

KORSZERŰSÖDIK A RÁDIÓTECHNIKAI RENDSZERÜNK?

Csikesz Ferenc¹

I. RÉSZ

Örvendetesen megszorodott az ajtónkon kopogtató radargyártó cégek száma, 1992-től kezdődően a világ élvonalába tartozó neves gyártók jelentős része tartott tájékoztatót és fejezte ki készségét termékének szállítására. Több, a légvédelmi rendszerek, eszközök tervezésére, gyártására specializálódott intézmény ajánlkozott a magyar légvédelem átvilágítására és korszerűsítésére.

1993-ban két cég kapott felkérést a rádiótechnikai rendszerünk modernizálására. Sajnálatos módon csak kettő, hisz kimondva-kimondatlanul, de az ajánlatoknak igen nagy előnye, hogy az értékelésben résztvevő és megfelelő felkészültséggel rendelkező bírálók ismeretanyaga bővül, eddig hozzáférhetetlen vagy korlátozottan hozzáférhető információk birtokába jutnak. Ékesen bizonyítja ezt a rosszlelkű IFF tender, *ahol is csak az ajánlatok áttanulmányozása után jelenthettük ki, hogy olyan ismeretek birtokába kerültünk, amelyek alapján már egy korrekt tender felhívás műszaki részét meg tudnánk fogalmazni.*

Pusztán a szűk szakmai szempontok is azt indokolják, **hogy tapasztalatszerzés céljából a gyártók minél szélesebb körével lépünk kapcsolatba.** A korszerű radarokkal történő ismerkedés felemás módon zajlott le, illetve zajlik napjainkban. Meghatározóan döntő részben a szemlélőségek (főnökségek) állománya jár a radargyártóknál, konzultál harci alkalmazásról, beszerzésről. **Elenyészően kevés a mérnök-műszaki beosztásúak részvétele.** Számunkra az ilyen-olyan csatornákon beszerzett szakirodalom, műszaki leírások tanulmányozása marad. Ez sem utolsó szempont. Sőt a légvédelemmel, rádiótechnikai rendszerrel, radarokkal kapcsolatos különböző szinteken hozzáférhető specifikáció gyűjtemények, tervezési eljárások tanulmányozását szervezetté kellene tenni. Hathatós

1 Csikesz Ferenc mk. ezredes, MH Haditechnikai Csoportfőnök-helyettes

NATO tanácsadással előbb-utóbb felkészülhetnénk egy korrekt tender összeállítására, illetve az ajánlatok szakszerű elbírálására.

A két cég ajánlatának összevetése, az elkészített vélemény radar mérnöki szempontból igen sok kívánni valót hagy maga után, sok esetben alapfokú ismeretek hiányát tükrözi. Jelen cikk egy nálunk kevésbé ismert terület, **a radarok elektronikai védelmének (ECCM) néhány aspektusával** szeretne hozzájárulni ahhoz, hogy egy régen hiányzó, egységesen értelmezett követelmény vagy összehasonlítási rendszer kidolgozásra kerüljön.

Annak köszönhetően, hogy a légi hadművelet során a légvédelem szenzor rendszere elsődleges célpontként szerepel, **a radarok zavarás elleni védelme igen kiterjedt szakirodalommal rendelkezik.** Az ajánlatkérés a légvédelem felderítő radarjaira vonatkozott. Ajánlatokat földi telepítésű, nagy hatótávolságú 3D radarokra, illetve különlegességgként számítógépes ballongfedélzeti 2D radarra kaptunk. *Farina szerint* (1) a felderítő radarok ellen zajzavar, dipól zavar, hamis cél generálás, rádiólokációs csapdák, radar elleni rakéták alkalmazásával kell számolni.

A radarok elleni elektronikai tevékenység (ECM) eljárásai közül a stand-off (a tűzhatás körzeten kívül települt) zavaró (SOJ) alkalmazható a legnagyobb biztonsággal a fix telepítésű földi vagy ballongfedélzeti radar ellen. Ballong radar elleni tevékenység során kiválóan használható a földi telepítésű zavaró állomás, hisz a föld görbülete miatti rádióhorizont korlátozó hatása ésszerű határok között nem jelentkezik.

1.) A zavarandó radar jelének felderítése

A zavarás inicializálása előtt a radar jelének megfelelő erősséggel kell elérnie a zavaró állomás felderítő-vevőjét. *A jel-zaj viszony a felderítő vevő kimenetén:* (1)

$$\frac{S}{N} = \frac{P_R G_R G_j \lambda^2}{(4\pi R_j)^2 k T B_j F_j L L_{atm}} \quad (1.)$$

ahol:

- P_R - a radar impulzus-teljesítménye,
- G_R - a radar antenna nyeresége,
- G_j - a zavaró állomás vevő antenna nyeresége,
- λ - a radar üzemi hullámhossza,
- kTB_jF_j - a felderítő vevő zajteljesítménye,
- L - a felderítő vevő vesztesége,
- L_{atm} - az egyutas atmoszféra csillapítás,
- R_j - a radar és a zavaró közötti távolság.

A radar és a felderítő-vevő közötti harcban a radar előnye, hogy vevője a saját jelalakjára van illesztve – a felderítő rendszer nehezen tudja duplikálni az egzakt radar jelalakokat –, hátránya, hogy míg a felderítő-vevő által vett jel a közöttük lévő távolság reciprokanak négyzetével, addig a radar által vett visszhang teljesítmény a cél távolság reciprokanak negyedik hatványával arányos.

A sikeres felderítés/zavarás érdekében a radar és a zavaróállomás között optikai átlátást kell biztosítani. *A föld görbületének és a terjedési refrakciónak a figyelembevételével az optikai átlátás:*

$$D_{[km]} = 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (2.)$$

ahol:

h_1 - a radar antenna magassága (m),

h_2 - a zavaró állomás antennájának magassága (m).

A 250 méter magas uralgó pontra telepített radar 4 méter magasságú felderítő antennával több, mint 70 km távolságból látható. A 3600 m magasan lebegő ballon radar 255 km-ről történő felderítését a föld görbülete nem korlátozza.

Az (1.), (2.) egyenletek alapján történik a felderítő-vevő hatótávolságának számítása. A radar antenna főnyaláb maximális értékének (G_R) a számításba vétele csak akkor lehetséges, ha az interferencia elhanyagol-

ható. Földi telepítésű radarok elleni tevékenység során alkalmazható zavaró távolság viszonylag kis értéke (40 km - 100 km), valamint a horizont közelsége miatt a több-utas terjedés okozta interferenciától nem lehet eltekinteni. Ez azt jelenti, hogy G_R értéke, a helyi topográfiai viszonyok és a föld reflexiós tényező effektív értékének függvényében 3-13 dB-el lesz a maximális érték alatt. Ballon radar felderítésekor, a nagy elevációs szög miatt a csökkenés lényegesen kevesebb.

A bevezetőben említett mindkét ajánlat az impulzus kompresszió elvén működő radarokra vonatkozott. Az impulzus kompresszió olyan eljárás, melynek során a célra jutó energia növelése érdekében széles impulzust sugároznak ki, miközben keskeny impulzusnak megfelelő távolság szerinti felbontóképességet érnek el. Az alkalmazott széles impulzus frekvencia modulált, illetve fázis és/vagy frekvencia kódolt lehet. A kisugárzott jel időtartamának és pillanatnyi sáv szélességének szorzata a kompresszió arány, mely a konvencionális radarokkal ellentétben egynél nagyobbrendekkel nagyobb.

Az impulzus kompressziós eljárás ECCM vonatkozásában számos előnnyel rendelkezik, melyek közül a felderíthetőség szempontjából ki kell emelni, hogy azonos kisugárzott energia esetén a radar impulzus teljesítménye alacsonyabb. Az alacsonyabb teljesítmény, párosulva a felderítő-vevő számára ismeretlen jelmodulációval, nehezebbé teszi a radar jelének detektálását, jellemzőinek mérését. Emiatt a kompressziós jelalakokat alkalmazó radarokat "halk" vagy alacsony felderíthetőségi valószínűségű radaroknak (LPIR) nevezik. *Az eddig kifejtetteket jól illusztrálja az ajánlatokban szereplő S sávú radarok összehasonlítása:*

- az A radar 150 kW csúcsteljesítménnyel max. 200 μ s széles, 3.5 MHz pillanatnyi sáv szélességű jelet sugároz ki, a felderítési zónát tűnyalábbal tapogtatja le.

- a B radar 3.5 MW csúcsteljesítményű 6.5 μ s széles, 1.6 MHz pillanatnyi sáv szélességű jelet sugároz ki, a felderítési zónát adáskor egy, helyszögben széles koszekáns négyzet nyalábbal, vételkor szimultán tűnyalábbal tapogtatja le.

Annak ellenére, hogy az A radar hatótávolsága lényegesen nagyobb, mint a B radaré (nagyobb az átlagteljesítmény - vételi antenna hatásos felület szorzata) az A radar 13.6 dB - el csendesebb, ami felderíthetőség

szempontjából nagy előny. Belátható, hogy az adáskor helyszögben széles nyalábot használó **B** radar jelét a felderítő-vevő könnyebben elfogja, mint a tűnyalábot kisugárzó **A** radarét. Az **A** radar, a fősíkokon kívüli melléknyalábait is figyelembevéve, a látható tér kb. 5%-át sugározza be egy adott pillanatban, ugyanez a **B** radarnál a széles adási cosec² nyaláb miatt kb. 25%, vagyis a **B** radar a felderítő-vevő számára ötször hozzáférhetőbb. A **B** radar helyszögben szimultán vételi nyalábjai azonos frekvenciájúak, így a zavarás találati valószínűsége is ötször nagyobb, mint az **A** radaré.

Az **A** radar kompresszió aránya 500, a **B** radaré 13. *A kompresszió arány ECCM hatását a következő 2. pont elemzi.*

Ha a radar automatikusan változtatja frekvenciáját, a felderítő-vevő a folyamatos frekvencia frissítés érdekében kénytelen a radar adását, a radar antenna melléknyalábján keresztül is detektálni. Ebben az esetben az (1.) egyenletben $G_R=0$ dB. Ez az eléggé konzervatív érték garantálja a gyakorlatilag folyamatos radarjel detekciót, nem elfelejtve, hogy a radar antenna forgáskarakterisztikájában - 20 dBi (izotróp antennára vonatkoztatott) szintű melléknyalábok is jelen vannak. Az alacsony melléknyaláb szint és impulzus csúcsteljesítmény érzékenyebb felderítő-vevő alkalmazását teszi szükségessé, ugyanakkor csökkenti az önrávezető rakéták alkalmazásának lehetőségét. E vonatkozásban az **A** radar előnye vitathatatlan.

A felderítő-vevő G_j antenna nyereségét az (1.) egyenletben 3 dB polarizációs veszteséggel kell csökkenteni az összes polarizáció kombinációban, kivéve az ortogonális és az ellentétes forgásirányú körpolarizáció eseteit, ahol is a gyakorlatban a kereszt polarizációs effektus miatt 30 dB veszteséggel lehet számolni.

2.) Átégetési távolság

Az átégetési távolság a céltárgynak a radartól mért azon ferde távolsága, melyre aktív zajzavar hatása alatt teljesülnek a detekciós és a vaklárma valószínűség minimum követelményei, vagyis a radar hatótávolsága aktív zavarás viszonyai között.

A radarok ECM viszonyok közötti viselkedésének kiterjedt szakirodalmi van. Az aktív zavarás alatti radar hatótávolság számítását L.W. Blake "Radar range-performance analysis" c. klasszikusnak számító munkájában írta le. Az irodalomjegyzékben felsorolt művek is Blake által közölt számítási módszert alkalmazzák. Elfogadott szokás, hogy tendereztetésekor az ajánlattevőt kötelezik a radarjára vonatkozó "Blake worksheet" megadására. Sajnálatos módon az említett két ajánlat egyike sem közölte, hogy milyen számítások alapján becsülte radarja felderítési távolságát. A B radar gyártója olyan nagyvonalú volt, hogy ajánlata műszaki részt nem is tartalmazott, helyette vásárokon szokásos szórólaponkat osztogatott. Igen szomorú, hogy felelős beosztású vezetők feltételezik, prospektusok alapján, tendereztetés mellőzésével tudnak érdemben választani. E téren sokkal átgondoltabb volt az LRI közelkörzeti radar és légiforgalmi irányító központ berendezéseinek beszerzési procedúrája. Nagyon szigorú, hathatós EUROCONTROL közreműködéssel készült tendereztetés alapján választották ki a szállítókat, egyáltalán nem látták úgy, hogy "eszközrendszerek beszerzése esetén a tárgyalásos eljárás lesz alkalmazható." Csak irigyelni lehet az LRI mérnökeiket azokért az ismeretekért és tapasztalatokért, amelyeket a tender közös összeállításakor - értékelésekor, illetve a referencia helyszínek és a gyártás folyamatának megtekintésekor szereztek.

Szomorú tény, hogy a közelkörzeti radar tendereztetésével kapcsolatos munkákban az MH szakemberei nem vettek részt, a katonai érdekeket (ECCM, stb.) nem képviselte senki, pedig ekkor már felismertük az erőforrások gazdaságos felhasználásának, a közös alkalmazásnak az elvét, és ekkor már túlvoltunk az IFF tenderen, melynek értékelésébe a polgári szféra bevonásra került.

A Blake által javasolt hatótávolság számítási módszer az alábbi gondolatmenetet követi. *A σ visszaverő felületű, R távolságon lévő cél által létrehozott jel-zaj viszony a radar vevő kimenetén:*

$$\frac{S}{N_{(\sigma,R)}} = \frac{P_T P_C \lambda^2 G_T G_R G_P \sigma}{(4\pi)^3 L_T R^4 k T_s B_R} \quad (3.)$$

ahol:

- P_T - az adó impulzus teljesítménye,
- P_C - az impulzus kompresszió arány,
- λ - az üzemi hullámhossz,
- G_T - az adó antenna nyereség a cél irányába,
- G_R - a cél irányában vett vételi antenna nyereség,
- G_P - a Doppler vagy MTI processzálási nyereség,
- L_T - a cél vagy rendszer veszteség,
- k - Boltzmann állandó,
- T_S - a vevő bemenetére számított rendszer zajhőmérséklet,
- B_R - a radar pillanatnyi sávszélessége.

$S/N=1$ esetén $R=R_0$, a *Marcum féle idealizált hatótávolság*.

$$R_0^4 = \frac{P_T P_C \lambda^2 G_T G_R \sigma}{(4\pi)^3 L_T k T_S B_R} \quad (4.)$$

Általában $S/N \neq 1$, hanem a P_d és P_{fa} rendszer paraméterek által meghatározott értékű. Ekkor a *zavarmentes környezetbeni hatótávolság*:

$$R = \frac{R_0}{\sqrt[4]{S/N_{(P_d, P_{fa})}}} \quad (5.)$$

A B_R sávszélességű radarnál az R_j távolságon lévő *zavarforrás által létrehozott zavar-zaj viszony*:

$$\frac{J}{N} = \frac{P_j G_j G_{RJ} \lambda^2 B_R}{(4\pi)^2 B_j R_j^2 L_j k T_S B_R} \quad (6.)$$

ahol: $P_j G_j / B_j$ - a zavaró effektív kisugárzott teljesítmény spektrum sűrűsége (ERPD),

L_j - a zavarjel csillapítása,

G_{RJ} - a radar vevő antenna zavaró irányában vett nyeresége.

Bevezetve a:

$$2C = \frac{P_j G_j G_{Rj} \lambda^2 B_R}{B_j L_j B_R k T_s (4\pi)^2}$$

jelölést, a (6.) egyenlet egyszerűbb alakra hozható:

$$J/N = 2C/R_j^2 \quad (7.)$$

Feltételezve, hogy a zajzavar fehér zaj, a zavarás hatására a vevő zajszintje $N[1+(J/N)]$ értékűre növekszik. A zavar alatti hatótávolság, melyre teljesül P_d és P_{fa} által meghatározott jel-zaj viszony, az (5.) egyenlet felhasználásával.

$$R_s = \frac{R}{\sqrt[4]{1+J/N}} \quad (8.)$$

A radar, a cél és a zavarforrás elhelyezkedése alapján két fő zavarási eljárás különböztethető meg:

a.) Az első a már említett SOJ (fedező zavarás). A zavaró állomás a radarhoz képest, függetlenül a céltávolságtól, R_j távolságon helyezkedik el. A zavarás alatti hatótávolság a (7.) egyenletnek a (8.) képletbe történő behelyettesítésével határozható meg.

$$R_s = \frac{R}{\sqrt[4]{1+2C/R_j^2}} \quad (9.)$$

A célt a radar az antenna főnyalábján keresztül detektálja. A zavar a főnyaláb maximális értékéhez képest alacsonyabb nyereségi szinten jut be a radar vevőjébe. Ennek a szintnek az értéke a főnyaláb azimut szélességétől (Θ_{az}), valamint a zavaró és a cél közötti azimut különbség ($\Delta\Theta_{az}$) nagyságától függ:

$$\Delta G_{dB} = -12 \left(\frac{\Delta \Theta_{az}}{\Theta_{az}} \right)^2 \quad (10.)$$

A (10.) képlet feltételezi, hogy a nyaláb Gauss alakú. Azimut különbség helyett a főnyaláb maximális értékéhez viszonyított melléknyaláb szintet is meg lehet adni, ΔG_R értéke a melléknyaláb szinttől függően negatív is lehet.

b.) A **másik** zavarási eljárás a kíséző (escort) zavarás. A kíséző zavaró ugyanazon a távolságon tartózkodik mint a cél, de $\Delta \Theta_{az}$ különbséggel. Ha $\Delta \Theta_{az} = 0$ az ún. önvédelmi zavarás valósul meg. Kíséző zavaráskor $R_S = R_j$. *Behelyettesítve a (9.) egyenletbe és megoldva.*

$$R_S^2 = \sqrt{C^2 + R^4} - C \quad (11.)$$

$R \ll \sqrt{C}$ esetén a (11.) kifejezés alakja módosul:

$$R_S = \frac{R^2}{\sqrt{2C}} \quad (12.)$$

A (6.), (8.) egyenletekben szereplő mennyiségek egyértelműen meghatározzák a radar zavarás alatti performanciáját. *Ezek a mennyiségek három jól elkülöníthető csoportra oszthatók:*

- zavaró adó paraméterei: P_j, G_j, B_j, L_j
- radar paraméterek: $P_T, G_R, G_{RJ}, B_R, P_C, S/N, G_P, L_T, T_S$
- egyéb paraméter: R_j

2.1.) A zavaró állomás paraméterei

A fedező zavarók nagy teljesítményű, egységnyi kitöltési tényezővel (CW) üzemelő adók. 1500 MHz felső határig lineáris félvezetős erősítőket használnak. A léghűtésű 2000 W teljesítményű berendezéseket kereskedelemben forgalmazzák. Ezer MHz felett általában haladó hullámú erősítőket (CW - TWT) alkalmaznak 1000 W, illetve 200 W teljesít-

ménnyel az L és S sávokban. Az S sáv felett 200 W teljesítmény érték elfogadható, mert egyrészt az itt üzemelő radarok kisebb teljesítményűek, másrészt ebben a frekvencia tartományban könnyebb nagyobb nyereségű antennát konstruálni. A 200 W teljesítményű TWT-ék levegő hűtésűek, kimenő teljesítményük növelésével folyadék hűtést kell alkalmazni, aminek káros kihatása az üzemeltetési megbízhatóságban jelenkezik. Párhuzamosan növekszik az ár is. A teljesítmény növelése mindenképpen kompromisszum kérdése, hisz 200 W helyett, 1 KW-os adó alkalmazása az átégetési távolságot 50%-kal csökkenti. A földi telepítésű zavaró eszközök vonatkozásában a súly, a felvett teljesítmény és a méretek kevésbé meghatározóak. A fix telepítésű radarok ellen keskeny nyalábszélességű antennák használatosak. Általában 1000 MHz felett lineáris polarizációjú parabola antennákat alkalmaznak, megközelítőleg azonos nyílásszélességgel vízszintes és függőleges síkban. A szűkebb iránykarakterisztika szélesség nagyobb antenna nyereséget tesz lehetővé.

A zavaró adó kisugárzott hatásos teljesítménye ($ERP = P_j G_j$) mellett a zavaró jel sáv szélessége határozza meg a radar vevő zajszintjét. Konventionális, fix frekvenciájú, vagy lassú áthangolású radar ellen célzott zavar alkalmazható, a radar vevő sáv szélességénél kétszer-háromszor szélesebb sávú zajzavarral. Ez általában lefedi a beállítási pontatlanságokat. Lényegesen bonyolultabb a frekvencia-agilis radar zavarása, mely impulzusról-impulzusra, vagy MTI üzemmódban, burtsról-burtsre változtatja a frekvenciáját. Könnyen belátható, hogy amíg az 1 MHz sáv szélességű radarral szemben a 3 MHz széles célzott zavar alkalmazható volt, addig a 200 MHz széles RF sávban frekvencia manővert végrehajtó radar ellen, még ha a pillanatnyi sáv szélessége marad is 1 MHz, már nem lesz sikeres. A zavaró jel sáv szélességének is legalább 200 MHz-nek kell lennie. Ebben az esetben a zavar teljesítmény spektrum sűrűsége 18,3 dB-el csökken, ami miatt a radar felderítési távolsága 2,85-szorosára növekszik. Ha az nem engedhető meg, több zavaró beállítással a 200 MHz széles sáv több alsávra bontható. Jelenleg a korszerű L sávú radarok üzemi frekvencia sávja 185 MHz, az S sávúaké 400 MHz. A B radar csak 200 MHz széles sávval rendelkezik, míg az A radaré 400 MHz.

A zavaró jel veszteségét a zavaró adási szakaszának csillapítása, az egyutas atmoszféra csillapítás és a radar vételi szakaszának csillapítása határozza meg.

2.2.) Radar paraméterek

A felderítő radarok elleni legáltalánosabb zavar a radar fő és melléknyalábján keresztül alkalmazott zajzavar. Skolnik bizonyítja (1.), hogy a zajzavarral szembeni eredményes ECCM technika a radar *átlagteljesítménye és antenna hatásos felülete szorzatának* növelése. Katonai radarok vonatkozásában javasolja, hogy a szorzat 20 dB-el haladja meg a szabvány méretezés során kapott értéket. A polgári légi forgalom irányítás által használt radarok és a katonai felderítő radarok közötti különbség az ECCM technikák alkalmazásában jelenkezik erőteljesen. A zajzavarás tulajdonképpen a radar és a zavaró állomás közötti energia harc. A főnyalábon keresztül történő zavaráskor az előny a zavaró adó oldalán van, hisz a radar jele kétszeres csillapítás, míg a zavar egyszeres csillapítás után érkezik a radarvevő bemenetére. A visszhang teljesítményt a radar maximalizálni tudja az átlag teljesítménye, a megvilágítási idő és az antenna nyereség növelésével. Hatása miatt ezt az eljárást *átégetés* üzemmódnak nevezik. Jelenlegi radar parkunk néhány típusa a függőleges síkban elhelyezkedő parciális nyalábok fedésbe hozatalával képes az adott térrészbe kisugárzott energia növelésére. *A megvilágítási idő optimális kezelési képességével igazából csak a fázisvezérelt rácsantennák rendelkeznek, a B radar nem tartozik ezek közé.*

A zavaró előnyét melléknyalábi zavarás során csökkenteni lehet *ultra alacsony melléknyaláb szintű antennák* tervezésével és a melléknyalábi vétel elnyomó technikák alkalmazásával. Napjaink korszerű gyártási technológiájának felhasználásával a fő nyalábhoz képesti 45 dB-nél alacsonyabb melléknyaláb szint érhető el. Ez megköveteli, hogy a rendszer fázishibája 3 fok négyzetes középértéken belül legyen. Közismert, hogy az antenna nyeresége, a főnyaláb szélessége, a melléknyaláb szintje kompromisszum eredménye. A melléknyaláb szintek nincsenek szabványosítva, a különböző antenna nyereségekhez tartozó megközelítő értéket a következő táblázat (5.) tartalmazza.

Antenna megnevezés	Melléknyaláb szint		
	A főnyalábhoz képest (dB)		Izotróp antennához képest (dBi)
	Csúcs	Átlag	Átlag
Normál	> -25	> -30	> -3
Alacsony melléknyaláb	-25 ÷ -35	-35 ÷ -45	-3 ÷ -10
Nagyon alacsony melléknyaláb	-35 ÷ -45	-45 ÷ -55	-10 ÷ -20
Ultra alacsony melléknyaláb	< -45	< -55	< -20

Ha a számított átégetési távolság nem elegendő felderítési célra, szokásos eljárás a *melléknyalábi vétel elnyomása (SLC)*. Általában nagy kitöltési tényezőjű és zajjellegű, a melléknyalábokon vett interferencia zavarok elnyomását teszi lehetővé kiegészítő antenna rendszer és vételi csatorna alkalmazásával. A zavar irányának és teljesítményének becslése alapján a vételi karakterisztikában a zavar forrás irányába minimum értéket hoznak létre. A zavar elnyomás értéke a fő és a kiegészítő antennák jeleinek korreláltságától függ. A jelenlegi megoldások max. 30 dB elnyomási tényezőt produkálnak. Az adaptív eljárás jelentősége a korszerű integrált rácsantennák megjelenésével tovább növekszik. Jelenlegi radar parkunk néhány típusa rendelkezik hagyományos antennákkal kivitelezett szerény képességű, max. 18 dB SLC megoldásokkal.

A célzott zajzavarral szembeni legjobb védekezés arra kényszeríteni a zavarót, hogy *szélessávú üzemre áttérve a teljesítmény spektrum sűrűségét csökkentse*. Szokás megkülönböztetni a frekvencia-agilis, frekvencia-diversity és a pillanatnyi széles sávú radar üzemmódokat. A **frekvencia-agilis** radar impulzusról-impulzusra változtatja a vivő frekvenciáját, véletlenszerűen, vagy meghatározott program szerint, kihasználva a teljes üzemi frekvencia sávját. Doppler jelfeldolgozáskor a frekvencia-agilitás csak kötegről-kötegre valósítható meg.

Frekvencia-diversity esetén a radar parciális nyalábokként eltérő frekvenciát sugároz ki. Elsősorban helyszögben szimultán legyező nyalábokkal dolgozó radaroknál szokásos (a B radar parciális nyalábjai azonos

frekvenciájúak), de megjelentek az ún. azimut-diversity radarok is. Azimutban két átlapolódott, eltérő frekvenciát használó tűnyalábbal dolgoznak. Az A radar ezt alkalmazza. Időnként az egy adó impulzuson belül 2 frekvencia-shift kódolt jelet is frekvencia-diversity-nek nevezik. Előnyük az ECCM alkalmazás mellett, hogy a céltárgy fluktuációs veszteségét csökkentve növelik a detekciós valószínűséget. Az A radar két eltérő frekvenciájú adóimpulzust sugároz ki. Zavarásához mind a két frekvencián üzemelnie kell a zavarónak. **A szórt spektrumú jelalakok** három csoportba sorolhatók:

- lineáris, vagy nem lineáris frekvencia modulált jelek,
- frekvencia-shift kódolt jelek,
- fázis-kód modulált jelek.

Az utóbbi két jelalakot a hazai lokátor park néhány típusa is alkalmazza.

Az impulzus kompressziós eljárást alkalmazó radarok előnyét felderíthetőségi szempontból az **1. pontban** elemeztük, példával illusztráltuk, hogy a csökkentett csúcsteljesítmény miatt később deríthető fel egy konvencionális vagy brutálisan nagy impulzus-teljesítményt alkalmazó radarhoz képest. Könnyen belátható, hogy fedező zavaróval szemben az impulzus kompresszió növeli a felderítési távolságot, hisz nagyobb energiát sugároz ki a célra. A zajzavar a radar vevő illesztett szűrőjének kimenetén kiszélesedik és csúcsteljesítménye a kompresszió arányának megfelelően csillapodik (2.) Felderítő radarok kompresszió aránya 10 és 500 közé tehető, tipikusan alacsony érték 13 (**B radar**). Speciális rendeltetésű radaroknál előfordul a 10^5 érték is.

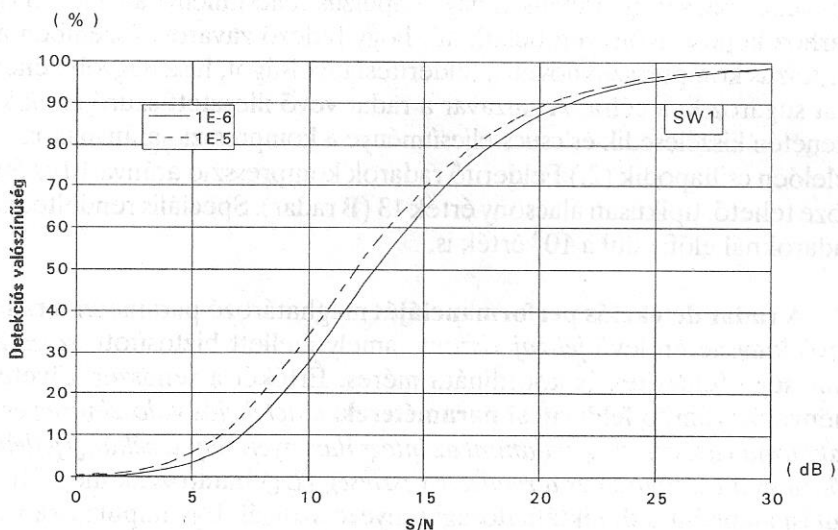
A radar detekciós performanciáját meghatározó paraméter a radar vevő kimenetén lévő *jel-zaj viszony*, amely mellett biztosított az előírt minőségű felderítés és koordináta mérés. Értékét a rendszer követelménynek számító **felderítési paraméterek**: *a detekciós valószínűség és a vaklármá valószínűség, valamint az integrálási nyereség, a céltárgy jellemzői (σ és a cél típusa) és a rendszer veszteség (L_T)* határozzák meg. Kiindulási alapként a detektálhatósági tényező szolgál. Egy impulzusra vett értékét az A radarnál $P_d=0.8$, $P_{fa}=10^{-6}$, SW1 előírásával 18 dB-re specifikálják. Ugyanakkor a B radarnál $P_d=0.75$, $P_{fa}=10^{-6}$, mellett 16.8 dB. A jel/zaj értékének meghatározása a ROC görbék (1.ábra) alapján történt.

Nyilvánvaló, hogy a vett impulzusok integrálása a kívánt jel-zaj viszonyt csökkenti, a rendszer veszteségei viszont a növelés irányába hatnak. Lényeges ismerni a radar rendszer összveszteségét, amely az adási szakasz, a vételi szakasz és a jelprocesszálas veszteségeiből, valamint az atmoszféra csillapításból tevődik össze. Közlésére a gyártókat a tender felhívásban kötelezni kell.

Az A radar gyártója $P_d=0.8$, $P_{fa}=10^{-6}$ paraméterek mellett; $SW=1$ típusú, $\sigma = 1\text{m}^2$ célra egy nehezen értékelhető diagramon kb. 390 km felderítési távolságot ad meg zavarmentes környezetben. A számítások, figyelembe véve a diversity nyereséget is kb. 360 km felderítési távolságot prognosztizálnak.

A B radar gyártója $P_d=0.75$, $P_{fa}=10^{-6}$, $SW1$, $\sigma=1.7\text{m}^2$ értékek esetén 352 km hatótávolságot specifikál zavarmentes környezetben. A két radar hatótávolságának összevetése csak azonos P_d értékek mellett lehetséges.

Azonos rendszer paramétereket és cél radarkeresztmetszetet feltételezve a B radar hatótávolsága csak 286 km, szemben az A radar 360 km-es performanciájával.



1. sz. ábra Detekciós görbék

A radarvevő bemenetén kialakuló jel-zaj viszonyt befolyásolja, a vevő bemenetére átszámított zajszint is. A vevő bemenő zajszintjét a bemeneti zajhőmérséklettel szokás jellemezni. *Blake a rendszer zajhőmérsékletet három összetevőre osztja:*

T_a - az antenna által összegyűjtött zaj,

T_r - az antennát a vevővel összekötő rádiófrekvenciás elemek zajhőmérséklete,

T_e - a vevő saját zajának hőmérséklete.

A vevő saját zaja teszi ki a meghatározó részt, nagyságát a **zajtényező** jellemzi. A zavaró által kisugárzott zajzavar tulajdonképpen a rendszer zajhőmérsékletét növeli $T_s + T_j$ értékre. Zavarmentes környezetben, elsősorban polgári alkalmazású radaroknál, követelmény az alacsony zajtényező. A kis zajú berendezés érzékenyebb a zavarásra és általában kisebb dinamika tartományt biztosít, ami nem kívánatos ECM környezetben vagy kis visszaverő felületű célok nagy intenzitású háttér visszaverődések melletti felderítéskor. Mindenesetre a T_s értékének és összetevőinek megadása a tender ajánlat benyújtásakor elvárható minimum.

2.3.) Egyéb paraméterek

A radar és a zavaró állomás közti távolságot (R_j) alapvetően az határozza meg, hogy a radar felderítési távolságát (R_s) milyen értéken kívánják korlátozni. Gyakorlatilag R_j értéke 40-100 km közé választható földi telepítésű zavaró alkalmazásakor. Közelebb telepíteni veszélyes, távolabbról pedig csökken a zavarás performanciája. A zavaró repülőgépeket 100 km-nél nagyobb távolságon őrzékeztetik.

A zavarással oltalmazandó repülőgépet a radar a főnyalábjával detektálja. Ebben a pillanatban a zavar a radar ismeretlen, állandóan változó szintű melléknyalábján keresztül injektálódik be a radar vevőbe. A pozitív és negatív értékek között változó melléknyaláb nyereség (dBi) átlag értékét célszerű 0 dB-re választani. Ha az így kapott R_s érték elfogadhatatlanul nagy, akkor a repülőgép repülési irányát kell úgy megválasztani, hogy az egybeessen a radart a zavaró állomással összekötő egyenessel. Ebben az esetben, főnyalábon keresztüli zavarás valósul meg. A következő legjobb megoldás, ha a zavaró állomás az első melléknyalábon keresztül tudja zavarni a radart, amikor az főnyalábjával a célt sugározza

be. Mindehhez természetesen előzetesen ismerni kell a radar antenna karakterisztikáját.

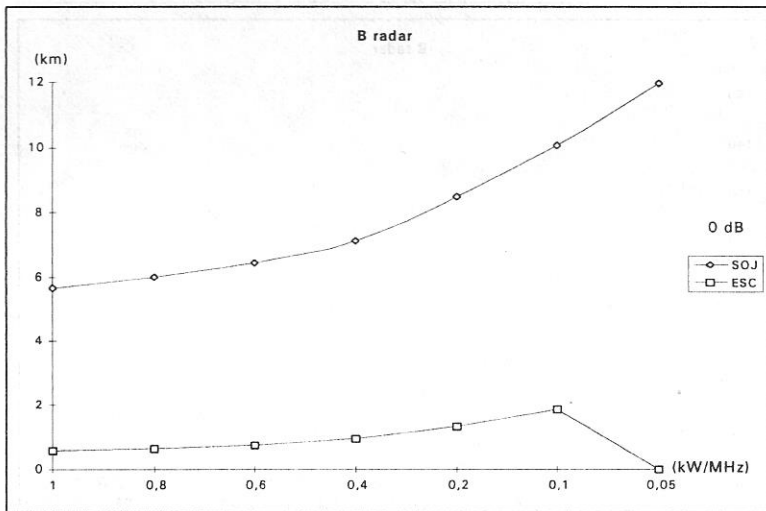
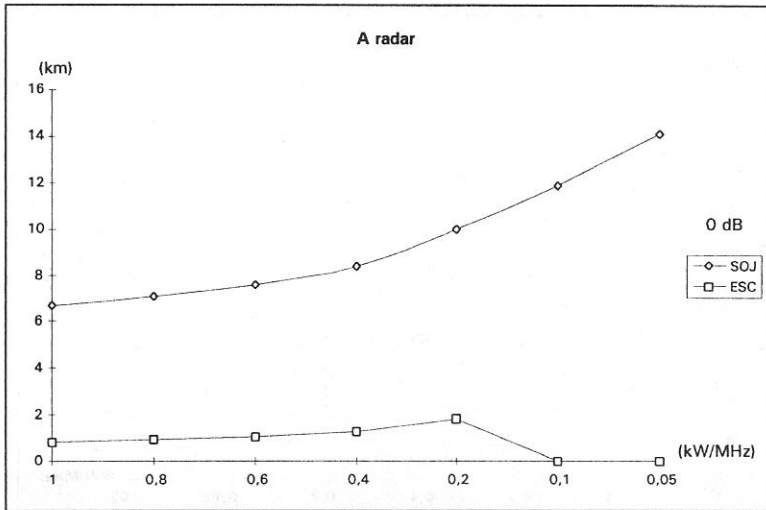
3. Alkalmazási példák

A radar zavarás összetett probléma, megtervezése a radar harcászati - műszaki adatainak alapos elemzését követeli meg. Ezek egyrésze felderítő-vevő segítségével megmérhető. Néhány adat azonban csak becsülhető, elsősorban a jelprocesszálassal kapcsolatos paraméterek. Különösen nehéz megbecsülni az ECCM képességeket. Általánosságban kijelenthető, hogy a radar zavar alatti viselkedését csak a gyártója és az üzemeltetője tudja pontosan körvonalazni.

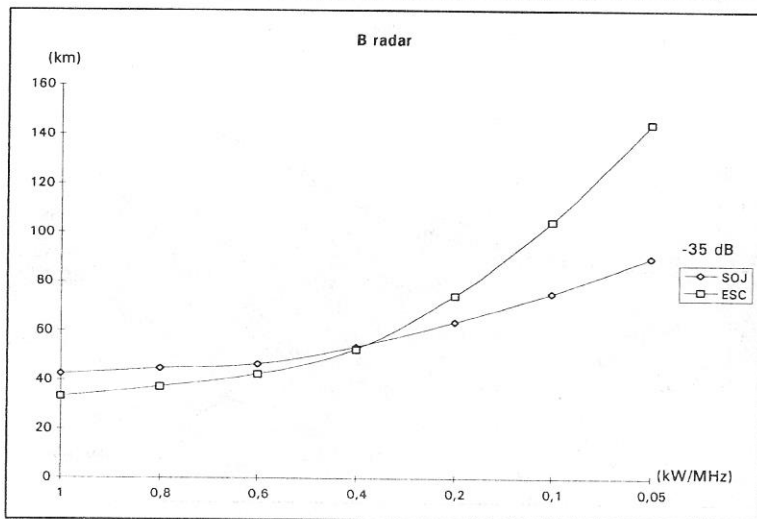
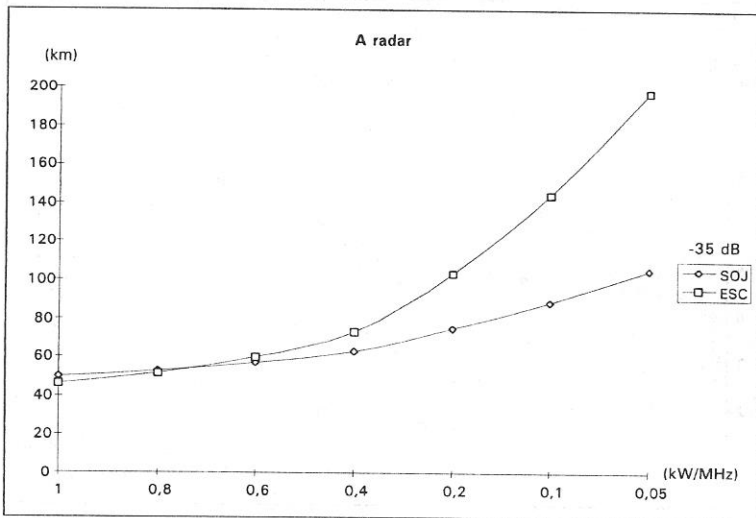
Az A és B radarról rendelkezésre álló információk alapján, kiindulási alapként elfogadva a **2. pontban** korrigált zavarmentes környezetbeni hatótávolságokat, **a két radar zavar alatti performanciáját a következő területeken célszerű összevetni:**

3.1.) Zavarás főnyalábban és az első melléknyalábban keresztül

A feltételezés szerint a zavaró adó a főnyaláb maximális értékénél injektálja a radar vevőjébe a zajzavart. A kísérő zavarás (ESC) ebben az esetben önvédelmi zavarás, hisz a célgép és a kísérőgép között sem távolságban, sem azimutban nincs szeparáció. Fedező zavarásnál szabványként elfogadott a zavaró és a radar közötti 100 km-es távolság. Mind a főnyaláb, mind az első melléknyaláb zavarásnak inkább elméleti, mint gyakorlati jelentősége van, hiszen az önvédelmi zavarást felderítő radarok ellen ritkán alkalmazzák, a fedező zavaráshoz szükséges cél repülési útvonal(ak) pedig nem minden esetben biztosítható(k). A *2. ábra* a főnyalábi, a *3. ábra* az első melléknyalábi zavarás alatti felderítési távolságokat ábrázolja a zavaró ERPD függvényében. Mindkét radarnál a főnyalábhöz képest -35 dB csúcs melléknyalábi szint lett figyelembevéve. A *2. ábráról* látható, hogy a főnyalábi zavarás igen kedvező eredményt biztosít a zavaró szempontjából.



2.sz. ábra
Zavarás főnyalábon keresztül



3. sz. ábra
Zavarás az első melléknyalában keresztül

A 100W/MHz spektrumsűrűségű önvédelmi zavarást alkalmazó 1m^2 visszaverő felületű célt a **B** radar 2 km távolságon deríti, ugyanezt az átégetési távolságot az **A** radar 200 W/MHz spektrumsűrűség mellett szolgáltatja. Szokás a radar aktív zavarás alatti hatótávolságát általában átégetési távolságnak nevezni, a szűkebb értelemben vett átégetési távolságot csak az önvédelmi zavarásnál definiálják. A 100 km távolságon lévő, 50 W/MHz zavar teljesítmény spektrum sűrűségű fedező zavarás hatására az 1m^2 hatásos visszaverő felületű célt az **A** radar 14 km, **B** radar 12 km távolságon deríti fel.

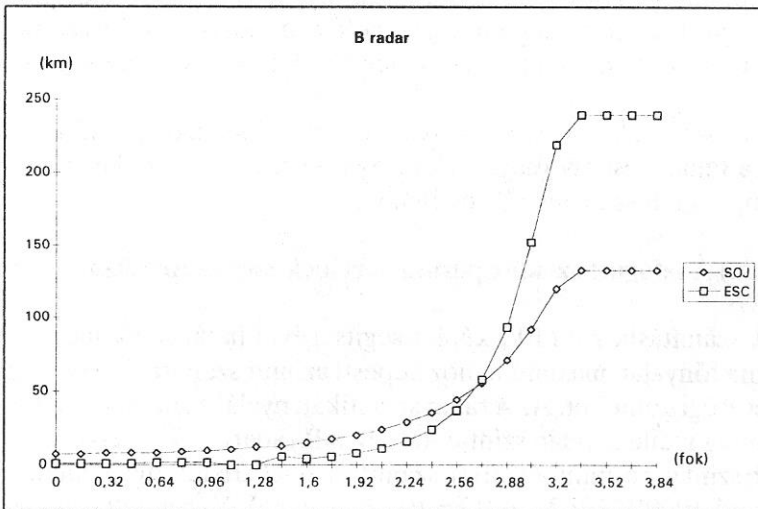
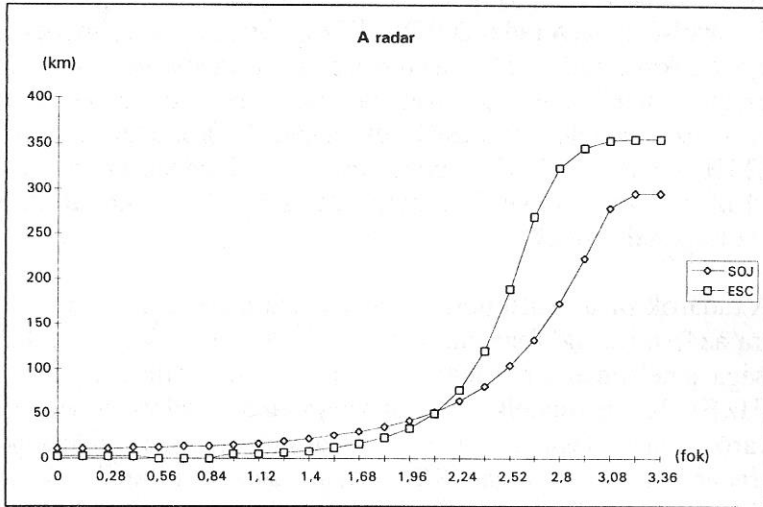
A radarok zavar alatti performanciájának mérésére és összehasonlítására az " α távolság" fogalmát használják. A radarnak az a felderítési távolsága, amelyen az 1m^2 radar keresztmetszetű célt detektálja, ha az 1 W/MHz ERPD-vel rendelkező zavaró ugyanazon a távolságon található. A zavaró jel sávszélessége nagyobb a radar pillanatnyi sávszélességénél. Az **A** radar 26.1 km, a **B** radar 18.7 km " α távolsággal" rendelkezik. Tulajdonképpen az " α távolság" a két radar összehasonlítását eldöntötte az **A** radar javára, azonban nem teszi lehetővé a radar-zavaró viszonylat dinamikus vizsgálatát, nem mutatja meg a radar ECCM képességeit.

Az első melléknyalábban keresztül történő fedező és kísérő zavarás estén a felderítési távolságok (3.ábra) rendre: - az **A** radarnál : 106 és 198km, - a **B** radarnál : 89 és 144km.

3.2.) A lefogott szektor paramétereinek meghatározása

A számításhoz a (10.) képlet segítségével határoztuk meg a radar antenna főnyaláb maximumához képesti azimut szeparációnak megfelelő nyereségi szinteket. Az **A** radar specifikált nyalábszélessége azimutban 1.4° , átlag melléknyaláb szintje -60 dB, a **B** radaré 1.6° , illetve a melléknyaláb szint jobb, mint -48 dB (a számításnál -50 dB lett figyelembe véve). A zavaró 1000W ERP-vel ($G_j=10$ dB $P_j=100$ W) rendelkezik, fedező zavaráskor távolsága a radartól 100 km. Az **A** radar pillanatnyi sávszélessége 3.5 MHz, a **2.1. pontban** elmondottak szerinti zavaró sávszélességet beállítva, a kisugárzott ERPD=1000 W/7 MHz. A **B** radarra vonatkozóan 1000 W/3.2 MHz.

Az azimut szeparáció függvényében a radarok zavar alatti hatótávolságát a 4.ábra szemlélteti.



4. sz. ábra
A lefogott szektor szélessége

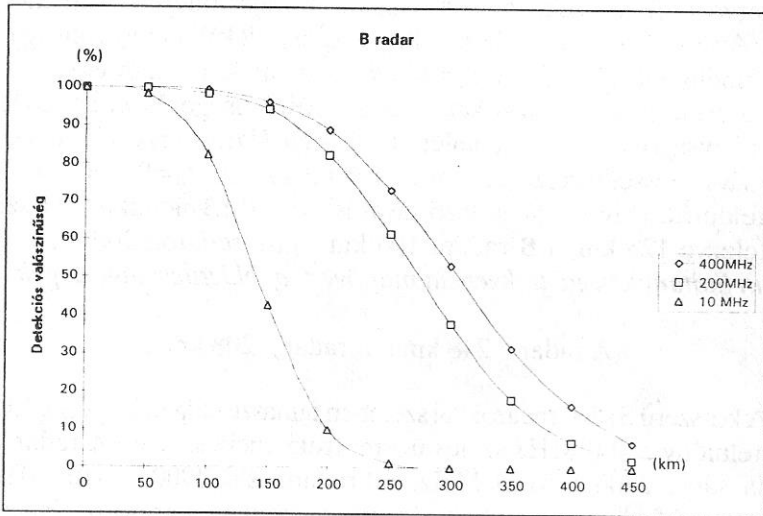
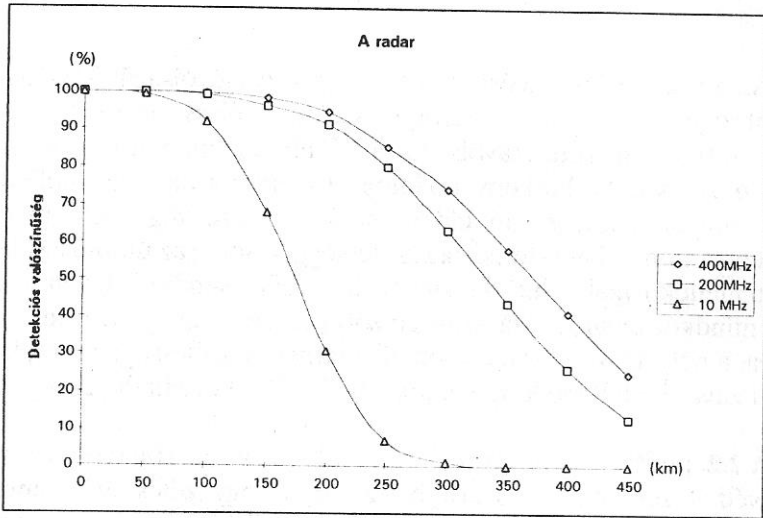
A B radar a 240 km nagyságú maximális zavar alatti (ESC) felderítési távolságát 3.36^0 azimut szeperációnál éri el. A lefogott szektor szélessége 6.72^0 .

Az A radar a 354 km értékű ESC felderítési távolságát 3.08^0 azimut különbségnél szolgáltatja, a lefogott szektor szélessége 6.16^0 . Fedező zavar esetén az átégetési távolságok az előbbi sorrendben 133 km, illetve 295 km. Az A radar keskenyebb lefogott szektor szélessége mellett feltűnő a lényegesen nagyobb felderítési távolsága is. Míg az előbbi a keskenyebb antenna karakterisztika szélességgel, addig az utóbbi az alacsonyabb melléknyaláb szinttel magyarázható. Figyelembe kell venni azt is, hogy mindkét zavarási eljárásnál célzott (keskeny sávú) zavar lett alkalmazva, amely az A radar nagyobb pillanatnyi sáv szélessége miatt, korlátozott zavaró ERP mellett, alacsonyabb ERPD-t eredményez.

A 2.2. pontban említettük, hogy a célzott zajzavarral szemben a legjobb védekezés, arra kényszeríteni a zavarót, hogy szélessávú üzemmódra áttérve, csökkentse a hatásos kisugárzott teljesítmény spektrum sűrűségét. Az S sávban maximális értéknek számító 8 kW hatásos kisugárzott teljesítményből ($G_j = 13$ dB, $P_j = 400$ W) kiindulva, keskeny és szélessávú zavarás eseteire a különböző detekciós valószínűségekhez tartozó felderítési távolságot az 5. ábra szemlélteti $P_{fa} = 10^{-6}$ konstans érték mellett. 10 MHz sáv szélességű célzott zavar esetén az A radar $P_d = 0.8$ értékhez tartozó felderítési távolsága, fedező zavaráskor, -50 dB melléknyaláb szintet feltételezve 125 km; a B radaré 106 km. *Ha a radarok 200 MHz széles sávban hajtanak végre frekvencia manővert, a felderítési távolságok:*

A radar 248 km, B radar 208 km.

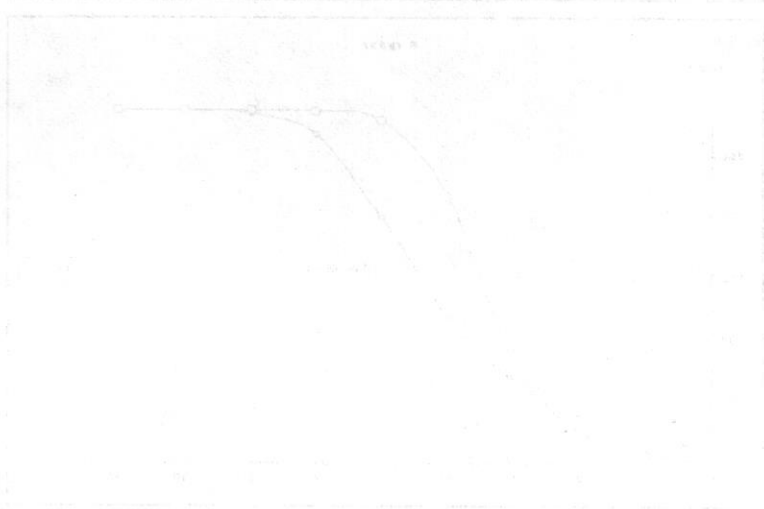
A korszerű S sávú radarokkal szemben támasztott igen lényeges ECCM követelmény a 400 MHz széles üzemi frekvencia sáv. Az A radar frekvencia sávja $2700 \div 3100$ MHz, a B radaré csak $2900 \div 3100$ MHz. A teljes üzemi frekvencia sávban történő frekvencia manőverezéshez tartozó felderítési távolság: A radar 280 km, B radar 208 km. Az 5. ábrát tartalmazza a B radar elképzelt 400 MHz széles, manőver sávjához tartozó felderítési távolságot is.

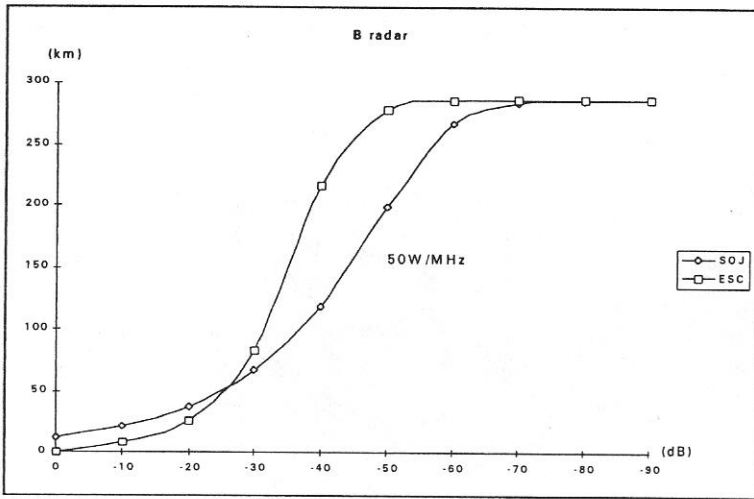
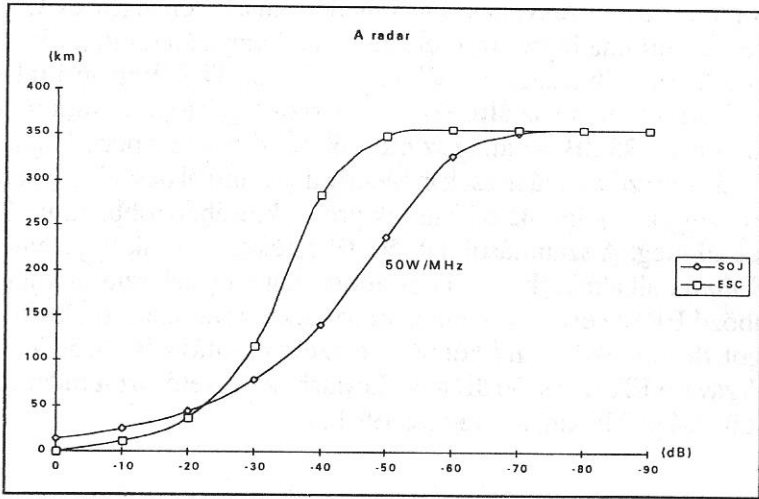


5. sz. ábra
A keskeny és szélessávú zavarás hatása

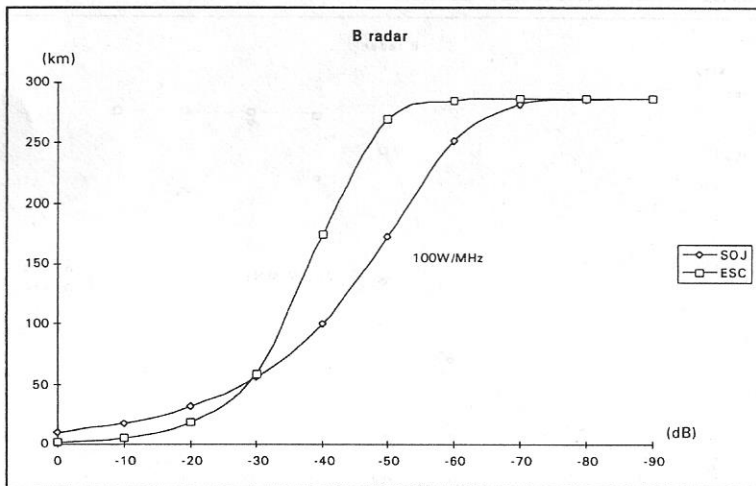
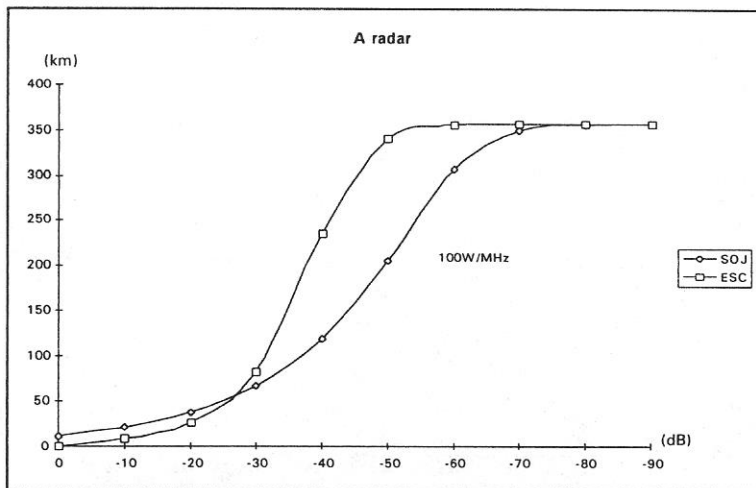
3.3.) Az átégetési távolság meghatározása

A radar üzemi frekvencia sávja melletti másik lényeges ECCM paraméter az antenna iránykarakterisztika melléknyaláb szintjének alakulása. A 2.2. pont táblázatos formában tartalmazza D.K. Barton által megfogalmazott antenna osztályozást. Az A radar gyártója a csúcs melléknyaláb szintet -35 dB, az átlag szintet -60 dB értéknél specifikálja. A B radar gyártója szűkszavúan csak melléknyaláb szintről beszél; egyik prospektusában jobb, mint -45 dB; másik prospektusában jobb, mint -48 dB értéket ad meg. A számításoknál -50 dB értéket vettünk figyelembe. A 6., 7., 8. ábrák alkalmasak arra, hogy adott melléknyaláb szintet kijelölve, különböző ERPĐ értékekre meghatározzuk a zavar alatti felderítési távolságot, de lehetővé teszi a két radar összehasonlítását is. Pl: 50 W/MHz fedező zavaró ERPĐ és -50 dB melléknyaláb szint esetén az A radar felderítési távolsága 238 km, a B radaré 199 km.

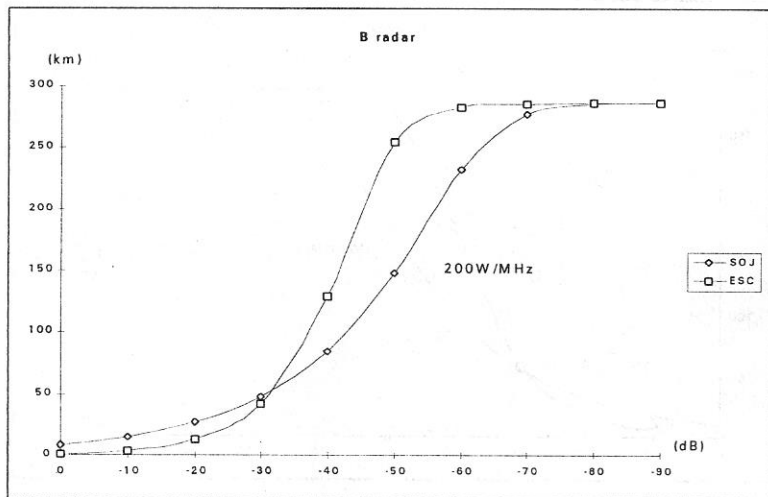
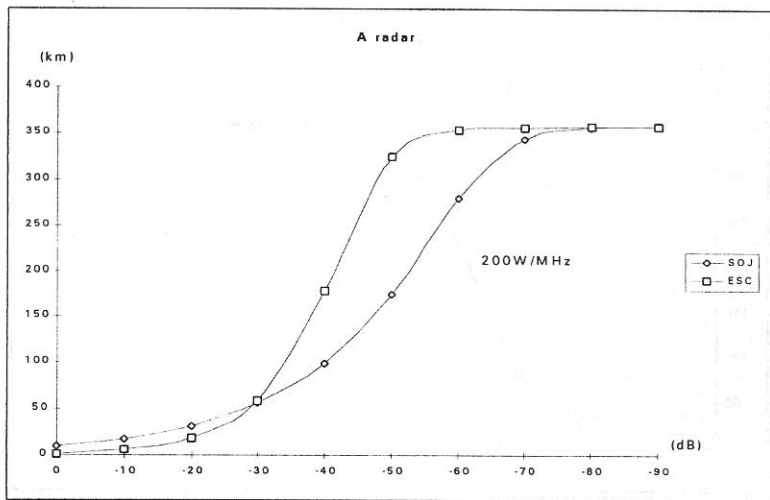




6. sz. ábra
 A felderítési távolság melléknyaláb szint függése
 50 W/MHz ERPD esetén



7. sz. ábra
 A felderítési távolság melléknyaláb szint függése
 100 W/MHz ERPD esetén



8. sz. ábra
 A felderítési távolság melléknyaláb szint függése
 200 W/MHz ERPD esetén

3.4.) Néhány szabványosított fogalom

- *Standard cél:*

radar keresztmetszet : 1m^2

fluktuációs modell : Swerling I.

max. sebesség : 3.5 M

- *Zavarmentes környezetbeni performancia :*

A szabvány célt a radar a $P_d=0.8$ és $P_{fa}=10^{-6}$ paraméterek által meghatározott felderítési zónájának megfelelő távolságon deríti.

- *Standard zavaró :*

A radartól 100 km távolságra települt, széles sávú, fehérzajt kisugárzó zavaró, amely a radar pillanatnyi sávszélességéhez illesztett 50 W/MHz hatásos kisugárzott teljesítmény spektrummal zavar. Polarizációja megegyezik a radar polarizációjával.

- *Aktív ECM viszonyok közötti performancia :*

A radar a szabvány célt, a standard zavaró által a radar melléknyalábján keresztül létrehozott zavar viszonyok és a $P_d=0.8$, $P_{fa}=10^{-5}$ paraméterek által meghatározott csökkentett felderítési zónának megfelelő távolságon deríti fel. A $P_d=0.8$, $P_{fa}=10^{-5}$ rendszer paraméterek 17.2 dB jel-zaj viszonyt határoznak meg (1. ábra).

A zavarási probléma másik oldala a radar beszerzésekor jelentkezik. Meg kell tudni határozni, hogy zavar viszonyok közepette milyen teljesítőképesség várható el a radartól. Természetesen ez a radarral szemben támasztott követelmények közül csak egy részterület. A beszerzést, vagy típus kiválasztást mindenkor részletes harcászati-műszaki elemzésnek kell megelőznie. Hogy ebben mennyi a harcászati és mennyi a műszaki oldal, azt alapvetően a beszerzendő eszköz bonyolultsága dönti el. Az eddigi összehasonlító, kiválasztó tevékenység igen nagy hiányosságának tekinthető, hogy éppen az érdemi műszaki analízist mellőzte.

Sajnos hadseregünkben hiányzik az a fórum, ahol a különböző nézeteket ütköztetni lehetne, de talán a legnagyobb probléma, hogy a műszaki

elemzéseket elvégezni hivatott állomány- véleménye alárendelt szerepet játszik. Talán az új közbeszerzési törvény végrehajtása legalább e téren változást fog hozni.

Felhasznált irodalom:

- 1.) *M.I. Skolnik*: Radar handbook. 1990. MC Graw-Hill.
- 2.) *B.L. Smith*: The Microwave Engineering Handbook. Vol. 3. 1993. Chapman & Hall.
- 3.) *Я.Д. Шурман, В.Н. Манжос*: Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. 1981. Изд. "Радио и связь."
- 4.) *Csikesz Ferenc*: Radar EW. 1990. MH.EI.
- 5.) *D.K. Barton*: Modern radar System Analysis. 1988. Artech House.