

DVB-T alapú passzív radar

Pető Tamás*, Dudás Levente**
Orbán József***

* Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Magyarország
(e-mail: petotamas.mk@gmail.com)

** Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, Magyarország
(e-mail: dudas@mht.bme.hu)

*** HungaroControl Magyar Légiforgalmi Szolgálat Zrt, Budapest, Magyarország,

Kivonat: A légtér ellenőrzéséhez használt radar rendszerek többsége radarjelek folyamatos sugárzásával képesek felderíteni a repülőgépek helyzetét. Ezek a radarjelek rendszerint olyan nagy energiájú impulzusok, amelyek előállításához rendkívül költséges nagy teljesítményű mikrohullámú erősítők szükségesek. Az adóegységek számottevő gyártási és üzemeltetési költsége mellett a kibocsátott nagy energiájú impulzusok alapján a radar könnyedén detektálható és ez által zavarható is. A passzív radar rendszerek, ezzel ellentétben nem tartalmaznak adóegységet, ezért szinte lehetetlen érzékelni őket. Most, hogy az eddig leküzdhetetlen akadályt állító technológia korlátok kezdenek eltűnni, az elméleti kutatások mellett kiemelt szerepet kap a rendelkezésre álló eszközökkel való realizálhatóság vizsgálata is. A cikk egy olyan passzív radar megvalósíthatósági kísérletét mutatja be, amely a digitális földfelszíni műsorszóró jelet (DVB-T) használja fel a céltárgyak észlelésére. A cikkben egyszerű modellből kiindulva szimulációs és mérési eredményeken keresztül kerül igazolásra a passzív radarok detektálási mechanizmusa.

1. BEVEZETŐ

A passzív radar rendszerek a környezetükben a már eleve meglévő rádiófrekvenciás EM forrásoktól származó jeleket használják fel a céltárgyak észlelésére. A módszer alapötlete korántsem új keletű, azonban a gyakorlatba való átültetés csak a jelenlegi eszközökkel vált elérhetővé.

Az utóbbi időben ezért megnövekedett számú tudományos publikáció foglalkozik a passzív radarok működésével. (F. Berizzi, M. Martorella, D. Petri, M. Conti, A. Capria 2010) Számos ezek közül behatóan tanulmányozza a lehetséges megvilágító források képességeit. Az eddigiekben részletesen kivizsgált megvilágító források közül a DVB-T jel kiemelkedően jó korrelációs tulajdonságokkal rendelkezik, ezért alkalmas a passzív elven működő radarok referencia forrásként való felhasználására.

A DVB-T jel alkalmazhatóságával kapcsolatban jelentős számú publikáció érhető el. (M. Radmard, M. Bastani, F. Behnia, M. M. Nayebi 2010, H. Andrew Harms, Linda M. Davis, James Palmer 2010, Diego Langellotti 2010, M. Radmard, M. Bastani, F. Behnia, M. M. Nayebi 2010, Zhiwen Gao, Ran Tao, Yongfeng Ma, Tao Shao 2006)

Az eddig bemutatott eredmények azonban csak igen kis számban alapoznak ténylegesen realizált rendszerek mérési eredményeire.

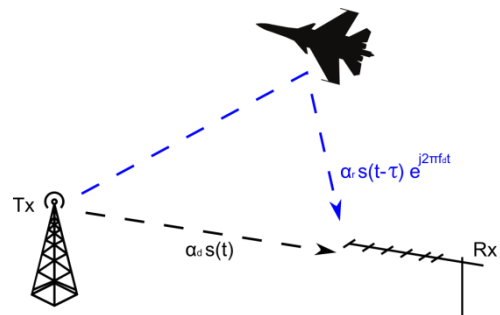
Jelen cikkünk célja, hogy az eddigiekben, elméletben részletesen kivizsgált eljárásokat gyakorlati módszerek alkalmazásával is igazolja. A detektálási eljárások működésének verifikálása első közelítésben szimulációs

technikákkal, majd reptülőtéri mérésekkel is bemutatásra kerülnek.

2. A MŰKÖDÉS ALAPELVE

A szakaszban röviden ismertetésre kerül a passzív radarok egy leegyszerűsített modellje, amely alapján megérthető a detektálás alapvető koncepciója. A lenti (1.) ábra a radar működését illusztrálja.

Az adótoronyból kisugárzott műsorszóró jel a közvetlen terjedési úton kívül számos más reflexiós úton keresztül is eljuthat a radar vevőantennájához. A legegyszerűbb modell felépítéséhez azonban a különböző terjedési utak közül elegendő kizárólag két úttal számolni. Ezek a közvetlen jelút és egy az érzékelni kívánt repülőgépről reflektált jel útja.



1. ábra Passzív radar jelútjai egyszerűsített modell szerint

A különböző utakon terjedő jelek egymástól függetlenül csillapodnak. Jelöljük a direkt út csillapítását α_d -vel, valamint a reflektált jelút csillapítását α_r -el.

A csillapítás mellett mindkét jel a véges terjedési sebességek miatt eltérő idő késleltetéssel érkezik meg a vevőhöz. Jelöljük a repülőgépről reflektált jel és a direkt úton érkező jel időkésleltetésének különbségét $\tau = t_r - t_d$ -vel.

A mozgó repülőgépről visszavert jel a repülőgép sebességétől, irányától és a térbeli helyzetétől függően valamekkora Doppler-eltolódást is szenved. Ezt jelöljük f_d -vel. A radar vevőantennája tehát ennek a két jelnek az összegét fogja venni.

Matematikailag ezek alapján az $r(t)$ vett jelet a következőképpen írhatjuk le egy reflektáló objektumot feltételezve:

$$r(t) = \alpha_d s(t) + \alpha_r s(t - \tau) e^{j2\pi f_d t} \quad (1)$$

A detektálás során célunk, hogy a vett jelben megkeressük a közvetlen úton érkező jel, vagy más néven referencijel időben τ -val késleltetett és f_d Doppler-frekvenciával eltolt másolatát. Ez praktikus korrelációs számítással tehető meg. A vett jel autokorrelációs függvényének kiszámításával, azokon a helyeken kapunk maximális jel-zaj viszony értékű csúcsokat, ahol a vett jel a lehető legjobban egyezik meg önmaga időben késleltetett változatával.

A direkt úton érkező (referencia) jelet a korreláció elvégzése előtt azonban korrigálnunk kell ugyanazzal az f_d Doppler-frekvenciával, amivel a reflektált jel is eltolódik, hogy maximális kiemelését kapjunk. Az előzőek alapján a repülőgép detektálását az alábbi kétdimenziós Doppler-eltolás keresztkorrelációs függvény kiszámításával végezhetjük el:

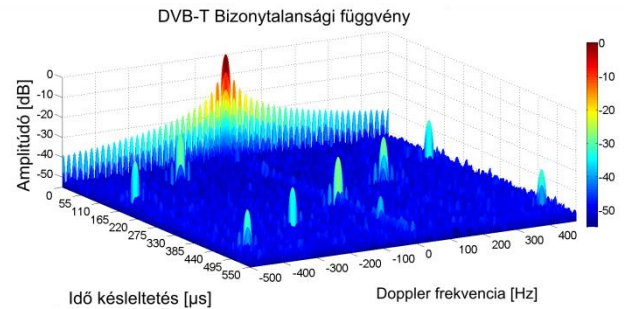
$$\chi(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t) r^*(t - \tau) e^{j2\pi f_d t} dt \quad (2)$$

3. A DVB-T JEL BIZONYTALANSÁGI FÜGGVÉNYÉNEK ANALÍZISE

Mivel a jelfeldolgozó algoritmusokban korreláció számítást alkalmazunk, ezért a felhasznált megvilágító jel korrelációs tulajdonságainak vizsgálata meghatározó jelentőségű a passzív radar hatékonyságának szempontjából. A megvilágító jel alkalmazásában rejülő lehetőségek elemzéséhez a jel bizonytalansági függvényét kell kivizsgáljunk. A radartechnikában a bizonytalansági függvényrel vizsgálják az alkalmazandó moduláció performanciáját. A bizonytalansági függvény kiszámítási módja jelen esetben megegyezik az első szakaszban közölt detektálás során számítható Doppler-eltolás korrelációs függvényrel (2.), azzal az eltéréssel, hogy az integrálási intervallumot értelemszerűen végesre kell választanunk.

Esetünkben a maximális Doppler-eltolódást 500 Hz-re választottuk, így egy átlagos céltárgy várható sebességének megfelelően (UHF sávú adás, maximálisan $450 \frac{km}{h}$ -ás

céltárgy sebesség). A bizonytalansági függvény kiszámítása során a koherens integrálási idő intervallum hozzávetőlegesen 60 ms a kellően részletes Doppler felbontás biztosításához.



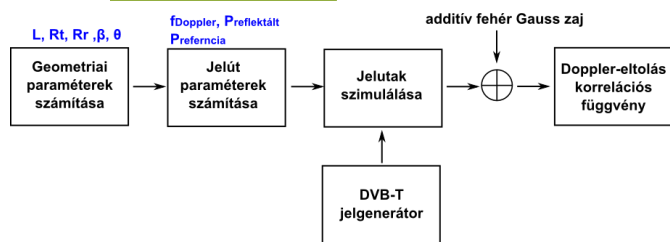
2. ábra A DVB-T jel bizonytalansági függvénye

A digitális földfelszíni televíziós műsorszóró jel a felhasznált OFDM modulációs sémának és az alkalmazott csatorna és forráskódolásoknak köszönhetően kellő képen véletlenszerűsített. OFDM moduláció használata során ugyanis az átvinni kívánt információt, egymáshoz relatíve közel lévő szinuszos vivők sokaságára ültetik rá. A jel véletlenszerűsége azért fontos, mert az optimális jelalakot a GWN (fehér Gauss zaj) képviseli és tipikusan egy adott moduláció véletlenszerűségének növelésével tart ehhez.

A (2.) ábra a DVB-T jel bizonytalansági függvényét ábrázolja. Az ábra alapján a DVB-T jel Doppler-eltolás korrelációs függvénye 50 dB-es dinamikatarománnyal rendelkezik. Ez a dinamikataromány, (mint az a későbbiekben bemutatásra kerül majd) már elegendően nagy ahhoz, hogy a reflexiókból származó korrelációs csúcsokat azonosítani lehessen. A függvényben megjelenő korrelációs kiemeléseket a jelben lévő folytonos és szórt pilotjelek okozzák. Ezek a korrelációs csúcsok esetenként megnehezíthetik a céltárgyak detektálását, ezért az eltüntetésükkel érdemes foglalkozni. (M. Radmard, M. Bastani, F. Behnia, M. M. Nayebi 2010, H. Andrew Harms, Linda M. Davis, James Palmer 2010, Diego Langellotti 2010, Zhiwen Gao, Ran Tao, Yongfeng Ma, Tao Shao 2006)

4. A DETEKTÁLÁSI ELJÁRÁSOK SZIMULÁCIÓJA

A szakaszban egy DVB-T jelet felhasználó passzív radar kísérleti megvalósítása kerül bemutatásra. A vizsgálatok helyszínéül célszerű olyan helyet választani, ahol a mozgó céltárgyak közel haladnak el a radar vevőantennájához, ezáltal viszonylagosan nagy teljesítményszintűek a reflektált úton beérkező jelek. A mérés helyszínéül ezért a Budapesti Liszt Ferenc Nemzetközi repülőtérrel választottuk.



3. ábra Szimulációs program blokkdiagramja

A működés koncepciója első közelítésben szimulációs módszerekkel került ellenőrzésre. A szimulációs program segítségével egy felszálló repülőgép detektálhatóságát vizsgáltuk. A szimulációs eljárás során előállítjuk a radar vevőantennájának talppontjában lévő jelek mintavételezett reprezentációját, majd ezután a szimulált jeleken végrehajtjuk a passzív radar jelfeldolgozási eljárásokat.

A program blokkvázlatos működését a fenti (3.) ábra szemlélteti. Az első lépésben a céltárgy geometriai paraméterei kerülnek kiszámításra az aktuális koordinátái, sebessége és gyorsulása alapján. A kapott távolság és szögparamétereket felhasználva a következő összefüggések segítségével a szimulátor kiszámítja a figyelembe vett jel utak paramétereit ($\alpha, \tau, f_{Doppler}$).

A következő egyenlet segítségével a referencijel vételi szintjét számíthatjuk ki.

$$P_{referencia} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 L^2} \quad (3)$$

A bisztatikus radaregyenletet felhasználva a céltárgyról reflektált jel teljesítményszintjét határozhatjuk meg.

$$P_{reflektált} = \frac{P_t G_t \sigma G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2} \quad (4)$$

A céltárgyról reflektált jel Doppler eltolódásának mértékét pedig a következő egyenlettel számíthatjuk ki.

$$f_{Doppler} = \frac{2v}{\lambda} \cos(\theta) \cos(\beta) \quad (5)$$

A fenti összefüggések (3., 4., 5.) paramétereinek jelentése, illetve a szimuláció során használt értékei az alábbiak:

- $P_t \rightarrow 100 \text{ kW}$ -az adó teljesítménye (Széchenyi hegyi DVB-T adótorony)
- G_t -az adó antenna nyeresége
- R_t -az adó és a céltárgy közötti távolság
- R_r -a vevő és a céltárgy közötti távolság
- $\sigma \rightarrow 100 \text{ m}^2$ -bisztatikus radar hatásos keresztmetszet
- $L \rightarrow 26 \text{ km}$ -vevő és adótorony közti távolság (Széchenyi hegyi DVB-T adótorony)

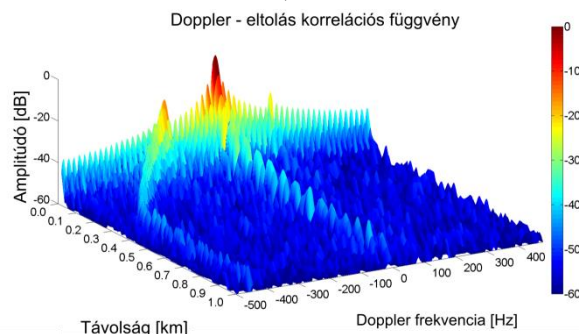
- G_r -vevő antenna nyeresége
- $\lambda \rightarrow 0.5 \text{ m}$ -hullámhossz
- θ, β - az adó, a céltárgy és a radar elhelyezkedéséből adódó geometriai paraméterek.

(Merrill I. Skolnik 1990, Nicholas J. Willis 2005)

Ezt követően a DVB-T generátor által előállított forrásjelet $s(t)$ módosítva elkészül a végleges szimulációs jel. Az előállított jel matematikai alakját a következő formában írhatjuk le:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i s_i(t - \tau) e^{j2\pi f_{d_i} t} + n(t)$$

ahol i az aktuálisan figyelembe vett jelút sorszámát, α a jelút csillapítását, τ az idő késleltetését, f_{d_i} pedig a Doppler frekvenciáját jelöli, $n(t)$ a jelet terhelő additív fehér Gauss zaj. A szimulációs jelet 10^6 mintával állítottuk elő (a mintavételi frekvencia 9 MHz).

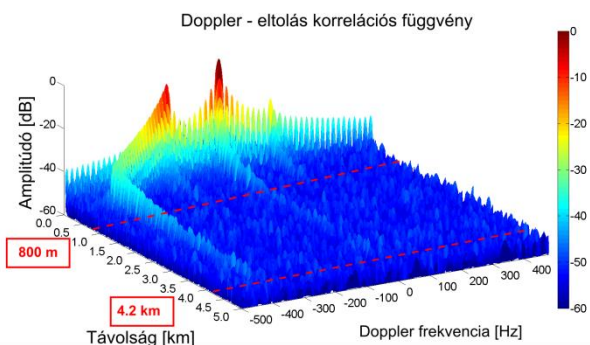


4. ábra Felszálló céltárgy nyomvonala a Doppler-eltolás korrelációs függvényen izotrop vevőantenna használatával

A szimulációt iteratíván több egymást követő időpillanatra futtattuk le. Az eredmények összefűzésével a fenti (4.) ábrán látható eredményt kaptuk. Az ábrán látható Doppler-eltolás korrelációs függvényen egyértelműen azonosítható a felszálló céltárgy nyomvonala.

Igen fontos megjegyezni, hogy a szimuláció elvégzése során izotrop vevő antennát feltételeztünk a radar vételi oldalán. Jól látható, hogy a céltárgy hozzávetőlegesen 800 m -es távolságnál alámerül a referencijel korrelációs függvényének dinamikartományába.

A kísérleti mérés eredményességének növelése érdekében ezért a vevő oldalon mindenképp célszerű legalább irányított antenna használatával növelni a reflektált jel és a referencia jel közötti izolációt. A következő (5.) ábrán látható eredmény egy 15 dB előre-hátra viszonyal rendelkező Yagi antenna feltételezésével készült szimuláció eredményét mutatja be.



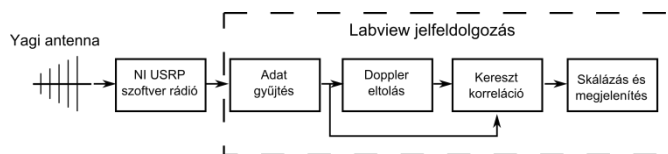
5. ábra Felszálló céltárgy nyomvonala a Doppler eltolás korrelációs függvényen irányított Yagi vevőantenna használatával

A radar várható hatótávolsága ezáltal 4.2 km-re növekedett meg az előbbi 800 m-es esethez képest. A passzív radar működési alapkonceptiójának kipróbálásához ez a hatótávolság már elegendően nagy lehet. Szintén fontos megemlíteni, hogy a bemutatott szimulációk során a céltárgy hatásos radar keresztmetszetének változása, illetve a vevőantenna fő nyalábjában való tartózkodásának mértékét nem vettük figyelembe.

5. REPÜLŐTÉRI MÉRÉS

5.1 Mérési összeállítás

A rádiófrekvenciás jelek vétele és adatgyűjtése a National Instruments 2920-as univerzális szoftver rádiójával történt. Jelen esetben a tesztmérés elvégzéséhez ez igen kézenfekvő választás, hiszen a radar elvi működésének kipróbálásához nem szükséges vevő egység tervezése és építése. A mérés elrendezését (6.) ábra szemlélteti. A mérések az előző szakaszban felhasznált 15 dB-es előre-hátra viszonyal rendelkező Yagi antennával készültek. A méréshez tervezett Yagi antennáról érkező jeleket a szoftver rádió lekeveri, mintavételezi, majd egy, a méréshez elkészített Labview program számára az IQ mintákat gigabit Etherneten keresztül továbbítja. A mért adatok tárolása után a Doppler-eltolás korrelációs függvény számítása offline módon történt.



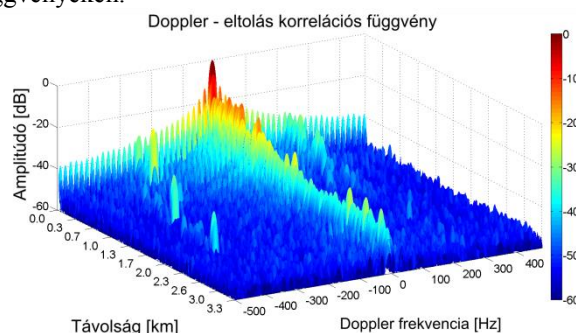
6. ábra Mérési összeállítás

A szoftver rádió használata során beállított fontosabb paraméterek a következők voltak:

- Működési frekvencia → 610 MHz
- IQ Mintavételi frekvencia → 9 MHz
- Bitmélység → 16 bit
- Gyűjtött minták száma → 10^6

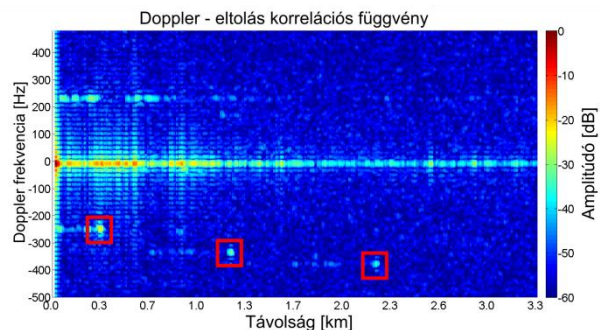
5.2 Mérési eredmények

A minták begyűjtése után a (2.) egyenlet alapján több egymást követő pillanatképre kiszámításra került a Doppler-eltolás keresztkorrelációs függvény. Egy pillanatkép kiszámításához 10^6 minta került felhasználásra, ezt átszámítva 110 ms-ot kapunk a koherens integrálási időre. A pillanatképek eredményeinek összevágásával a (7.) és (8.) ábrákon prezentált eredmények születtek. Az ábrákon láthatóan hozzávetőlegesen 300 Hz-es Doppler frekvencia körül megjelenik egy korrelációs csúcs, amely az idő elteltével mind távolságban, mind pedig Doppler frekvenciában elmozdul a kiszámított korrelációs függvényeken.



7. ábra Sikeresen detektált felszálló céltárgy a kétdimenziós korrelációs függvényen – perspektivikus nézet

Az eredményeket összevetve, elmondhatjuk, hogy az előzetesen szimulált értékeknek megfelelő eredményeket kaptunk. A radar mérési alapelve tehát helytállóan mondható.



8. ábra Sikeresen detektált felszálló céltárgy a kétdimenziós korrelációs függvényen - felülnézet

A radar leglényegesebb korlátozó tényezője a nagy teljesítménnyel érkező direkt jel, amely az előzetesen becsülteknek megfelelően elfedte a céltárgyról távolabbról reflektálódó jeleket.

A referenzijel kioltása praktikus segédantennák, illetve antennarendszer alkalmazásával oldható meg. (Tao R., Wu H.Z., Shan T. 2010)

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Napjainkban a passzív radarok kutatása egyre fontosabbá válik az alacsony gyártási és üzemeltetési költségeknek valamint a figyelemre méltó civil és katonai jelentőségének köszönhetően. A radar elterjedése elsősorban az újonnan

elérhető nagy teljesítményű jelfeldolgozó rendszereknek köszönhető.

A működés teóriájával, valamint a lehetséges megvilágítási források alkalmazásáról számos tudományos publikáció jelent meg az utóbbi időben.

Emellett viszonylag kevés figyelem fordul az elérhető technológiai eszközökkel való realizálhatóság vizsgálatára. Jelen dokumentumban egy DVB-T (digitális földfelszíni videó műsorszó) jelet felhasználó passzív radar megvalósíthatósági kísérlete került bemutatásra. A radar alapvető működését először szimulációs, majd gyakorlati méréseken keresztül sikerült igazolnunk.

A mérési eredmények alapján a passzív radarok céltárgy detektálási elve az első szakaszban felvázoltak szerint gyakorlatban is helytállóan bizonyult.

Az adótorony által kisugárzott referencijel viszonylag magas teljesítményszinttel érkezik a passzív radar antennájához, ami a céltárgyakról reflektált jelek elfedését okozza. A hatótávolság növeléséhez ezért a vett jelben ki kell oltani a nagy szintű referencijeleket, ami segédantennákkal történik.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatási projektet a Nemzeti Fejlesztési Ügynökség támogatta (NFÜ, Magyarország) az alábbi projekt keretében: Kognitív Módszerű UAV Ütközés Elhárítás Milliméteres Hullámhosszú Radar Alkalmazásával, UWBSRR12, 2012-2015.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Merrill I. Skolnik (1990). *Radar Handbook*. McGraw-Hill Professional. 2nd edition
- Nicholas J. Willis (2005) *Bistatic Radar*. SciTech Publishing Inc.
- M. Radmard, M. Bastani, F. Behnia, M. M. Nayebi (2010). *Cross Ambiguity Function Analysis of the '8k-mode' DVB-T for Passive Radar Application*. Radar Conference, 2010 IEEE. Washington, DC 10-14 May 2010
- H. Andrew Harms, Linda M. Davis, James Palmer (2010). *Understanding the signal structure in DVB-T signals for passive radar detection*. Radar Conference, 2010 IEEE. Washington DC 10-14 May 2010
- F. Berizzi, M. Martorella, D. Petri, M. Conti, A. Capria (2010). *USRP technology for multiband passive radar*. Radar Conference, Washington, DC 10-14 May 2010
- Diego Langelotti (2010). *Impact of synchronization on the ambiguity function shape for PBR based on DVB-T signals*. Radar Symposium (IRS), 2010 11th International, Vilnius, Lithuania, 16-18 June 2010
- M. Radmard, M. Bastani, F. Behnia, M. M. Nayebi (2010). *Advantages of the DVB-T Signal for Passive Radar Applications*. Radar Symposium (IRS), 2010 11th International Vilnius, Lithuania, 16-18 June 2010
- Zhiwen Gao, Ran Tao, Yongfeng Ma, Tao Shao (2006). *DVB-T Signal Cross-Ambiguity Functions Improvement for Passive Radar*. Radar, 2006. CIE '06. International Conference Shanghai, 16-19 Oct. 2006
- Tao R., Wu H.Z., Shan T. (2010). *Direct-path suppression by spatial filtering in digital television terrestrial broadcasting-based passive radar*. Radar, Sonar & Navigation, IET (Volume:4, Issue: 6) December 2010



„IFFK 2014” Budapest

Online: ISBN 978-963-88875-3-5

CD: ISBN 978-963-88875-2-8



Paper DVB-T alapú passzív radar

Copyright 2014 Budapest, MMA.

Editor: Dr. Péter Tamás