

RADAROK ELEKTRONIKAI VÉDELME I. (ELMÉLETI MEGKÖZELÍTÉS)

ELECTRONIC PROTECTION OF RADARS (THEORETICAL APPROACH)

SZÖKRÉNY Zoltán

(ORCID ID: 0000-0001-7411-5546)

szokreny.zoltan@uni-nke.hu

Absztrakt

A rádióelektronikai zavarás elleni védelem napjaink kiemelt kutatási területe. A radarok üzemszerű működésük közben a természetes zavarforrásokon kívül harci körülmények közt szándékos radar performancia csökkentő hatásoknak vannak kitéve. A külső zajok, zavarok a hatékony felderítést megnehezítik vagy akár lehetetlenné is teszik. A cikk áttekinti a radarokra ható elektromágneses zavarokat és egy lehetséges szempontból osztályozza őket. Az alapok mellett tisztázza az elektronikai ellentevékenység elleni tevékenység (ECCM) fogalmát és lehetőségeit. A pontos gyakorlati megoldások a cikk második részében kerülnek ismertetésre. A radaregyenlet (Blake chart) számításaival elemzi a különböző teljesítményű zavaró adók különböző távolságon történő zavarás hatását.

Kulcsszavak: radar maximális hatótávolság, Elektronikai ellentevékenység elleni tevékenység (ECCM), zavarás, Blake chart

Abstract

The protection against radio electronic jamming is a major field of research today one of the elements of the electronic warfare. The radar performances are reduced by the effects of jamming among combat conditions, and natural sources of interference in normal operation. The external noises and interferences make the effective detection more difficult or even impossible. The article reviews the radar electromagnetic interferences and classifies them as a possible point of view. It clarifies the definition of Electronic Counter - Countermeasures (ECCM) and capabilities. The exact practical solutions are presented in the second part of the article. The radar equation (Blake chart) calculations analyzes the interferences effects at different distances of several jamming power of transmitters.

Keywords: radar maximal range. Electronic Counter Counter Measures (ECCM), jamming, Blake chart

A kézirat benyújtásának dátuma (Date of the submission): 2017.06.29.
A kézirat elfogadásának dátuma (Date of the acceptance): 2017.11.12.

BEVEZETÉS

A rádiolokátorok nagy érzékenységgű elektronikus mérőberendezések, amelyek eredményességét a szándékos, vagy környezeti zavarjelek jelentősen befolyásolhatják. Mint minden elektronikai eszközt, ezeket is védeni kell a zavaró, teljesítményüket negatívan befolyásoló hatásoktól. Az elektronikai hadviselés (EW¹) a második világháború óta folyamatos fejlődésen ment keresztül, és mára már meghatározó tényezője a modern hadviselésnek.

A jelenlegi katonai doktrínánk szerint nincs közvetlen veszély, ami Európát fenyegetné, azonban a légtérfelügyelet magas szintű biztosítása kockázatos és költséges feladat. Bármikor felléphet olyan helyzet, amikor a valós idejű információszerzés nélkülözhetetlen, ugyanakkor ez kívülről kis költséggel bénítható. Lokátoraink 1999. március 12-i csatlakozásunk óta a NATO integrált légvédelmi rendszerének a NATINADS² részei és az óta folyamatos készülségi szolgálatot látnak el. A békeidőben is harc feladatot ellátó berendezéseinknél kiemelten fontos, hogy a céltárgy detektálás, útvonalba fogás és az azonosított légihelyzet-kép (RAP³) előállításához szükséges radar információk - egy szándékos zavarás vagy az állandóan jelen lévő természetes interferenciák ellenére is - egyértelműen rendelkezésre álljanak a felhasználók számára.

Írásomban a radarok elleni szándékos elektronikai zavarásokkal foglalkozom. Tisztázom az alapfogalmakat, majd számításokkal igazolom a zavaró eszközök hatékonyságát. A radaregységek alapján bizonyítom hatásosságukat és a radarokban az ellenük használható módszerek szükségességét.

A RADAROK ELEKTROMÁGNESES ZAVAROK ELLENI VÉDELME NEK ELMÉLETI ALAPJAI

Alapfogalmak

Elektromágneses zavar (EMI⁴) nevezünk bármely olyan elektromágneses jelenséget, amely ronthatja a berendezések működését. Az EMI lehet elektromágneses zaj, nem kívánt jel, vagy magában a továbbító közegben bekövetkező változás. [1]

Az elektronikai hadviselés (EW) fogalma a MH Összhaderőnemi Doktrína definíciója alapján: „Az elektronikai hadviselés: a műveleti (hadműveleti, harc-) támogatás fajtája. Azon tevékenységek összessége, amelyek az elektromágneses spektrum ellenség által történő felhasználásának meghatározására, felderítésére, csökkentésére vagy megakadályozására, illetve az elektromágneses energia és az irányított energia felhasználására, az elektromágneses spektrum saját célú felhasználására, valamint az ellenség vezetési és irányítási rendszerei támadásának támogatására, a saját csapatok védelmére irányulnak.” [2]

Az elektronikai hadviselés három egymást kiegészítő, valamint egymást részben átfedő területre osztható fel:

- elektronikus hadviselést támogató tevékenység (ESM⁵): „Az elektronikai támogatás az elektronikai hadviselés azon területe, amely az ellenség helyzetére vonatkozó tájékozottság és a fenyegetés késedelem nélküli felismerése céljából magában

¹ Electronic Warfare - elektronikai hadviselés (EHV)

² NATINADS - NATO Integrated Air Defense System

³ RAP - Recognized Air Picture - azonosított légihelyzet-kép

⁴ Electromagnetic Interference – elektromágneses zavar (interferencia)

⁵ Electronic Support Measures - elektronikus hadviselést támogató tevékenység

foglalja az elektromágneses kisugárzások kutatását, felfedését és azonosítását, valamint a kisugárzók helyének meghatározását.” [3] Ez a tevékenység az elektromágneses jelek kutatásán, elfogásán, azok térbeli meghatározásán alapul.

- elektronikai ellentevékenység (ECM⁶): „Az elektronikai ellentevékenység az elektronikai hadviselés azon területe, amely magába foglalja az elektromágneses és egyéb irányított energiák kisugárzását abból a célból, hogy megakadályozza vagy csökkentse az elektromágneses spektrum ellenség által való hatékony használatát.” [3]
- elektronikai védelem (EPM⁷): „Az elektronikai hadviselés azon területe, amely biztosítja az elektromágneses spektrum saját részről történő hatékony használatát az ellenség elektronikai támogató és ellentevékenysége, valamint a saját csapatok által okozott nem szándékos (kölsönös) rádiózavarok előfordulása ellenére.” [4] Az elektronikai felderítéssel, elektronikai ellentevékenységgel illetve az ellenfél vezetési és fegyverirányítási eszközeinek megbontására irányuló minden más tevékenységgel összhangban kell végezni. A radartechnikában az ezen a területet magába foglaló módszereket az elektronikai ellentevékenység elleni tevékenységnek (ECCM⁸) nevezzük.

„Elektromágneses kompatibilitásnak (EMC⁹) nevezzük egy készülék, berendezés vagy rendszer azon képességét, hogy elektromágneses környezetben kielégítően tud működni, és ugyanakkor nem hoz létre elfogadhatatlan mértékű elektromágneses zavar jelet.” [5]

Zavarstabilitásnak nevezzük a lokátor azon tulajdonságát és képességét, amely kifejezi, hogy az adott rendszer az elektronikai zavarás viszonyai között képes-e funkcionális feladatainak végrehajtására.

Zavarvédettségnek (EMS¹⁰) nevezzük valamely elektronikus berendezés tűrőképességét a nemkívánatos elektromágneses energia hatásával szemben. Egy adott áramkör, egység vagy rendszer érzékenységi szintjét az a zavarkörnyezet határozza meg, amelyben az még megbízhatóan működni képes. Minél jobb a rendszeren belül a zavarvédettség, annál nagyobb a zavarstabilitás. [6]

A zavarok osztályozása

A zavarás, zavartatás szempontjából legfontosabb a jel-zaj+interferencia viszony értékelése. Ezt a radaregyenletből kiindulva tesszük meg, melyet három fő részre osztunk:

$$\frac{S_R(t)}{N_R} = \frac{P_{\text{átl}} t_o G_{tr} F_{tr}^2}{(4\pi)L_t} \frac{\sigma F_P^2}{(4\pi)} \frac{\lambda^2 G_r F_r^2}{(4\pi)kT_s B_r L_\alpha R_{\text{max}}^4} \quad (1)$$

ahol :

- a radar adási szakaszára jellemző tényezők:

⁶ Electronic Countermeasures - elektronikai ellentevékenység

⁷ Electronic Protective Measures - elektronikai védelem

⁸ Electronic Counter-Countermeasures - elektronikai ellentevékenység elleni tevékenység

⁹ Electromagnetic Compatibility - elektromágneses kompatibilitás

¹⁰ Electromagnetic Susceptibility - elektromágneses érzékenység

- $P_{\text{átl}}$ – az adó átlagteljesítménye, $P_{\text{átl}} = P_t \tau f_{\text{PRF}}$ ahol P_t az adóimpulzus teljesítménye, és τ az adóimpulzus időtartama, $f_{\text{PRF}} = n/t_0$
- t_0 – a céltárgy besugárzásának ideje „n” impulzus által,
- G_{tr} – az adóantenna nyeresége,
- F_{tr} – a hullámterjedési tényező az adótól a céltárgyig,
- L_t – adási veszteség.
- a céltárgyra jellemző tényezők:
 - σ – a céltárgy hatásos visszaverő felülete,
 - F_p – a polarizációs tényező az adójel polarizáció változása a céltárgy felületén.
- a radar vételi szakaszára jellemző tényezők:
 - λ – a radar üzemi hullámhossza,
 - G_r – a vevőantenna nyeresége,
 - F_r – a hullámterjedési tényező a céltárgytól a vevő bemenetéig,
 - k – a Boltzmann-állandó,
 - T_s – a vevő bemenetére redukált rendszer zajhőmérséklet,
 - B_r – a radar vevőrendszereinek pillanatnyi sáv szélessége (az adójelre illesztett impulzus minimális veszteséggel való vételére optimalizált sáv szélesség),
 - L_α – atmoszféra csillapítása,
 - R_{max} – a maximális hatótávolság (egyenestáv esetén).

Az egyenletbe csoportosítva vannak azok a tényezők, amelyek a feladat elméleti áttekintéséhez szükségesek. A radarmérnök feladata a jel-zaj+interferencia viszony növelése. Ezzel szemben a radart zavarni szándékozó szakemberek jel-zaj+interferencia viszony csökkentésére törekednek, illetve ha ezt nem tudják elérni, olyan hamis céljeleket imitálnak, melynek az elvárt céljel-zaj viszonya meghaladja a céltárgyra jellemző értékeket. Ennek elérésére több módszer is ismert. Evidensnek tűnik a visszavert jelek szintjének csökkentése, például a lopakodó technológiák alkalmazása, vagy a vevő zajszíntjének a növelése külső zavarás által. Ez utóbbi vizsgálata a cikk tárgya.

A zavarás részletesebb matematikai analízise

A szándékos, aktív zavarás viszonyainak részletesebb elemzéséhez az (1) egyenletet átírjuk az alábbi, a maximális szabadtéri hatótávolságot kifejező alakra [7]:

$$R_{\text{max}}^4 = \frac{P_{\text{átl}} t_0 G_t G_r \lambda^2 \sigma F^4}{(4\pi)^3 (kT_s + qJ_0) D_x(n) L_t L_\alpha} \quad (2)$$

ahol :

- q – a zaj minőségi faktora,
- $J_0 = \frac{P_j G_j G_r \lambda^2 F_j^2}{(4\pi)^2 R_j^2 B_j L_{\alpha j}}$ a zavarás spektrumsűrűsége; (3)

ahol:

- P_j – a zavaró adó teljesítménye,
- G_j – a zavaró antenna nyeresége,
- G_r – a radarantenna nyeresége,

- F_j – a zavaró jel karakterisztika terjedési tényezője,
 - R_j – a zavaró hatótávolsága,
 - B_j – a zavaró adó sávszélessége,
 - L_{aj} – a szakaszcsillapítás a zavaradótól a radarig.
- $D_x(n)$ - detektálási tényező, ahol 'n' a céltárgyról visszaverődött és a radar által integrált impulzusok száma, (n=1 az adott céltárgyra jellemző *egy impulzushoz tartozó jel-zaj viszony*, Swerling típusok)

A radarokat zavaró eszközök általában légi hordozókon: felderítő és zavaró repülőgépeken illetve helikoptereken találhatók, melyek őrzáratozási légtérből tevékenykednek. Ma már az új repülőgépek fejlesztésekor egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek az önálló elektronikai hadviselési képességek beépítésére. Ezek szinte kizárólag automatikus működtetésű rendszerek. A fedélzeti önvédelmi rendszerekben általában rádiolokátorokat zavaró berendezések vannak, míg a kommunikációs zavarók hiányoznak. Kiemelt gyorsasággal fejlődnek a pilóta nélküli repülőgépek, amelyek különböző kategóriás akár hadműveleti és harcászati szinten is alkalmasak a kisméretű, korszerű zavaró berendezések hordozására.

Őrzáratozási légtérből végrehajtott zavarás (SOJ11) esetén a 2. számú egyenlet egyszerűsített formája: [8]

$$R_{\max}^4 = \frac{P_{\text{átl}} t_o G_t G_r \sigma F^4}{(4\pi)^3 k(T_s + T_j) D_x(n) L_t L_\alpha} \quad (4)$$

ahol:

$$T_j = \frac{J_0}{k} = \frac{P_j G_j G_r \lambda^2 F_j^2}{(4\pi)^2 R_j^2 B_j L_{aj}} \quad (5)$$

A környezeti, topológiai körülményeket és a zavaró teljesítmény jellemzőit kifejező változók nagyban befolyásolják a radar maximális hatótávolságát, melyet a következőkben Blake chart számítások segítségével szemléltetünk.

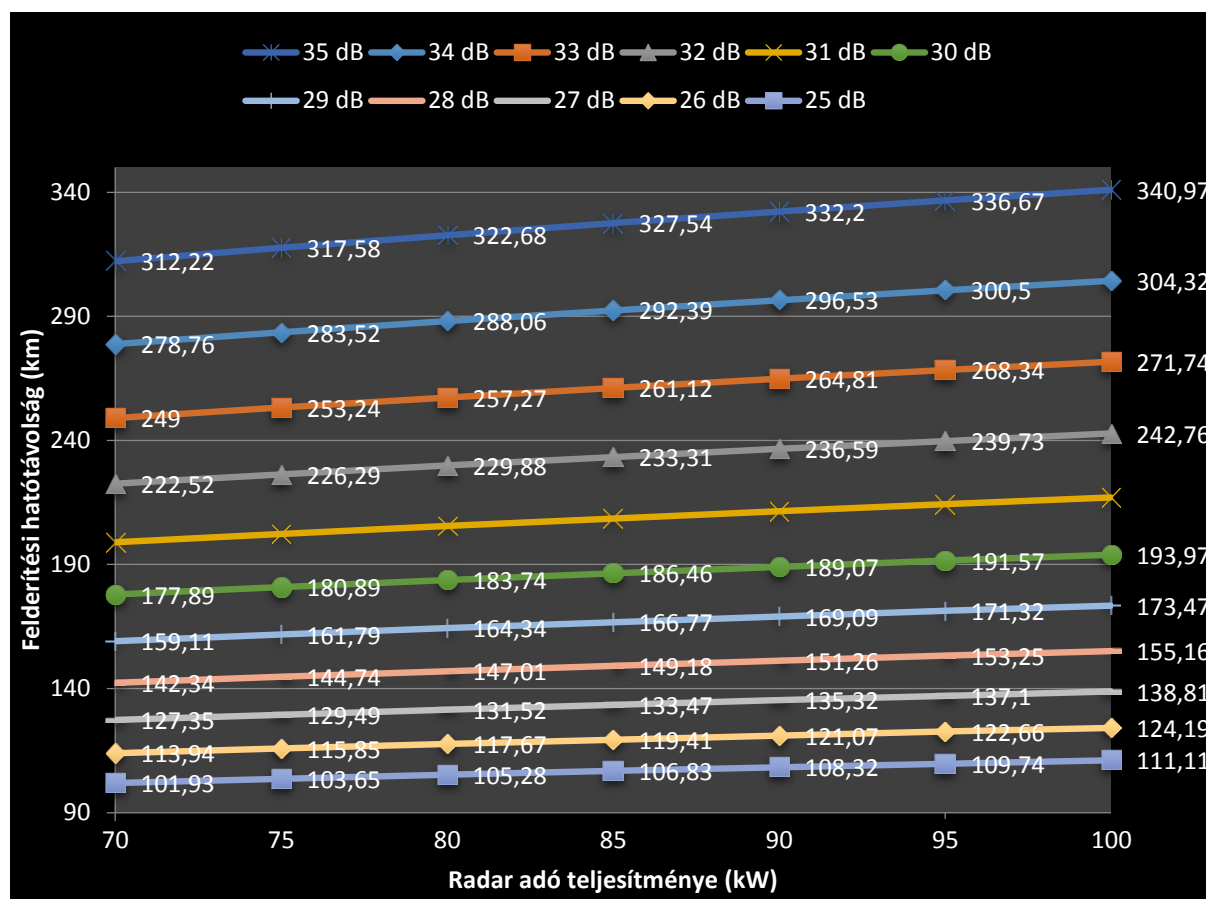
Kísérő zavarás (EJ¹²) esetén a saját vagy a kíséretében tartózkodó légi járművek tevékenységének a fedése a cél a fedélzetén lévő zavaró eszközökkel.

Az (1) egyenlet első tagja a radar adótraktusának jellemzői. Ezek közül a hullámterjedési tényezővel (az adótól a céltárgyig) és nagy adási veszteséggel optimálisan megválasztott konstrukció esetén a későbbiekben egy konstans értékkel számolok. Az adóantenna megfelelő konstrukciója esetén a jel-zaj+interferencia viszony vagy a radar egyértelműségi hatótávolsága jelentősen változhat, de az egyenes láthatóság szempontjából adottnak tekinthető. Az 1. ábra mutatja a 25 és 35 dB közti antennanyereség 1 dB-enkénti változása mellett a hatótávolság növekedését. Jól látható, hogy míg 100 kW-os adóteljesítmény és 35 dB-es antenna nyereség esetén is a hatótávolság 340,97 km. Ugyanezzel a teljesítménnyel, de 25 dB-es antenna nyereséggel már csak az korábbi hatótávolság alig harmada 111,11 km. Ugyanez a kb. 30%-os hatótávolság csökkenés igaz a kisebb adóteljesítménnyel számított értékeknél is.

¹¹ SOJ – Stand-off Jamming – őrzáratozási légtérből végrehajtott zavarás

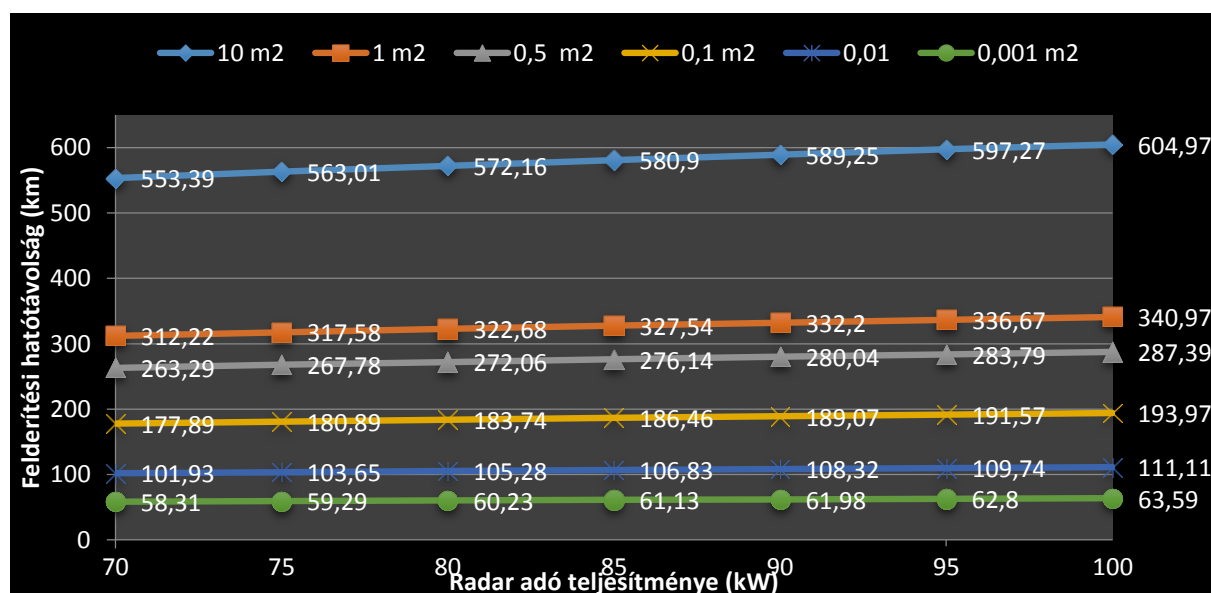
¹² EJ – Escort Jamming – kísérő zavarás

Az (1) egyenlet középső tagja a légtérben tartózkodó repülő eszközök és az azokról visszaverődő jelek paramétereit szemlélteti. A polarizációs tényező az adójel polarizáció változását mutatja a céltárgy felületén. Ezt nem tudjuk befolyásolni a számításokban konstans érték. A σ (a céltárgy hatásos visszaverő felülete) az angol nyelvű szakirodalomban RCS¹³ a céltárgyra leginkább jellemző paraméter. Nagymértékben függ a repülőgép besugárzási szögétől és a visszaverő felület anyagától, minőségétől és fluktuációjától. Általánosan elfogadott érték (az „S” frekvencia sávban) hogy, a civil utasszállító, katonai csapatszallító vagy bombázó repülőgép 10-100 m²-es, egy hagyományos vadászgép 1-5 m²-es, egy lopakodó technológiával készült vadászgép 0,1-0,01 m²-es, egy föld levegő rakéta, egy közepes méretű UAV, szárnyas rakéta szintén 0,1-0,01 m²-es, míg egy kisméretű drón vagy madár 0,001 m²-es hatásos visszaverő felülettel (RCS-el) rendelkezik. Az F-22 Raptor az USAF félrevezető állítása szerint egy üveggyölyőével megegyező, azaz körülbelül 0,0001–0,0014 m², míg egy F-35 Lightning II 0,005 m²-es hatásos visszaverő felülettel rendelkezik. A 2. ábra a különböző hatásos visszaverő felülettel rendelkező céltárgyak felderítési távolságra gyakorolt hatását mutatja növekvő adóteljesítmények esetén.



1. ábra A radar maximális hatótávolsága 25-35 dB antennanyereség esetén (saját szerkesztés)

¹³ RCS – Radar Cross Section – a céltárgy hatásos visszaverő felülete



2. ábra A radar maximális hatótávolsága 0,001-10 m² RCS értékek esetén (saját szerkesztés)

Az (1) egyenlet utolsó tagja a radar vevőtraktusának jellemzőit tartalmazza. Monosztatikus radar összeállítást használva a vevő antenna nyeresége megegyezik az adóantennáéval. A hullámterjedési tényező (a céltárgytól a vevő bemenetéig) optimális helyzetben megegyezik az adáskori hullámterjedési tényezővel. A radarvevő pillanatnyi sávszélességének csökkentése illetve növelése szinkron zavarás esetén ugyan növelné a jel-zaj viszonyt, azonban ezt csak egy határig tehetjük meg, mert az adójelre illesztett impulzus minimális veszteséggel való vételére optimalizált a sávszélesség.

A RADAR MAXIMÁLIS HATÓTÁVOLSÁGA ZAVARMENTES ÉS ZAVAR ALATTI ESETBEN BLAKE CHART SZÁMÍTÁSOKKAL IGAZOLVA

A Blake chart [9] egy a radarok maximális hatótávolságát kiszámító egyenletrendszer, amelyet először Lamont V. Blake alkotott meg 1962-ben az Amerikai Egyesült Államok haditengerészeti kutató-laboratóriumának radartechnológiai osztályán. Az általam használt táblázat Microsoft Office Excel alapú munkalap, amelyben megadhatóak a radar valamint a zavaró adó főbb a számításokhoz szükséges technikai paraméterei. A Blake chart szimulációnál a zavaró adó sávszélessége nagyobb, mint a radarvevő sávszélessége és fehér zaj jellegű.

A radar előírt detekciós valószínűség legyen $P_d=0,9$, az előírt vakriasztási valószínűség legyen $P_{fa}=10^{-6}$. A radar végezzen térletapogatást 3D-ben 6 fordulat/perc sebességgel.

A radar és a zavaró mint rendszer a következő harcászati-technikai paraméterekkel rendelkezik:

A számítások során feltételeztem, hogy a lokátor egy „átlagos” a mai kor követelményeinek megfelelő berendezés, amely a következő harcászati-műszaki elvárásoknak felel meg:

- Az adó impulzusteljesítménye: 70-75-80-85-90-95-100 kW,
- az adóimpulzus szélessége: 100 μ s,
- az impulzus ismétlődési frekvencia: 500 Hz,
- az üzemi frekvencia: 1250 MHz,
- az antenna nyalábszélessége: 2°,
- az antenna nyeresége adáskor és vételkor is: 35 dB,
- az antenna elektromos középpontjának magassága: 6 m.

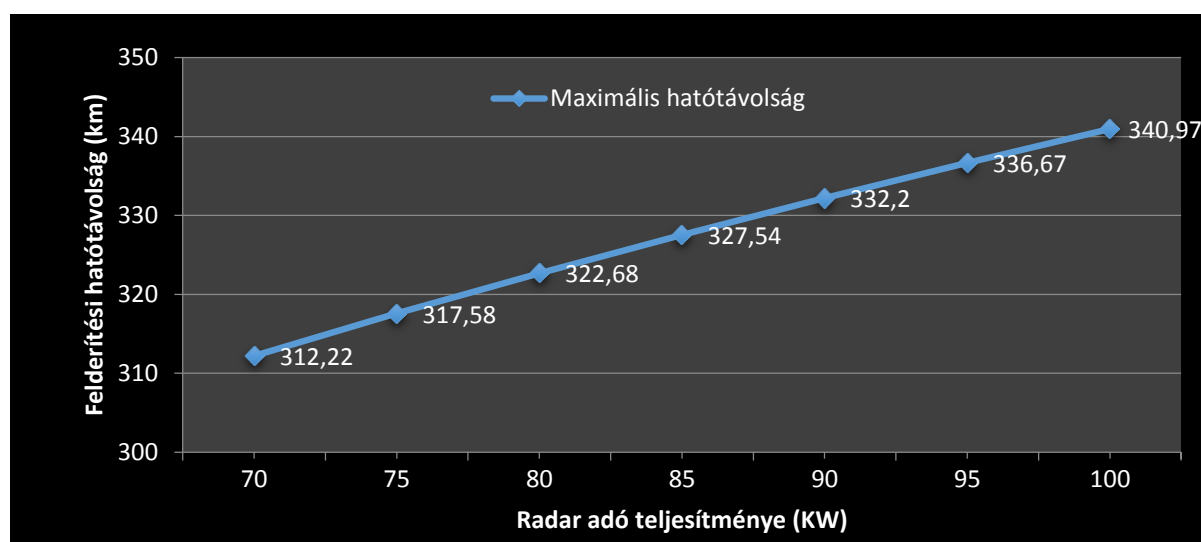
A céltárgy Swerling 1 modell, $\sigma=1 \text{ m}^2$ hatásos visszaverő felülettel.

A zavaró eszköz műszaki paraméterei:

- az adó átlagteljesítménye: 10-100-200-1000W,
- a zavarás fajtája: folyamatos (CW),
- az üzemi frekvencia: 1250 MHz,
- az adó sáv szélessége: 200 MHz,
- az antenna nyeresége a radar irányába: 10 dB.

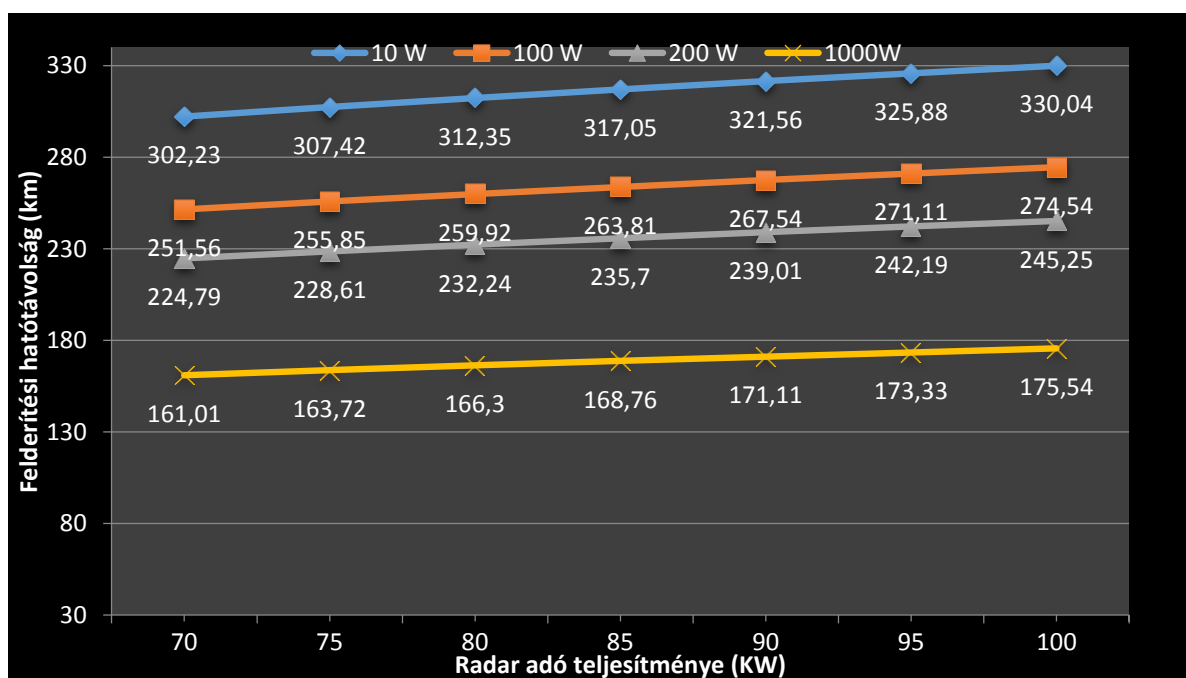
A radar és a zavaró adó közti távolságot 300, 100, 50 és végül 10 km-re választva számoltam ki a céltárgy maximális detektálhatóságát. A zavaró adó helyszöge a radarhoz képest $2,2^\circ$.

Első eset: A lokátor zavarmentes környezetben üzemel a korábban felsorolt harcászati-technikai paraméterekkel. Ebben az esetben a különböző teljesítményű adóimpulzusokkal számított maximális hatótávolságokat a 3. ábra tartalmazza.



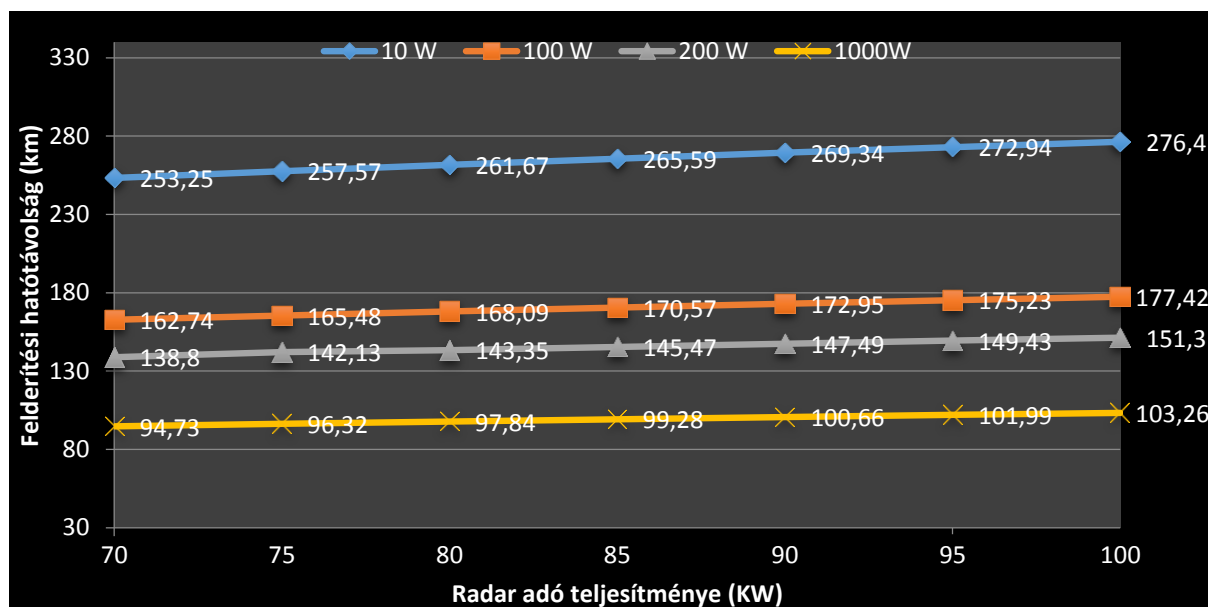
3. ábra: A radar maximális hatótávolsága zavarás nélkül (saját szerkesztés)

Második eset: A lokátor és a zavaradó távolsága 300 km (ez közel van a lokátor maximális hatótávolságához zavarás nélkül), mely megfelel az őrző-átjárási légtérből végrehajtott zavarás módszerének. A zavaradó helyszöge $2,2^\circ$, sáv szélessége 200 MHz (ez minden esetben nagyobb a radar vételi sáv szélességénél), az effektív kisugárzott teljesítménye 100W, 1KW, 2KW és 10 KW (10W, 100W, 200W és 1 kW zavaró teljesítmény - P_j). Ebben az esetben a különböző teljesítményű adóimpulzusokkal számított maximális hatótávolságokat a 4. ábra tartalmazza.



4. ábra A maximális hatótávolság a zavaradótól 300 km-re (saját szerkesztés)

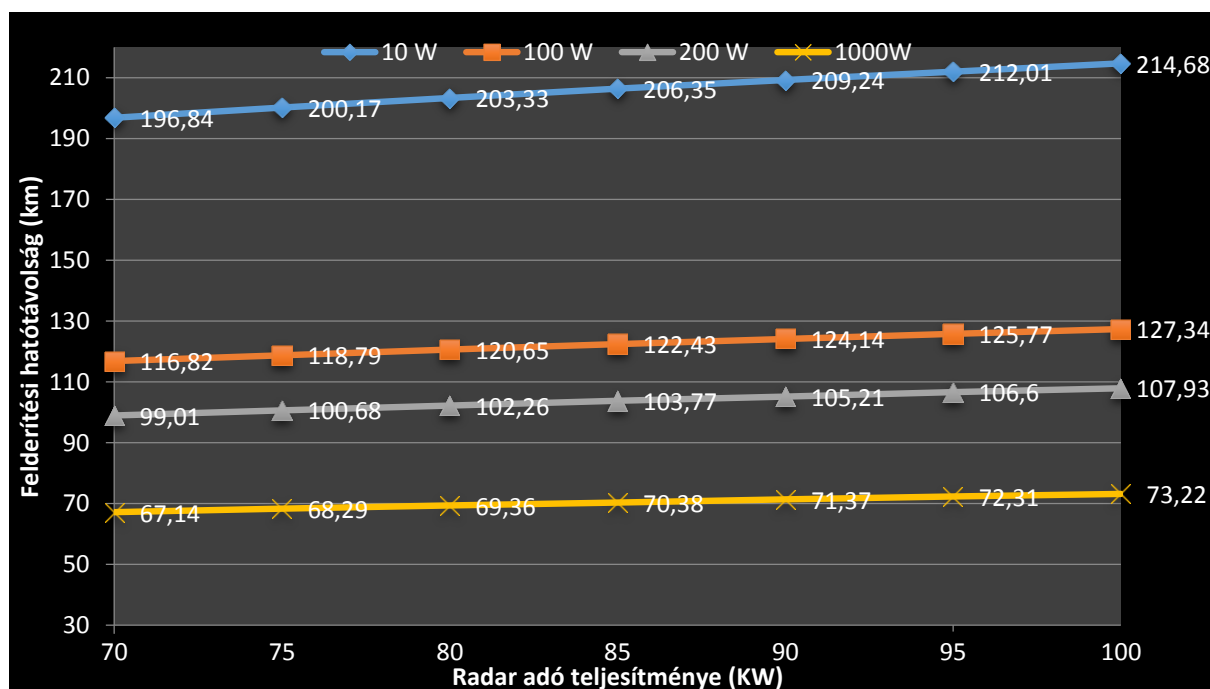
Harmadik eset: A lokátor és a zavaradó távolsága 100 km (ez belül van a lokátor maximális hatótávolságán zavarás nélkül), ami megfelel a kísérő zavarás módszerének. Az antennák által bezárt helyszög 2.2° . A zavaradó sávszélessége 200 MHz, az effektív kisugárzott teljesítménye 100W, 1KW, 2KW és 10 KW (10W, 100W, 200W és 1 kW zavaró teljesítmény - P_j). Ebben az esetben a számított maximális hatótávolságokat az 5. ábra tartalmazza.



5. ábra A maximális hatótávolság a zavaradótól 100 km-re (saját szerkesztés)

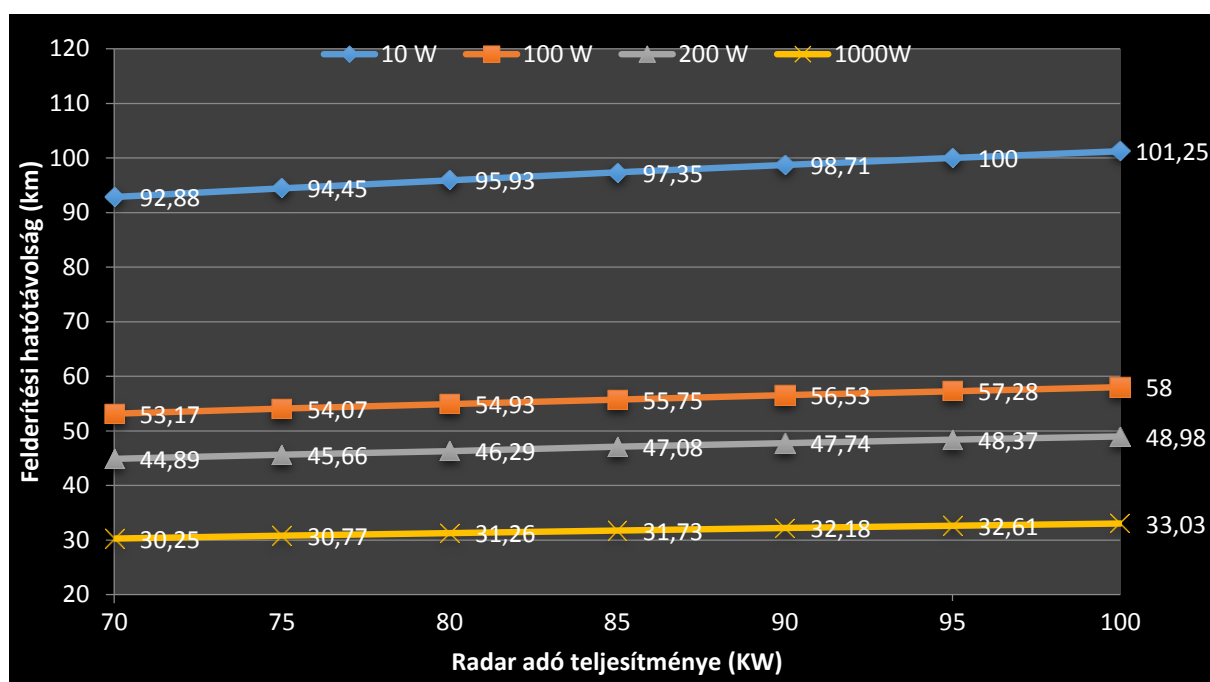
Negyedik eset: A lokátor és a zavaradó távolsága 50 km (ekkor a zavaró adó már közel van a lokátor), ami ismét a kísérő zavarás módszerének felel meg. A zavaradó helyszöge 2.2° , a sávszélessége 200 MHz (mely ismét mindig nagyobb a radar vételi sávszélességénél). Az

effektív kisugárzott teljesítménye 100W, 1KW, 2KW és 10 KW (10W, 100W, 200W és 1 kW zavaró teljesítmény - P_j). Ebben az esetben a különböző teljesítményű adóimpulzusokkal számított maximális hatótávolságokat a 6. ábra mutatja be.



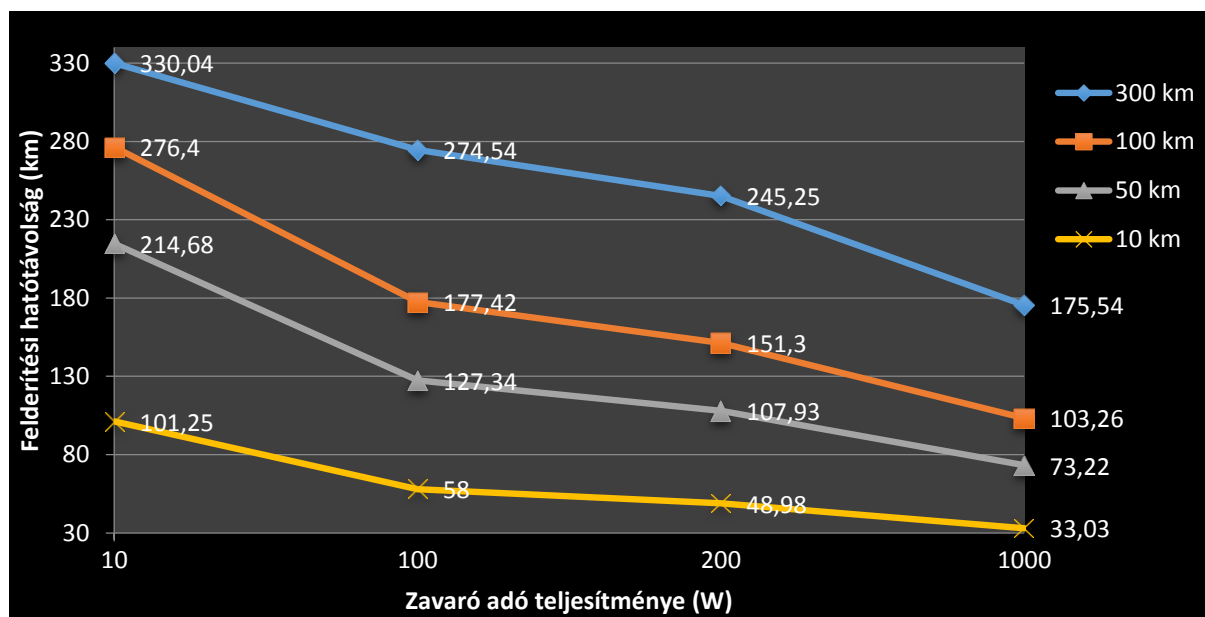
6. ábra: A maximális hatótávolság a zavaradótól 50 km-re (saját szerkesztés)

Ötödik eset: A radar és a zavaradó távolsága 10 km (a zavaró adó nagyon közel van a lokátorhoz). A zavaradó helyszöge 2.2° , sávszélessége 200 MHz, az effektív kisugárzott teljesítménye 100W, 1KW, 2KW és 10 KW (10W, 100W, 200W és 1 kW zavaró teljesítmény - P_j). A különböző teljesítményű adóimpulzusokkal számított maximális hatótávolságokat a 7. ábra szemlélteti.

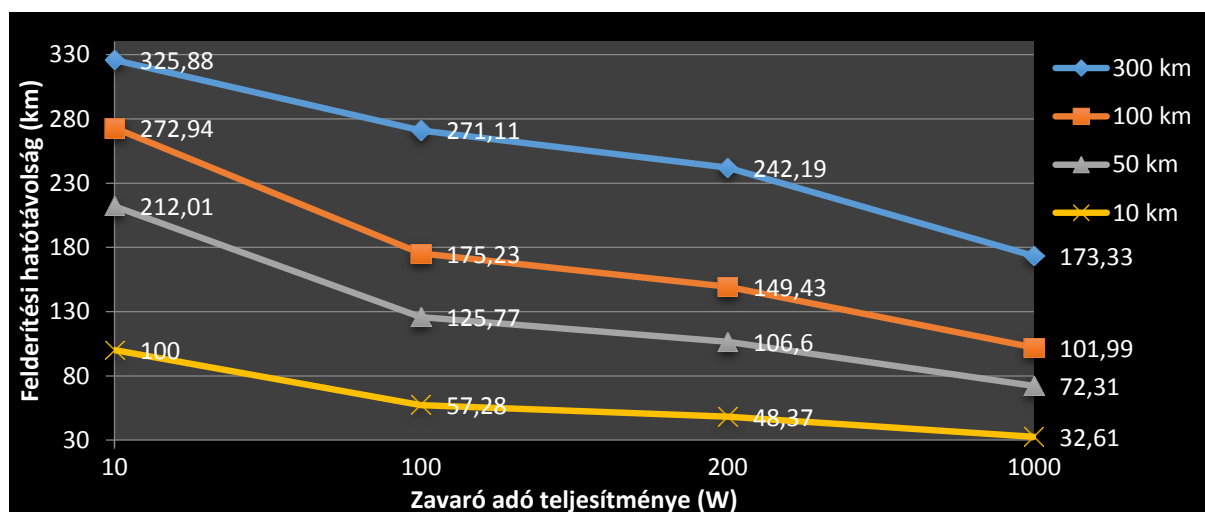


7. ábra: A maximális hatótávolság a zavaradótól 10 km-re (saját szerkesztés)

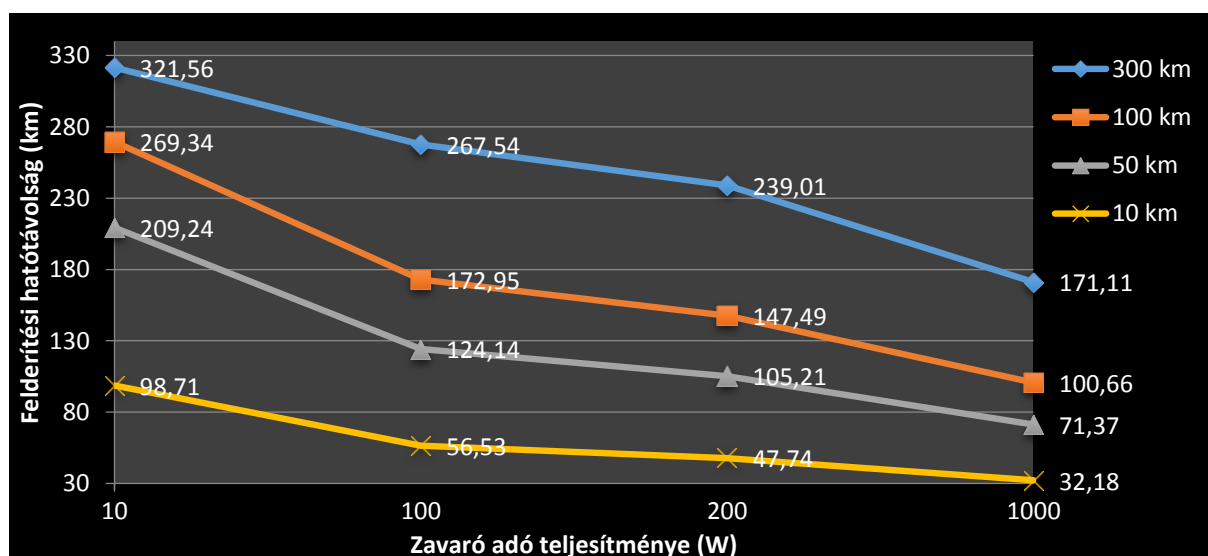
További számításokat végeztem különböző távolságokból (300, 100, 50 és 10 km) végrehajtott zavarásra különböző zavaradó teljesítmények (10, 100, 200 és 1000W) esetén. Ezen számításokat különböző radaradó teljesítmények (100, 95, 90, 85, 80, 75 és 70 kW) esetén vizsgáltam. Az eredményeket a 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14. ábrákon ábrázoltam.



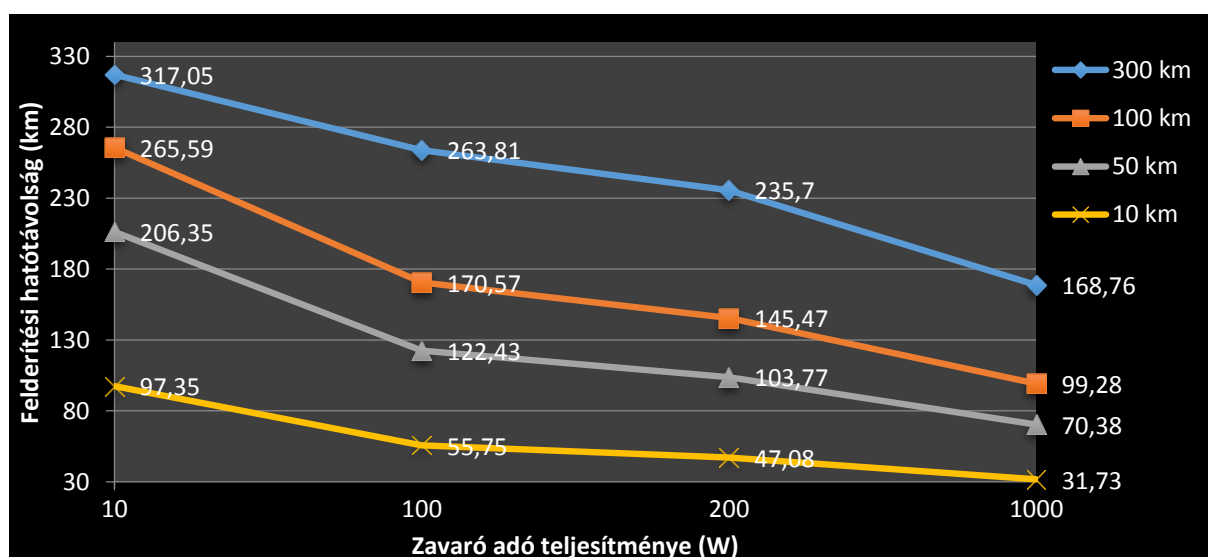
8. ábra: 100 kW radaradó teljesítmény esetén a hatótávolság (saját szerkesztés)



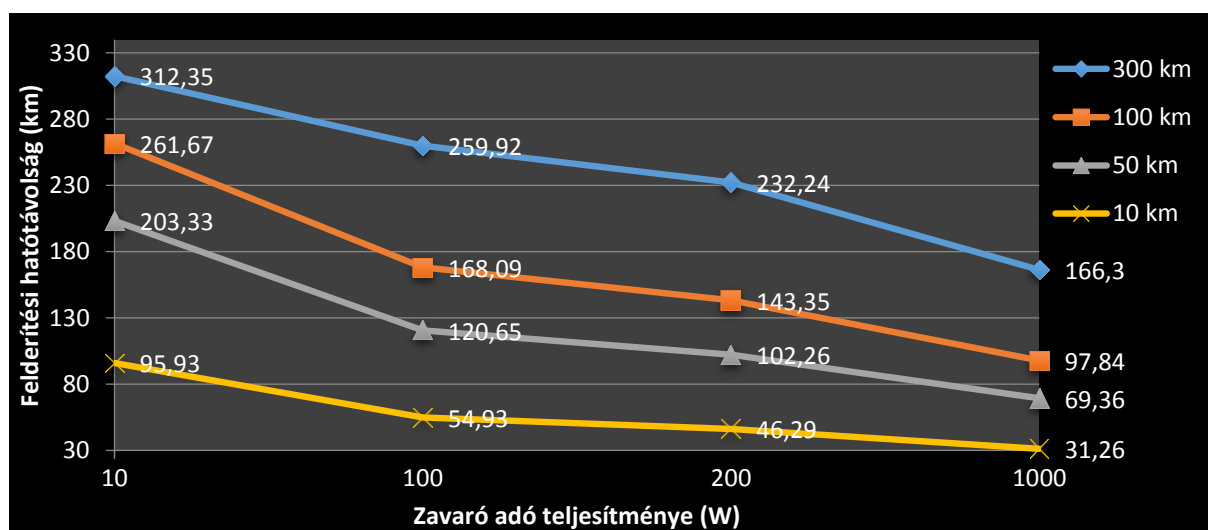
9. ábra: 95 kW radaradó teljesítmény esetén a hatótávolság (saját szerkesztés)



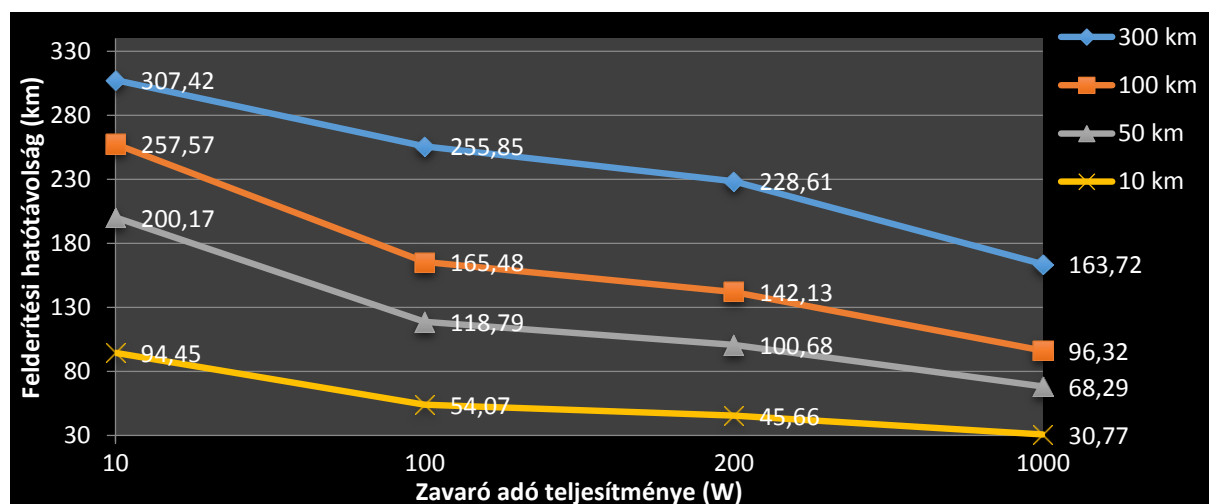
10. ábra: 90 kW radaradó teljesítmény esetén a hatótávolság (saját szerkesztés)



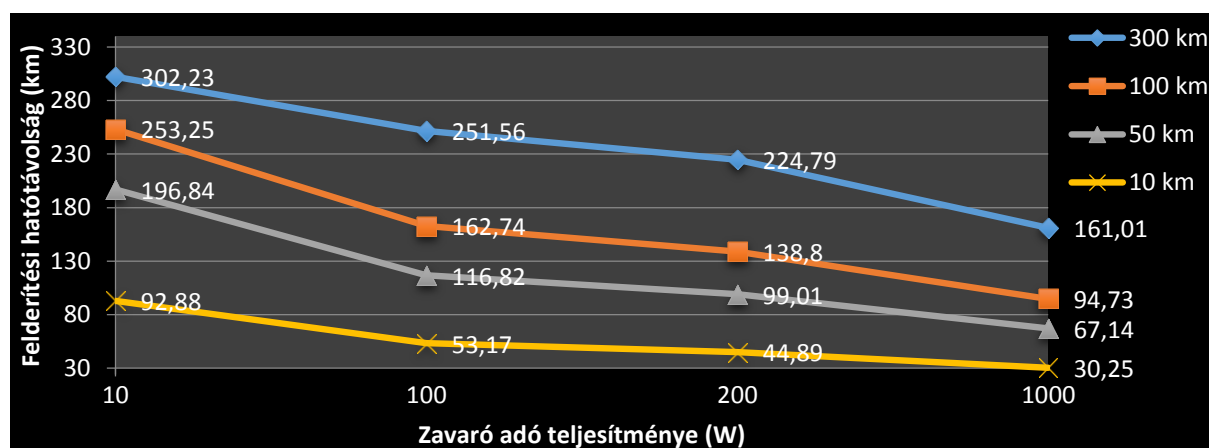
11. ábra: 85 kW radaradó teljesítmény esetén a hatótávolság (saját szerkesztés)



12. ábra: 80 kW radaradó teljesítmény esetén a hatótávolság (saját szerkesztés)



13. ábra: 75 kW radaradó teljesítmény esetén a hatótávolság (saját szerkesztés)



14. ábra: 70 kW radaradó teljesítmény esetén a hatótávolság (saját szerkesztés)

Az ábrákon látható, hogy az radar adójának teljesítményét csökkentve (100-ról 70 kW-ra) a felderítési hatótávolság nem csökken jelentősen. A visszavert jelek vételét főként a zavaró adó teljesítménye és távolsága a lokátortól korlátozza. Ez is bizonyítja, hogy mindenképp szükség van a radarberendezésekben az aktív zavarok elnyomására, szűrésére, kiküszöbölésére alkalmas technikák alkalmazására.

KÖVETKEZTETÉSEK

Ha a radar zavarmentes környezetben üzemel, akkor a maximális hatótávolsága 100 kW-os kimenő teljesítmény esetén legnagyobb 340km. Megállapítható, ha a teljesítményt a háromnegyedére csökkentjük, akkor is 320 km körüli értéket kapunk (3. ábra). Ez megfelelő rádiolokációs felderítést eredményez.

Ha a zavaradó radarhoz viszonyított távolsága 300 km (8. ábra): ugyan 100 kW-os radaradó teljesítmény mellett csökkent a hatótávolság (330,04 km-ről 175,54 km-re), de így a lokátor még mindig hatékonyan derít fel, tehát a légtér ellenőrzöttnek minősül. Megállapítható, hogy a zavarás nem hatékony. A zavaróadónak közelítenie kell a radarhoz a zavarás megvalósításához.

Ha a zavaró adó és a radar távolsága 100 km: ilyen távolságban már a kettes esetben alkalmazott zavaró teljesítmény tizede ($P_j=100$ W) is elég volt ugyanolyan mértékű hatótávolság csökkentéshez ($R_{\max}=177,42$ km) (5. ábra). Amennyiben ugyanolyan

zavarteljesítményt alkalmaznak, mint a kettes esetben ($P_j=1000\text{W}$) akkor a hatótávolság az eredeti harmadára csökken ($R_{\max}=103,26\text{ km}$) (5. ábra).

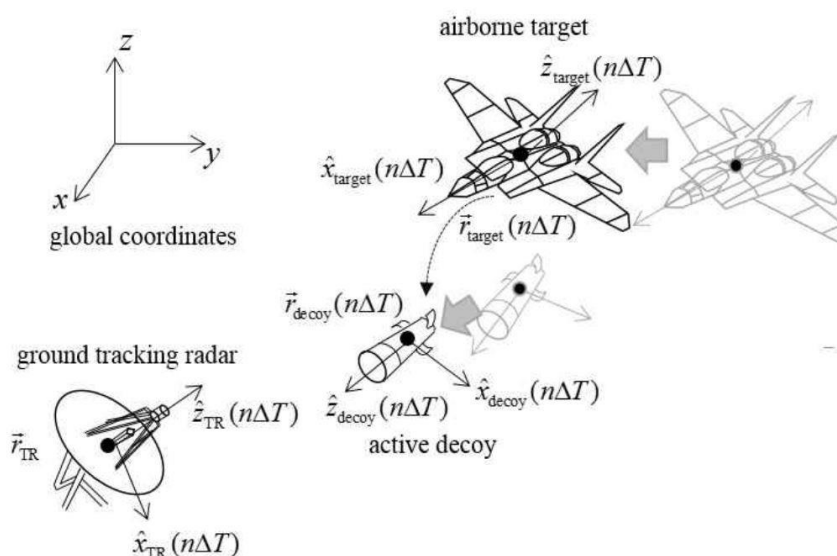
Ha a zavaró és a radar távolsága 50 km: ez egy valós helyzetnek fogható fel mivel a lokátoraink pár darabtól eltekintve az országhatártó 50 km-en belül helyezkednek el. Ilyen távolságban már a kettes esetben alkalmazott zavaró teljesítmény tizede ($P_j=100\text{ W}$) már nem csak felére csökkenti, hanem harmadolja az eredeti zavarás nélküli hatótávolságot ($R_{\max}=127,34\text{ km}$). Amennyiben ugyanolyan zavarteljesítményt alkalmaznak, mint a kettes esetben ($P_j=1000\text{W}$) akkor a hatótávolság kevesebb, mint az eredeti negyedére csökken ($R_{\max}=73,22\text{ km}$) (6. ábra). Ez a távolság már kétségesé teszi az időbeni felderítést és célazonosítást valamint az információ időbeni eljuttatását a felelős magasabb szintű szervezetek és döntéshozók számára. Ebben az esetben nincs idő válaszingézkedés foganatosítására, hiszen 50-60 km-t egy 900 km/h sebességgel repülő gép 3-4 perc alatt tesz meg.

Ha a zavaró adó radarhoz viszonyított távolsága 10 km: ebben a távolságban már a kettes esetben alkalmazott zavaró teljesítmény százada ($P_j=10\text{ W}$) is elég, hogy harmadolja az eredeti hatótávolságot ($R_{\max}=101,25\text{ km}$) (7. ábra). Amennyiben ugyanolyan zavarteljesítményt alkalmaznak, mint a kettes esetben ($P_j=1000\text{W}$) akkor a hatótávolság az eredeti tizedére csökken ($R_{\max}=33,03\text{ km}$). Amennyiben sikerül a zavaró adót a radarhoz ilyen közel jutatni elmondható, hogy a berendezés az eredeti feladatát nem képes ellátni. A lokátor ebben az esetben csak egy szűk távolsági kapun keresztül képes felderíteni. Ebben az esetben a légvédelem reakciója lehetetlenné válik.

Számítást végeztem arra az esetre, ha az eddigi zavaradót, melynek teljesítménye $P_j=10\text{ W}$, 1 km közel kerül a lokátorhoz annak hatótávolsága $R_{\max}=32,52\text{ km}$ -re csökken. Gyakorlatilag a radar használhatatlan eszközzé válik.

A fentebb leírtak alapján belátható, hogy a radarok hatékony elektronikai védelem nélkül könnyen zavarható és könnyen kiiktatható tényezőt jelentenének a légvédelmi rendszerben még az olyan egyszerű zavaró eszköz, mint egy CW zavaró számára is.

A valóságban a felsorolt eseteknél bonyolultabb - zavarással kapcsolatos - légi helyzet szimulációkat kell alkalmaznunk, hogy részleteiben feltárjuk a légtérellenőrző radarok ellen bevethető eljárások hatékonyságát. Egy ilyen esetet szemléltet a 15. ábra.



15. ábra: Kombinált zavarási helyzet ábrázolása, valós és megtévesztő céltárgyakkal [10]

A radarok különböző részegységeiben alkalmazható elektronikai védelmi elveket és gyakorlati megoldásokat ezen írásom folytatásában részletezem. Ott lesz szó az antennával

megvalósítható (SideLobe Blanking, SideLobe Cancellation), az adóval (Radar with Large ERP, Frequency Agility and Diversity, Automatic Frequency Selecting), a vevővel (Dual Frequency Conversion, Large Dynamic Range Receivers) és a jelfeldolgozó rendszerrel (Digital Coherent and Adaptive Moving Target Indication, CFAR Detection, Pulse width and Pulse Repetition Frequency Discriminator) megvalósítható ECCM technikákról.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] *Az Európai Parlament és a Tanács 2004/108/EK irányelve* (2004. december 15.)
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX%3A32004L0108>
- [2] *Magyar Honvédség Összhaderőnemi Doktrína* 3. kiadás, 2012, MH kiadvány, p. M1-3.
- [3] *Magyar Honvédség Összhaderőnemi Elektronikai Hadviselés Doktrína* 1. kiadás, 2004, MH kiadvány, p. 6.
- [4] *Magyar Honvédség Összhaderőnemi Elektronikai Hadviselési Doktrína*. MH HVK, 2005. p. 8.
- [5] *Magyar Honvédség Összhaderőnemi Elektronikai Hadviselési Doktrína*. MH HVK, 2005. p. 10.
- [6] BALAJTI I, VASS S: *Elektronikai védelem*. Budapest, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, J-1435. 2000,
- [7] BARTON D. K, LEONOV S.A: *Radar Technology Encyclopedia* (Electronic Edition), Artech House London, 1998, 64, 65, 132, 154-161, 376-385, 420. p, ISBN 0-89006-893-3
- [8] BARTON D. K: *Radar system analysis and modeling*. Boston, Artech House, 2005, 545 p. ISBN 1-580536-81-6
- [9] BALAJTI I: *Korszerű katonai radarok és radaradat-feldolgozó rendszerek*. Budapest, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, J-1462. 1998, p. 75.
- [10] RIM J-W, KOH I-S, CHOI S-H: *Jamming Performance Analysis for Repeater-type Active Decoy against Ground Tracking Radar Considering Dynamics of Platform and Decoy*. Prague, Czech Republic, The 18th International Radar Symposium IRS 2017, June 28-30, ISBN 978-3-7369-9343-3 pp.9.