

Balajti István*

A rádiófrekvenciás radarhálózatok előnyei és megvalósításuk kihívásai

Az ELM–2084 rádiólokátor-technológia alapján

BEVEZETÉS

Izraeli technológiát tartalmazó radarokat vásárol a Rheinmetall Canada vállalattól a Magyar Honvédség – jelentette be Maróth Gáspár, a védelmi fejlesztésekért felelős kormánybiztos. Az ELM–2084 típusú légtérelenőrző, légvédelmi és tűzérési felderítő radarok várhatóan 2022-től állhatnak a magyar haderő rendelkezésére. Az együttműködés kutatás-fejlesztési programokat is tartalmaz. [1] Ezzel a beszerzéssel eldőlt, hogy az elkövetkező évtizedekben a magyar légvédelem és tűzérési érzékelő elemek gerincét az ELM–2084 MMR (Multi-Mission Radar – többfeladatú rádiólokátor) radarcsalád technológiája és

1. ábra. Az ELM–2084 MMR radar, terepjáró tehergépjárműre telepítve [2]



továbbfejlesztésének lehetőségei fogják meghatározni. A szerződésben foglaltak nem nyilvános tartalma miatt a radarról a szerző csak a gyártó cég weboldalán található adatokkal, valamint az interneten fellelhető információkkal rendelkezik. Az 1. táblázat összefoglalja az ELM–2084 rádiólokátor (továbbiakban: radar) ismert műszaki paramétereit.

Az „S” frekvenciasáv alkalmazásának előnyei az „L”, UHF és VHF frekvenciasávokhoz viszonyítva: a nagyobb 3D-s mérési pontosság – és azonos antennaerősítési tényezők esetén – a jelentősen kisebb antennaméret, ezért optimális a mobil és többfeladatú radaralkalmazásokhoz.

A frekvenciasáv további sajátossága:

- azonos típusú repülőeszközök hatásos radarkeresztmetszete (RCS – Radar Cross Section) általában kisebb, mint az alacsonyabb frekvenciasávokban;
- napjainkban szinte minden lopakodó-technológiát erre a frekvenciasávra optimalizálnak.

Az ELM–2084 MMR MŰKÖDÉSE, ALRENDSZEREI ÉS ÉLETTARTAMCIKLUSRA VONATKOZÓ LOGISZTIKÁJA

A korszerű radarmegoldások antennarendszereit napjainkban többnyire fázisvezérelt antennarendszer-kialakítással valósítják meg, amelyek közül a legkorszerűbb – egyúttal legbonyolultabb – rendszer az aktív fázisvezérelt antennarács (AESA – Advanced Active Electronically Steered Array) -technológia alkalmazása. Így van ez a jelen beszerzés alapját képező ELM–2084 radar esetében is. Az 1. táblázatban jelölt alkalmazási üzemmódtípusok gyorsan változó digitális antenna-iránykarakterisztika kialakítását követelik meg, mivel az elvárt feladatok és üzemmódok realizá-

ÖSSZEFOGLALÁS: Az elmúlt években a Zrínyi Honvédelmi és Haderőfejlesztési Program keretében rendkívüli mértékben felgyorsult a Magyar Honvédség és ezzel párhuzamosan a magyar hadiipar modernizációja. Az új beszerzési eljárás haditechnikai eszközök és technológiák alapjaiban megváltoztatják a magyar haderő képességeit és a védelmi ipar lehetőségeit. Ha a nemzetközi védelmi ipari együttműködésekben rejlő gazdasági, katonai potenciált a kutatás-fejlesztés területén és az eszközök élettartama alatti kiszolgálásában jelentkező lehetőségeket sikerül jól kihasználni, akkor jelentősen növekedhet Magyarország katonapolitikai presztízse is. Költséghatékonyan megoldhatóvá válik a magyar hadmérnöképzés és a katonai vezetés felkészültségének a kor követelményeinek megfelelő színvonalon tartása.

KULCSSZAVAK: Zrínyi Honvédelmi és Haderőfejlesztési Program, rádiólokátor, kvázi monostatikus (KM), mesterséges intelligencia, ELM–2084, ELM–2090

ABSTRACT: In recent years, the modernisation of the Hungarian Army and the Hungarian military industry have been accelerated extremely. It is in the process of acquiring advanced military equipment and technologies, which can fundamentally change the Hungarian military and its industrial conditions of the past 30 years. If we can take advantage of these opportunities in developing economic and military research, as well as creating service assets for the life-cycle support that inherent in international military cooperation, the military political prestige of Hungary can be significantly increased. The readiness skills of the Hungarian military engineering and military leadership can be also solved in a cost-efficient way and to be elevated to the requirements of our time.

KEY WORDS: Zrínyi Defense and Armed Forces Development Program, radar, Quasi Monostatic (KM), Artificial Intelligence, ELM–2084, ELM–2090

* Kandidátus, nyugállományú alezredes, NKE HHK Katonai Műszaki Doktori Iskola. ORCID: 0000-0003-3566-2904

1. táblázat. Az ELM-2084 MMR AESA*-radar specifikációja (A szerző szerkesztése a [2] [3] alapján)

	Légtérellenőrzés		Tűzérésközök helyzetmeghatározása
	Nagy hatótávolság	Réskitöltés	Lövedékek, „kisarakták”
Üzemi frekvenciasáv	„S” - sáv (hullámhossz = 10 cm) több párhuzamosan képzett sugárnyalábbal		
Telepítési mód	Mobil, áttelepíthető (légi szállítással is), fix telepítés		
Hatótávolság (Maximális)	475 km	250 km	100 km
Oldalszög/lefedettség	120° szektor, vagy 360°		120° szektor
Helyszög/lefedettség (Max. 50°)	0–33 km magassági tartományban	0,1–3 km magassági tartományban	Szükség szerint átkonfigurálható
Mérési pontosság	Nagy pontosságú 3D		0,3% CEP**
Útvonalképzés	<= 1100 db; <= 30 antennafordulat percenként		200 céltárgy/perc
Aktív zavarvédelem	Korszerűnek hirdetett, részleteiben ismeretlen		
Céltárgy-azonosítás	IFF***, azonosítás és céltárgy-osztályozás		
Hadrafoghatóság	Nagy megbízhatóság, fokozatosan leépülő redundáns alrendszerek		

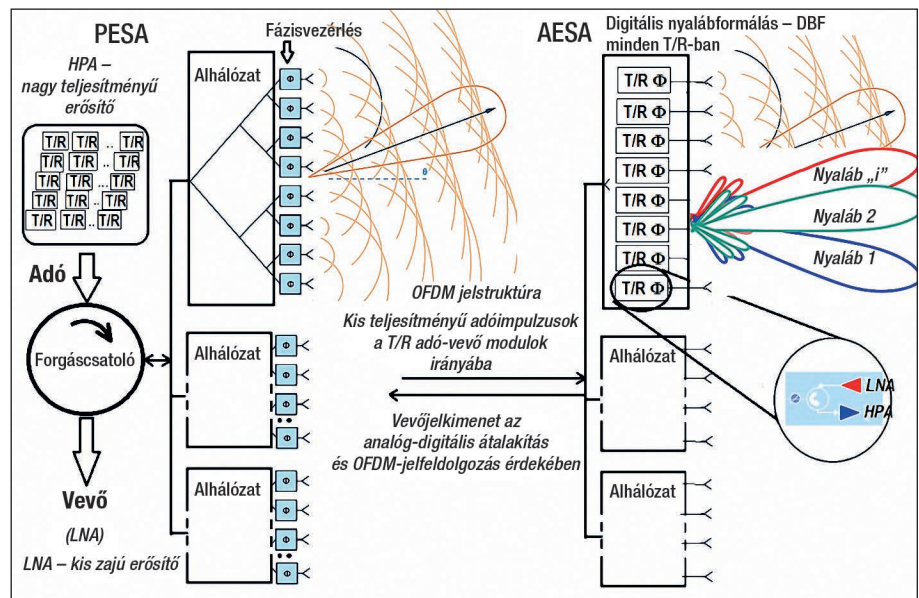
* AESA – Advanced Active Electronically Steered Array (élvonalbeli elektronikus sugárpozicionálással rendelkező fázisvezérelt antennarács); ** CEP – Circular Error Probable (körkörös mérésihiba-valószínűség); *** IFF – Identification Friend or Foe (barát-ellenség azonosítás)

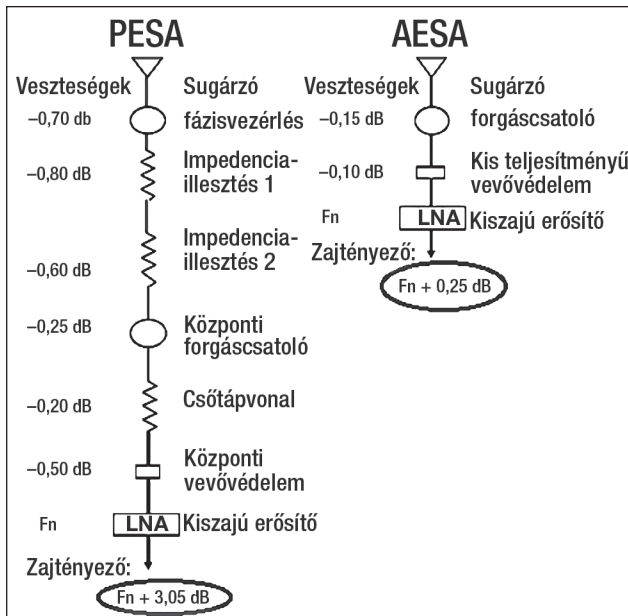
lásához különböző adójelforma, impulzusteljesítmény, nyalábszélesség és oldalnyalábszintek szükségesek. Nagy hatótávolságú légtér ellenőrzés esetén lassan forgó antennát vagy szektoros üzemmódot célszerű alkalmazni, hogy legyen elég idő a nagy távolságokon található céltárgyakról visszaverődő energia összegyűjtésére, integrálására, az elvárt jel-zaj+zavar viszony (SINR – Signal-to-interference-noise ratio) növelésére. Ideális esetekben csak jel-zaj viszony (angol kifejezéssel Signal-to-noise ratio – SNR vagy S/N) a hasznos és a vevőzaj aránya dB-ben kifejezve. Réskitöltő feladatok esetén, a céltárgyak közelsége miatt nagy a céltárgyak jel-zaj+zavar viszonya, ugyanakkor közvetlen veszélyt jelentenek a védendő objektumokra és folyamatosan manővereznek. Ezért a céltárgyakat – álló célzónában történő detektálás után – néhány másodpercen belül útvonalba kell fogni és azonosítani. A megbízható útvonalképzéshez a céltárgyak gyakori „helyzetmérése” (plot képzése) szükséges, amely manőverező, pilóta nélküli eszközök, drónok esetén két másodperc időtartamot igényel. A harmadik, a tűzérésközök helyzetmeghatározása üzemmódban azonban a fő működési jellemző jelentősen eltér az előzőktől. Ez esetben egy adott szektorban, a földközélpelben megjelenő tűzérésközök lövedékek, kisarakéták helyzetét kell detektálni, majd útvonalba fogni, azonosítani, osztályozni, és meghatározni a lövedék röppályájának kezdeti és becsapódási pontjait. Ezután – ha lehetséges – azonnal aktivizálni kell a saját védendő objektumok védelmi rendszereit, és csapásmérést kell indítani az ellenséges tűzérésköz helyzetkoordinátaira. A feladatok ellátá-

sa érdekében a radar egy adott szektorban folyamatosan pásztázza a rádióhorizontot, várva a lövedékek indítását. Ha ez megtörténik, a tűzérésközök követését, a horizontot pásztázó sugárnyalábtól frekvenciában (vagy adójelparamétereiben „ortogonálisan”) eltérő és mérési pontosságban jobb paraméterekkel rendelkező nyalábokkal folytatják. A különböző céltárgyakra vonatkozó adatbázisok segítségével automatikusan meghatározhatók a lövedékek mozgásparaméterei, típusai és kiszámíthatók az ellenintézkedésekhez szükséges adatok.

A felvázolt feladatok megoldásához a legnagyobb kihívást az elektromos nyalábmozgatáskor fellépő magas oldalnyalábszintek jelentik, amelyek közeli, illetve állócélok vagy interferencia esetén intenzív hamis célképződések kialakulásához vezethetnek. Több, párhuzamosan előállí-

2. ábra. Az aktív és passzív fázisvezérelt antennák felépítése (A szerző szerkesztése)





3. ábra. A PESA- és AESA-antennák nagyfrekvenciás jelvesztései (A szerző szerkesztése a [4] alapján)

tott iránykarakteristika esetén a megoldandó kihívások jelentősen növekednek. Az antennanyereség és az irányélességi szög az antenna felületének nagyságától függ, amely napjainkban a rendszerben lévő „S” sávú radarok esetén 5000–10 000 sugárzó elem együttes rendszeréből áll. Az elmúlt 10 évben az elvárt 5–12 kW közötti átlagos adóteljesítmény már gazdaságosan kezelhető gallium-nitrid (GaN) technológiát alkalmazó adó-vevő (T/R – Transmit Receive) modulokkal. A GaN alapú adó-vevő AESA-rendszerű radar esetén az antennarendszer mögött szerelt modulokban, míg a passzív fázisvezérelt antennarács (PESA – Passive Electronically Steered Array) alkalmazása esetén külön adókabinban található. A PESA- és az AESA-radarok rendszerstruktúrájában lévő különbségeket szemlélteti a 2. ábra.

A két megoldás közötti fő különbségek az AESA-technológia több párhuzamos nyálábformálásában, az OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiple Access (ortogonális frekvenciaosztásos multiplex mód) megvalósíthatóságában, a nagyfrekvenciás jelek veszteségében, az antenna hőképeben, és a 15-20 évre előrevetített logisztikai költségekben jelentkeznek. A nagyfrekvenciás jelek veszteségeiben tapasztalható különbséget szemlélteti a 3. ábra. Megállapítható, hogy az AESA-radar veszteségei 3 dB-lel kisebbek a PESA megoldáshoz viszonyítva, amelynek következtében ezeknek a radaroknak a hatótávolsága – azonos körülmények, adóteljesítmények, antennaméreték és RCS esetén – 25%-kal nagyobb. (A radaregylet alapján 12 dB jelszint-növelés megduplázza a radar hatótávolságát.) További előnye a megoldásnak az élettartamciklusra vonatkozott, a nagy teljesítményeket elviselő, központi forgácsoló csőtápvonal és impedancia illesztések mellőzése miatt előforduló kevesebb kritikus meghibásodás. Általában az AESA-technológia T/R (adó/vevő) fázisvezérlést is tartalmazó moduljainak performancia-csökkenése, a szomszédos T/R-modulok „szoftveres” átkonfigurálásával a T/R-elemek 30%-ának meghibásodásáig, üzem közben átkonfigurálható, mely a kívánt sugárzási karakteristika minél nagyobb mértékű megőrzését célozza.

A hőelvezetés problémáját valószínűleg megoldották az ELM-2084 radar esetén, hiszen a ventilátor és egyéb nagy

méretű hőelvezető egységek nem láthatók a radarról készült fotókon. A tapasztalatok alapján a nagy hőterheléssel járó sugárzókat, T/R modulokat, változtatható méretű antennacsoportokba szervezik, amelyek vezérlése és jelfeldolgozása szoftvermodulok alkalmazásával történik. Ezek a műszaki megoldások lehetőséget nyújtanak a radar mérési szabadságfokának flexibilis növelésére.

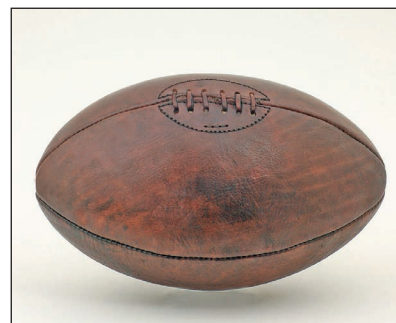
Az AESA-RADAROK ÉLETTARTAMCIKLUSRA (15–20 ÉV) VONATKOZÓ LOGISZTIKAI TÁMOGATÁSA

A korszerű radarok költséghatékony élettartamciklus-kihasználásának megszervezése területén jelentkező lemaradás oka elsősorban az lehet, hogy a Magyar Honvédségben az elmúlt 30 évben nem történt radarbeszerzés, és a korszerű RAT-31DL radarokat a NATO tartja fent. A fő kihívásokra megoldást jelenthet a Rheinmetall Canada vállalattal kötött együttműködési szerződés, amely tartalmazza a Magyarországon történő összeszerelést, gyártást és a közös kutatás-fejlesztést (K+F). Ebben a tényben még a szerződés részleteinek ismerete nélkül is biztosak lehetünk, hiszen ezen feltételek megléte nélkül lehetetlen a nemzetközi tendereknél szokásos „a minimális felhasználói-műszaki elvárásokat, minimális áron” beszerzett radar vételi árának 4-7 szeresét kitevő profitot, a 15-20 éves élettartamciklus során realizálni. A szerző tapasztalatai szerint az eredeti gyártóval kötött élettartamra szóló logisztikai támogatási szerződés lehetővé teszi a „mindkét fél csak nyerhet” helyzet megvalósulását, hiszen az együttműködés mindkét fél érdeke. Ezáltal az üzemeltetés során bekövetkező felhasználói követelmény-kiegészítések, saját kezelőállományunk működtetés során megmutatkozó szakmai hiányosságai, a hazai gyártási és K+F lehetőségek kihasználásával folyamatosan kiküszöbölhetők olyan területek is, amelyek – hagyományos szerződések esetén – az eredeti radar gyártója extra profitot realizálhat.

Fontos tény, hogy jelentős költségek takaríthatók meg a radarok professzionális logisztikai kiszolgálásával, ha rendszeres időközönként az eredeti gyártótól független „in-situ” radarperformancia vizsgálatra kerül sor, amely túlmutat a beépített tesztek lehetőségein, és biztosítja a radarperformancia elvárt szinten tartását, és a nagy értékű, hosszú üzemidő-kieséssel járó meghibásodások előrejelzését.

Az ELM-2084 MMR PERFORMANCIA-NÖVELÉSI LEHETŐSÉGEI

Az 1980-as évek elején világossá vált, hogy a céltárgyakat és a viselkedésüket leíró különböző RCS fluktuációs modellek jogilag nehezen kezelhetők a katonai átvevők számára. Ezért megfogalmazódott az igény egy egyszerű, ugyanakkor hatékony RCS-re vonatkozó elvárás kidolgozására, amelyet az Amerikai Egyesült Államokban használt szabványos



4. ábra. Rögibilabda, mint a szabványos hatásos radarrezisztmetesz [13]

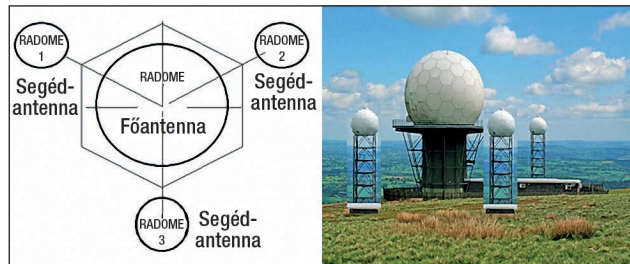
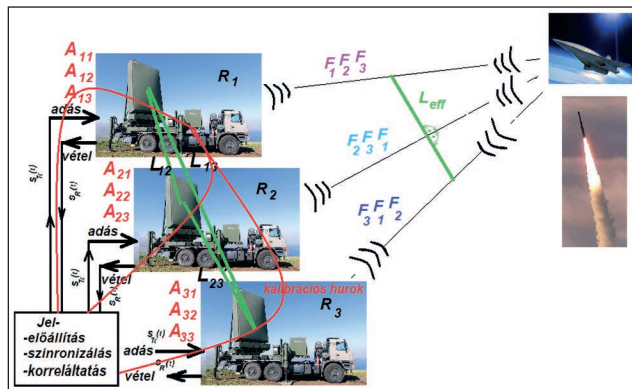
technikai Intézet koordinálta, amelynek rádióelektronikai szegmensét – ezen belül a rádiólokátorok fejlesztését – dr. Jáky József kormánybiztos vezette. A rádiólokációval kapcsolatos elméleti kutatásokért dr. Bay Zoltán fizikus, míg a rádiólokátorok építéséért dr. Istvánffy (Rainer) Edvin gépészmérnök volt felelős. 1943. december 20-án, Sári község közelében hadműveleti szolgálatba állították az első teljesen magyar fejlesztésű távolfelderítő rádiólokátorokat. [6] (6. ábra.)

A Sas-radarok a „méteres”, más néven VHF hullámtartományban, 120 MHz-en üzemeltek, szimmetrikus táplálású, passzív, fázisvezérelt antennaráccsal (PESA). A vízszintes antenna nyalábszélessége $22,5^\circ$ volt, amely az oldalszög mérési pontosságának növelése érdekében kiegészült monopulzusos irányméréssel. Az elméleti szabadtéri céltárgydetektálási távolság – Liberator típusú, RCS = 10 m^2 -es céltárgyat alapul véve – 136 km volt. Ebben az időben ismerték fel, hogy a méteres hullámtartományban a földfelszínről történő reflexió megnöveli a céltárgyak maximális detektálhatóságát, ez esetben kb. 200 km-re. Az egymástól 200 m-re települt Sas-1 és Sas-2 közül az egyik percnként háromszor tapogatta le körkörösén a légeretet, míg a másik csak a kijelölt fő szektort pásztázta. Így a radarok minden letapogatási ciklus alatt ugyanazon $22,5^\circ$ -os szektort vizsgálták. Gyakran előfordult, hogy ezekben az esetekben az Alpok fölött repülő Liberator-kötélekeket 400–500 km távolságban detektálták. Abban az időben csak rendellenes hullámterjedéssel tudták magyarázni a jelenséget, de napjainkban már ismert, hogy ez a radarok úgynevezett kvázi monostatikus (KM) telepítésének volt köszönhető. Ez esetben a rádiólokátorok adóteljesítményei, adó- és vevőantenna-nyereségei, valamint a céltárgyról visszavert jelek összeadódnak, ezáltal a SINR 12 dB-lel nő, és ez a Sas-1 és Sas-2 radar hatótávolságát megduplázták.

Természetesen az előbb felvázolt alkalmazási elvet az ELM-2084 radarokkal is ki lehet használni, pl. a 7. ábrán jelzett módon. Ezen elgondolás szerint, a radarok alapvetően önállóan hajtják végre harcfeadataikat, de előkészíthetők KM üzemmódban történő működésre is. Ez utóbbi működés esetén települjön a három radar 10 km-es sugarú körön belül egymástól L_{12} , L_{13} , és L_{23} távolságra.

A szakirodalomban többféle KM működési eljárást fogalmaznak meg, amelyek közül a a szerző – a megvalósíthatósági kihívások ellenére – az alábbi megoldást tartja optimálisnak. [4] [8] Ez esetben a három radar egyikét fő- vagy referenciadarra jelölik ki, amelynek alapjel-előállító egységét használja a másik két radar, ehhez szinkronizálják a radarok sugárnyaláb-mozgatását és az AESA-k adásvételi folyamatait. A feladat megoldása megkívánja a három radar RF jelelőállításának korreláltatását, amely a rendsze-

7. ábra. Az ELM-2084 radarok kvázi monostatikus telepítése (A szerző saját vázlata)

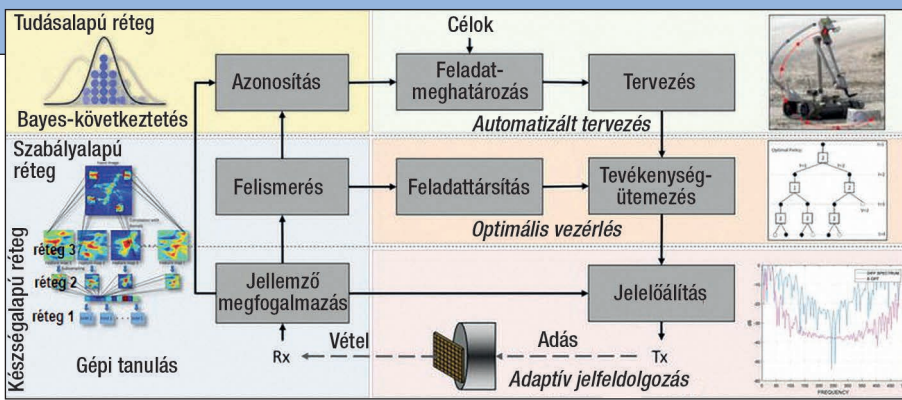


8. ábra. Aktív zavarok és önrávezető rakéták elleni védelem rendszertopológiája (A szerző saját vázlata)

rek korrelációs hurkain keresztül (A_{11} , A_{12} , A_{13} , A_{21} , A_{22} , A_{23} , A_{31} , A_{32} és A_{33}) megvalósítható. Az egyszerűsített leírás miatt fogadjuk el, hogy minden kisugárzott impulzus három vivőfrekvenciát használ a 7. ábrán jelzett R_1 , R_2 és R_3 radarok kisugárzási sorrendjében. A referenciadar és a céltárgy közötti egyenesre merőleges metszet határozza meg a radarok közötti hatásos távolságot, jelölése: L_{eff} . Ennek nagysága behatárolja a KM-konfiguráció mérési adatainak pontossági növekedését. A felvázolt KM-radarkonfiguráció performancia-növekedése könnyen belátható a Sas-1 és Sas-2 rendszernél ismertetett módon. Három ELM-2084 radar KM üzemmódban háromszorosára növeli a rendszer adójel-teljesítményét, az adó- és vevőantennák nyereségét és a céltárgyról visszavert impulzusok számát. Ezek az alrendszer-performanciák összeadódnak, ezért a radar-egyenletben szereplő SINR 18 dB-lel nő. Ez fizikai jelenség a céltárgydetektálás hatótávolságát két és félszeresére növeli. A radaregyenleten alapuló Blake chart számítások paramétereinek változtatásával több olyan elméleti ELM-2084 üzemmód is kidolgozható, amelyeknél az alrendszer-paraméterek lehetőséget adnak a szabványos rögbilabda 80 km távolságon történő detektálására. Három radar KM üzemmódban történő alkalmazása esetén ez a távolság 200 km. További hatótávolság-növekedés érhető el a céltárgykörnyezetre vonatkozó korrelációs kapuban alkalmazható, változó küszöbértékképző algoritmusokkal. (9. és 11. ábra.)

Korszerű KM-radaralkalmazásokra példa a 8. ábrán bemutatott elrendezés. Ez a rendszertopológiá megduplázza az eredeti radar hatótávolságát, miközben harcrtéri helyzetekben megoldja és/vagy kiterjeszti az aktív zavarokkal és az önrávezető rakétákkal szembeni védelmet. Ebben az elrendezésben a rendszer középpontjában RADOME² alatt található az ELM-2084, három egymástól 120° -ban elhelyezkedő segéd AESA antennával körülvéve. A segéd AESA-k felépítésükben megegyeznek a fő antennával, de méretük annak csak egyharmada. A fő- és segédantennák sugárnyaláb-mozgatása, jelelőállítása közös, és megegyezik az előzőekben leírtakkal. Mindkét ismertetett példa harcrtéri körülmények közötti legfontosabb tulajdonsága a két-háromszoros hatótávolság-növekedés és a kimagasló aktív zavarvédelmi képesség.

Tény, hogy a hadseregek személyi állományának drasztikus csökkenésével azok kognitív lehetőségei jelentősen csökkentek. Ennek alapvető oka, hogy a múltban a katonai eszközök kezelését kiképzéssel és hadgyakorlatokkal magas szinten lehetett tartani. Napjainkra azonban a katonák szerepét átvették az adott feladatra optimalizált számítástechnikai algoritmusok, IT-megoldások, amelyeket elsősorban szimulált feladatokra fejlesztettek. Ugyanakkor a radarok által alkalmazott jelmodulációk, jel- és adatfeldolgozó algoritmusok, eljárások a szakirodalomban hozzáférhető és megtanulható, rádiófelderítéssel alkalmazásuk mechanizmusa kiismerhető és kognitív képességek hiányában a kisugárzott jel „hatékonyan” manipulálható. Ezért



9. ábra. A kognitív radararchitektúra háromrétegű modelljét támogató technológiák [9]

komoly veszélyként merül fel, hogy az automatizált katonai műszaki megoldások, a robotizáció, a kognitivitás hiányában nagyon sebezhető újfajta elektronikai harceszközökkel. A további veszélyforrások kiküszöbölése érdekében fontos szempont a műszaki katonai tudományok kutatásában rejlő újfajta szemléletmódok, lehetőségek beépítése.

Az érzékelt problémák kezelésére 10-15 éve intenzív kutatások kezdődtek a radarok kognitív képességeinek kialakítására. Ennek lényege, hogy a dinamikus, állandóan változó radarkörnyezetet a mesterséges intelligencia különböző szakterületein jelentkező eredmények felhasználásával megfigyeljük, értékeljük, és a radarokban már széleskörűen alkalmazott adaptív eljárásokon túlmutató kognitív képességekkel kiegészítjük. [4] [8] [9] A 9. ábrán látható elrendezés a Rasmussen-modellhez³ hasonló kognitív radararchitektúra kifejlesztéséhez minden kognitív alfunkciót három rétegbe és öt különböző radar-jelfeldolgozási technológiába sorol. A három réteg: készisgalapú, szabályalapú és tudásalapú rétegek, míg az öt radar-jelfeldolgozási technológia: a gépi tanulás, a statisztikai alapú Bayes-következtetések⁴, az adaptív jelfeldolgozás, az optimális vezérlés és az automatizált tervezés témaköreibe csoportosítható. A szerző nem rendelkezik információval az ELM-2084 radarban alkalmazott kognitív algoritmusokról, de biztos abban, hogy a magyar szakemberek számára komoly kihívást jelent azoknak a feladatoknak a megoldása, amelyek nyomán követhetővé válik a radartechnológia nemzetközi fejlődése.

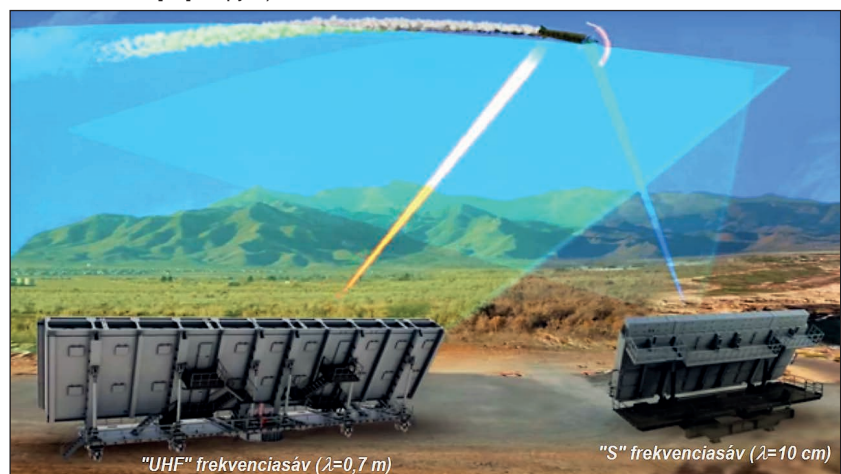
A STRATÉGIAI, KORAI ELŐREJELZŐ RADARRENDSZEREK SZÜKSÉGESSÉGE

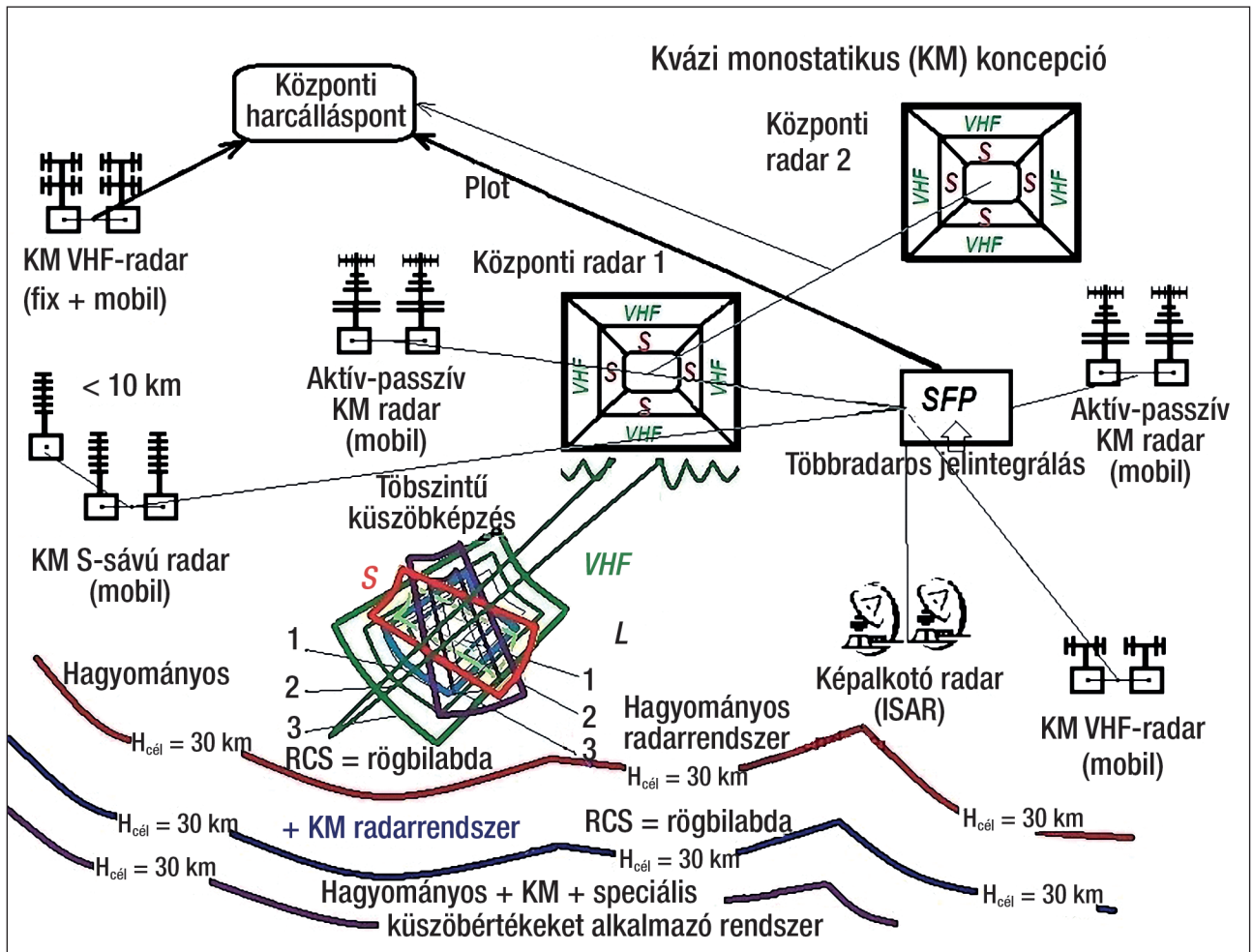
Napjaink légvédelmi rendszerei hatástalanok a hiperszonikus fegyverek ellen, mivel ezek a radarok légtérelenőrzési terei fölött repülnek. Az interkontinentális rakéták elleni védelem lehetőségei is korlátozottak, mivel a rakéta a röppályák alatt, a 23-60 km-es magassági tartományban manővereznek. A megoldást a légtérelenőrző, nagy hatótávolságú radarrendszerek performancia-növelése jelenti: magasságban 33 km-ről legalább 60 km-re, míg távolságban 460 km-ről 1200 km-re. [10] A javasolt műszaki megoldások között szerepel a lengyel radarszakemberekkel közösen kifejlesztendő nagy hatótávolságú VHF-radar KM alkalmazásban. Mindkét ország jelentős tapasztalatokkal rendelkezik a VHF-radarok üzemeltetése területén, domborzati viszonyaik optimálisak a VHF-radarok telepítésére, és a két országban települt korai előrejelző VHF-radarok „belátnak” egymás légterébe. Ez utóbbi lehetőséggel megoldható a VHF-radarok holtkúpjában

10. ábrán bemutatott ELM-2090 TERRA stratégiai, két frekvenciasávban üzemelő radarrendszer (Strategic Early Warning Dual Band Radar System) megvásárlásával. [12] Eredetileg ezt a rendszert rakétavédelemre és alacsony műholdpályák megfigyelésére fejlesztették ki, de átalakítható hiperszonikus fegyverek detektálására és követésére is. Az „S” frekvenciasávban üzemelő radar megépíthető 5-6 db ELM-2084 típusú radar gallium-nitrid technológiát alkalmazó adó-vevő GaN T/R és SW moduljain, míg az UHF-radart célszerű lehet megvásárolni, vagy a VHF radarra áttervezni. Az ELM-2090 rendszer beszerzése valószínűleg nagyságrendileg költségesebb lenne, mint a lengyel szakemberekkel közös KM VHF-radar-fejlesztés.

A 11. ábrán a szerző által korszerűnek tartott magyar légtérelenőrző rendszer összefoglalása látható. A kvázi monostatikus koncepció központi eleme a két helyszínen települt, két frekvenciasávban üzemelő, nagy teljesítményű radar. Ezek fix településűek, de a rendszer szerves részét képezik a fix és mobil telepítésű KM VHF-radarok, aktívpasszív radarok, a három radarból álló mobil ELM-2084 radarcsoport, a képalkotó radar (ISAR – Inverse Synthetic Aperture Radar) és a központi harcálláspont. A 11. ábrán jelölve látható a rendszer maximális hatótávolsága három működési eljárás esetére. A lehetőségek érzékeltetésére a céltárgy legyen *rögbilabda*, *RCS=conts.*, amelyet minden esetben $H_{060} = 30$ km-en kell detektálni, mivel napjaink széleskörűen elterjedt „hagyományos” radarrendszerei ezt teszi lehetővé. Ehhez viszonyítva a hagyományos radarrendszer KM alkalmazásokkal kiegészülve, minimálisan megduplázza a *rögbilabda* detektálhatóságát, és ez – a fő veszélyeztetettségi irányokban – tovább növelhető a „több-radaros jelintegrálást” speciális küszöbértékeket alkalmazó korrelációs kapukkal.

10. ábra. ELM-2090 TERRA stratégiai, korai előrejelző radarrendszer (A szerző szerkesztése a [12] alapján)





11. ábra. Elképzelés a magyar légtérelenőrző rendszer korszerűsítésére (A szerző szerkesztése)

ÖSSZEGRZÉS

A tanulmány a magyar légvédelem radarrendszerének korszerűsítésében jelentkező, legjelentősebb műszaki megoldások áttekintése. A rádiófrekvenciás radarhálózatok előnyei világosak: a jelenlegi megoldásoknál jelentősen nagyobb céltárgyfelderítési távolság, mérési pontosság, felbontóképesség és zavarvédelem. Hagyományos és kvázi monostatikus radarok „szövevényes” kapcsolatinak kiépítését igényli, amelyek csak képzett hadmérnökökkel oldhatók meg. Az új műszaki kihívások, a beszerzés alatt álló ELM-2084 radartechnológia hazai adaptálásának útjai és feladatai körül csoportosíthatók. A jelen tanulmány természetesen csupán egy elképzelés, de remélhetőleg érzékelteti a XXI. század radarrendszer-fejlesztésekben lévő új típusú kihívások nagyságrendjét és a megvalósításukban rejlő katonai és tudományos lehetőségeket. A Rheinmetall Canada vállalattal kötött szerződés – az eszközök beszerzésén túl – a hosszú távú együttműködés során megvalósuló kutatási- és fejlesztési programoknak köszönhetően figyelemre méltó lehetőséget tartogat a magyar radarszakértők számára is.

HIVATKOZOTT IRODALOM

[1] „Új radarokat vesz a honvédség” *hirado.hu*, <https://hirado.hu/belfold/cikk/2020/12/11/uj-radarokat-vesz-a-honvedseg/> (Letöltve: 2021.8.28.);

- [2] „ELM 2084 MMR (Israel)” *Missile Defence Advocacy Alliance*, 2020.12. <https://missiledefenseadvocacy.org/defense-systems/elm-2084-mmr-israel/> (Letöltve: 2021.1.16);
- [3] Annas Ahronheim „ELTA Systems joins Lockheed Martin to offer radar for US „Sense Off”, *The Jerusalem Post* 2019.7.8. <https://www.jpost.com/Israel-News/ELTA-Systems-joins-Lockheed-Martin-to-offer-radar-for-US-Sense-Off-594982> (Letöltve: 2021.1.16);
- [4] Klemm, Richard, Ulrich Nickel, Christoph Gierull, Pierfrancesco Lombardo, Hugh Griffiths, és Wolfgang Koch, szerk. *Novel Radar Techniques and Applications Volume 1: Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar*. Institution of Engineering and Technology, 2017. <https://doi.org/10.1049/SBRA512F>;
- [5] Balajti István, „Korszerű elektronikai harceszközök hatása a rádiólokátor rendszerekre”, *Haditechnika* 55, 3. sz. (2021): 2–7. <https://doi.org/10.23713/HT.55.3.01>;
- [6] I. Balajti, F. Hajdú, “Surprising findings from the Hungarian radar developments in the era of the second world war” *URSI Radio Science Bulletin* 358 (2016): pp. 82-108, http://www.ursi.org/content/RSB/RSB_358_2016_09.pdf (Letöltve: 2018.10.6);
- [7] V. Chernyak, *Fundamentals of Multisite Radar systems*, Gordon & Breach Science Publisher, 1998;

- [8] S.Z. Gurbuz, H.D. Griffiths, A. Charlish, M. Rangaswamy, M.S. Greco and K. Bell, "An Overview of Cognitive Radar: Past, Present, and Future", *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 34, 12. sz. (2019): 6–18. <https://doi.org/10.1109/MAES.2019.2953762>;
- [9] Brüggewirth Stefan, Marcel Warnke, Christian Bräu, Simon Wagner, Tobias Müller, Pascal Marquardt, és Fernando Rial, „Sense Smart, Not Hard: A Layered Cognitive Radar Architecture”. In *Topics in Radar Signal Processing*, szerkesztette Graham Weinberg. InTech, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71365>;
- [10] Balajti István, „A hiperszonikus fegyverek hatása a légvédelemre és a légtérellenőrzésre”. *Haditechnika* 55, 1. sz. (2021): 2–7. <https://doi.org/10.23713/HT.55.1.01>;
- [11] Jianqi Wu, *Advanced Metric Wave Radar*, Singapore: Springer Singapore, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7647-3>;
- [12] “ELM-2090 TERRA Strategic Early Warning Dual Band Radar System,” IAI, <https://www.iai.co.il/p/elm-2090-terra> (Letöltve: 2021.1.17.);
- [13] Forrás: <https://www.shutterstock.com/hu/search/rugby+ball+vintage> (Letöltve: 2021.6.10.).

JEGYZETEK

- 1 Gyakran nevezik még: multistatikus, kvázi monostatikus (KM), iker vagy MIMO – multiple-input multiple-output radaroknak.
- 2 A RADOME (radar-dome – radarkupola) radarrendszerek és a műholdas kommunikáció (SATCOM) antennák burkolata, amely készülhet merev, önhordó anyagokból vagy levegővel felfújt rugalmas szövetből is. A RADOME megvédi a radarrendszert vagy az antennát az időjárás viszontagságaitól és elrejti a nyilvánosság elől. Olyan anyagból készül, amely csak minimálisan csillapítja az antenna által továbbított vagy vett elektromágneses jelet. (A szerk.)
- 3 Jens Rasmussen 1983-ban alkotta meg az ember-gép rendszerek információ-feldolgozás hierarchikus kognitív szintjeit leíró modellt. Alapfeltevése, hogy az emberi tevékenység célok által vezérelt, ezek a célok jöhetnek kívülről (feladat, utasítás, elvárás), de fakadhat a személy belső igényéből, törekvéseiből is. Vizsgálta azt is, hogy az adott cél végrehajtásakor milyen mechanizmusok állnak az ember rendelkezésére. (A szerk.)
- 4 Thomas Bayes (1701–1761) angol matematikus, presbitériánus lelkész nevéhez kötődik egy speciális matematikai formula, a Bayes-tétel, amelyet ő maga sosem publikált, halála után, a jegyzeteiből állították össze. A tétel a valószínűségszámításban egy feltételes valószínűség és a fordítottja között állít fel kapcsolatot. (A szerk.)

Prof. dr. Krajnc Zoltán (főszerk.)

Hadtudományi lexikon Új kötet

A Magyar Hadtudományi Társaság gondozásában 1995-re elkészült kétkötetes Hadtudományi lexikon 4000 szócikkben dolgozta fel a korszak releváns hadtudományi ismeretanyagát. Az eltelt több mint húsz év alatt olyan globális politikai, geostratégiai átrendeződések zajlottak le és olyan mértékű haditechnikai fejlődés ment végbe a világban, amely alapjaiban változtatta meg a hadviseléssel kapcsolatos gondolkodást. A hadtudomány korszerű ismereteinek lexikon jellegű összefoglalása érdekében prof. dr. Krajnc Zoltán ezredes főszerkesztő és prof. dr. Padányi József vezérőrnagy szakmai vezető irányításával a Magyar Tudományos Akadémia Hadtudományi Bizottsága, a Magyar Hadtudományi Társaság, a Honvéd Tudományos Kutatóhely, valamint a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar több mint 80 munkatársa, két év alatt dolgozta ki a 11 tematikus egységbe sorolható, alfabetikus sorrendben szereplő 4000 szócikket. A szerkesztőbizottság feladata volt a hadtudomány, illetve a katonai műszaki tudományok kutatási spektrumának megfelelő tudományági főcsoportok, valamint tudomány-szakterületek meghatározása. A tudományok rendszertani csoportosítása napjainkban rendkívül összetett és nehéz feladat, különösen az interdiszciplináris, továbbá interdependens területek esetében.

A szerkesztőbizottság az alábbi főcsoportokat határozta meg: hadtudomány, annak elmélete, kialakulása, fejlődése, tárgya, feladata, módszerei, jövője. A biztonság katonai dimenziója, a biztonsági kihívások katonai vetületei és a nemzetközi válságkezelés. A hadművészet ágazatai: a katonai stratégia, a hadművelet, a harcászat és a katonai vezetés. A katonai műveletek, a hadtudomány műveleti támogató területei, a műveleti kiszolgáló támogatás területei, beleértve a haditechnikát és a védelemgazdaságot. A hadtörténet, a védelmi igazgatás és benne a hadijog, a humánpolitika, a kiképzés és felkészítés, valamint a katonai szociológia, pszichológia és pedagógia.

A szerkesztőbizottság reményei szerint a Hadtudományi lexikon új kötete hasznos segítőtje lesz a hadtudomány művelőinek, továbbá kapaszkodót jelent és értékes információkat nyújt a jelenkori hadtudomány iránt érdeklődő olvasóknak is.

A Dialóg Campus kiadónál 2019-ben megjelent, 4000 szócikket tartalmazó, keménytáblás könyv terjedelme 1200 oldal. A kiadvány „A jó kormányzást megalapozó közszolgálat-fejlesztés” című KÖFOP-VEKOP projekt keretében jelent meg. A kézikönyv – regisztráció után – pdf formátumban ingyenesen letölthető a Ludovika Egyetemi Kiadó webshopjából, a <https://webshop.ludovika.hu/termek/sorozatok/pro-patria-ad-mortem/hadtudomanyi-lexikon-uj-kotet/> linkről. (DRU.)

