



Balajti István\*

# Az ELM-2084 MMR többfeladatú légtérelenőrző, légvédelmi és tüzérségi felderítőradar

## BEVEZETÉS

A mérnökképzés – beleértve a napjainkban újraindított hadmérnökképzést – alapszabálya a mérnöki gondolkodásmód: a *mit?*, *miért?* és *hogyan?* kérdéskör mérnöki elvárások szerinti elsajátítása, illetve megvalósítási szintjei-

nek elmélyítése. A tanulmány címe megadta a választ az első kérdésre. A *miért* általános elvárásait tömören megfogalmazta az összefoglalás, míg az alkalmazási területek *miért*, és a költséghatékony megvalósíthatóság *hogyan* kérdésköreit bővebben szükséges kifejteni. A tanulmány az ELM-2084 radar Kárpát-medencében történő alkalmazási

**ÖSSZEFOGLALÁS:** Az a tény, hogy Magyarország a Kárpát-medence közepén helyezkedik el, sajátos elvárásokat támaszt a katonai légtérelenőrző rádiólokátorokkal szemben. A katonai radarokkal szembeni elvárásoknak alkalmazkodniuk kell ahhoz a tényhez, hogy a környező hegylányok lehetővé teszik határaink rejtett megközelítését. A célfelderítést, útvonalképzést és -azonosítást nehezítő intenzív állócélképződés, a változatos időjárási jelenségek és a hullámterjedési sajátosságok tovább növelik a radarokkal szembeni elvárásokat. A tanulmány röviden áttekinti és értékeli az ELM-2084 MMR típusú multimissziós mobil radar néhány fontos performancia (teljesítmőképesség) jellemzőjét, kiemelt figyelmet fordít az üzemi frekvencia miatt tapasztalható előnyök és kihívások bemutatására, valamint értékelésére. Ebből a típusból a Honvédelmi és Haderőfejlesztési Program (HHP) keretében Magyarország 11 darabot vásárol Izraeltől.

**KULCSSZAVAK:** ELM-2084 MMR, radar, AESA, radaregnyelet, többfeladatú radar

**ABSTRACT:** The location of Hungary being in the middle of the Carpathian basin generates specific requirements for civilian and military air traffic control radar performances. The fact that Hungary located in the middle of the Carpathian Basin places special requirements on military surveillance radars. The military expectations of radars must adapt to the fact that the surrounding mountain close distances allow a hidden approach to our borders. Intensive stationary clutter formations, changeable weather phenomena and microwave propagation phenomenon further increase the demands on radars performances, making target detection, tracking and identification difficult. The article briefly reviews and evaluates some important performance features of the ELM-2084 MMR, paying special attention to the presentation and evaluation of the advantages and challenges presented by the operating frequency. Within the framework of the National Defense and Military Development Program (HHP), Hungary is purchasing 11 Israeli radars.

**KEY WORDS:** ELM-2084 MMR, radar, AESA, Radar Equation, special-purpose (multipurpose) radar

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

elvárásaira fókuszál oly módon, hogy a szerző *nem ismeri* a radar *bizalmas*, érzékeny információként kezelt műszaki részleteit, de több mint 40 év *hadmérnöki tapasztalattal rendelkezik* a hasonló típusú radarok továbbfejlesztése, alkalmazása, a logisztikai biztosítás in situ performanciamérések kidolgozása és végrehajtása területén.

A világszínvonalú, a légi és a tüzérségi célok felderítésére, valamint nyomon követésére alkalmas izraeli radarrendszer a tervek szerint 2025-ben áll a Magyar Honvédség szolgálatába. A Honvédelmi és Haderőfejlesztési Program keretében 11 darab új izraeli lokátor rendszerintegrációját a Rheinmetall kanadai leányvállalata végzi; a haditechnikai eszközök egyes részegységeinek gyártása és komplett vég-szerelésük Magyarországon, a honvédség légvédelmi rendszerekre specializált üzemében, Nyírteleken valósul meg.<sup>1</sup>

## Az ELM-2084 MMR ELEKTROMÁGNESES SPEKTRUM JELLEMZŐI

### AZ ELEKTROMÁGNESES SPEKTRUM KATONAI JELENTŐSÉGE

Az a hadsereg, amely előbb – az események szempontjából *valós időben* – képes detektálni, értékelni, majd hatást gyakorolni a műveleti területen végbemenő folyamatokra, egyértelműen előnyre tesz szert. Tény, hogy az elektromágneses hullámtartományban (EMH) végbemenő folyamatok alapvetően jellemzik és befolyásolják a hadszíntéren végbemenő eseményeket. A korszerű katonai koncepciók, mint pl. a „digitális katona” (Digital Soldiers), a számítógéphálózatba kapcsolt vezetési rendszer (Network Centric Operation) megvalósíthatatlanok az elektromágneses spektrum (Electromagnetic Spectrum – EMS) használata nélkül. Napjainkban az internet alapú műszaki megoldások (Internet of Things – IoT) és a mesterséges intelligencia (Artificial Intelligence – AI) egyre bővülő alkalmazási területei lehetővé teszik a környezetünkben végbemenő folyamatok *elektromágneses spektrumot alkalmazó eszközök* érzékelését, in situ mérését, és a vett jelek kiértékelését. [1] Az elektromágneses spektrum szerző általi értelmezését szemlélteti az 2. ábra.

Az ábrával kapcsolatban felmerülő és megválaszolendő kérdések az érdeklődő olvasóhoz:

- Mi az elektromágneses hullámtartomány, és mi köze a szinuszhullámhoz, a fénysebességhez és a matematikailag értelmezett vektorokhoz?
- Miért vannak érzékszerveink és mire szolgálnak?
- Hogyan lát, tájékozódik a denevér és a delfin?
- Mit kell tudni az autóradarokról az iparban, az orvostudományban; a rádióasztromóbiában használt szenzorokról, pl. a James Webb űrteleszkópról?
- Mi az interferencia, a holográfia és a kvázi-monostatikus (egymás közelében települt, de egy radarként kezelt) radarrendszerek közötti összefüggés?
- Vannak-e magyar sikerek a radarfejlesztésekben?
- Miért az „S” frekvenciasáv az IAI ELTA ELM-2084 többfeladatú radar fő üzemi tartománya?

A fenti kérdések megválaszolására – a jelen tanulmány mellett – a szerző röviden kitér a kifejezetten fiataloknak szóló könyvében [2] is. (Lásd recenziókat az 43. oldalon.)

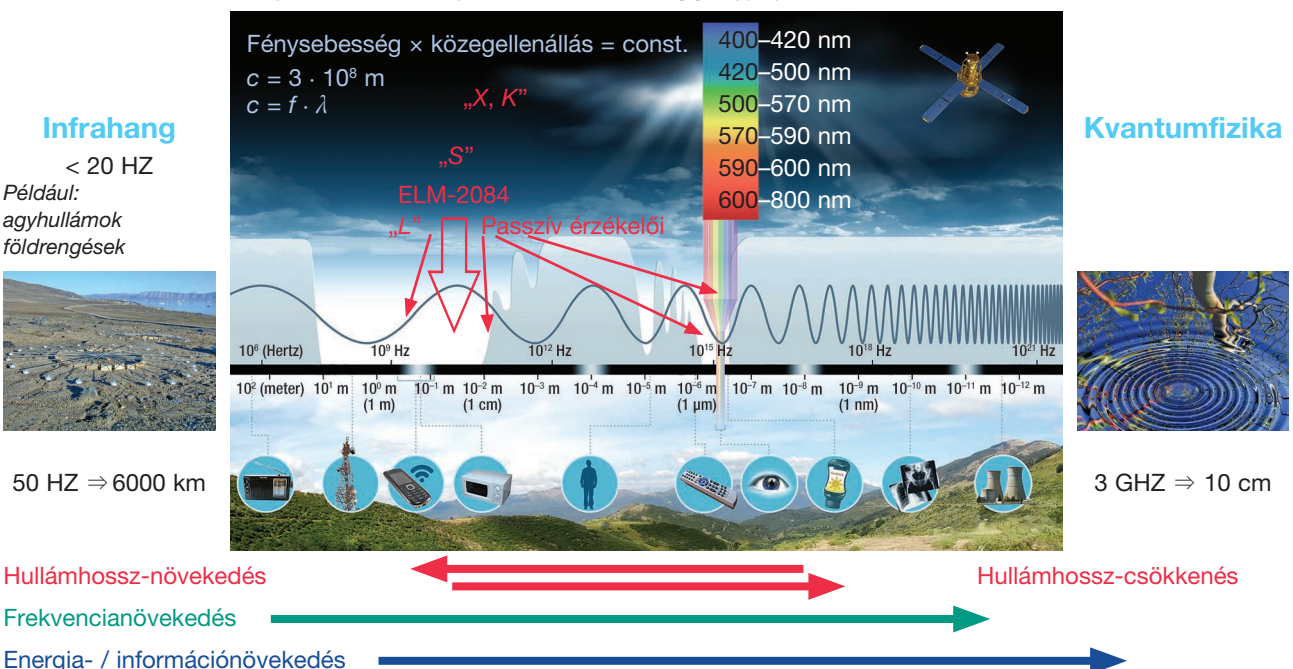
Az elektromágneses spektrumban végzett mérések vonatkozásában kiemelt jelentőségű a *sávszélesség*, amely – egy adott mérési frekvenciatartományban és konfigurációban – meghatározza az elméletileg elérhető legjobb *mérési pontosságot* és *felbontást*. Kiemelt fontossága miatt lineáris differenciálegyenletekkel szokás kezelni, és fizikai megvalósíthatóságát értelmezni. Egy elektromos áramkör kimeneti feszültség ( $V_t$ ) összetevőit, idő függvényében, az (1) egyenlet írja le. [3]

$$V_t = L \frac{d^2 q(t)}{dt^2} + R \frac{dq(t)}{dt} + \frac{1}{C} q(t) \quad (1)$$

Ahol:  $L$  – inuktivitás,  $R$  – ellenállás,  $C$  – kapacitás,  $q$  – elektromos töltés.

Az egyenlet jól használható egyenáram és alacsony frekvenciás áramkörök leírására, mert az áramkörökben a feszültség majdnem fénysebességgel ( $3 \times 10^8$  m/s) terjed. Ennek következtében, 50 Hz-es rendszerek esetén, a körülöttük kialakuló térhullámok másodpercenként 6 millió méterre távolodnak el az áramkörtől. Így a kisugárzott jelek a teljes szinuszhullámhoz 6000 km út megtétele szükséges, amely-

2. ábra. A teljes elektromágneses spektrum (A szerző szerkesztése [1] alapján)



hez képest az eszköz méretei elhanyagolhatóan kicsik. Ezért megállapítjuk, hogy az áramkör minden pontján a feszültség azonos. Más a helyzet a nagyfrekvenciás, pl. 3 GHz-en üzemelő rendszerek, radarok esetén, ahol a térhullámok csak 10 cm távolságra terjednek egy periódus alatt. Így az áramkör különböző pontjaiban mért feszültség- és áramértékek jelentősen különböznek. Ezeknek a rendszereknek a leírásához és elemzéséhez már az úgynevezett Maxwell-egyenletek jelentik a kiindulási alapot.

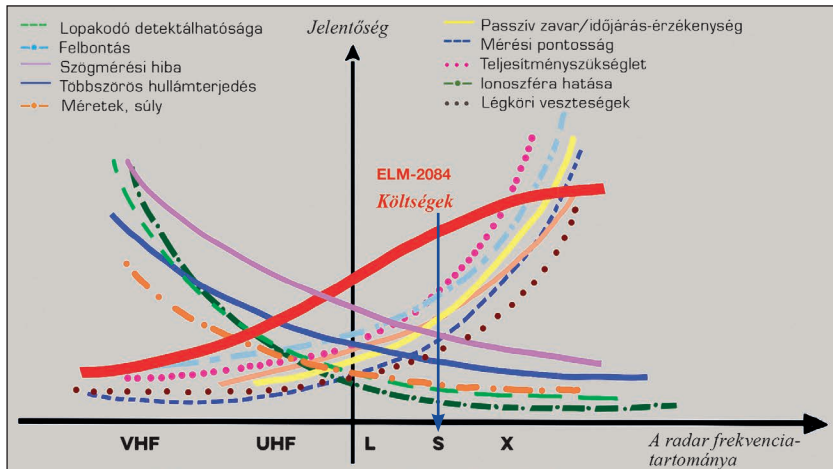
A szerző hadmérnöki múltja lehetőséget ad a katonai terminológia és gondolatmenet alkalmazására. Az 2. ábra bal oldalán ábrázolt infrahang-frekvenciatartományában az agyhullámokkal, a földrengések által keltett rezgésekkel és a fénysebességgel terjedő elektromágneses hullámokkal egyszerre kell foglalkozni. Idetartozik a katonai szempontból fontos nehéz gépjárművek, pl. harckocsik által keltett rezgések különböző közegekben való terjedési sajátosságainak in situ mérése, az egyes járművek néhány km-en belüli lokalizációja, egymástól történő megkülönböztetése. Ez egyben olyan kutatás-fejlesztési (K+F) terület, ahol a passzív lokációs érzékelők, rendszerek által vett jelek detektálását és értékelését végző algoritmusok kidolgozása jelenti a fő kihívást. Az ábra jobb oldali része azt hivatott szemléltetni, hogy a kvantum-kommunikáció, a radar és számítógépek által elérhető, napjainkban még nem teljesen értett fizikai elvek és lehetőségek – pl. a jelenleg alkalmazottnál nagyságrendekkel nagyobb sávzélességek, információátviteli lehetőségek, „feltörhetetlen” titkosítási eljárások, újfajta fizikai elveken üzemelő radarok, kommunikációs és számítógépes eszközök megjelenése –, biztonsági okok miatt nyugtalanítják korunk katonai vezetőit.

Az ábra bal és jobb oldala után vizsgáljuk meg a „fő erők”, tevékenységek központi területeit, ahol a mérnöki elképzelések, innovációk és napjaink katonai tevékenységeinek döntő hányada megvalósul.

### Az ELM-2083 MMR ÁLTAL HASZNÁLT ELEKTROMÁGNESES SPEKTRUMTARTOMÁNYOK

Az ELM-2083 MMR radar által használt elektromágneses spektrumot jól látható módon ábrázoltuk az 2. ábrán, míg a spektrumjellemzők sajátosságainak részletei a 3. ábrán láthatók. Az elsődleges radarrendszer az „S” frekvenciasáv felső tartományában (9 cm hullámhossz) üzemelő nagy teljesítményű, de kis veszteségekkel rendelkező, aktív fázisvezérelt rácsantenna (AESA – Active Electronically Scanning Array) technológiát használ. Az AESA-antennák előnyei közé tartozik, hogy hasonlóan az ablakokhoz, egyszerre több felhasználó „tekinthet át” rajtuk. Így azonos időben több irányba, több frekvencián, egymástól lényegesen különböző feladatokra is alkalmazhatók. Ebből a szempontból fontos, hogy azonos időben hány sugárnyaláb, és milyen paraméterekkel célszerű kialakítani.

A barát-idegen felismerő (IFF – Identification Friend or Foe) másodlagos radarrendszer békében 1030 MHz kérdező (Uplink), és 1090 MHz válasz (Downlink) üzemmódokat alkalmaz. Harcszerű körülmények között joggal feltételezhető – mivel a fix frekvencia elektronikai harceszközökkel könnyen lefogható –, hogy ez a rendszer a teljes „L” frek-



3. ábra. Az „S” frekvenciasávú radar jellemzői (A szerző szerkesztése)

encia sávban (23 cm hullámhossz körül) üzemeltethető. Az 1. ábrán jól megfigyelhetők az oldalsó és hátsó fix telepítésű antennák, amelyek valószínűleg az „X” (3 cm hullámhossz körül) és/vagy a „K” frekvenciatartományokat (1,3 cm hullámhossz körül) használják. Az árbócra szerelt passzív érzékelők az optikai (550 nm hullámhossz körüli) és infravörös (3–8  $\mu\text{m}$  hullámhossz körüli) tartományban üzemelnek. A radarhoz szorosan illeszkedik a (rádió)elektronikai felderítő és kiértékelő rendszer, amely az IFF-antenna alatt található. A katonai alkalmazási lehetőségek és azok hatékonysága, a mérnöki kreativitás és a rendelkezésre álló költségkeretek függvénye. Pl. több sugárnyaláb kialakításához szükség van a párhuzamosan alkalmazható fázisfordító modulok számának, azok passzív vételi performanciára, és paraméterekre beállítható sugárnyaláb-vezérlési jellemzőinek előzetes meghatározására.

### MILYEN PERFORMANCIÁKKAL RENDELKEZHET AZ ELM-2084 MMR?

Ezzel a kérdéssel kapcsolatban kínál válaszokat a [2], de a témakör mélyebb megértése érdekében további szakirodalmak tanulmányozása célszerű. [4] [5]

### A RADARPERFORMANCIÁK FREKVENCIAFÜGGÉSE

Különböző radarparaméterek frekvenciatartomány szerinti változását szemlélteti a 3. ábra, amely az alábbi radar-egyenlet elemzésével készült. Segítségével behatárolható az ELM-2084 MMR radar legfontosabb, frekvenciától függő jellemzőinek változása.

A radarok alkalmazási lehetőségeit tömegük, antennaméreteik, a frekvenciasáv hullámterjedési veszteségei, és a települési hely sajátosságai határozzák meg. Ugyanakkor a radar műszaki elvárásait és gazdaságilag észszerű megvalósíthatóságát az alkalmazott hullámhossz- és a frekvenciatartomány jelentősen befolyásolja. Azonos műszaki paraméterek eléréséhez a hullámhossz csökkenésével jelentősen csökkennek a radar méretei, valamint a tömege. Ezért magasabb frekvenciatartományokban a hullámhosszhoz viszonyítva kisebb antennamérettel nagyobb antennafelületek, így nagyobb antennanyereség, irányélességi szög, alacsonyabb oldalnyalábszintek és felbontás élehető el. (Értelmezésüket lásd az egyenleteknél.) Ezáltal „élesebb / vékonyabb” sugárnyalábok alakíthatók ki, amelyek

következtében nagyobb mérési pontosság, felbontás (két egymás közelében tartózkodó céltárgy megkülönböztethetősége) és azonos adóteljesítmények esetén hatótávolságnövekedés realizálható. A helyhez kötött földi telepítésű, nagy méretű „távolfelderítő” radarok frekvenciatartománya az „S” sávig terjed. Mobil légtérelőző és többfunkciós radaroknál célszerű az „S” és a „C” frekvenciasávot alkalmazni. A magasabb frekvenciatartományok érzékenyebbek az időjárás körülményekre, mivel az alkalmazott hullámhossz mérete azonos vagy kisebb a környezetben található hópehely, esőcsepp és/vagy jégkristály méreteinél. Az elektromágneses hullámok földfelszínről történő visszaverődése is hullámhosszfüggő, ezért az „álló célok” intenzívebbek magasabb frekvenciákon. Ha a szabad térben terjedő sugárnyaláb útjában akadály található, akkor a geometriai optika szerint az árnyékban lévő céltárgyra nem jut energia. A valóság azonban ennél árnyaltabb, mivel az atmoszférában időlegesen jelen lévő turbulenciák, anomáliák hatnak a rádióhullámok terjedésére, így a radarmérések pontosságára. Hatásukkal különösen zivatarfelhők és nagyobb vízfelületek esetén kell számolni, de napjaink legkorszerűbb radarjai már a Föld ionoszférájának változásait is számításba veszik. Az „S” frekvenciasáv alkalmazásának előnyei:

- nagy mérési pontosság távolságban, oldalszögben és helyszögben,
- nagy felbontóképesség,
- aránylag nagy antennanyereség és adóteljesítmény,
- kis méretek, térfogat és tömeg.

Hátrányai: álló célok, passzív zavarok és időjárás-érzékenység, amelyeket költséges mozgócél-kiválasztó és konstans vaklármá-normalizáló rendszerekkel kell ellensúlyozni. További hátrány, hogy a lopakodó-technológiák az „S” sávú radarok ellen is nagyon hatékonyak. Úgy az előnyök kihasználása, mint a hátrányok kiküszöbölése az AESA (Active Electronically Scanned Antenna – aktív fázisvezérelt antenna) felépítésén, a nagyon hatékony GaN (gallium-nitrid) adóvevő kis fáziszajú és kis veszteségekkel rendelkező modulok és a digitális jelfeldolgozás lehetőségeinek „state-of-the art” (legkorszerűbb) alkalmazásán múlik.

### A RADAR MAXIMÁLIS HATÓTÁVOLSÁGA

A radarok teljesítményjellemzőit – a performanciáját –, a radaregyenlet határozza meg (2). Az egyenlet szerinti első összetevők az adójel, középen a céltárgyjellemzők, míg a harmadik tag a vételi szakasz jellemzőit írja le. [6] Ebben az esetben elvárás, hogy a radar koherens jelintegrálást<sup>2</sup> valósítson meg a céltárgy teljes besugárzási idejére, adott minőségű céltárgydetektálási, detekciós és vaklármá-valószínűség követelményekkel. A koherens jelfeldolgozás maximalizált jelfeldolgozási nyereséget ígér egy adott korrelációs időn belül. A fejlesztők feladata annak meghatározása, hogy adott környezeti körülmények között milyen korrelációs együttható értéket lehet a valóságban realizálni, és ezt az értéket milyen hosszú ideig lehet fenntartani.

$$R_{\max} = 4 \sqrt{\frac{P_{\text{át}} t_r G_{\text{Tr}} F_{\text{Tr}}^2 \sigma(\theta) \lambda_0^2 F_p^2}{(4\pi) L_{\text{Tr}}} \frac{G_R F_R^2}{(4\pi) k_B T_s D_x(n) L_R}} \quad (2)$$

Ahol:

- $P_{\text{át}} = P_t \tau f_r$  – az adó átlagteljesítménye,
- $P_t$  – az adóimpulzus teljesítménye,
- $\tau$  – az adóimpulzus időtartama,
- $f_r$  – impulzussismétlődési frekvencia (PRF – Pulse Repetition Frequency),

- $t_r = n/f_r$  – a koherens jelfeldolgozás időtartama ( $n$  – impulzusszám),
- $G_{\text{Tr}}$  – az adóantenna nyeresége,
- $L_{\text{Tr}}$  – adóoldali átviteli veszteség (tápvonalak, antenna),
- $\sigma(\theta)$  – a céltárgy hatásos keresztmetszete (RCS) a vevőantenna(-ák) irányában,
- $\lambda_0$  – a vivőfrekvencia hullámhossza,
- $F_{\text{Tr}}$  – az adó és a céltárgy közötti hullámterjedési tényező,
- $F_p$  – polarizációs együttható,
- $F_R$  – a céltárgy és a vevőpont közötti hullámterjedési tényező,
- $R$  – az adó, a céltárgy és a vevőpont közötti távolság ( $R = r_1 + r_2$ ),
- $L_R$  – vevőoldali átviteli veszteség,
- $D_x(n)$  – „ $n$ ” visszavert jelre vonatkoztatott (integrált) detektálási tényező: jel-zaj viszony,
- $x$  – a Swerling-modell típusának száma, mint referencia,
- $n$  – a céltárgyról visszaverődött és a radar által detektált impulzusszám.

A vevőantenna nyeresége  $G_R$  és hatásos felülete  $A_R$  közötti összefüggés:

$$G_R = \frac{4\pi A_R}{\lambda_0^2} \quad (3)$$

A vevőrendszer zajteljesítménye:

$$N_R = k_B T_s B_n = E\{|w(n)|^2\} \quad (4)$$

Ahol:

- $k_B$  – a Boltzmann-állandó ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K),
  - $T_s$  – a rendszer vevőbemeneti zajhőmérséklete (K),
  - $B_n$  – a vevőzaj sáv szélessége, optimális a vett jel szempontjából (Hz),
  - $w(n)$  – vevőzaj ADC (Analoge Digital Converter – analóg digitális átalakító) után „ $n$ ” szinten minta vételezve,
  - $E\{|w(n)|^2\}$  – a vevőzaj varianciája, szórása (W).
- A távolságmérés pontossága:

$$\delta R = \frac{c}{2B_n \sqrt{2D_x(n)}} \quad (5)$$

ahol:  $c$  – a fénysebesség.

A radar távolság szerinti felbontása az a két egymáshoz legközelebbi lévő távolság, amikor még a céltárgyak megkülönböztethetők egymástól:

$$\delta_R = \frac{c}{B_n} \quad (6)$$

Az egyedi radarparamétereket – a könnyebb áttekinthetőség és kezelhetőség érdekében – célszerű kapcsolódó jellemzőik szerint csoportosítani. Ezáltal könnyebben kezelhetők a logisztikai és K+F kihívások, a különböző alkalmazások, illesztések kockázata és ezeknek a radar performanciákra gyakorolt hatása. Ilyen alkalmazási csoportok lehetnek a légtérelőző, a légvédelmi és tűzérzégi felderítő radarok, vagy a komplexebb hálózatközpontú kvázi-monostatikus, valamint a bistatikus és multistatikus rendszerek. A leggyakrabban használt paramétercsoportok:

- $P_{\text{át}} G_{\text{Tr}} / L_{\text{Tr}}$  – Az adójel teljesítményparamétereit meghatározó jellemzők.
- $F_{\text{Tr}} F_R F_p$  – Hullámterjedési viszonyok, amelyeket az adó- és vevőantennák egymás polarizációjára való illesztettsége, a repülő eszköz



keresztpolarizációs együtthatója, az adó-és vételi jelek „torzulásai”, valamint a veszteségek határozatképesek meg.

$\lambda_0 G_R / T_s B_n L_R$  – A vett jel teljesítményparamétereit meghatározó jellemzők. Elektronikai harc körülményei között értékére a zavarvédő eszközök elvárásai a meghatározók.

$(1 + 2v_r/c)$  – Az alapsávi jel „nyuzsorodása”, amely az adójel-moduláció nyúlásában vagy zsugorodásában nyilvánul meg attól függően, hogy a céltárgy távolodik vagy közeledik a radarhoz. Mivel a hagyományos céltárgyak sebessége 4-7 nagyságrenddel kisebb a fénysebességénél, értéke általában elhanyagolható. Napjainkban az alacsony pályás műholdak jelentette fenyegetés, és az energiafegyverek megjelenésével jelentősége felértékelődik.

$2(r_1 + r_2)/c$  – Az alapsávi jel időkéscése, amely a céltárgy pontos radiális távolság mérését teszi lehetővé megfelelő moduláció esetén. ( $R_{max} = r_1 + r_2$  – bisztatikus radar-konfiguráció)

$\omega_D$  – Doppler-körfrekvencia, amely a radiális sebesség mérését teszi lehetővé megfelelő moduláció esetén. (Hosszú impulzus.) A 7. és 8. ábrák esetén értéke függ a  $L_{eff}$  és a repülés irányszögének viszonyától.

$\varphi_{21}$  – Az adójelek kezdő fázisának ismerete a vett jelek szinkronizálásához és a korrelációs együtthatók beállításához szükséges.

$2(r_1 + r_2)k_0$  – A vivőjel fáziskésése, a radarok zavarvédelmi képességeinek növelésében, a kvázi-monostatikus (K-M), az integrált VHF, „L” és „S” radarrendszerek, valamint az in situ radarperformancia-mérésekben játszik döntő szerepet. Értéke 0 ...  $2\pi$  vagy annak többszöröse, mérésével meghatározható az egymáshoz közel települt antennákra érkező jelek fáziskésése, ha az antennák közötti távolságot pontosan ismerjük. Elengedhetetlenül szükséges paraméterek az adaptív szűrők, a céltárgy „ujjlenyomat” / képkalkotás a rádiolokációs hologramokhoz és a közeltéri antennamérésekhez.

$\sigma(\theta)$  – A céltárgyak RCS-értéke a repülőeszköz-fejlesztők kezében van, ezért hatását a radaregyenletre és a korrelációs tényezőre külön vizsgálni kell.

**Az ELM-2084 RADAR AESA AKTÍV FÁZISVEZÉRELT ANTENNARENDSZERÉNEK ELEMZÉSE**

Az antennarácsok főbb jellemzői és sajátosságai az apertúraamplitúdó és a fáziseloszlás függvényeiből kiindulva, a „gyors Fourier-transzformáció” (Fast Fourier Transformation – FFT) térbeli hullámokra történő alkalmazásával számított iránykarakteristikákon keresztül értékelhetők. Az (7) egyenlet által számítható és az FFT mint térbeli szűrő által determinált jel a lineáris (ekvidisztáns-azonos amplitúdó eloszlásfüggvénnyel rendelkező) antennarácson (Uniform Linear Array – ULA) „n” jelszinten mintavételezve felírható [8]:

$$x(n) = \sqrt{M} v(\theta) s(n) + w(n) \tag{7}$$

Ahol:

$$v(\theta) = \frac{1}{\sqrt{M}} [1 e^{-jk_0 d \sin(\theta)} \dots e^{-jk_0 d \sin(\theta)(M-1)}]^T$$
 – antenna-irányvektor,

$\theta$  – a keskenysávú jel iránya,  $(-\pi/2 < \theta < +\pi/2)$ ,

$\frac{1}{\sqrt{M}}$  – M antennaelemszám,  $\sqrt{\phantom{x}}$  – a számítási műveletek egyszerűsítésére,

$d \leq \lambda_0/2$  – a szomszédos antennaelemek közötti távolság,

$k_0$  – térhullámok esetén értelmezett hosszegységre eső hullámszám, vagy időegységre eső hullámszám,

$w(n)$  – a vevőrendszer zajhőmérséklet vektora (3) (korrelálatlanak tekintjük, ezért a mintavételezés „n” előtti szűrők átfedéseiből és az érzékelő elemek kölcsönös egymásra hatásából eredő ideiglenes korreláció értéke elhanyagolható),

$s(n)$  – vételi keskenysávú jelvektor.

**A FÁZISVEZÉRELT RÁCSANTENNA FŐBB PARAMÉTEREI**

Kimeneti jel az antenna talpponton:

$$y(n) = \sum_{m=1}^M c_m^* x_m(n) = c^H x(n) \tag{8}$$

Ahol:  $c = [c_1^* c_2^* c_3^* \dots c_M^*]^T$  – a súlytényezők komplex értékekkel jellemzett mátrixa (a megvalósítástól függően különböző ablakfüggvények alkalmazhatók: Han, Hamming, Taylor, Chejbisev, Klisler, a főnyaláb elvárt szélesség és oldalnyaláb szintjének beállítására).

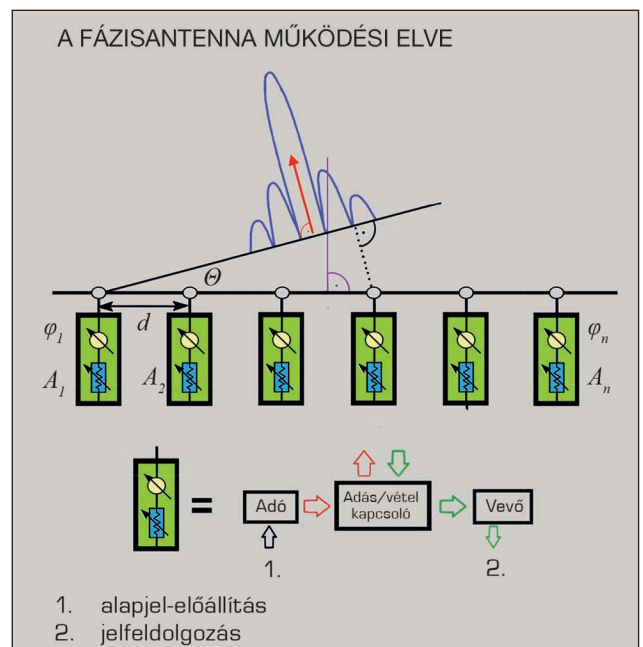
Iránykarakterisztika:

$$C(\theta) = c^H v(\theta) \rightarrow |C(\theta)|^2 \tag{9}$$

Antennaerősítés (antennanyereség) az elvárt jel irányában ( $\theta_j$ ):

$$G_{ny} = \frac{SNR_{rács}}{SNR_{elem}} = \frac{|C^H v(\theta_j)|^2}{|C|^2} M \tag{10}$$

**4. ábra. Az aktív fázisvezérelt antenna működési elve** (A szerző szerkesztése)



Általános elfogadott AESA aktív fázisvezérelt antenna-rendszer működését szemlélteti a 4. ábra. Itt minden elemi adó-vevő modul tartalmazza az adójel-erősítést, egy adásvétel kapcsolót, a fázisszabályzót és a vételi rendszert. Az alapjel-előállítás történhet modulonként szinkronizáltan, vagy egy központi egységben jelszétosztó hálózaton keresztül. A koherens jelfeldolgozás érdekében az adó és a vevő alrendszerek szinkronizáltak. Az elemi modulok egymástól „d” távolságra helyezkednek el, és ez a távolság az éppen aktuális frekvencia függvényében határozza meg az elektromos sugármozgathoz szükséges modulszintű fázisbeállítás mértékét. Az egymástól „d” távolságra lévő sugárzó elemek, modulok fázisa ( $\varphi_n$ ) és amplitúdója ( $A_n$ ) eltér egymástól egy „ $\theta$ ” szöggel, az így kialakuló hullámfrent a tér egy adott pontja felé „elmozdul”. Ezáltal a radar elemi sugárzóinak teljesítménye a térben adódik össze és nem a radarban, mint a passzív radarantennák alkalmazásakor.

**PÉLDA AZ ELM-2084 RADAR FŐBB PERFORMANCIA LEHETŐSÉGEIRE**

Az ELM-2084 radart az alábbiakban a bizalmasan kezelt, pontos paraméterek nélkül modellezzük. Erre a hasonló, de ismert polgári és katonai radarok adatai és a szakirodalomban használt [6] [8] szimulációk adnak lehetőséget. Ezek ismerete alapján első megközelítésben kiszámíthatók az ELM-2084 radar-performanciák elvárható értékei, így a maximális hatótávolsága is meghatározható. Alkalmazzuk a szakirodalomból ismert gyakori elvárásokat:

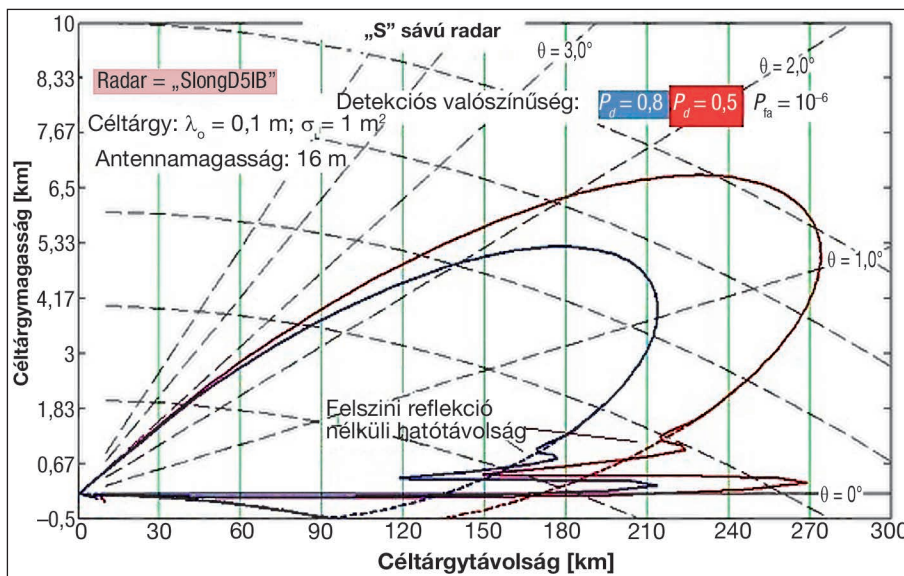
Szabvány céltárgy:  $S_{w1}$ ,  $P_d = 0,8$  és  $0,5$ ;  $P_{fa} = 10^{-6}$ ,  $\sigma = 1 \text{ m}^2 \equiv 0 \text{ dB}$ ;

Térletapogatósi módok: háromdimenzióban (3D-s) – 6 antenna fordulat/perc oldalszögben, párhuzamos helyszögben;

Főnyálabszélesség, oldalszögben és helyszögben (félteljesítményen  $-3 \text{ dB}$ ) =  $1,5^\circ$

Szimulációs eredmények a szakirodalom [6] felhasználásával, ha az „S” sávú radar működési paraméterei:  $P_t = 50\,000 \text{ W} \equiv 46,99 \text{ dB}$ ;  $\tau = 300 \mu\text{s} \equiv -35,23 \text{ dB}$ ;  $f_r = 300 \text{ Hz}$ ;  $G_{Tr} = 33,40 \text{ dB}$ ;  $G_R = 40,50 \text{ dB}$ ;  $T_s = 898 \text{ K} \equiv 2,5 \text{ dB}$ ;  $f_o = 1/\lambda_o = 3,1 \text{ GHz} \equiv 94,91 \text{ dB}$ ;  $F = 0 \text{ dB}$ ;  $D_1(1) = 14,51 \text{ dB}$ ;

**5. ábra. Az „S” sávú radar céltárgydetekciós performanciája  $P_d = 0,8$  és  $P_d = 0,5$  esetére**  
(A szerző szerkesztése)



$L_{TR} + L_R = 9,41 \text{ dB}$ . A céldetektálás magasság/távolság szerinti lehetőségeit az 5. ábra mutatja.  $R_{max} = 217 \text{ km}$ , ha  $Sw1$ ,  $P_d = 0,7/P_{fa} = 10^{-6}$ . Vegyük észre, hogy az adóantenna nyeresége  $7 \text{ dB} -1$  eltér a vevőantenna-nyereségtől, de alap üzemmódban ezzel megegyezhet. Ez esetben a maximális hatótávolság  $300 \text{ km}$  fölé növekedhet. Ugyanakkor a radar erőforrásainak ütemezése szempontjából célszerű a  $7 \text{ dB}$  adóteljesítmény-különbséget tartalékolni a több feladatú üzemmódok optimalizálása érdekében.

Az 5. ábrán megfigyelhető, hogy a többszörös hullámterjedés okozta földközeli nyaláb rendkívül szűk, és a felszíni egyenetlenségek miatt nem használható céldetektálásra, ugyanakkor jelentősen növeli a vaklármat. Ennek a hatásnak a csökkentése az oldalnyálabszintek helyszög szerinti manipulálása a megoldás. A számítások további részletekkel egészíthetők ki a szakirodalom [8] lehetőségeinek felmérésével.

A radarok hatékonyságát tovább növelhetjük azzal, hogy kihasználjuk a feladataikkal kapcsolatos előzetes ismereteinket. Előre kidolgozhatunk olyan eljárásokat, amelyekkel a radar – feladataihoz igazodva – optimális adójel-sáv szélességgel, teljesítménnyel, antenna-iránykarakterisztikai jellemzőkkel és elvárt gyakorisággal tapogtatja le a körülöttük lévő teret.

**Az ELM-2084 RADAR LÉGTÉRELLENŐRZÉSI ÜZEMMÓDJA**

Az ELM-2084 radar légtérellelőrzési radar a Magyar Honvédség Légierő Parancsnokság honlapján [9] meghatározott feladatok végrehajtásának eszköze. Az alaprendeltetése a magyar légtérben és annak közvetlen környezetében megjelenő repülőeszközöknek az előzőleg tárgyalt elvárások szerinti detektálása, útvonalba fogása, az útvonal fenntartása és azonosítása. Ezért a háromdimenziós (3D-s) távolfelderítő radarok nagy kiterjedésű légtérek ellenőrzésére optimalizáltak, így tartalmazniuk kell egy azonos távolságot és egy azonos magasságot alkalmazó ellenőrzési területet. Ezen belül azonos detektálási és vaklárma-valószínűségekkel kell megoldaniuk a légtérben tartózkodó repülőeszközök felderítését. A 3D-s radarok képesek a céltárgyak távolság-, illetve oldalszög-, és a magassági helyzetükre vonatkozó adatokat egyidejűleg meghatározni. Általános 3D-s légtérellelőrző radar térletapogatósi elvet szemléltet a 7. ábra. A korszerű ELM-2084 radarral (6. ábra) szemben támasztott további követelmény, hogy a felderített fontosabb céltárgyakat detektálás után, adott szektoron belül, egy külön erre a célra kijelölt tűnyalábbal folyamatosan megfigyelje.

A 7. ábrán megfigyelhető a kis és nagy hatótávolságú üzemmódok egymáshoz viszonyított helyzete, míg az 1. táblázatban az ismert főbb műszaki paraméterek összefoglalása látható.

A radar által detektált és plottal jelzett célokról szolgáltatott információból mielőbb útvonalat kell képezni, mivel csak útvonalakra lehet feladatokat szabni. Az útvonalképzés azonban jelentős információvesztéssel jár, ezért valós környezetben a céltárggyal kapcsolatos



6. ábra. Az ELM-2084 3D légtérelőző radar (Forrás: HM Zrínyi / Fotóarchívum)

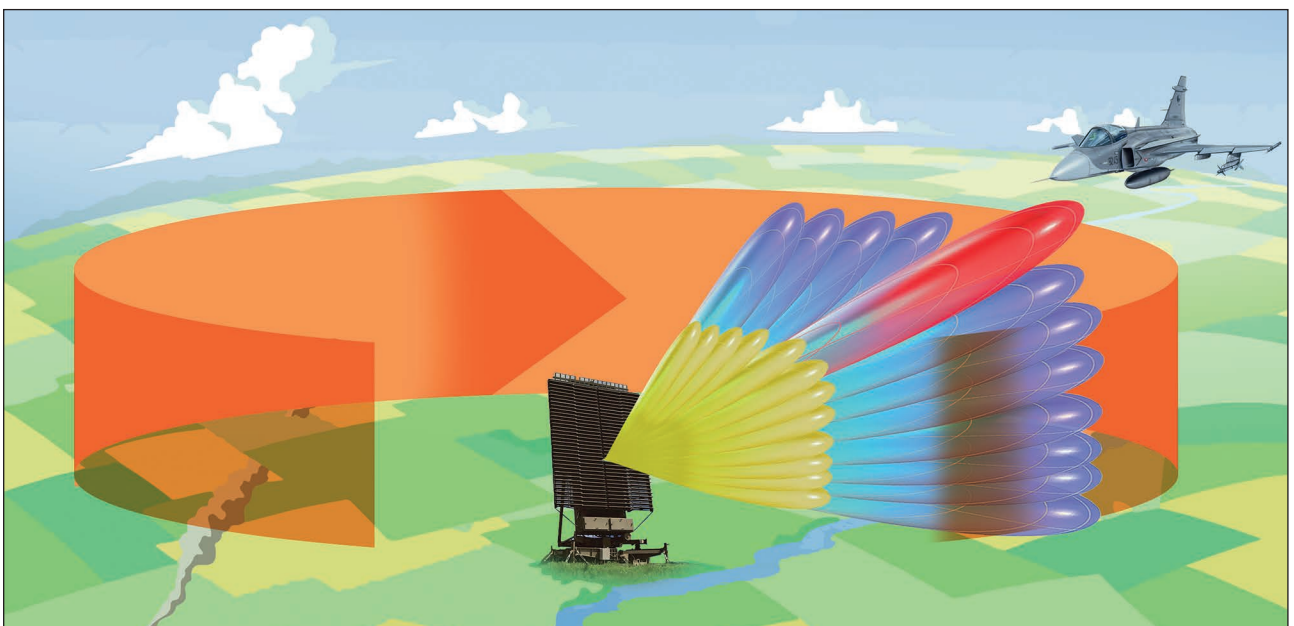
mérési eredmények korrelációját és a plotokból kialakuló útvonalkezdetek becslését, külön erre a célra optimalizált algoritmusok végzik. A becslés során három fő összetevőt kell figyelembe venni:

- kinematikus összetevők (pozíció, sebesség, gyorsulás, fordulósugár stb.);
- a radarkörnyezeti jellemzők (radarimpulzus-szélesség, spektrumjellemzők, céltárgytípus stb.);
- állandó vagy lassan változó paraméterek (a céltárgy aerodinamikai jellemzői).

A repülőeszköz kinematikai jellemzőit nem tudjuk befolyásolni, mivel ez a szemben álló fél kezében van, de a műszaki lehetőségeiket értékelni kell, hogy optimalizálhatók legyenek a radarban szükséges jelfeldolgozási és adatfeldolgozási kapacitások.

A radarkörnyezeti jellemzők azok, amelyeket a legteljesebb mértékben a céldetektálás és az információegyesítés érdekeinek lehet alárendelni, hiszen saját rendszerünk erre a feladatra optimalizálható. Az adatfúziós valószínűséget leginkább az adatok korrelációja befolyásolja, amely a repülőeszközök manőverező képességétől függ. Napjaink széleskörűen alkalmazott adatfúziós algoritmusai (a Kalman-szűrők, vagy kiterjesztett Kalman-szűrők) 7-8 G gyorsulásértékig képesek megbízhatóan követni a manőverező céltárgyakat. A pilóta nélküli repülőeszközök néhány fajtája, például a hiperszonikus rakéták, akár 25 G gyorsulással is mozoghatnak. Külön kihívást jelentenek a kis sebességgel, de nagy gyorsulási potenciával rendelkező drónok, ahol már 150 km/h sebesség esetén is a radar adatfrissítési, plotképzési, korrelációs időtényezője keve-

7. ábra. Általános 3D-s légtérelőző radar területapogatósi elve (A szerző szerkesztése)



1. táblázat. Az ELM-2084 légtérelenőrző radar főbb jellemzői

Jellemzők	Nagy hatótávolságú	Réskitöltő	Megjegyzés
Elméleti hatótávolság	470 km (250 nm)	250 km (135 nm)	
Lefedettség/oldalszög	360° vagy 120°	360° vagy 120°	választható
Lefedettség/helyszög	0–33 km-ig	0,1–3 km-ig	-10° +30°
Mérési pontosság	50 m, <0,25°, <0,2°	50 m, <0,2°, <0,2°	Távolság/oldal-/helyszög
Üzemi frekvenciasáv	„S” sáv ( $\lambda = 9$ cm)	„S” sáv ( $\lambda = 9$ cm)	
Útvonalképzés	Max. 1100	Max. 30 AFP*	
Céltárgytípusok	minden, ami a légkörben található	lővedékek, kiskrakéták	Swerling 1,2,3,4,5
Céltárgy-azonosítás	nem publikus adat	IFF**	nem publikus adat
Telepítési mód	Fix, mobil	mobil	nem publikus adat
Hadrafoghatóság	Nagy megbízhatóságú, fokozatosan leépülő redundáns rendszerek		

\*AFP – Antennafordulat percenként, \*\*IFF – barát-idegen felismerés

sebb, mint 2 s. Ezért az útvonalképzés új típusú algoritmusok („multi hipotetikus”, „nem parametrikus” szűrők) kidolgozását és alkalmazását várja el.

A réskitöltő radarok és légvédelmi rendszerek tulajdonosságairól bővebb információ található a [10] szakirodalomban.

### Az ELM-2084 RADAR LÉGVÉDELMI ÉS TŰZÉRSÉGI LŐVEDÉK FELDERÍTŐ ÜZEMMÓDJA

Az ELM-2084 légvédelmi és tüzérségi lövedék felderítő radar – a honvédelmi miniszter döntése alapján – a Magyar Honvédség Szárazföldi Parancsnokság meghatározott feladatainak végrehajtási eszköze [11].

A szakirodalom hasonló feladatok ellátására alkalmas radarokat ismertet: AN/TPQ<sup>3</sup>-36, AN/TPQ-37, AN/TPQ-53, COBRA, ARTHUR, Aistyonok. A szárazföldi csapatoknál történő alkalmazás sajátossága, hogy a harctereken a tüzérségi lövedékek detektálására és követésére szolgáló radarok egy adott szektorban folyamatosan pásztázzák a rádióhorizontot, ahol a lövedékek felbukkanhatnak. (8. ábra) Ha lövedéket, kiskrakétát vagy drónt detektál a kereső radarnyaláb, a központi számítógép azonnal a horizontot pásztázó sugárnyalábtól frekvenciában eltérő, és mérési pontosságban jobb paraméterekkel rendelkező nyalábokkal követi.

8. ábra. Az általános tüzérségi felderítőradar térletapogató elve (A szerző szerkesztése)



9. ábra. Az ELM-2084-es légvédelmi és tüzérségi lövedék-felderítőradar

A különböző céltárgyakra vonatkozó adatbázisok segítségével automatikusan meghatározhatók a lövedékek mozgásparaméterei, típusai, és kiszámíthatók az ellenintézkedésekhez szükséges adatok is. Ellenintézkedés alatt az ellenséges tüzérszükség azonnali (ideális eset), vagy néhány percen belüli megsemmisítését értjük, mivel a lövedék pályájából kiszámítható annak becsapódási és indítási helye. A tüzérségi lövedékek útvonalképzése, az alkalmazott algoritmusok hasonlóak a légtérelenőrző radarral szembeni elvárások felsorolásában leírtakhoz, ugyanakkor a különböző céltárgytípusok, kevert ballisztikus röppályák és a manőverező drónok útvonalképzése, még több, párhuzamosan alkalmazott sugárnyaláb esetén is komoly műszaki feladat.





2. táblázat. Az ELM-2084 légvédelmi és tűzérési lövedék-felderítőradar

Jellemzők	Réskitöltő	Megjegyzés
Elméleti hatótávolság	100 km	
Lefedettség/oldalszög	120°szektor	választható
Lefedettség/helyszög	0,1–3 km-ig	–10° +50° konfigurálható
Mérési pontosság	0,3% CEP*	Távolság/oldal/helyszög
Üzemi frekvenciasáv	„S” sáv ( $\lambda = 9$ cm)	
Útvonalképzés	200 céltárgy/perc	
Céltárgy típusok	Lövedékek	Minden, ami ballisztikus pályán repül
Céltárgy-azonosítás	adatbázisból	
Telepítési mód	mobil	Repülőgéppel szállítható
Hadrafoghatóság	Nagy megbízhatóságú, fokozatosan leépülő redundáns rendszerek	

\* CEP – Circular Error Probable (körkörös mérésihiba-valószínűség).

A 9. ábrán az ELM-2084 típusú légtérelenőrző, légvédelmi és tűzérési felderítőradar látható.

A 2. táblázat összefoglalja a radarra vonatkozó ismert műszaki jellemzőket.

## ÖSSZEZÉS

A tanulmány részletesen összefoglalta és vizsgálta az ELM-2084 többfeladatú radaroknak az elektromágneses spektrum által behatárolt főbb performancia jellemzőit. A radaregyenlet alkalmazásával ismertette a legfontosabb elvárható műszaki paramétereket, és bemutatta az elvárható performanciák megvalósításának kihívásait. Megállapítható, hogy ez a radartípus mindkét alkalmazásban megfelelhet korunk korszerű elvárásainak.

Ugyanakkor történelmi tapasztalataink arra figyelmeztetnek, hogy újfajta megközelítésben keressük a napjainkban megjelenő kihívások megoldásait. Ilyen kihívások a hiperszonikus fegyverek légtérelenőrzés célú radarfejlesztésekre vonatkozó elvárásai. Erre az ELM-2084 még nem lehet képes, de minden paramétere adott ahhoz, hogy 5 éven belül ezzel a képességgel is rendelkezzen. Az új fejlesztési lehetőségek elősegítése céljából kidolgozás alatt áll egy a közeljövőben megjelenő tanulmány, amely a magyar ELM-2084 radarok legfontosabb, a szerző által perspektivikusnak tartott K+F fejlesztési lehetőségek – in situ radarperformancia-vizsgálat, meteorológiai adatszolgáltatás, kvázi-monostatikus, holografikus képalkotó üzemmódok, hiperszonikusfegyver-felderítési képesség – műszaki alkalmazásainak elvárásait foglalja össze. A HHP keretében a Magyar Honvédséghez érkező lokátorok jelenleg a világ legkorszerűbb radareszközei közé tartoznak.

## HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] Elektromágneses sugárzás: [https://hu.wikipedia.org/wiki/Elektrom%C3%A1gneses\\_sug%C3%A1r%C3%A1s](https://hu.wikipedia.org/wiki/Elektrom%C3%A1gneses_sug%C3%A1r%C3%A1s) (Letöltve: 2022.12.12);
- [2] Balajti István, *A RADAR – Haditechnika Fialoknak sorozat* (Budapest: Zrínyi Kiadó, 2021), 1–72.;
- [3] Gregson, S., McCormick, J., PariniC. „Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements”, The

Institution of Engineering and Technology ISBN 978-0-86341-736-8;

- [4] Balajti István, „A rádiófrekvenciás radarhálózatok előnyei és megvalósításuk kihívásai –Az ELM-2084 rádiólokátor-technológia alapján, *Haditechnika* LV. évf., 5. (2021): 8–15. <http://doi.org/10.23713/HT.55.5.02>;
- [5] IAI, „ELM-2084 MMR Multi Mission Radar”, <https://www.iai.co.il/p/elm-2084-mmr> (Letöltve: 2022.12.12);
- [6] Barton. David K, 2005. *Radar system analysis and modeling* (Boston: Artech House, 2005) p. 545.;
- [7] Manolakis, D. G., Ingle, V. K., Kogon, S. M. *Statistical and adaptive signal processing*. London, Artech House 2005. p. 796. ISBN 1-58053-610-7
- [8] „Prerelease Release Highlights - MATLAB & Simulink” <https://www.mathworks.com/help/phased/ug/uniform-linear-array.html> (Letöltve: 2023.1.23.);
- [9] „Magyar Honvédség Légierő Parancsnokság” [honvedelem.hu](https://honvedelem.hu) <https://honvedelem.hu/alakulat/magyar-honvedseg-legiero-parancsnoksag.html> (Letöltve: 2023.1.23.);
- [10] Tömböl László. Juhancsik János, *NASAMS – Légvédelem a XXI. században – Haditechnika Fialoknak sorozat* (Budapest: Zrínyi Kiadó, 2021) 1–72.;
- [11] „Magyar Honvédség Szárazföldi Parancsnokság” [honvedelem.hu](https://honvedelem.hu) <https://honvedelem.hu/alakulat/magyar-honvedseg-szarazfoldi-parancsnoksag.html> (Letöltve: 2023.1.23.).

## JEGYZETEK

- 1 <https://infostart.hu/belfold/2022/11/21/a-vilag-legmodernebb-radarrendszeret-allitjak-hadrendbe-magyarorszagon#>
- 2 Két azonos frekvenciájú hullám akkor mondható koherensnek, ha a találkozásukkor interferenciára képesek, azaz a fáziskülönbségük egy adott helyen időben állandó, vagy nagyon lassan változik.
- 3 Az egyesített elektronikai típusjelölési rendszer (Joint Electronics Type Designation System – JETDS) az Amerikai Egyesült Államok háborús minisztériuma által, a második világháború során kifejlesztett, és 1957-ben a MIL-STD-196 szabványban formalizált kategorizálás szerint: az AN/ Army/Navy (Marines) – hadserg/haditengerészet (tengerészgyalogság), T – hordozható, jármű által szállított, P – célokat detektáló és plottal jelző, Q – többfeladatú.