

Szőkrény Zoltán¹ – Balajti István²

LÉGTÉRELLENŐRZŐ RADAROK BALLISZTIKUS RAKÉTA RÖPPÁLYA DETEKTÁLÁSI LEHETŐSÉGEI³

A modern háborúk folyamán jelentős mértékben kibővült a légi hadviselési eszközök arzenálja. A merevszárnyú repülőgépeken, helikoptereken, pilóta nélküli és távvezérelt repülő eszközökön kívül a hadszíntéren bármikor bevetésre kerülhetnek a különböző típusú hadszíntéri rakéták. Ezek közül az utóbbi évtizedekben különösen a hadszíntéri ballisztikus rakéták jelentettek komoly fenyegetést.

POSSIBILITIES OF BALLISTIC MISSILE TRAJECTORY DETECTION BY SURVEILLANCE RADARS

During modern wars the arsenal of air warfare tools were significantly expanded. In addition to the fixed-wing aircraft, helicopters, unmanned and remote controlled flying devices, different types of theater missiles could be deployed on the battlefield. Out of these – particularly in the last few decades – the war theater ballistic missiles showed serious threats.

BEVEZETÉS

Az Öböl-háborúban a hadszíntéri ballisztikus rakéták iraki részről történő alkalmazása felhívta a koalíciós erők figyelmét az ellenük való védekezés hiányosságaira és szükségességére. Irak hatásosan illusztrálta, hogy képes az ilyen rakéták továbbfejlesztésére és hatékony alkalmazására. Miközben ezek a rakéták pontatlanok voltak, azért, hogy hadműveleti és harcászati jelentőségüket növeljék, geopolitikai célokat támadtak, és vegyi töltetek alkalmazásának lehetőségével pszichológiai fenyegetést jelentettek, mellyel megpróbálták belekeverni a koalíciós erőket és a környező országokat egy újabb konfliktusba.

A fejlődő országokban növekvő számban rendszeresítenek egyre nagyobb hatótávolságú rakétákat, így egyre nagyobb távolságú célokat érhetnek el. Ez a ballisztikus rakéták terjedésének amúgy is nehezen kivitelezhető korlátozásán túl fokozott erőfeszítésekre kényszeríti a NATO összes tagországát, amihez anyagi és szellemi lehetőségeink függvényében a szövetség kollektív védelmi rendszerébe integrálódva hazánknak is hozzá kell járulnia.

Magyarországot semleges, csatlakozásra váró és NATO tagországok veszik körül. Reális TBM (harcászati ballisztikus rakéta) fenyegetettséggel tehát nem kell számolni. De előfordulhatnak a rakétacsapatok éles lövészei során céltévesztett rakéták a drónok fejlődése szintén megköveteli az új típusú „kiterjesztett” légtér-ellenőrzési képességek meglétét. A mezőgazdaságban a jégkárok megelőzése céljából jégvédelmi rakétákat alkalmaznak. Mindkét esetben a kilőtt rakéták követése elvárt követelmény, ez különösen a baleseti helyzetek okainak kivizsgálásánál

¹ alezredes, tanársegéd, Nemzeti Közszerológati Egyetem, szokreny.zoltan@uni-nke.hu

² ny. alezredes, Nemzeti Közszerológati Egyetem, balajti.istvan@uni-nke.hu

³ Lektorálta: Prof. Dr. Makkay Imre ny. ezredes, egyetemi tanár, Nemzeti Közszerológati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Tanszék, drmi48@gmail.com

hasznos. A rakéták mellett a ma egyre inkább terjedő katonai és polgári célokat szolgáló drónok extrém manőverező képessége is megköveteli a légtérellenőrzés TBM képességeinek vizsgálatát, hiszen a napjainkban elterjedt kis elevációs szöggel rendelkező felderítő radar berendezések erre nem alkalmasak.

HADSZINTÉRI RAKÉTA

A rakétákat hatótávolságuk szerint kis (500 km-ig), közepes (500 km és 5000 km között) és nagy hatótávolságúak (5000 km-t meghaladó) csoportokba sorolhatjuk⁴. [1]

Az 1. táblázatból megfigyelhető, hogy a rakéták hatótávolsága, csúcsmagassága és repülési sebessége között meghatározott összefüggés van. A földi telepítésű radarok céltárgy detektálási hatótávolsága miatt, számunkra a kis és a közepes hatótávolságú hadszíntéri rakéták egy részének repülési tulajdonságaival célszerű közelebbről foglalkozni.

Az 1. ábrán látható, hogy a hadszíntéri rakéta röppályája aktív és passzív szakaszból tevődik össze. A vezérelt hadszíntéri rakétákat rendszerint függőlegesen indítják. Indítás előtt a rakéta fedélzeti vezérlő berendezésébe betáplálják a kiszámított hadszíntéri röppálya adatait. Az aktív szakaszon (az égésvégi pontig) a hajtómű működik. Az aktív szakasz – melyen a vezérlés (célra irányítás) történik – a röppálya rövidebb szakaszát alkotja. A röppálya passzív szakaszán a rakéta, a hajtómű működése során nyert mozgási energia következtében halad tovább.

Hatótávolság	Pálya csúcsmagassága	Sebesség célközvetben	Repülési idő
km	km	m/s	perc
300	100	1020	4
1000	260	3100	9
2000	460	4000	12
3000	650	4800	15
4000	820	5400	18
5000	970	5900	21

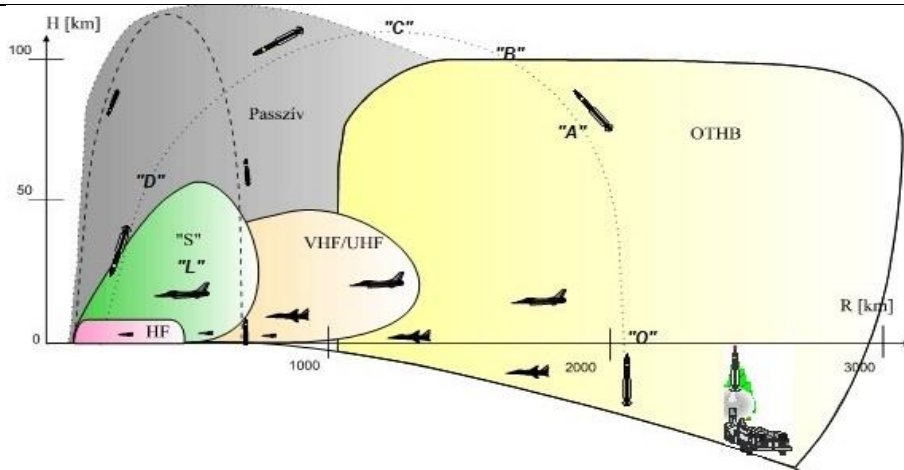
1. táblázat A rakéták jellemzői⁵[2]

A rakéta „hasznos része” (többnyire csak a rakéta robbanófeje) a hajtómű kiégése után ballisztikus röppályán mozog a célig. Ez a röppálya némileg módosul a légkörbe való visszatéréskor. A hadszíntéri röppálya alakja kisebb hatótávolságú rakéták esetén parabola, nagyobb hatótávolságú rakéták esetén pedig ellipszis alakú. A hadszíntéri rakéta égésvégi sebessége az első kozmikus sebességnél kisebb, hiszen ez feltétele a ballisztikus röppálya kialakulásának. Ha az égésvégi sebesség értéke az első és a második kozmikus sebesség közötti, akkor a röppálya felveszi a földkörüli kör vagy ellipszis alakú pályát.

A nem vezérelt hadszíntéri rakéták indítása, a megsemmisítendő cél távolságából és a hajtómű égési ideje által meghatározott égésvégi sebességből kiszámított ballisztikus röppályának megfelelő indítási szögön történik. A fejrész burkolata speciális a hasznos teher megvédése céljából.

⁴ Field Manual No. 44-100 US Army Air Defense Operations. Washington DC, Headquarters of the Army, 1995. Chapter 2: Theatre. Chapter 3: Joint Counterair and Theatre Missile Defense Doctrine. 37-39. p

⁵ Rutai László: A légvédelmi rakétaegység harcászati ballisztikus rakéták elleni harcrendjének megtervezéséről, Hadtudomány 1999. 3–4. sz. p. 62–74



1. ábra Függőleges indítású hadszíntéri rakéta röppályája

O–B	Röppálya aktív szakasza	O–A	Légkörből való kijutás
C	Röppálya csúcsa	A–B	Irányított pályarész
D	Légkörbe való belépés	B	Égésvégi pont
D–E	Visszatérő pályarész	B–E	Röppálya passzív szakasza

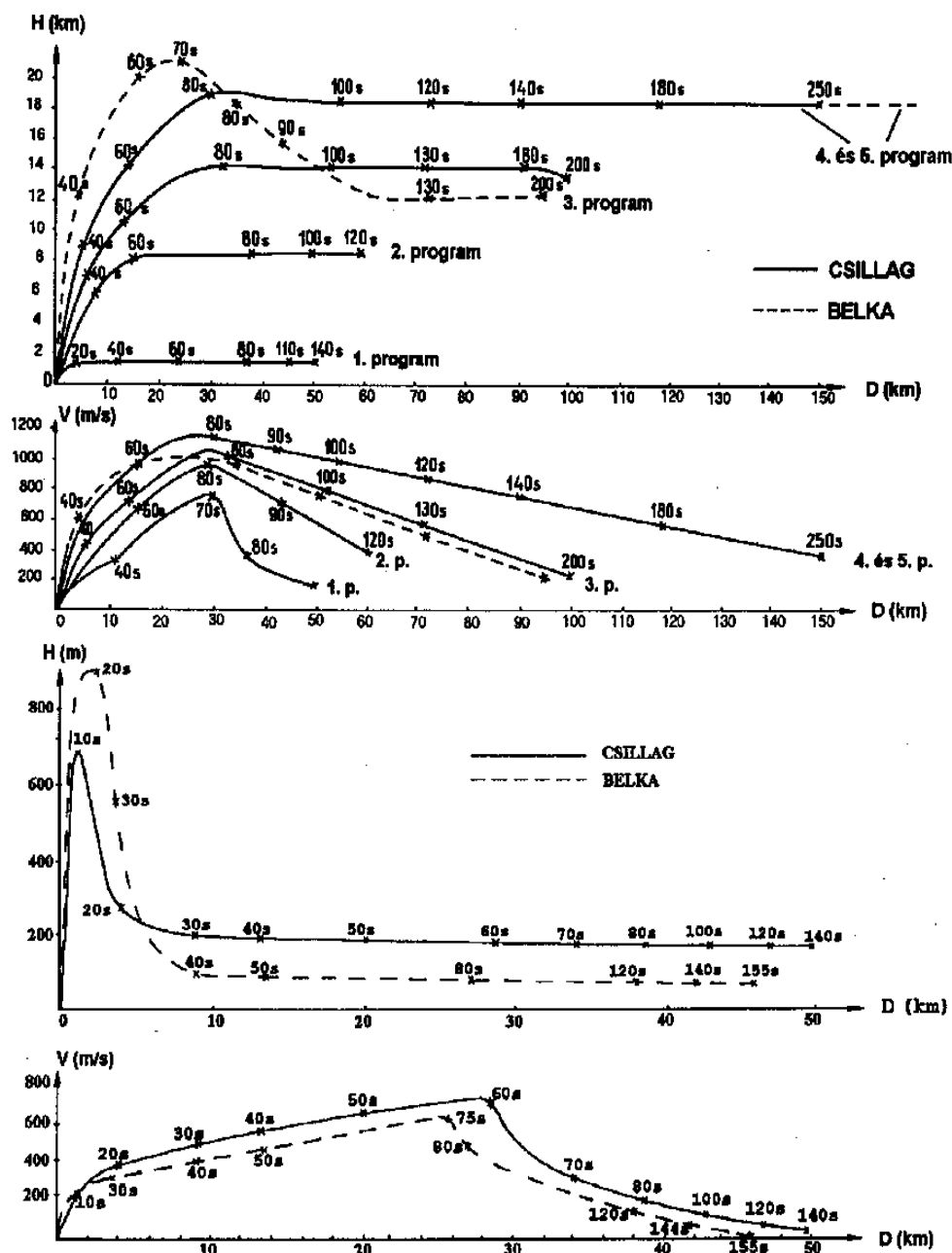
Hadszíntéri rakéta – mint légi cél – sajátosságai

A hadszíntéri rakéta jellemzőit elemezve és kiegészítve a rádiólokációs detektálásra vonatkozó követelményekkel az alábbi értékelés leegyszerűsíti a radarokkal szembeni céltárgy detektálási elvárások kidolgozását, és a radarokban hatékonyan alkalmazható TBM céltárgy azonosítást:

1. nem vízszintes célpályán, hanem ballisztikus röppályán közeledik;
2. kicsi a manőverező képessége, (az aktív röppályán való tartás mértékéig);
3. nagy a repülési sebesség, főleg a röppálya visszatérő szakaszán. A repülési sebességek között típusonként és röppályánként eltérések vannak. Ez rendkívül jelentős Doppler-frekvencia eltolást eredményezhet, melyet koherens radarjel feldolgozással pontosan mérhetünk;
4. a rakéta felszálló ágán nagy az RCS, ha a rakéta hosszanti tengelyével megegyező polarizációjú kisfrekvenciás radarral sugározzuk be;
5. 200 km-t meghaladó indítás esetén, a föld görbülete miatt állócélokkal nem kell számolni, de 8–9 órás kihullási idővel rendelkező dipólfelhőkkel igen;
6. a rakéta, a felszálló ágon a radarhoz képes kis radiális sebességgel bír. Ha a mozgócél-indikátor/ - detektálás (MTI/MTD) rendszer nincs felkészítve a TBM detektálásra, a radar könnyen elveszítheti („kiszűri”) a hasznos jelet;
7. az égésvégi pont után kicsi az RCS, mert több típusnál a hajtómű (kiégése után) leválik, és csak a robbanófej repül tovább;
8. a röppálya indítási és visszatérő szakaszát kivéve, a rakéta nagy magasságban, ritka légkörben repül. A levegő törésmutatója gyorsan változik és ezt a rádióhullámok két utas terjedése szempontjából figyelembe kell venni;
9. a visszatérő röppályán való mozgása nagy (30–70°) eleváció szerinti detektálási képességet kíván a légtérellenőrző radartól;
10. a becsapódása nagy elevációs szögön történik. A becsapódási szög értéke változó, a rakéta típusától és a beprogramozott optimális röppályától függ;
11. a hadszíntéri rakéta által előidézett aktív zavarással nem kell számolni.

A hadszíntéri rakéták minél távolabbi megsemmisítésének követelménye és a nagy célsebességből adódó rövid reakcióidő megköveteli a hadszíntéri rakéták több száz kilométeres távolságban történő detektálását (felderítését) útvonalba fogását és azonosítását, valamint az információ azonnali eljuttatását a felhasználóhoz, hogy az valós időben megtehesse ellenintézkedéseit. Az állásidő előrejelzése a hibajavító tevékenységnek köszönhetően.

A 2. ábra a magyar légvédelem harcászati teljesítőképességének felmérésére használt (1970–1980-s és 1990-s évek eleje) UAV és TBM teszteszközök repülési profiljai és sebesség adatait szemlélteti. (Nyílt szaksajtóban publikált. A radarok helyzete a 0–ponton 10–60 km távolságban.)

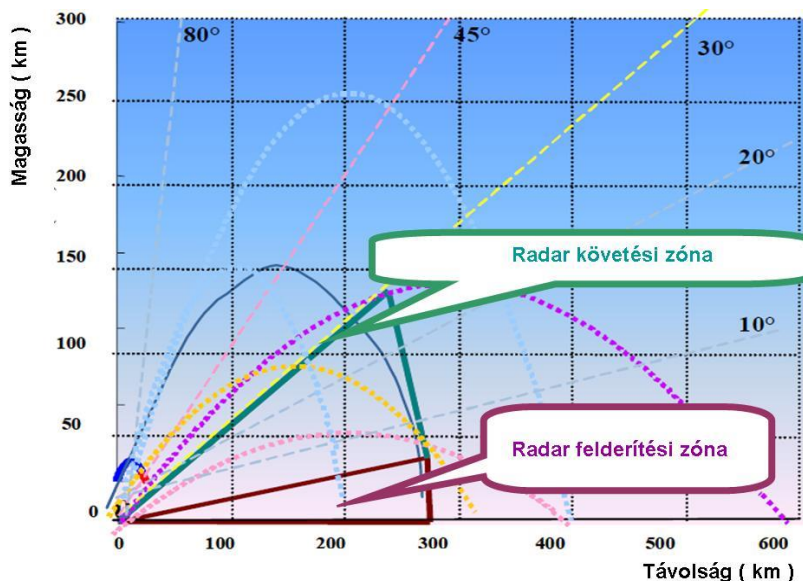


2. ábra Valós UAV és TBM test profilok⁶ [3]

⁶ Veres Mihály: Légvédelmi rakétafegyverek légterünk védelmében. Haditechnika, 2000. 3. sz. p. 8-16.

Air surveillance radar – TBM detektálás (útvonalba fogás) azonosítás – sajátosságai

A különböző elevációs mérési képességekkel rendelkező radarok céltárgy detektálási képességeinek távolság- és elevációban való mérési lehetőségeinek szemléltetésére készült a 3. ábra. Ezek a paraméterek, valamint a térletapogató ideje alapvetően behatárolják a TBM típusú célok detektálásának lehetőségeit. A 3. ábra és a 2. táblázat segítségével ez könnyen belátható. A 2. táblázat azt szemlélteti, hogy a TBM rakéta, ha a radarhoz képest 100, 300, 600 és 1000 km távolságon kerül indításra, hány másodpercig tartózkodik a különböző eleváció tartománnyal rendelkező radarok detektálási terében, ha átlagsebessége 100 és 1000 m/s.



3. ábra Ballisztikus rakéta pályák

A 2. táblázatból látható, hogy a TBM átlagsebességének növekedésével a radar által történő detektálhatósága lineárisan csökken. A TBM detektálhatósága értékelésénél figyelembe kell venni a távolfelderítő radarok 5, 10, illetve 12 másodperces adatfrissítési idejét, valamint azt a tényt, hogy a hamis riasztások miatt nem elég detektálni a TBM-et, de egyben útvonalba is kell fogni a detektált plotokat. Ezért az útvonalba fogáshoz legalább három egymás utáni céltárgy detektálást kell kiértékelni, melyet könnyebben teljesíthetők, ha a TBM mozgását az egymást függőlegesen részben átfedő sugárnyalábokban vett jelek detektálásával és párhuzamos kiértékelésével oldják meg. Amikor a céltárgy átlagsebessége a lehetséges megfigyelési idő alatt 100 m/s, akkor a 100 km távolságon indított rakéta útvonalba fogásához TBD legalább 20°-os elevációs tartománnyal rendelkező radarok esetén van esély, 10 s adatfrissítési idővel. Nagy sebességek ($v=1000$ m/s) esetén a 30°-os elevációs tartomány és a 10 s adatfrissítési idő csak 600 km távolságból indított rakéták detektálását teszi lehetővé.

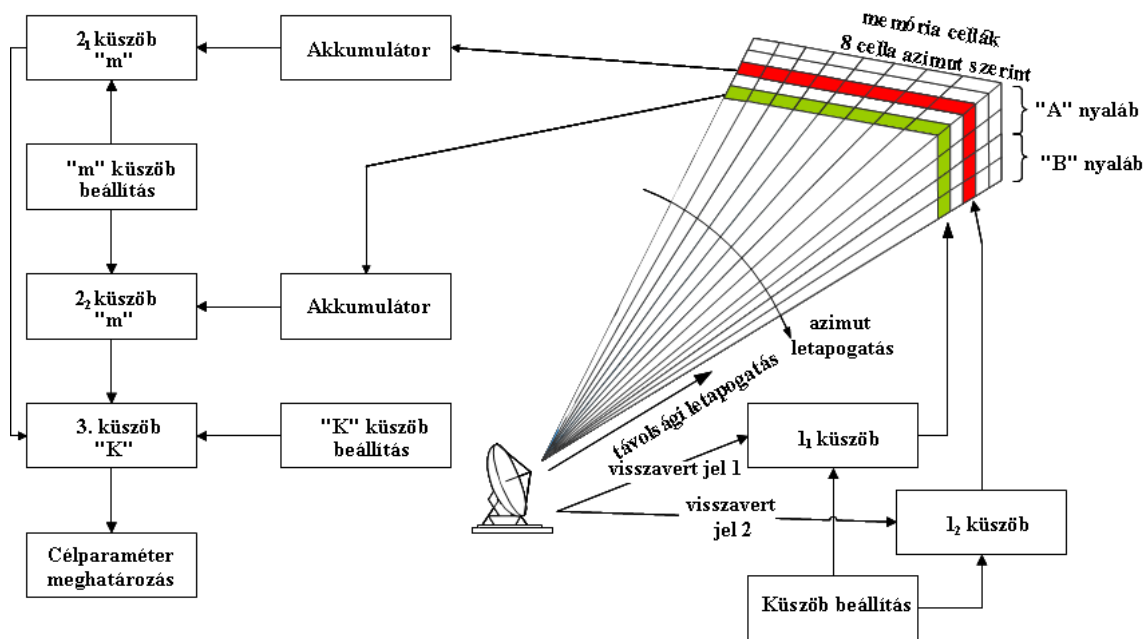
Az eredményekből megállapítható, hogy 10 másodperces adatfrissítéskor csak a radarhoz távoli indítások esetén van esély a TBM detektálására és útvonalba fogására.

$v=100$ m/s	100 km	300 km	600 km	1000 km
15°	26,8 s	80,38 s	160 s	267,9 s
20°	36,39 s	109,19 s	218 s	363,9 s
30°	57,77 s	173,2 s	346 s	577,7 s
45°	100 s	300 s	600 s	1000 s
$v=1000$ m/s				
15°	2,68 s	8,038 s	16,0 s	26,79 s
20°	3,639 s	10,919 s	21,8 s	36,39 s
30°	5,777 s	17,32 s	34,6 s	57,77 s
45°	10,00 s	30,0 s	60,0 s	100,0 s

2. táblázat A TBM detektálhatóság ideje

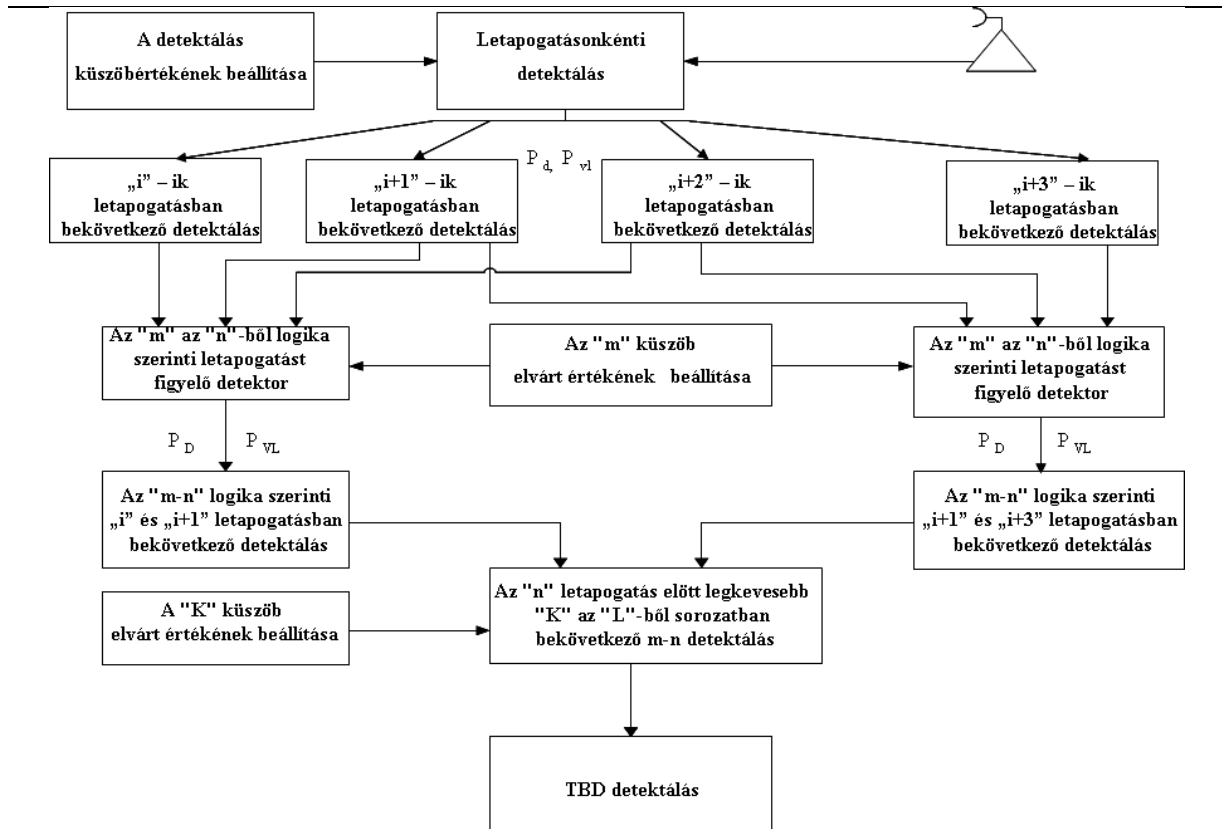
A TBM detektálás megvalósítása olyan nagy teljesítményű és antennanyereségű radarokkal lehetséges melyek mérési pontossága és felbontóképessége úgy oldalszögben, mint emelkedési szögben eléri a később meghatározott értékeket.

Az adatfeldolgozás megvalósítása történhet „hagyományos” 3 küszöbös módszerrel. A folyamat egyszerűsített vázlata a 4. ábrán látható.



4. ábra A háromküszöbös detektálás elve

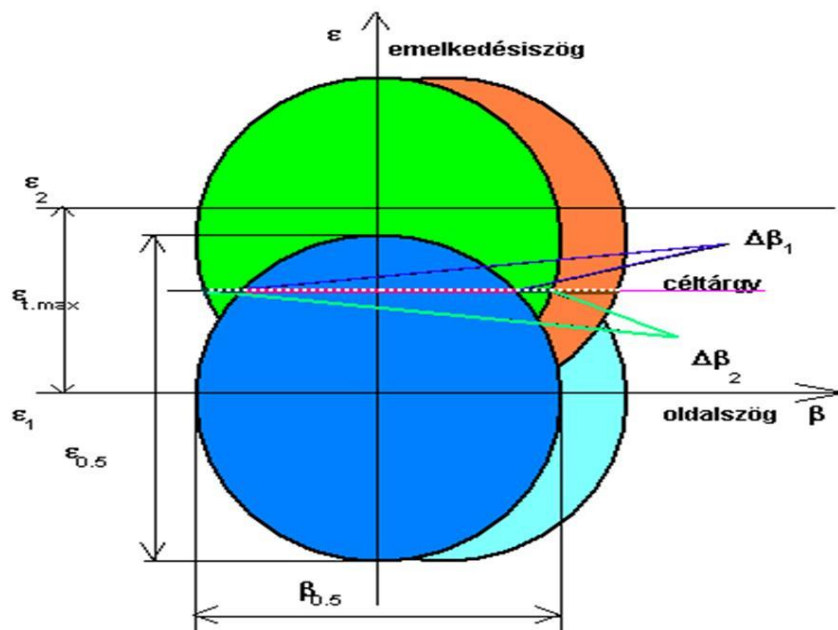
Az eljárás egyszerűsített algoritmusát az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra A háromküszöbös detektálás algoritmusá

Az 5. ábrán bemutatott algoritmus nagyobb biztonsággal képes a TBM eszközök detektálására, ha a küszöbképzés figyelembe veszi a radar sajátosságai. Ezek közül a legfontosabb a harmadik küszöb értelmezése („K” az „L”-ből logika) paraméter érvényességének pontos meghatározása.

A 6. ábra, a céltárgy emelkedési szögének meghatározásához szükséges nyalábparamétereket szemlélteti, melyre érvényes a 7. ábra korrelációs kapuval kapcsolatos megállapításai.



6. ábra Többszörös átfedésű rádiólokációs tér

ahol:

- $\varepsilon_{0,5}$ és $\beta_{0,5}$ – a félteljesítményű nyalábszélességet jelöli elevációban, illetve oldalszögben,
- $\Delta\beta_1$ illetve $\Delta\beta_2$ – a céltárgy helyén a sugárnyaláb oldalszög szélessége, míg
- $\varepsilon_{t,max}$ – a két sugárnyaláb maximumpontok szöghelykülönbsége.

A Neymann–Pearson–féle döntési szabály érvényességét feltételezve, legyen S_k darab olyan (logikai „1” és „0”-ból álló) sorozat, melyek hossza „S” és értéke $S = n+L-1$, S_k . Ha csak zaj van jelen, akkor az „S” sorozat kimenetén a vaklárma valószínűség⁷:

$$\Pi_{VL,k} = p_{vl}^1 (1 - p_{vl})^{S-1} \quad (1)$$

A teljes térre, minden S_k sorozat kimenetét felhasználva az összegzett vaklárma valószínűség:

$$\Pi_{VL} = \sum_k \Pi_{VL,k} \quad (2)$$

Általában ismert p_{vl} valószínűsége elvart jel-zaj viszonyra ezért a 2. egyenlet megoldható.

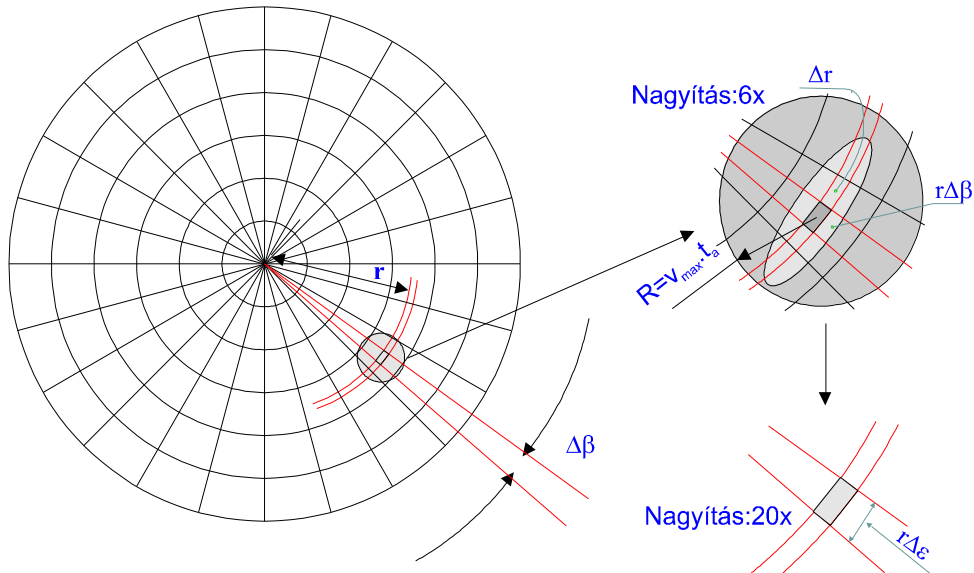
A detektálási valószínűségek meghatározása, hasonlóan a (1). egyenlethez:

$$\Pi_{D,k} = p_d^1 (1 - p_d)^{S-1} \quad (3)$$

A teljes térre, minden S_k sorozat kimenetét felhasználva az összegzett vaklárma valószínűség:

$$\Pi_D = \sum_k \Pi_{D,k} \quad (4)$$

Néhány praktikus számadat.



7. ábra A korrelációs kapu jellemzői

⁷ [BLA1]–64. oldal

A 7. ábra a korrelációs kaput és főbb jellemzőit szemlélteti az egyszerű megértés érdekében kétkoordinátás radar (PPI) indikátorán.

Vegyük észre, ha ismert a detektált cél radiális sebessége a korrelációs kapu mérete jelentősen csökken (az 7. ábrán a 6x nagyítás szürkített oválisa). A 7. ábra felhasználásával könnyen felírható az elemi cella térfogata 3D radar esetén. Az ábrából egyértelműen látható, hogy az elemi cella köbtartalma távolságfüggő. Pontosabban a terület és a térfogat azonos, de ennek következtében a belsejében található elemi cella mérete változó. Azok a céltárgyak, melyek a radar felderítési zónájának távoli határa közelében találhatók nagyobb oldalszög- és eleváció méretű oldalakkal fognak rendelkezni, mint azok melyeket a települési hely közelében detektál a radar, ugyanakkor a korrelációs kapu mérete nem változik.

Egy önálló radarra vonatkoztatva a korrelációs kapuban található elemi cellák számát (N) és a várható vaklárma–valószínűséget (hamis plotképzés, téves pályaképzés) egyszerűen számítható. Három különböző hullámtartományban üzemelő radar esetén a radarok felbontása és így az elemi cellák mérete jelentősen eltér egymástól. A különböző hullámtartományú radarok azonos méretű korrelációs kapuban található elemi celláinak számát szemlélteti az 3. táblázat, ahol a 3D radartól függő adatok:

- a radar(adó) indításának periódusideje 3,5 ms, adatfrissítési ideje 10 s (távolfelderítő radar üzem mód);
- a „VHF” sávú radar adójel pillanatnyi sávszélessége 1 MHz;
- az „L” („S”) sávú radaradó-jel pillanatnyi sávszélessége 4 MHz;
- az „X” sávú radaradó-jel pillanatnyi sávszélessége 8 MHz (kereső üzem módban) és 500 MHz céltárgy azonosítás üzem módban;
- $\Delta\varepsilon$ – a radar tartomány ismert legjobb felbontás értékei.
- Céltárgytól függő paraméterek:
- TBM típusú céltárgy maximális sebessége 1000 m/s;
- a céltárgy távolsága a lokátortól 10–600 km.

A 3. táblázat oszlopai és egymás után következő sorai szemléletesen bizonyítják, hogy minél jobb a radar felbontása, annál több a korrelációs kapuban lévő cellák száma.

$t_a=10$ s	„VHF”	„L” („S”)	„X” (8 MHz)	„X” (500 MHz)
$r=10$ km	$1,0 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^7$	$8,2 \cdot 10^7$	$5,0 \cdot 10^9$
$r=30$ km	$1,1 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^6$	$9,1 \cdot 10^6$	$5,5 \cdot 10^8$
$r=50$ km	$4,0 \cdot 10^4$	$7,6 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^8$
$r=75$ km	$1,7 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$	$8,8 \cdot 10^7$
$r=100$ km	$1,0 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^5$	$8,2 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^7$
$r=150$ km	$4,4 \cdot 10^3$	$8,4 \cdot 10^4$	$3,6 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^7$
$r=300$ km	$1,1 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^4$	$9,1 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^6$
$r=450$ km	$4,9 \cdot 10^2$	$9,3 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^6$
$r=600$ km	$2,7 \cdot 10^2$	$5,1 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^6$

3. táblázat A korrelációs kapuban található elemi cellák száma

A korrelációs kapuban található elemi cellák száma közvetlenül befolyásolja a céltárgy-detektálásra környezetében (a korrelációs kapuban) elvárható vaklárma–valószínűséget. Ha adott, hogy egy távolsági cellában a $P_{VL} = 10^{-6}$, akkor a különböző hullámtartományú, 3D radarok korrelációs kapuiból az eredő vaklárma–valószínűség az 4 táblázat szerint alakul.

$t_a=10$ s	„VHF”	„L” („S”)	„X” (8 MHz)	„X” (500 MHz)
r=10 km	0,63	0,99	1	1
r=30 km	0,11	0,87	0,99	1
r=50 km	0,04	0,53	0,95	1
r=75 km	0,01	0,28	0,75	1
r=100 km	0,01	0,17	0,56	0,99
r=150 km	0,004	0,08	0,30	0,99
r=300 km	0,001	0,02	0,08	0,99
r=450 km	0,0005	0,01	0,04	0,91
r=600 km	0,0002	0,005	0,02	0,75

4. táblázat A korrelációs kapuban megjelenő vaklárma értéke ($P_{VL} = 10^{-6}$)

A magas vaklármaszint esetén megállapítható, hogy értéke a különböző típusú céltárgy-detektorokkal beállítható, de a túl magas küszöbszintek alkalmazása jelentős jel-zaj viszony emelkedéssel jár. Kézenfekvőnek látszik a korrelációs kapu (és ezen keresztül a vaklárma) csökkentése az adatfrissítési idővel.

Legyen az adatfrissítési idő 1 s és egy távolsági cellában elvárt vaklárma-valószínűség $P_{VL} = 10^{-6}$. Ekkor a különböző hullámtartományú radarok korrelációs kapuiból az eredő vaklárma-valószínűség az 5. táblázat szerint alakul.

$t_a=1$ s	„VHF”	„L” („S”)	„X” (8 MHz)	„X” (500 MHz)
r=10 km	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-1}$
r=30 km	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$
r=50 km	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$
r=75 km	$0,4 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$
r=100 km	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$
r=150 km	$0,4 \cdot 10^{-6}$	$8,4 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$
r=300 km	$0,1 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$9,1 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$
r=450 km	$0,4 \cdot 10^{-7}$	$9,3 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$
r=600 km	$0,2 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$

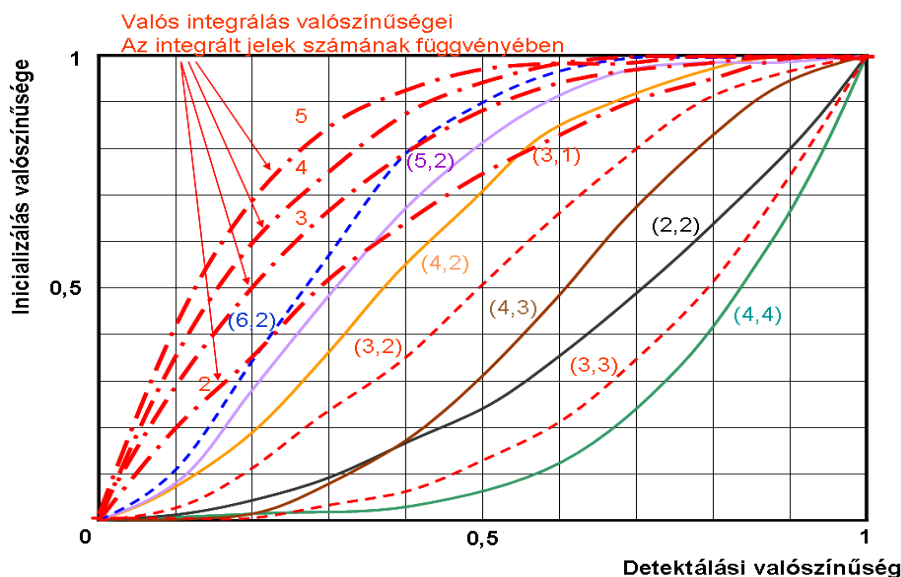
5. táblázat A korrelációs kapuban megjelenő vaklárma értéke ($P_{VL} = 10^{-6}$)

Úgy tűnik az adatfrissítési intervallum csökkentésével a korrelációs kapuban megjelenő vaklárma értéke közben tartható és szabályozható. A radar egyenlet szerint, ahhoz, hogy megfelelően nagy detektálási valószínűséget lehessen biztosítani nagy adóteljesítmények, antennanyereség és hosszúidejű céltárgy-besugárzás szükséges. Jelenlegi ismereteink szerint ez csak rendkívül költséges elektromos sugárnyaláb mozgatással, vagy nagyszámú (csak a volt Varsói Szerződés idején alkalmazott) radar rendszerbenntartásával biztosítható.

Az 4. és 5. táblázat további analiziséből következik:

- a radarok felbontásának növekedésével, jelentősen nő a korrelációs kapun belüli hamis plotképzés valószínűsége. Ez különösen a radarok települési helyei közelében magas;
- A céltárgy több egymás melletti cellában is detektálásra kerülhet a mozgásparaméterek függvényében;
- az azonos méretű korrelációs kapun belüli legkisebb vaklárma-valószínűségeket a VHF radarok biztosítják;
- a radar települési helyétől távolodva a korrelációs kapuban megjelenő vaklárma-valószínűség jelentősen csökken;

- az egyszerű kezelhetőség miatt, a korrelációs kapun belül célszerű a különböző hullámtartományú radaradatok-fúziójához azonos vaklármá- valószínűséget biztosítani. Ebben az esetben viszont a különböző hullámtartományú radarokban, a távolságtól is különbözőképpen függő elvárt vaklármá- valószínűségeket kell alkalmaznia;
- a mozgó ablak detektorok („K” az „L”-ből logika: K/L) elfogadási küszöbszintjeit változtatni kell a TBM radarhoz viszonyított elvárt távolságának függvényében. Közelítő feltételek: 6/6; 5/5; 4/4; 3/3; 5/6; 4/5; 3/4; 3/5; 2/3; 2/2; 1/2; 1/1; A lehetőségeket szemlélteti a 8. ábra.



8. ábra Az útvonal inicializálás valószínűsége⁸ [4]

A különböző típusú radarok információ feldolgozásánál az elemi cellatartalmat kell az adatfeldolgozó algoritmusoknak kezelni. Gyakorlatból ismert, hogy a TBM „VHF” radar számára Sw2 típusú céltárgy az „L” vagy „S” sávú radar számára Sw3 vagy Sw4, míg az „X” sávú radar számára Sw 4 típusú céltárgyként jelentkezik. Az algoritmusban optimális Swerling modell típusa az adott aktuális helyzetben elvárható függ továbbá a hullámterjedéstől és radar TBM irányába jelentkező RCS profil és Doppler komponensektől. Ismert, hogy az L frekvenciasávban üzemelő légtérrelenőrző radar esetén felszínről történő visszaverődés, valamint a légkör törésmutatójának megváltozása következtében:

- a radarhoz közeli tartományokra 10–100 km-ig a légkör törésmutató-változása nem okoz 1 dB-nél nagyobb eltérést.
- földközeli magasságokon 100 és 200 km között a veszteség elérheti a +20 dB (negatív „k” esetén).

Ha a radar TBM detektálás közben frekvencia hopping üzemmódra tér át a TBM detektálás (útvonalba fogás) azonosítás optimalizálásának algoritmusait a csoportos frekvenciaváltások függvényében újra kell képeznie, hiszen a PD és PFA romlás elkerülhetetlen a jel-koherencia elvesztésével. Korszerűbb megoldások alapja a „Particle filters” alapokon nyugszanak.

⁸ Ösz Sándor (1998): ARIS, Bevezetés és rendszerparaméter analízis. Egyetemi tankönyv. Budapest, ZMNE. p. 210

Napjaink gyorsan fejlődő polgári és katonai légi járműveinek aerodinamikai lehetőségei megkövetelik az RT rendszer folyamatos fejlesztését. Mivel ez a folyamat rendkívül költséges ezért szükséges a lehetőségek előzetes szimulációkat is magába foglaló felmérése, elemzése. A cikk áttekintette a TBM röppályák detektálásához szükséges és ésszerűen elvárható körülményeket. Osztályozta és értékelte a légtérkiterjesztés elvárásait és a legegyszerűbben megvalósítható algoritmusok nyújtotta előnyöket.

Megállapítható, hogy az olyan radarok vagy radar-rendszerek, amelyek 15° -nál kisebb emelkedési szögtartománnyal rendelkeznek párhuzamos jel feldolgozással még optimális TBM pozíciók esetén sem képesek a hatékony TBM detektálásra.

A TBM detektálás valószínűségének növeléséhez mindenképpen növelni kell a párhuzamosan feldolgozott jelek (csatornák által lefedett) az emelkedési szögtartományt legalább 45° -ra, de kívánatos a 70° fok és vagy az adatfrissítés idejét legalább 2–5 másodpercre.

Legfontosabb megállapításunk, hogy napjaink korszerű szoftver alapú jelfeldolgozással rendelkező radarjaiban aránylag kis költséggel flexibilisen utólag is beépíthetők a kor színvonalának megfelelő technikai megoldások.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] FIELD MANUAL No. 44-100 US Army Air Defense Operations. Washington DC, Headquarters of the Army, 1995. Chapter 2: Theatre. Chapter 3: Joint Counterair and Theatre Missile Defense Doctrine. 37-39. p
- [2] RUTTKAI LÁSZLÓ A légvédelmi rakétaegység harcászati ballisztikus rakéták elleni harcrendjének megtervezéséről, Hadtudomány 1999. 3–4. sz. p. 62–74
- [3] VERES MIHÁLY Légvédelmi rakétafegyverek légterünk védelmében. Haditechnika, 2000. 3. sz. p. 8-16.
- [4] ŐSZ SÁNDOR Bevezetés és rendszerparaméter analízis. Egyetemi tankönyv. (1998) ARIS, Budapest, ZMNE. p. 210