

A MSSR antenna in situ performanciavizsgálata közeltéri mikrohullámú holográfiával

MSSR antenna in situ performance measurement using near-field microwave holography

KIS Károly Árpád, DR. BALAJTI István, DR. SARVAJ CZ Kornél

Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Villamosmérnöki és Mechatronikai Tanszék, 4028 Debrecen, Ótemető utca 2-4.,
kis.karoly@eng.unideb.hu, balajti.istvan@eng.unideb.hu, sarvajcz@eng.unideb.hu

Abstract

This study presents the long-term performance evaluation of the TAR-1 Monopulse Secondary Surveillance Radar (MSSR) antenna installed at Budapest International Airport. The reliable operation of SSR systems is essential for the safe and efficient management of air traffic [1]. The research aims to assess antenna degradation and identify faults using an in situ near-field measurement method combined with microwave holography. This approach enables accurate analysis of the antenna's condition without disassembly. Results confirm the method's effectiveness in fault detection and maintaining system reliability.

Keywords: MSSR, HungaroControl, in-situ, performance measurement, 4ChVNA, Circular Near field, Microwave Holography

A tanulmány a Budapest Nemzetközi Repülőtéren működő TAR-1 Monopulse Secondary Surveillance Radar (MSSR) antenna hosszú távú teljesítménymérésének eredményeit mutatja be. Az SSR rendszerek megbízható működése alapvető a légiforgalom biztonságos és hatékony irányításához [1]. A kutatás célja az antenna degradációjának vizsgálata és a hibák azonosítása egy in situ közeltéri mérési módszerrel, amely mikrohullámú holográfián alapul. Az eljárás lehetővé teszi az antenna állapotának pontos elemzését leszerelés nélkül. Az eredmények igazolják a módszer hatékonyságát a hibadetektálásban és a rendszer megbízhatóságának fenntartásában.

Kulcsszavak: MSSR, HungaroControl, in-situ, performanciamérés, 4ChVNA, közeltéri, mikrohullámú holográfia

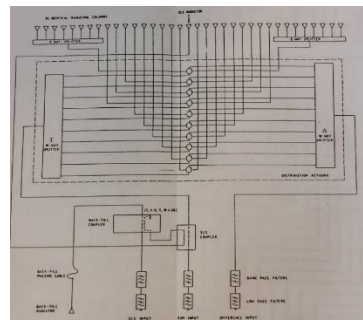
1. BEVEZETÉS

A közeltéri antennamérés visszhangtalan kamrákban és speciális alkalmazásoknál jól kidolgozott technológiával rendelkezik, azonban polgári célú antennák helyszíni (in situ) teljesítményméréséről kevés publikáció érhető el. Az ilyen mérések iránti igény folyamatosan növekszik, mivel a különböző időjárási körülmények között, szabadtéren üzemelő SSR radarok világszerte előregednek. A légi közlekedés biztonsági előírásainak költséghatékony betartása szigorúan korlátozott karbantartási időt tesz lehetővé. A helyszíni közeltéri mérésekhez kapcsolódó eljárások és számítási módszerek fejlődése új lehetőségeket nyit meg ezen kihívások gyors és gazdaságos megoldására. A HungaroControl CNS osztálya e területen korszerű módszereket alkalmazva élen jár a polgári radarüzemeltetésben.

Együttműködés alakult ki a HungaroControl és a Debreceni Egyetem Műszaki Kara között a püspökladányi Raytheon ASR23 radar helyszíni mérései kapcsán [2]. Ezen együttműködés eredményeként karunkat felkérték, hogy vegyen részt a Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtéren telepített TAR-1 MSSR antenna közeltéri helyszíni teljesítménymérésében.



1. ábra. TAR-1 MSSR radar és a mérési környezet



2. ábra. Az ALE-9 antenna sugárzó elemeinek, teljesítményosztóinak és kábeleinek elrendezése

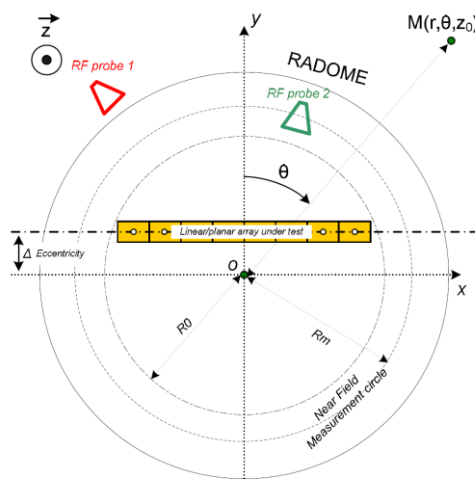
2. A TAR-1 RADAR MSSR ANTENNA ELMÉLETI TELJESÍTMÉNYJELLEMZŐINEK ÉRTÉKELÉSE

Az ALE-9 MSSR antenna 35 sugárzó oszloptömbből áll, mögöttük kábelezéssel, osztókkal és hibridekkel, amelyek hibaforrások lehetnek (lásd 2. ábra). A rendszer szimmetrikus, de karbantartása munkaigényes, mivel egyetlen elem hibája másokat is befolyásolhat. A Debreceni Egyetem mikrohullámú holográfián alapuló módszerrel számítja ki az antenna amplitúdó- és fáziseloszlását, melyből azimut távolféteri karakterisztikák is meghatározhatók [8][11]. Azimut távoli térerősség-eloszlások számíthatók az adott sík- vagy lineáris antennatömb (mechanikusan forgó antenna) kör alakú közeltéri méréseiből és a körhullám-spektrumból [8][11]. A 3. ábrán látható, azimut síkban ($z = z_0$) végzett kör alakú közeltéri mérések az elektromos tér tangenciális komponenseire összpontosítanak. Az elektromos tér bármely tangenciális komponense a poláris sík ($r > R_0$, θ , z_0) tetszőleges pontján a következő összefüggés szerint kapcsolható a körhullám-spektrumhoz (CWS) [9][10][11]:

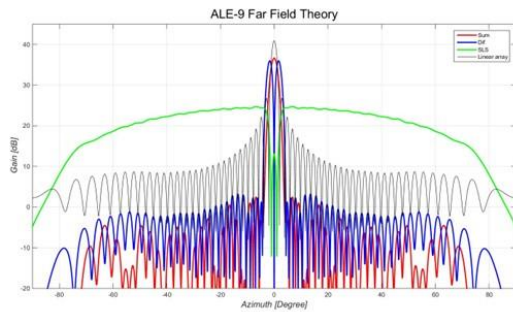
$$E(r, \theta, z_0) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_{n,k_{z_0}} \cdot H_n^{(i)}(k_r \cdot r) \cdot e^{jn\theta} \cdot e^{jk_{z_0}z_0}, \quad (1)$$

ahol:

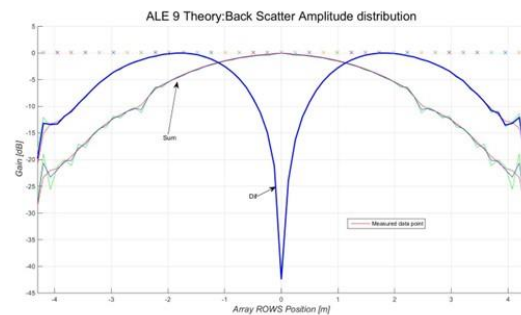
- $H_n^{(i)}$ az „n”-edik rendű és „i”-edik fajtájú Hankel-függvény (ahol $i=1$ esetén befelé terjedő hullámokról, azaz lefelé irányuló mérésről, míg $i=2$ esetén kifelé terjedő hullámokról, azaz felfelé irányuló mérésről beszélünk).
- A $C_{n,k_{z_0}}$ együtthatók alkotják az elektromos tér adott transzverzális komponenséhez tartozó körhullám-spektrumot (CWS) a $z=z_0$ azimut síkban. (A $C_{n,k_{z_0}}$ független az „r” és „ θ ” változóktól, azonban függ a függőleges vagy vízszintes polarizációtól.)
- k_r a $\vec{k}$ hullámvektor radiális komponense
- k_{z_0} a $\vec{k}$ hullámvektor függőleges komponense

3. ábra. Az antenna kör alakú közeltéri méréseinek konfigurációja a $z=z_0$ azimut síkban (felülnézet) [11]

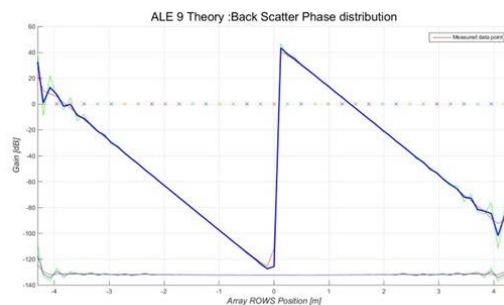
Ebben az esetben a kör alakú köztéri mérési adatokból számított, elméletileg optimális jellemzőket a 4., 5. és 6. ábra szemlélteti [3]. (Ennek elméleti háttere a mikrohullámú holográfia területén található, míg a helyszíni mérések részletei külön cikkekben kerülnek ismertetésre.) A 3. ábra bemutatja az MSSR antenna elméleti, gyárilag beállított távoli térben számított iránykarakteristikáját mindhárom csatornára vonatkozóan: Összeg (Sum, piros), Különbségi (Dif, kék) és Omni (Omni, zöld). A szürkével jelölt „egyenletes” görbe csak az összehasonlításához szolgál, és szemlélteti az antenna azimut szögének és oldalsáv-szintjeinek változását az alkalmazott ablakfüggvény függvényében [4][5]. A 4. ábra az antenna felületi sugárzó elemeinek ideális amplitúdó-eloszlásfüggvényét mutatja mikrohullámú holográfiához. Az ábrán a zöld-vörös vonal az összegcsatorna, a kék vonal pedig a különbségi csatorna eloszlási értékeit jelöli a 35 antennaelem esetében. Az 5. ábra a mikrohullámú holográfiai számítás fázis-eloszlásfüggvényeit szemlélteti.



4. ábra. ALE-9 gyári/elméleti, távolféri iránykarakterisztikái



5. ábra. ALE-9 gyári Sum és Dif csatorna amplitúdó-eloszlásfüggvényei



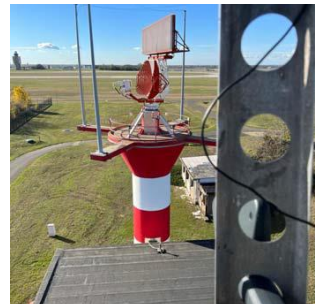
6. ábra. ALE-9 gyári Sum és Dif csatorna fázis-eloszlásfüggvényei

3. AZ ELSŐ NAPON MÉRT ANTENNA TELJESÍTMÉNYJELLEMZŐINEK ÉRTÉKELÉSE

Az első nap fő feladata a mérőrendszer beállítása, kalibrálása, az elektromágneses környezet felmérése és a rendszer működőképességének ellenőrzése volt. A 4 csatornás vektor-hálózatanalizátort (4ChVNA), a Rohde & Schwarz H300CE antennát és az RF szondaként használt microstrip antennákat kábelekkal csatlakoztattuk a darus teherautóra szerelt mérési platformhoz. A 4ChVNA egy könnyű (7,5 kg alatti), valós idejű hálózatanalizátor, egy adó- és négy egyidejű vevőcsatornával. Az összeállítás minden eleme megfelelően működött. A radarhoz viszonyítva három mérési pontot jelöltünk ki, ahogyan azt a 7. ábra szemlélteti.



7. ábra. A mérési pontok elhelyezkedése a radarhoz képest

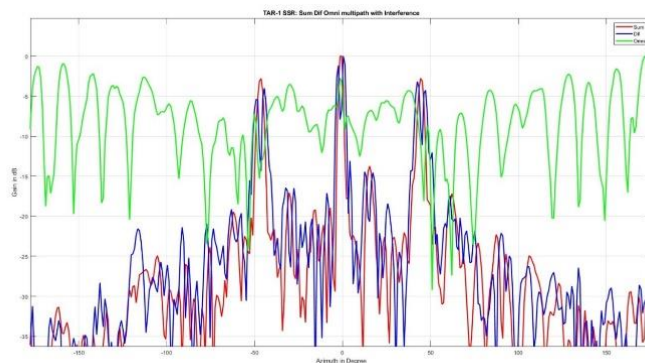


8. ábra. Logperiodikus antenna az első mérési pontban

3.1. Első mérési pont

Az első mérési helyszín a radar antennájától 25 méterre, 40°-os északi irányban helyezkedik el, szemben a radarberendezés épületének főbejáratával (lásd 6. ábra). A darus teherautó segítségével 18 méteres magasságba emelkedve helyeztük el a Rohde & Schwarz HE300 logperiodikus antennát a másodlagos antenna alsó síkjával egy vonalba (lásd 8. ábra).

A helyszín kedvező alapja miatt megfelelőnek tűnt a méréshez, azonban az első eredmények alapján a radar és a mérőrendszer erős, változó intenzitású interferenciának volt kitéve a repülőtér irányából. Ez jelentősen megnehezítette az adatok kiértékelését, mivel a jelek a rendszer távoltéri iránykarakterisztikáját tükrözték vissza (lásd 8. ábra). A jelenség többutas hullámterjedés és fémes felületeken (pl. kerítéseken) történő visszaverődés következménye lehet. A helyszíni vizsgálatok (lásd 9. ábra) szerint a radarépület nedves, sík felülete és a környező kerítések erős reflektorként viselkedtek. A 9. ábrán látható $\pm 45^\circ$ -os visszaverődések különösen a kerítések hatására utalnak. További részletes mérések szükségesek a pontosabb elemzéshez.

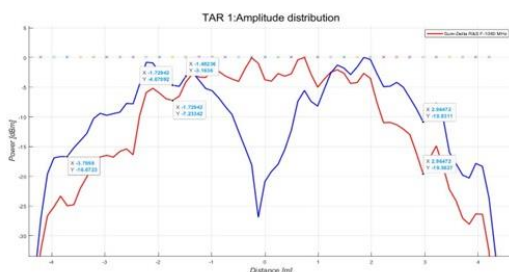


9. ábra. A TAR-1 távoltéri iránykarakterisztikái többutas hullámterjedés és erős interferencia környezetben

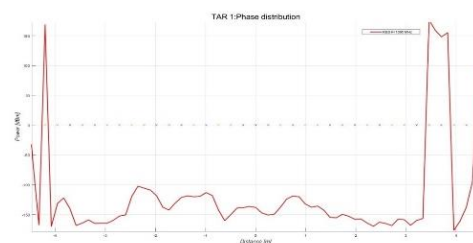
3.2. Második mérési helyszín

A második mérési helyszín a radartól északra, 17 méterre helyezkedik el a másodlagos antennától (lásd 7. ábra). A méréseket 19 méteres magasságban végeztük, R&S HE300 logperiodikus és „L” sávú üregrezonátoros micristrip antennák felhasználásával. Az összegyűjtött adatokból számított amplitúdódiagram a 11. ábrán látható.

A mérőrendszer áthelyezése megoldotta a többutas hullámterjedéssel kapcsolatos problémákat, azonban a repülőtér irányából érkező erős interferencia továbbra is kihívást jelentett a 1030 MHz-es (uplink) és 1090 MHz-es (downlink) frekvenciákon. A mérést kompromisszumként 1060 MHz-en végeztük el. Az adatgyűjtés a Rohde & Schwarz H300CE tesztantennával történt, majd az eredményeket kiértékeltek. A 10. és 11. ábra mutatja az amplitúdó- és fáziseloszlást, az 1. táblázat pedig a valószínűleg hibás oszlopokat. Az ellenőrző méréseket micristrip antennával végeztük, ezek eredményeit a 12. és 13. ábra, valamint a 2. táblázat tartalmazza. A 4ChVNA minden mérés során közvetlenül az antennából lejövő kábelekhez csatlakozott.

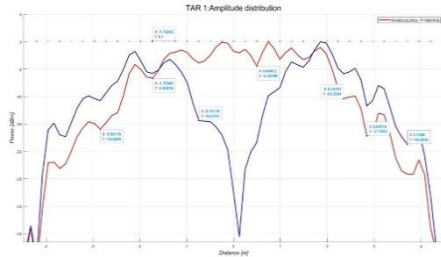


10. ábra. Sum, Dif csatornák amplitúdó-eloszlásfüggvényei R&S H300CE tesztantennával mérve

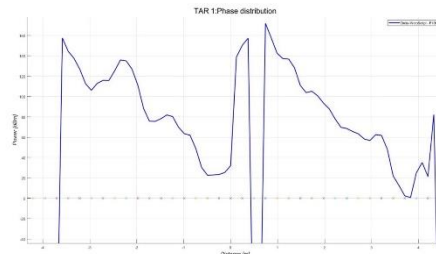


11. ábra. Sum csatorna fázis-eloszlásfüggvénye R&S H300CE tesztantennával mérve

Sugárzó pozíció	Probléma	Javítási javaslat
16, 20	Szimmetrikus hiba	A mögöttes RF hálózat ellenőrzése szintén fontos
11, 15, 22	Egyéni hiba	-
3, 8, 30, 33	Egyéni hibák, amelyek a szomszédos sugárzó elemeket is befolyásolják	A mögöttes RF hálózat és a teljesítményszótlók ellenőrzése szintén fontos



12. ábra. Sum, Dif csatornák amplitúdó-eloszlásfüggvényei microstrip tesztantennával mérve

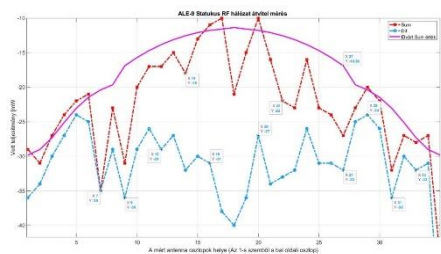


13. ábra. Sum csatorna fázis-eloszlásfüggvénye microstrip tesztantennával mérve

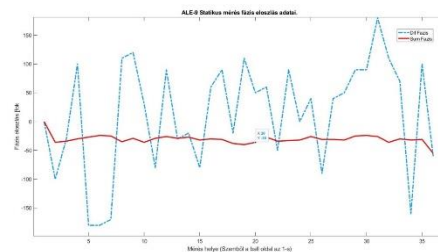
Sugárzó pozíció	Probléma	Javítási javaslat
16, 20	Szimmetrikus hiba	A mögöttes RF hálózat ellenőrzése szintén fontos
11, 15, 22, 24	Egyéni hiba	-
3, 7, 8, 28, 30, 33	Egyéni hibák, amelyek a szomszédos sugárzó elemeket is befolyásolják	A mögöttes RF hálózat és a teljesítményszótlók ellenőrzése szintén fontos

4. A RADAR ÉRTÉKELÉSE KÖZVETLEN CSATLAKOZÁSSAL VÉGZETT MÉRÉSEK ALAPJÁN (MÁSODIK NAPI MÉRÉSEK)

A 2. mérési ponton gyűjtött mikrohullámú holográfiai adatok megfeleltek az elvárásoknak, és a darus platform lehetővé tette közvetlen mérések végzését az antenna reaktív zónájában. Ez alkalmat adott az eltérő mérési módszerek összehasonlítására és az RF hálózat vizsgálatára. A 3. mérési helyszínen a 35 modul mindegyikét egyenként mértük meg egy microstrip antennával, amelyet 10-10 másodpercre érintettünk az elemekhez (lásd 14. ábra). A 4ChVNA-n keresztül mértük a Sum és Dif csatornák amplitúdóját és fázisát. Bár a mérés kísérleti jellegű, hasznos információt nyújt a modulok állapotáról. Az eredményeket a 14. és 15. ábra mutatja.



14. ábra. ALE-9 statikus mérés amplitúdó-eloszlás eredményei: elvárt Sum, mért Sum és Dif csatornák

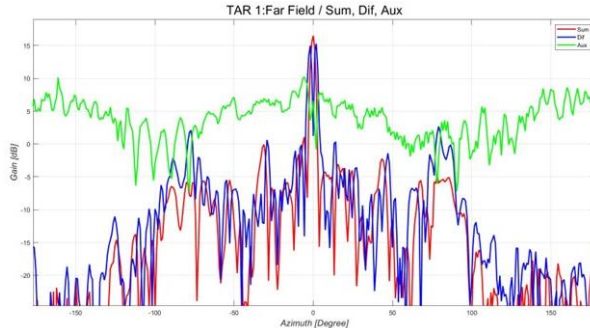


15. ábra. ALE-9 statikus mérés fázis-eloszlás eredményei: mért Sum és Dif csatornák

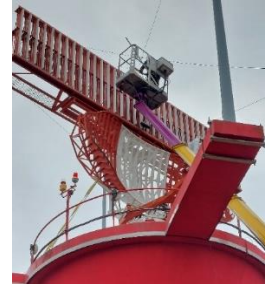
A mérési eredmények várható értékekkel történő összehasonlítása alapján látható, hogy az Sum csatorna jelei erősen ingadoznak, de a fázisértékek nagyjából követik a vártat, ugyanakkor a Dif csatorna fázisa egyáltalán nem követi a 6. ábrán látható elméleti értékeket.

5. A MÉRÉSI EREDMÉNYEK ÖSSZEGLZÉSE

A TAR-1 MSSR radarantenna teljesítményjellemzői az évtizedes üzemelés során az eredeti állapothoz képest romlottak. Ennek ellenére a rendszeres, szakszerű karbantartásnak és a HungaroControl műszaki csapatának lelkiismeretes munkájának köszönhetően az antennarendszer továbbra is megfelel az üzemi követelményeknek. Ez jól tükröződik a 2. mérési pontnál (lásd 7. ábra) végzett köztéri mérések alapján számított távltéri iránykarakteristikákon, melyeket a 16. ábra mutat be [6][7].



16. ábra. TAR-1 MSSR antenna távltéri mért iránykarakteristikái



17. ábra. Adott sugárzó elem közvetlen betáplálása

A TAR-1 MSSR antenna teljesítménye az évek során romlott, de a rendszeres karbantartásnak köszönhetően továbbra is megfelel az üzemi követelményeknek. A 2. mérési pontnál (7. ábra) kapott köztéri adatokból számított távltéri karakterisztikák (16. ábra) ezt alátámasztják [6][7]. Az oldalsáv-szint (sideband) a vártnál 15–20 dB-lel magasabb, de a segédantenna karakterisztikája ezt lefedi, így nem jelent működési problémát. A $\pm 90^\circ$ irányban tapasztalt kiemelkedések iránymérési hibára utalhatnak. A statikus mérések szerint az összegcsatorna jelei ingadoznak, míg a különbségi csatorna fázisa eltér az elmélettől, ami a Dif csatorna kábelezésének vagy osztóinak degradációjára utal.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani Cserháti Gábornak, a HungaroControl osztályvezetőjének, valamint minden kollégájának a mérések során végzett munkájukért és közreműködésükért.

A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM EKÖP-24-2 KÓDSZÁMÚ EGYETEMI KUTATÓI ÖSZTÖNDÍJ PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.



IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] S.Gregson, J.McCormick, C.Parini: "Principles of Planar Near-Field Antenna Measurements", The Institution of Engineering and Technology, ISBN 978-0-86341-736-8
- [2] K. Á. Kis, K. Sarvajcz and I. Balajti, "Radar spectrum measurement from drone platform in situ," 2023 24th International Radar Symposium (IRS), Berlin, Germany, 2023, pp. 1-10, doi: 10.23919/IRS57608.2023.10172474.
- [3] B. Joy and D. T. Paris, "Spatial sampling and filtering in near field measurements", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-20 No3, May 1972.
- [4] I. Balajti, "Performance Measurements of the Radar In Situ", Invited paper to MRRS – 2008, Proceedings, pp334-339, ISDN: 978-1-4244-2689-8
- [5] J.J. Nicolas, "Measurements of phased array antenna fields in situ: A few key aspects", IEEE Radar Conference Proceedings, Rome , May 2008
- [6] J.R. Engesaeth; J.J. Nicolas; I. Balajti: "Mitigation of the "In Situ" Radar Antennas measurement reflections and multipath of the System Performance Checks", IEEE Radar Conference Proceedings, Pasadena, USA, May 2009
- [7] I. Balajti, "AIR SURVEILLANCE RADAR ANTENNA PERFORMANCE MANAGEMENT AT HUNGAROCNTROL." (2017). Online: <https://www.semanticscholar.org/paper/Balajti-Istva%CC%81n-AIR-SURVEILLANCE-RADAR-ANTENNA-AT/375a0268c21402f9049a736959c7dca0a89f3aac> (accessed 2024/02/28)
- [8] J.R. Engesaeth; J.J. Nicolas; I. Balajti: Mitigation of the "In Situ" Radar Antennas measurement reflections and multipath of the System Performance Checks, IEEE Radar Conference Proceedings, Pasadena, USA, May 2009
- [9] A. D. Yaghjian, "An overview of near-field antenna measurements", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP-34 No 1, January 2006.
- [10] J.J. Nicolas, "In Situ Array Antenna diagnostics using Microwave Circular Holography", submitted to IEEE Array 2010 review
- [11] J. J. Nicolas, "Antenna array diagnosis in situ: Experimental results using microwave circular holography," 2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Waltham, MA, USA, 2010, pp. 306-310, doi: 10.1109/ARRAY.2010.5613354.