti távolság, c pedig a fénysebességet jelöli.

$$\frac{R_t + R_r - L}{c} = \tau \quad (1)$$



1. ábra Bisztatikus radar geometria

Az észlelt Doppler frekvencia függ a céltárgy sebességétől, irányától, illetve a bisztatikus β szögtől is. A passzív elvű mérés eredményeképpen tehát közvetlenül a bisztatikus távolságot és Doppler frekvenciát határozhatjuk meg. Ez azt jelenti, hogy egy észlelt cél lehetséges pozíciói egy elipszisen helyezkednek el. A cél pontos meghatározásához több bisztatikus mérési párra, vagy a detektált reflexió azimuth és elevációs szögeinek mérésére van szükség.

LEHETSÉGES MEGVILÁGÍTÓ FORRÁSOK

A megfelelő megvilágító forrás kiválasztása minden esetben specifikus, amely függ a detektálható céloktól az aktuális terepviszonyoktól és a kisugárzott jel paramétereitől is. A szakaszban áttekintjük a leggyakrabban használt illuminátorokat, azok főbb paramétereit, illetve röviden említést teszünk néhány jelenleg működő kísérleti rendszerről is. Jelen cikkben az FM, DAB, DVB-T, GSM, LTE, WiFi és GNSS jeleket vizsgáljuk meg.

Megvilágító forrás	Frekvenciasáv [MHz]	Tipikus adóteljesítmény (EIRP)	Sávszélesség [MHz]	Elérhető távolságfelbontás	Hatótávolság
FM rádió	88–108	10 kW–100 kW	~ 0,15	~ 1 km	~ 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	~ 100 m
GNSS (GLONASS)	1600	300W–500 W	5	30 m	~ 500 m

1. táblázat Alkalmazható megvilágító források és paramétereik

Az alkalmazható források közül a legelterjedtebb az FM rádióadás. Ennek fő okai a sávszélességből adódó egyszerű kezelhetőség, illetve a nagyteljesítményű adótornyok által biztosított jó megvilágítottság. Az elmúlt időszakban számos kísérleti és már üzemszerűen működtetett rendszer is látott napvilágot. A lengyel PaRaDe FM rádió alapú passzív radar demonstrációs rendszerrel nagyméretű Airbus A320-as repülőgépet néhányszor 100 km-es távolságban is sikerült

követni [2]. A jel alkalmazhatóságának egyik nagy hátránya viszont az alacsony sávszélességből adódó gyenge távolságbontás. Emellett a felderítés bizonytalansága változik a sugárzott adásjel tartalmától is. Általánososan elmondható, hogy a gyorsan és véletlenszerűen változó tartalom jó felderítési paramétereket biztosít.

A DAB és DVB-T adások a nagy adóteljesítmény mellett relatív jó távolságbontást is képesek biztosítani. A források hatékony kihasználásának egyik nehézsége az egyfrekvenciás (SFN) működés, vagyis, hogy a földrajzilag egymáshoz közel lévő adótornyok is sugározhatnak ugyanazon a frekvencián. Ez nagymértékben megnehezíti a célok azonosítását, valamint a vevőegység megvédését a nagyteljesítményű direkt jel okozta elvakítástól. Ez ellen a legkönnyebben a megfelelő telepítési körülmények biztosításával tudunk védekezni. A budapesti Liszt Ferenc Nemzetközi repülőtéren végzett kísérletekben egy négy csatornás kísérleti rendszerrel 30 km-es távolság felett is sikerült detektálnunk leszálló repülőgépeket [4].

A GSM rendszer kiváltsága a rendkívül jó területi lefedettség, ez azonban csak lokálisan jelent jó megvilágítást, ugyanis a használt adóteljesítmény igen alacsony, emellett pedig az alacsony sávszélesség is gyenge felbontást képes csak biztosítani. A Fraunhofer intézet (FGAN) munkatársai kísérleti méréseket végeztek 32 csatornás passzív radar rendszerrel. A kísérleti méréseken kooperatív kisbusz méretű céltárgyat sikeresen detektálták 2 km-es távolságon [5], [6]. Mivel a megvilágításból adódóan itt többnyire közeli, földfelszíni célokat tudunk detektálni a közel 1 km-es távolságbontás számottevő problémát jelent. Jó alternatíva lehet így a 4. generációs hálózatok által használt LTE jel felhasználása, amivel akár 10 m alatti felbontást is képesek vagyunk biztosítani. Fontos megjegyezni azonban, hogy az LTE esetében a használt sávszélesség nem állandó és a kisugárzott jel spektrális eloszlása nem feltétlenül frekvencia folytonos.

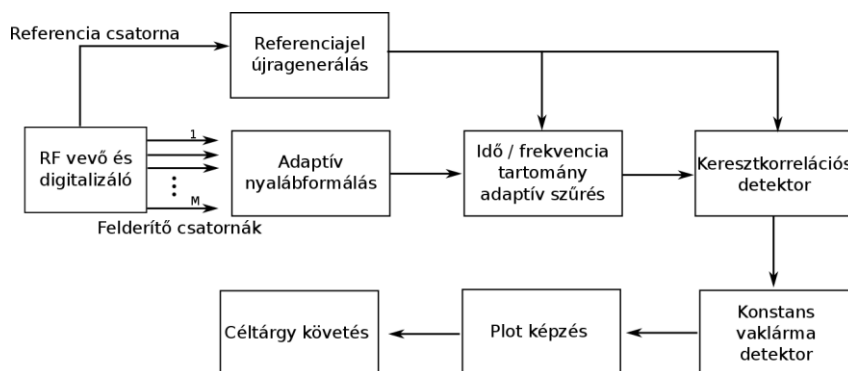
A WiFi jelek felhasználása ezzel szemben állandó és rendkívül jó távolságbontást képes biztosítani. Fabiola Colone és kutató társai repülőtéren és zárt teremben is végeztek kísérleti méréseket WiFi forrásjel használatával [3]. Az eredményeikből kiderül, hogy akár beltéri körülmények között is lehetséges két egymás mellett haladó embert elkülöníteni. A repülőtéren végzett méréseken sikerrel detektáltak kis méretű repülőgépeket, mozgó autókat illetve pilóta nélküli repülőgépeket is. A jel felhasználásához azonban szofisztikált clutter kioltó algoritmusokra és referenciajel előfeldolgozásra van szükség. A WiFi jel kihasználásnak hátránya a kis adóteljesítmény így csak kis méretű területen használható eredményesen. Ajánlott felhasználása ebből adódóan kisebb területek védelmére korlátozódik. Behatólag, kis méretű pilóta nélküli repülőgépek észlelésére vagy akár járműforgalom monitorozására.

A rádiófrekvenciásan megvilágított terület nagysága és minősége az adóteljesítmény nagysága mellett jelentősen függ az adótorny antenna iránykarakteristikájától is. 2014-ben Dudás Levente és kollégái magas légköri ballonnal végzett méréseket hajtottak végre [1], amelyből megismertük a DVB-T adótornyok nagy magasságban kisugárzott teljesítményét. A kísérletekből kiderült, hogy akár néhányszor 10 km magasságban is jelentős teljesítményű EM sugárzás mérhető az UHF sávban. Ez egyrészt a közeli DVB-T adótornyoktól, másrészt a rádióhorizont kinyílásával a földrajzilag jóval távolabb telepített adóállomásoktól is származik. A mérési eredményekből adódóan kijelenthetjük, hogy a nagy teljesítményű televíziózáshoz használt műsorszóró adók jó megvilágítást biztosítanak a magasabb légrétegekben ezért jól alkalmazha-

tóak repülőgépek detektálására. Az alacsony teljesítményszinttel működő GSM és WiFi rendszerek ezzel szemben a földfelszínen kis távolságra képesek jó megvilágítást biztosítani.

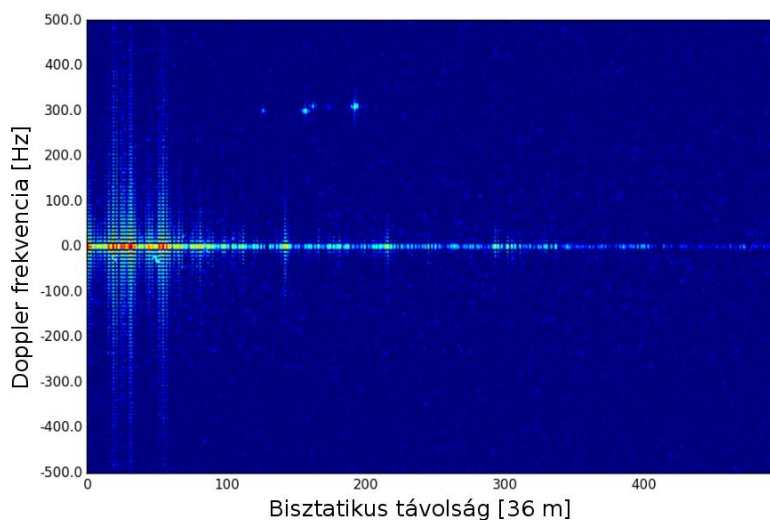
JELFELDOLGOZÁS

A passzív elvű mérésből adódóan számos probléma merül fel, melyek megoldása a digitális jelfeldolgozásra hárul. Ilyen többek között az clutter kioltás a megfelelő detektor alkalmazása a céltárgy iránymérés illetve a célkövetés is.



2.ábra Passzív radar jelfeldolgozás

Az általánosan alkalmazott feldolgozási sémát a 2. ábra illusztrálja. A feldolgozás központi eleme a mozgó objektumot észlelésért felelős keresztkorrelációs detektor. A keresztkorrelációt az adótoronytól kisugárzott referenciajel és a megfigyelt területről begyűjtött felderítő csatorna vett jele között végezzük el. A művelet elvégzésének eredményeképpen megkapjuk a távolság és Dopplerfrekvencia tartományban értelmezett felbontását a vett jelnek. Egy ilyen távolság Doppler mátrixot illusztrál a 3. ábra.

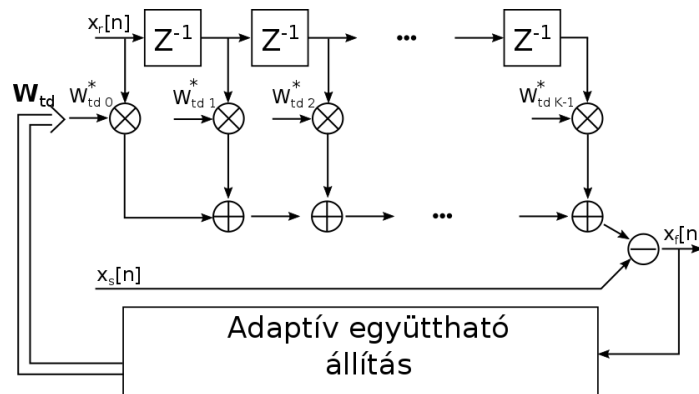


3.ábra Távolság-Doppler mátrix a keresztkorrelációs detektor kimenetén

A keresztkorrelációs detektor alkalmazásával jól láthatóan elkülöníthetővé válnak a mozgó célok az álló céloktól, ami nagymértékben megkönnyíti a detektálást. Emellett a detektor másik fontos feladata megfelelő nyereség biztosítása. A céltárgyról reflektált jel legtöbbször olyan alacsony jelszinttel érkezik meg a vevőegység antennájához, hogy az jóval a vevőrendszer belső

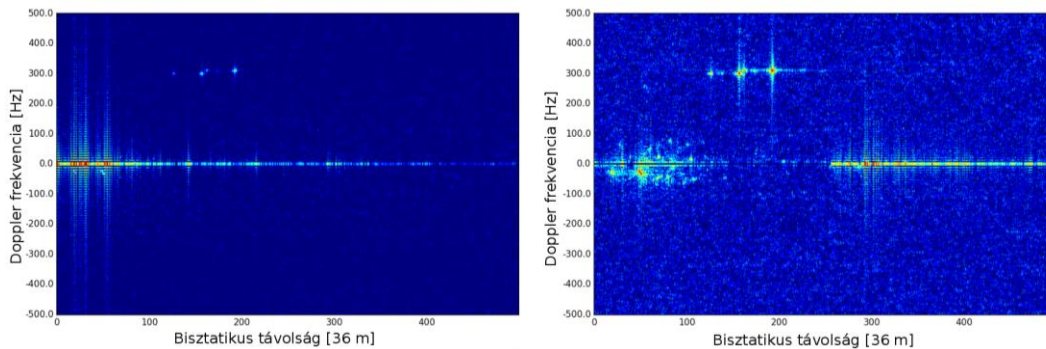
zaja alatt található. Ahhoz, hogy ezt az alacsony szintű jelet kiemeljük és észlelni tudjuk, koherens integrálásra van szükségünk, amit a keresztkorrelációs detektor biztosít számunkra.

A passzív radar rendszerek nagy hatótávolságú működéséhez egy jelentős problémát kell megoldani, ez pedig a direkt jel okozta interferencia elnyomása. A probléma forrása a felderítőcsatornaként használt vevőfokozatba közvetlen, illetve több utas terjedésen keresztül bejutó referenciajel. Ezeknek a jelkomponenseknek az energiája több nagyságrenddel is nagyobb lehet az észlelni kívánt céltárgy reflexiójától, ami annak elfedését okozza. A nagy teljesítménykülönbségből adódó maszkoló hatás ellen a rendszer több különböző pontján is védekeznek. Az egyik leghatékonyabb jelfeldolgozási eljárás erre a problémára a Wiener szűrő alkalmazása. Az utóbbi időben számos időtartományban működő szűrő algoritmust javasoltak. Ezen algoritmus működésének közös alapja, hogy a vételi oldalon előálló referenciajelet használják fel a felderítőcsatornába beszűrődő statikus reflexiók kiszűrésére. Az algoritmus blokkvázlatát a 4. ábra mutatja be.



4.ábra Időtartománybeli interferencia szűrés blokkvázlata

A szűrőblokknak két bemenete van, a referencia jel, illetve a felderítő jel. A referenciajeltől a FIR szűrőn áthaladva előáll a felderítőcsatornán mérhető közvetlen úton érkező jelkomponens és annak időben eltoltt másolatai. A szűrő kimenetén ezt a segéd jelet kivonjuk a felderítőcsatorna jeléből, amellyel a megfelelő együtthatók beállítása mellett kiolthatjuk a nagyteljesítményű statikus reflexiókat. A szűrő működését valós mérési eredményeken a 5. ábra mutatja be. A baloldali ábrán a keresztkorrelációs detektor kimenetét látjuk a szűrő alkalmazása nélkül, a jobb oldali ábrán pedig a szűrő alkalmazásával. A statikus, zéró Doppler frekvenciával rendelkező jelkomponensek eltűnése tisztán látható, emellett észrevehetjük, hogy a hasznos céltárgy-reflexió korrelációs csúcsa jóval nagyobb amplitúdójú. Szintén érdemes megfigyelni, hogy egyéb, alacsony Doppler frekvenciával rendelkező célok is észlelhetővé váltak.



5.ábra Zéró Doppler interferenciaszűrés hatása a távolság-Doppler frekvencia mátrixban

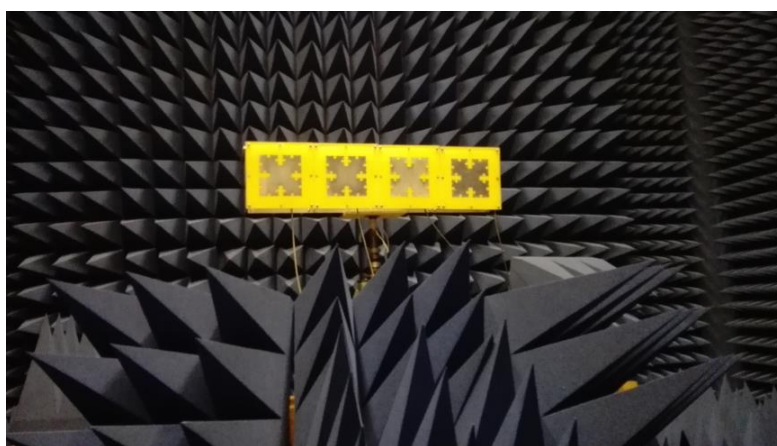
A direkt jel elnyomásában ezen kívül komoly szerepet vállal a felderítőcsatornán használt antennarendszer. A digitális nyalábformálási technikák alkalmazásával lehetőség nyílik a vételi iránykarakterisztika megfelelő módon történő kialakítására. A direkt jel irányába null helyeket szintetizálhatunk, míg a detektálni kívánt cél felé főnyalábot alakíthatunk ki. Ezzel a módszerrel tovább csökkenthetjük a reflektált jel és direkt jel közötti jelentős jelszint különbséget. Emellett a detektált cél iránymérésére is lehetőség nyílik, aminek fontos szerepe van a cél pontos lokalizálásában.

Azok a megvilágító források, amelyek digitális modulációt alkalmaznak, lehetőséget nyújtanak arra, hogy a vételi oldalon tökéletesen visszaállítsuk eredeti jelalakjukat. Erre alapvetően azért van szükség, mert a többutas terjedéssel és zajjal terhelt referenciajel a keresztkorrelációs detektor és az időtartományban működő szűrő hatásfokának degradációját okozza. Ezt a módszert az FM műsorszórási jel kivételével az összes itt tárgyalt illuminátor esetében széles körben alkalmazzák.

DVB-T DEMONSTRÁCIÓS RENDSZER

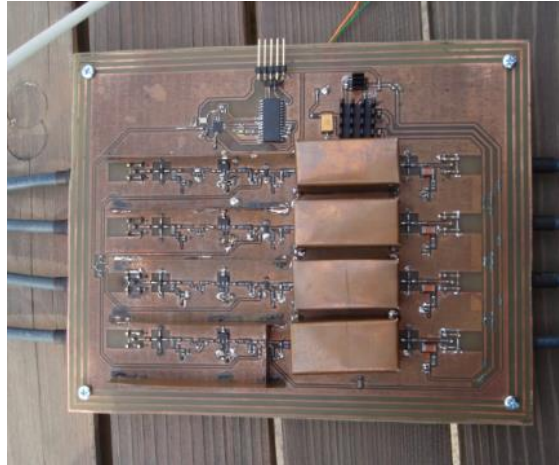
A Mikrohullámú Távérzékelés Laboratóriumban 2014-től kezdődően egy 4 csatornás DVB-T alapú passzív radar demonstrációs rendszer került kifejlesztésre beleértve annak hardveres és szoftveres részegységeit is (antennarendszer, rádiófrekvenciás vevőegység, jelfeldolgozás során használt algoritmusok). A fejlesztett vevőrendszer nagy integráltságú célalkatrészek alkalmazásával készült így a jelenleg publikált hasonló kísérleti rendszerekhez képest kisebb méretű és fogyasztású eszközről beszélünk.

A vevőrendszer hardveres oldalon három, nagyobb részegységből tevődik össze. A felderítőcsatornán alkalmazott lineáris antennarendszerből, a rádiófrekvenciás front-end egységből és a digitális adatgyűjtő kártyából. A négyelemű antennarendszer reflexiómentesített szobában készült képe a 6. ábrán látható. Az antennarendszer elemi sugárzója egy Koch fraktál patch antenna. Ennek a struktúrának az alkalmazása biztosít lehetőséget számunkra, hogy az egyes antennaelemek kellően kis méretűek legyenek így elkerülhető az irányszögtartományban jelentkező ál célok megjelenése.



6. ábra DVB-T alapú passzív radar demonstrátor antennarendszere

Az antennarendszerről érkező nagyfrekvenciás jeleket az RF front-end fogadja, majd kondicionálja, szűri és középfrekvenciára keveri. Az egységről készült kép a 7. ábrán látható.



7.ábra UHF sávú négy csatornás RF front-end

Az analóg középfrekvenciás kimenetek ezután egy digitális adatgyűjtő kártyára érkeznek, ahol első lépésben megtörténik a jelek koherens digitalizálása, majd előfeldolgozása egy FPGA áramkörön belül. Az alkalmazott FPGA áramkör egy olyan rendszerchip része, amely egy ARM CPU-val egy tokon belül került kialakításra. A kártya így közvetlenül képes nagyteljesítményű jelfeldolgozási feladatok elvégzésére. A feldolgozott minták az ARM processzoron keresztül Gigabit Etherneten tölthetők le a kártyáról.



8.ábra Adatgyűjtő és jelfeldolgozó kártya

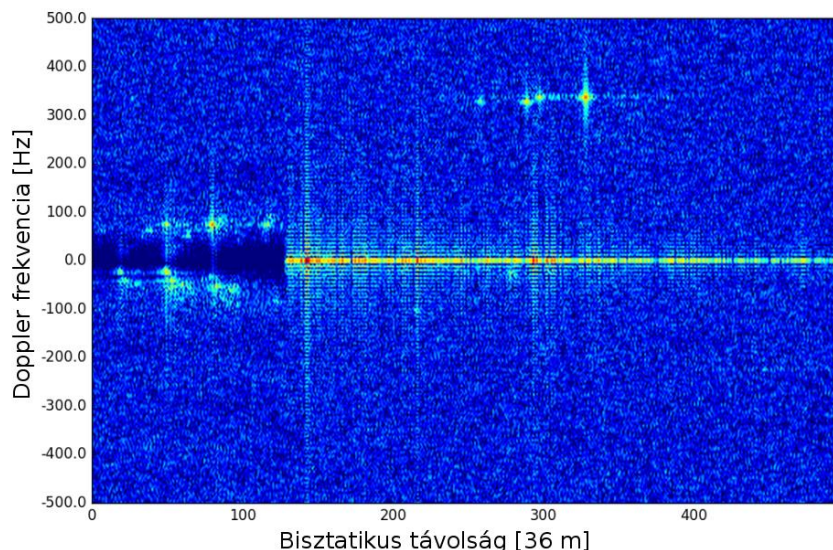


9.ábra Passzív radar vevőegység a demonstrációs mérésen

A következőekben a demonstrációs rendszerrel végzett kísérleti eredmény kerülnek bemutatásra. A mérés helyszínéül a budapesti Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtérrel választottuk a közel elhaladó céltárgyak által biztosított jól kontrollálható mérési körülmények eléréséhez.

A passzív radar vevőrendszert a futópálya végén állítottuk fel, ahol leszálló repülőgépeket figyeltünk meg. A mérés elrendezéséről készített kép a 9. ábrán látható.

A céltárgyak megvilágítását a Budapest körzetében működő DVB-T adótornyok szolgáltatták. A jelenleg működő három adótorny egyfrekvenciás (SFN) működési módot követ, amely szerint az adótornyok ugyanazon a frekvencián, ugyanazt a tartalmat sugározzák azonban az adások között precízen beállított fix késleltetés van. Az ebből a működésből adódó hatásokat megfigyelhetjük a mérésen kiszámított távolság-Doppler mátrixon a 10. ábrán, ahol céltárgyhoz tartozó diszkrét reflexió csúcs helyett több egymáshoz közeli reflektált jelkomponenst is azonosítani tudunk. Szintén érdekes megfigyelni, hogy a különböző adótornyok megvilágításából érkező reflexiók eltérő bisztatikus geometriából is származnak, ezért a reflexiók Doppler frekvenciában is eltérnek. A leszálló nagyméretű utas szállító repülőgép mellett több, lassan mozgó járművet, autót is azonosíthatunk.



10.ábra Detektált leszálló repülőgép

A méréseken a legtávolabbi észlelt céltárgy reflexió meghaladja a 30 km -es távolságot.

PERSPEKTÍVÁK

A jelenleg működő kísérleti rendszerek jól mutatják a technológiában rejlő lehetőségeket. Fontos azonban kiemelnünk, hogy a passzív radar rendszerek működésükből adódóan nem, vagy csak részben képesek átvenni a hagyományos aktív radarok feladatát. A megbízható működés biztosításához számos kísérleti mérésre és a használt eljárások finomítására van szükség. Emellett a hangsúlyt kell fektetnünk a jelenleg fejlesztés alatt álló új generációs távközlési és műszórák jelek kivizsgálására is (DVB-T2, 5G, V2X), hiszen a közeljövőben ezen források biztosítják majd a passzív radarok által is használható rádiófrekvenciás megvilágítást.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Dudás Levente, Szűcs László, Gschwindt András: A SMOG-1 kisműhold spektrummonitorozó rendszere, Repüléstudományi Közlemények XXVII: (1) pp. 85-105. (2015)
- [2] Mateusz Malanowski, Krzysztof Kulpa, Janusz Kulpa, Piotr Samczynski, Jacek Misiurewicz: Analysis of detection range of FM-based passive radar, IET Radar, Sonar & Navigation, vol 8, no. 2, pp 153-159, 2014 február
- [3] D. Pastina, F. Colone, T. Martelli, P. Falcone: Parasitic exploitation of WiFi signals for indoor radar surveillance, IEEE Transaction on Vehicular Technology, vol 64., no. 4, pp. 1401-1415, 2015 április
- [4] Pető Tamás, Seller Rudolf: Quad channel DVB-T based passive radar, 17th International Radar Symposium (IRS), Prága, Csehország 2016
- [5] Reda Zemhari, Ulrich Nickel, Wulf-Dieter Wirth: GSM Passive Radar for Medium Range Surveillance, 6th European Radar Conference, Róma, Olaszország 2009
- [6] D. Petri, F. Berizzi, M. Martorella, E. Dalle Mese, A. Capria: A Software Defined UMTS Passive Radar Demonstrator, 11th International Radar Symposium, Vilnius, Litvánia, 2011
- [7] H. Ma, M. Antoniou, D. Pastina, F. Santi, F. Pieralice, M. Bucciarelli, M. Cherniakov: Maritime Moving Target Indication Using Passive GNSS-based Bistatic Radar, IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, vol pp, no99

MODERN PASSIVE RADAR TECHNIQUES

Nowdays the non cooperative passive radar systems represent a significant trend in the modern radars. This can be attributed to the widespread of the illuminator signals which have wide bandwidth and apply digital modulation techniques. The emergence of the modern signal processing architectures had also a key role in the development of these systems. This paper gives a short introduction to the current development situation of the passive radars, including the analysis of the illuminator of opportunity. We demonstrate the applicability of passive radars with presenting experimental results carried out with a DVB-T based system.

Keywords: passive radar, bistatic radar, signal processing, PBR, PCL, DVB-T

Pető Tamás (MSc)
doktorandusz hallgató
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki kar
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

Mikrohullámú Távérzékelés Laboratórium
peto@hvt.bme.hu
orcid.org/0000-0002-4848-9031

Dr. Seller Rudolf
Egyetemi adjunktus
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki kar
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék

Mikrohullámú Távérzékelés Laboratórium
seller@hvt.bme.hu
orcid.org/0000-0003-0573-2684

Pető Tamás (MSc)
PhD student
Budapest University of Technology and Economics
Faculty of Electrical Engineering
Department of Broadband Infocommunications and
Electromagnetic Theory

Microwave Remote Sensing Laboratory
peto@hvt.bme.hu
orcid.org/0000-0002-4848-9031

Dr. Seller Rudolf
Senior lecturer
Budapest University of Technology and Economics
Faculty of Electrical Engineering
Department of Broadband Infocommunications and
Electromagnetic Theory

Microwave Remote Sensing Laboratory
seller@hvt.bme.hu
orcid.org/0000-0003-0573-2684



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_3/2017-3-07-0420_Peto_Tamas-Seller_Rudolf.pdf

