

X. Évfolyam 4. szám - 2015. december

BALAJTI István

balajti.istvan@uni-nke.hu

TUDOMÁNYOSAN MEGALAPOZOTT „IN SITU” RADAR VIZSGÁLATOK FONTOSSÁGA

Absztrakt

A radar hálózat műszaki lehetőségeit maximálisan kihasználó üzemeltetéshez elengedhetetlen a radarok sajátosságaihoz alkalmazkodó „in situ” mérési eljárások alkalmazása. Hagyományosan ez a munkamegosztásra kerül a radart üzemelő állomány és a radar eredeti gyártójának szakemberei között. Ennek a munkamegosztásnak a hiányosságai ismertek, hiszen a radarba beépített öntesztek (BITE) műszeretetségi szintje behatárolt, ugyanakkor az eredeti gyártó (ORM) helyszíni mérései alaposabbak, de ritkábbak, drágák és profit orientáltak. Minden mérési eljárásnál elsődleges szempont a mérés hitelessége, a mérési hiba meghatározása. Gyakorlati tapasztalatok azt mutatják, hogy a meghibásodási jelenségek magyarázhatók a helyi körülményekkel is, úgy, mint reflektció, többszörös hullámterjedés, rendellenes hullámterjedés a földfelszíni és időjárási körülmények. A cikk az olvasók figyelmét a tárgykör mérnöki/tudományos áttekintésére irányítja.

Method of implementation and the radar system oriented set of “in situ” tests have particular interest in maintaining current radar net at the peak of their operational capabilities. This work is traditionally shared between the radar operational personal and the original radar manufacturer (OEM) engineers. The shortcomings of these methods are known, because the level of test or technical check is determined by Built In Test Equipments (BITE) of the radar, and their supplementary tools are limited; the original equipment manufacturer site visits are deeper in measurement point of view, but seldom, expensive and frequently profit oriented. For any measurement techniques, a reliable estimate of errors is one of the primary concerns. Experiences shows that degradations can be explained with local circumstances such as reflections, multipath, anomalous propagation, ground and weather conditions. This paper wishes to draw the reader’s attention to the engineering/scientific aspects of the subject.

Kulcsszavak: rádiólokáció, „in situ” mérések, hadrafoghatóság, logisztika, légi közlekedés ~ radiolocation, „in situ” measurements, war operability, logistics, air traffic

BEVEZETÉS

Az országok légteréből, környezetéből származó valós idejű információ összegyűjtése és feldolgozása meghatározó szerepet játszik a biztonságos légiközlekedésben. Békeidőben a haditechnikai eszközök, berendezések hadrafoghatóságának fenntartása rendkívül kritikus, hiszen a meghibásodások, eszköz performancia csökkenések, általában fokozatosan hosszabb idő alatt, pl. tárolás alatt következnek be. A berendezésekbe beépített önteszt (BITE) nem biztosít kielégítő védelmet a performancia romlás ellen, hiszen gazdaságossági okok miatt, csak néhány alapvető rendszerparaméter üzemképességét célszerű ellenőrizni. A központilag betervezett gyári- közép és nagyjavítások határfoka is javítható, ha az eszközökön rendszeres performancia felméréseket végeznek. A performancia romlások néhány fajtája pl. a meghibásodások azonnal felfedezhető, de a kiegészítő eszközök pl.: az érzékelőt burkoló RADOME veszteségei, krízis és háborús viszonyok közötti üzemmódok nem vagy csak költségesen, nagyon korlátozott mértékben ellenőrizhetők. Ezért az eszközök rendszergazdáinak megoldást kell találni a gazdaságos üzemeltetésre, miközben biztosítaniuk kell a berendezés pl. a rádiólokátorok állandó magas szintű hadrafoghatóságát.

A rádiólokációval foglalkozó elméletek általános modellezési elvárásai szerint, a rádiólokátorok alrendszerei pontosan követik a matematikai leírásokat. Így pl. leggyakrabban a céltárgy pontszerű, az antennarendszer optimális térbeli szűrő, az adójel „tisztá” spektrummal rendelkezik, a vevőrendszer linearitása és dinamikája legyen végtelen, stb. Előfordulhat, hogy ezeknek az elvárásoknak elhanyagolható veszteségekkel megfelelően különösen, ha kipróbált, a gyakorlatban bevált megoldásokat alkalmazunk. Néha azonban bizonyos elméleti elvárásokat fel kell adni, mivel a jelenlegi technológiai szinten nem, vagy csak rendkívüli költségekkel realizálhatók. Számolni kell a haditechnikai eszközök „meglepetésfaktorának” fokozása, valamint az eredeti gyártók profitmaximalizálása érdekében alkalmazott manipulációs, radarperformancia „értelmezésekkel”, melyek rendkívüli mértékben megnehezítik a különböző rendszerek képességeinek összehasonlíthatóságát. Ezen hatások csökkentésének és az eszközök hadrafoghatóságának értékeléséhez fontos a hazánkban még meglévő tapasztalatok megőrzése és az „in situ” (valós helyzet alapján) vizsgálatok tapasztalatainak feldolgozása.

1. A HADITECHNIKAI ESZKÖZÖK PERFORMANCE VIZSGÁLATAINAK HÁTTERE

Általános esetben a haditechnikai eszközök pl.: radarperformanciák „in situ” vizsgálati legalább három interdiszciplináris szakterület tudásanyagát ötvözik, ezek:

- a rádiólokáció elmélete és gyakorlata,
- a mérés technika elmélete és a gyakorlata,
- a környezeti hatások, különös tekintettel a mikrohullámú interferenciákra.

Mindhárom diszciplína elmélete és gyakorlata önálló tudományos kutatások tárgya. Ezért a szerző „in situ” mérésekkel kapcsolatos tapasztalatainak feldolgozása csak arra törekszik, hogy elősegítse a haditechnikai eszközök „in situ” mérése során fellépő különböző kölcsönhatások bemutatását, a mérési eredmények kiértékeléséhez és hitelesítéséhez szükséges tudományos háttér megalapozását. Ennek érdekében röviden áttekintem és összefoglalom a MH HTI-ben végzett kutatás+fejlesztés (K+F) területén, valamint nemzetközi szinten a radarok korszerűsítése és performancia vizsgálataik, „in situ” mérések, végrehajtása, újak kidolgozása és az eredmények kiértékelése során szerzett tapasztalatokat.

Elvárásaim szerint elősegítem az érdeklődő szakembereket:

- behatárolni azokat a radarperformanciákat meghatározó műszaki területeket, ahol a jelenlegi, világszínvonalú technológiai megoldások költséghatékonyan tovább fejleszthetők,
- kizárni azokat a tudományosan elfogadott kutatási területeket, melyek nem relevánsak a légtérelenőrző rádiólokátor technológiai alkalmazásokban a jelenlegi és az elkövetkező 10-15 évben,
- feltárni azokat az „in situ” vizsgálati területeket, melyek Magyarországon a téma vonatkozásában célszerű kutatni, egyetemen oktatni, és amelyek gazdasági sikerek forrásai lehetnek,
- adatokat gyűjteni a Gauszi-monostatikus és a „VHF” „m”-s rádiólokátorok új alkalmazási területei műszaki performanciáinak értékeléséhez,
- meghatározni a közeljövő rádiólokátor rendszereinek elvárható és „in situ” mérésekkel bizonyítható paramétereit,
- bemutatni a téma műszaki kihívásait és gazdasági lehetőségeit.
- felhívni a figyelmet és összegyűjteni a Magyarországon még meglévő tudásorientált rádiólokációval kapcsolatos területeket, melyeket nem szabadna veszni hagyni, illetve a jövőben komolyabb hangsúllyal kell kezelni.

2. RADAR PERFORMANCIA VIZSGÁLATOK FONTOSABB TAPASZTALATAI

A NAMSA-nál (ma NSPA) a 90-s évek közepén kezdődtek a SPC1 kapcsolatos munkák, melyek fokozatosan az összes, a NATO-ban rendszeresített távolfelderítő, kis hatótávolságú és tűzérési lövedék pályadetektáló rádiólokátor rendszerére kiterjedtek. (A szerző 2001-től veszek részt különböző tesztek és mérési eljárások kidolgozásában, bevezetésében, végrehajtásában és a tesztadatok kiértékelésében.) Ha egy radar típusra vonatkozó RPV projektként determinálunk, a projektháromszög elvárásai szerint legfontosabb a célkitűzés pontosítása, melyekkel meghatározható a szükséges radarperformancia mérések típusa, komplexitása, költséghatékonyan és redundanciákkal értékelhető a rádiólokátor műszaki állapota. A cikkben leírt RPV egyrészt kevesebb az SPC-nél [1], mivel terjedelmi és adat minősítési okok miatt nincs lehetőség az eredmények teljes mélységű ismertetésére, másrészt több is annál, hiszen az itt leírtak az ezen a területen szerzett tapasztalatoknak a szisztematikus feldolgozását jelenti. [1] [2]

Mi a feladata az RPV méréseknek?

- A rádiólokátorok és más haditechnikai eszközök, magas fokú műszaki hadrafoghatóságának mérésekkel bizonyított elősegítése, ill. garantálása.
- A haditechnikai eszközök, azon belül a rádiólokátorok, műszaki állapotának rendszeres, az eredeti gyártótól független felmérése, ellenőrzése, rendszeres időközönként, pl. 2 évenként.
- Olyan mérések kidolgozása és bevezetése melyek az eredeti és a fejlesztendő eszközben megtalálható tesztek (BITE2) képességen túlmutatnak.
- A katasztrófális, egyben rendkívül költséges meghibásodások előrejelzése, ill. bekövetkezésük valószínűségének csökkentése. (Cél a javítási költségek csökkentése és az eszközök hadrafoghatóságának növelése.).

¹ SPC (System Performance Check – (Radar) rendszer performancia - ellenőrzés)

² Built In Test Equipment

- Általános információk nyerése a radarperformanciák stabilitásáról, kiemelt tekintettel a krízis és háborús képesség vonatkozásokra.
- A különböző rádiólokátorokban alkalmazott alrendszer-megoldások hatékonyságának, műszaki lehetőségeik behatárolása és megbízhatóságukra vonatkozó adatbázis felállításához szükséges adatok összegyűjtése és értékelése.
- Az elavult vagy gazdaságosan nem helyettesíthető alrendszerek, részegységek modernizálásához szükséges adatok gyűjtése és csoportosítása.
- Rádiólokátor-élettartam növelése céljából olyan átvételi tesztek kidolgozása, melyek részleges alrendszer modernizációhoz kapcsolhatók.
- A Gauszi-monostatikus és „VHF” rádiólokátorok „in situ” mérés technikai ismereteinek előkészítése, ill. bővítése.

Követelmények a célszerűen kialakított RPV-struktúrával szemben:

- Feleljen meg a projektháromszög követelményelvárásoknak, úgymint a kitűzött célok, a rendelkezésre álló pénzügyi és időkeret által behatárolt minőségi munka.
- Vegye figyelembe a környezeti mikrohullámú interferenciák hatását, mérésekkel bizonyítsa értéküket, és ha lehetséges, kompenzálja.
- Ne ismételje az eszköz beszerzésekor elvégzett átvételi teszteket, de alkalmazhatóságuk célszerűségét vizsgálja meg és szükség szerint implementálja.
- Értékelje át a gyártók „házon belüli” elvárásait, műszaki paramétereit egy általánosan elfogadott szabvány szerint, mivel ezek gyakran ismeretlenek és/vagy más gyártók mérési eljárásainak ellentmondóak.
- Legyen független az eredeti gyártótól.

Az elvárt feladatokhoz tartozó idő- és költség-keretszámítások a RPV mérések végrehajtása és az eredmények kiértékelése két jól képzett rádiólokátor mérnök munkaidejével számol különböző 10-40 munkanap időtartammal. A költségeket növeli a helyszíni vizsgálatokhoz szükséges mérő műszerek beszerzése, karbantartása, kalibrálása stb.

2.1 A radarperformancia-vizsgálatok kivitelezése

A célkitűzések elvárásai alapján elemeznünk és determinálnunk kell a rádiólokátor műszaki állapotát meghatározó, de a BITE rendszer lehetőségein túlmutató és a mérésekre rendelkezésre álló időn belül ellenőrizhető fő rendszerparamétereket. Tapasztalataim szerint ezek az alábbi elvárások köré csoportosulnak:

- Rádiólokátor-alrendszer paraméterjellemzői (pl. adó-/vételi rendszer sáv szélességek, dinamika).
- A céltárgy-detektálási zónában a detekciós és a vaklármá- valószínűség változások minősége.
- A rádiólokátor-távolság-, oldalszög- és magasságmérés pontossága, ill. a céltárgyfelbontás minősége.
- Elsődleges és a másodlagos rádiólokátor antenna iránykarakterisztikák paramétereitől való eltérések és okaik.
- Állócél- és interferenciaelnyomás, aktív zavarvédelmi képességek.
- Multi-radar képességek, plot korreláltatás minőségi paraméterei, a rádiólokátor helyszíntől függő paraméterei, pl. tájolás.

Az „in situ” radarperformancia-mérésekkel kapcsolatos jelek, adatok, a kapcsolódó fogalmak feldolgozásra és publikálásra kerültek. Az alábbiakban, az elvárt tömörség és az új tudományos eredmények kimutatása tekintetében az egzakt eredményeket nyújtó, mért és/vagy

szimulált jel- és adatfeldolgozásra épülő lehetőségek ismeretanyagának összefoglalására³ és szelektív, a javasolt új rendszer számára is fontos rangsorolására szorítkozom, melyek:

- A radarperformancia-méréshez szükséges paraméterek, mérési eljárások értékelése, kiválasztása és az egyes eljárások felépítésének egységesítése.
- A rádiólokátor BITE rendszere és a performanciavizsgálatokhoz szükséges (elvárható) adatok rendszerezése, fontosságuk értékelése.
- Adórendszer matematikai modell⁴, a főbb paraméterek szimulációja és/vagy mérése:
 - Teljesítményszintek
 - Sávszélesség, jeltisztaság
 - Jelstabilitás,
 - Állóhullám arány
- Vevőrendszer matematikai modell, a főbb paraméterek szimulációja és/vagy mérése:
 - Teljesítményszintek
 - Dinamika, sávszélesség
 - Jeltisztaság
 - Jelstabilitás,
- Antennák matematikai modellje, a főbb paraméterek szimulációja és/vagy mérése:
 - Távoltéri mérések
 - Közeltéri mérések (sík és kör felületen)
- Az elektronikus ellentevékenységi és a védelem kérdései (ECM és ECCM kérdések), matematikai modelljeik és a mérési elvárások értékelése. SLB⁵ és SLC⁶ képességek szimulációja és mérése.
- Digitális jelfeldolgozás a rádiólokátorban és a kapcsolódó matematikai modellek. Első „Küszöb” (állócéll modellek, jelküszöbök, CFAR és detektálási valószínűség) paraméterekre vonatkozó mérések és szimulációk.
- Multi-radar képességek mérése, ellenőrzése, SSR paramétermérések. MODE-S és jelentősége az „in situ” radarmérésekben.
- A rendszeresen megismételt mérései eredmények újbóli feldolgozásával kinyerhető értéktöbblet meghatározása.

A fő tesztelvárásokat különböző rádiólokátor-típusokra bontva az 1. táblázathoz hasonló módon kell csoportosítani, kidolgozni és végrehajtani. A tesztek száma függ a rádiólokátor komplexitásától. [3]



1. ábra. „In situ” mérési környezet

³ Az NKE Műszaki Doktori Iskola általam hirdetett tantárgyainak tananyaga

⁴ Lásd részletek: MATLAB Phase Array Toolbox

⁵ SLB (Side-Lobe Blanking -oldalnyaláb kapuzás)

⁶ SLC (Side-Lobe Cancellation -oldalnyaláb elnyomás; orosz megfelelője -AK)

1. táblázat. Általános RPV-mérési struktúra

Sorszám	Tesztnév	Alap követelmény
0	RPV-előkészítő tevékenységek/Rendszerparaméterek	Igen
1	BITE szerinti rendszer veszteségek	Igen
2	Antenna forgásdekódoló és vízszintezés	Igen
3	SSR Antenna diagramok	Igen
4	SSR kábel veszteség/ VSWR	2 szint
5	SR impulzushossz/teljesítmény	Igen
6	Impulzus kompresszió / CNIF	Igen
7	SR Adórendszer csúcsteljesítmény	Igen
8	Vevőrendszer kalibráció/dinamika	Igen
9	Vevőrendszer sávszélesség/erősítés	Igen
10	Rendszer zajtényező	2 szint
11	Vételi SR antenna Hz. Diagram	Igen
12	Vételi SR antenna Vert. Diagram	Igen
13	Adási SR antenna Hz. Diagram	Igen
14	Adási SR antenna Vert. Diagram	2 szint
15	SR antenna Amplitúdó és fázis eloszlás (Közel téri mérések)	Igen
16	Nap alapján északra tájolás	Igen
17	Multi-radar-SR/SSR plot korreláció,	Igen
18	Multi-radar-SR/SSR plot, Pd/Pfa minőség	Igen
19	SR Antenna nyáláb irányítottság – A Nap mint interferencia (referenciajel) forrás	Igen
20	Hőkamerás vizsgálatok/adórendszer veszteségek	2 szint

Az első szintű tesztek, alapesztek, kötelezően végrehajtandók, míg a 2 szint csak akkor, ha az alpmérések, nem egyértelmű meghibásodásra vagy képesség csökkenésre utalnak. Minden első szintű teszt részletes mérési eljárással rendelkezik, mely az alábbi főbb pontokat tartalmazza:

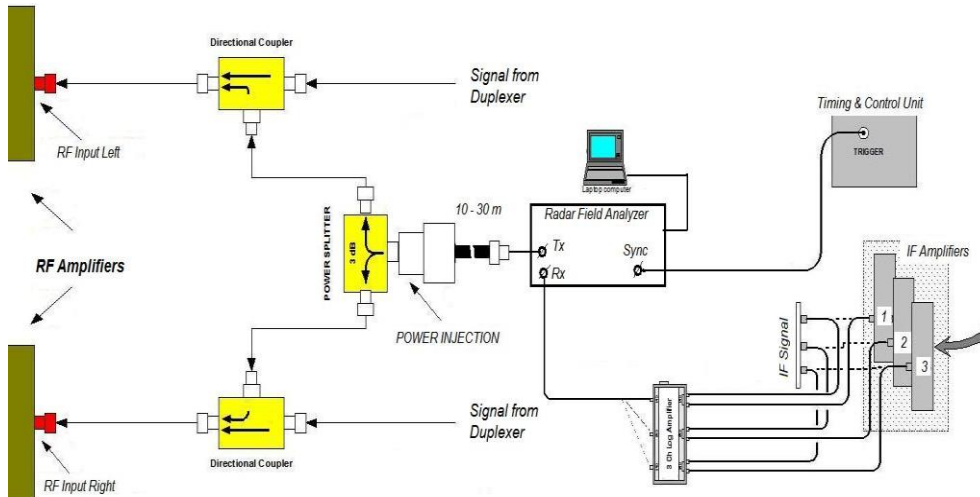
- A teszt célja és általános leírása.
- A teszt eredmények értékelési kritériumai.
- A teszt végrehajtásához szükséges eszközök, adatok, csatlakozók, szinkronjelek, a rádiólokátor helyszínhez köthető információk.
- Részletes tesztvégrehajtási leírás.

2.2 A tesztekkel kapcsolatos legfontosabb tapasztalatok értékelése

Általános „in situ”mérési helyzetet ábrázol az 1. ábra. A hegytetőn a RADOM alatt, kommunikációs tornyokkal körülvéve található a rádiólokátor. Előtérben a tesztberendezések, a mindkét polarizációjú jelek vételére képes, és különböző modulációval rendelkező RF jelek sugárzására alkalmas log-periodikus dipól antenna, az RF jelelőállító és -vételi egységgel rendelkező „Radar Field Analyzer” (RFA), valamint a vezérlést az adatok tárolását biztosító PC. [1]

Aktív antennarácscsal rendelkező rádiólokátor vevőrendszer és a teszteszközök elhelyezésének vázlatát mutatja az 2. ábra. Ez a teszt a vevő kalibrálása, a vételi dinamika és linearitás mérésére szolgál. Középen található az RFA, mely a rádiólokátorhoz szinkronizálva előállítja az RF tesztjeleket és fogadja a vevő logaritmikus erősítőn keresztül kicsatolt KF jeleit. Az RF jelek közvetlenül az adás-vételkapcsoló után kerülnek betáplálásra, míg a jelkicsatolás a jelfeldolgozó egység előtt KF szinten történik. A 3. ábra egy olyan mérési eredményt szemléltet ahol a vételi kalibrációs görbék nem teljesítik a linearitásra vonatkozó elvárásokat. Ettől, a rádiólokátorok számára alapvető paramétertől nagymértékben függ a SINR-veszteség, a rádiólokátor koordinátamérési pontosság és felbontás, valamint a zavarvédelmi eszközök hatékonysága.

A mért max. dinamika tartomány (elvárható > 70 dB) a vevő telítésbe vitele és a vevő zajszintje közötti érték, ugyan megfelel az elvárásoknak, de a szakirodalomban szokásos 1 dB kompressziós pontoknál szigorúbb 0.5 dB követelményt már nem teljesíti. A mérésnél a maximális pontosság elérése érdekében a vételi görbéket 9-ed fokú szűrő karakterisztikával közelítjük.

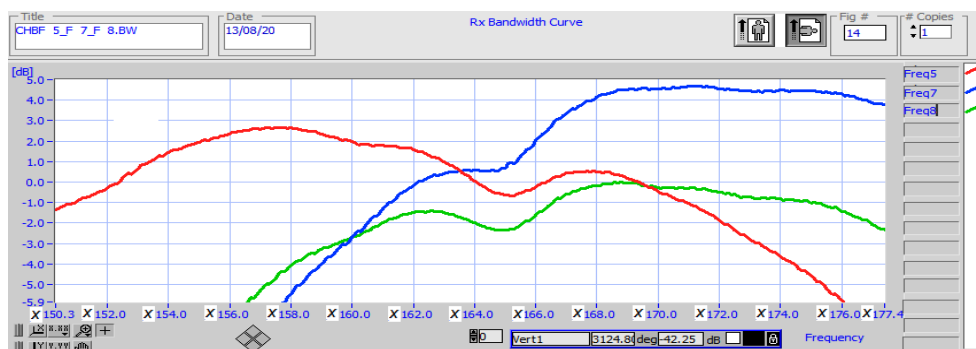


2. ábra: Vevőrendszer-kalibráció (forrás: szerző)



3. ábra: Hibás vevőrendszer-linearitás (forrás: szerző)

Az 3. ábra esetén a fő kihívás a hibás eredmények okának meghatározása. A lehetséges okok: a vevőrendszer meghibásodása, környezeti hatások vagy maga a mérési eljárás. Kiegészítő mérések végrehajtása után megállapítást nyert, hogy a kalibrált mérőműszer (RFA) szállítás közben veszít mérési pontosságából.



4. ábra: Hibás vevőrendszer-sávszélesség (forrás: szerző)

Az 4. ábra egy az 2. mérési elrendezéssel megfigyelt vevő sávszélesség mérési eredményét mutatja. Ez a mérés szintén hibát jelez („x162.5 MHz” frekvencián 3-3.5 dB-s beszívás

tapasztalható), de ezúttal a rádiólokátor-vevő RF szakaszán bekövetkezett kábel meghibásodást kellett izolálni, a mérések alacsonyabb és magasabb frekvenciákon történő megismétlésével.

2.2.1. Multi-radar SR/SSR plot korreláció, Pd/Pfa minőségvizsgálat

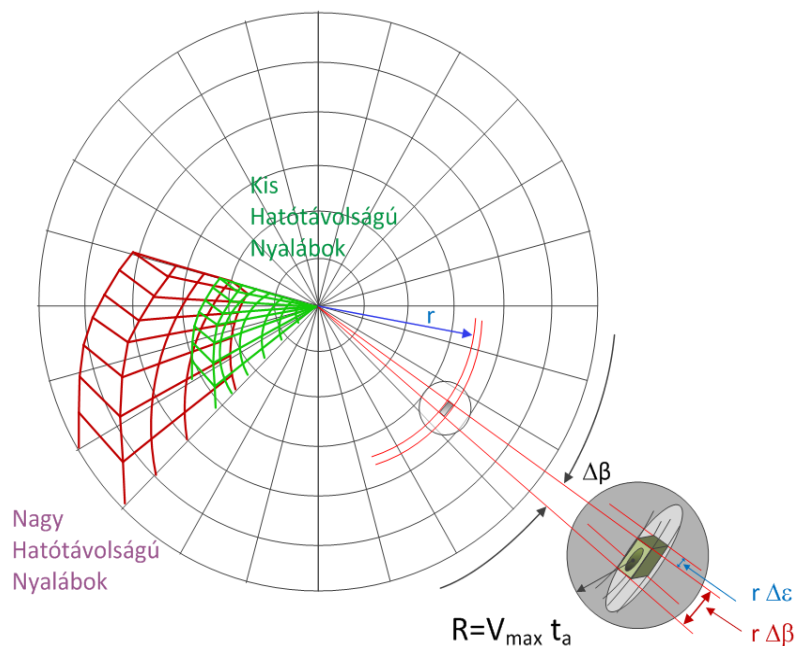
A technológia és a számítástechnika fejlődésével a rádiólokátorok hálózatba kapcsolásának elvárásai folyamatosan nőnek, bár legalacsonyabb szinteken csak a kommunikációs adatinterfészek szabványosak. Ezekre csatlakozva lehetőség van a rádiólokátor-hálózat céljelentéseivel kapcsolatos adatok gyűjtésére, majd a rendszerperformanciák vizsgálatára. A feladat végrehajtásához ismernünk kell, hogy a mai, korszerűnek tartott rádiólokátor hálózatok plot alapú adategyesítést valósítanak meg az alábbi előnyök miatt:

- a céltárgyak mozgásparaméterei a szomszédos rádiólokátorok felderítési zónáinak átfedési együtthatói arányában gyakrabban kerülnek frissítésre,
- ezáltal az útvonalképző algoritmusok, nagy 8-9 G gyorsulással rendelkező célokat is képesek követni, és
- az útvonalak fenntartása a gyakoribb adatfrissítés miatt megbízhatóbb, mint önállóan tevékenykedő rádiólokátorok esetén.

Az előnyök realizálása jelentősen függ a rendszert alkotó rádiólokátorok pillanatnyi performanciáitól, melyek közül különösen fontosak:

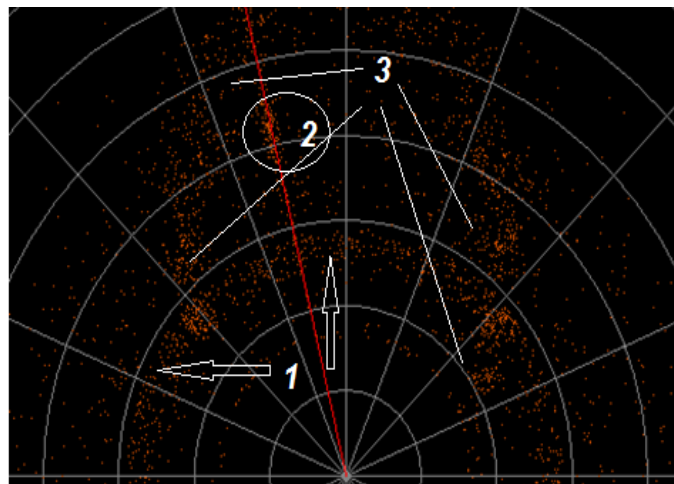
- a rádiólokátor tájolására, koordinátopozícióra és az SR/SSR-adatgyűjtés szinkronizálásra vonatkozó paraméterek,
- a céltárgyak detektálásával kapcsolatos, gyakran a szabvány céltárgyra vonatkoztatott plotminőséget különböző üzemmódokban előíró Pd, Pfa, eloszlás függvények,
- a céltárgyra vonatkoztatott mérési pontosság, felbontás, mely meghatározza a plot egyesítésekhez alkalmazható korrelációs kapuk méretét.

A vizsgálatok ezeknek a követelményeknek a figyelembevételével kerülnek kidolgozásra, tesztelésre majd véglegesítésre. Az 5. ábra a plotok kidolgozásához és korrelációjához szükséges kiindulási alapot jelentő rádiólokátor felbontó képesség paraméter komplexitást szemlélteti. Jól megfigyelhető a rádiólokátorokra jellemző üzemmód függő felbontóképesség változás, mely a „Nagy” és „Kis” hatótávolságú nyalábok 3D-s optimális üzemmódjainak a függvénye.

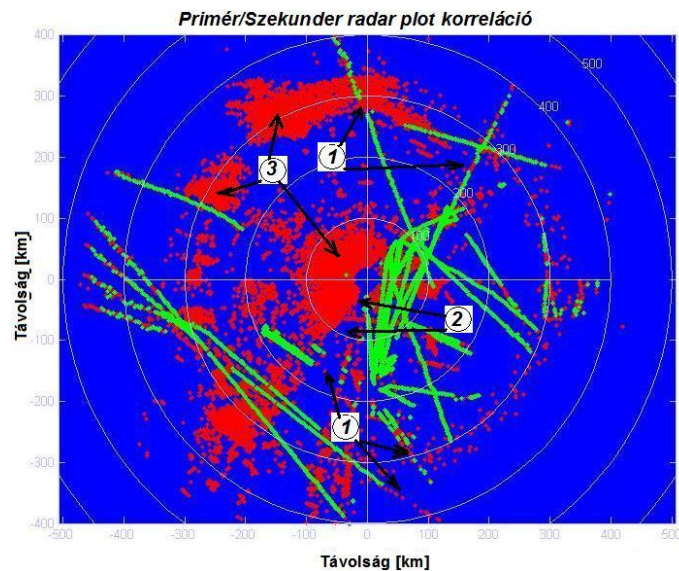


5. ábra: A korrelációs kapu és a felbontóképesség cellaméretei (forrás: szerző)

Ehhez kapcsolódó mérési eredményt mutat az 6. ábra. A méréshez szükséges plot adatokat az adatrögzítő 10 órán keresztül gyűjtötte a rádiólokátor normál üzemmódjában, kikapcsolt adóval, fix detektálási küszöbértékekkel. Ez alapján felmérhetők a vaklármaértékeket befolyásoló környezeti és rádiólokátor specifikus jellemzők. Három fő hibaforrás figyelhető meg: a „Nagy” és „Kis” hatótávolságú nyalábok átfedése (1-s számmal jelzett terület), a helyi interferenciaforrás (2-es terület) és a Nap, mint zavaró adó által keltett hamis plotok (3-as területek) között. Működő adórendszerek, de kikapcsolt zavarvédelmi eszközökkel a hamis plotok eloszlása az 7. ábrán bemutatotthoz hasonlít. Zöld szín jelzi az SSR, míg a piros az SR plotokat. Az ábrán jól elkülöníthetők a céltárgydetektálás számára problematikus területek. Az 1-es jelzi a hiányos SSR-plotokat, 2-es a hiányos SR-plotdetekciót, míg 3-as jelzi azokat a területeket, ahol intenzív hamis plotképződés csökkentheti a valós célok észlelési valószínűségét.

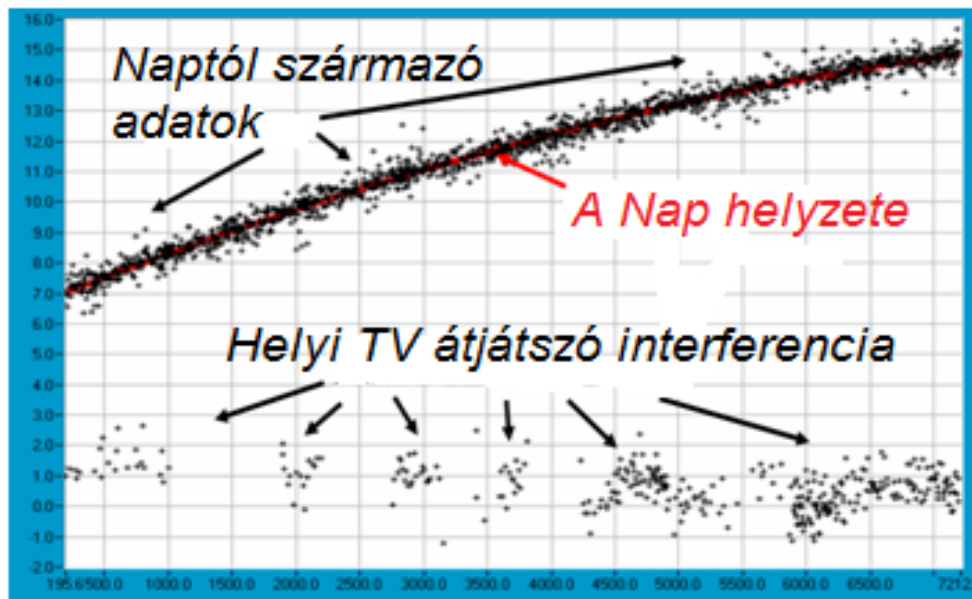


6. ábra: Vaklármaeloszlás valós mérés alapján (forrás: szerző)



7. ábra: SR/SSR plot korreláltatás valós mérés alapján [1]

A 8. ábra olyan ECCM képességromlás következtében bekövetkező hamis plot szám növekedés mérési eredményét mutatja, mely oldalnyalábon keresztül hat a rádiólokátorra. Ennek hatására csökken a rádiólokátor iránymérési képessége.



8. ábra: A Nap mint zavaradó pályája alapján ECCM képességsökkenés kimutatás [1]

Az 1. táblázatban megfigyelhető, hogy az elsődleges és a másodlagos rádiólokátor-antenna iránykarakterisztika paramétereinek mérését több teszt is támogatja és végrehajtásuk távortéri és közeltéri mérésekkel történik. Ezáltal az egymástól független mérések eredményei átfedésben vannak, megerősítve az eredmények helyességét és segítve az esetleges meghibásodások helyének behatárolását. A távortéri mérések aránylag egyszerűek, lásd 1. ábra, de végrehajtásukat gyakran akadályozza az időjárás, a megfelelő kihelyezett mérőpont kijelölése és jelentős problémákat okozhatnak az erős reflexiók a fix, általában negatív helyszögeken, az úttalan utak stb. Ezért napjainkban a közeltéri mérések jelentősége nő.

Minden teszt alkalmazhatósága szempontjából kritikus elem a teszt kidolgozásának és elfogadásának folyamata, melynek elvárásai:

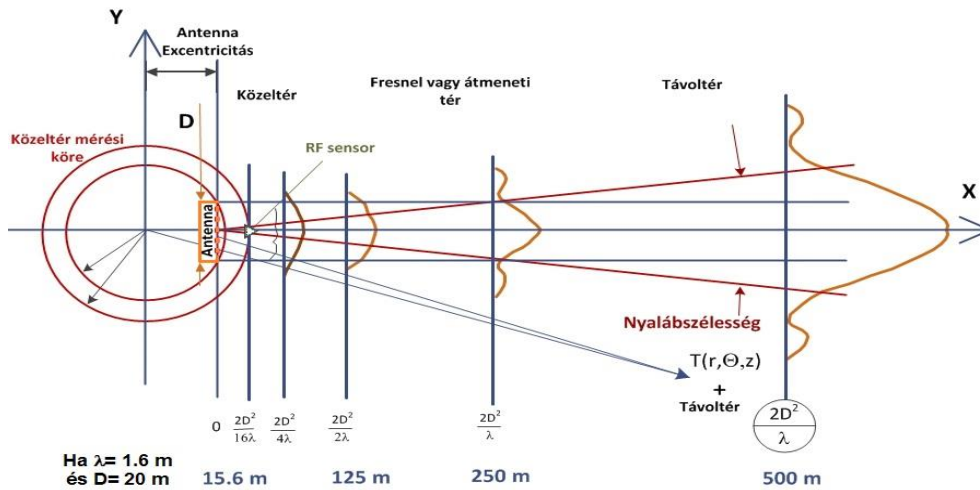
1. Speciális szaktudás, az „in situ” mérésekhez igazítható elméleti háttér felkutatása, rendszerezése és alkalmazhatóságuk igazolása.
2. Programozói ismeretek a szimulációs algoritmusok kidolgozásához. Fontos a rádiólokáció ismerete a mért eredményeknek a rádiólokátor dokumentációkban található értékekkel való kiértékeléséhez.
3. Rádiólokációs és projekt vezetői ismeretek a mérések költséghatékony kidolgozásához és végrehajtásához.
4. A mérési eljárás pontosítása, ha lehetséges egyszerűsítése, a szimulált eredmények valós mérések eredményeivel való összehasonlításával.

2.2.2. Az antenna rendszerek közeltéri mérései

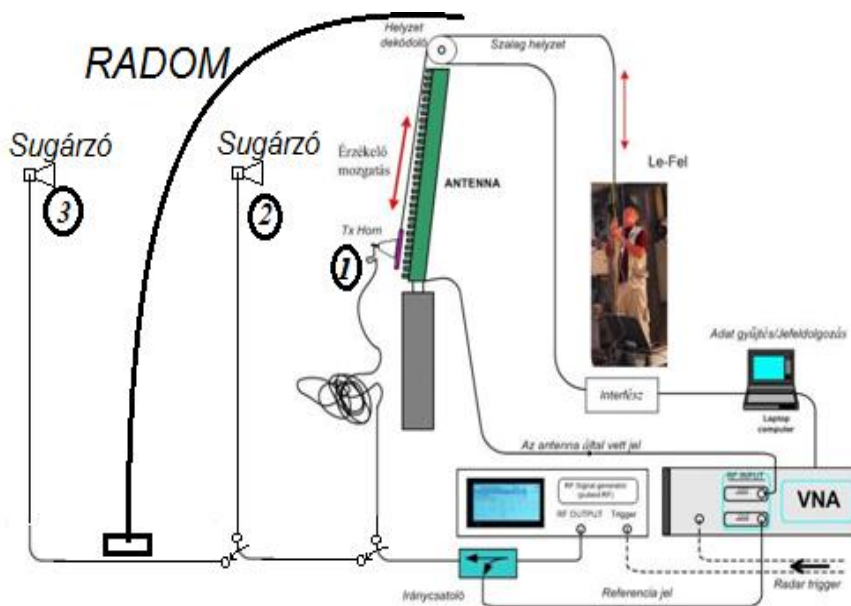
Az 9. ábra a mérési elmélet és elrendezés pontosítása céljából az antenna elektromágneses térének változását szemlélteti a közel- és távortéri mérési elrendezésekhez. Az ábra jelzi a térbeli hullámfront alakulásának folyamatát (a 20 m-s VHF antennára vonatkoztatva) a közel tértől a $T(r, \Theta, z)$ -vel jelzett távortéri pontig.

Közeltéri mérésekkel megoldandó feladatok:

- a függőleges és vízszintes iránykarakterisztikák mérése síkban (lásd 10. ábra) ,
- a vízszintes iránykarakterisztikák mérése egy körszelet és/vagy hengerpalást mentén,
- a rádiólokátor antennát védő RADOM-performanciák ellenőrzése.



9. ábra: A közeltér és a távotér értelmezése (forrás: szerző)



10. ábra: A Közeltéri mérés műszerezettsége [2]

Az RF-jelforrás jele egy iránycsatorlón keresztül az RF-hálózat analizátorra kerül, mint referenciajel, míg másik része a sugárzón (RF sensor) keresztül az antennára. A mérési elrendezés egyszerűsített S-paramétermérés, ahol az antenna által vett jel összehasonlításra kerül a referenciajellel. Ezáltal a köztük lévő fázis- és amplitúdó különbségek a sugárzó helyzetének függvényében közvetlenül elemezhetők és a távotéri iránykarakterisztikák FFT segítségével számíthatók. A mért és elvárt paraméterek összehasonlításával általában feltárható az antenna performanciaromlása, de néha kiegészítő (1. táblázat - 2 szint) mérések, pl. állóhullám arány mérésre is szükség van a meghibásodás pontos behatárolásához.

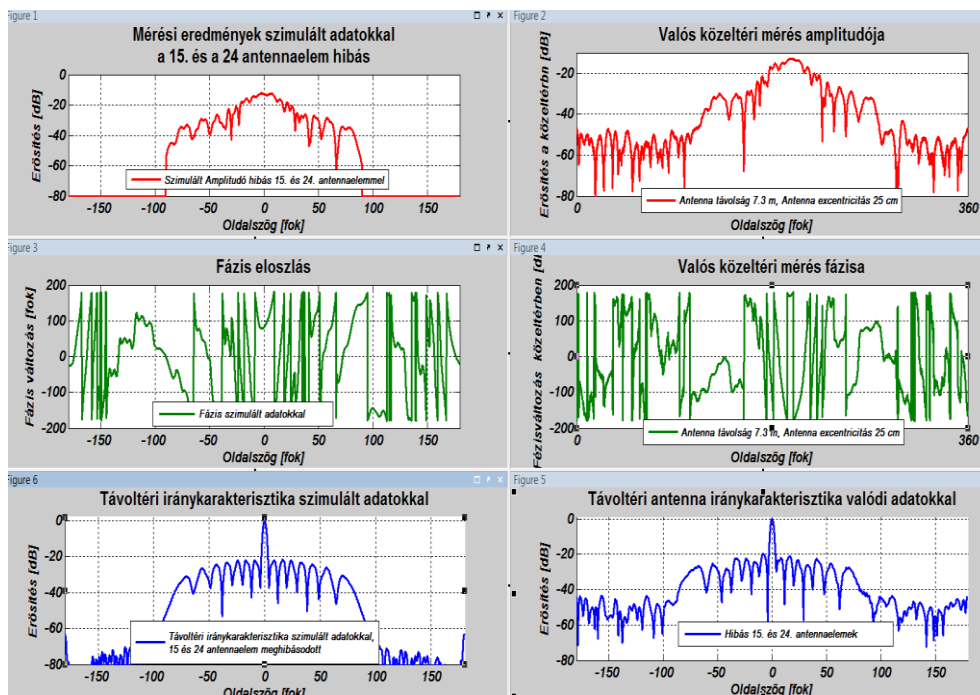
Az „in situ” mérések általános sajátossága, hogy a mérési elrendezés a lehető legegyszerűbb, a helyszínen gyorsan beállítható és minimális idő alatt végrehajtható legyen, További elvárás, hogy a mérési pontosság tegye lehetővé az eredmények hasznosítását. Ezek a követelmények egymással ütközhetnek, különösen, ha a mérési eszközkészlet beszerzési és használatbavételi árát is figyelembe kell venni a teszteljárások kidolgozásakor. Ezért a különböző feladatok végrehajtásához szükséges mérési elvárások, azon belül a mérési elrendezéseknek (10. ábra) fontos szerep jut a kivitelezhetőség értékelésében. Saját tapasztalatom és a szakirodalom [88] szerint is az „in situ” mérések legnehezebben kivitelezhető és legköltségesebb tényezője a mérések elvárt hibahatárokkal történő megismételhetőségének betartása. Mivel nincs két teljesen egyforma „in situ” környezet, még a két év múlva ugyanazon helyszínen végzett mérés

is más, ezért a pontos mérés megismétlésének elvét fel kell adni és helyette az elvárható „korrekt” mérés fogalmát kell bevezetni és alkalmazni. Ehhez kell hozzárendelni az adatgyűjtés paramétereit, pl. az érzékelők pozicionálása tegye lehetővé, hogy az ebből származó hibák minimális, de legalább pontosan becsülhető mértékű pontatlanságot okozhassanak. Ugyancsak fontos, hogy a reflektciók és interferenciák felmérése első lépésben megtörténjen, hogy frekvenciaváltással, vagy a mérés sebességének változtatásával esetleg referenciamérés végrehajtásával az eredmények pontosíthatók és kiértékelhetők legyenek. Az adatgyűjtő szenzor elem helyzetét, a mintavételi sebességet (Nyquist-kritérium) és az érzékelő iránykarakteristikáját úgy kell megválasztani, hogy ezekből kifolyólag ne legyen szükség az adatok utólagos korrekciójára.

A helyszínen a legnagyobb és legidőigényesebb probléma az érzékelőnek a mérendő antenna forgásközéppontjába való beállítása, mely csak bizonyos toleranciákkal oldható meg. Ezért az ebből adódó hibák korrekcióját a mérési adatokat kiértékelő algoritmusnak is támogatnia kell. Gyakran előfordul, hogy a mérési adatok csonkoltak, pl. síkfelületen történő közeltéri mérések esetén, melynek hatását szimulációval pontosan fel kell mérni.

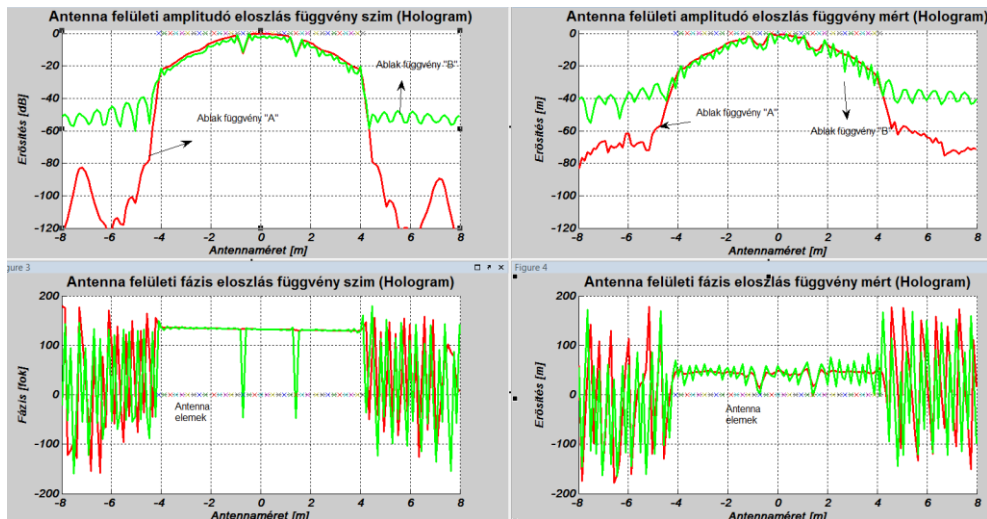
Amennyiben pontosabb hibafeltárást is elvárunk a mérésektől ezeket ki kell terjeszteni a mikrohullámú holográfia⁷ alkalmazására, mellyel közvetlenül mérhető az antennaelemek amplitúdó és fázis viszonya. Az amplitúdó- és fáziseloszlás függvényekből közvetett módon következtetéseket vonhatunk le az antennaelem és az egész antennarendszer illesztettségére, a fázisforgatók vagy a tápegységek meghibásodására vonatkozóan.

Komoly elméleti felkészüléssel kell rendelkezni az algoritmusok kidolgozásához, a mérési adatok és az eredmények értékeléséhez. [4] A gyűjtött adatok és szimulációs eredmények összehasonlítását az 11 és 12. ábra szemlélteti.



11. ábra: A közeltéri körfelületen szimulált (bal oldal) és mért (jobb oldal) amplitúdó, fázis eloszlás valamint az ezekből számított távoltéri iránykarakterisztikák (forrás: szerző)

⁷ Pl. lehetőség van a Gábor Dénes által 1947-ben szabadalmaztatott mikrohullámú holográfia antennarács diagnosztikai mérésekkel kapcsolatos központi adatbázis kifejlesztésére és a kapcsolódó K+F tevékenységekhez (pl. céltárgyfelismerés) szükséges tapasztalatok gyarapítására.



12. ábra: Szimulált és mért hologramok (forrás: szerző)

Az 12. ábrán a távoltage-re vonatkozó mérés alapján számított iránykarakteristikából (11. ábra alsó része) a vizsgált antenna felületére képzett amplitúdó- és fáziseloszlások két különböző simítási (ablak) függvénnyel (zöld és piros vonalas értékek) lettek megvalósítva. Ennek a holografikus jelfeldolgozásban jól ismert megoldásnak a hatékonysága a mérési hibákon kívül függ az antenna eredeti ablakfüggvény-paramétereitől. Tapasztalataim szerint a két különböző paraméterekkel rendelkező ablakfüggvény segít a különböző antennákhoz tartozó legjobb együttható értékek gyors lokalizálásában, hiszen az antennák amplitúdó- és fáziseloszlás függvényei gyártóspecifikusak.

A mérési eredmények kiértékelésének utolsó pontja a szimulált és a valós mérések eredményeinek összehasonlítása. Természetesen a szimulált adatok pontosabb eredmény meghatározást tesznek lehetővé, de a valós mérési eredmények is legalább 5-8 dB eltérést jeleznek, a hibás elem helyén, az amplitúdóeloszlás függvényen. Ugyanakkor a meghibásodás helyén bekövetkező amplitúdóváltozást a fázismenetben bekövetkező eltérés is jelzi. A hibaforrás helyének pontosabb behatárolását teszi lehetővé a monopulzusos mérésre optimalizált antenna többi nyálábjára (Delta, Omega) vonatkozó eredmények összevetése.

Természetesen a szimulált és a valós mérések adatainak feldolgozása ugyanazokkal az algoritmusokkal történnek.

Az „in situ mérések” külön problémája, hogy terepen alkalmazható műszerekkel elvégezhető legyen. A mérésre alkalmas berendezést (1 adó és 4 vétel csatornás) RF hálózat analízátort (BURS14) Mikó Gyula és Sella Rudolf vezetésével a BHE Kft. készítette el. Ezzel a műszerrel az első mérési eredmények Dr. Orbán József (Hungarocontrol) engedélyével a Liszt Ferenc repülőtéren található légtérelenőrző radarok antennáin történtek.

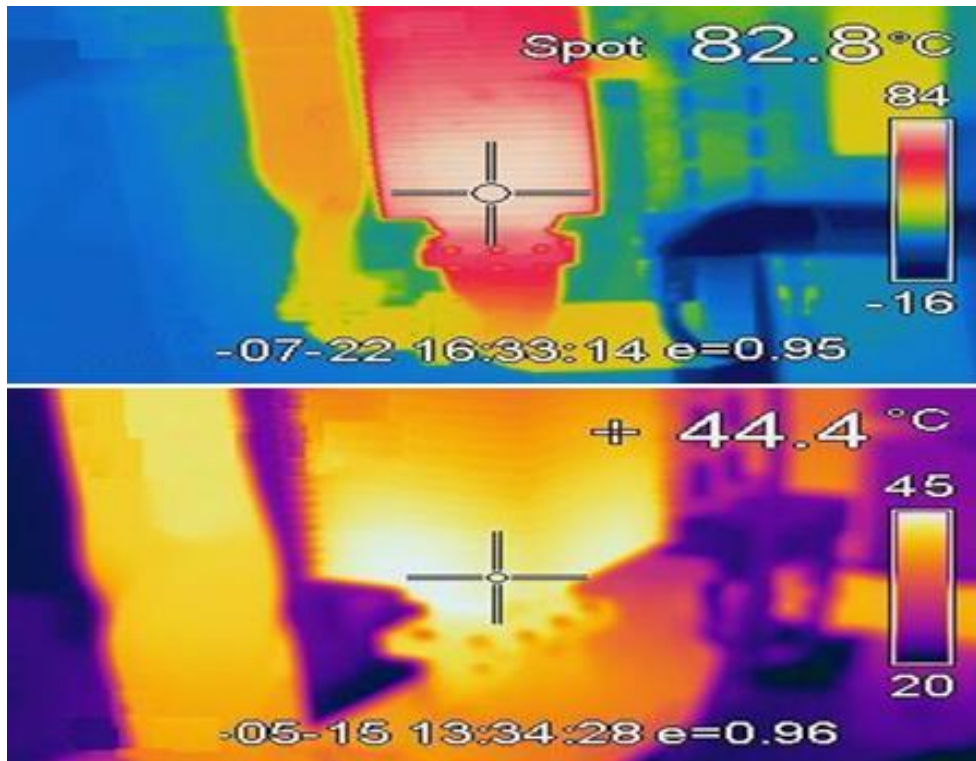
2.2.3. A radarperformanciákra vonatkozó adatbázis jelentősége

Hosszabb időn keresztül azonos és különböző rádiólokátor-típuson végzett folyamatos RPV vizsgálatok adatai és jelentései által a rádiólokátor logisztikai biztosítása szempontjából 10 - 15 év alatt nagyon értékes adatbázis felépítésére nyílik lehetőség. Ez az adatbázis alkalmas:

- a különböző rádiólokátor-helyszínek azonos rádiólokátor-típusokra vonatkozó mérései eredményeinek összevetésére,
- az meghibásodási „trendek” kimutatására,
- az egyedi mérésekből nem megállapítható meghibásodások feltárására,
- a kismértékben romló performanciaterületek behatárolására,
- mérési eredményekre vonatkozó elvárások pontosítására,
- a rádiólokátorok alrendszer/részegység modernizációra/feljavítására vonatkozó javaslatok megalapozása,

- jelentős üzemidő-kiesést okozó meghibásodások előrejelzésére.

Az 13. ábra egyszerű hőkamerával végzett adatgyűjtés és adatbázissal való összehasonlítás hasznosságát szemlélteti az adórendszer műterhelés hőmérsékletváltozás mérésével. Ez a mérés nem része az eredeti gyári méréseknek, de az adórendszer veszteségeinek növekedésére, egy adott szint után egyértelmű meghibásodások kimutatására használható.



13. ábra: A műterhelés nem várt hőmérsékletemelkedése (forrás: szerző)

Az ehhez hasonló különböző rádiólokátor helyszíneken gyűjtött mérési adatok bizonyítják, hogy az azonos mérési eredmények összevetésével, újraértékelésével, gyakran egyszerűen és olcsón behatárolhatók a más módszerekkel nehezen vagy csak rendkívül költségesen felfedezhető meghibásodások.

ÖSSZEGZÉS

A légiközlekedésben alkalmazott radarok és különböző haditechnikai eszközök performanciájának fenntartása békeidőben rendkívül kritikus és költséges. Megköveteli a magas szinten képzett mérnök-műszaki állomány rendszerben tartását, folyamatos képzését, hiszen a berendezések üzemeltetéséhez szükséges tudás nem létezik a polgári életben. Ezért a cikk röviden:

- behatárolta azokat a radarperformanciákat meghatározó műszaki területeket, ahol a világszínvonalú technológiai megoldások költséghatékonyan tovább fejleszthetők,
- feltárt néhány olyan „in situ” vizsgálati területet, melyek Magyarországon a téma vonatkozásában célszerű kutatni, és amelyek gazdasági sikerek forrásai lehetnek,
- segít meghatározni az új rádiólokátor-rendszer költséghatékonyágát behatároló „in situ” mérésekkel ellenőrizhető valós paramétereket,
- feltárta a jövőben egyre fontosabb Gauszi-monostatikus és „VHF” rádiólokátorok műszaki performanciáinak értékeléséhez is szükséges „in situ” mérési elvárásokat,

- meghatározta azokat a tudásorientált rádiólokációval kapcsolatos területeket, melyeket nem szabad veszni hagyni, illetve a jövőben komolyabb hangsúllyal kell kezelni, úgy az oktatásban mint a K+F tevékenységek során,
- összefoglalta és bemutatta azokat a tudományosan megalapozott műszaki területeket, ahol lehetőség adódhat sikeres és költséghatékony hazai fejlesztésekre.

Ezek a tapasztalatok napjainkra részben beépültek a jelenleg is hadrafogható rádiólokátorainkba, valamint főleg az „in situ” mérések területén kiegészültek a nemzetközileg elismert különböző rádiólokátor-technológiákkal kapcsolatban végzett mérési tapasztalatokkal. Ennek a tudásanyagának a jelentőségét emeli, hogy a rádiólokátor-mérésekkel kapcsolatos „in situ” tapasztalatok kiemelten fontosak a hadrafoghatóság szinten tartása és a logisztikai biztosítás költségeinek csökkentése miatt.

Az „in situ” mérések eredményeinek felhasználásával pontosíthatók az új rádiólokátor-rendszerek kialakítására vonatkozó elvárások, melyek közül kiemelten fontos, hogy:

- Költséghatékonyan vizsgálható a haditechnikai eszközök, pl. beépített teszt BITE rendszerek képességein túlmutató performanciák.
- Behatárolható a feljavítások, fejlesztések gazdaságosan megvalósítható műszaki megoldások köre.
- Pontosan megfogalmazhatók azok a rádiólokátor-alrendszer paraméterek, megoldások, melyeket célszerű előírni a tenderkiírások során illetve „in situ” mérésekkel is ellenőrizni az átvételi eljárásoknál.
- Konkrét mérési eljárások rendelkeznek a kritikus rendszerparaméterek méréséhez.
- Az oktatásba beépülhetnek az eredeti gyártók manipulációs rádiólokátor performancia értelmezései.
- Évtizedes mérési tapasztalatok csökkenthetik a környezeti hatások által bekövetkező mérési eredmények kiértékelési bizonytalanságát, elősegíthetik a rejtett radarperformancia hibák időbeni felismerését.

A komplex helyszíni mérések legfontosabb eredménye a rádiólokátorok magas szintű hadrafoghatóságának elősegítése, a valóságos radarperformanciák bizonyítása.

Felhasznált irodalom

- [1] BALAJTI, István (2008): Performance measurements of the radar “In Situ”. In: Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, MRRS 2008. Kiev, Ukraine, 22-24 September, 2008. p. 334-339.
- [2] ENGESAETH, J. R., NICOLAS, J. J.; BALAJTI, I. (2009): Mitigation of the “In Situ” radar antennas measurement reflections and multipath of the System Performance Checks. In: IEEE Radar Conference, Pasadena, USA, 4-8 May 2009. p. 1-5.
- [3] BARTON, D.K. (2007): Modern radar system analysis: software and user`s manual, version 3.0. Boston, Artech House, 158 p. ISBN 978-1-59693-264-7
- [4] JOY, E. B. (1988): Near field range qualification methodology. In: IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 36. no. 6, June, p.836-844.
- [5] Istvan BALAJTI: Near field antenna measurements in the field, International Radar Symposium (IRS) Proceedings, 2015, Dresden, Germany p. 930 - 935
<http://www.dgon-irs.org/index.php?id=32>