



Nemzeti Közszerológati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Üzemeltető Intézet
Katonai Repülő Tanszék



ORSZÁGOS TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

RADARKERESZTMETSZET MÉRÉSE DOPPLER ELJÁRÁS SEGÍTSÉGÉVEL

A konzulens neve, beosztása:

Dr. Ludányi Lajos ny. alezredes, főiskolai tanár

Készítették:

Fábián Kristóf honvéd tisztjelölt

Kiss Zsolt honvéd tisztjelölt

Szolnok

2015

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	3
1. A kutatás elméleti háttere.....	6
1.1 A radar egyenlet értelmezése:.....	6
1.2 RCS függése a fizikai méret és a frekvencia viszonyától.....	7
1.3 Radar célok modellezése és szemléltetése.....	8
1.3.1 Fizikai optikai modell	9
1.4 Hatásos visszaverő felület csökkentése érdekében használt eljárások	10
1.4.1 Formakezelés	10
1.4.2 Radarjel-elnyelő anyag alkalmazása.....	11
1.4.3 Passzív kioltás.....	12
1.4.4 Aktív kioltás.....	12
1.5 A Doppler jelenség	12
1.5.1 A CW (Continuous Wave) folyamatos üzemű radar	13
1.5.2 Doppler frekvencia számolása	14
1.6 A méréseink során alkalmazott Doppler radar főbb műszaki jellemzői.....	15
1.6.1 Technikai adatok.....	16
1.6.2 A radar működési elve	17
1.6.3 A radar iránykarakterisztikája.....	18
2. Mérés.....	21
2.1 Reflektáló lapok mérése	21
2.1.1 A mérés összeállítás leírása	21
2.1.2. Reflektáló lapok mérési eredményei.....	22
2.2 A repülőgép mérése	27
2.2.1 A mérési összeállítás leírása	27
2.2.2 Teljes fém felületű repülőgép	28
2.2.3 Kompozit függőleges- és vízszintes vezérsíkú repülőgép	31
2.2.4 Kompozit hátsórészű repülőgép.....	33
2.2.5 Kompozit orr- és hátsórészű repülőgép	35
2.3 A kapott eredmények értelmezése	38
Összegzés	46
Felhasznált irodalom	47
Mellékletek.....	48

BEVEZETÉS

2001. szeptember 11-én az al-Kaida terroristái több utasszállító repülőgépet térítették el. A terroristák úgy váltak a légiirányítás számára közel láthatatlanná, hogy a repülőgépek transzponder válasz-jeladó berendezéseit deaktiválták. A repülőgép transzpondere a földi radar mellett levő transzponder-radar jelére válaszol. Az adatokat vagy a légi irányítás kéri le, vagy a pilóta mondja be.

Az aktív válaszadó funkció tulajdonképpen mintegy felerősíti a földi radar jelét. Az aktív visszasugárzás által megnöveli a földi radar hatótávolságát. Az aktív válaszadó üzemmód lehetőséget nyújt arra, hogy erre a jelre plusz információkat is rá tudjanak ültetni, például: repülés iránya, magassági adat, katonai gépek esetében IFF jelet, fedélzeti számokat, járatazonosítót ad meg. Ennek az aktív válaszadónak több csatornája van, és ha a pilóta elfelejti átkapcsolni a megfelelő frekvenciára, akkor a légi irányítás nem tudja felvenni vele a kapcsolatot. Következésképpen a transzponder rossz üzemmódra való állítása, vagy bekapcsolásának elmulasztása okozhat problémákat.

Abban az esetben, ha ki van kapcsolva, az irányítás indikátor monitorán, mint videojel megjelenik a repülőgép, de nincsenek hozzárendelve a repülési adatok. A földi radar által detektált beérkező fluktuáló visszavert jel szűrve van, fel van erősítve, azért, hogy az indikátor kijelzőn világos, éles jól behatárolható pont jelenjen meg. Ha közvetlenül a kisugárzott és visszavert jel lenne rávezetve a légi irányítás kijelzőjére, akkor az ott megjelenő kép értelmezhetetlen lenne. A videojel pontos helyzetét, adatait nem lehetne megállapítani. Tisztítani, integrálni kell a jelet, az ernyőre nem a primer radarjel kerül, hanem az úgynevezett videojel, amely nagy erősségű, és zavarmentes. Ehhez hozzá kell rendelni a transzponder által szolgáltatott adatokat, azért hogy a repülésirányító tisztában legyen, hogy milyen repülőgépről van szó. Mivel ezek a fent említett esetben elvesztek, a légi irányítás nem tudta, hogy hol van pontosan a repülőgép, csak egy videojelet észleltek, amely bizonyos időközönként elmozdult, de hogy az milyen magasan, és milyen járatszámú repülőgép volt a sok másik pont között nem tudták megállapítani. Az esetet követően a nagy repülőgépgyártó cégek elkezdtek vizsgálni a repülőgépek radarkeresztmetszetének (Radar Cross Section, továbbiakban: RCS) struktúráját. A mérések alapján elkészítettek egy adatbázist, amelyet a légi irányítási központokkal megosztottak. Ennek segítségével egy előszűrést végeznek a radar által vett jeleken, amely alapján megállapítják a repülőgép típusát és ez kerül ki a légi irányítás indikátor ernyőjére. Ez nagy segítség a légi irányításnak, ugyanakkor a technológia fejlődése lehetőséget nyújtott arra, hogy az új repülőgépek építésében egyre több – igen kedvező tulajdonsággal bíró – kompozit anyagot használjanak fel, szemben a hagyományos, csak fém felépítésű alkatrészekkel. Az új

kialakítások következtében a repülőgépek RCS struktúrája megváltozott, így az előbb említett adatbázis használhatóságát elvesztette. Tehát a technológia fejlődésével az adatbázis folyamatos frissítésre szorul.

Az 1990-es években gyártott repülőgépek szerkezetének 10-15%-át építették kompozitokból, ám az Airbus legújabb modellje, az elsőként 2013.06.14-én felszálló A350-es, már 50%-nyi kompozitból készült, ami nagy és fontos előrelépésnek tekinthető.



1. ábra Kompozit hátsó részű Airbus A350 ¹

Üzemeltetési szempontból mindenféleképpen kiemelendő az a tény, hogy a kompozit alkatrészek akár 20%-kal is könnyebbek lehetnek, mint alumíniumból készült megfelelőjük. Az pedig magától értetődik, hogy ha az adott gép össztömege kisebb, mint hagyományos anyagokból készült társai, akkor az a repülőgép sokkal gazdaságosabban üzemeltethető. A kompozitok olyan társított anyagok, amelyeket főleg szénszálak, kerámia, műanyag, illetve üveg egyesítésével állítanak elő.

A leggyakrabban alkalmazott anyagok tulajdonságait az alábbi táblázat mutatja:

	Vezető képesség (S/m)	Relatív permittivitás
Szénszálak anyagok	40 000	3,4
Epoxy	50	3,4

1. táblázat A kompozitok esetében leggyakrabban alkalmazott anyagokra jellemző fizikai paraméterek ²

Amint a táblázatból látható, a szénszálak anyagoknak sokkal nagyobb a vezetőképessége (konduktivitása), mint az epoxynak. Az anyagokra jellemző vezetőképességből közvetve adódik a veszteségi tényező, amelyet a következő módon határozhatunk meg:

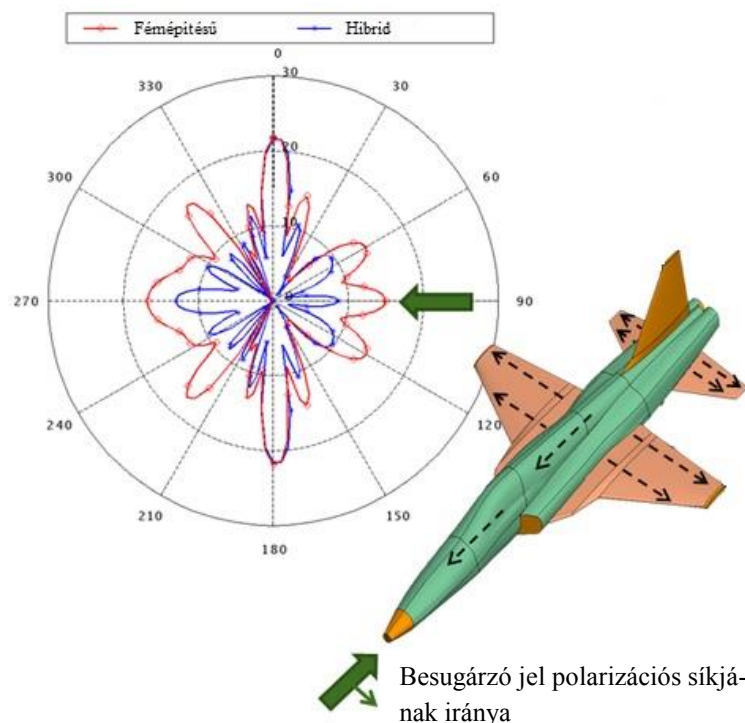
¹ http://www.ainonline.com/sites/default/files/uploads/a350xwb_msn2_first_flight_3_.jpg (2014.10.28.)

² Forrás: <http://www.feko.info/applications/white-papers/the-effect-of-carbon-fibre-body-panel-on-aircraft-rcs/the-effect-of-carbon-fibre-body-panel-on-aircraft-rcs/view> Készítették: a szerzők (2014.09.10.)

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (1)$$

ahol: ε'' - abszorpciós tényező, és ε' - relatív permittivitás. Az ε'' értéke a lopakodó technikában minősített adat, ezért ezt a gyárak szándékosan nem adják meg.

Egy korábban elvégzett számítógépes becslési számítás alkalmával egy F5-ös vadászpilóta gépet 50 MHz-es frekvenciájú jellel sugároztak be. A számítás célja az volt, hogy csökkentse az F5-ös radarkeresztmetszetét azáltal, hogy a főbb felületelemeket – gondolunk itt a szárnyakra, a függőleges vezérsíkra, magassági kormányokra – kompozit anyagokra cserélték. A hibrid (fém és kompozit) és a fém repülőgépek RCS struktúrája hasonló alakú, de amplitúdójában jóval kisebb reflektált jelet mértek.



2. ábra F5-ös vadászpilóta gép RCS karakterisztikája 50 MHz-es besugárzáskor³

Dolgozatunk célja, e tényeket figyelembe véve, a fém- és kompozit anyagokból készült repülőgépek visszavert jeleinek mérésekkel alátámasztott vizsgálata.

Katonai szempontból nézve az RCS csökkentése a repülőgépek esetében előnyös, illetve a tervezésük során tudatosan törekednek rá. A lopakodó technológiában a fém felületre ferrit szemcséket gözölögtettek, így az segít az el nem reflektált hullámok elnyelésében. Polgári szempontból viszont ez a jelenség problémát jelent. A légi irányítás feladatát a detektálás lehetőségének csökkenése megnehezíti.

³ Forrás: Uo. Készítették: a szerzők (2014.09.10.)

1. A KUTATÁS ELMÉLETI HÁTTERE

1.1 A radar egyenlet értelmezése:

A radar viselkedésének meghatározásához a radar egyenletet használjuk, amely tartalmazza a következő paraméterek kapcsolatát: adó, vevő, antenna, cél, és környezeti tényezők. Ez az egyenlet a maximális hatótávolság, és a radar hasznos teljesítményét befolyásoló tényezők meghatározásához szükséges.⁴

A radaregyenlet:

$$P_r = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \right) \left(\frac{\sigma}{4\pi R^2} \right) \left(\frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \right) \quad (2)$$

ahol:

P_r – reflektált teljesítmény [W];

P_t – adóteljesítmény [W];

G_t – kisugárzó antenna nyeresége;

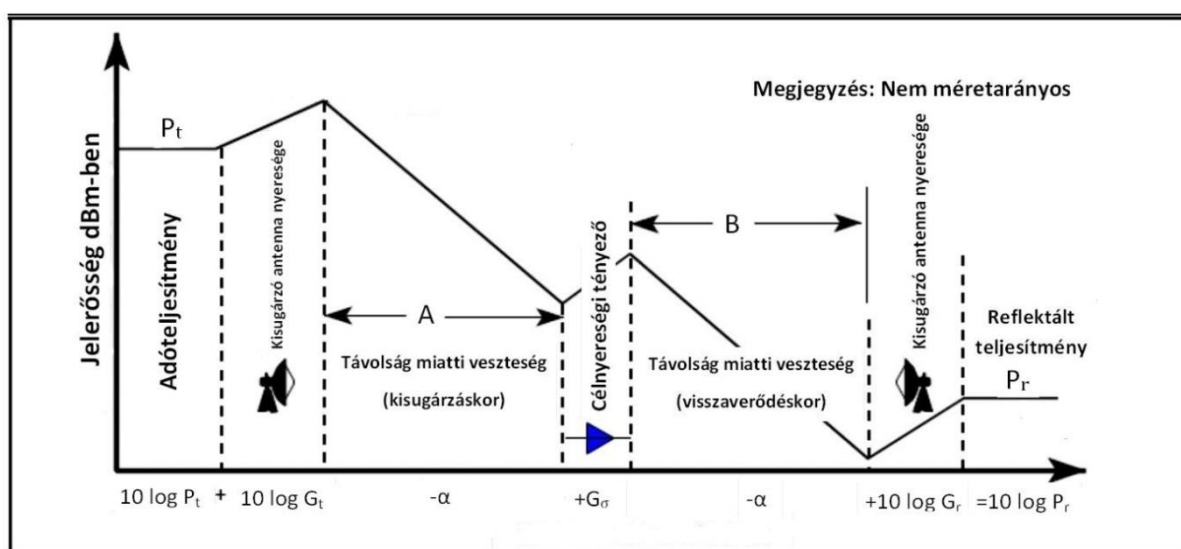
G_r – vevő antenna nyeresége;

σ – radar keresztmetszet (RCS) [m²];

R – adó és cél távolsága [m];

λ – kisugárzott jel hullámhossza [m].

A radaregyenlet értelmezésekor felhasználhatjuk a jel terjedésének 3. ábráját.



3. ábra A jel terjedése a térben⁵

⁴ <http://www.shipjournal.co/index.php/sst/rt/prnterFriendly/72/250> (2014.09.15.)

⁵ Forrás: Uo. Készítették: a szerzők (2014.09.15.)

Az (2)-es egyenletben az első zárójeles tag a radar teljesítménysűrűsége a célon $[\frac{W}{m^2}]$. Az első és második zárójeles kifejezés mutatja a vevő radarnál lévő teljesítményt, viszont itt már figyelembe véve a visszaverődést, és a jelszóródást a célról. A harmadik tag az antenna hatásos felületét adja meg.

Ahol az adó- és vevőradar megegyezik, ott $G_t = G_r = G$ így a képlet az alábbi módon változik:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (3)$$

$R_{\max}$ -nak nevezzük azt a távolságot, amelyen túl a cél már nem detektálható. Ez akkor fordulhat elő, amikor a P_r reflektált teljesítmény egyenlő az $S_{\min}$ minimális detektálási jellel. Ezt az egyenlőséget behelyettesítve, és átrendezve az egyenletet kapjuk a következő kifejezést:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 S_{\min}}} \quad (4)$$

A (4)-es egyenlet adja meg a kapcsolatot a radarkeresztmetszet és a cél között. Az RCS azt a tulajdonságot jelöli, hogy a tárgyra sugárzott jel hányad része reflektálódik vissza a radar irányába, illetve a besugárzott jelből mennyi szóródik szét. Az RCS meghatározása:

$$\sigma = \frac{\text{egységnyi térszögbe a radar felé reflektált teljesítmény}}{\text{a céltárgyra eső teljesítménysűrűség}/4\pi} \quad (5)$$

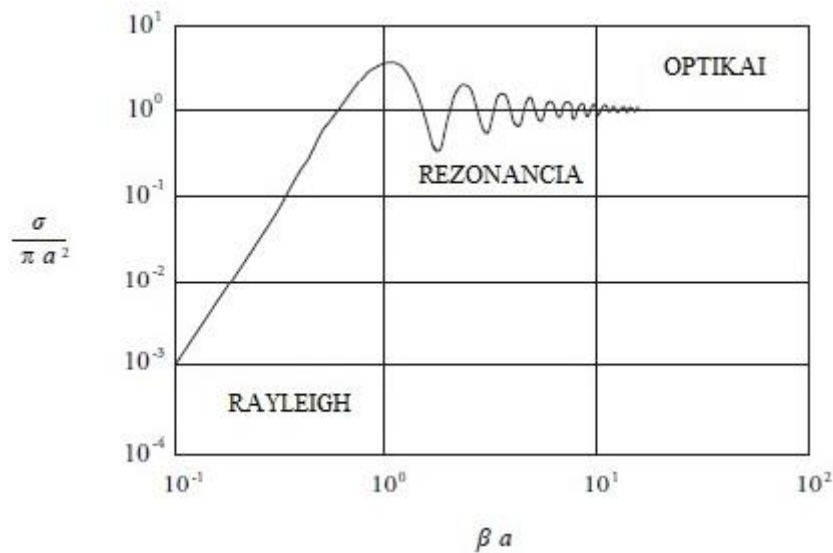
Nyilvánvaló, hogy egy tárgy RCS-e annak a mértéke, hogy mennyi az adott irányból az egységnyi felületre érkező jel által okozott teljesítménysűrűség.

Néhány tényező, amely meghatározza a visszavert elektromágneses energia mennyiségét:

- az adott cél anyaga, és geometriája;
- a cél abszolút mérete;
- a cél relatív mérete a kisugárzott jel hullámhosszához képest;
- beesési szög, amely egyenlő a kisugárzott jel, és a visszaverő felület normálisa által bezárt szöggel. Ez függ a tárgy alakjától, és irányítottságától;
- visszaverődési szög, amely egyenlő a céltárgy felületéről visszaverődő hullám és a tárgy felületének normálisa közti szöggel. Ez közvetlenül kapcsolódik a beesési szöghöz;
- adójel erőssége;
- radar és cél közti távolság.

1.2 RCS függése a fizikai méret és a frekvencia viszonyától

Az analízis érdekében fontos tudnunk a radarkeresztmetszet értékeit különböző frekvenciákon. Három frekvenciatartományt különböztetünk meg a cél RCS-e szempontjából (4. ábra).



4. ábra Tökéletesen vezető „a” sugarú gömb RCS-e⁶

A vízszintes tengelyen a hullámhossz és a gömbi főkör területének aránya, a függőleges tengelyen a hatásos visszaverő felület és a gömbi főkör területének aránya van ábrázolva.

$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ – fázistényező;

a – gömb sugara;

σ – hatásos visszaverő felület.

- alacsony frekvenciájú- vagy Rayleigh tartomány: ($\frac{2\pi a}{\lambda} < 1$) Ekkor a hullámhossz arányai-
ban nagyobb a céltárgy méreténél. Itt az indukált áram amplitúdóban és fázisban állandó;
- rezonancia- vagy Mie tartomány: ($\frac{2\pi a}{\lambda} \approx 1$) a céltárgy geometriai mérete közel azonos
a hullámhosszal. A céltárgyról a radar vevőjébe egy közvetlen reflektálódott, valamint
egy, a fémfelületen keletkező faláramok generálta másodlagos visszaverődött jel is
bekerül, és ezek interferálnak;
- nagyfrekvenciás- vagy optikai tartomány: ($\frac{2\pi a}{\lambda} > 1$) itt a céltárgy mérete jóval na-
gyobb a hullámhossznál. A cél apertúra-síkként kezelhető.⁷

1.3 Radar célok modellezése és szemléltetése

Többféle eljárás lehetséges, mint például szilárd testek, élek, ívelt felületek, metszetek model-
lezése. Ezek az eljárások a radar keresztmetszet előrejelzésben játszanak szerepet. Fontos,
hogy ezek a valóságnak megfelelő, reális modellek legyenek, azért, hogy a repülőgép felszí-
nén létrejövő elektromágneses jelenségeket vizsgálni lehessen.

⁶ Forrás: Uo. Készítették: a szerzők (2014.09.15.)

⁷ http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2014_cikkek/2014-2-44-0147_Partos_Sandor.pdf (2014.09.15.)

A leggyakoribb módszer a mai modellezésben a sima metszetek éleinek vizsgálata, ahol a felület hasonlít a valódira, és magas fokú lehet az előrejelzés.

Fő hátránya a modellezésnek az, hogy a minta kialakítása rendkívül bonyolult olyan tárgyak esetében, amelyek olyan összetett felületeket tartalmaznak, mint pl. a repülőgép szárnyai, vagy a hajtómű, ahol több száz metszetre lenne szükség a valós modellezés érdekében.⁸

Egy pontos modell megteremtésének érdekében a metszeteket minél jobban a valós repülőgéphez kellene közelíteni, amely úgy érhető el, hogy csökkentjük a használni kívánt felület darabok számát. Ezek, a térbeli koordinátáknak az alapján jellemzett metszetek, rendkívül nagy mennyiségű információ feldolgozást vonnak maguk után a nagyfrekvenciás tartományban.

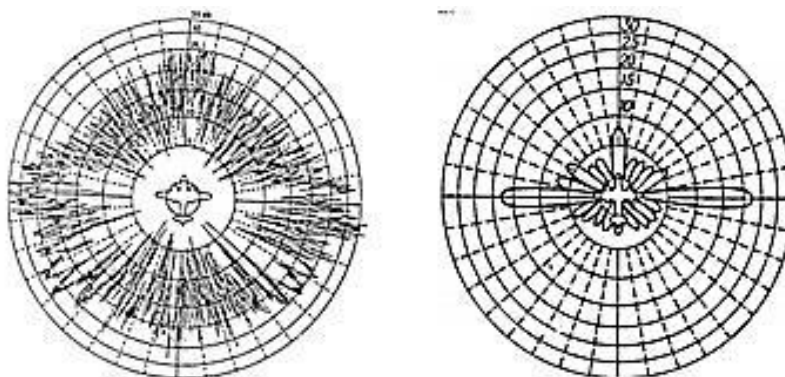
1.3.1 Fizikai optikai modell

Összetett célok RCS-e meghatározható úgy, hogy az egyes besugárzott területek reflektált jeleit összegezzük.

A metszetek szerinti modellezés lehetővé teszi, hogy a diffrakciót könnyen beépítsük az élekbe, azáltal, hogy a szomszédos oldalak éleit vizsgáljuk. Ezek az élek megfelelhetnek a valóságos modell kialakításának (mint például egy repülőgép szárnyának kilépő éle, vagy ívelt felületek).

A fő hátrány ennél a módszernél a korlátlan frekvencia alkalmazása (5. ábra). A fizikai optikai közelítésnél a besugárzott területen létrejövő indukált áramokat határozhatjuk meg. Hogy ezt az eljárást alkalmazhassuk a repülőgépen, csak a besugárzott felülettel foglalkozunk, az árnyékban levő területet nullának vesszük.

Mivel a fizikai optikai módszer a tárgy felszínén létrejövő áramokat úgy közelíti, mintha az egy valós repülőgépe lenne, így a nagy felületekről reflektálódó jelet jó aránnyal közelíti, míg a kisebb felületeket, éleket, és felfüggesztéseket helytelenül becsli. Ez jó eredményeket produkál a nagyméretű radar céloknál, mint például a törzs domináns felülete.⁹



5. ábra B-26-os bombázó vízszintesen polarizált jel mérésével (bal) 10 cm-es, (jobb) 3-5 m-es hullámhosszal¹⁰

⁸ <http://www.shipjournal.co/index.php/sst/rt/prINTERfriendly/72/250> (2014.09.15.)

⁹ Uo.

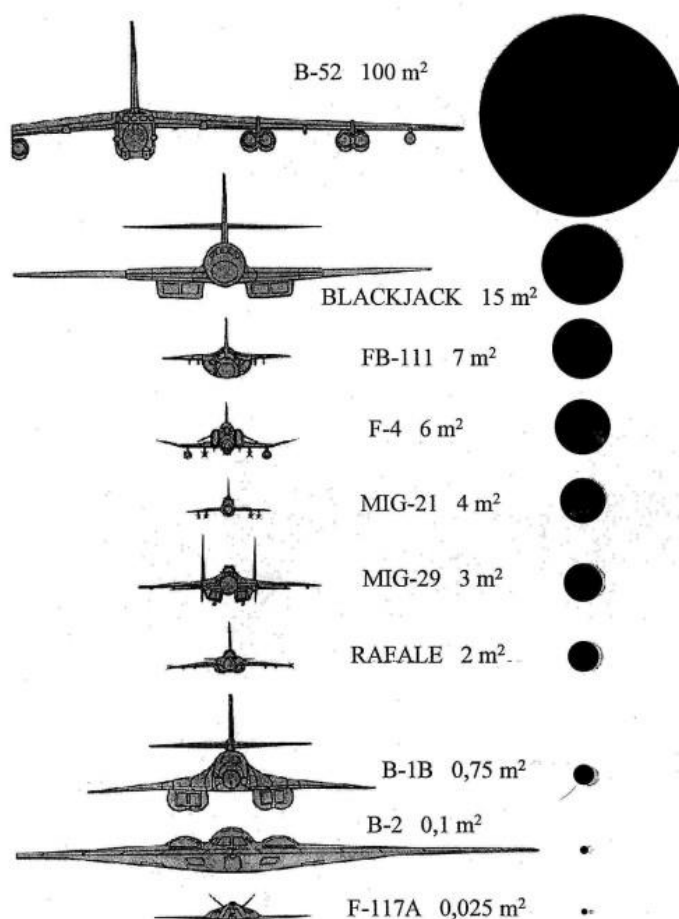
¹⁰ <http://worldtracker.org/media/library/Reference/Encyclopedia's/Encyclopedia%20of%20Radar%20Technology%20.pdf> (2014.09.17.)

1.4 Hatásos visszaverő felület csökkentése érdekében használt eljárások

1.4.1 Formakezelés

Egy repülőgép hatásos visszaverő felületét kisebb mértékben határozza meg annak geometriai mérete, mint pl. az élek kialakítása (6. ábra).

Ennek az eljárásnak a tervezési ciklusban van a legnagyobb jelentősége. Itt az a cél, hogy a repülőgépen lecsökkentsék a szögletes formákat. Ezt követően lehet alkalmazni a mikro-geometriai elemek RCS-ének csökkentését. Ez úgy valósul meg, hogy az adott alrendszereket megszünteti, vagy újratervezi, és így a radar jelet meghatározott irányba szórja szét, és ezáltal csökken a hatásos visszaverő felület. A gondos tervezés is az előnyünkre válhat, azáltal, ha a felületet előkészítjük, minimalizáljuk a nyílások számát, illetve a nem használt érzékelőket, és fegyverrendszereket elrejtjük.¹¹

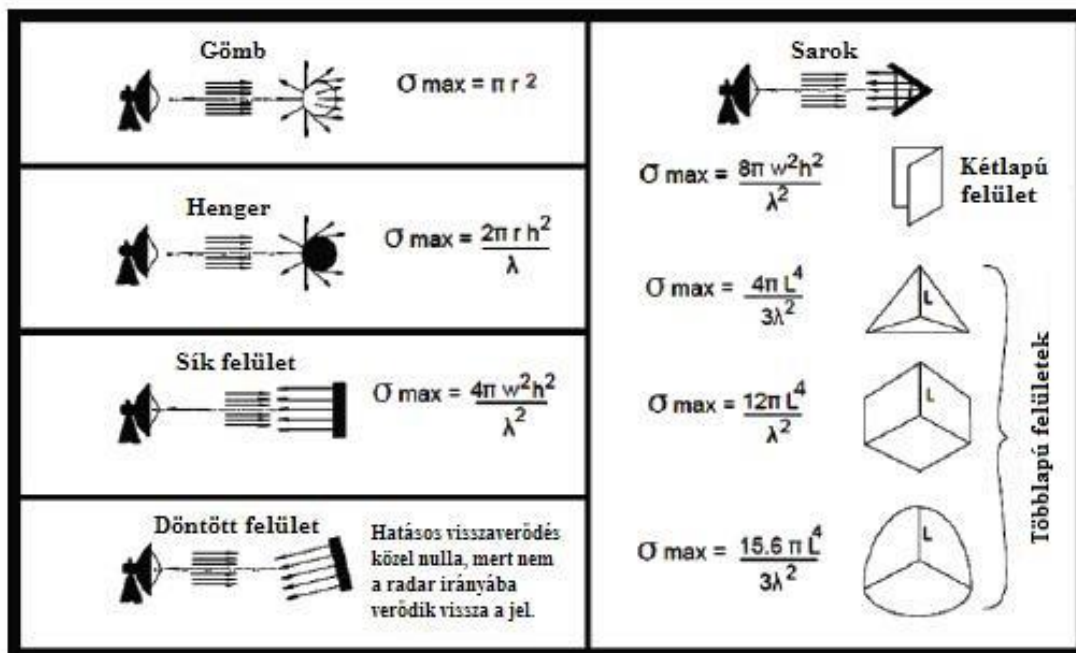


6. ábra Különböző típusú repülőgépek radarkeresztmetszetének nagysága¹²

A 7. ábra a radar jel szétszóródását mutatja különböző felületekről. Leolvasható, hogy minél szögletesebb tárgyról beszélünk, annál nagyobb a visszavert jel.

¹¹ <http://www.shipjournal.co/index.php/sst/rt/prINTERfriendly/72/250> (2014.09.15.)

¹² http://www.google.com/imgres?imgurl=http://sg.hu/kep/2011_06/sg2011_14_03.jpg&imgrefurl=http://sg.hu/cikkek/82641/van-jov337juk-a-lopakodo-vadaszgepeknek&h=681&w=500&tbnid=UZ1A-Ka27OpaOM&zoom=1&tbnh=262&tbnw=192&usq=__qBWgc_-zlETQ4PWQLmTP0FELvCw= (2014.09.27.)



7. ábra Maximális RCS különböző felületeknél¹³

A maximális hatásos visszaverő felület meghatározását különböző felületeknél kísérleti mérések útján határozzák meg.

1.4.2 Radarjel-elnyelő anyag alkalmazása

A repülőgépek felületét különböző radarjel-elnyelő anyagokkal kezelik, és vonják be. Ezek fontos szerepet játszanak a hatásos visszaverő felület csökkentésében. A visszavert radar jel tartalmazza a közvetlen reflexiót, a különböző élekről való visszavert jelet, valamint a többszörös reflexiót, amely a vevő bemenetén jelenik meg.

Ezek az anyagok számos formában alkalmazhatóak, attól függően, hogy mi a felhasználás módja. Például a repülőgépeken felhasznált anyagoknak ellen kell állniuk a korróciónak, a nyomáskülönbségnek, és különböző környezeti behatásoknak. Vannak olyan különleges kialakítású radarjel-elnyelő panelek, amelyek kis tömegűek, és úgy tervezték őket, hogy el lehessen helyezni a sárkányszerkezeten (ezek a berendezések a szélessávú jelet nyelik el). A nehezebben hozzáférhető helyeket általában ugyanilyen összetételű spray-el kezelik. Könnyű összetételű habokat is alkalmaznak olyan helyeken, ahol jel kisugárzása történik (pl. kupolák, antennák). Érdekes még megemlíteni a repülőgépeknél alkalmazott radarjel elnyelő fóliát, amelynek anyaga apró ferrit-kristályokból épül fel.

Ezen anyagok tervezésénél figyelembe kell venni az általánosan használt radarok (felderítő, és rávezető) frekvenciáit. Általában a repülőgépek elleni földi rávezetésű rakéták a 6-18 GHz-es tartományban üzemelnek.

¹³ Forrás: <http://www.tscm.com/rcs.pdf> Készítették: a szerzők (2014.09.20.)

1.4.3 Passzív kioltás

Ennek az az alapja, hogy a felületen kialakítanak egy olyan visszavert jelforrást, amelynek különböző paraméterei (fázis, amplitúdó) szabályozhatóak. Ezáltal törli más visszaverő jelforrás intenzitását. Ez általában bonyolultabb testek esetében nem alkalmazható sikeresen, hiszen az elrendezés jelentősen frekvencia és rálátási-szög függő.

1.4.4 Aktív kioltás

Ez a technológia még fejlesztés alatt áll, lényege, hogy a reflektált jelet fázisban, és amplitúdóban kioltó másik sugárzást bocsásson ki a repülőgép.

Ez az elv akadályokba ütközik, mert a visszasugárzás elektronikájának olyan bonyolult repülési jellemzőket kell ismerni, mint például a beérkező jel beesési szöge, intenzitása, frekvenciája, valamint ismernie kell a saját repülőgép visszaverődő jelének jellemzőit. Ezek ismeretében képes megfelelő frekvenciájú, és hullámformájú jelet kibocsátani.¹⁴

1.5 A Doppler jelenség

Mikor a radar elektromágneses hullámot bocsájt ki egy céltárgy felé, a hullám kölcsönhatásba lép a tárggyal majd visszaverődik arról. A visszaverődött hullám tulajdonságaiban bekövetkezett változások egyértelműen tükrözik a céltárgy bizonyos jellemzőit. A radar méri a kibocsájtott jelre érkező visszavert jelet, ezáltal érzékeli a cél jelenlétét, és behatárolja annak térbeli pozícióját.

Az impulzus radarok egy relatív rövid, nagy energiájú elektromágneses jelet sugároznak ki, miközben a vevő vár a visszavert jelre. A visszavert jel önmagában csak a cél ottlétéről szolgál információval, sokkal érdekesebb számunkra a kibocsájtás és a visszavert jel fogdása között eltelt idő, mivel ebből a radar – cél távolságra tudunk következtetni. A visszavert- és a kibocsájtott jel elkülönítése a kettő időbeni különbségen alapszik.

Viszont ha a cél és a radar között relatív mozgás van, akkor a jelek elkülönítése a Doppler jelenség alkalmazásával oldható meg. Ez pedig a visszavert jel fázisváltozásából adódó frekvenciaváltozásának detektálásán alapszik.¹⁵

Doppler eltolódásnak nevezzük azt a jelenséget, amikor a fény- vagy hanghullámok esetében jelentős különbség jelentkezik a hullámforrásnál és az észlelési pontnál mért frekvenciák között. Ezt a hullámforrás és az észlelési pont egymáshoz viszonyított mozgása okozza. A Doppler eltolódást a csillagászati mérésekhez, a radar technikához és a modern navigációhoz is felhasználják. Először 1842-ben egy osztrák fizikus, Christian Doppler írta le ezt a jelenséget.¹⁶

¹⁴ <http://www.shipjournal.co/index.php/sst/rt/prINTERfriendly/72/250> (2014.09.15.)

¹⁵ <http://nptel.ac.in/courses/101108056/module2/lecture4.pdf> (2014.10.05.)

¹⁶ <http://www.acfr.usyd.edu.au/pdfs/training/sensorSystems/14%20Doppler%20Measurement.pdf> (2014.04.28.)

A mono-statikus radarok esetében, ahol az adó és a vevő azonos helyen található, az elektromágneses hullám által megtett teljes táv az adó és a cél közötti távolság kétszeresével egyenlő. A Doppler frekvenciát az elektromágneses hullám hullámhossza, illetve a radar és a cél közötti távolság határozza meg: $F_D = \pm 2v/\lambda$, ahol $\lambda = c/f$ a hullámhossz, v pedig a radar és a cél relatív sebessége.

Abban az esetben, ha a radar nem mozog, a relatív sebesség a célnak a radar látótengelye mentén eső sebességkomponensével (radiális sebességével) lesz egyenlő. Ha a cél távolodik a radartól, akkor a sebességet negatívnak tekintjük, ennek következtében a Doppler eltolódás negatív lesz, mivel a visszavert hullám hullámhossza megnő, frekvenciája csökken. Ha a cél közeledik, a visszavert hullám hullámhossza rövidebb lesz, frekvenciája nő, ekkor pozitív Doppler eltolódásról beszélünk.¹⁷

1.5.1 A CW (Continuous Wave) folyamatos üzemű radar

Azokat a CW radar-berendezéseket, amelyek a Doppler frekvencia feldolgozásával végzik a méréseket, Doppler radaroknak nevezzük. A CW radarok időben állandó amplitúdójú és állandó frekvenciájú modulálatlan jelet sugároznak ki. Az egyszerű CW radar a távolság mérésére nem alkalmas, mivel nincs az idő késés megállapításához szükséges viszonyítási alapja.

Az impulzus radar esetén, mint már fentebb említettük, a rendszer impulzusokat sugároz ki és a jel kisugárzása és visszatérése közötti idő intervallumból következtet a radar-cél távolságra. Viszont ha a kisugárzás folyamatos, az eltelt idő mérése nem lehetséges. A CW radar a visszaverődött jel Doppler eltolódásának mérésével a radar-cél távolság pillanatnyi megváltozását képes észlelni.¹⁸

A Doppler frekvenciával a mozgások is mérhetőek, mivel a Doppler radar nem csak a visszavert jel teljesítményét detektálja. A radar a visszavert jel és a kibocsájtott jel frekvenciáit összehasonlítja és meghatározza a különbséget. A kibocsájtott és visszavert elektromágneses hullámok frekvenciájában jelentkező eltérés viszont általában annyira csekély, hogy nem mérhető elég pontosan. Ezért a Doppler radar inkább a jelek fázisára fókuszál, mivel ezen a téren sokkal nagyobb fokú a differencia, ez pedig növeli a detektálás valószínűségét. Így a fázis eltolódás mérésével a kisebb mértékű változások is észlelhetővé válnak.

Az impulzus Doppler radarok esetében a radar egy ismert fázisú referencia jelet és az azt követő visszavert jel fázisát hasonlítja össze. A visszavert jel Doppler eltolódása a fázis időbeni változásából származik.¹⁹

¹⁷ <http://www.ntu.edu.sg/home/ssho/papers/CLHW06.pdf> (2014.04.28.)

¹⁸ <http://fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/cwradar/cwradar.htm> (2014.10.14.)

¹⁹ http://meteorologytraining.tpub.com/14271/css/14271_69.htm (2014.10.25.)

1.5.2 Doppler frekvencia számolása

Ha a földi radar kisugárzott frekvenciája állandó, a távolodó vagy közeledő célról visszavert jel frekvenciája a fázisváltozásból adódóan:

$$\omega_v = \frac{d\varphi_v}{dt} \quad (6)$$

mivel a visszavert jel fázisváltozásának időszerinti deriváltja a körfrekvenciával egyenlő.

A φ_v visszavert jel fázisa ugyanakkor a kisugárzott φ_k fázistól, valamint a földi radar és a repülőgép közötti távolság φ fáziskésésétől függ.

Mivel a $\varphi_k = \omega_k t$, illetve $\varphi = \omega_k t_d = \omega_k \frac{2D}{c}$, ahol a t_d – a földi radar és a repülőgép távolságától függő időkéésés, D – céltávolság, így:

$$\varphi_v = \varphi_k - \varphi = \omega_k t - \omega_k t_d = \omega_k \left(t - \frac{2D}{c} \right) \quad (7)$$

Ebből a visszavert jel frekvenciája:

$$\omega_v = \frac{d\varphi_v}{dt} = \omega_k \frac{d}{dt} \left(t - \frac{2D}{c} \right) = \omega_k \frac{d}{dt} t - \omega_k \frac{2}{c} \frac{dD}{dt} = \omega_k \left(1 - \frac{2}{c} v_c \right) \quad (8)$$

ahol:

$$\frac{dD}{dt} = \pm v_c \quad (9)$$

Mivel $\omega = 2\pi f$, így végezetül:

$$f_v = f_k \left(1 \pm \frac{2}{c} v_c \right) \quad (10)$$

A megközelítési illetve a távolodási sebesség mérését a radar a kisugárzott és visszavert jel frekvenciájának különbségével, a Doppler-frekvenciával detektálja.²⁰

$$F_D = f_k - f_v = f_k - f_k \left(1 \pm \frac{2}{c} v_c \right) = \pm \frac{2}{c} f_k v_c = \pm \frac{2v_c}{\lambda} \quad (11)$$

A Doppler frekvencia számolására használatos (11)-es összefüggés viszont csak abban az esetben igaz, ha a cél a radiális sebesség irányába mozog.

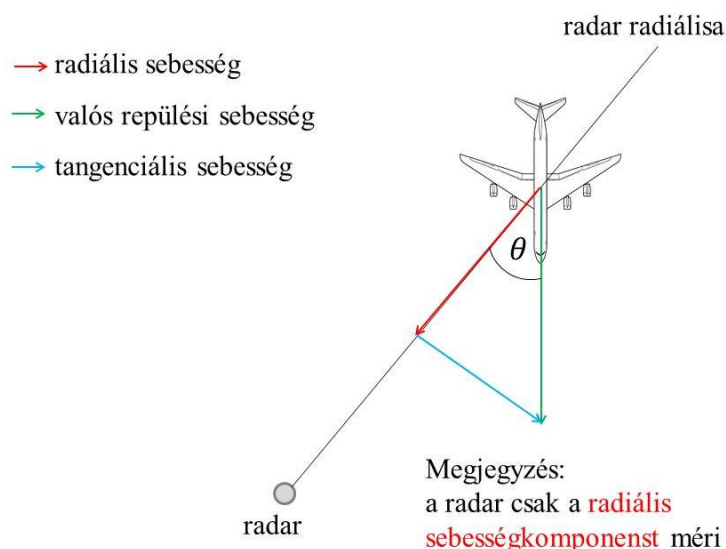
Azonban a repülőgépek általában nem közvetlenül a radar felé, a radiális sebességkomponens irányába haladnak, hanem attól eltérő irányba. Abban az esetben, ha a haladási sebesség és a radiális sebesség vektora θ szöget zár be, akkor az egyenlet

$$F_D = \pm \frac{2v_c}{\lambda} \cdot \cos \theta \quad (12)$$

alakban írható fel (8. ábra). Az utóbbi képlet alapján belátható, hogy ha a cél a radar látótengelyére pontosan merőlegesen halad, tehát $\theta = 90^\circ$, a Doppler frekvencia 0 értékű lesz, mivel ilyenkor nincs radiális sebessége a célnak, csak tangenciális sebessége létezik.²¹

²⁰ <http://www.acfr.usyd.edu.au/pdfs/training/sensorSystems/14%20Doppler%20Measurement.pdf> (2014.04.28.)

²¹ <http://www.radartutorial.eu/11.coherent/co06.en.html> (2014.10.28.)



8. ábra A radar előtt mozgó repülőgép sebességkomponensei²²

A Doppler-frekvencia többnyire a hangfrekvenciás tartományba esik:

Pl: ha $f=1\text{GHz}$ ($\lambda=30\text{cm}$), illetve $\cos \theta = 1$, és a céltárgy sebessége: $v_c=556\text{ m/s}$, akkor

$$F_D = 3700\text{ Hz} \quad (13)$$

Minél magasabb a kisugárzott jel frekvenciája, annál jobban detektálható a kis sebességű cél.

Ha $f=10\text{ GHz}$, akkor:

v_c	556	277	222	166	111	55	27	[m/s]
v_c	2000	1000	800	600	400	200	100	[km/h]
F_D	37 000	18 466	14 800	11 066	7400	3666	1800	[Hz]

2. táblázat A Doppler frekvencia nagysága adott sebességek esetén²³

1.6 A méréseink során alkalmazott Doppler radar főbb műszaki jellemzői

Az általunk használt RSM 1650 típusú radart a HYGROSENS INSTRUMENTS gyártotta.

A radar felhasználási területe igen széles:

- távolság- és sebességmérés;
- riasztó- és biztonsági berendezés;
- OEM (közlekedés biztonsági) alkalmazás autóiiparban.

A radart olyan feladatokra tervezték, amelyekben a cél detektálása, illetve mozgásának észlelése a megoldandó probléma.

²² Készítették: a szerzők

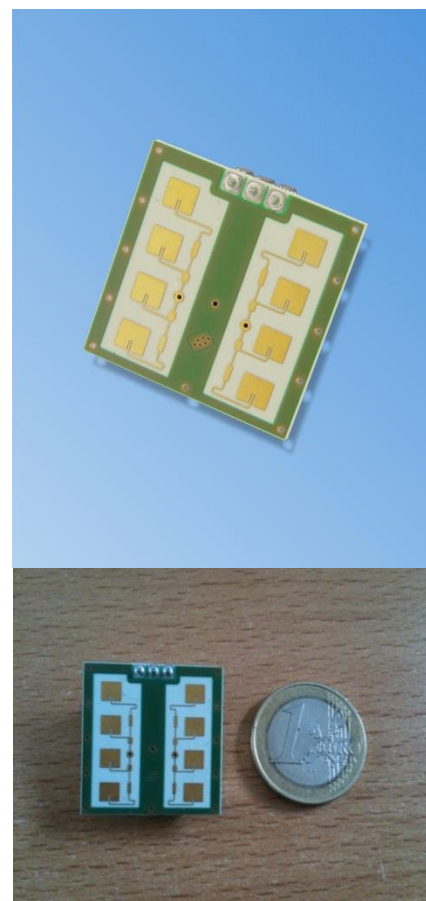
²³ Készítették: a szerzők

Ellentétben a passzív infravörös mozgásérzékelőkkel, amely csak akkor észleli az adott objektumot, ha hőmérsékletbeli eltérés jelentkezik közte és a környezete között, ez a radar az érzékelő irányába eső minden mozgásra reagál. Így, a mozgásérzékenysége rendkívül magas, és jól alkalmazható, amikor valaminek a jelenlétét kell megfigyelni.

Az egység, egy erősítés nélküli kevert jelet generál, amelyet fel kell erősíteni, mielőtt azt mikrokontrollerrel vagy komparátorral értékelni lehetne. A méréseink során az előbb említett funkciókat a számítógép hangkártyájával biztosítottuk.²⁴

1.6.1 Technikai adatok

Üzemi feszültség	4,75-5,25 V
Tápáram	30-40 mA
Üzemi hőmérséklet	-20 – +60 °C
Frekvencia	Szabvány: EU: 24-24,25 GHz UK: 24,15-24,25 GHz F: 24,075-24,175 GHz
Leadott teljesítmény	16 dBm
Hőmérsékletingadozás	-1 MHz/°C
Antenna karakterisztika	Vízszintesen 80 ° (azimut) Függőlegesen 32 ° (emelkedés) -3 dB-es szinten mérve
Oldalszirom-elnyomás	Vízszintesen 13 dB (azimut) Függőlegesen 13 dB (emelkedés)
IF kimeneti feszültség	-300 – +300 mV
Jelszint	A kategória (kicsi): 263-399 mV B vagy E kategória (közepes): 400-549 mV C kategória (nagy): 550-8502 mV



9. ábra RSM 1650-es Doppler radar²⁵

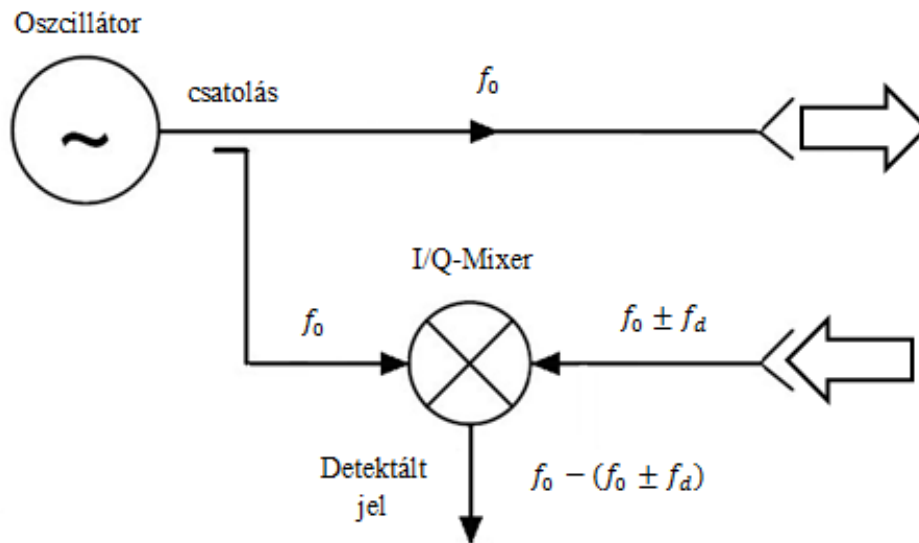
3. táblázat Az RSM 1650-es Doppler radar technikai adatai²⁶

²⁴ http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/500000-524999/502370-in-01-de-Radar_Bewegungsmelder_RSM1650.pdf (2014.04.05.)

²⁵ http://conrad.ru/doci/Universalnyy_radar_datchik_modul_Hygrosens_rabochee_napryagienie_5_V_502370_en.pdf (2014.02.15.)

²⁶ Forrás: Uo. Készítették: a szerzők

1.6.2 A radar működési elve



10. ábra Folyamatos üzemi Doppler radar blokk vázlata²⁷

Az adó egy folyamatos, f_0 frekvenciájú jelet sugároz ki az antennán keresztül. A kisugárzott energia egy része eléri a célt, visszaverődik, majd ennek a visszavert jelnek csak töredéke jut radar vevőjébe. Ha a cél mozog a radarhoz viszonyítva, a visszavert jel frekvenciája $\pm f_d$ -vel el fog térni f_0 -hoz képest. A vett jel $f_0 \pm f_d$ frekvenciával lép be az antennán keresztül, a beépített keverő az alap jelet és a vett jelet keveri. Az f_d ebből az algebrai kifejezésből adódik: $f_0 - (f_0 \pm f_d)$. Az I/Q Mixer a Doppler jelben keletkező fázistolások valós és komplex összetevőit különíti el, viszont számunkra a komplex szám abszolút értéke fontos. A Doppler jelet a visszavert jeleket elemző mérőszoftver segítségével szűrni tudjuk. Az alul áteresztő szűrőket a felhasználás területéhez igazodva állíthatjuk be a szoftverben.²⁸

A radar egy erősen integrált adó- és vevő szenzorból illetve egy push-pull mixerből épül fel. A teljes hálózatot hordozó felületre integrált félvezető alkatrészekből állítják elő. A micro-strip antennák pedig a kétoldalas nyomtatott áramkör felületére vannak ültetve.

Az RSM 1650-es mozgásérzékelő radar a Doppler-elv alapján működik: a kisugárzott elektromágneses (mikrohullám tartományú, $\lambda = 0,0125\text{m}$) hullámot az adott tárgyról visszaverődő jellel a beépített keverő szuperponálja. Így a keverő kimenetén létrejövő jel frekvenciája arányos a sebességgel: 45 Hz-es Doppler frekvencia kb. 1 km/h=3,6 m/s-nak felel meg. A jel amplitúdója pedig arányos az adott tárgy méretével és az érzékelőtől való távolságával.

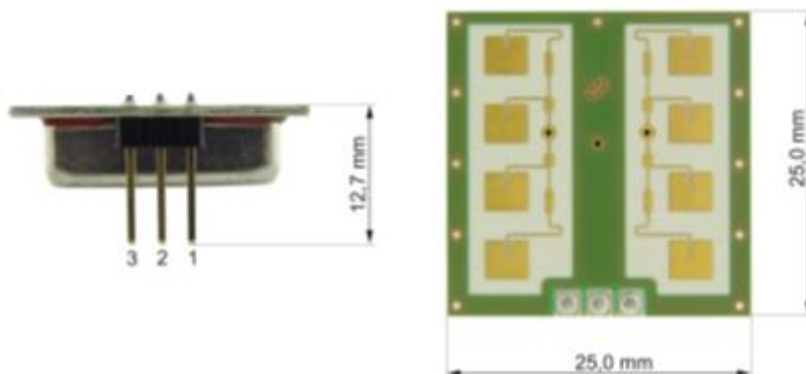
Az RSM 1650-es a radiális mozgásokra a legérzékenyebb. Viszont az olyan mozgásokat nem, vagy kevésbé képes detektálni, melyeknél csak tangenciális sebességkomponense van a célnak.

²⁷ Készítették: a szerzők

²⁸ <http://nptel.ac.in/courses/101108056/module2/lecture4.pdf> (2014.10.05.)

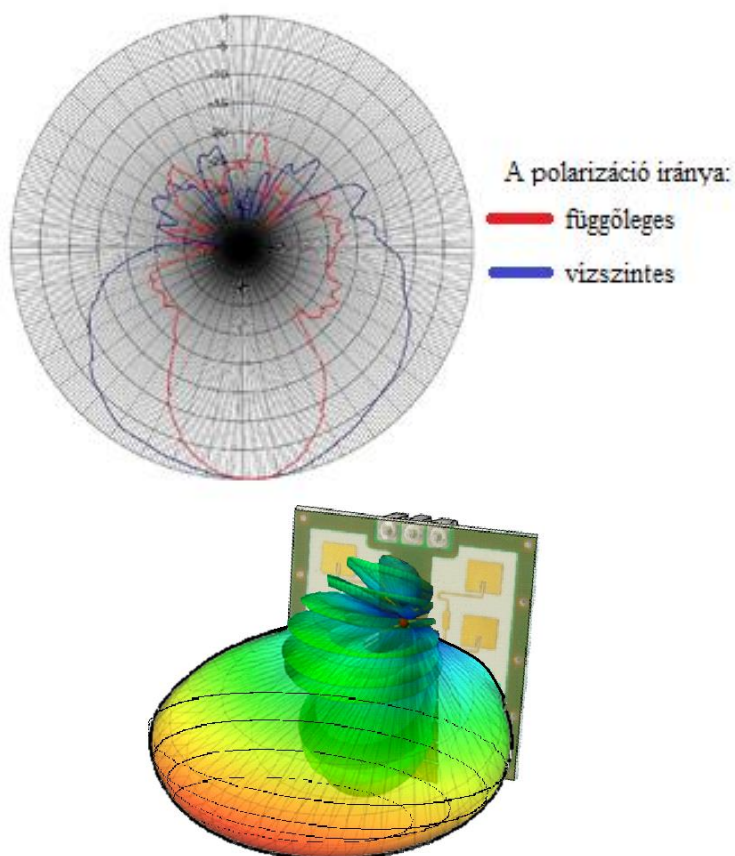
A keverő kimenetén megjelenő feszültség viszont nagyon alacsony, maximális értéke kb. 300 μV . Ezért egy következő erősítőre van szükség, meghatározott sávszélességgel (kb. 20-900 Hz-ig; 0,12-5,55 m/s-ig).²⁹

1. Üzemi feszültség
2. Kimenet
3. Földelés



11. ábra Az RSM 1650-es radar csatlakoztatása³⁰

1.6.3 A radar iránykarakterisztikája

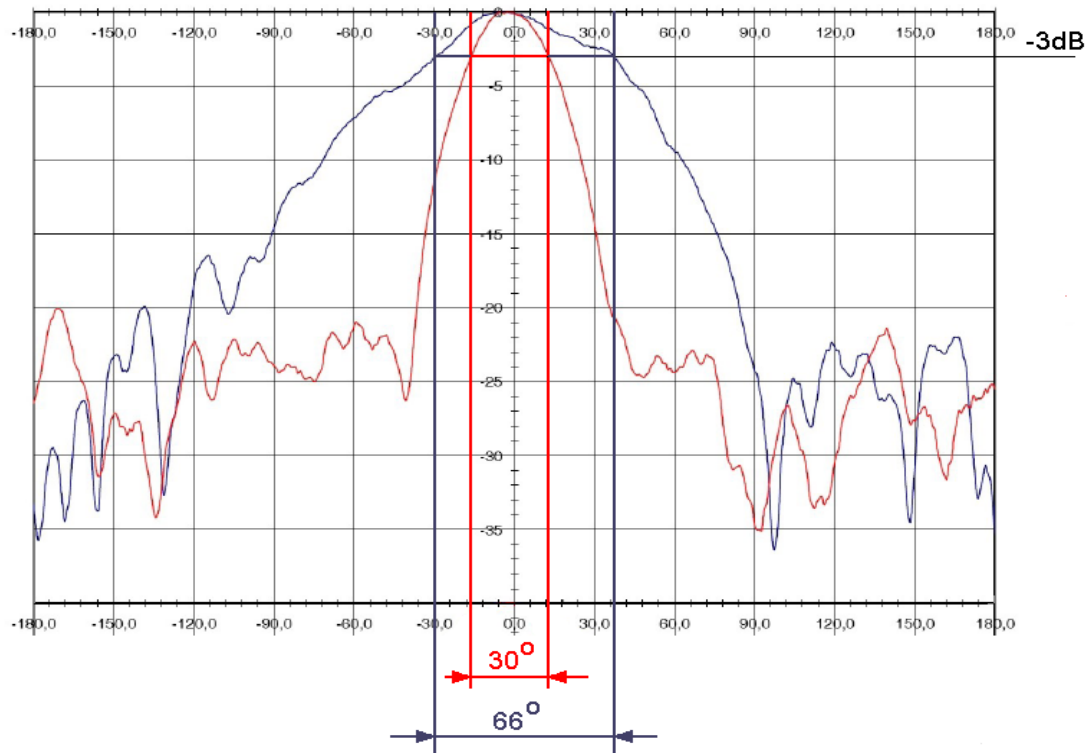


12. ábra Az RSM 1650-es iránykarakterisztikája polárkoordináta rendszerben, és ennek 3D-s ábrája³¹

²⁹ http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/500000-524999/502370-in-01-de-Radar_Bewegungsmelder_RSM1650.pdf (2014.03.13.)

³⁰ Forrás: http://conrad.ru/doci/Universalnyy_radar_datchik_modul_Hygrosens_rabochee_napryagienie_5_V_502370_en.pdf Készítették: a szerzők (2014.02.15.)

³¹ Forrás: Uo. Készítették: a szerzők (2014.04.05.)



13. ábra A radar iránykarakterisztikája Descartes-féle koordináta-rendszerben³²

A 13. ábrán a függőleges tengelyen a jel erőssége dB-ben, vízszintes tengelyen az iránykarakterisztika vizsgálati szöge látható. Ha a -3dB-es csillapítási értéket vesszük figyelembe, látható, hogy az antenna karakterisztika vízszintesen polarizált jel esetén 66°, függőlegesen polarizált jel esetén 30°, amely értékek közel azonosak a táblázatban megadott értékekkel.

A radar leírásában megfigyelhető, hogy a radar leadott teljesítménye 16 dBm, azaz 1 mW-hoz viszonyítva kapjuk, hogy:

$$16\text{dBm} = 10\lg \frac{P_t}{1\text{mW}} \quad (14)$$

$$P_t = 10^{\frac{16\text{dBm}}{10}} \cdot 1\text{mW} \approx 40\text{mW} \text{ a kisugárzott teljesítménye.} \quad (15)$$

Az antenna nyeresége:

$$G = 4\pi \frac{A}{\lambda^2} = 4\pi \frac{0,000625}{0,00015625} = 50,26 \quad (16)$$

összefüggéssel adható meg, mivel az adó- és a vevőantenna együtt van, így a RSM 1650-es nyeresége G^2 . Az apertúra felülete $A \cong 0,000625 \text{ m}^2$. A mérések során a radar tápfeszültsége 5 V, a radar és a cél távolsága 0,35 m, a kisugárzott jel frekvenciája 24 GHz volt.

³² Uo. (2014.04.05.)

Ebből következik, hogy $\lambda = 0,0125\text{m}$. A mérések során az RCS az alábbi képlet alapján közvetlenül megadható:

$$\sigma = \frac{P_r(4\pi)^3 R^4}{P_t G^2 \lambda^2} = 75,45 \frac{P_r}{P_t} [\text{m}^2] \quad (17)$$

ahol:

σ – hatásos visszaverő felület [m^2];

P_r – reflektált teljesítmény [W];

P_t – adóteljesítmény [W];

G – az antenna nyeresége;

R – a radar és a cél távolsága [m];

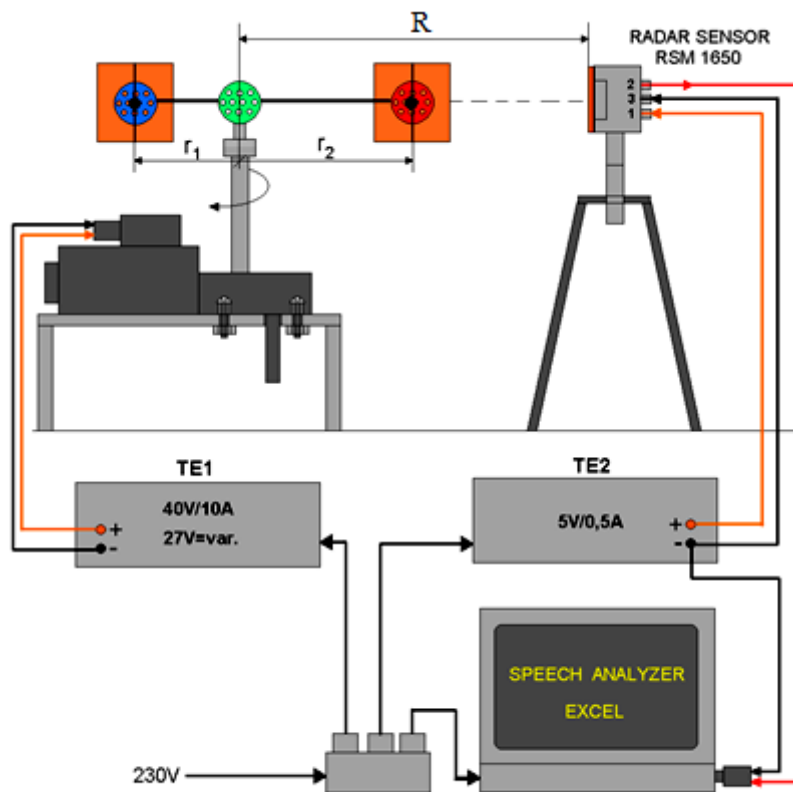
λ – kisugárzott jel hullámhossza [m].

2. MÉRÉS

2.1 Reflektáló lapok mérése

2.1.1 A mérés összeállítás leírása

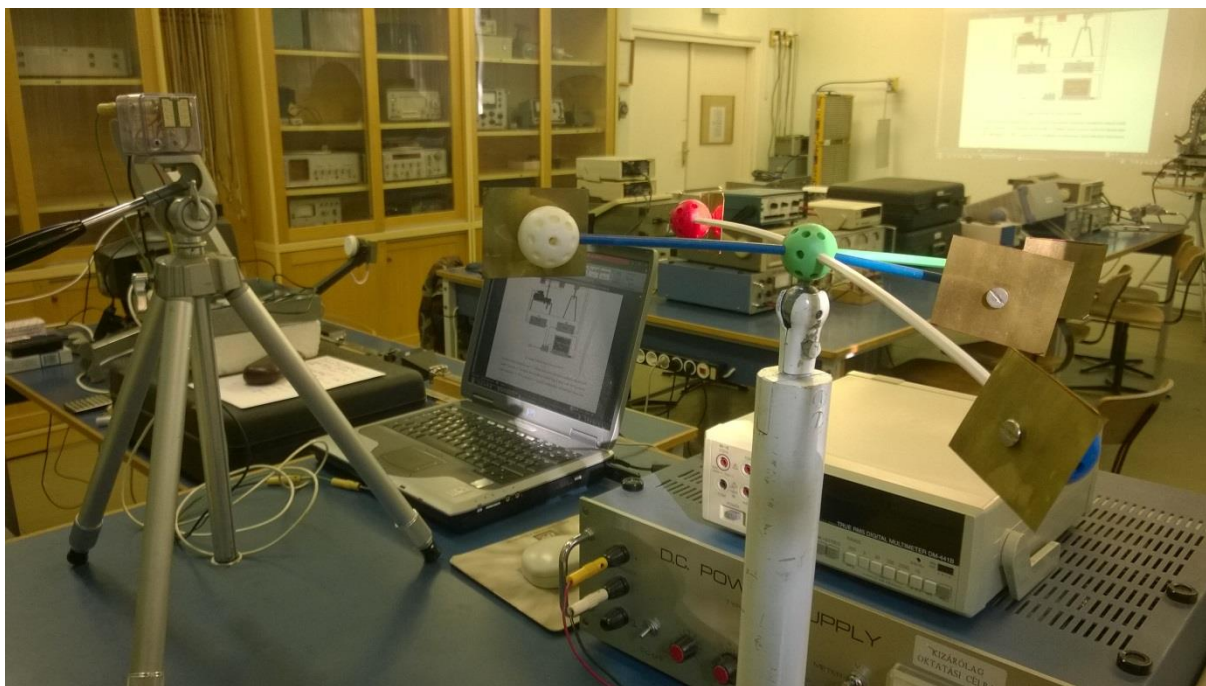
A repülőgéppel történő mérések előtt egységes méretű reflektáló lapokon végeztünk méréseket, annak érdekében, hogy megismerjük mind a radar, mind az analizáló szoftver működését. Mivel a lapok struktúrái a repülőgéphez képest sokkal egyszerűbbek, így arra következtethettünk, hogy a reflektált jelek kiértékelése könnyebben elvégezhető.



14. ábra Reflektáló lapos mérési összeállítás³³

Az 14. ábrán látható reflektáló lapok „ r ” rádiuszú kör mentén forognak a meghajtó tengely körül, amely a radartól „ R ” távolságra helyezkedik el. Látható, hogy a mérés során két tápegységre volt szükségünk. A TE1-es tápegység a meghajtó mechanizmus tápfeszültségét biztosította (27 V-os változtatható feszültséggel, ennek függvényében változik a fordulatszám), míg a TE2-es pedig a radar működéséhez szükséges 5V-os feszültséget szolgáltatva. A meghajtó reduktora úgy van beállítva, hogy a polaritás felcserélésével is ugyanabba az irányba forog, valamint egy nagy lassító áttétellel rendelkezik. A radar kimenete a számítógép hangkártya bemenetére lett csatlakoztatva. A mérési eredmények kiértékeléséhez a Speech Analyzer internetről ingyen letölthető programot, valamint a Microsoft Excel szoftvert használtuk.

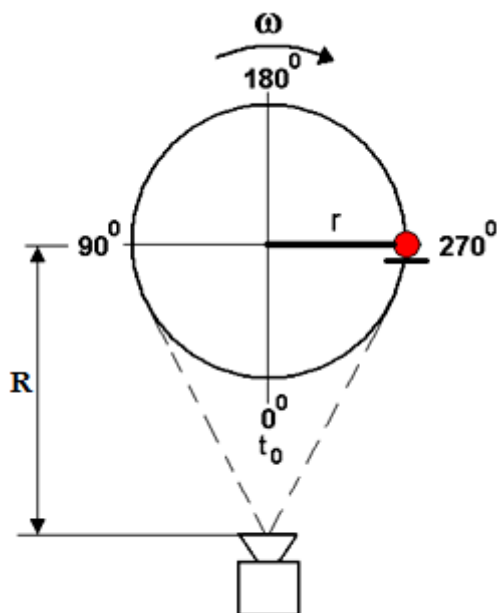
³³ Készítették: a szerzők



15. ábra Reflektáló lapos mérési összeállítás képe³⁴

2.1.2. Reflektáló lapok mérési eredményei

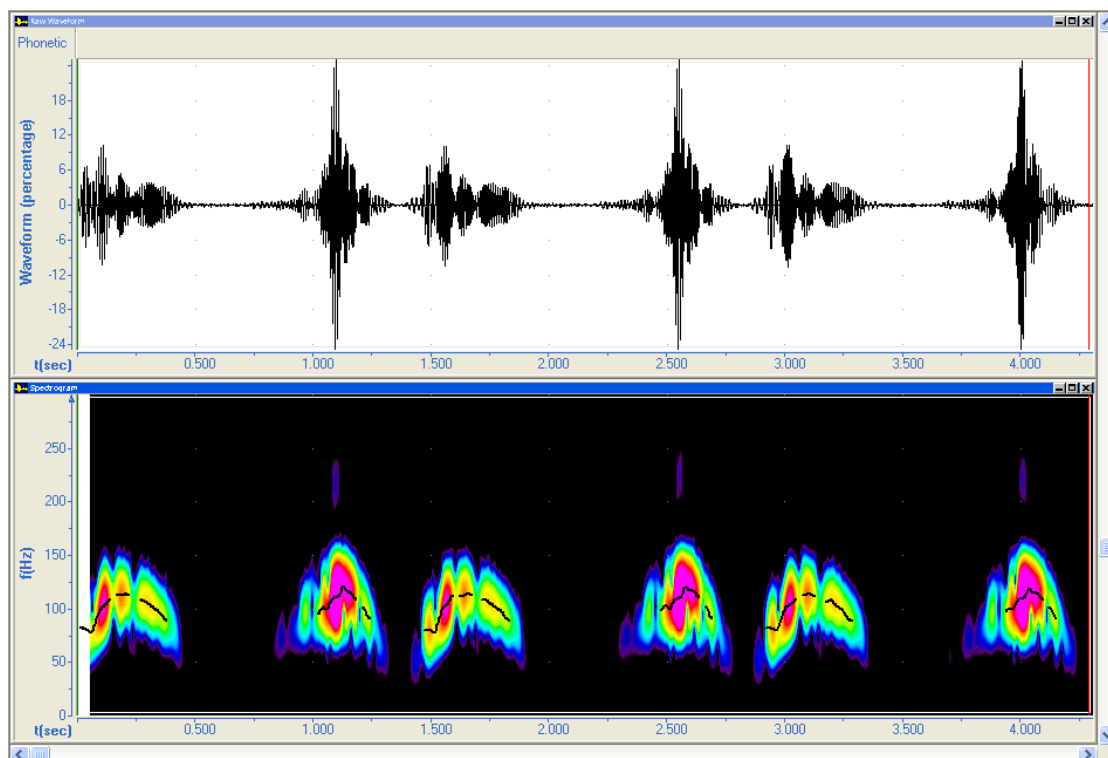
A 16. ábrán felülnézetben látható a radar és a reflektáló lap elhelyezkedése. A mérések a t_0 időpillanatban, 0° -nál kezdődtek.



16. ábra Egy reflektáló lap mérése felülnézetben³⁵

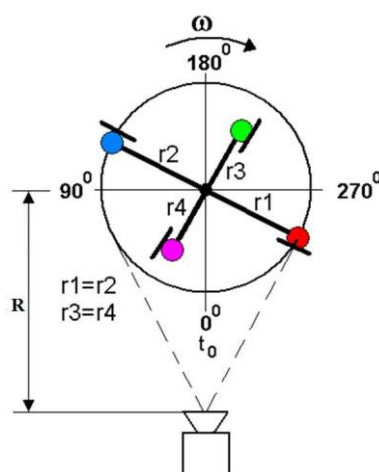
³⁴ Készítették: a szerzők

³⁵ Készítették: a szerzők



17. ábra Egy reflektáló lap hullámformája, és spektrogramja³⁶

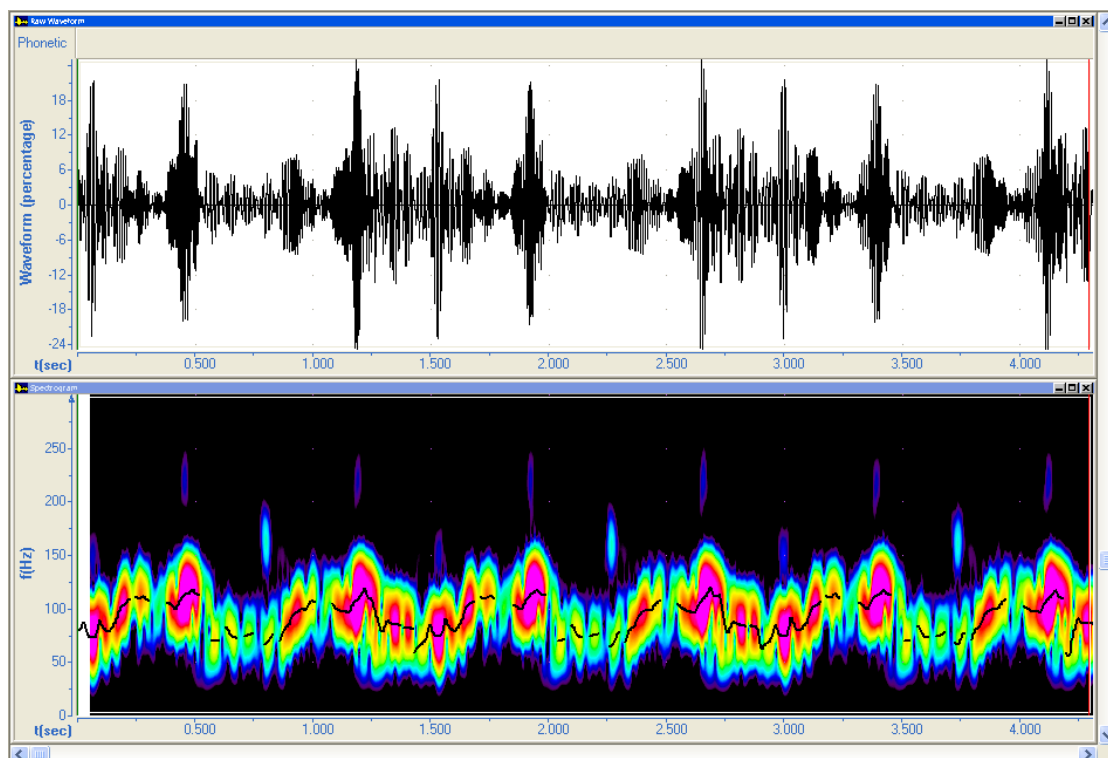
A 17. ábra egy reflektáló lapról visszavert jel hullámformáját (Waveform), valamint spektrogramját mutatja. A jel hullámformájáról látható, hogy az időben periodikusan ismétlődik, így könnyen leolvasható egy körbefordulás időtartama. A spektrogram függőleges tengelyén a frekvencia (Doppler eltolódás) látható az idő függvényében. A színes területeken látható fekete görbék a Doppler frekvencia átlagolt értékét mutatják, és ez van Excelben rögzítve. A színek a visszavert jel intenzitását adják meg dB-ben, minél inkább a vörös felé tolódnak a színskálán, annál nagyobb értékűek.



18. ábra Négy reflektáló lap mérése felülnézetben³⁷

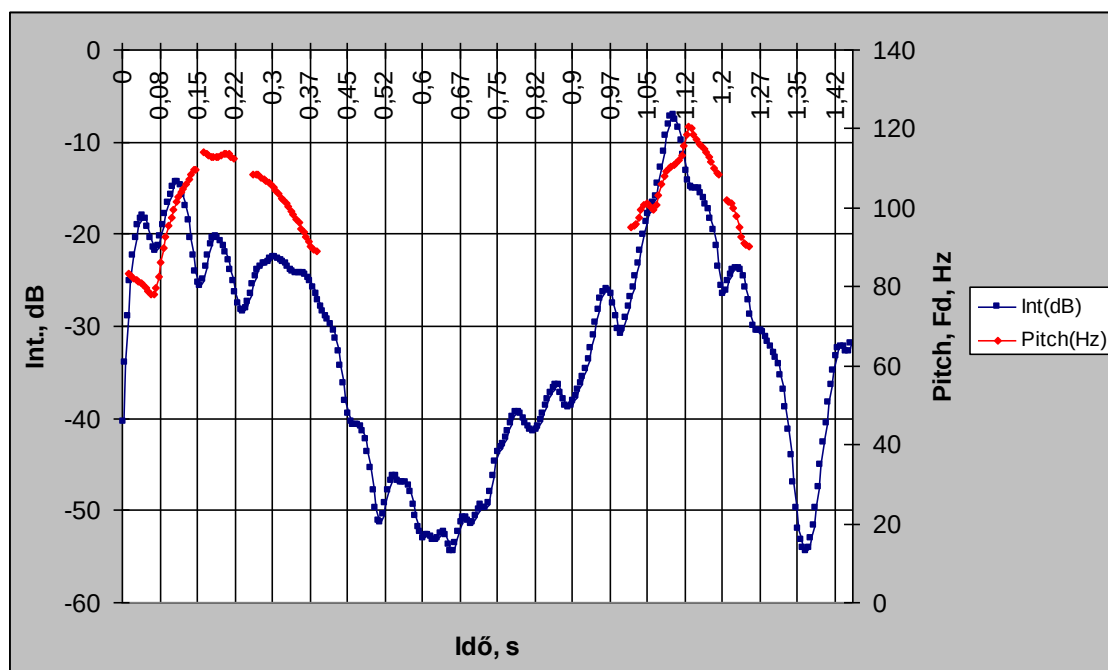
³⁶ Készítették: a szerzők

³⁷ Készítették: a szerzők



19. ábra Négy reflektáló lap hullámformája, és spektrogramja³⁸

A 19. ábrából azt a következtetést lehet levonni, hogy minél szegdeltebb egy felület, minél több a visszaverődési alap egységnyi idő alatt, annál nagyobb a hullámformának a fluktuációja, és így egyre nehezebb megállapítani a forgó objektum struktúráját.



20. ábra Egy reflektáló lap egy körbefordulásának mérési eredményei³⁹

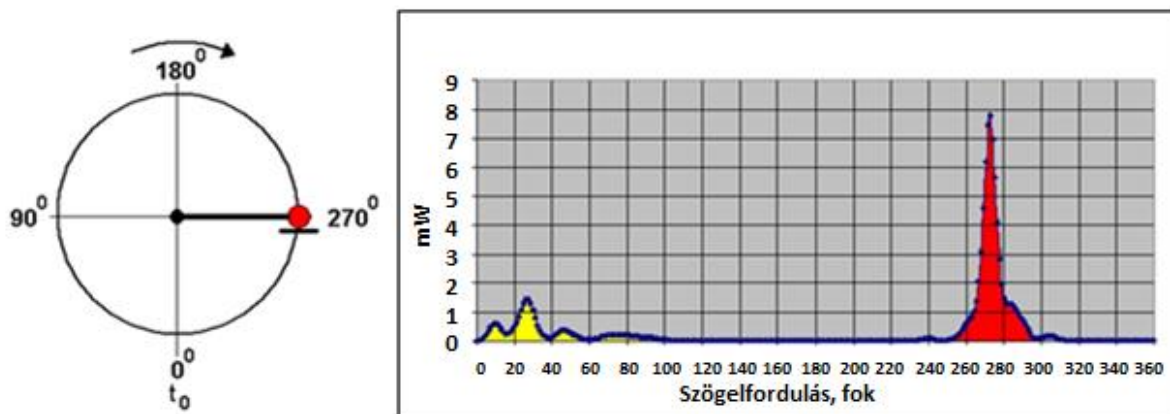
³⁸ Készítették: a szerzők

³⁹ Készítették: a szerzők

A 20. ábrán a függőleges tengelyen a reflektált jel intenzitása (Int) dB-ben, Doppler frekvenciája (Pitch) látható Hz-ben, valamint a vízszintes tengelyen az idő s-ban. Ez az ábra a 17. ábrából következik, úgy hogy a szoftver lehetőséget nyújt különböző adatok táblázatba való exportálására, és ezen táblázatos értékek vannak itt megjelenítve.

A mérés elindítása után a többszöri körbefordulás miatt több impulzussorozat jött létre, de a későbbi mérési eredményekkel való összehasonlíthatóság érdekében a $t = [0 - 1,42s]$ időintervallumban vizsgáltuk a kapott eredményeket, amely egy körbefordulás periódusidejének felel meg.

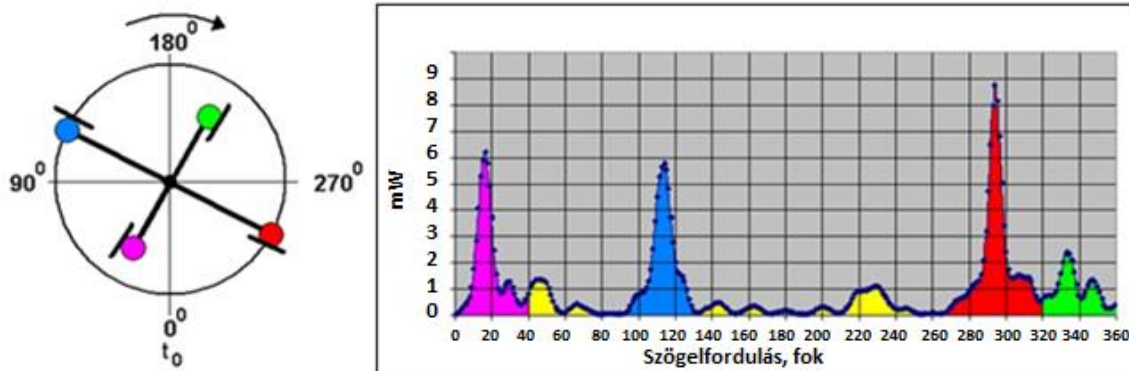
Mivel az általunk használt Doppler radart úgy tervezték, hogy az csak a mozgás jelenlétét detektálja, ennek következtében nem képes különbséget tenni a közeledő, illetve a távolodó haladási irányok között. Amint ez a 20. ábráról leolvasható, $t = [0 - 0,39s]$ intervallumban a jel intenzitása csökken, amely arra utal, hogy a lap távolodik a radartól, viszont a Doppler frekvencia nő, így az mozgásban van. A $t = [0,39 - 1s]$ tartományban a szoftver a Doppler frekvenciát nem képes kimutatni, mivel azt 20 Hz-nél nagyobb frekvenciájú tartományú jelek mérésére tervezték. A $t = [1 - 1,25s]$ időtartamban a Doppler frekvencia újra megjelenik, az intenzitás itt eléri a maximumot, amelyből a lap közeledésére következtethetünk.



21. ábra Egy reflektáló lap 360°-os körbefordulás során keletkező visszavert jel teljesítménye⁴⁰

A (2)-es egyenletben látható összefüggés felhasználásával a visszavert jel dB-ben megadott intenzitását az Excel segítségével mW-os teljesítménybe számoltuk át. A 21. ábra ezt szemlélteti. A vízszintes tengelyen a szögelfordulás értéke 0°-360°-ig, a függőleges tengelyen a reflektált jel teljesítménye mW-ban látható. A 21. ábra bal oldalán a maximális teljesítményhez tartozó szöghelyzetet mutatja, jelen esetben 270°-nál. Ezt a helyzetet a jobb oldali grafikon egyértelműen tükrözi.

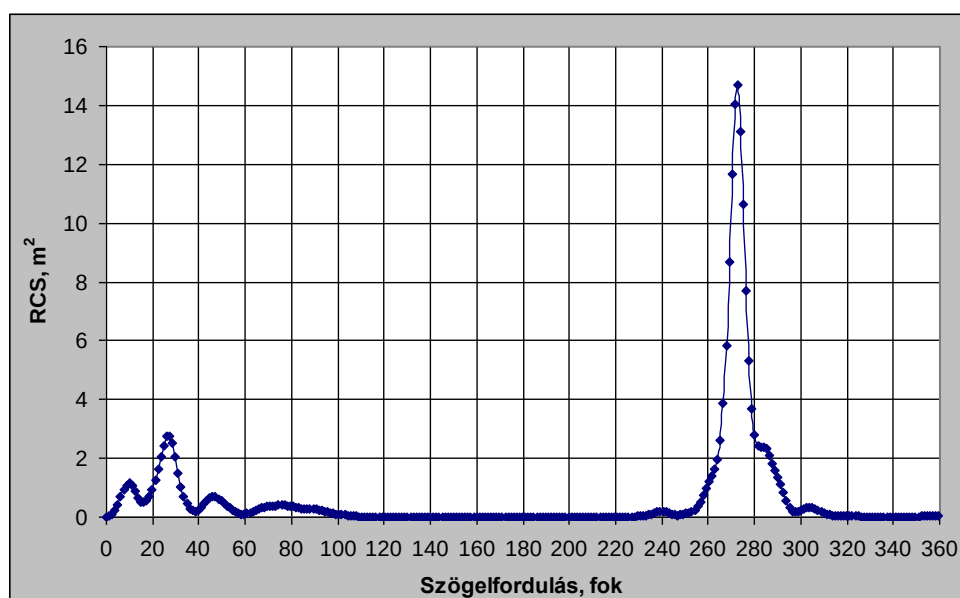
⁴⁰ Készítették: a szerzők



22. ábra Négy reflektáló lap 360°-os körbefordulás során keletkező visszavert jel teljesítménye⁴¹

A 22. ábrán már négy reflektáló lap látható, amelyek egymáshoz viszonyítva 90°-ra helyezkednek el. A kék és piros lapok egyforma rádiuszon helyezkednek el (18 cm), míg a másik kettő sugara kisebb (10 cm). Mivel az utóbb említett lapok sugara kisebb, ebből következik, hogy a radiális sebességük is kisebb.

A jelek beazonosítása azért történhet nagy biztonsággal, mert a lapok számának növelése során a visszavert jel struktúrája minden esetben jellegzetesen megváltozott. A sárgával jelzett területek a mérések során keletkező zajoknak azonosíthatóak be. A különböző esetek mérési eredményeit az 1. melléklet tartalmazza.

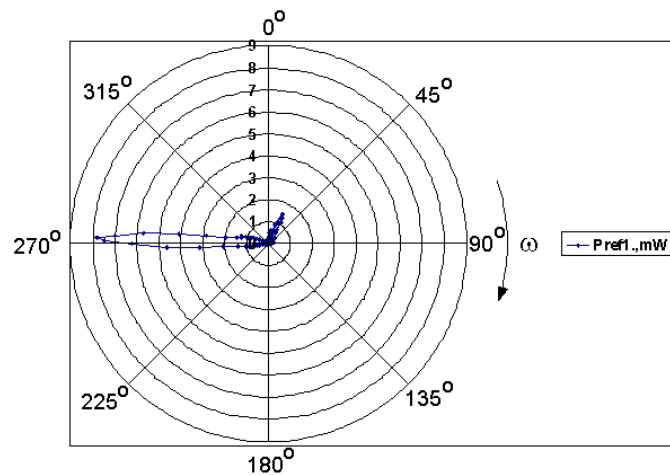


23. ábra Egy reflektáló lap hatásos visszaverő felületének mértéke 360°-os körbefordulás esetén⁴²

A (17)-es egyenletből következtetünk arra, hogy a hatásos visszaverő felület, és a reflektált teljesítmény (W-ban) egyenes arányosságban van, illetve számolhatóak egymásból. A 23. ábra vízszintes tengelyén szögelfordulás, függőleges tengelyén pedig RCS látható m²-ben. A grafikon alapján látható, hogy a 0,000625 m²-es reflektáló lap maximális hatásos visszaverő felülete közel 15 m².

⁴¹ Készítették: a szerzők

⁴² Készítették: a szerzők



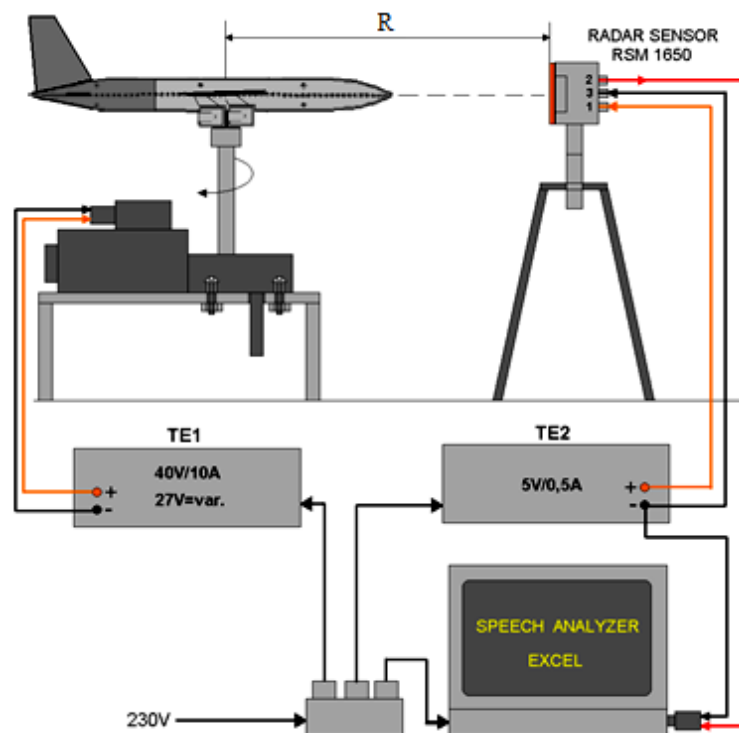
24. ábra A reflektált teljesítmény szemléltetése polárkoordináta rendszerben egy lap forgatása esetén⁴³

2.2 A repülőgép mérése

2.2.1 A mérési összeállítás leírása

Az előzőekben bemutattuk az egyszerű struktúrájú reflektáló lapos összeállítások mérési eredményeit. Mint fentebb láthattuk ezek jól értelmezhetőek, segítségükkel megérthetjük a radar és a szoftver működését, és láthatjuk, hogy ez a mérési eljárás felhasználható a repülőgép modellel végrehajtandó mérésre.

A repülőgépes mérések során kapott információkat ugyanazon metódus, valamint logikai sorrend alapján kívánjuk bemutatni.



25. ábra Repülőgépes mérési összeállítás⁴⁴

⁴³ Készítették: a szerzők

⁴⁴ Készítették: a szerzők

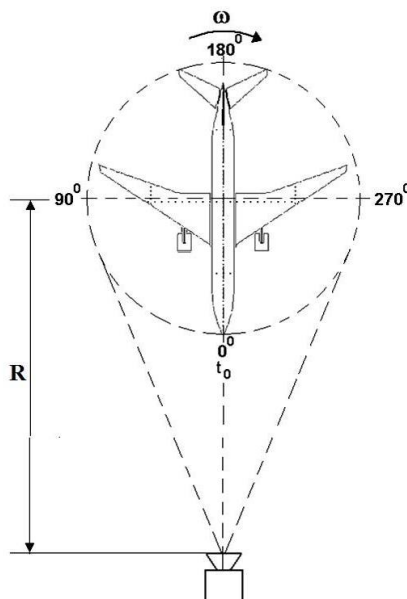


26. ábra A mérési összeállítás képe⁴⁵

A repülőgépes mérésekhez egy műanyag utasszállító modellt használtunk fel. A repülőgép felületét alufóliával vontuk be, ezzel demonstrálva a hagyományos, fémépítésű repülőgépeket. Az alufóliával be nem fedett területek a mérések szempontjából kompozitnak tekinthetők. A 1. táblázat magyarázatul szolgál arra, hogy a mérések során a műanyag felületek miért helyettesíthetik a valóságban kompozit anyagú alkatrész-elemeket. Mint már említettük a szénszálas anyagoknak nagy az abszorpciós tényezője (ezért elnyelik a radar jeleket), viszont jelen esetben valószínűsíthetően a műanyag felületek visszavert jele nagyságrendekkel kisebb, mint a bevontaké.

2.2.2 Teljes fém felületű repülőgép

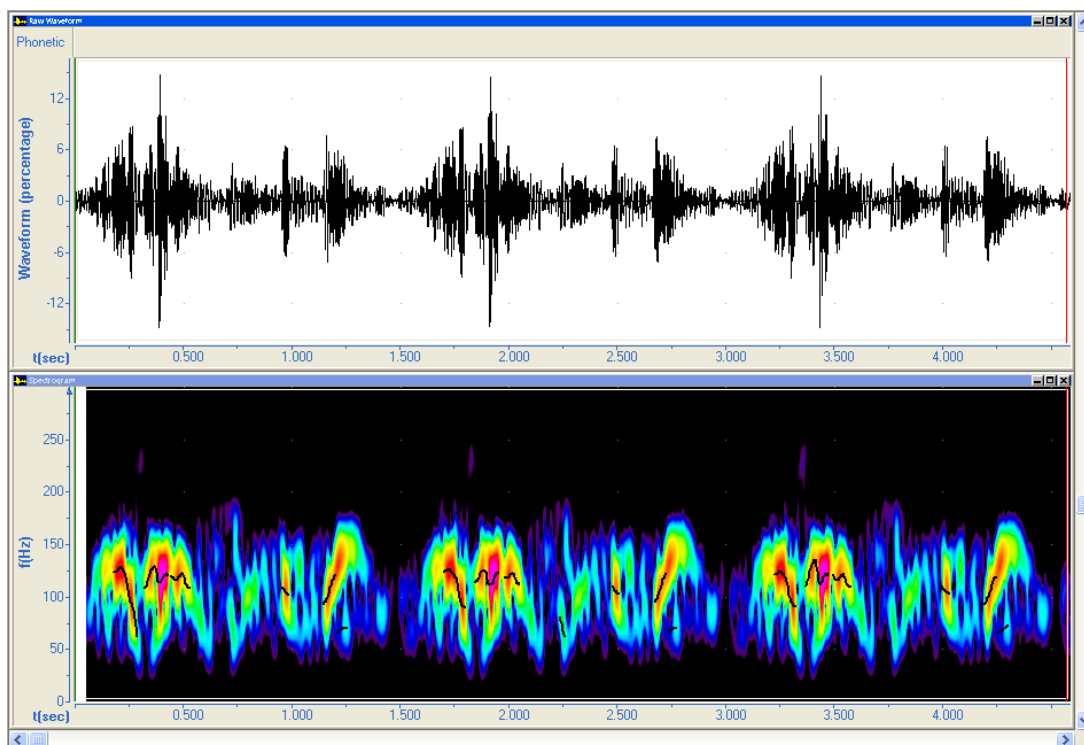
A 27. ábrán szereplő fehér színű repülőgép a teljesen fém modellt szimbolizálja. Későbbiekben a borítást fokozatosan eltávolítottuk, ezeket az elemeket szürkével jelöltük.



27. ábra Repülőgépes mérési összeállítás felülnézetben⁴⁶

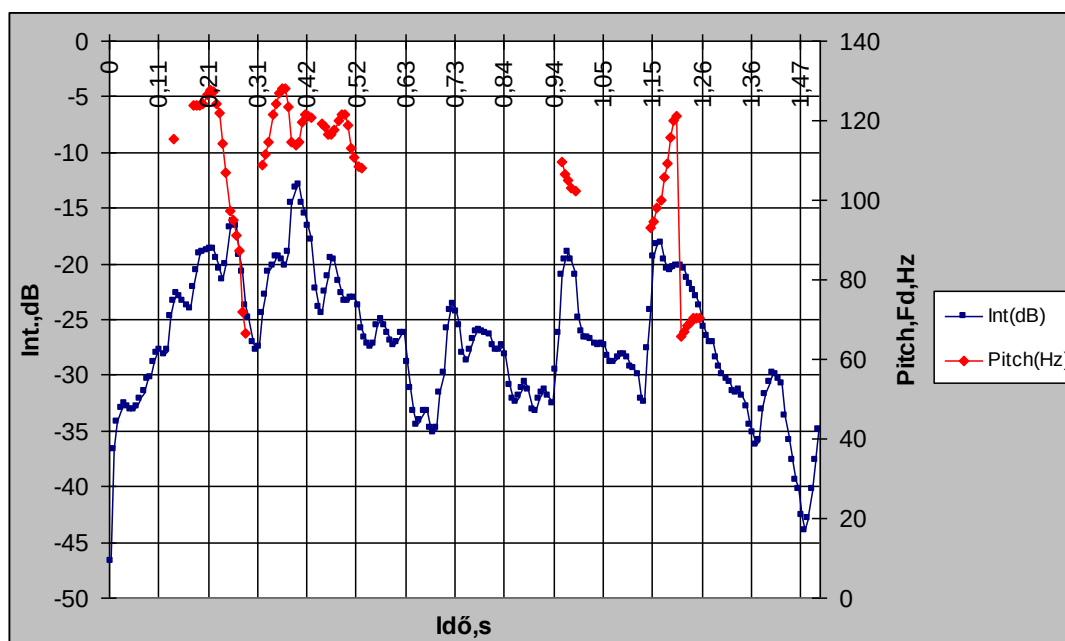
⁴⁵ Készítették: a szerzők

A repülőgépes mérések során a megforgatás tengelyét a repülőgép súlypontjához csatlakoztattuk. A repülőgép forgatási sebessége konstans volt. A mérések kezdetekor a repülőgép orra a radarral szembe nézett, ezt tekintjük a 0° -nak.



28. ábra Teljes fém felületű repülőgép visszavert jelének hullámformája és spektrogramja ⁴⁷

A 28. ábrán látható, hogy a visszavert jel hullámformája periodikusan változik. A spektrogramon látható a jel intenzitása, valamint a Doppler frekvencia átlagolt értéke.

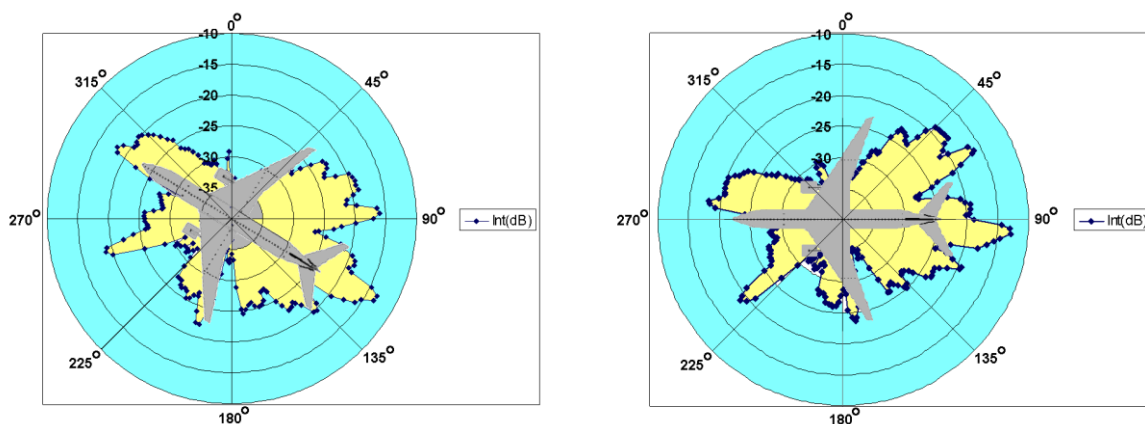


29. ábra Teljes fém felületű repülőgép visszavert jelének intenzitása ⁴⁸

⁴⁶ Készítették: a szerzők

⁴⁷ Készítették: a szerzők

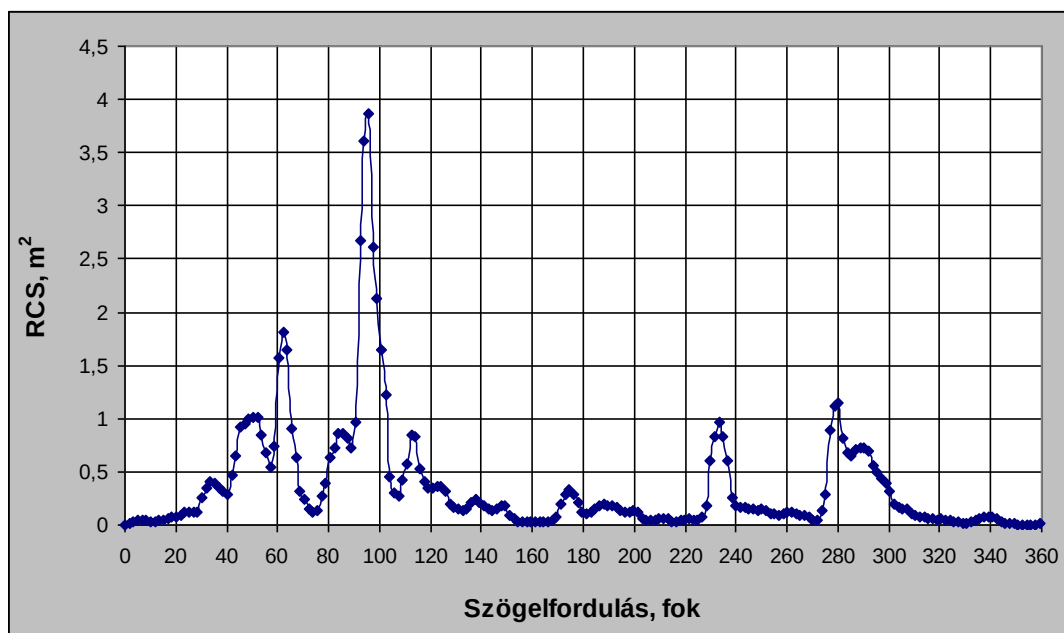
Ahogy a 29. ábrán látható a reflektáló lapokhoz képest a visszavert jel intenzitása nehezebben értelmezhető a bonyolultabb struktúra miatt. A Doppler frekvencia a jel intenzitás nagyságának megfelelően változik. Ebből a grafikonból következtethetünk a repülőgép térbeli helyzetére.



30. ábra Teljes fém felületű repülőgép visszavert jelének intenzitása polárkoordináta rendszerben⁴⁹

A 30. ábra különböző szöghelyzetből történő indítások – ezt a berajzolt repülőgép makettek állása mutatja – során keletkező intenzitás adatokat tükrözi polárkoordináta rendszerben. Jól megfigyelhető, hogy a két jel struktúrája azonos, azok csak az indítások közötti szöghelyzetek különbségével vannak elforgatva egymáshoz képest.

A reflektáló lapoknál alkalmazott számítások alapján a 31. ábrát kapjuk, ahol a szögelfordulás függvényében láthatjuk az RCS-t.

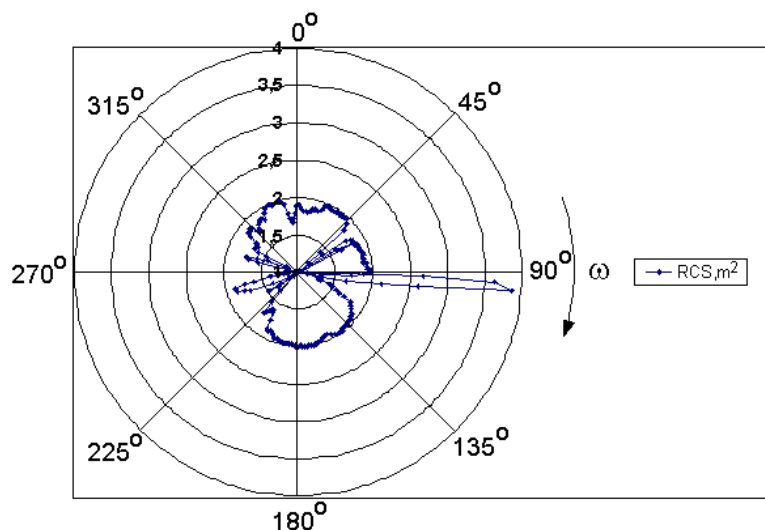


31. ábra Teljes fém felületű repülőgép hatásos visszaverő felülete⁵⁰

⁴⁸ Készítették: a szerzők

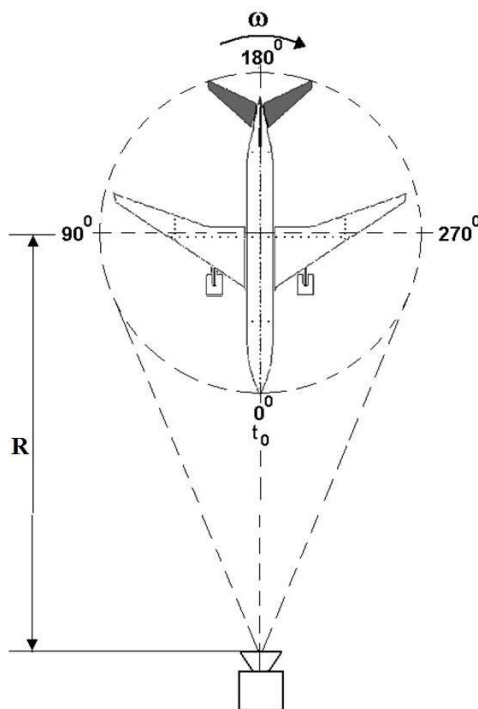
⁴⁹ Készítették: a szerzők

A 31. és 32. ábrák szemléltetik, hogy a legnagyobb RCS a 95° -os szöghelyzetnél jelentkezik. Ekkor a repülőgép törzsének hossz tengelye merőleges a radarra, illetve a függőleges vezérsík közeledik a radar felé.



32. ábra Teljes fém felületű repülőgép hatásos visszaverő felülete polárkoordináta rendszerben ⁵¹

2.2.3 Kompozit függőleges- és vízszintes vezérsíkú repülőgép

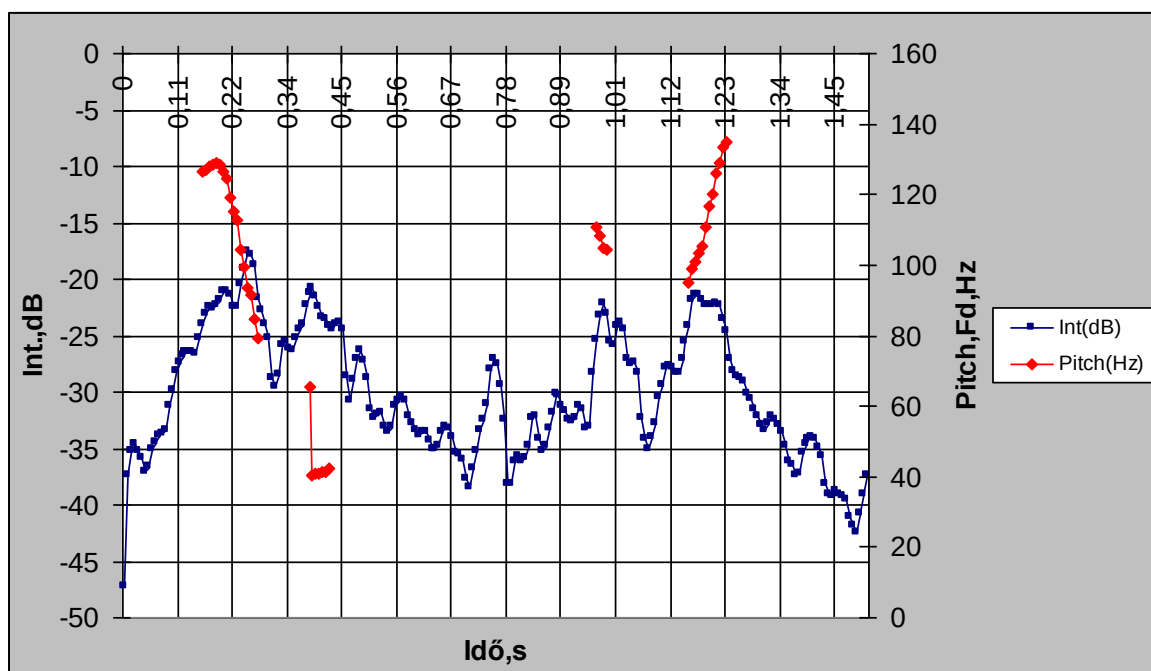


33. ábra Kompozit függőleges- és vízszintes vezérsíkú repülőgépes mérés felülnézetben ⁵²

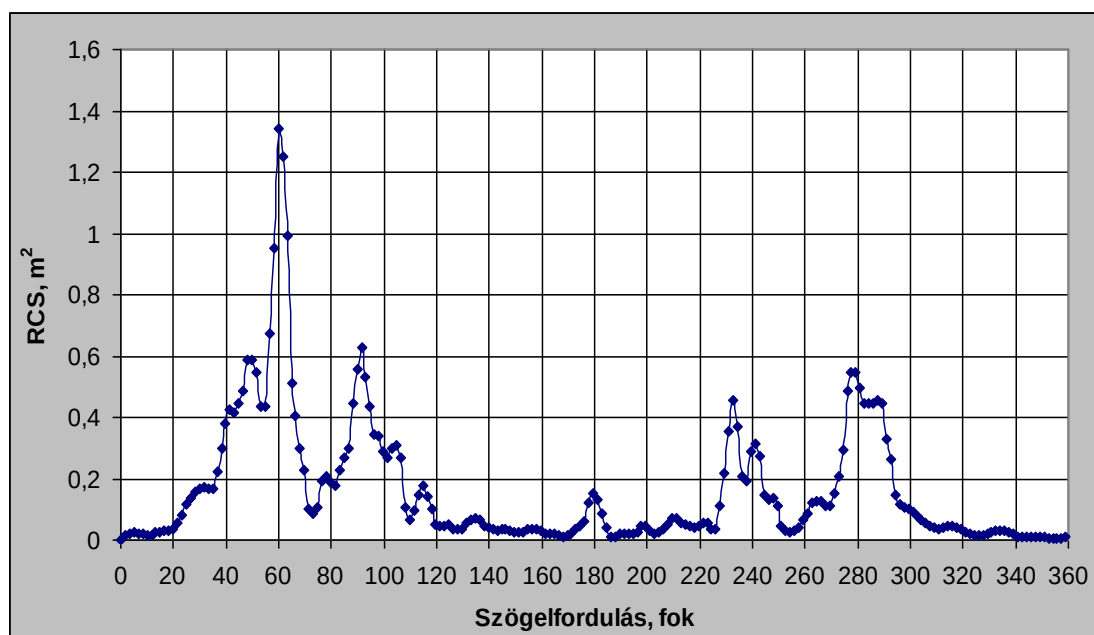
⁵⁰ Készítették: a szerzők

⁵¹ Készítették: a szerzők

⁵² Készítették: a szerzők



34. ábra Kompozit függőleges- és vízszintes vezérsíkú repülőgép visszavert jelének intenzitása⁵³

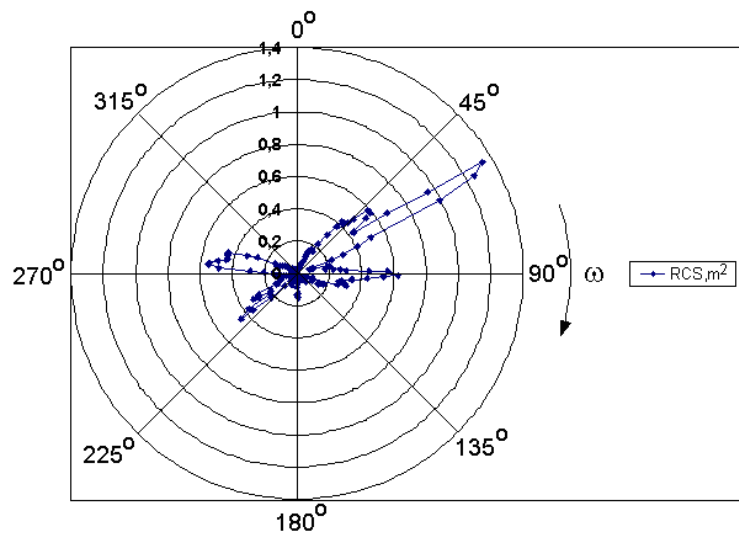


35. ábra Kompozit függőleges- és vízszintes vezérsíkú repülőgép hatásos visszaverő felülete⁵⁴

A 31. és 35. ábrát összehasonlítva szembevető a különbség a maximális RCS között. Amíg a 31. ábrán a maximális visszaverő felület közel 4 m^2 volt, addig a 35. ábrán ez nem éri el az $1,4 \text{ m}^2$ -t sem.

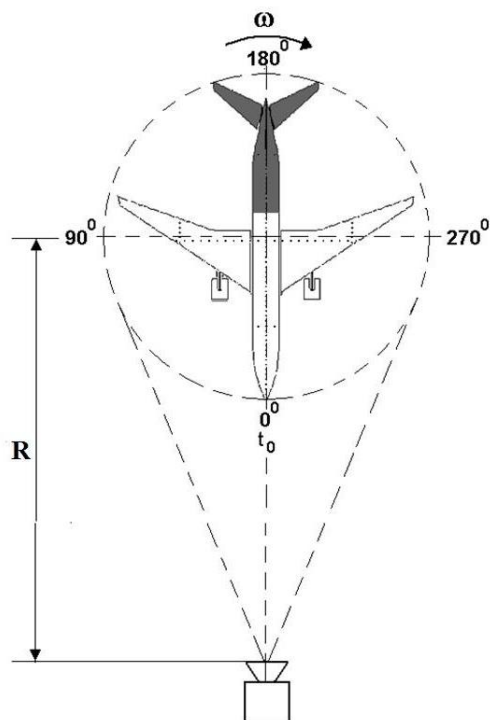
⁵³ Készítették: a szerzők

⁵⁴ Készítették: a szerzők



36. ábra Kompozit függőleges- és vízszintes vezérsíkú repülőgép hatásos visszaverő felülete polárkoordináta rendszerben⁵⁵

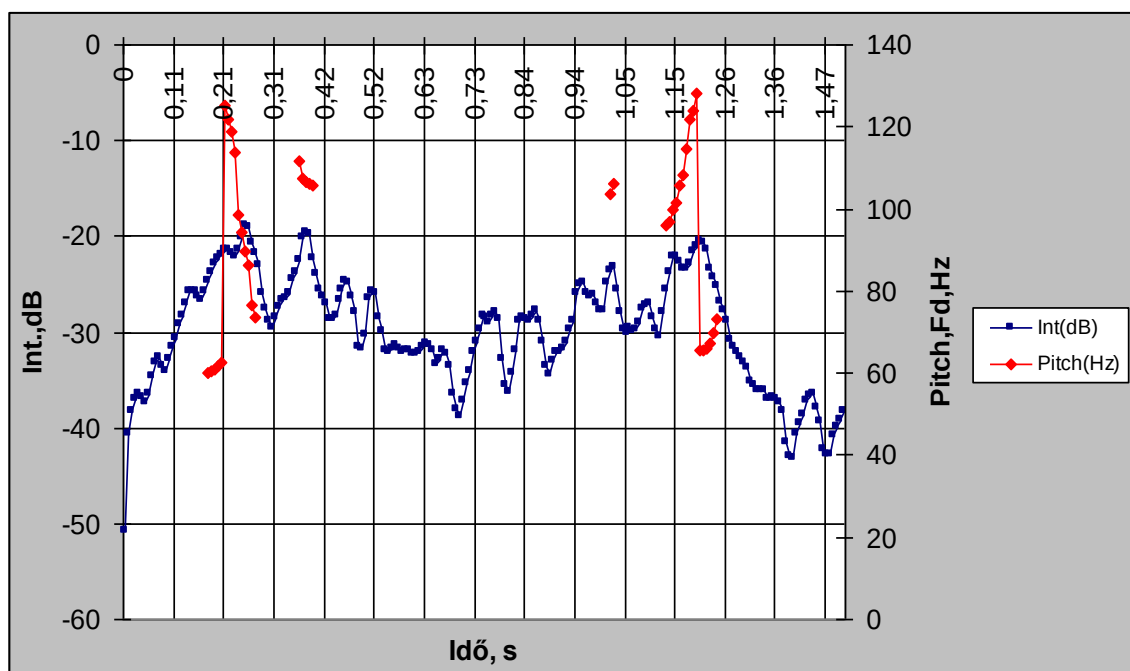
2.2.4 Kompozit hátsórészű repülőgép



37. ábra Kompozit hátsórészű repülőgépes mérés felülnézetben⁵⁶

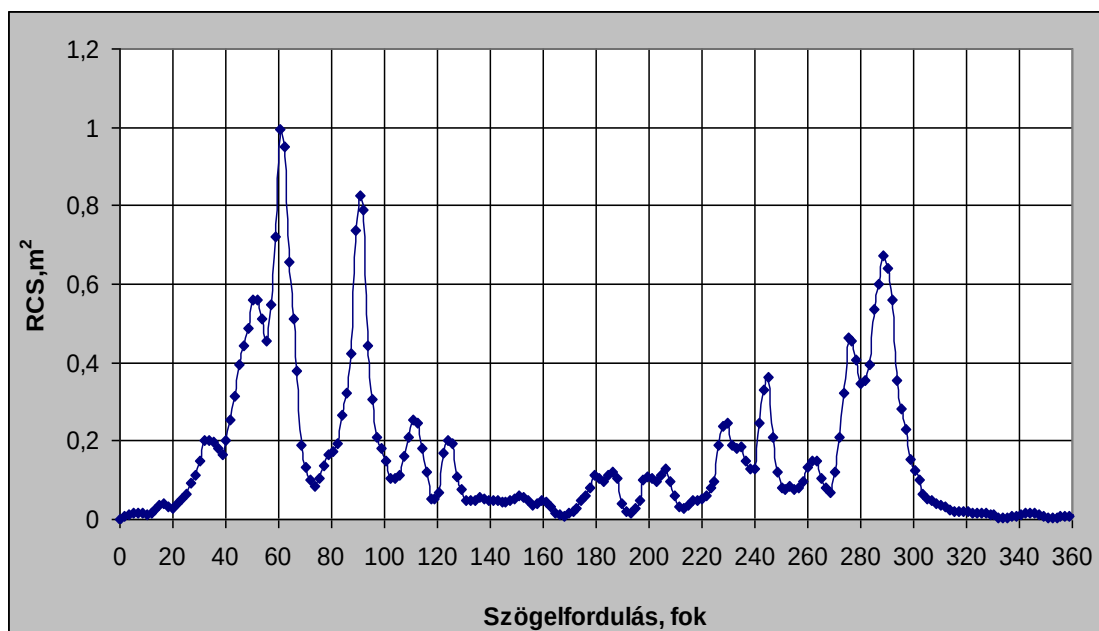
⁵⁵ Készítették: a szerzők

⁵⁶ Készítették: a szerzők



38. ábra Kompozit hátsórészű repülőgép visszavert jelének intenzitása ⁵⁷

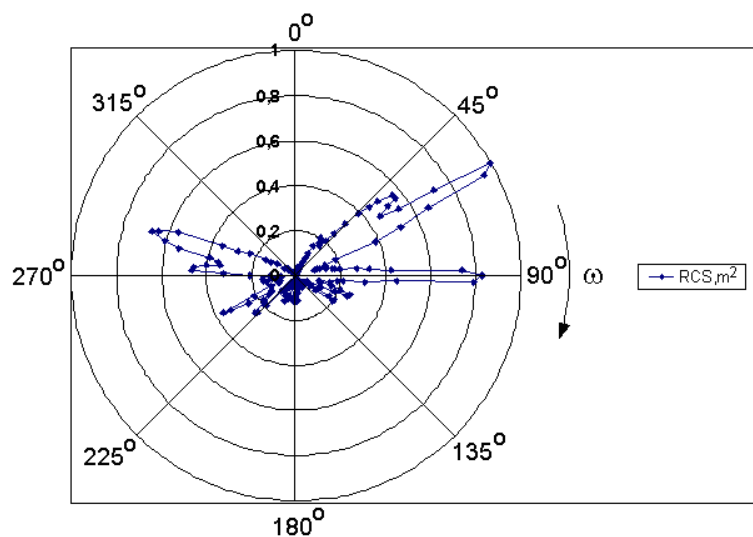
A 38. ábráról leolvasható, hogy a visszavert jel intenzitásának görbéje egyre jobban kisimul, valamint hogy a -30 dB-es átlagértékhez közelít. Minél több a fémrész a repülőgépen, annál nagyobb a jel fluktuációja. A Doppler eltolódást egyre nehezebb értékelni, így már csak lokális értékek jelennek meg.



39. ábra Kompozit hátsórészű repülőgép hatásos visszaverő felülete ⁵⁸

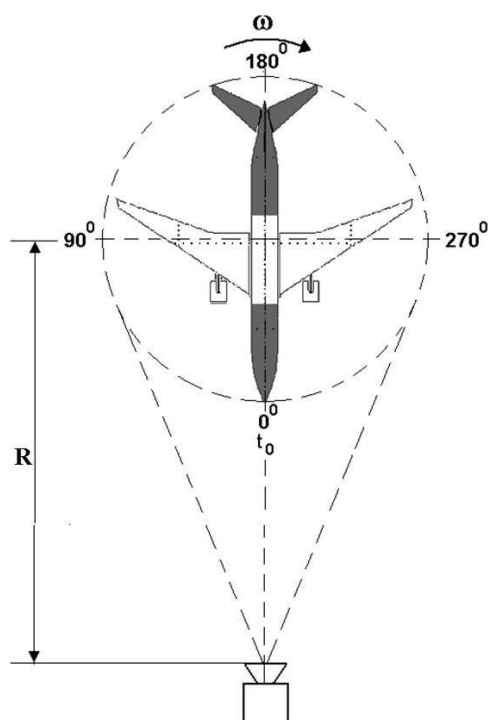
⁵⁷ Készítették: a szerzők

⁵⁸ Készítették: a szerzők



40. ábra Kompozit hátsórészű repülőgép hatásos visszaverő felülete polárkoordináta rendszerben⁵⁹

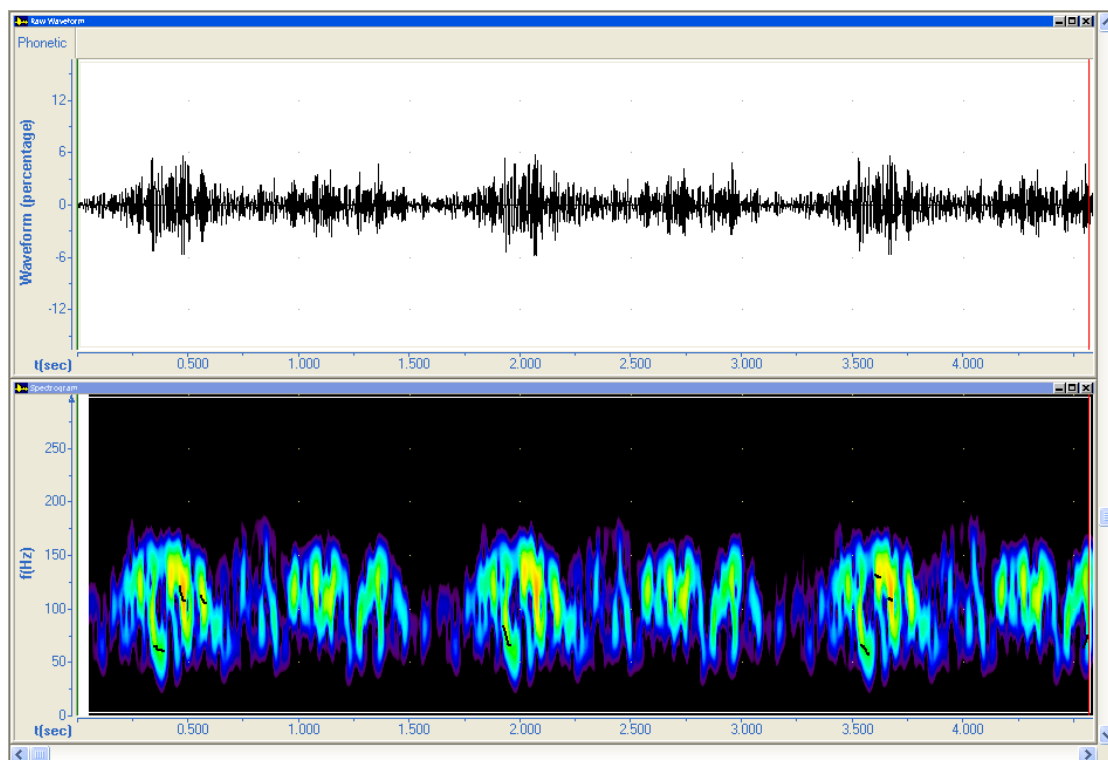
2.2.5 Kompozit orr- és hátsórészű repülőgép



41. ábra Kompozit orr- és hátsórészű repülőgép mérés felülnézetben⁶⁰

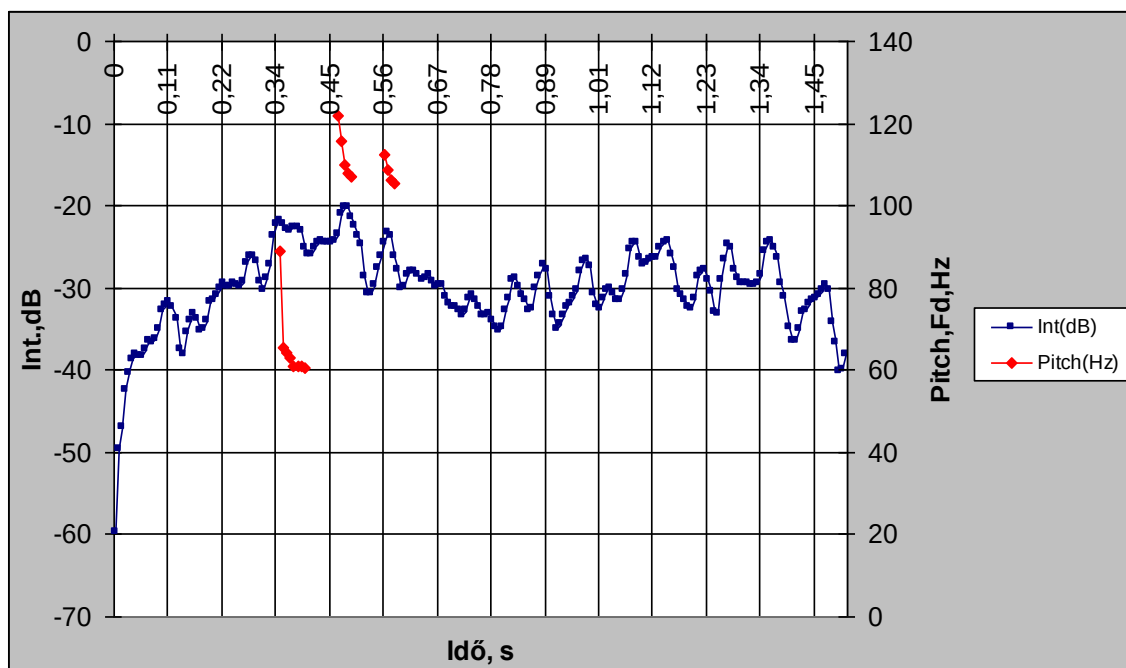
⁵⁹ Készítették: a szerzők

⁶⁰ Készítették: a szerzők



42. ábra Kompozit orr- és hátsórészű repülőgép visszavert jelének hullámformája és spektrogramja⁶¹

A 28. ábrával összehasonlítva a 42. ábrát megfigyelhető hogy a jel hullámformájának amplitúdója nagymértékben csökkent, valamint a spektrogramról a piros – nagy intenzitású – jelek eltűntek, itt már csak kisebb intenzitásúak –világoskék és zöld – találhatóak. Továbbá látható hogy a Doppler frekvencia átlagolt értéke is csökkent.



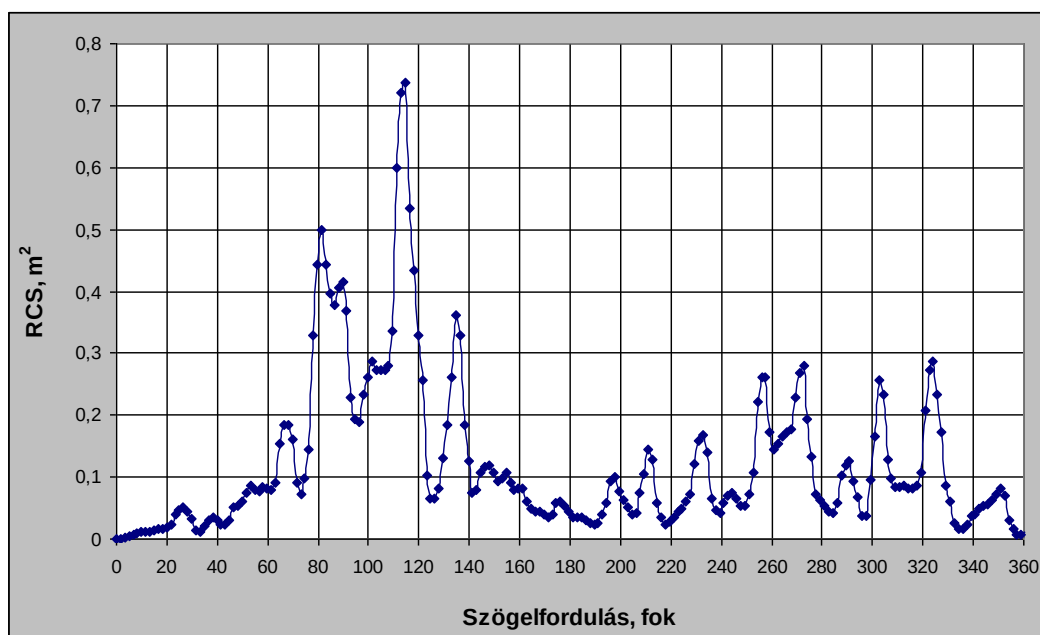
43. ábra Kompozit orr- és hátsórészű repülőgép visszavert jelének intenzitása⁶²

⁶¹ Készítették: a szerzők

⁶² Készítették: a szerzők

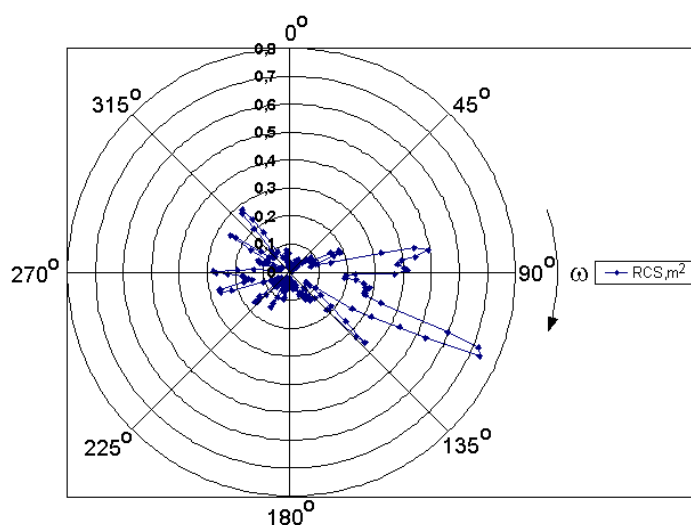
Mivel ennél az esetről már csak a törzs középső része, és a szárnyak fémépítésűek, a visszavert jel intenzitása itt a legkisebb. A repülőgép vízszintes forgatása esetén a szárnyak nagy felületei lényegtelenek számunkra, hiszen a radar azoknak csak belépő- vagy kilépő éleit látja, amelyről minimális a visszaverődés (mivel a kisugárzott jel polarizációs síkja függőleges).

Mindezekről függetlenül, még mindig a repülőgép törzse jelenti a fő visszaverő felületet, ahogy az a 44. ábrán látható.



44. ábra Kompozit orr- és hátsórészű repülőgép hatásos visszaverő felülete⁶³

Habár az RCS struktúrája a függőleges tengely léptékének megváltozása miatt fluktuáltabbnak tűnik, megfigyelhető, hogy itt a maximális visszaverő felület még a $0,8 \text{ m}^2$ -t sem éri el.



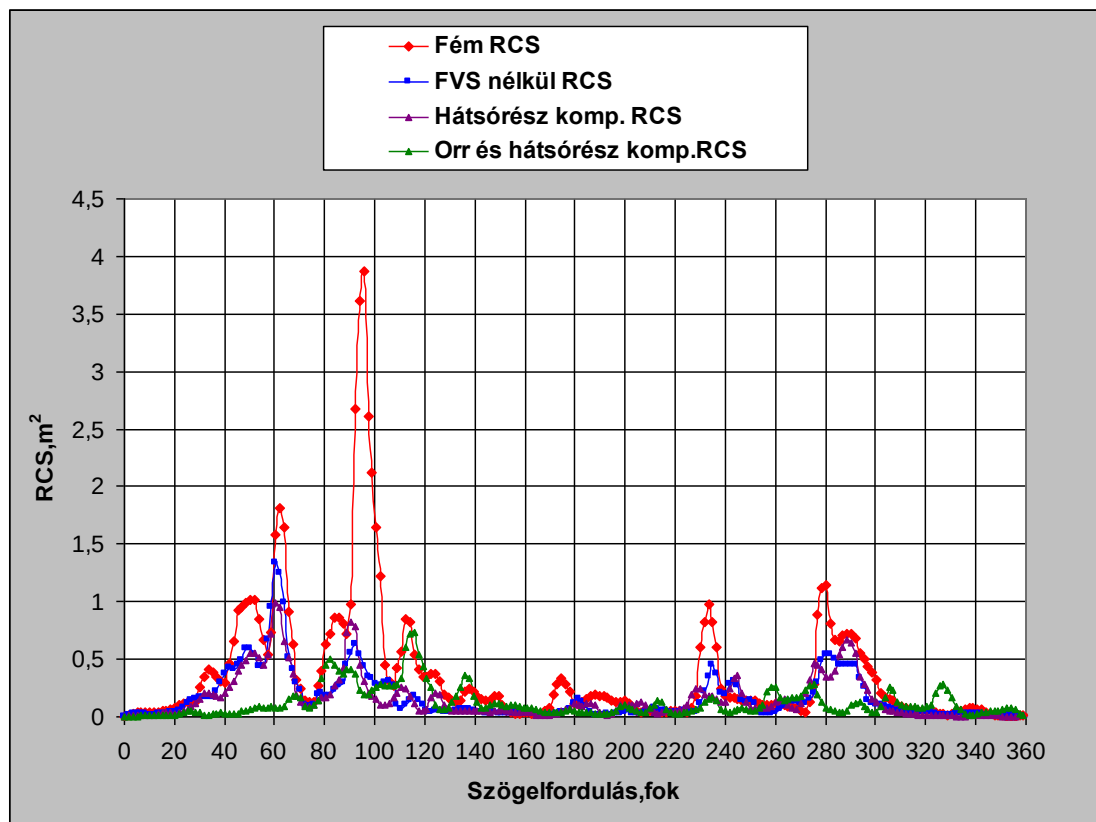
45. ábra Kompozit hátsórészű repülőgép hatásos visszaverő felülete polárkoordináta rendszerben⁶⁴

⁶³ Készítették: a szerzők

⁶⁴ Készítették: a szerzők

2.3 A kapott eredmények értelmezése

A 46. ábrán a könnyebb összehasonlíthatóság érdekében az előzőekben bemutatott RCS grafikonokat összegeztük.



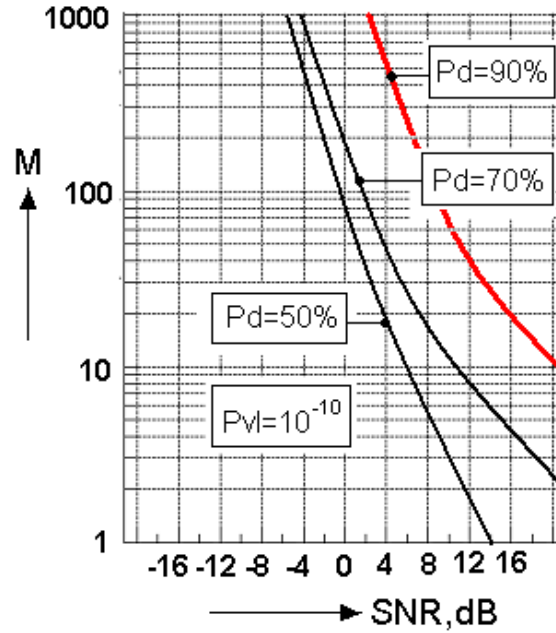
46. ábra RCS mérések összehasonlítása⁶⁵

Nyilván a legnagyobb hatásos visszaverő felület a fémépítésű gépnél van. Mindegyik mérésnek a kiindulási pontja ugyanaz a 0° volt, valamint a periódusidő is megegyezett, ennek következtében a különböző grafikonok jól egymásra illeszthetőek voltak.

A legtöbb céltárgy hatásos keresztmetszete és ezzel a róla visszavert jel teljesítménye erősen változik a rálátás szögével. Ezért mozgó céltárgyak esetében a detekciós valószínűség, jelről jelre más értékű lesz.

A szükséges átlagos jel-zaj viszony (SNR- Signal Noise Rate) függ a céltárgy hatásos keresztmetszetének valószínűségi jellemzőitől, valamint az egymás után következő jelek korreláltságától (47. ábra):

⁶⁵ Készítették: a szerzők



47. ábra SNR viszony M jel integrálása esetén⁶⁶

A 47. ábra a különböző céltárgyak esetén, adott minőségű detekció biztosításához szükséges SNR viszonyt mutatja, M számú jel videó-integrálásakor, korrelált (fekete) és korrelálatlan (piros) jeleknél.

A radarok jelintegrálásának korszerű eszközei a lineáris szűrőket kiváltó digitális szűrők, melyeknek z-átviteli függvénye:

$$\Phi(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{a_M z^{-M} + a_{M-1} z^{-(M-1)} + \dots + a_1 z^{-1} + a_0}{b_N z^{-N} + b_{N-1} z^{-(N-1)} + \dots + b_1 z^{-1} + 1} \quad (18)$$

A (18) egyenlet a véges differenciák elméletéből következően átírható a következő differencia-egyenletté:

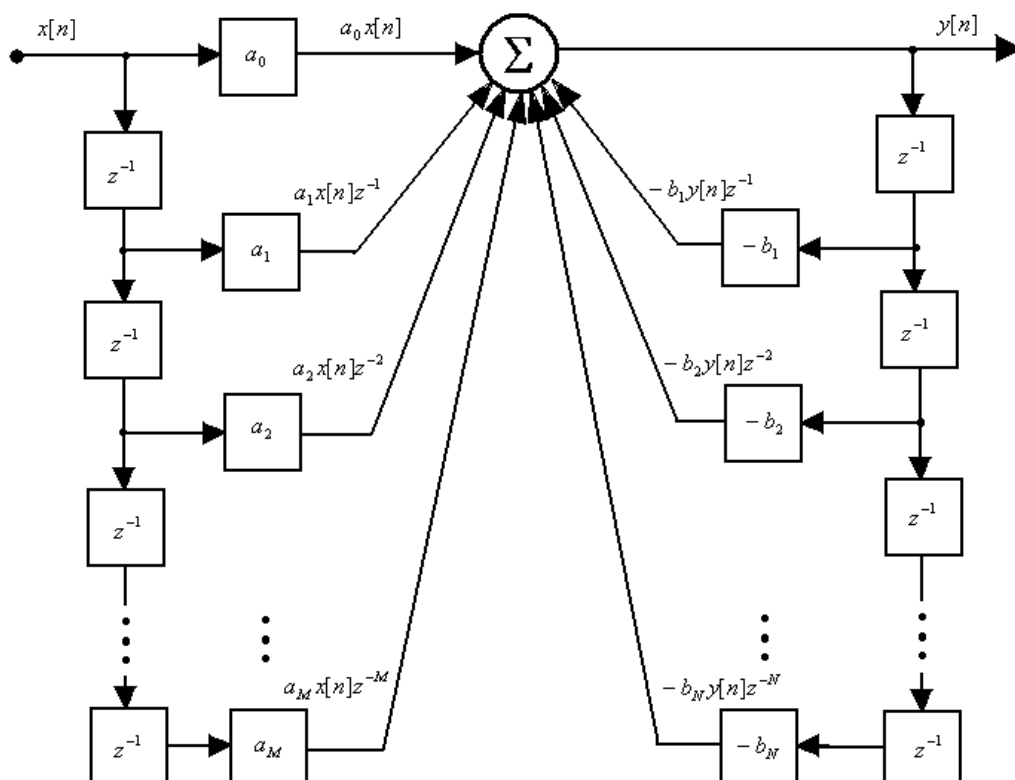
$$y(n) = \sum_{i=0}^M a_i x[n-i] - \sum_{j=1}^N b_j y[n-j]$$

$$x[n] = x[nT]$$

$$y[n] = y[nT] \quad (19)$$

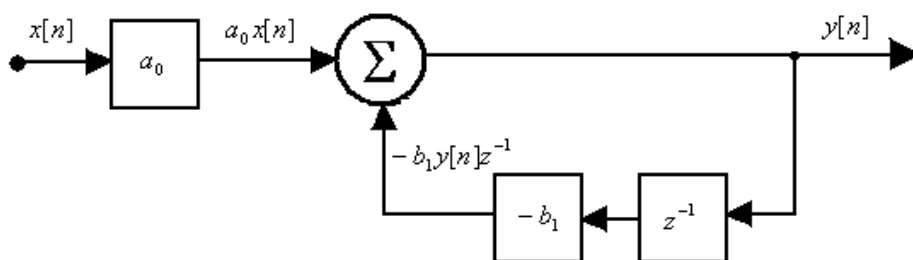
A (19) összefüggés algoritmus a 48. ábrán látható:

⁶⁶ Készítették: a szerzők



48. ábra A digitális szűrő algoritmusa⁶⁷

A jelintegrálási technikában gyakran alkalmazott szűrési módszer az exponenciális szűrés, melynek digitális szűrő algoritmusa látható az 49. ábrán:

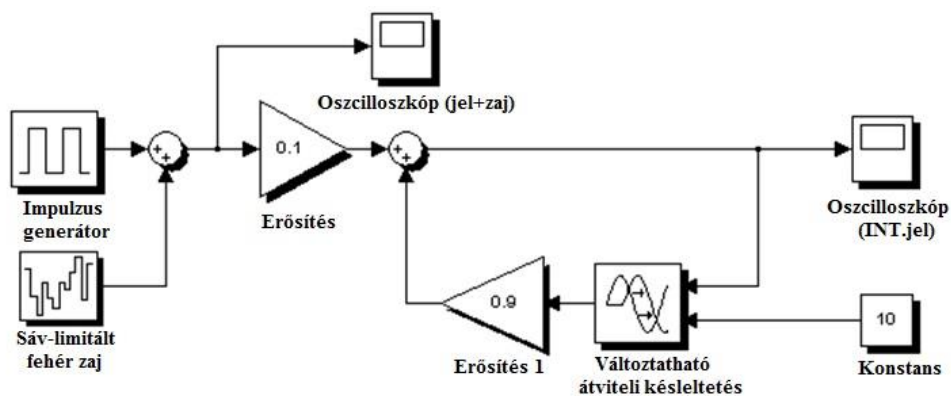


49. ábra Az exponenciális digitális szűrő algoritmusa⁶⁸

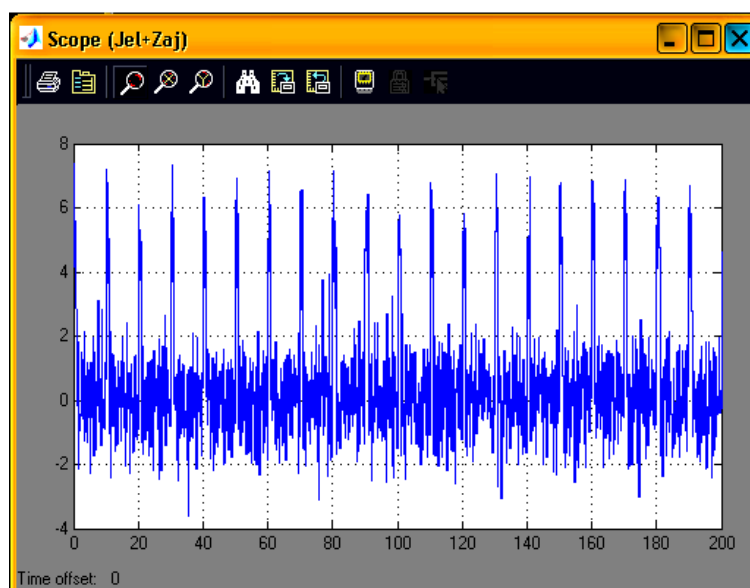
A Matlab® Simulink segítségével, beállított a_0 és b_1 paraméterekkel szimulálhatunk zajjal terhelt impulzusok jelintegrálását, melynek hatásvázlatát és a szimuláció eredményeit az 50. és 51. ábrákon láthatjuk:

⁶⁷ Készítették: a szerzők

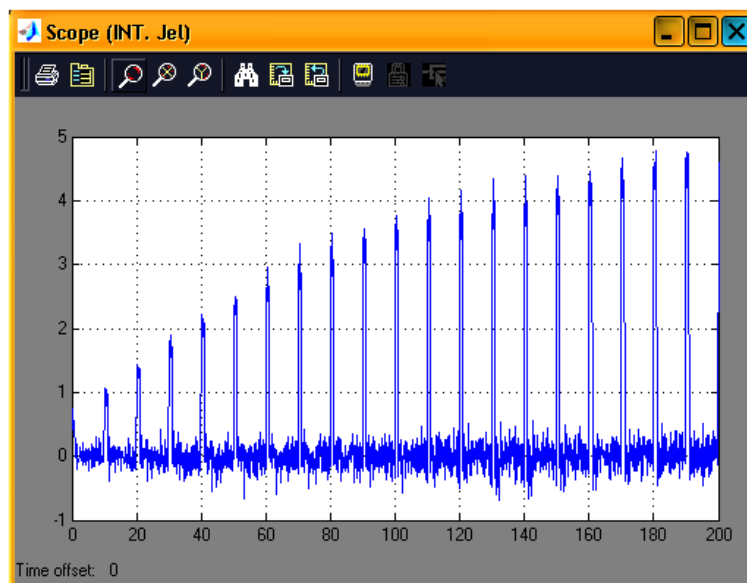
⁶⁸ Készítették: a szerzők



50. ábra A jelintegrálás hatásvázlata⁶⁹



51. ábra A jelintegrátor bemenetén lévő zajjal terhelt impulzus-sorozat⁷⁰

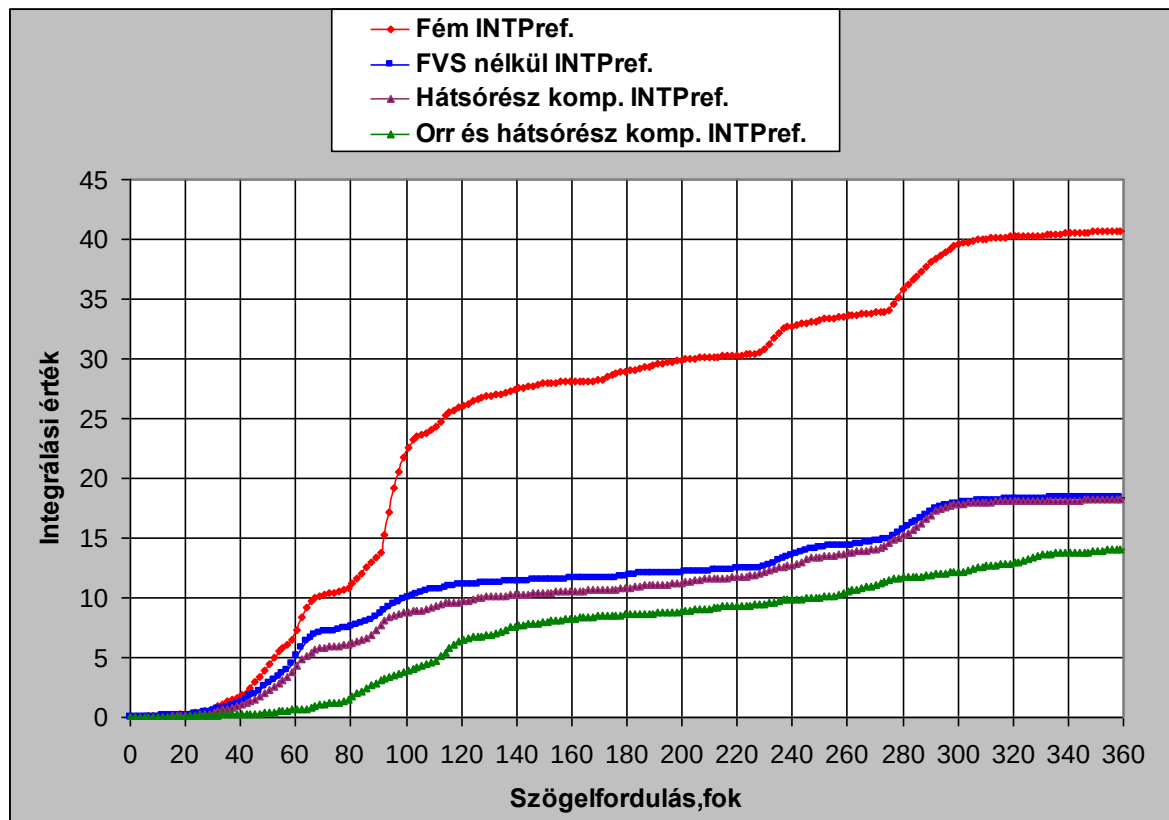


52. ábra A jelintegrátor kimenetén lévő szűrt impulzus-sorozat⁷¹

⁶⁹ Készítették: a szerzők

⁷⁰ Készítették: a szerzők

⁷¹ Készítették: a szerzők



53. ábra Az integrálási értékek a szögelfordulás függvényében⁷²

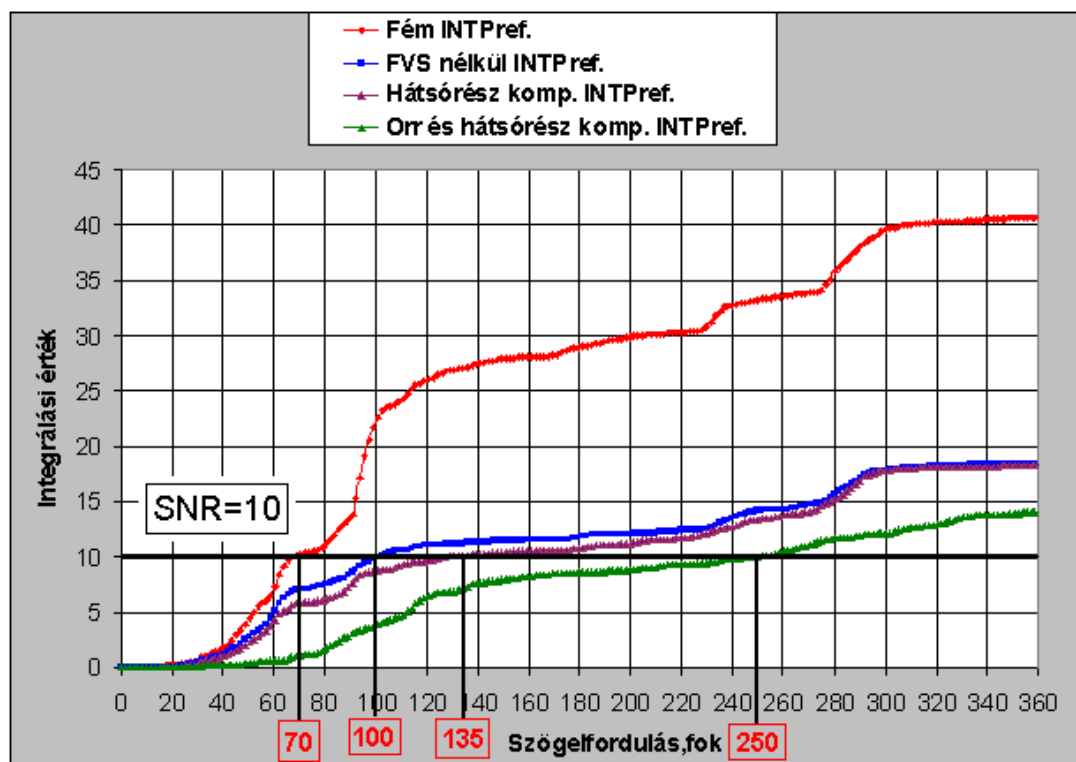
Az integrálási érték a reflektált jelek teljesítményének összegzéséből adódik. A 53. ábrából egyértelműen látszik, hogy a fém felületek csökkentésével, az integrálási értékek is csökkennek. Megfigyelhető, hogy a fémépítésű repülőgép integrálási értéke meghaladja a 40 egységet, míg a zölddel jelölt görbe még a 15-öt sem éri el.

Az integrálási értékekre lehet különböző kritériumokat tenni. Az 54. ábrán egy földi radar integrálási küszöbét szemléltetjük. Az SNR változtatásával állítható a cél észlelésének valószínűsége.

Ha ez 10 egység, akkor a cél detektálása az 54. ábra alapján a következőképpen alakul:

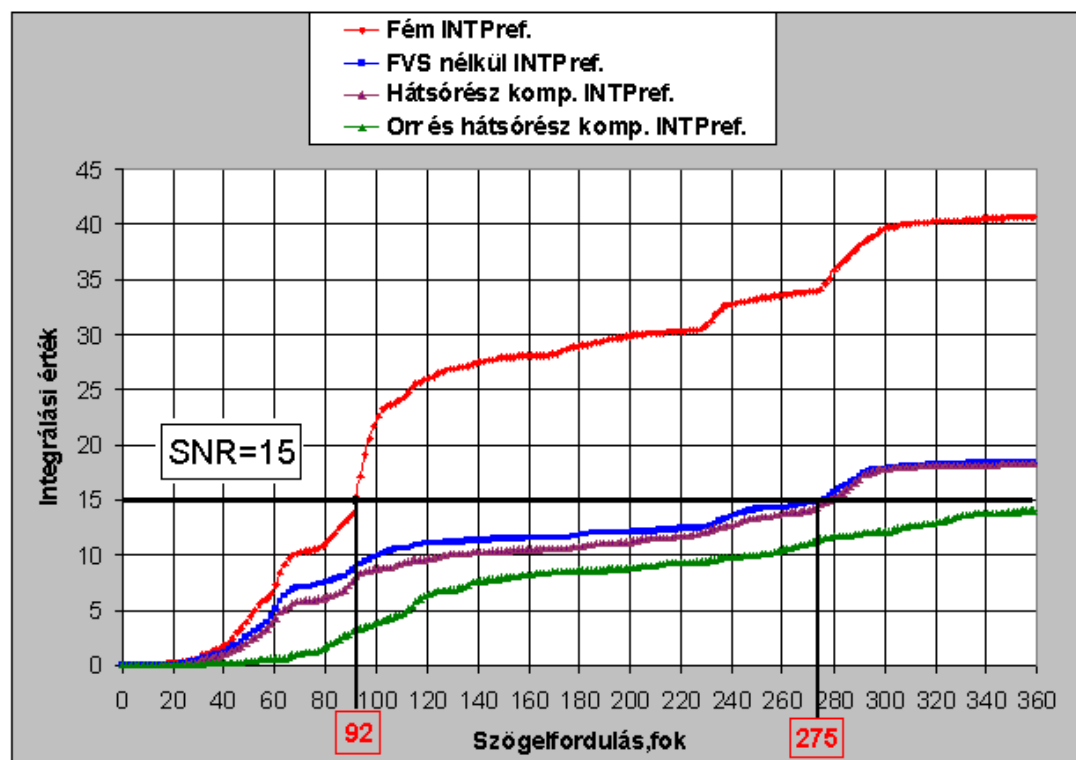
- fém repülőgép esetében a radar már 70°-os szöghelyzetben detektálja a célt;
- kompozit repülőgépnél a radar csak 250°-os szöghelyzetben észleli a repülőgépet.

⁷² Készítették: a szerzők



54. ábra Integrálási érték szögelfordulás függvényében I.⁷³

Az 55. ábrán láthatjuk, hogy az SNR érték 15-ösre való állítása esetén a hibrid repülőgépet annak egy teljes körülfordulása alatt a radar nem képes detektálni.



55. ábra Integrálási érték szögelfordulás függvényében II.⁷⁴

⁷³ Készítették: a szerzők

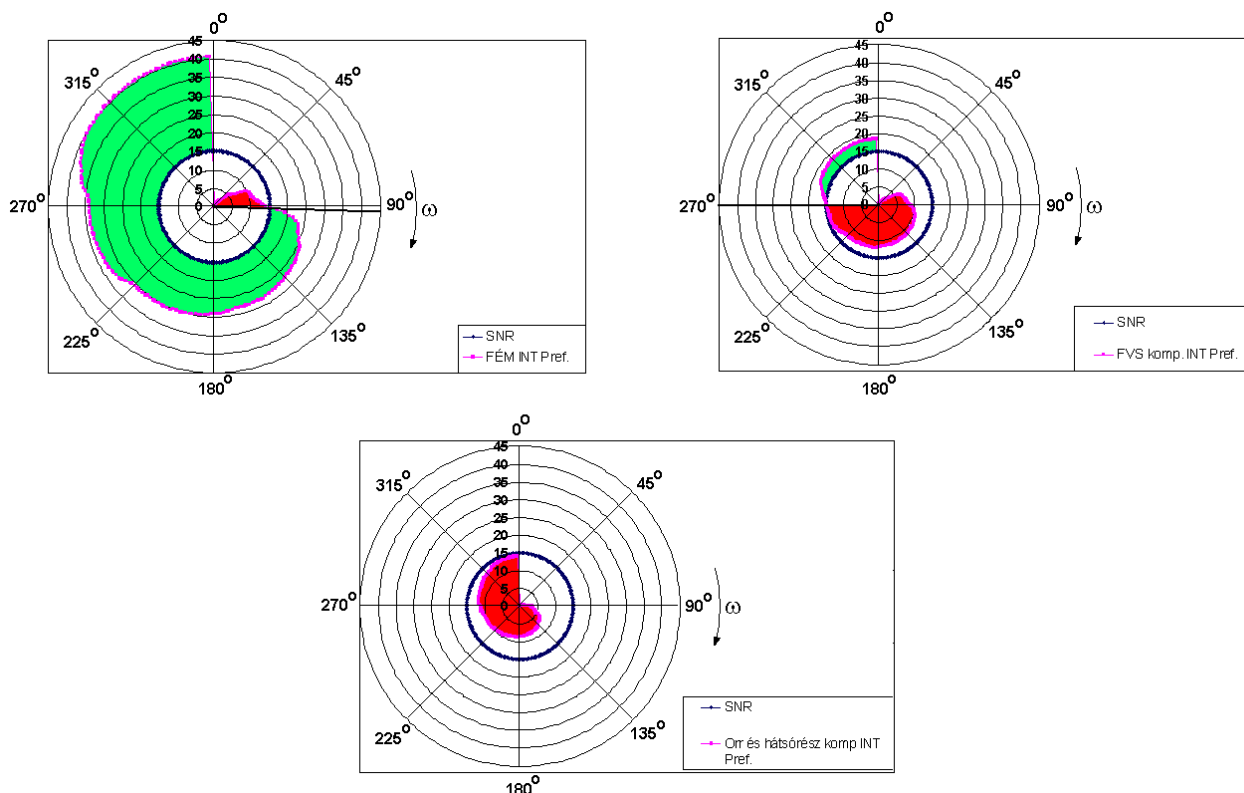
⁷⁴ Készítették: a szerzők

Az 56. ábra megfeleltethető az 55. ábrának, azzal a különbséggel, hogy itt a mért adatok polárkoordináta rendszerben vannak feltüntetve. A koncentrikus körök a különböző integrálási értékeket jelölik. Az ábrán kék körrel jelzett érték az 55. ábrán megjelölt SNR értékkel egyezik meg.

Az 55. ábrán lilával, és kékkel jelölt görbék közel azonosak, ezért az 56. ábrán csak három koordinátarendszer látható. Az 56. ábrán zöld színnel sátozott terület azt a szögtartományt jelöli, amelytől kezdve a radar képes a repülőgépet detektálni a megadott SNR érték mellett. A piros azt a területet mutatja, ahol a radar a repülőgépet nem érzékeli.

Ezek alapján nyilvánvalóan kitűnik, hogy a fémépítésű repülőgép már a 15° -os szöghelyzetnél, viszonylag hamar detektálható. Jelentős különbséget fedezhetünk fel a második grafikonon, ahol a cél detektálása már csak 275° -nál következik be.

A harmadik esetben jól látható, hogy a gép egy teljes körülfordulása során az integrálási érték nem lépi át a kék kört, a piros terület nem vált át zöldbe, így a repülőgép nem észlelhető.



56. ábra Integrálási érték polárkoordináta rendszerben⁷⁵

Feltételezve egy valóságos földi radarberendezés műszaki paramétereit, illetve a mért maximális radarkeresztmetszet értékeket felhasználva, megállapíthatjuk azt a maximális távolságot, ahol ez a radar már detektálja a célt.

⁷⁵ Készítették: a szerzők

A 4. táblázat a földi radar paramétereit, míg az 5. táblázat a mért maximális RCS értékeket, és az $R_{\max}$ távolságokat tartalmazza.

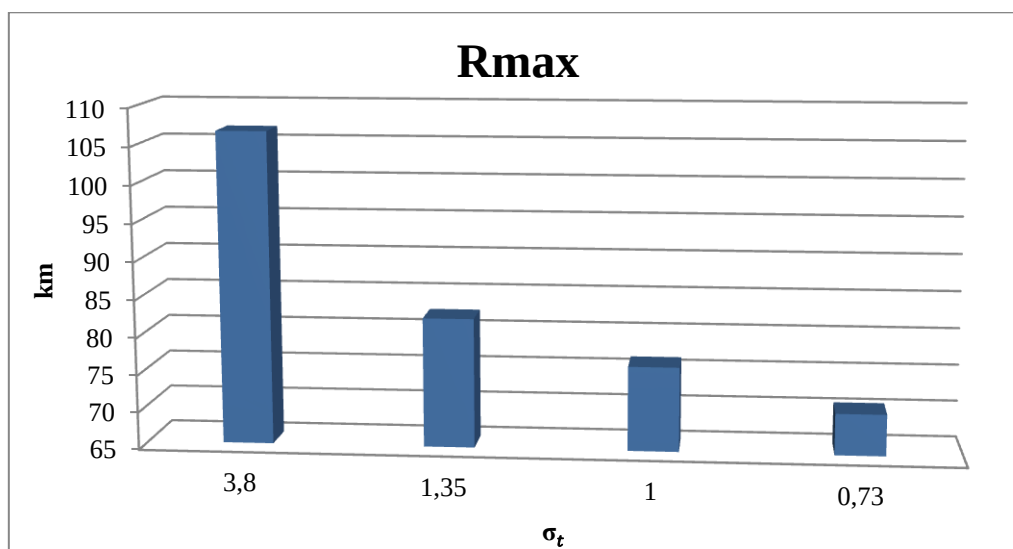
Adóteljesítmény	P_t	10^6 W
Antenna nyereség	G	1900
Hullámhossz (2700 MHz-nél)	λ	0,11 m
MDS	P_{MDS}	$5 \cdot 10^{-15} \text{ W}$
Veszteségek	L_S	128,8

4. táblázat Valóságos földi radar paramétere⁷⁶

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{tx} G^2 \lambda^2 \sigma_t}{(4\pi)^3 P_{\text{MDS}} L_S}} = \sqrt[4]{3,418 \cdot 10^{19}} \cdot \sqrt[4]{\sigma_t} \quad (20)$$

σ_t		$R_{\max}$
σ_t (fém repülőgép)	$3,8 \text{ m}^2$	106,7 km
σ_t (kompozit függ. és vízsz. vezérsík)	$1,35 \text{ m}^2$	82,4 km
σ_t (kompozit hátsórész)	1 m^2	76,4 km
σ_t (kompozit orr és hátsórész)	$0,73 \text{ m}^2$	70,6 km

5. táblázat Maximális detektálhatósági távolság RCS függvényében⁷⁷



57. ábra Maximális detektálhatósági távolság RCS függvényében⁷⁸

⁷⁶ Készítették: a szerzők

⁷⁷ Készítették: a szerzők

⁷⁸ Készítették: a szerzők

ÖSSZEGZÉS

A 3. fejezetben bemutatott mérési eredmények alapján egyértelműen belátható, hogy a dolgozat elején felvetett probléma nem csak elméletben, hanem gyakorlatban is gondot jelent. A mérések során folyamatosan növeltük a repülőgépen a kompozit felületek nagyságát. A mérési eredmények összehasonlításakor egyértelműen észrevehető, hogy a repülőgép detektálhatósága nagymértékben csökkent.

Méréseinket a 2. ábrán látható becslési módszer alapján kiszámított értékekkel összehasonlítva, azonos eredményekre jutottunk. A repülőgép RCS-e, illetve a detektálható Doppler frekvencia is valóban csökkent.

A kompozitok előnyös tulajdonságaiból fakadóan nyilvánvaló, hogy a technika fejlődésével ezen anyagok még inkább elterjedtek lesznek, mint napjainkban. Méréseink alapján belátható, hogy ez azt a problémát okozza, hogy a repülőgépek a földi radarok számára egyre kevésbé észlelhetők. A napjainkban alkalmazott ún. ultralight – kis tömegű, műanyagból, és kompozitokból felépített – repülőgépek esetében ez a probléma már fennáll. Habár ezek igen kisméretű repülőgépek, felhasználásuk annál elterjedtebb.

Ezek alapján belátható, hogy a transzponder berendezésekre nagy szükség van, hiszen a jövő repülőgépei valószínűleg nagyon kis mértékben lesznek detektálhatóak a földi radarok számára, amely a repülőgépek egyre növekvő száma miatt nem megengedhető a légi irányítás számára. Mi sem bizonyítja ezt jobban, mint egy 2010-es felmérés, amely szerint a Kanadában regisztrált civil repülőgépek 19%-a ultralight típusú volt.⁷⁹

A kis RCS értékkel rendelkező repülőgépek jobb detektálhatósága érdekében alkalmazzák napjainkban a Luneberg lencsét. Ez egy speciális, félgömb alakú, áttetsző, dielektromos lencse, amely megnöveli a céltárgy hatásos visszaverő felületét. Ennek belsejében speciális módon kialakított különböző törésmutatójú rétegek vannak. Ez a beérkező jelet fókuszálva veri vissza. Ezeket a Magyar Honvédségben lévő Meteor célgépeken is alkalmazták azért, hogy a Mistral típusú rakétákat rá lehessen vezetni ezekre a célokra.

A kapott eredmények alapján ezeket a lencsét a jövőben polgári repülőgépeken is alkalmazni kellene, annak érdekében, hogy a repülőgép jól észlelhető, valamint a transzponder jeladó meghibásodása, kikapcsolása esetén is nyomon követhető legyen.

⁷⁹ http://en.wikipedia.org/wiki/Ultralight_aviation#Canada (2014. 10. 29.)

FELHASZNÁLT IRODALOM

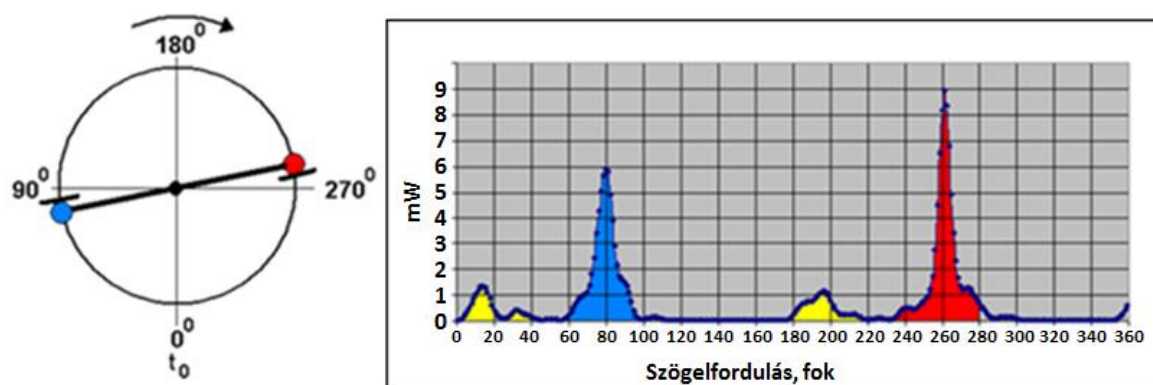
1. http://conrad.ru/doci/Universalnyy_radar_datchik_modul_Hygrosens_rabochee_napryagienie_5_V_502370_en.pdf (2014.02.15.)
2. http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/500000-524999/502370-in-01-de-Radar_Bewegungsmelder_RSM1650.pdf (2014.03.13.)
3. <http://www.acfr.usyd.edu.au/pdfs/training/sensorSystems/14%20Doppler%20Measurement.pdf> (2014.04.28.)
4. <http://www.ntu.edu.sg/home/ssho/papers/CLHW06.pdf> (2014.04.28.)
5. <http://www.feko.info/applications/white-papers/the-effect-of-carbon-fibre-body-panel-on-aircraft-rcs/the-effect-of-carbon-fibre-body-panel-on-aircraft-rcs/view> (2014.09.10.)
6. <http://www.shipjournal.co/index.php/sst/rt/prINTERfriendly/72/250> (2014.09.15.)
7. http://www.repulestudomány.hu/kulonszamok/2014_cikkek/2014-2-44-0147_Partos_Sandor.pdf (2014.09.15.)
8. <http://worldtracker.org/media/library/Reference/Encyclopedia's/Encyclopedia%20of%20Radar%20Technology%20.pdf> (2014.09.17.)
9. <http://www.tscm.com/rsc.pdf> (2014.09.20.)
10. http://www.google.com/imgres?imgurl=http://sg.hu/kep/2011_06/sg2011_14_03.jpg&imgrefurl=http://sg.hu/cikkek/82641/van-jov337juk-a-lopakodo-vadaszgepeknek&h=681&w=500&tbnid=UZ1A-Ka27OpaOM&zoom=1&tbnh=262&tbnw=192&usq=__qBWgc_-zLETQ4PWQLmTP0FELvCw= (2014.09.27.)
11. <http://nptel.ac.in/courses/101108056/module2/lecture4.pdf> (2014.10.05.)
12. <http://fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/cwradar/cwradar.htm> (2014.10.14.)
13. http://meteorologytraining.tpub.com/14271/css/14271_69.htm (2014.10.25.)
14. http://www.ainonline.com/sites/default/files/uploads/a350xb_msn2_first_flight_3_.jpg (2014.10.28.)
15. <http://www.radartutorial.eu/11.coherent/co06.en.html> (2014.10.28.)
16. http://en.wikipedia.org/wiki/Ultralight_aviation#Canada (2014. 10. 29.)

MELLÉKLETEK

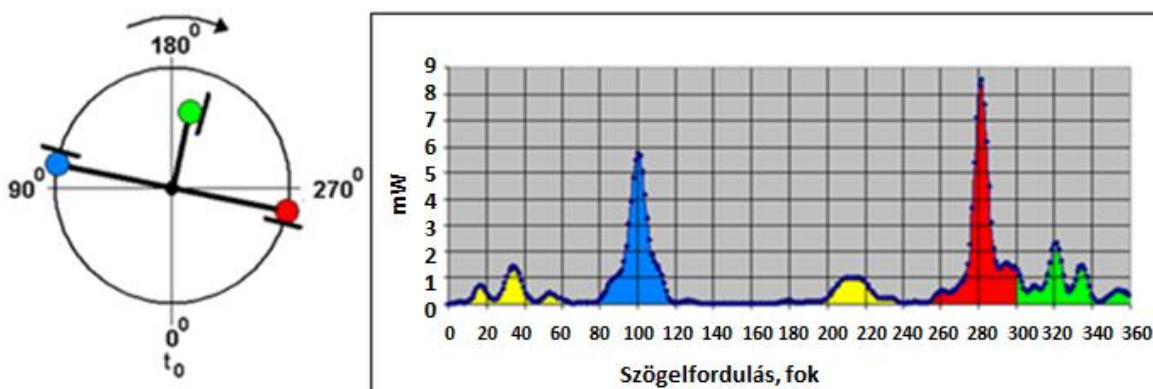
1. melléklet: Ábrajegyzék
2. melléklet: Jelölések jegyzéke

1. melléklet

Ábrajegyzék



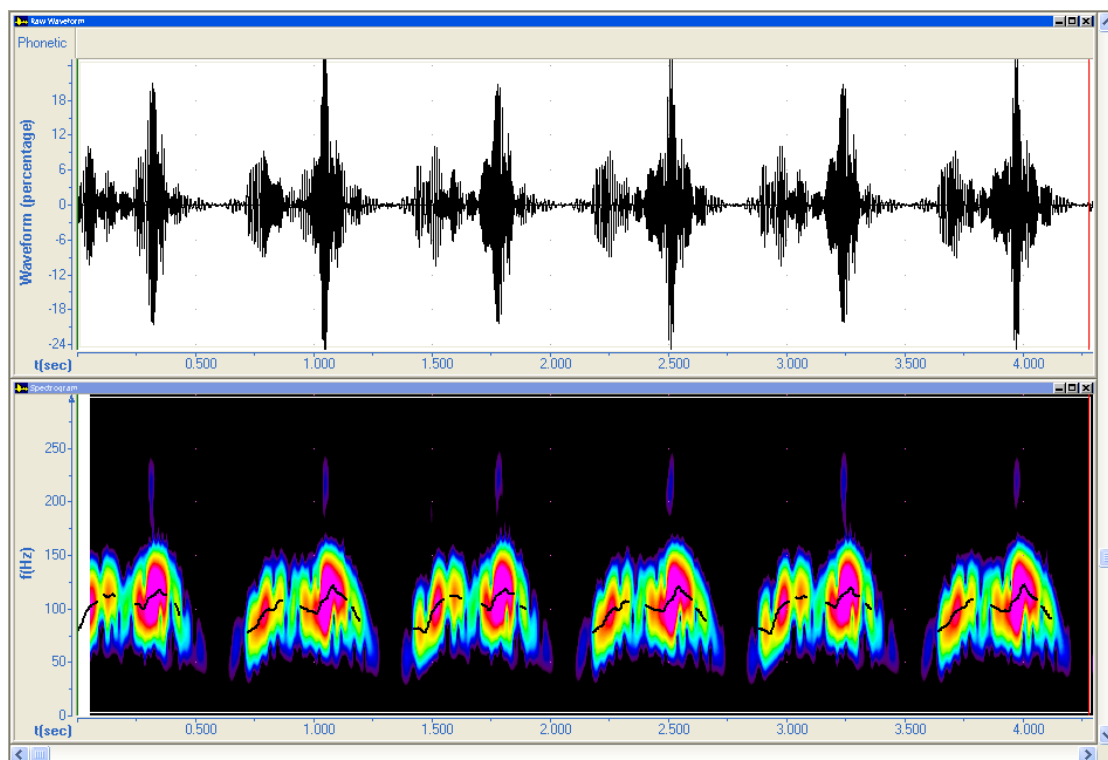
58. ábra Két reflektáló lap 360°-os körbefordulás során keletkező visszavert jel teljesítménye⁸⁰



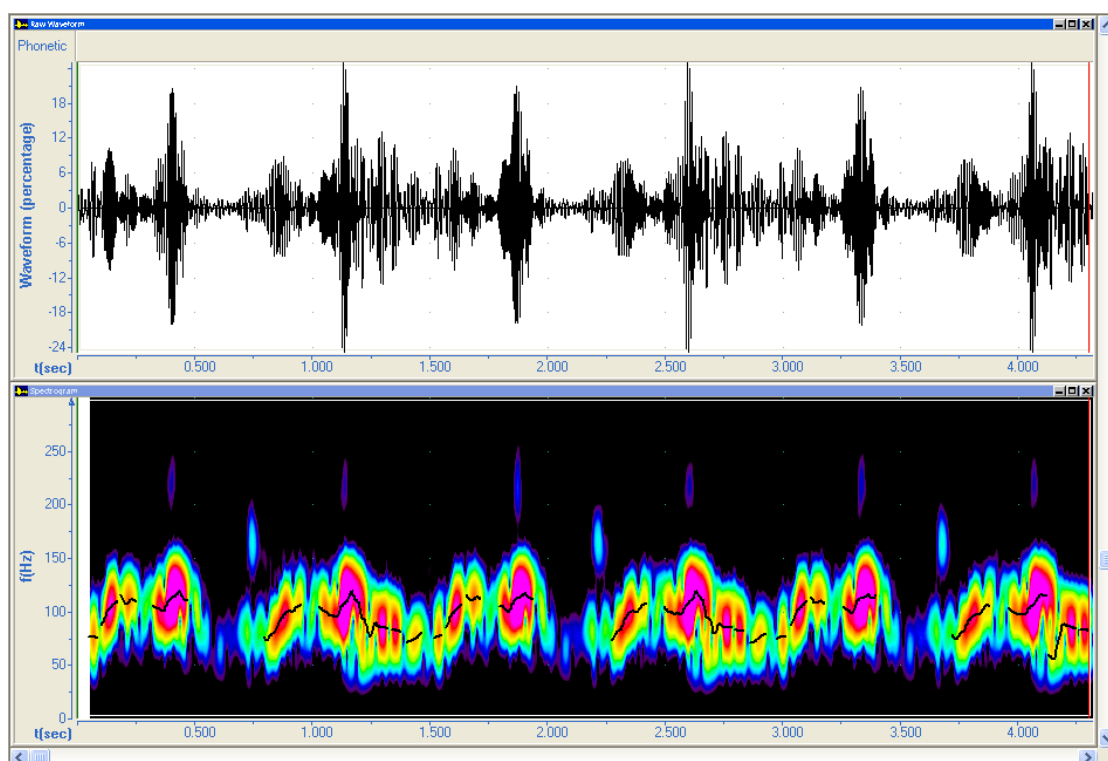
59. ábra Három reflektáló lap 360°-os körbefordulás során keletkező visszavert jel teljesítménye⁸¹

⁸⁰ Készítették: a szerzők

⁸¹ Készítették: a szerzők



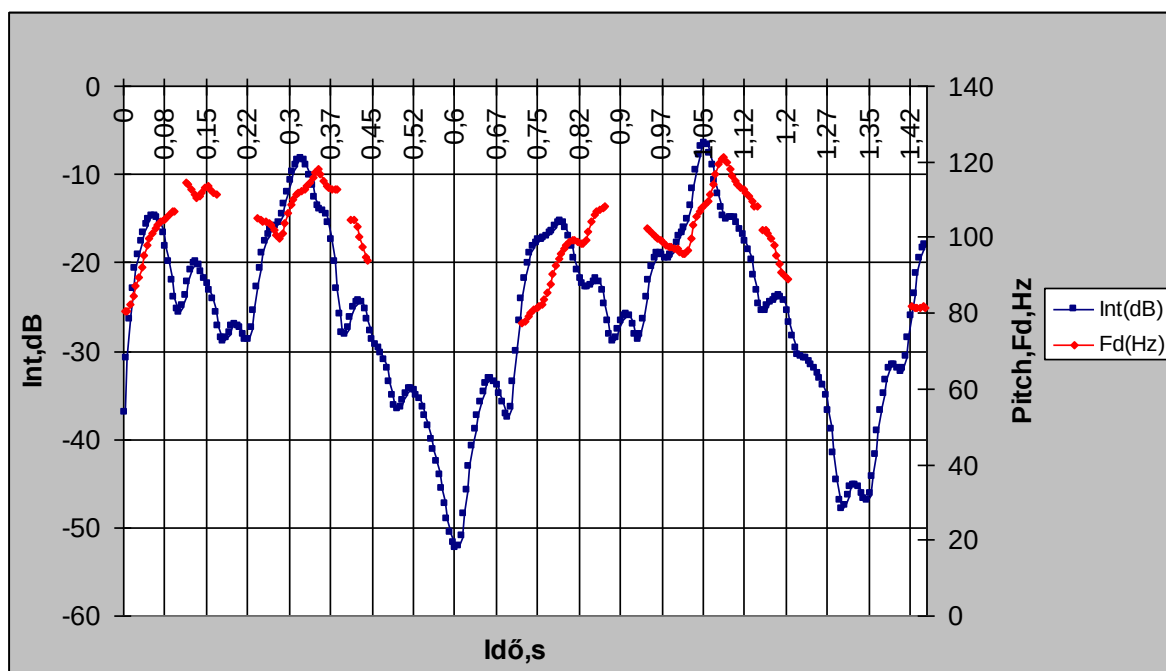
60. ábra Két reflektáló lap hullámformája, és spektrogramja⁸²



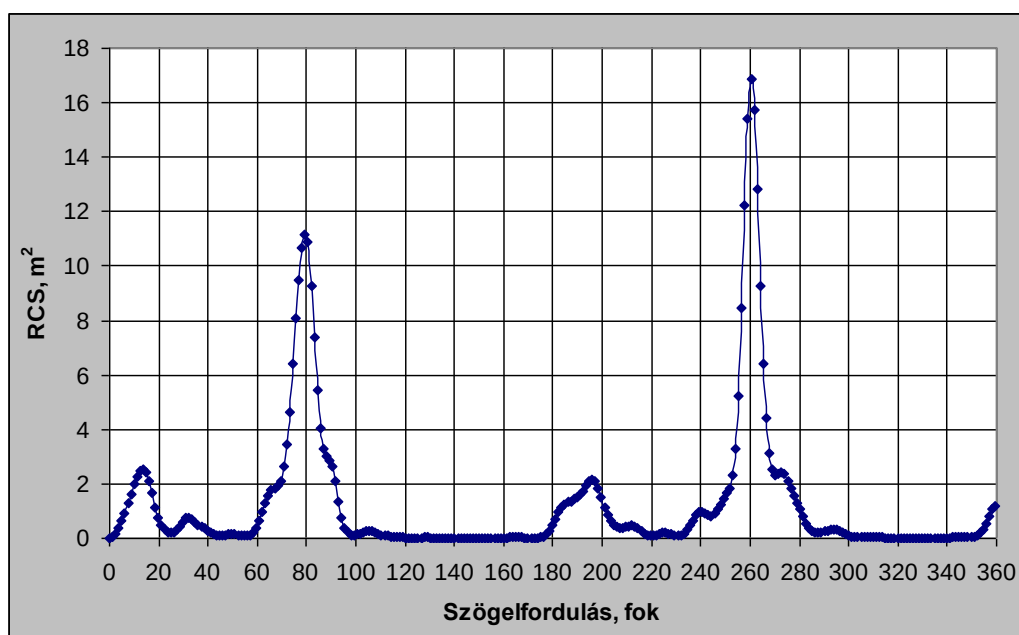
61. ábra Három reflektáló lap hullámformája, és spektrogramja⁸³

⁸² Készítették: a szerzők

⁸³ Készítették: a szerzők



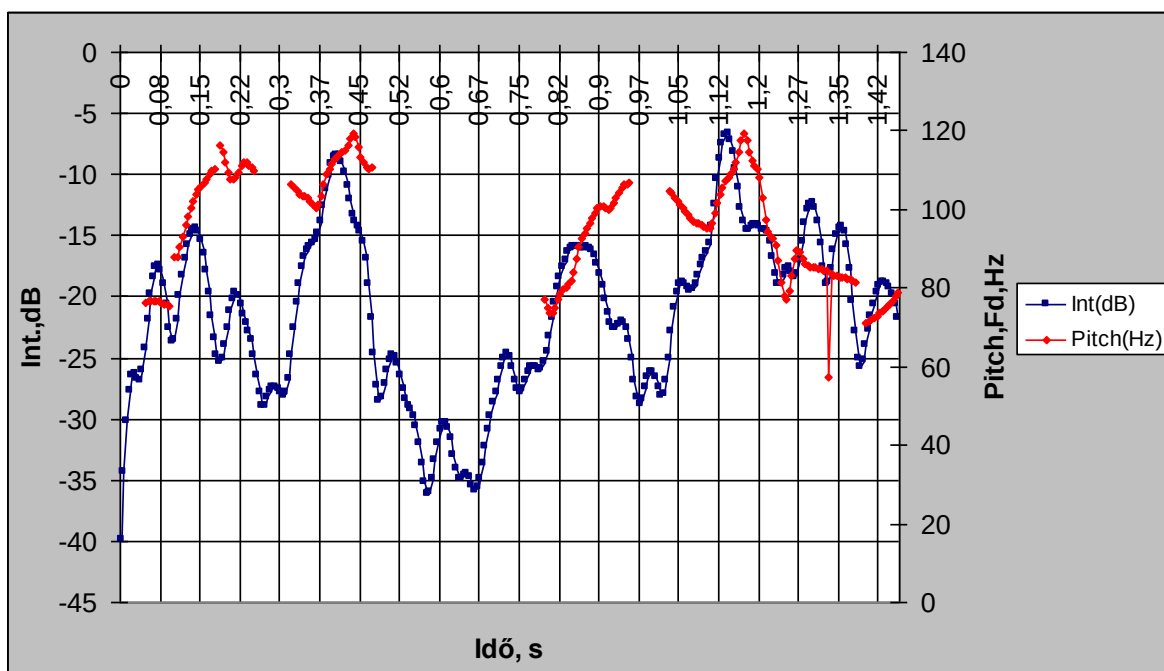
62. ábra Két reflektáló lap egy körbefordulásának mérési eredményei⁸⁴



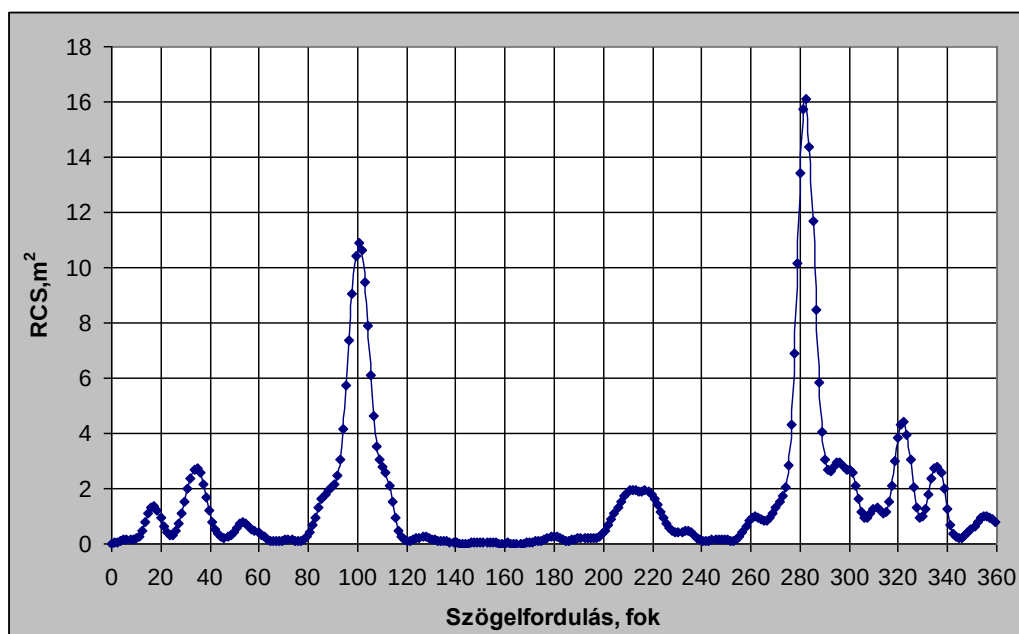
63. ábra Két reflektáló lap hatásos visszaverő felületének mértéke 360°-os körbefordulás esetén⁸⁵

⁸⁴ Készítették: a szerzők

⁸⁵ Készítették: a szerzők



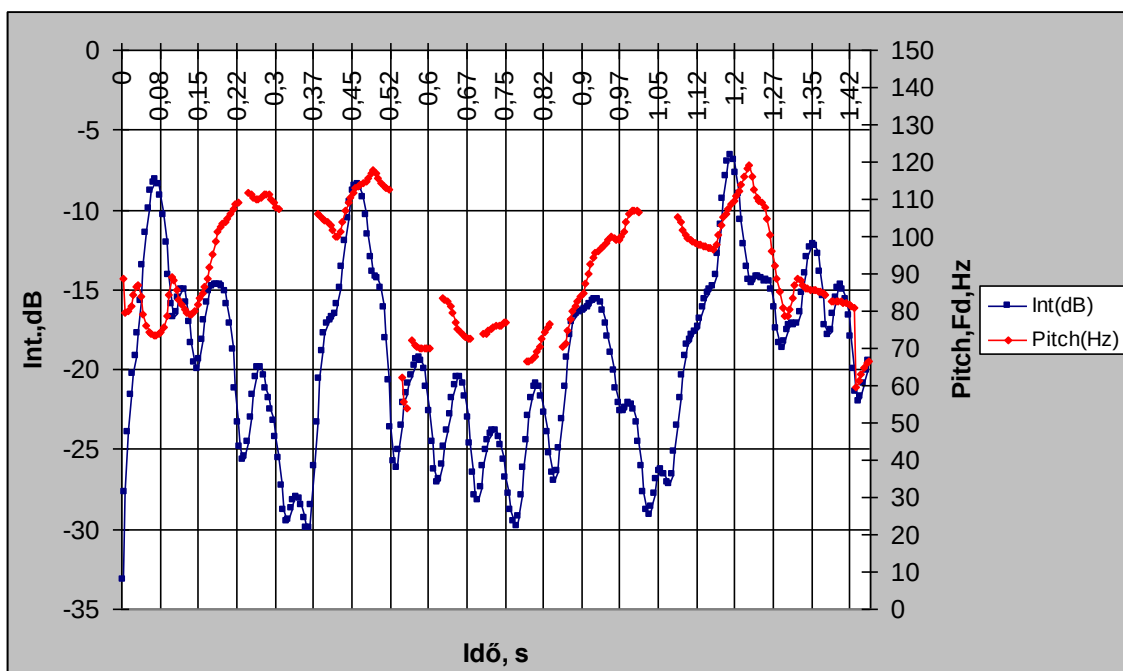
64. ábra Három reflektáló lap egy körbefordulásának mérési eredményei⁸⁶



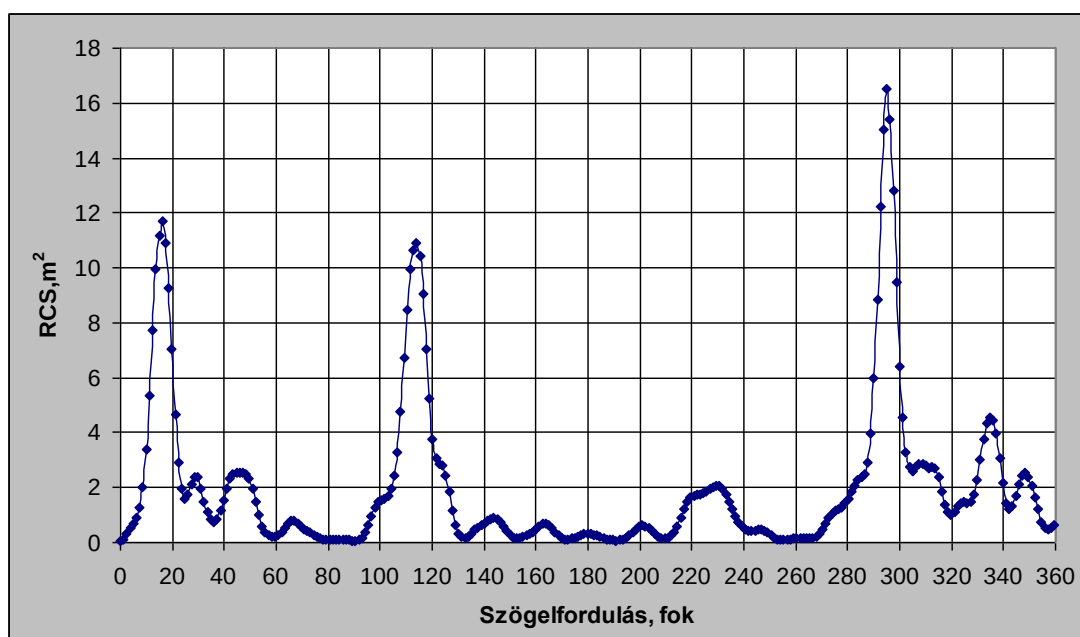
65. ábra Három reflektáló lap hatásos visszaverő felületének mértéke 360°-os körbefordulás esetén⁸⁷

⁸⁶ Készítették: a szerzők

⁸⁷ Készítették: a szerzők



66. ábra Négy reflektáló lap egy körbefordulásának mérési eredményei⁸⁸



67. ábra Három reflektáló lap hatásos visszaverő felületének mértéke 360°-os körbefordulás esetén⁸⁹

⁸⁸ Készítették: a szerzők

⁸⁹ Készítették: a szerzők



68. ábra A mérési összeállítás képe II⁹⁰



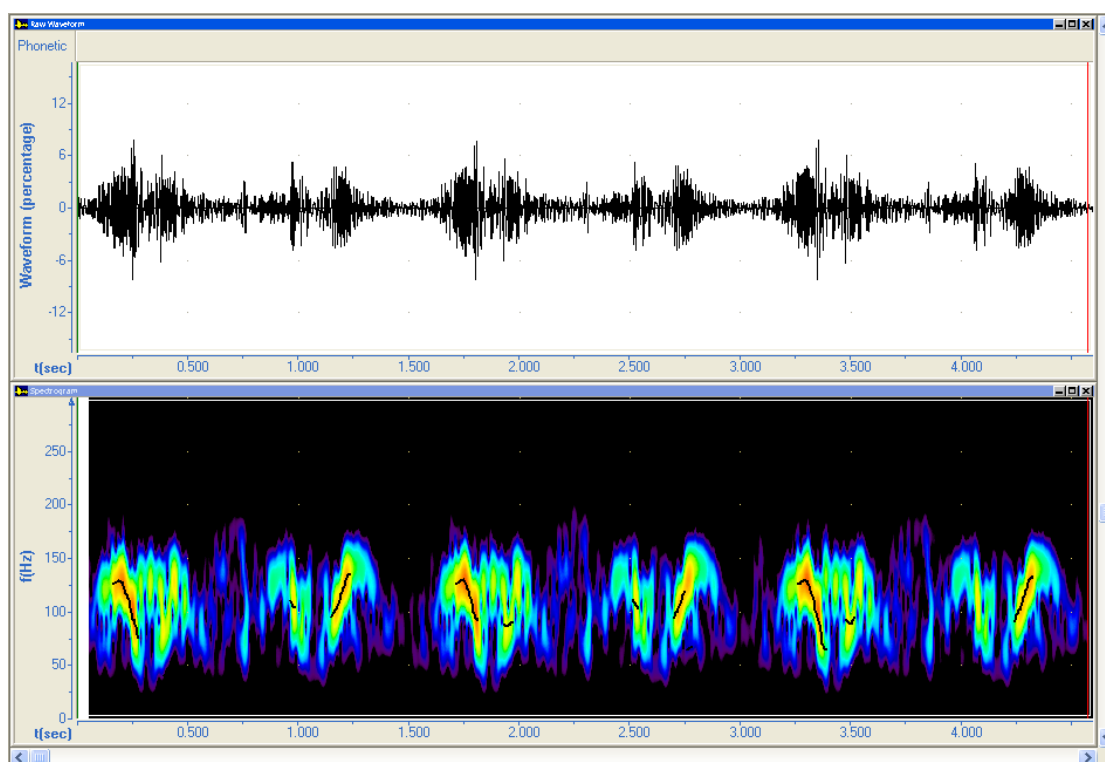
69. ábra A mérési összeállítás képe III⁹¹

⁹⁰ Készítették: a szerzők

⁹¹ Készítették: a szerzők



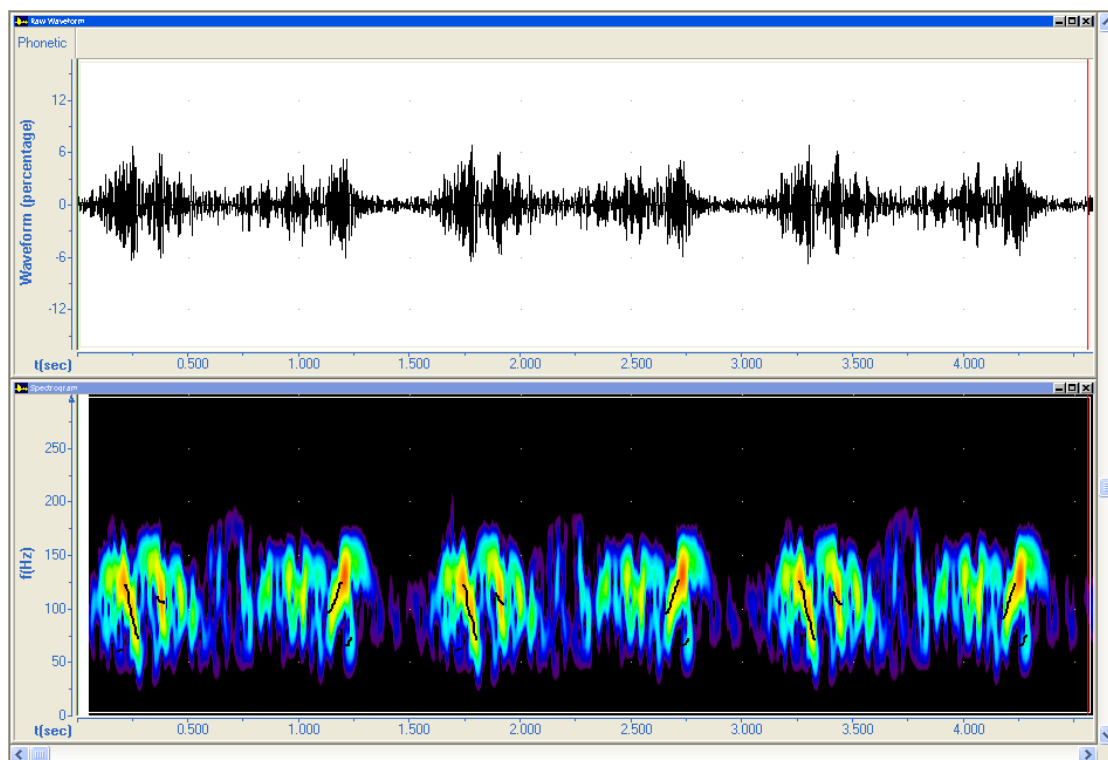
70. ábra A mérési összeállítás képe IV⁹²



71. ábra Kompozit függőleges- és vízszintes vezérsíkú repülőgép
visszavert jelének hullámformája és spektrogramja ⁹³

⁹² Készítették: a szerzők

⁹³ Készítették: a szerzők



72. ábra Kompozit hátsórészű repülőgép visszavert jelének hullámformája és spektrogramja ⁹⁴

⁹⁴ Készítették: a szerzők

2. melléklet

Jelölések jegyzéke

P_r	– reflektált teljesítmény
P_t	– adóteljesítmény
G_t	– kisugárzó antenna nyeresége
G_r	– vevő antenna nyeresége
G_o	– célnyereségi tényező
S_{min}	– minimális detektálási jel
σ	– radar keresztmetszet
R	– adó és cél távolsága
R_{max}	– az a távolság, amelyen túl a cél már nem detektálható
λ	– kisugárzott jel hullámhossza
c	– fénysebesség
f	– frekvencia
β	– fázistényező
F_D	– Doppler frekvencia
a	– céltárgy geometriai mérete
φ_k	– kisugárzott jel fázisa
φ_v	– visszavert jel fázisa
ω_k	– kisugárzott jel körfrekvenciája
ω_v	– visszavert jel körfrekvenciája
φ	– fáziskésés
t_d	– a földi radar és a repülőgép távolság
D	– céltávolság
v	– a radar és a cél relatív sebessége
v_c	– cél sebessége
f_k	– kisugárzott jel frekvenciája
f_v	– visszavert jel frekvenciája
θ	– a haladási sebesség és a radiális sebesség vektora által bezárt szög
f_0	– radar által kisugárzott folyamatos jel frekvenciája
f_d	– a visszavert jel frekvenciájának eltérése f_0 -hoz képest
A	– apertúra felület