

DVB-T Alapú Passzív Radar

Pető Tamás

Mikrohullámú Távérzékelés Laboratórium
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Budapest, Magyarország
E-mail:petotamas.mk@gmail.com

Dudás Levente

Mikrohullámú Távérzékelés Laboratórium
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Budapest, Magyarország
E-mail:dudas@mht.bme.hu

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 műsorszórást (DVB-T) használja fel a céltárgyak észlelésére. A cikkben egyszerű modelltől kiindulva szimulációs és mérési eredményeken keresztül kerül igazolásra a passzív radarok detektálási mechanizmusa.

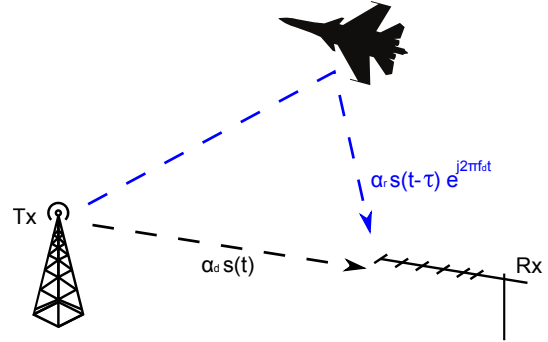
Index Terms—DVB-T passzív radar, légtér ellenőrzés, passzív radar kísérlet

I. BEVEZETŐ

A passzív radar rendszerek a környezetükben a már eleve meglévő lévő rádiófrekvenciás 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 [5]. Számos ezek közül behatóan tanulmányozza a lehetséges megvilágító források képességeit [7],[5]. Az eddigiekben részletesen kivizsgált megvilágító források közül a DVB-T jel kiemelkedően jó korrelációs tulajdonságokkal rendelkezik, ezért alkalmas lehet a passzív elven működő radarok referencia forrásként való felhasználására.

A DVB-T jel alkalmazhatóságával kapcsolatban jelentős számú publikáció érhető el [3],[4],[6],[7],[8]. Az eddig bemutatott eredmények azonban csak igen kis számban alapoznak ténylegesen realizált rendszerek mérési eredményeire. A dokumentum célja, hogy az eddigiekben elméletben részletesen kivizsgált eljárásokat gyakorlati módszerek alkalmazásával is igazolja. A detektálási eljárások működésének verifikálása első közelítésben szimulációs technikákkal majd repülőtéri mérésekkel is bemutatásra kerülnek.



1. ábra. Passzív radar jelútjai egyszerűsített modell szerint

II. A MŰKÖDÉS ALAPELVE

A szakaszban röviden ismertetésre kerül a passzív radarok egy leegyszerűsített modellje, amely alapján megérthető a detektálás alapvető koncepciója. A fenti (1.) ábra a radar működését illusztrálja. Az adótoronyból kisugárzott műsorszórási jel a közvetlen terjedési úton kívül számos más reflexiók 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.

A különböző utakon terjedő jelek egymástól függetlenül csillapítódnak. 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 geometriai 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 következő képen írhatjuk le:

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

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 korreláció számításal tehető meg. A vett jel autokorrelációs függvényének kiszámításával, azokon a helyeken kapunk maximális jel-zaj viszony értékű csúcsoakat, ahol a vett jel a lehető legjobban egyezik meg önmaga időben késleltetett változatával. A direkt úton érkező (referencia) jelet a korreláció elvégzése előtt korrigálnunk kell ugyanazzal az f_d Doppler-frekvenciával, amivel a reflektált jel is eltolódik, hogy maximális kiemelést kapjunk. Az előzőek alapján a repülőgép detektálását az alábbi kétdimenziós Doppler-eltolás keresztkorrelációs függvény kiszámításával végezhetjük el:

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

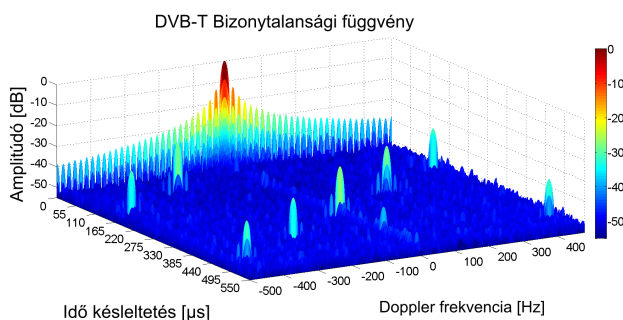
III. A DVB-T JEL BIZONYTALANSÁGI FÜGGVÉNYÉNEK ANALÍZISE

Mivel a jelfeldolgozó algoritmusokban korreláció számítás alkalmazunk, ezért a felhasznált megvilágító jel korrelációs tulajdonságainak vizsgálata meghatározó jelentőségű a passzív radar hatékony működésének szempontjából. A megvilágító jel alkalmazásában rejülő lehetőségek elemzéséhez a jel egyértelműségi függvényét kell kivizsgálunk. Az egyértelműségi függvény kiszámítási módja jelen esetben megegyezik az első szakaszban közölt detektálás során számítandó Doppler-eltolás korrelációs függvényével (2).

A maximális Doppler-eltolódás 500 Hz-re lett megválasztva egy átlagos céltárgy várható sebességének megfelelően (UHF sávú adás, maximális 300 – 400 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ -ás céltárgy sebesség). Az egyértelműségi függvény kiszámítása során a koherens integrálási idő hozzávetőlegesen 60 ms a kellően részletes néhány Hz-es Doppler felbontás biztosításához.

A Digitális földfelszíni televíziós műsorszóró jel a felhasznált OFDM modulációs sémának és az alkalmazott csatorna és forrás kódolásoknak köszönhetően kellő képen véletlenszerűsített. OFDM moduláció használata során ugyanis az átvinni kívánt információt, egymáshoz relatíve közel lévő szinuszos vivők sokaságára ültetik rá.

A (2.) ábra a DVB-T jel egyértelműségi függvényét ábrázolja. Az ábra alapján a DVB-T jel Doppler-eltolás korrelációs függvénye 50 dB-es dinamikatarományal rendelkezik.



2. ábra. A DVB-T jel bizonytalansági függvénye

Ez a dinamikataromány, (mint az a későbbiekben bemutatásra kerül majd) már elegendően nagy ahhoz, hogy a reflexiókból származó korrelációs csúcsoakat azonosítani lehessen. A függvényben megjelenő korrelációs kiemeléseket a jelben lévő folytonos és szórt pilotjelek okozzák. Ezek a korrelációs csúcsoak esetenként megnehezíthetik a céltárgyak detektálását, ezért az eltüntetésükkel érdemes foglalkozni. [3],[4],[6],[8]

IV. A DETEKTÁLÁSI ELJÁRÁSOK SZIMULÁCIÓJA

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

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 reprezentációja, majd ezután a szimulált jeleken végrehajtjuk a passzív radar jelfeldolgozási eljárásokat.

A program blokkvázlatos működését a lenti(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 jelutak paramétereit ($\alpha, \tau, f_{Doppler}$).

A következő egyenlet segítségével a referencijel vételi szintjét számíthatjuk ki.

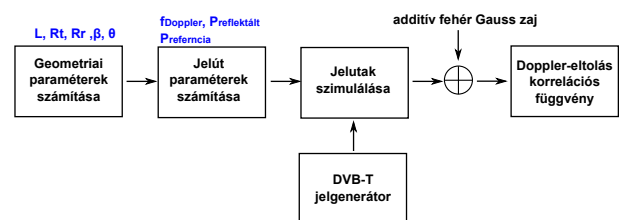
$$P_{referencia} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 L^2} \quad (3)$$

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

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

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

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



3. ábra. Szimulációs program blokkdiagramja

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 -adó antenna nyeresége
- R_t -az adó és a céltárgy közötti távolság
- R_r -a vevő és a céltárgy közötti távolság
- $\sigma_b \rightarrow 100 \text{ m}^2$ -bisztatikus radar hatásos keresztmetszet
- $L \rightarrow 26 \text{ km}$ -vevő és adótorony közti távolság (Széchenyi hegyi DVB-T adótorony)
- G_r -vevő antenna nyeresége
- $\lambda = 0.5 \text{ m}$ -hullámhossz
- θ, β az adó, a céltárgy és a radar elhelyezkedéséből adódó geometriai paraméterek.

[1],[2]

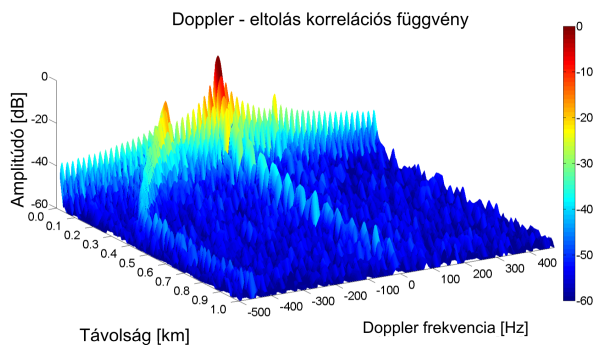
Ezt követően a DVB-T generátor által előállított forrásjelet $s(t)$ módosítva elkészül a végleges szimulációs jel. Az előállított jel matematikai alakját a következő formában írhatjuk le:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i s_i(t - \tau_i) e^{j2\pi f_{d_i} t} + n(t) \quad (6)$$

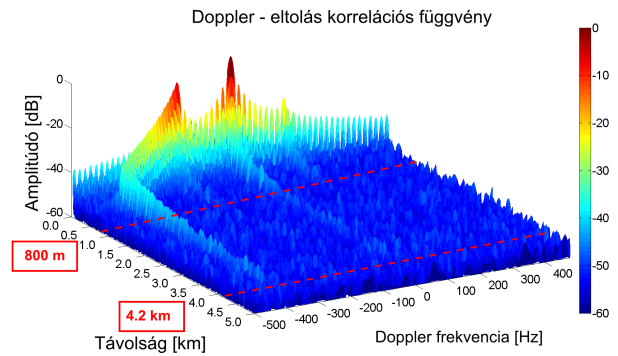
, ahol i az aktuálisan figyelembe vett jelút sorszámát, α a jelút csillapítását, τ az idő késleltetését, f_d pedig a Doppler frekvenciáját jelöli, $n(t)$ a jelet terhelő additív fehér Gauss zaj. A szimulációs jelet 10^6 mintával állítottuk elő (a mintavételi frekvencia 9 MHz).

A szimulációt iteratíván több egymást követő időpillanatra futtattuk le. Az eredmények összefűzésével a lenti (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 izotróp vevő antennát feltételeztünk a radar vételi oldalán. Jól látható, hogy a céltárgy hozzávetőlegesen 800 m -es távolságnál alámerül a referenciajel korrelációs függvényének dinamikartományára alá. A kísérleti mérés eredményességének növelése érdekében ezért a vevő oldalon mindenképp célszerű



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



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

legalább irányított antenna használatával növelni a reflektált jel és a referencia jel közötti izolációt. A következő (5.) ábrán látható kép egy 15 dB előre-hátra viszonyal rendelkező Yagi antenna feltételezésével készült szimuláció eredményét mutatja be.

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

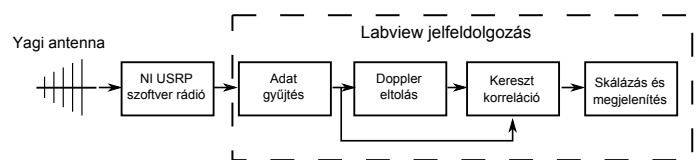
V. REPÜLŐTÉRI MÉRÉS

V-A. Mérési összeállítás

A rádiófrekvenciás jelek vétele és adatgyűjtése a National Instrument 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 szimulált 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.

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

- Működési frekvencia $\rightarrow f = 610 \text{ MHz}$



6. ábra. Mérési összeállítás

- IQ Mintavételi frekvencia $\rightarrow f_s = 9 \text{ MHz}$
- Bitmélység $\rightarrow 16\text{bit}$
- Gyűjtött minták száma $\rightarrow 10^6$

V-B. 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.

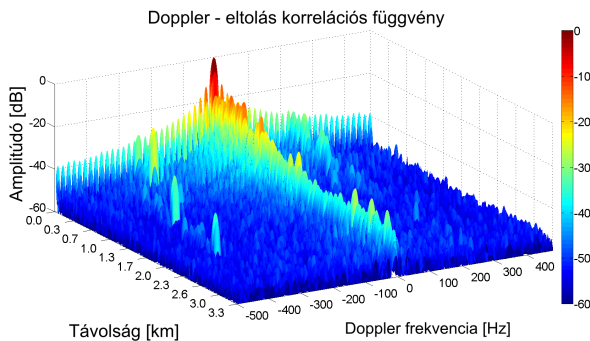
Az eredményeket összevetve, elmondhatjuk, hogy az előzetesen szimulált értékeknek megfelelő eredményeket kaptunk. A radar mérési alapelve tehát helytállóan mondható.

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

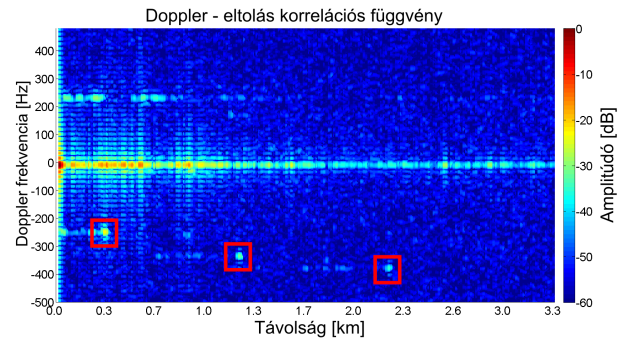
VI. ÖSSZEGZÉS

Napjainkban a passzív radarok kutatása kezd igen népszerűvé válni az alacsony gyártási és üzemeltetési költségeknek valamint a figyelemre méltó 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



7. ábra. Sikeresen detektált felszálló céltárgy a kétdimenziós korrelációs függvényen - perspektívikus nézet



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

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

Az adótorony által kisugárzott referenciajel viszonylag magas teljesítményszinttel érkezik a passzív radar antennájához, ami a céltárgykról reflektált jelek elfedését okozza. A hatótávolság növeléséhez ezért a vett jelben ki kell oltani a nagy szintű referenciajelet. A referenciajel kioltása praktikus segédantennák, illetve antennarendszer alkalmazásával oldható meg. [9].

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.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Merrill I. Skolnik "Radar Handbook" McGraw-Hill Professional; 2 edition January 1, 1990
- [2] Nicholas J. Willis "Bistatic Radar" by SciTech Publishing Inc. , 2005
- [3] M. Radmard, M. Bastani, F. Behnia, M. M. Nayebi "Cross Ambiguity Function Analysis of the '8k-mode' DVB-T for Passive Radar Application", Radar Conference, 2010 IEEE Washington, DC, 10-14 May 2010.
- [4] H. Andrew Harms, Linda M. Davis, James Palmer "Understanding the signal structure in DVB-T signals for passive radar detection", Radar Conference, 2010 IEEE Washington, DC 10-14 May 2010
- [5] F. Berizzi, M. Martorella, D. Petri, M. Conti , A. Capria "USRP technology for multiband passive radar", Radar Conference, 2010 IEEE-Washington, DC 10-14 May 2010
- [6] Diego Langelotti "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
- [7] M. Radmard, M. Bastani, F. Behnia, M. M. Nayebi "Advantages of the DVB-T Signal for Passive Radar Applications", Radar Symposium (IRS), 2010 11th International Vilnius, Lithuania, 16-18 June 2010
- [8] Zhiwen Gao, Ran Tao, Yongfeng Ma, Tao Shao "DVB-T Signal Cross-Ambiguity Functions Improvement for Passive Radar ", Radar, 2006. CIE '06. International Conference Shanghai, 16-19 Oct. 2006
- [9] Tao R., Wu H.Z. , Shan T. "Direct-path suppression by spatial filtering in digital television terrestrial broadcasting-based passive radar", Radar, Sonar & Navigation, IET (Volume:4 , Issue: 6) December 2010