

## DVB-T ALAPÚ PASSZÍV RADAR

*A passzív radar rendszerek a hagyományos telekommunikációs és műsorszóró jeleket felhasználva is képesek a céltárgyak érzékelésére. Mivel a passzív radarok tervezése folyamán általában egy már létező, kiépített rendszer lehetőségeit próbájuk meg kihasználni, olyan egyedi nehézségekkel kell megbirkóznunk, melyeket a hagyományos radarok tervezésénél például a sugárzott jelalak vagy akár a működési frekvencia megválasztásával alapvetően kiküszöbölhetünk. Az alkalmazott megvilágítási forrás tulajdonságai pedig alapvetően határozzák meg rendszer teljesítőképességét. Egy hatékonyan működő rendszer kialakításra azonban remek lehetőséget kínál a Digitális földfelszíni műsorszóró (DVB-T) jel a korrelációs tulajdonságainak köszönhetően. 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 dokumentum egy DVB-T jelet felhasználó passzív radar megvalósíthatósági kísérletét mutatja be, egyszerűsített modelleket felhasználva.*

### DVB-T BASED PASSIVE RADAR

*The passive radar systems are able to detect targets using only traditional telecommunication or broadcast signals. During the design of a passive radar we are trying to exploit the opportunities of an already existing system, thus we need to face such problems that could be simply eliminated e.g. during the design of the transmitted signal or the operation frequency of a traditional active radar. The properties of the used source of illumination essentially determines the overall performance of the system. The Digital Video Broadcasting - Terrestrial (DVB-T) signal has beneficial properties from our viewpoint, therefore it offers a great opportunity to develop an effectively operating system. Nowadays passive radars are gaining ground and become more popular. Now, that the so far insurmountable technological limitations begin to disappear, beside the theoretical researches the investigation of realizations with the recently available hardware technologies are becoming more important. This paper presents a feasibility experiment of a DVB-T based passive radar using simplified models.*

## BEVEZETŐ

A passzív radar rendszerek anélkül képesek detektálni és követni céltárgyakat, hogy a céltárgyat megvilágító forrásokkal együttműködnének. Aktív radarral történő felderítés során a rendszer kisugároz egy jól specifikált radarjelet, amelyet a céltárgyról reflektálva majd detektál. A passzív radarok ezzel ellentétben nem sugároznak, hanem a környezetükben lévő, egyéb forrásoktól származó jeleket használják fel a céltárgyak észlelésére. Mivel a rendszer nem sugároz ki semmilyen mérőjelet a céltárgyak észleléséhez, ezért nem detektálható és így nem is zavarható. A passzív radaroknak ezért nincs is szükségük dedikált adóegységre sem, emiatt az üzemeltetésük és gyártásuk is jelentős mértékben olcsóbb.

A számos előnyös tulajdonságának köszönhetően az utóbbi időben megnövekedett számú tudományos publikáció foglalkozik a passzív elven működő radarok működésével [5]. Számos ezek közül behatóan tanulmányozza a lehetséges megvilágító források képességeit. [5], [7]. Az eddigiekben kivizsgált megvilágító források közül a DVB-T jel kiemelkedően jó kor-

---

<sup>1</sup> egyetemi hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, petotamas.mk@gmail.com

<sup>2</sup> tanársegéd, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, dudas@mht.bme.hu

<sup>3</sup> egyetemi adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, seller@mht.bme.hu

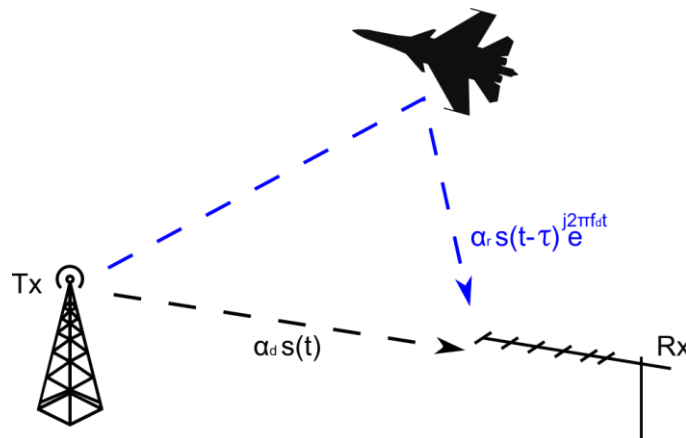
relációs tulajdonságokkal rendelkeznek, ezért alkalmas lehet a passzív elven működő radarok referencia forrásaként való felhasználására.

A dokumentum célja, hogy az eddigiekben elméletben részletesen kivizsgált eljárásokat gyakorlati mérési eredményeken keresztül igazolja.

## A MŰKÖDÉS ALAPELVE

A szakaszban röviden bemutatásra kerül a passzív radarok egy leegyszerűsített modellje, amely alapján megérthető a detektálás alapvető koncepciója.

Az 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 a különböző terjedési utak közül azonban elegendő kizárólag két úttal számolni. Ezek a közvetlen úton érkező jel és egy az érzéklni kívánt repülőgépről reflektált jel.



1. ábra Passzív radar főbb jelútvonalai<sup>4</sup>

A különböző utakon terjedő jelek egymástól függetlenül csillapítódnak. Jelöljük a direkt út csillapítását  $\alpha_d$ -vel, valamint a reflektált jelút csillapítását  $\alpha_r$ -el.

A csillapítás mellett mindkét jel a véges terjedési sebességek miatt eltérő idő késleltetéssel érkezik meg a vevőhöz. Jelöljük 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 a frekvencia eltolást 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:

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

<sup>4</sup> forrás : a szerző saját készítésű ábrája

A vett jel tehát tartalmazza a közvetlen úton érkező adótorony által kisugárzott jelet, valamint ugyanezen jel időben és Doppler-frekvenciában eltoló változatát.

A detektálás során ezért a célunk, hogy a vett jelben megkeressük a közvetlen úton érkező jel vagy más néven referenciajel időben  $\tau$ -val késleltetett és  $f_d$  Doppler-frekvenciával eltoló változatát. Ez praktikus korreláció 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 jellel korreláltatva a reflektált jelet akkor kapunk azonban csak maximális kiemelést ha a direkt úton érkező jelet korrigáljuk ugyanazzal az  $f_d$  Doppler-frekvenciával amivel a reflektált jel is eltolódik az adótorony által kisugárzott jelhez képest. Mivel a céltárgy sebességét és így a Doppler frekvenciáját nem ismerjük, ezért a referenciajelet az összes lehetséges Doppler-frekvenciával el kell tolnunk.

A következőkben bemutatott modellben az egyszerűségekre való tekintettel feltételezzük, hogy kizárólag egy csatorna áll rendelkezésünkre a céltárgyak detektálásához. Mindazonáltal a referenciajel és a céltárgyról érkező visszavert jel elkülönített vétele a rendszer képességeit drasztikus mértékben képes növelni.

A detektálás során tehát első lépésként előállítjuk a vett jel különböző Doppler-frekvenciában eltoló változatait, majd az így előállított segédjelek mindegyikét korreláltatjuk az eredeti vett jellel. Az egyes korrelációs függvények sokaságából így összeállíthatunk egy kétdimenziós függvényt, amelynek maximumai azokat az időpontokat és Doppler-frekvenciákat jelölik ahol a reflektált jelet is tartalmazó vett jel a lehető legjobban illeszkedik a műsorszóró adótorony által sugárzott aktuális jellel.

Az előzőek alapján a repülőgép detektálását az alábbi kétdimenziós Doppler-eltolás kereszt-korrelációs függvény kiszámításával végezhetjük el:

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

A kereszt-korreláció számítás megegyezik azzal, mintha a jelet átengedtük volna egy illesztett szűrőn. A Doppler-eltolás korrelációs függvény ez alapján egy olyan illesztett szűrő bank kimenetét reprezentálja, ahol az illesztett szűrő bank a vett referenciajeltől és annak Doppler-frekvenciában eltoló változataiból készült el. A következő fejezetben ennek az illesztett szűrő-banknak a hatékonyságát vizsgáljuk meg, a használt referenciajel függvényében.

## MEGVILÁGÍTÓ FÜGGVÉNYEK ANALÍZISE

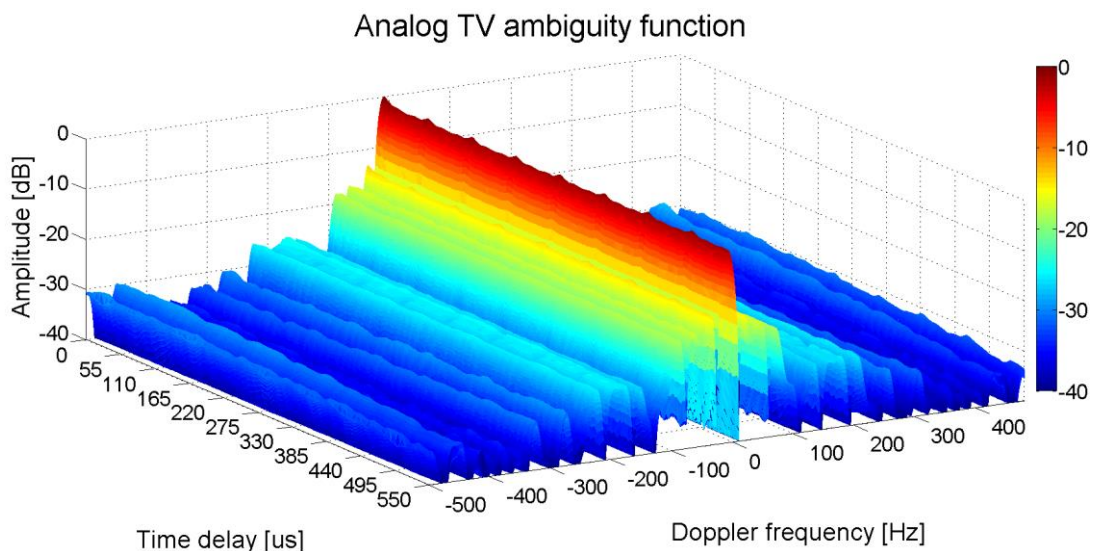
Mivel a jelfeldolgozó algoritmusokban korreláció számítást alkalmazunk, ezért a felhasznált megvilágító jel korrelációs tulajdonságainak vizsgálata meghatározó jelentőségű a passzív radar hatékony működésének szempontjából. A megvilágító jel alkalmazásában rejlő lehetőségek elemzéséhez a jel egyértelműségi függvényét kell kivizsgáljunk. Az egyértelműségi függvény kiszámítási módja jelen esetben (egy csatornás vétel) megegyezik az első szakasz-

ban közölt detektálás során számítandó Doppler-eltolás korrelációs függvénnyel (2). Amennyiben egy jel, az időben és Doppler-frekvenciában eltoló változataival igen jól korrelál, az azt jelenti, hogy az illesztett szűrő bank nem tud hatékonyan működni, mert a szűrők kimenetei között nincs elegendően nagy dinamika.

A bemutatott egyértelműségi függvények MATLAB segítségével kerültek kiszámításra. A maximális Doppler frekvencia eltolást 500 Hz-re lett megválasztva egy átlagos céltárgy sebességének megfelelően. Az egyértelműségi függvények kiszámítása során a koherens integrálási idő hozzávetőlegesen 60 ms.

## Analóg TV jel

A (2.) ábra a Magyarországon is használt analóg TV adás egyértelműségi függvényét ábrázolja. Az analóg TV adás egyértelműségi függvénye az ábráról is kivehetően közel sem biztosít elegendően nagy dinamikatartományt a reflexiók detektálásához.



2. ábra Analóg TV jel bizonytalansági függvénye<sup>5</sup>

Általánosságban elmondható, hogy egy jel akkor rendelkezik kedvező korrelációs tulajdonságokkal, ha spektrálisan jól szétterített, azaz zajszerű a felépítése [3]. Az analóg TV jel a képinformáció átviteli módjából, és a beépített szinkronjelekből adódóan nem teljesíti ezeket a spektrális feltételeket.

## DVB-T jel

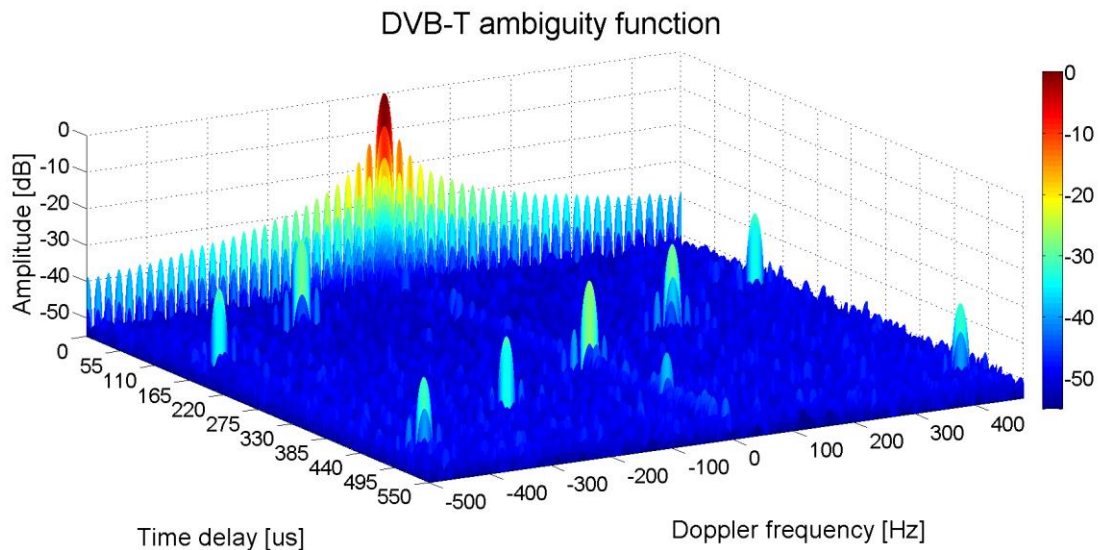
A Digitális földfelszíni televíziós műsorszóró jel azonban a felhasznált OFDM (Ortogonalis frekvencia nyálábolás) modulációs sémának és az alkalmazott csatorna és forrás kódolásoknak köszönhetően kellőképpen véletlenszerűsített. Az előállított véletlenszerűsített információt egymáshoz relatíve közel lévő szinuszos vivők sokaságára ültetik rá, így zajszerű spektrá-

---

<sup>5</sup> forrás : a szerző saját készítésű ábrája

lis felépítést kapunk.

A (3.) ábra a DVB-T jel egyértelműségi függvényét ábrázolja. Az ábra alapján a DVB-T jel Doppler-eltolás korrelációs függvénye 50 dB-es dinamikartománnyal rendelkezik. Ez a dinamikartomány, (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 jelet felépítő folytonos és szórt pilotjelek okozzák. Ezek a korrelációs csúcsok esetenként megnehezíthetik a céltárgyak detektálását, ezért az eltüntetésükkel érdemes foglalkozni. [3],[4],[6],[8]



3. ábra DVB-T jel bizonytalansági függvénye<sup>6</sup>

## PASSZÍV RADAR MÉRÉSI KÍSÉRLET

### Előzetes számítások

A szakaszban egy DVB-T jelet felhasználó passzív radar kísérleti mérése kerül bemutatásra. A mérés fő célja, a fentiekben bemutatott passzív radar működési elv gyakorlatban való igazolása. A tesztmérés helyszínéül célszerű olyan helyet választani, ahol a mozgó céltárgyak közel haladnak el a radar antennájához, ezáltal viszonylagosan nagy teljesítményszintűek a reflektált jelek. A mérési helyszínéül ezért a Budapesti Liszt Ferenc Nemzetközi repülőtérre esett a választás. A tesztmérés előkészítéséhez és az elmélet alapján várható eredmények becsléséhez a hozzávetőleges teljesítményszintek kiszámításra kerültek a bisztatikus radar-egyenlet alapján: [1],[2]

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

<sup>6</sup> forrás : a szerző saját készítésű ábrája

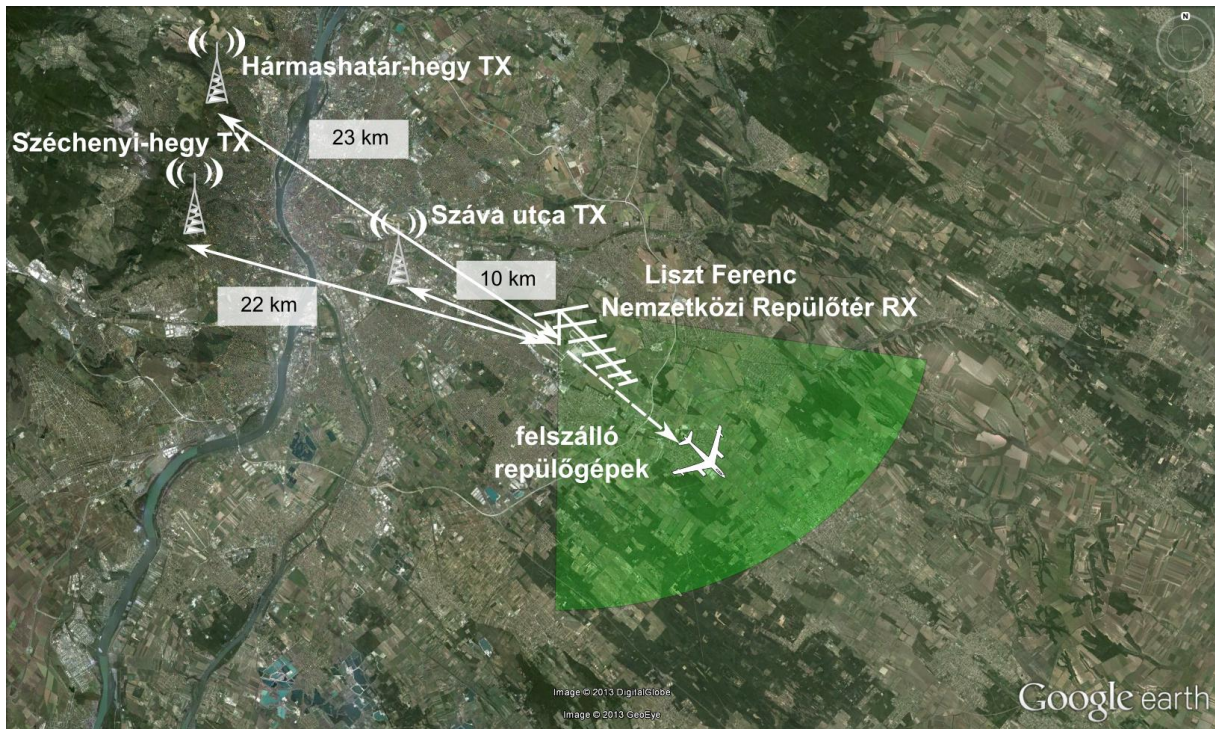
$$P_{reflektált} = \frac{P_t G_t \sigma_b G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R_t^2 R_r^2} \quad (4)$$

,ahol

- $P_t \rightarrow 100 \text{ kW}$  – az adó teljesítménye
- $G_t \rightarrow 1$  – az 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 RCS
- $L \rightarrow 26 \text{ km}$  – a vevő és adótorony közti távolság
- $G_r \rightarrow 1$  – a vevő antenna nyeresége
- $\lambda \rightarrow 0,5 \text{ m}$  – hullámhossz

A használni kívánt 610 MHz-es frekvencián Budapesten jelenleg három DVB-T adótorony üzemel. Ezek a Széchenyi-hegyen, a Hármashatár-hegyen és a Száva utcában találhatóak. A számítások alapján a legnagyobb közvetlen úton érkező jelszintet a Széchenyi hegyi adótorony állítja elő a vételi ponton. Ez körülbelül  $-35 \text{ dBm}$ -re adódik.





4. ábra A Budapesten üzemelő DVB-T adótornyok és a kísérleti radar elhelyezkedése<sup>7</sup>

A DVB-T jel bizonytalansági függvényének ismeretében tudjuk, hogy a reflektált jel minimális jelszintje, 50 dB-el lehet a direkt úton érkező jel teljesítményszintje alatt a detektálás biztosításának érdekében.

A mérések egy 8 elemű 15 dB-es előre-hátra viszonytal rendelkező Yagi antennával készültek. Ennek a vevő antennának a használatával további 15 dB-lel növelhetjük a direkt úton érkező jel és reflektált jel teljesítmény szintje közötti különbséget.

Az előzőek alapján az antenna megfelelő beállításával, a minimálisan észlelhető reflektált jel teljesítményszintje  $P_{min} = -35 \text{ dBm} - 15 \text{ dB} - 50 \text{ dB} = -100 \text{ dBm}$  körül várható.

A fenti (4) bisztatikus radaregyenletet átrendezve a minimálisan detektálható reflektált jelszint ismeretében kiszámítható maximális hatótávolság:[1],[2]

$$R_t R_r = \sqrt{\frac{P_t \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{min}}} \quad (5)$$

A jelölések megegyeznek a fenti (3,4) összefüggésben összefoglaltakkal.

A maximális becült távolság ezek alapján 4,3 km-re adódik. A repülőgépről érkező reflektált jel okozta korrelációs csúcs a számítások szerint tehát ettől a távolságtól kezdve válik észlelhetővé.

<sup>7</sup> forrás : a szerző saját készítésű ábrája

A következő (6) egyenlet felhasználásával a Doppler-frekvenciára is tehető egy hozzávetőleges becslés. [1],[2]

$$f_{Doppler} = \frac{2v}{\lambda} \cos(\Theta) \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (6)$$

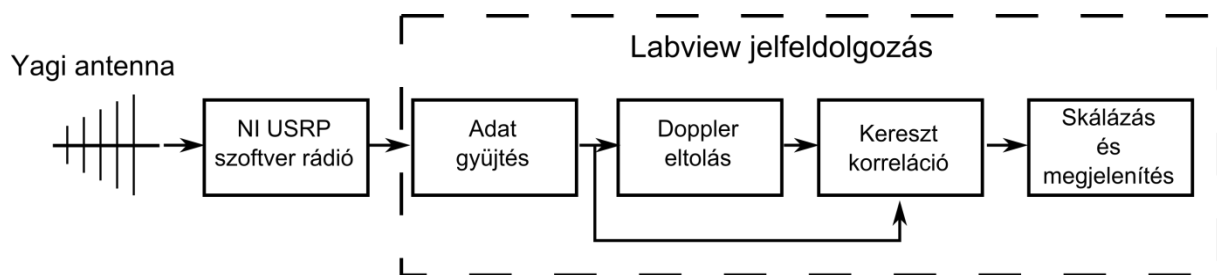
, ahol  $\Theta$  és  $\beta$  a mérés elrendezés geometriai paraméterei. A felszálló repülőgépek átlagos sebessége  $330 \frac{km}{h}$  alapján a várható Doppler frekvencia  $f_{Doppler} \approx 300Hz$ .

A számítások elvégzéséhez a geometriából adódó paraméterek a Google earth program segítségével kerültek meghatározásra.

### A mérési összeállítás

A méréshez az egyszerű tesztkörnyezet felállíthatósága végett alapvetően általános célú hardverelemek kerültek felhasználásra. A rádiófrekvenciás jelek vételére és az adatok gyűjtésére a National Instrument 2920-as univerzális szoftver rádióját használtuk fel. 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 az (5). ábra szemlélteti. A méréshez tervezett Yagi antennáról érkező jeleket a szoftver rádió lekeveri, mintavételezi majd az IQ mintákat továbbítja egy a méréshez elkészített Labview program számára gigabit ethernet keresztül. Az mért adatok tárolása után a Doppler-eltolás korrelációs függvény számítása offline módon történt.



5. ábra Mérési összeállítás blokvázlata

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

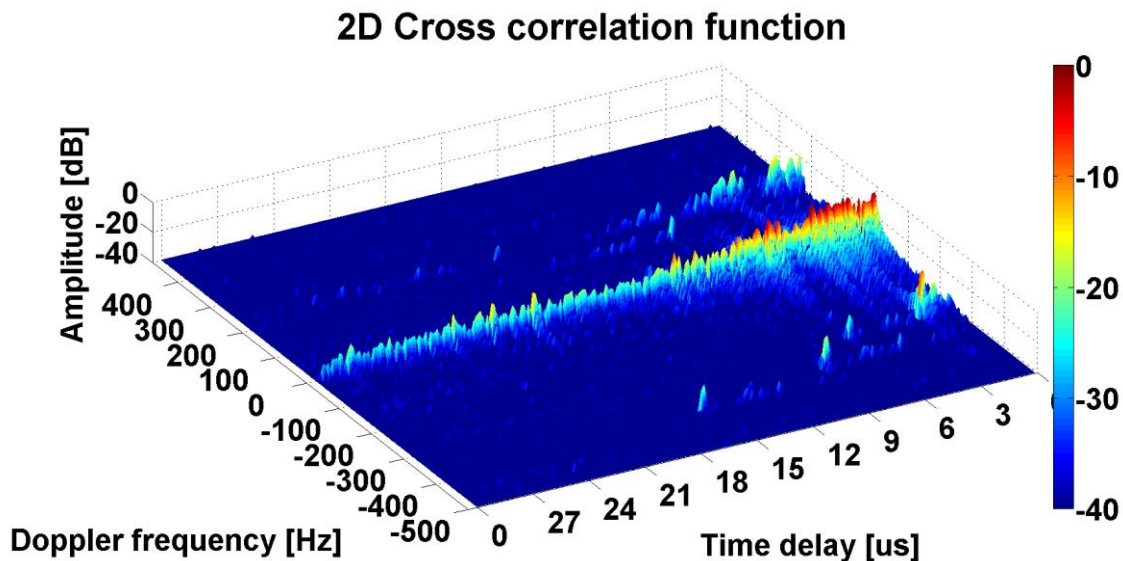
- Működési frekvencia  $\rightarrow 610 MHz$
- IQ Mintavételi frekvencia  $\rightarrow f_s = 9 MHz$
- Bitmélység  $\rightarrow 16 bit$
- Gyűjtött minták száma  $\rightarrow N = 10^6$

Az USRP által küldött adatokat egy Labview alkalmazás fogadta és dolgozta fel. A Doppler-eltolás korrelációs függvény kiszámítása a sebesség növelésének érdekében Fourier transzformációval került kiszámításra.



## MÉRÉSI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

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

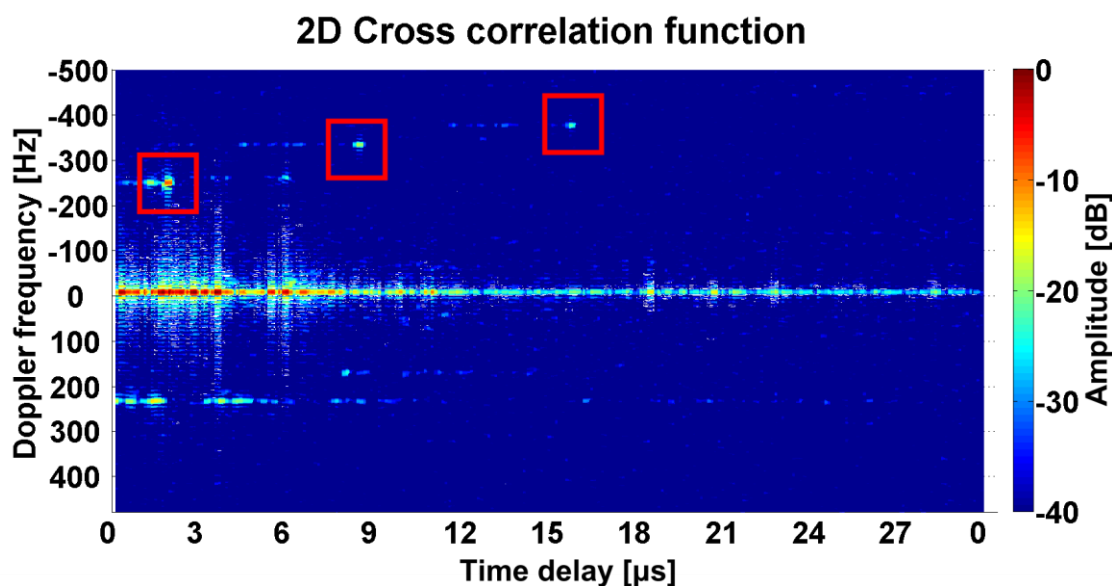


6. ábra Kétdimenziós keresztkorrelációs függvény perspektivikus nézete<sup>8</sup>

A mérési eredmények ábráin feltüntetett időeltolódást átszámítva távolságra, a  $20\mu\text{s}$ -ra  $6\text{ km}$ -t kapunk. Az eredményeket összevetve, elmondhatjuk, hogy a kiszámítottaknak megfelelő eredményeket kaptunk. A radar mérési alapelve tehát helytállónak mondható.

---

<sup>8</sup> forrás : a szerző saját készítésű ábrája



7. ábra Kétdimenziós keresztkorrelációs függvény felülnézete<sup>9</sup>

A korrelációs függvényt megvizsgálva, 0 Hz-en meglehetősen sok olyan korrelációs csúcsot találunk, amelyek nem a DVB-T jel felépítéséből adódóan vannak jelen. A radar tehát rengeteg olyan a műsorszóró adótoronytól származó jelet vett, amelyek a környező tereptárgyakról visszaverődve, több utas terjedésen keresztül jutottak a vevő antennájára. Ez nagy mértékben csökkentheti a hasznos korrelációs csúcsok kiemelkedésének mértékét.

Mindazonáltal a leglényegesebb korlátozó tényező a nagy teljesítménnyel érkező direkt jel, amely az előzetesen becsülteknek módon elfedte céltárgyról távolabbról reflektálódó jeleket.

A különböző adótoronyoktól érkező referencia jeleket ezért nagyságrendekkel ajánlatos csökkenteni a vett jelben ahhoz, hogy a céltárgyról érkező reflexió korrelációs csúcsa elegendően kiemelkedjen a referenciaként használt adások korrelációs függvényének küszöbszintje alól. Erre a feladatra a leghatékonyabb megoldás a referenciajelek kioltása (vagy legalább elégséges mértékben való csillapítása) a vett jelben. A megvalósításához antennarendszerre és egy többsatornás koherens vevőegységre van szükség.

## ÖSSZEZÉS

Az első szakaszban bemutatásra kerültek a passzív radarok fundamentális működési elvei, a detektáláshoz használt jelfeldolgozó eljárások alapjai.

A második szakaszban a megvilágító források tulajdonságai kerültek elemzésre. Ezek közül is részletesebben az Analóg Tv jel és DVB-T jel. Az elérhető dinamikatartományok ismeretében a DVB-T jel használata javasolt a passzív radarok megvilágító forrásaként.

A harmadik szakaszban egy teljes értékű demonstrációs tesztmérés került bemutatásra. A mérési eredmények alapján levonható a következtetés, hogy a passzív radarok céltárgy detektálási elve az első szakaszban felvázoltak szerint gyakorlatban is helytállónak bizonyult.

<sup>9</sup> forrás : a szerző saját készítésű ábrája

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

## KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

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

- [1] MERRILL I. SKOLNIK Radar Handbook, McGraw-Hill Professional; 2 edition January 1, 1990
- [2] NICHOLAS J. WILLIS Bistatic Radar, SciTech Publishing Inc, 2005
- [3] M. RADMARD, M. BASTANI, F. BEHINA, 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 LANGELLOTTI 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. BEHINIA, 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