

Drón platform alapú in situ mérési eljárás kidolgozása antennákhoz

Radar spectrum measurement from drone platform in situ

KIS Károly Árpád¹, Dr. BALAJTI István², SARVAJ CZ Kornél³

^{1,2,3}Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Mechatronikai Tanszék, 4028 Debrecen, Ótemető utca 2-4.
e-mail: ¹kiscarolku@mailbox.unideb.hu, ²balajti.istvan@eng.unideb.hu, ³sarvajcz@eng.unideb.hu
ORCID: ¹0000-0001-7501-8756, ²0000-0003-3566-2904, ³0000-0002-8076-6748

Abstract

This paper is about spectrum analyzer measurements in situ of different antenna-type radiation patterns, including radar, using an Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) platform. This measurement method offers a 3D complex solution for mapping the emissions of emitters such as radar, Wi-Fi communication antennas, and electrosmog of automobiles, smart cities, which subject gets increasing attention today and in the near future. Based on these facts, the goal of this research is to analyze design issues and create a drone-based platform that can autonomously “in situ” measure these electromagnetic spectrum components and then draws conclusions from the data obtained.

Keywords: UAV, spectrum measurement, in situ, radar

Kivonat

Ez a cikk különböző antenna típusok sugárzási mintáinak spektrumanalizátoros in situ méréseiről szól, beleértve a radarokat is, pilóta nélküli légijármű (UAV) platformról. Ez a mérési módszer 3D-s komplex megoldást kínál az olyan sugárzók kibocsátásának feltérképezésére, mint a radar, a Wi-Fi kommunikációs antennák, valamint az autók, okosvárosok elektroszmogja, amelyek ma és a közeljövőben egyre nagyobb figyelmet kapnak. Ezen tények alapján a kutatás célja a tervezési kérdések elemzése és egy olyan drónalapú platform létrehozása, amely önállóan „in situ” képes mérni ezeket az elektromágneses spektrumkomponenseket, majd a kapott adatokból következtetéseket von le.

Kulcsszavak: UAV, spektrum mérés, in situ, radar

1. BEVEZETÉS

A 21. századra a technikai fejlődésnek köszönhetően, mint az Ipar 4.0, robotok, autonóm járművek és okos-város koncepciók szinte elképzelhetetlen lett életünk antennák használata nélkül. Minden ilyen rádióhullámokat használó eszköz maga körül elektromos és mágneses teret hoz létre. Ezen a sugárzási teljesítmények nagy része hasznos, viszont a kisugárzott energia töredékét elektroszmognak nevezik. Ha tartósan ilyen sugárzásoknak vagyunk kitéve, a szervezetünkben bekövetkező elváltozások akár egészségügyi kockázattal is járhatnak. Ezek közül a legjelentősebbek a fejfájás, migrén, koncentrációs zavarok, szívritmuszavar, de előfordulhatnak légúti, szemészeti vagy akár immunrendszeri panaszok is [1]. Számos tanulmány, publikáció és kutatás foglalkozik ezen fiziológiai hatásokkal [2]. Ezen okok miatt vizsgáljuk a sugárzókat egy újfajta mérési eljárással, mely az antenna teljesítményének spektrum analizátoros in situ mérésére koncentrálódik. A QuadSat nevű dán cég drónalapú szolgáltatást kínál, amely lehetővé teszi az RF berendezések tesztelését és ellenőrzését költség- és időhatékony módon. Ez az iparág korántsem elterjedt, ezért további kutatásokra van szükség ahhoz, hogy globálisan elterjedhessen [3]. Ezenkívül az Ipar 4.0-n alapuló intelligens gyárak egyesítik a kibertechnológiákat, például a kiberbiztonságot, a dolgok internetén (IoT) alapuló gyártási folyamatait vagy a kiberfizikai rendszereket (CPS) [4,5,6,7]. Feltörekvő technológiák vannak az összetettebb és tökéletesebb fizikai megvalósítás, a teljesítmény javítása, a minőség, az irányíthatóság, a menedzsment és a korszak láthatósága terén. További részletek a [8,9,10]-ben.

A tanulmányban kitérünk a kereskedelemben megvásárolható drónok alkalmazásáról drón-platformként in situ mérési eljárás fejlesztésére. A mérési útvonal tervezésére és végrehajtására, a spektrum analízatoros mérés végrehajtására, valamint a mérés végrehajtására valós körülmények között.

2. A MÉRÉSI ELJÁRÁS

2.1. Kutatáshoz használt drón

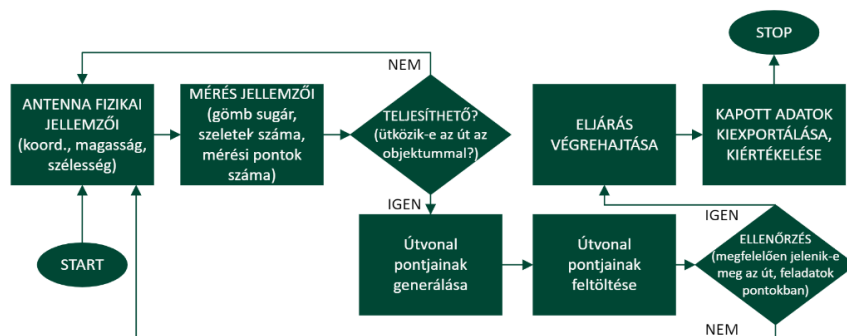
A kutatáshoz egy DJI Inspire 1 típusú Vertical Takeoff and Landing (VTOL) drónt használtunk. Ez az 1. ábrán látható drón teljes mértékben kielégíti repülési időre és hasznos teherbírásra szabott igényeinket. Az Inspire 1 az „in situ” tesztkövetelmények alapján nagyon pontosan meg tudja határozni földrajzi helyzetét és megtartani az adott pozíciót. Ebben az esetben 2 m-ig terjedő hibát jelent, ami a spektrummérések alkalmazási területünkön megengedhető. Ezt a hibát egy RTK GPS (valós idejű kinematikus globális helymeghatározó rendszer) minimalizálhatja, amely centiméteres pontosságot tud elérni [11].



1. ábra: DJI Inspire 1 drón az egyetemen fejlesztett „L” sávú antennával [szerzők saját képe]

2.2 Az in situ mérési eljárás kidolgozása

A mérési eljárás első lépése a mérendő tárgy/antenna földrajzi elhelyezkedésének, méreteinek és magasságának pontos ismerete. Ezután meg kell adni a mérés paramétereit. Ezek a mérési gömb sugara, rétegeinek száma, rétegenkénti pontok száma és lefedettsége. Ezen adatok (változók) ismeretében először egy a kutatáshoz fejlesztett Python programban generáltatjuk le az útvonaltervet, majd importáljuk a drónhoz csatlakoztatott alkalmazásba, amellyel az „in situ” művelet 3D-ben is elvégezhető. A végrehajtás során a drón platform spektrum analízatora mérést végez, amelyet a leszállás után exportálunk és kiértékelünk. Az eljárás folyamatábrája a 2. ábrán látható.



2. ábra: A mérési eljárás folyamatábrája [szerzők saját szerkesztése]

3. ÚTVONALTERVEZÉS A UAV PLATFORMHOZ

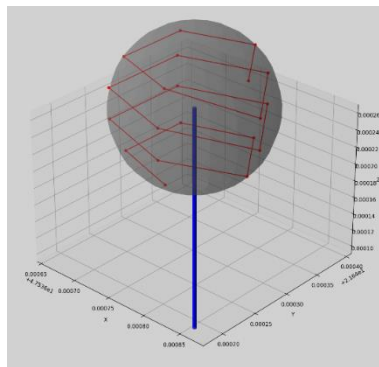
A kutatás fontos része egy Python program kifejlesztése volt, amely bizonyos változók függvényében bármikor nagy pontossággal és gyorsan képes létrehozni a drón repülési tervét a mérési alkalmazásokhoz. Ez a repülési terv az antennához igazodó gömb felszínén lévő bizonyos pontokból áll, a program ezeket a pontokat képes 3 dimenziós koordinátákba legenerálni. A választott változók a mérendő objektum (antenna) földrajzi elhelyezkedése, amely tartalmazza a szélességi és hosszúsági koordinátákat, a sugárzó fizikai méreteit (magasság, szélesség), a mérőgömb középpontjának magasságát, a mérőgömb sugarát, mérőgömb mérési

rétegeinek száma, a rétegenkénti mérési pontok száma, valamint a gömb felületének mérési lefedettségének mértéke százalékban. Ezen adatok ismeretében a fejlesztett program kiszámítja az útvonalterv egyes pontjainak földrajzi koordinátáit, a repülési magasságot a pontokban, és az irányt úgy, hogy a drónra szerelt antenna mindig a mérendő objektum felé irányuljon. Ezt az útvonaltervet a programban is exportálhatjuk és feltölthetjük a drón autonóm repülését támogató alkalmazás felhőjébe.

Mivel eredetileg a számításokhoz a program futtatásakor a földrajzi helyzetet koordinátákban, a magasságokat és a mérési gömb adatait méterben kell megadni, ez a matematikai számításokban és a vizualizációban a különböző mértékegységek ütközéséhez vezetne, így nem lenne arányos. Ennek a hatásnak a kiküszöbölésére pusztán a vizualizáció céljából a méterben megadott változókat a Föld GPS koordinátarendszeréhez viszonyítva átszámítjuk, ehhez a kutatásban egy durvább, de még kellően kielégítő összefüggést használtunk [13]:

$$l \text{ szélességi vagy hosszúsági fok} = 111139 \text{ méter} \quad (1)$$

Az (1) segítségével a hossz- és szélességi koordináták kiszámítása elhanyagolható mértékű eltérést eredményez a tesztelés és a mérés szempontjából. A programban generált 3D pontok szemléltetés céljából a programban is megjelennek, hogy az vizuálisan is megjeleníthető legyen, ezzel megkönnyítve az ellenőrzést (lásd 3. ábra).

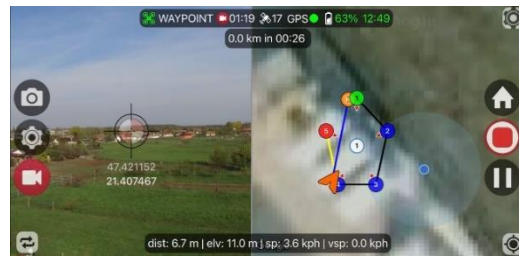


3. ábra: A repülési terv vizualizációja [szerzők saját szerkesztése]

4. IN SITU TESZTREPÜLÉSEK A DRÓNNAL

A rendszer teszteléséhez elengedhetetlen a tesztútvonalak berepülése, ami lehetővé teszi, hogy következtetéseket vonjunk le a pontosságról és a megbízhatóságról. A teszteket egy lakóövezettől legalább 150 méterre, magánterületen repülve végeztük. Az „in situ” mérés tárgya a tervek szerint a mérési útvonal repülése volt. A cikk egyik szerzője az Európai Unióban elfogadott A1/A3 távpilóta engedéllyel rendelkezik. Szemléltetésként egy 1 rétegű, rétegenként 5 pontból álló útvonal látható és annak kivitelezése a 4. ábrán. A repülési magasság 11 m, a mérési sugár 3 méter, amit a drón végig tudott tartani, elhanyagolható pontatlansággal. A legnagyobb mért függőleges eltérés 30 cm volt, de ezt a drón azonnal korrigálni tudta, amikor megállt a mérési pontokban.





4. ábra: 1 rétegű, 5 pontból álló útvonalterv végrehajtása [szerzők saját képei]

5. SPEKTRUM ANALIZÁTOR

5.1 A spektrumanalizátor kiválasztása

A kutatás során szükséges volt egy olyan, a drónra felszerelhető spektrum analizátor használata, mellyel el tudjuk végezni az in situ méréseket. Ez a kutatás az 1 GHz-től az „S” sávig terjedő frekvenciatartományt célozta meg, beleértve „L” sávú radarokat, valamint a jövőbeli kutatásokhoz az alacsonyabb frekvenciákat is. Ezen elvárások miatt nehéz olyan eszközt találni, mely kielégíti igényeinket a súly, frekvenciatartomány és érzékenység tekintetében is. A kutatáshoz választott eszköz egy USB spektrum analizátor, amelynek működési tartománya 35 MHz és 4,4 GHz között van [14]. Ez a mérőműszer alkalmas mérete, súlya és tömege miatt is. Nem elhanyagolható szempontból pedig költséghatékony megoldás is komolyabb társaihoz képest. A projektben a mérésekhez szükséges antennákat is a tanszékünkön fejlesztettük és gyártattuk le. Lásd részletekben a [15]-ben.



5. ábra: 35M-4400M USB spektrum analizátor [14]

A spektrumanalizátor műszaki teljesítménye tekintetében egy sweep típusú analizátor, mely frekvencia letapogató funkcióval rendelkezik. Használatához szükséges NWT program soros USB porton keresztül kommunikál az eszközzel. A program Linux operációs rendszereken érhető el.

5.2 A mérés végrehajtása

A drónra szerelt mérőeszköz a Raspberry Pi 4-en keresztül vezérelhető. Mivel a Raspberry Pi 4-gyel mobilinternet segítségével tudunk kapcsolódni az internetre, így távéléréből működtethető a Raspberry és így az analizátorunkat üzemeltető program is van hozzáférésünk. Amíg a drón a mérési pontokban van, a készülék egy-egy mérést végez, mely adatokat a készülék belső tárhelyére menti. Ezek az adatok a repülés után kinyerhetők, így minden egyes mérési pontban egy frekvencia-amplitúdó felbontást kapunk.

A mérés másik módja a drónról lelógó koaxiális kábel, amely a földön működő spektrumanalizátorhoz csatlakozik, amely számítógéphez csatlakozik. Így azonnal kiértékelhető adatokat nyerhetünk ki, ezt a megoldást használtuk a teszteléshez (lásd 6. pont).

5.3 A mérési adatok kiértékelése

A kapott értékeket egy programmal táblázatba foglalhatjuk, azaz a felbontástól függően minden egyes frekvenciához amplitúdó értéket kapunk. Ezt egy körön, hengeren és legkésőbb a mérési gömbhöz illeszthető gömbön kívánjuk szemléltetni úgy, hogy a repülési geometria mérési pontjai és környezetük az amplitúdótól függően, a frekvencia alapján szint váltsanak. Minél nagyobb az amplitúdó, annál vörösebb lesz a szín, mint egy hőterképen. A mérési pontokban egyszerre tudjuk megjeleníteni az azonos frekvencián mért

eredményeket, de a program végigfut az összes mért frekvencián, így egy GIF (Graphical Interchange Format) képet kaphatunk, amely dinamikusan változtatja majd a színét a mérési gömbnek megfelelő pontokban és azok környezetében a frekvencia változásának függvényében.



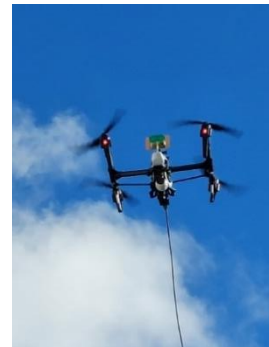
6. ábra: A Mechatronikai Tanszék hallgatói a püspökladányi mérési pontnál [szerzők saját képe]

A 6. ábrán a HungaroControl püspökladányi légiforgalmi irányító radarantennái látható, mely performaciavizsgálatát végeztük el a tesztelés alatt.

6. TESZTELÉS VALÓS KÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT

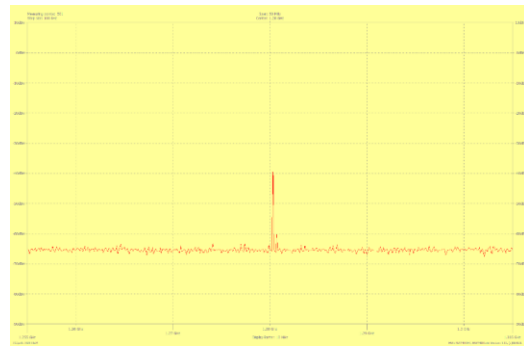
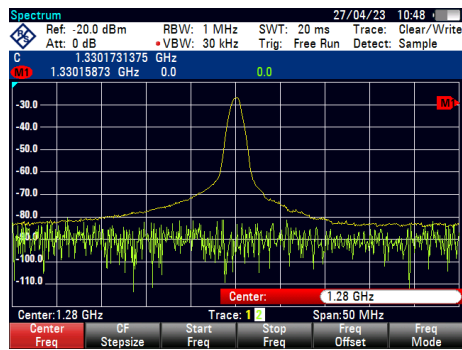
2023. április 3-án és 4-én a Püspökladányi Radar Antennánál lehetőség nyílt a Mechatronikai Tanszéknek közeltéri radarméréseket elvégezni, amelyek során drónnal végzett ilyen jellegű méréseket is teszteltünk.

A drón tetejére egy microstrip antenna került (lásd 1. ábra), amelyet 50Ω impedanciájú koaxiális kábellel kötöttünk a spektrumanalizátorhoz. A kábellel a repülés során stabilabb volt a drón, de a tesztek során fellépő 60 km/h -t meghaladó széllelőkések miatt és a fellépő turbulencia hatására nem tudtunk magasabban repülni, mint a radom alja, így nem tudtunk értékelhető eredményt produkálni. A jövőbeni karbantartás során lehetőségünk lesz a radarállomáson megismételni a tesztek.



7. ábra: Közeltéri drón-platform alapú spektrum mérés a Püspökladányi Radarállomáson (bal); a drón platform az „S” sávú microstrip antennával felszerelve [szerzők saját képe]

Tesztelési célból további spektrumanalizátoros méréseket végeztünk a laboratóriumban, a püspökladányi Raytheon ASR 23SS passzív primer antenna paramétereivel. Hosszú, 100 mikroszekundumos impulzusszélesség, 1280 MHz átviteli jelfrekvencia és 370 MHz impulzusismétlési frekvencia felhasználásával a 8. ábrán látható eredményt kaptuk. A bal oldalon referenciaként a Rohde & Schwarz FSH4 spektrumanalizátor által mért eredmény látható.



8. ábra: A mért spektrum a R&S FSH4 (bal) és a 35M-4400M USB Spektrum Analizátorral (jobb) [szerzők saját szerkesztése]

Kijelenthetjük, hogy az „olcsó” spektrumanalizátor megfelelően működik, és alkalmas az ilyen típusú mérésekhez. Még fordított polarizációs méréseknél is helyesen méri a körülbelül 25-30 dBm-el gyengébb várható jelet.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Ez a cikk egy drón-platform alapú speciális rendszer használatát fejti ki sugárzók „in situ” spektrum mérésére, beleértve a radarokat is. Ez a módszer a mérés testreszabásától tetszőleges antennára a kapott adatok kiértékeléséig komplex megoldást kínál az útvonaltervezést is beleértve a mérnöki szempontokat figyelembevéve.

A tesztek során tapasztalatokat gyűjtöttünk a drón platform alapú „in situ” mérőrendszerek megbízhatóságáról, pontosságáról és kapacitásáról. Ehhez több órányi tesztanyag összegyűjtése volt szükséges, mely során a rendszer működését áttanulmányozva elmondható, hogy stabil, megfelelően kommunikáló és megbízható kapcsolatot alakítottunk ki az útvonalrepüléstől a mérés autonóm elvégzéséig. További fejlesztési lehetőségként egy dróndokkoló állomás tervezését is megcéloltuk, lásd a részleteket a [16]-ban.

A tanulmányban bemutatott szempontok nagyban hozzájárulnak a jövőbeli projektek előrehaladásához és eredményeihez a radarteljesítmény „in situ” mérése terén a mechatronikai mérnökképzés számára. A Debreceni Egyetem nagy hangsúlyt fektet a radarkompetenciák elsajátítására, ennek eredménye és a jövő egyetemi kutatásainak alapja ez a tanulmány is. A részletekért lásd egyetemünk másik tanulmányát [17]. Összességében elmondható, hogy a felmerülő problémák megoldása során mindig igyekeztünk olyan megoldásokat találni, amelyek nemcsak igényeinket kielégítik, hanem gazdaságosak is.

8. IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Gy. Trencsényi, Z. Képes: Scandium-44: Diagnostic Feasibility in Tumor-Related Angiogenesis”, International Journal Of Molecular Sciences. -24 : 8 (2023), p. 1-23. -Int. J. Mol. Sci. - 1422-0067 [Online], Available: <https://hdl.handle.net/2437/350258> (Downloaded: 08.01.2023)
- [2] „Electrosmog-related research, studies, publications”, [Online], Available: <https://elektrosmog-meres.hu/elektrosmog-kutatasok/> (Downloaded: 08.01.2023)
- [3] QuadSat – Drone based antenna measurements and calibration, [Online], Available: <https://quadsat.com/> (Downloaded: 23.04.2023)
- [4] G. A. Sziki, K. Sarvajcz, J. Kiss, T. Gál, A. Szántó, A. Gábora, G. Husi: Experimental investigation of a series wound DC motor for modeling purpose in electric vehicles and mechatronics systems, ELSEVIER, Measurement 109 (2017) 111-118 p.
- [5] H. Almusawi, G. Husi: Design and Development of Continuous Passive Motion (CPM) for Fingers and Wrist Grounded-Exoskeleton Rehabilitation System, Appl. Sci. 2021, 11, 815. <https://doi.org/10.3390/app11020815> (downloaded 05.06.2022)
- [6] H. C. Mark; J. Botzheim, T. Thomessen, P. Korondi: Bacterial Memetic Algorithm Trained Fuzzy System-Based Model of Single Weld Bead Geometry, IEEE ACCESS 8 pp. 164864-164881., 18 p. (2020)
- [7] N. M. Gyongyossy, M. Domonkos, J. Botzheim, P. Korondi: Supervised Learning with Small Training Set for Gesture Recognition by Spiking Neural Networks, 2019 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI) Piscataway (NJ), USA, IEEE (2019) pp. 2201-2206., 6 p.
- [8] T. P. Kapusi, T. I. Erdei, G. Husi, A. Hajdu: Application of Deep Learning in the Deployment of an Industrial SCARA Machine for Real-Time Object Detection, Robotics, MDPI, 2022, 11, 69. <https://doi.org/10.3390/robotics11040069>
- [9] D. Torma, Gy. Győri, K. Sarvajcz: Processing and analyzing psychophysiological data using NI DIAdem software, International Review of Applied Sciences and Engineering, 11 (2020) 2, 188–196.p. DOI:10.1556/1848.2020.20128

- [10] B. G. Barsy, Gy. Gyóri, P. T. Szemes: Development of EEG measurement and processing system in LabVIEW development environment, *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 11 (2020) 3, 287–297, DOI: <https://doi.org/10.1556/1848.2020.00151>
- [11] In-Su Lee, Linlin Ge, “The performance of RTK-GPS for surveying under challenging environmental conditions”, [Online], Available: https://www.researchgate.net/publication/241398905_The_performance_of_RTK-GPS_for_surveying_under_challenging_environmental_conditions (Downloaded: 08.01.2023)
- [12] Python documentation, [Online], Available: <https://docs.python.org/3.11/> (Downloaded: 08.01.2023)
- [13] How to Convert Distances From Degrees to Meters, [Online], Available: <https://sciencing.com/convert-distances-degrees-meters-7858322.html> (Downloaded: 23.04.2023.)
- [14] Ebay.com, 35-4400M USB Spectrum Analyzer, [Online], Available: https://www.ebay.com/itm/363248995352?mkcid=16&mkevt=1&mkrid=711-127632-2357-0&ssspo=lzm8fhdqsf2&sssrc=2349624&ssuid=kzvzx2pftmw&var=&widget_ver=artemis&media=MORE (Downloaded: 08.01.2023)
- [15] Jubangaliyeva; E. Shoshi; P. E. Pinto; N. A. Bealallo; A. Masuk; I. Balajti: Circular Loop, E-patch, Blade, and Spiral Array Antennas for Cyber-Physical System Applications, In: IEEE, Computer Society (szerk.) 23rd Proceedings International Radar Symposium, Gdansk, Poland: Warsaw University of Technology (2022) pp. 412-417. Paper: 183441 , 6 p
- [16] K. Á. Kis, K. Sarvajcz: Drone automation for industrial property protection and agricultural use, *Acta Academiae Nyiregyhaziensis* 7., pp. 235-242., [Online], Available: <https://www.nye.hu/acta> (Downloaded: 08.01.2023)
- [17] M. K. Orosz, Gy. Korsoveczki, I. Balajti: Performance analysis of quadcopter drones to radar detection and track initialization characteristics optimization, 24rd Proceedings International Radar Symposium, Berlin, 2023