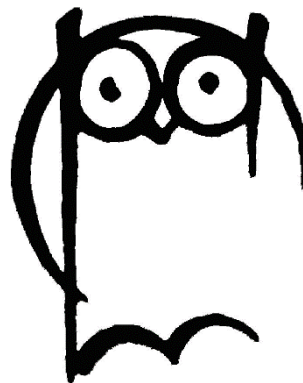


Debreceni Egyetem

Műszaki Kar

Mechatronikai Tanszék



Drón-platform alapú RF mérési eljárás kidolgozása antennák spektrum analizátoros mérésére

Szerző: **Kis Károly Árpád** BSc hallgató

Témavezető: Sarvajcz Kornél

Tanszékvezető: Prof. Dr. Husi Géza

Debrecen

2023.

Tartalomjegyzék

Előszó	3
Bevezetés.....	3
1. Elektromágneses sugárzók	4
1.1 Az elektromágneses spektrum jelentősége	4
1.2 Antennák működése	7
2. Drónok.....	8
2.1 Mi az a drón?	8
2.2 A projektben használt drón	10
3. Irodalomkutatás	11
3.1 Elektroszmoggal kapcsolatos kutatások	11
3.2 Drónokkal történő mérési eljárások kutatásai	13
3.3 Specifikus RF drón-platform alkalmazások	15
4. Mérési eljárás kidolgozása	17
4.1 Útvonaltervezés	17
4.1.1 A megoldani kívánt probléma	18
4.1.2 Az útvonalrepüléshez fejlesztett Python program	19
4.1.2.1 A Python program funkciói	20
4.1.2.2 A program használata a gyakorlatban	21
4.1.3 A Flight Plan applikáció DJI drónokhoz	23
4.1.3.1 Az útvonaltervek csv formátuma	24
4.1.3.2 A csv formátum lementése	24
4.1.3.3 A csv fájl feltöltése a Flight Plan applikációba	25
4.1.3.4 Útvonalterv betöltése a Flight Plan applikációba	26
4.1.3.5 Útvonalterv végrehajtása	27
4.2 Teszt utak repülése drónnal	28

4.2.1 Ismétlési pontosság tesztelése.....	30
4.2.2 Repülhető tesztek száma egy akkumulátorral.....	30
4.3 A mérőrendszer.....	32
4.3.1 Spektrum analízátor	32
4.3.2 Laboratóriumi mérések spektrum analízátorral	33
4.3.3 RF előerősítő alkalmazása	33
4.3.4 Vevőantenna	34
4.3.4.1 „L” sávú antenna impedanciavizsgálata	35
4.3.5 A használt drón-platform RF vizsgálata	36
4.3.6 A mérés elvégzése	37
4.3.6.1 Vezetékes mérési megoldás	37
4.3.6.2 Vezeték nélküli mérési eljárás	38
4.3.7 WinNWT4 program	40
4.4 Drón-platform tesztelése valós körülmények között	42
4.4.1 Első püspökladányi mérés	43
4.4.2 Második püspökladányi mérés	44
4.5 Teljes mérési eljárás ismertetése	46
5. Mérési eredmények kiértékelése	47
5.1 Fejlesztett Python program a mérési eredmények vizualizációjára	47
5.2 Tesztrepülések során nyert adatok kiértékelése	49
6. Továbbfejlesztési lehetőségek	53
7. Összegzés	53
Köszönetnyilvánítás	54
Irodalomjegyzék.....	55

Előszó [1]

Kis Károly Árpád végzős alapszakos mechatronikai mérnök hallgató vagyok. A repülés, annak minden vívmánya, a repülőgépek szerkezete, valamint a fizikája már kisgyermek korom óta foglalkoztat. Szabadidőmben szívesen repülőgép-szimulátorozok, valós körülményeket modellezve repülök IFR (Instrumental Flight Rules) utakat, a valósághoz amennyire csak lehet, közel álló típusokkal. Kutatási munkám éppen ezért nagyon közel áll hozzám, hiszen a pilóta nélküli légi járművek fejlődése elképzelhetetlen lett volna a repülőgépekből átvett tudás hasznosítása nélkül. Éppen ezért választottam egyetemi tanulmányaimnak a mérnöki képzést, hiszen itt olyan tudást kapok, melynek a jövőben szeretném komoly hasznát venni.

2023 évben a Kari TDK-ra benyújtott jelen dolgozatom a 2022 évben megkezdett kutatásomra épül, az akkor megkezdett kutatásom folytatása, továbbfejlesztése, valamint gyakorlati teszteléssel, mérésekkel, adatkiértékelési-eljárással, valamint valós mérési adatok kiértékelésével kiegészített verziója [1].

Bevezetés [1][2][3]

A XXI. századra a technikai fejlődésnek köszönhetően a világunk működése szinte elképzelhetetlen antennák használata nélkül. Nap mint nap használjuk ezeket az eszközöket a távközlésben, mobilhálózatokban, televízió- és rádióműsorszórásban, de még a műholdjaink sem működnének nélkülük [4].

Ezek az RF (rádiófrekvenciás) rendszerek rohamosan fejlődnek, megtalálhatóak mindennapi életünk valamennyi területén, otthonainkban, városainkban, mindennapi használati eszközeinkben, autóinkban és az iparban is. Ezen berendezések nagymértékű fejlődését és terjedését a hagyományos mérési és kalibrációs módszerekkel szinte lehetetlen lekövetni, ezért kutatási projektem célja egy olyan RF mérő berendezés tervezése, mely drón-platformra épül és képes tetszőleges antenna spektrum méréseket elvégezni a sugárzók elektromágneses szennyezésének (elektroszmog) feltérképezésével és a mérési adatokat vezeték nélkül továbbítani az in-situ mérési feltételeknek eleget téve.

Kutatásomban tehát egy olyan drón-platform alapú mérési eljárás kidolgozása a cél, mellyel különböző antenna típusok sugárzási mintáit lehet spektrum analízátoros mérési módszerrel autonóm módon feltérképezni. A módszer egy olyan 3 dimenziós komplex megoldást kínál számtalan fajta sugárzó feltérképezésére, mint a radar, kommunikációs

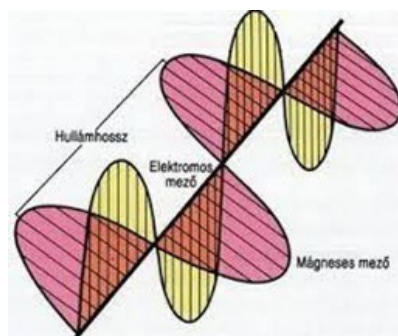
antennák, Wi-Fi, valamint az autók, okosváros-koncepciók elektroszmogja, melyek a közeljövőben egyre nagyobb figyelmet fognak kapni. Ezekre a tényekre alapozva kutatásomban kitérek az antennákra, a drón-platformra, a mérési eljárás ismertetésére, a mérési útvonatervezésre és annak megvalósítására, a spektrum analízátorra és a használt előerősítőre, a vezeték nélküli mérési eljárásra, az in-situ tesztelésre valós körülmények között, valamint az ezek során kinyert mérési adatok értékelési módszerére.

1. Elektromágneses sugárzók [1]

Az antennák valamennyi vezeték nélküli kommunikációs eszközben megtalálhatóak, rádióhullámok vételére és sugárzására alkalmas eszközök. Ugyan az embereket elégedettséggel tölti el ezen eszközök használata, viszont élettani hatásokról is fontos beszélni. Minden ilyen eszközre igaz, hogy elektromos és mágneses teret hoznak létre magunk körül. Ezeket a sugárzási terheléseket elektroszmognak nevezzünk. Ha tartósan ilyen sugárzásnak vagyunk kitéve, akkor szervezetünkben fellépő változások akár egészségügyi kockázattal is járhatnak. Ezek közül a legjelentősebbek a fejfájás, migrén, koncentrációs zavarok, ritmuszavar, de légzőrendszeri, szemészeti vagy akár immunrendszeri panaszok is felléphetnek [5]. Ezekről az élettani hatásokról sok tanulmányt, publikációt és kutatást találhatunk, valamint az irodalomkutatásban is kitérek ilyen jellegű kutatásokra [6].

1.1 Az elektromágneses spektrum jelentősége

Az antennák elektromágneses sugárzást használva továbbítják és veszik a jeleket. Az elektromágneses spektrum (EMS) – másnéven elektromágneses sugárzás – mindenhol jelen van környezetünkben. Az elektromágneses hullámok olyan transzverzális hullámok, melyeket fel lehet bontani egy elektromos- ($\vec{E}$) és egy mágneses ($\vec{B}$) mezőre. Ezek a hullám haladásával periodikusan változnak nem csak a terjedés irányára, de egymásra merőlegesen nézve is (lásd 1. ábra). Ezen mezők segítségével közvetíti a térben a hullám az energiát.



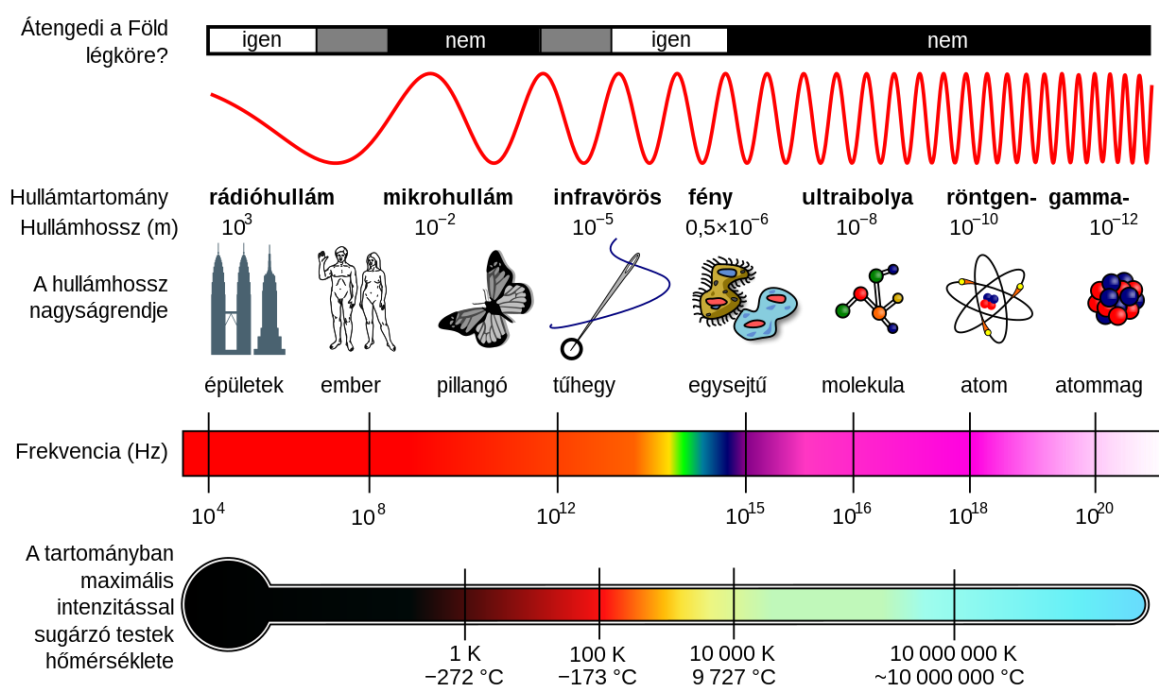
1. ábra: Az elektromágneses hullám felbontása [7]

Az elektromágneses hullámok fontos fizikai mennyiségei a hullámhossz (λ), a terjedési sebessége ($c = 299792458 \frac{m}{s}$) és a periódusideje ($T = \frac{\lambda}{c}$), valamint frekvenciája ($f = \frac{1}{T}$) és energiája. Az elektromágneses sugárzás hordozója az a diszkrét egység melyet fotonnak vagy kvantumnak nevezünk. Így a kvantum energiáját a következőképpen adhatjuk meg:

$$Q = h \cdot f \quad (1)$$

Ahol: Q – egy kvantum energiája, Joule [J]
 h – Planck-állandó, $6,626 \times 10^{-34}$ [Jsec]
 f – frekvencia, Hertz [Hz]

A hullámok ismétlődő, periodikus mozgásához a leghatékonyabban a szinusz és koszinusz függvényeket tudjuk rendelni, mint referenciákat. A legismertebb elektromágneses hullámok a látható fény. Ennek hullámhossztartománya 380-750 nanométer között változhat. Az EMS-t hullámhossz és frekvencia szerint tudjuk ábrázolni, a spektrum egyes tartományai között viszont nincs éles átmenet. Ezt szemlélteti a 2. ábra:



2. ábra: Az elektromágneses spektrum hullámhossz és frekvencia szerint [8]

Az antennák az elektromágneses spektrum rádióhullám tartományában dolgoznak. Ez a 3 Hz és 300 GHz közötti frekvenciát jelent. Hullámhosszuk szerinti csoportosításuk az 1. táblázatban látható:

1. táblázat: A rádióhullámok hullámhossz szerinti csoportosítása [8] [szerző saját szerkesztése]

Elnevezés	Rövidítés	Hullámhossz	Alkalmazás
Hosszúhullám	LF	650 m – 10 km	Rádiótechnika
Középhullám	MF	180 m - 650 m	
Rövidhullám	HF	10 m – 180 m	
Ultrarövidhullám	VHF	10 cm – 10 m	Rádió-, TV-, radartechnika
Dm, cm, mm-es és mikrohullámok	UHF, SHF, EHF	300 μ m – 30 cm	MRI, mobiltávközlés, gyógyászat, mikrohullámú sütő

A kutatás alap problémája az elektroszmog, azaz az EMS-nak való kitettség, azon belül is a rádiófrekvenciás tartományra vonatkozó expozíció. A kitettség vagy expozíció akkor fordul elő, ha egy élőlény elektromos, mágneses vagy EM-es térben tartózkodik [9]. Ezen terek erősségét az alábbi egyenletekkel lehet meghatározni:

- Elektromos térerősség:

$$E = \frac{f}{q}, \quad \left[\frac{W}{m} = \frac{N}{C} \right] \quad (2)$$

Ahol: E – Elektromos térerősség

F – Pontszerű q töltésre ható erő [N]

q – Pontszerű próbatöltés [C]

- Mágneses térerősség:

$$F = q(v \times \mu H), \quad \left[\frac{A}{m} \right] \quad (3)$$

Ahol: H – Mágneses térerősség

q – Pontszerű próbatöltés [C]

v – Pontszerű töltés sebessége [m/s]

F – Pontszerű q töltésre ható erő [N]

A rádiófrekvenciás források adott frekvenciájára meghatározható egy ún. expozíciós/kitettségi arány, mely az ide tartozó határértékek töredékében kifejezve 100 kHz és 300 GHz között felírható [9]:

$$ER = MAX \left[\left(\frac{E}{EL} \right)^2, \left(\frac{H}{HL} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Ahol: ER – Az expozíciós arány a forrás minden működési frekvenciájára

E – A mért elektromos térerősség a forrás f frekvenciáján

H – A mért mágneses térerősség a forrás f frekvenciáján

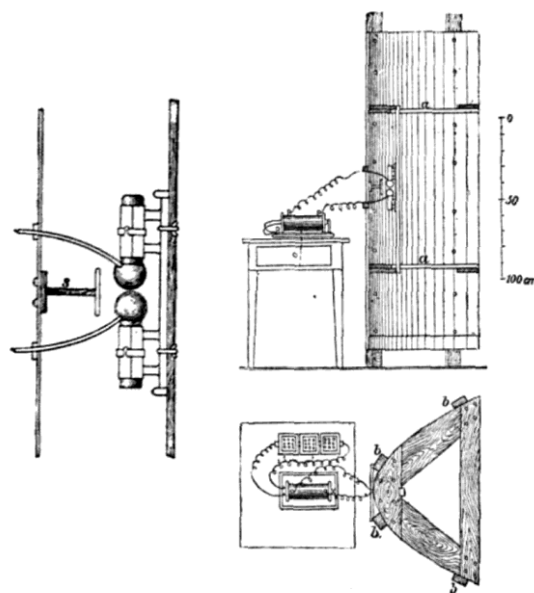
EL – A vizsgálati elektromos mező határértéke f frekvencián

HL – A vizsgálati mágneses mező határértéke f frekvencián

1.2 Antennák működése

Az antennák legfontosabb része egy rezgőkör, mely tekercsből és kondenzátorból áll (LC). Működésük lényege, hogy a két elektronikai elem külső forrásból energiát vesz fel, melyek a reciprocitás elve szerint leadnak. Ez azt mondja ki, ha van egy adó és egy vevő részünk és az adóba táplálunk egy P_A teljesítményt, a vevőből pedig P_V teljesítményt nyerünk, akkor elméletben, ha a vevőantennába tápláljuk a P_A teljesítményt, az adóantennán a P_V Teljesítményt vehetjük. Ennek a gyakorlatban természetesen vannak fizikai korlátai. Azaz a reciprocitási tétel értelmében egy antenna adás- és vételi iránykarakterisztikái megegyeznek [10].

Az első antenna megépítése Heinrich Hertz német fizikus nevéhez köthető, aki 1888-ban Maxwell egyenleteit felhasználva adott és vett először rádióhullámokat. Hertz egy parabola antennát épített, mint vevőegység, és egy szikratávíró adót használt az elektromágneses jel generálására. Utóbbi a rádióhullámokat elektromos szikra segítségével állítja elő. Hertz ezzel 454 MHz-es jelet tudott előállítani és érzékelni [11]. Az alábbi 3. ábrán látható Hertz rajza az 1983-ban megjelent könyvéből.



3. ábra: Hertz kísérleti szikratávíró adója – a vevőegység is hasonló felépítésű volt [11]

Mivel az mérőantennát irányítani kell, és csak egy irányba lehet vele jól mérni, így a mérés alatt mozgatni kell ezeket. Ezért jött az ötlet, hogy szereljük fel a mérőszerkezetet egy drónra, mert azzal nem csak 2, de 3 dimenzióban, magasságtól függetlenül, szabadon tudjuk a méréseket elvégezni, tetszőleges szögbe fordulva.

2. Drónok [1][2][3]

Az előző pontban bemutatott antennákra gyakorlatilag mindig igaz az az állítás, hogy magasan, nehezen megközelíthető helyekre vannak felszerelve, de ez nem véletlen, hiszen így nagyobb lefedettséget és jobb jelerősséget lehet elérni használatuk során, hiszen kevesebb tereptárgy, épület és egyéb zavaró hatás gyengíti az elektromágneses hullámok terjedését. Éppen ezért az antennák in-situ mérése általában egy bonyolult és költséges folyamat, mert gyakran a mérőberendezéseket, mérőantennákat létrákkal, darus kocsikkal, épített állványrendszerrel kell a mérni kívánt sugárzók elé felhelyezni. Ennek a problémának a megoldására vezetem be a drón-platform alapú mérési eljárást, mely során egy drónra szerelt mérőberendezés végzi az antennaméréseket. Ez egy rugalmas, szinte bárhol, költséghatékonyan alkalmazható gyors megoldást kínál in-situ tesztek elvégzésére. Ebben a fejezetben a drónokat fogom kifejteni.

2.1 Mi az a drón [12]?

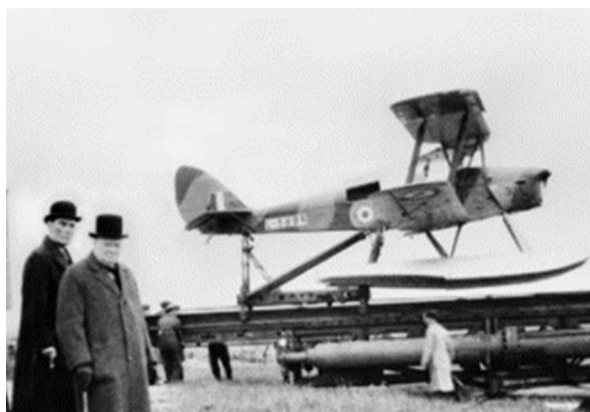
A UAV (Unmanned Aerial Vehicle), közismertebb nevén drón¹ olyan pilóta nélküli légijármű, mely fedélzetén dolgozó pilóta nélkül üzemel, vagy amelyet ilyen üzemmódra terveztek, és amely önálló vagy távirányítással történő irányításra képes [13]. A működésükhöz szükséges információkat a környezetükből gyűjtik, szenzorok segítségével érzékelik pozíciójukat és egy döntési folyamat eredményeként működésüket, helyzetüket, mozgásukat a háromdimenziós térben korrigálják [14] [15].

Az UAV-k, mint sok más forradalmi eszköz a háborús konfliktusok eredményeképpen létrejött technikai fejlesztések egyike. Ezen katonai felhasználás során elsősorban olyan feladatkörök ellátására szánták őket, amelyek túl veszélyesnek bizonyultak a nehezen pótolható pilóták részére, és testi épségüket veszélyeztette volna a küldetés végrehajtása. Legkorábbi, írásos feljegyzés pilóta nélküli légi járműről a XIX. század közepéről származik, mely még

¹ Unmanned Aerial Vehicle (UAV)/Unmanned Aerial System (UAS)/Unmanned Aircraft (UA) - Pilóta Nélküli Légijármű. ICAO Circular (2011) 328. 1–38.

hajtómű nélküli fejlesztéseket közölt. Ekkor kedvező szélirányba tudtak bombákkal felszerelt ballonokat indítani [16] [17].

Az I. világháború során már repülő torpedókat is teszteltek, melyeket egy- vagy kétfedeles repülőgépekből alakítottak ki. Ezekkel az eszközökkel az volt a legnagyobb probléma, hogy miután célhelyen kiürítették rakományukat nem voltak képesek visszatérni indítási helyükre. Ennek a megoldására a brit fejlesztésű Queen Bee (4. ábra) pilóta nélküli célrepülőgép hozott óriási áttörést az iparban. Ez volt az első olyan eszköz, mely vissza tudott térni indítási helyére, ezzel még olcsóbbá téve a légvédelmi feladatok elvégzését.



4. ábra: Queen Bee – az első drón repülőgép [18]

A brit mérnökök egy De Havilland DH 82-es „Tiger Mouth” kétfedeles légszáras repülőgépbe építettek rádió távvezérlést, mely a kor technikai fejlesztésének volt köszönhető. Először ennél a típusnál használták a drone kifejezést, így írta be magát a repülés történelmébe. Ezt követően a rádióvezérelt, emberi jelenlét nélkül repülő légi jármű elnevezésének szinonimája lett a DRÓN kifejezés. Egészen a vietnámi háború 1973-as befejezéséig, legyen az cél-, vagy gyakorlati drón, vagy akár felfegyverzett támadó légi jármű, ezzel a névvel illette a szakzsargon, vagy akár a sajtó híradása is. Ezt az időpontot követően lett „színesebb” az elnevezés, mivel először a Távolról vezetett jármű (RPV²), majd Pilóta nélküli légijármű (UAV³), ezt követően a Távolról irányított légi rendszer (RPAS⁴), majd napjainkban már a Pilóta nélküli légi rendszer (UAS⁵), de egyre gyakrabban a Légirobot-rendszer (RAS⁶) és az Önálló légi rendszer (AAS⁷) kifejezésekkel is fogunk még találkozni, amelyek ennek a

² Remotely Piloted Vehicle

³ Unmanned Aerial Vehicle

⁴ Remotely Piloted Aircraft System

⁵ Unmanned Aerial/Aircraft System

⁶ Robotic Aerial System

⁷ Autonomous Aerial System

rohamosan fejlődő légi organizmusnak a csereszabatos leírását adják [19]. A XX. században további katonai drónok kifejlesztése zajlott a nagyhatalmak csatája során néhány ismertebb típus a II. világháborús V-2-es rakéták, illetve a vietnámi háborúban szolgáló AQM-34 Firebee [20].

Tehát az UAV-k szerepe egyre jelentősebb a légi, földi, illetve a tengeri műveletekben is. A drónok, a bombákat hatástalanító robotoktól a mini tengeralattjáróig, a hajófedélzetről indítható felderítő helikopterektől a nagy magasságban tevékenykedő precíziós támadásokat végrehajtó légi eszközökig a legtöbb esetben a feladatuk végrehajtása, illetve az arra történő felkészítésük során igénylik az emberi beavatkozást [21] [22]. A jelenlegi kutatások középpontjában a „tüzelj és felejtsd el” képesség fejlesztése áll, amely a drónokat olyan feladatok elvégzésére teszi alkalmassá, mint például sokáig, órákon át elhúzódóan legyenek a cél közelében elemelve és várva az alkalmat, hogy majd a másodperc törtresze alatt döntsenek nem csak a csapásról, hanem a lehetőségének bekövetkezéséről is [23].

A pilóta nélküli légijárművek fejlődéstörténetét a hasznosítás szemszögéből megfigyelve leszögezhető, hogy az eddigi életszakaszuk három részre osztható. Az első, amely során fegyverként alkalmazva, különféle pusztító eszközöket szereltek rá, helyeztek el benne és azok segítségével kívánták rombolni, pusztítani a szembenálló fél erőit és eszközeit. A következő felhasználási mód, ahol célrepülőgépként került bevetésre a légvédelmi erők békeidős kiképzését biztosította, életszerű körülményeket nyújtva számukra. A harmadik terület pedig, amikor különféle szenzorokat elhelyezve alkalmassá tették az eszközt, a levegőből történő információszerzésre és továbbításra, elősegítve ezzel a különböző vezetési szinteken, különböző felhasználási területeken a megalapozott döntések meghozatalát [23]. A kutatási munkámban ezt a felhasználási területet használok fel. Az evolúció során a robotizált berendezések az egyén számára egyre több lehetőséget, kényelmi szolgáltatást és információs látókörbővülést fognak jelenteni, ami autonóm feladat végrehajtást eredményez azáltal, hogy egy operátor egyidejűleg több légi eszköz manővereit koordinálja, mivel a „felnőtté vált, önálló” eszközünk „nem igényli” a folyamatos felügyeletet [24].

2.2 A projektben használt drón

A kutatáshoz a Mechatronikai Tanszék DJI Inspire 1 típusú VTOL⁸ drónját használtam. A drón repülés közben a távirányítóval összekötött okostelefonra vagy tabletre valós idejű telemetriai

⁸ Vertical Take-off and Landing

adatokat és HD képet tud szolgáltatni, melyhez a tesztelés során szükségem van. A drón kiképzése megengedi, hogy 360°-ban lehessen a gimbalnak köszönhetően felvételeket készíteni, mert felszállás után a leszállótalpak felemelkednek, így nem fogják a kamerát vagy szenzorokat kitakarni. Ezzel még plusz stabilitást is kap a drón. Több repülési mód közül választhatunk: *P*, *A* és *F* mód [25]. Az első és utolsó módban GPS-es helytartás, valamint az elsőben még plusz vision rásegítés is van, az *A* módban ezek nélkül lehet repülni. A tesztelés során a repülési tervek teljesítésére az *F* módot fogom alkalmazni, hiszen GPS alapú utat fogok repülni. A drón 655 gramm hasznos teherrel is tud repülni.



5. ábra: DJI Inspire 1 kiengedett leszállótalpakkal [szerző saját képe]

Az Inspire 1 nagyon pontosan tudja meghatározni földrajzi helyzetét és tartani az adott pozíciót, a tesztek alapján ez maximum 1 m-es hibát jelent, mely az alkalmazási területemhez megengedhető. Emellett a repülési, talajhoz viszonyított magasságot is 1-2 dm-es pontossággal képes meghatározni és tartani. Fontos, hogy a drón a talajhoz viszonyított magasságot méri, így az objektum és mérés adatait is ehhez viszonyítva kell megadnunk a későbbiekben.

3. Irodalomkutatás

Az irodalomkutatásban a kutatásom alapjának számító elektromágneses szennyezéssel/elektroszmoggal kapcsolatos tanulmányokat is áttekintem, valamint a drón alapú mérési eljárásokon át a specifikus RF méréseket is tanulmányozni fogom UAV-k használatával.

3.1 Elektroszmoggal kapcsolatos kutatások

Manapság már számtalan kutatás foglalkozik az EM-es terek által okozott káros élettani hatásokkal. Ezen kutatások többsége megállapítja, hogy ezen sugárzók hatékonysága és eredményei ellenére – melyek nélkül elképzelhetetlen lenne 21. századi életünk – veszélyesek

is lehetnek az emberekre és egyéb élőlényekre nézve. Ezen sugárzók által kibocsátott EMH-ok a test élő szöveteivel ütközve olyan elváltozásokat okozhatnak, melyek károsak lehetnek szervezetünk működésére nézve.

M. M. Seizgain 2022-es kutatásában kifejtette, hogy a szervezetünkben a molekulák természetes szerepére nézve elváltozások történhetnek az EMH-ok elnyelése közben. Néhány elváltozási kategorizálva: megnövekedett szívverés és vérnyomás, szédülés, migrén, neuromuszkuláris rendszer zavarjai, vérfehérjék elváltozása, leukémia, DNS elváltozások. Következtetésként ajánlásokat tett, hogy próbáljunk minél kisebb kitettségnek alá vetni magunkat, távolságot tartani ezektől a sugárzóktól és védekezni ellenük, mert önkénytelenül is ki vagyunk téve ezeknek a tereknek [26].

P. Jangid et al. 2022-ben publikált cikkében a nem ionizáló EMS hatását vizsgálta a női termékenységre. Kutatásukban kiderül, hogy a nem ionizáló sugárzás a méhben és a petefészekben is megnöveli a szabad gyökök terhelését, ezzel a sejtnövekedést gátolja és DNS elváltozáshoz vezethet. Ezzel bizonyítható, hogy a petesejtek és az azokat tápláló környező sejtekben is elváltozásokat okozhat a sugárzás, mely a női termékenységi tényezőkre és esetlegesen a meddőségre is hatással lehet [27].

Meenu L. et al. Mobiltelefonok által kibocsátott EMS hatását vizsgálták, ezen belül is a 4G LTE sávot. Bebizonyították, hogy a sugárzási értékek nagyban változnak a kimenő és bejövő hívásokkal, valamint a Wi-Fi használatával. Az elektromos mező változása nagyban összefügg a mágneses mező változásával is és a sugárzott teljesítmény intenzitásának változásával. Tehát a telefonok által létrehozott EM-es mező kis sugarú megléte bizonyítéka a szervezetünkre gyakorolt hatásának, ha hosszabb ideig vagyunk kitéve neki [28].

Jin-E Shen 2020-as cikkjében ismertette az EMH-ok káros hatásait és néhány védelmi stratégiát is javasolt a kitettség csökkentésére. Emellett olyan kockázati faktorokra is kitért, mint a robbanóanyagok és illékony anyagok kitettsége EM-es tereknek, mind a két esetben robbanásveszélyes állapotot kialakítva a különböző vegyületekben. Kijelentette, hogy az EM-es szennyezés a jelen problémája, melyet, ha nem veszünk komolyan, akár nagyfokú károsító hatása is lehet az emberek egészségére. Éppen ezért a nagyvállalkozásoknak erősíteni kell ezen szennyezések csökkentésére irányuló törekvéseiket [29].



6. ábra: Elektroszmog kitettség szemléltetése egy lakásban [30]

A C95.3-2021-es IEEE Standard fejti ki a 0 Hz és 300 GHz közötti frekvenciasávban az ajánlott gyakorlatot elektromos, mágneses és EM-es terek mérésére és számítására, tekintettel az élőlények kitettségére/expozíciójára ilyen terekben. A szabvány veszélyforrásként is hivatkozik ezen terekre, és meghatározza a potenciális veszélyeket is ilyen terek mérésénél [31].

Azaz összességében elmondható, hogy az EM-es szennyezés/elektroszmog a 21. század nagy problémája, melynek mindannyian ki vagyunk önkénytelenül is téve és érdemes lehet ezen sugárzások elleni védelmi stratégiákat megfontolni.

3.2 Drónokkal történő mérési eljárások kutatásai [1]

A drónok technikai fejlődésének és terjedésének köszönhetően ezen eszközök már nem csak kutatásokban és az iparban jelentek meg, de mára mindenki számára megvásárolható COTS⁹ eszközök lettek. Különbféle szenzorokkal szerelve a drónokat nagyon sokféle felhasználási módot érhetünk el, melyeket akár napi szinten használnak különféle feladatok elvégzésére és eddigi feladatok megkönnyítésére egyaránt. Összességében tehát a drónok használata egy komoly és hatékony eszköz lett mérési területeken is.

Talán az egyik legtöbbet használt alkalmazási mód ipari szinten a 3 dimenziós térképezés és fotogrammetria. F. Remondino et al. 2011-es cikkükben foglalták össze a UAV-

⁹ Commercial off-the-shelf

k ezen jellegű értékes felhasználását, valamint a fejlődési lehetőségeket is [32]. Ebben a kutatásban már megjelentek a LiDAR¹⁰ szenzorok is, melyek azóta már sokat fejlődtek.

M. A. Boon et al. egy 2006-os kutatásukban már mocsaras területek feltérképezéséhez használtak drónokat [33]. Összességében azt a következtetést vonták le, hogy a drónokkal történő mérések pontossága és minősége messze meghaladja az addigi kutatási célokra használt műholdfelvételeket, így használatukkal sok hidrológiai és geomorfológiai kérdés megválaszolható lenne.

Egy 2019-es tanulmány, melynek szerzői, Lin et al. már a LiDAR szkennerekkel történő tengerparti feltérképezést értékeli [34]. A kutatás eredményei alapján a mind a LiDAR, mind a kép alapú térképezési technikák nagy felbontású és jó minőségű topográfiai adatokat szolgáltatnak és a két technika által generált pontfelhők 5-10 cm-es hibatarományon belül mozognak. Összességében tehát elmondható, hogy a drónokkal történő mérések pontosak és jó minőségűek, mely a kutatásomban is fontos tényező lesz.

Montoya et al. Hulladéklerakókhoz fejlesztett ki drón-platform alapú gázkoncentrációmérő rendszert, mert a bomlás során felszabaduló metán és szén-dioxid gázok a közeli városok levegőminőségét, így az ott élő emberek egészségét is befolyásolják. A drónra többféle MOS szenzort rögzítettek, melyeket egy Arduino Nano-val működtettek és vezeték nélküli jelátvitellel valós időben voltak képesek a méréseket a bázisállomáson követni [35].

Marchisotti és Zappa a betonszerkezetek hibáinak UAV alapú 3 dimenziós mérési eljárását vizsgálták. A drónra RGB kamera szenzorokat helyezve a szerkezetek azonosíthatóak voltak, viszont a károsodás mértékét 2 dimenziós képekből pontatlan megállapítani, így 3 dimenziós rekonstrukciós technikák használata fontos ilyen jellegű méréseknél. Az elért eredmények alapján a mérőrendszerük a szerkezeti hibákat képes volt 2,5 mm-es szórás alatt megállapítani [36].

Wang et al. 2021-es tanulmányában drónra szerelt radarról monitorozta folyók vízsebességét és vízszintjét. A kísérletek eredményei azt mutatják, hogy az áramlásmérés pontossága a drón-platformot alkalmazva megkétszereződött és a mérési tartomány is növekedett az eddigi rögzített módon történő radaros hidrológiai mérésekhez képest [37].

¹⁰ Light Detection and Ranging – Lézer alapú távérzékelés

G. Mai et al. 2019-es nemzetközi konferenciájában drónokkal vizsgált nagyteljesítményű AC és DC távvezetésekről készült ellenőrző felvételekhez fejlesztettek egy platformot, mellyel kiválthatóak a világon naponta kb. 100 ezer kép ellenőrzése alól a mérnökök [38]. Ebből is látszik mekkora iparág a drónokkal történő különböző mérések.

Az előző fejezetre hivatkozva az IEEE-nek is van ajánlása a távvezeték vonalak drón alapú ellenőrző rendszeréhez (P2821/D6, Jul 2020). Az útmutató AC és DC felsővezetéseken végzett járőrvizsgálatokhoz használt AUV-rendszerek általános műszaki követelményeit, tesztelési módszereit és szabályait foglalja magába, hiszen ezen típusú mérések magas biztonsági kockázattal is járhatnak [39].

Tehát az ipar számos területén használnak már UAV-platform alapú mérési rendszereket és számos kutatás is foglalkozik ilyen rendszerek kifejlesztésével, hiszen sok esetben egy gyorsabb, gazdaságilag kevésbé megterhelő és biztonságosabb megoldást kínálnak.

3.3 Specifikus RF drón-platform alkalmazások

Ebben az alfejezetben a drónok specifikusan RF mérési eljárásokra, antenna és radarmérésekre specializált felhasználási módjairól gyűjtöttem irodalomkutatást. Ezen felhasználási mód is egyre inkább elterjedőben van az iparban.

Dill et al. A 2019-es IEEE Radarkonferencián bemutatott kutatásukban drónra szerelt többsatornás SAR¹¹-t használták eltemetett objektumok, például taposóaknák felderítésére. Ezt a technológiát addig még főleg csak légi és úrról történő feltérképezésre használták, ebben rejlik a kutatásuk újdonsága. Emellett cikkükben foglalkoznak még a drónra felszerelhető ilyen típusú alkalmazásra tervezett könnyű, kis energiafogyasztású és strapabíró UHF-UWB¹² radarmodul kifejlesztésével [40].

Tunç et al. 2023-as tanulmányában már egy költséghatékony radart szereltek egy kis méretű drónra, melyet ugyancsak SAR alapú képalkotásra használtak. Ezt a megoldást földi célpontok hatótávolsági profiljának meghatározására használták. A képalkotáshoz új technológiájú algoritmusokat használtak [41].

Giusti et al. 2023-ban már az SAR technológiát továbbfejlesztve, 3D interferometrikus inverz SAR módszert használva mutatta be kísérleti eredményeit a 2023-as IEEE

¹¹ Synthetic Aperture Radar

¹² Ultra high frequency - Ultra wide band

Radarkonferencián. A 3 dimenziós radaros képalkotási módszerek jelentős javulást mutatnak kétdimenziós társaikkal szemben. A 3D-s InISAR módszert egy drónraj segítségével oldották meg a kutatók, mely során 4 drón repül megfelelő alakzatban, 1 adó és 3 vevő felbontásban, ezzel kettős ortogonál antennakonfigurációt alkotva [42].

Klein et al. radar által támogatott navigációs rendszer kidolgozását kutatta GPS mentes környezethez és mutatta be 2021-ben. Mivel a folyamatos navigáció elengedhetetlen a drónok autonóm repüléséhez és az alap fedélzeti érzékelők GPS hiányában nem képesek a megtervezett útvonalon tartani a drónt, így egy olyan radarral segített navigációs rendszert dolgoztak ki, mely képes megbecsülni a drón-platform vízszintes sebességét és magasságát a GPS-től függetlenül. Ehhez ún. mindenirányú (omnidirectional) radart használtak [43].

Mivel egyre nagyobb problémát okoznak a drónok terjedésével azok használata lezárt légtérben, valamint a UAV-k illetéktelen behatolásai magasan őrzött objektumok területére, így az egyik legtöbbet kutatott drónos téma manapság a UAV-k detektálása. Ezekhez legtöbb esetben radarokat használnak. Park et al. 2021-ben az IEEE Access-ben megjelent cikkjükben egy átfogó felmérést mutattak be a drónellenes rendszerekről. Ezen fajta rendszereket észlelés, azonosítás és semlegesítési kategóriákba sorolták. A drónészlelési kategóriában hő-, radar-, optikai-, akusztikus- és hibrid alapú megoldásokat mutattak be. A radar alapú észlelési rendszerek frekvenciatartománya a „P” sávtól egészen a „Ku” sávig terjed, azaz 300 kHz-tól a 18 GHz-es tartományig [44].

Morris et al. 2021 júniusában az IEEE Sensors egyik számában megjelent kutatása a pilóta nélküli légijárművek autóradarokkal történő detektálásáról és lokalizálásáról szól. Ehhez milliméteres hullámhosszú, azaz 77 GHz körüli autókban is alkalmazott radarokat használták, kis, 16 mW-os adóteljesítménnyel. Kutatásukból kiderül, hogy ezen fajta érzékelők alkalmasak kis méretű drónok detektálására, és hogy a mikro-Doppler effektust tanulmányozva képesek a drónok méretbeli osztályozására is, pontosan megkülönböztetve azokat a madaraktól [45].

Lam et al. 2023-ban publikált kutatásában „V” sávú radarokat használt drónok észlelésére és osztályozására. Ehhez egy 66 GHz-en üzemelő kutatás alatt lévő radart használtak, valamint a drón motorjai által keltett mikro-Doppler jellemzőket is vizsgálták rövid idejű Fourier-transzformációval (STFT) és folyamatos hullámtranszformációval (CWT). Megállapították, hogy az ezekből nyert adatok használhatóak a különböző drónok osztályozására [46].

Drón-platform alapú antenna mérésről és azon belül is elektromágneses sugárszennyezést feltérképező kutatások és megoldások nem jellemzőek még ezen iparágra. Egy dán cég viszont, a QuadSat UAV-platform alapú antenna méréseket és kalibrációt kínál a partnereinek. Megoldást kínálnak RF berendezések in situ tesztelésére és ellenőrzésére, mindezt idő- és költséghatékony módon, in-situ drón-platform alapú mérőberendezésükkel [47]. Tehát a drón-platform alapú antenna- és radarmérési szeglete az iparnak többnyire kiaknázatlan, nem elterjedt, viszont ez a közeljövőben a kereslet még tovább növekedésével valószínűleg változni fog.

4. Mérési eljárás kidolgozása [1][2][3]

A továbbiakban a mérési eljárás kidolgozásának lépéseit fogom kifejteni. Ezt a drón útvonaltervezésének a megoldásával fogom kezdeni, majd a tervezett útvonal autonóm végrehajtásait is be fogom mutatni és ki fogok térni az autonóm útvonalrepülés tesztelésére is. Ezután a mérőrendszer felépítését fogom bemutatni, a használt eszközöket, a mérések vezetékes elvégzésének lehetőségét, valamint a vezetékek nélküli mérési módszer fejlesztését is, szót ejtve a projekthez használt mérőprogramról is. Végül a drón-platform alapú mérések valós körülmények között történt tesztelését is be fogom mutatni és össze fogom foglalni a teljes mérési eljárást az elejétől egészen a mérések elvégzéséig. Ezután fogok a mérési eredmények kiértékelésének módszerére rátérni.

4.1 Útvonaltervezés

A kutatásban szükséges, hogy a drón előre meghatározott pontokban végezze el a méréseket. Ha ezeket a mérési pontokba kézzel kéne a drónt irányítani a mérések elvégzéséhez, akkor az egy hosszú, körülményes és nehezen kivitelezhető folyamat lenne. Ennek az az oka, hogy a mérési pontok pontos helyzetét és magasságát kézzel bonyolult lenne kiszámolni, de a mérési pontok pontos koordinátáinak ismeretében is még a leggyakorlottabb drónpilótáknak is kihívás lenne azt pontosan és a legidőhatékonyabb és -költséghatékonyabb módon kivitelezni. Ezekre a tényekre alapozva tehát a projektben megcéloltam egy program fejlesztését, mely segítségével az útvonalterv könnyen, akár in-situ körülmények között is létrehozható és alkalmas arra, hogy egy, a drón autonóm repülését támogató alkalmazásba azt feltöltve képes legyen végrehajtani a mérési eljárást autonóm koordináta alapú repüléssel.

4.1.1 A megoldani kívánt probléma

A kutatásban tehát célom volt egy olyan program fejlesztése, mely a drón Flight Plan¹³-jét le tudja nekünk generálni bizonyos változók függvényében bármikor, tetszőszerűen. Ez a repülési terv egy az antennához igazodó gömb felszínének bizonyos pontjaiból áll, a program ezeket a pontokat képes számunkra 3 dimenziós koordinátákban megadni. A választott változók a mérendő objektum (antenna) földrajzi elhelyezkedése, azaz szélességi és hosszúsági koordinátái, az objektum fizikai kiterjedése (magassága, szélessége), a mérési gömb középpontjának magassága, a mérési gömb sugara, a mérés rétegeinek száma, a mérési pontok száma rétegenként, valamint a gömb felületének mérési lefedettségének mértéke százalékos értékben. Ezeket a változókat a 2. táblázatban foglaltam össze:

2. táblázat: A program lényeges változói és azok mértékegységei [szerző saját szerkesztése]

Elnevezés	Rövidítés	Mértékegység
Antenna hosszúsági koordináta	x	földrajzi koordináta
Antenna szélességi koordináta	y	földrajzi koordináta
Antenna magasság	h	[m]
Antenna szélesség	w	[m]
Mérési középpont magassága	z	[m]
Mérési gömb sugara	R	[m]
Mérés rétegeinek száma	L	[db]
Rétegenkénti mérési pontok száma	P	[db]
Mérési lefedettség értéke	c	[%]

A programban generált 3 dimenziós pontokat a projektben szemléltetés képpen meg is jeleníttetem, így az vizuálisan is áttekinthető, ezzel is megkönnyítve az ellenőrzést. Mivel eredetileg a számításokhoz GPS koordinátákat kell megadni a program futtatásakor, a magasságokat, illetve a mérési gömb adatait pedig méterben, így az a vizualizációban különböző mértékegység rendszerek ütközéséhez vezetne, így nem lenne arányos. Ennek a kiküszöbölése érdekében kizárólag a vizualizáció céljából a méterben megadott változókat a Föld GPS koordináta rendszeréhez viszonyítva átváltom. Ez a gyakorlatban egy 111000,0001-gyel történő osztást jelent [48].

Célom egy olyan program létrehozása volt, mellyel akár a mérés helyszínén is percek alatt meg tudjuk a repülési tervet alkotni, így azt egyből fel is tudjuk használni. A program és a

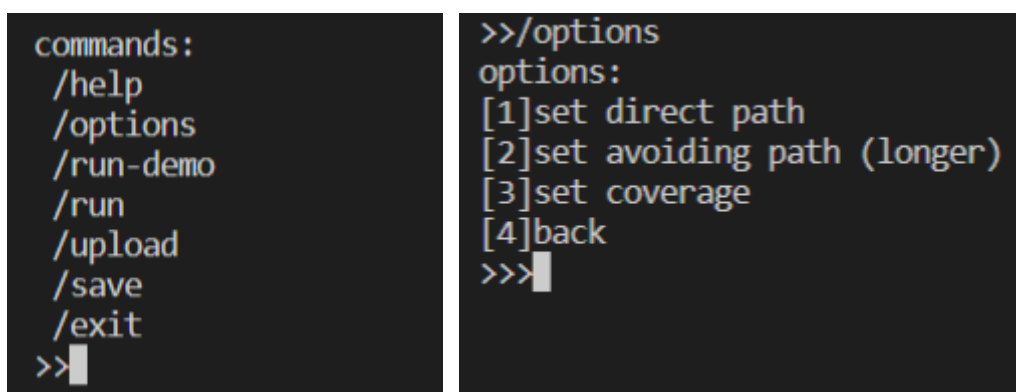
¹³ Repülési terv

drónt autonóm módon vezérlő applikáció közötti kapcsolatot és a Flight Plan feltöltését a 4.1.3.3. pontban részletezem.

4.1.2 Az útvonalrepüléshez fejlesztett Python program

A program futtatásához több könyvtár használata is szükséges. A 3 dimenziós megjelenítéshez a matplotlib, a felszínek ábrázolásához a numpy, a Flight Plan kiimportálásához a csv, illetve ennek a felhőbe való feltöltéséhez a pydrive kiegészítőket használtam [49][50][51]. A fejlesztett programom 4 nagyobb kód-részre bontható: egy „menü” részre, a változók megadására, az út koordinátáinak kiszámolására, valamint ezek ábrázolására az objektummal együtt. A „menü” részben hívható meg a további 3 előbb említett részt, mint funkció definíciókat.

A menüben parancsokkal lehet navigálni, attól függően, hogy mit szeretnénk csinálni (lásd 7. ábra). A /run parancssal először az összes változót kéri be a program, majd ezek alapján számolja ki az útvonal pontjait és ezt fogja ábrázolni a felhasználónak. Ha a /run-demo parancsot használjuk, akkor egy már előre megadott változókból generált példát fog a program lefuttatni, azaz az útvonalat kiszámolni, valamint ábrázolni, hasonlóan, mint az előző esetben. A /options parancsot használva 2 beállítási lehetőség közül lehet választani. Beállítható egy „óvatos tervezési” lehetőség is, melynek kevés rétegenkénti pont darabszám felvételekor van jelentősége (4-nél kevesebb pont), hiszen ilyenkor a gömb felületén kívül eső plusz pontokat szűr be az útvonaltervbe a program, ezzel elkerülhető olyan eset, hogy a drón a mérendő objektumon keresztül repüljön át, ami ütközéshez vezetne. Valamint itt lehet beállítani azt is, hogy a gömb függőleges síkra leképzett merőleges vetületének magasságának hány százalékát fedjék le az útvonalterv rétegei. Ez alaphelyzetben 60%.



```
commands:
/help
/options
/run-demo
/run
/upload
/save
/exit
>>

>>/options
options:
[1]set direct path
[2]set avoiding path (longer)
[3]set coverage
[4]back
>>>
```

7. ábra: A program menürendszere (balra) és az /options almenü (jobbra) [szerző saját szerkesztése]

A `/save` paranccsal menthető le a Flight Plan megfelelő formátumban, ez a 4.1.3.2 pontban van bővebben kifejtve. A már előzetesen lementett útvonalterveket a `/upload` paranccsal lehet Google Drive-ra feltölteni, melyhez a felhő utasításkészletéhez való hozzáférést a Google API¹⁴ biztosítja [52].

4.1.2.1 A Python program funkciói

A programkódon belül ezek a funkciók segítenek kisebb, moduláris darabokra bontani, így ezekkel szervezettebbé és kezelhetőbbé tenni a fejlesztett programot. Ezeket a funkciók bármikor meghívhatóak, így az ismétlődés is elkerülhető velük, valamint újra felhasználhatóak bármely programrészben.

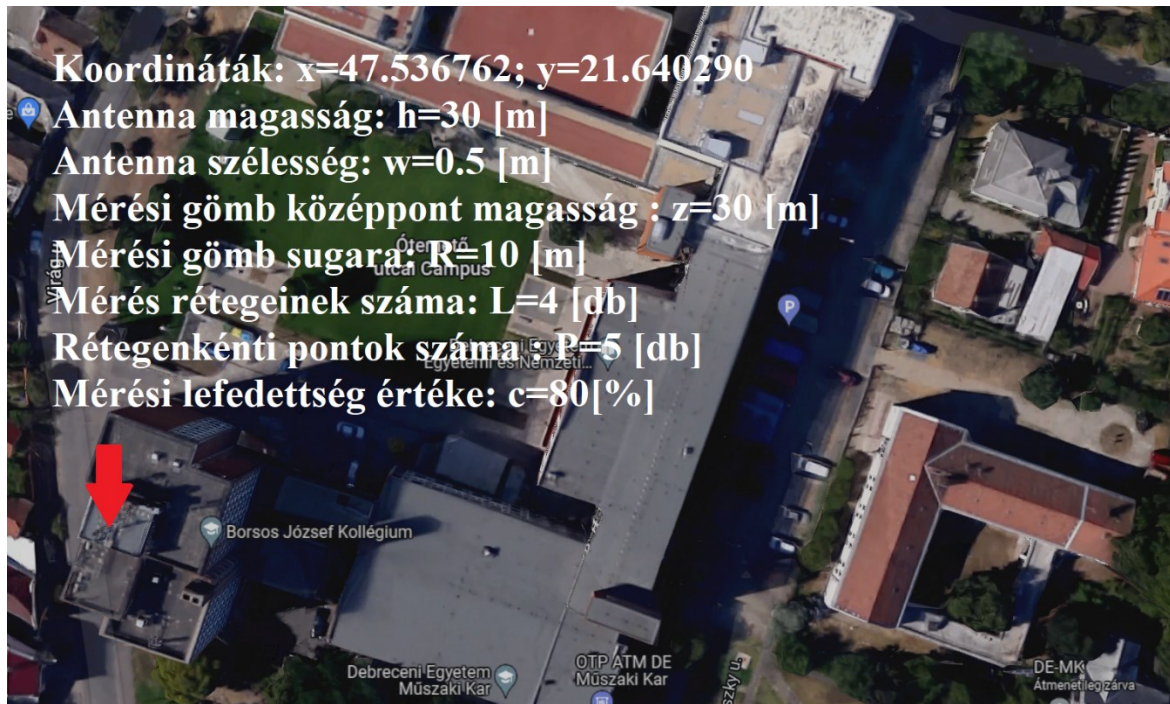
A kutatáshoz fejlesztett programban 3 ilyen funkció van: `TakeUserInput()`, `CalculatePath()`, `Display()`.

- `TakeUserInput()`: Ezzel a funkcióval azt a programrészt hívható meg, mellyel a felhasználótól kéri be a program a futtatáshoz szükséges változókat. A `/run` és a `/run-demo` parancs is meghívja. Ellenőrzi, hogy a generálandó útvonal vagy a gömbfelület ütközik-e majd az objektummal vagy a talajjal. Amennyiben ütközik, úgy a program hibát jelez és új adatok bevitelét kéri.
- `CalculatePath()`: Az előző funkcióval bekért adatokat használja fel az útvonal kiszámításához. Ez a rész az útvonal pontjaiból képzett koordináta listát adja vissza. A `/run` és a `/run-demo` parancs is meghívja.
- `Display()`: Az előző funkció által legenerált koordináta listát használja fel. Először a mérési gömböt fogja kirajzolni szürkével, majd a mérendő objektumot (antennát) rajzolja ki méretarányosan a mérési gömbhöz viszonyítva kékkel. Ezután az előzőleg generált pontokat rajzolja meg a koordináta listából, majd vonalakkal is kirajzolja a koordináta listát piros színnel. Ez azt a hatást kelti, mintha a pontok össze lennének kötve. A vizualizáció tengelyei Descartes-féle koordináta rendszerben ábrázolják ezeket az alakzatokat egyben, méretarányosan. A `/run` és a `/run-demo` parancs is meghívja.

¹⁴ API (Application Programming Interface/Alkalmazásprogramozási felület)

4.1.2.2 A program használata a gyakorlatban

A program futtatását a Debreceni Egyetem Ótemető utcai Campusán (Műszaki Kar) található Borsos József Kollégium tetején telepített antennával szemléltetem. A használt paramétereket az alábbi, 8. ábrán láthatjuk:

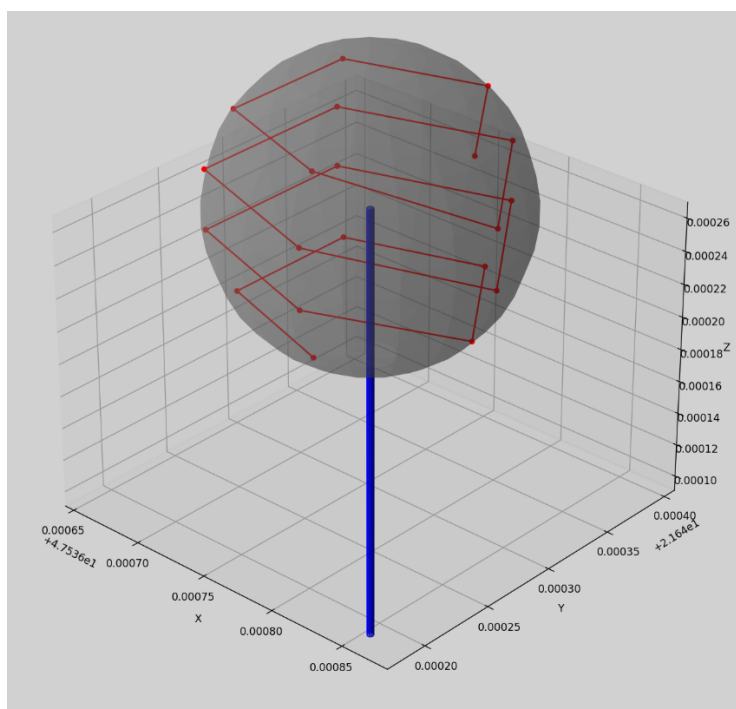


8. ábra: Mintaprogram adatai, Borsos József Kollégium antennája [Google Térkép, szerző saját szerkesztése]

Ezekkel az adatokkal futtatva a program összesen 20 pontot fog kiszámolni (rétegenként 5-öt) és ezeket szemlélteti is, valamint szélességi, hosszúsági koordinátáikat megadja és a talajhoz viszonyított magasságukat is. Ezen kívül még egy irányszöget is ad, mely mindig a gömb függőleges tengelyébe fog mutatni az adott pontból (lásd 9. ábra). Erre a repülésnél lesz szükség, hiszen a drón így mindig a pontokban megadott irányba fog fordulni, így a mérőműszer vevőegysége az objektum felé fog nézni. Az első pont mindig a legmagasabb rétegben kezdődik, így lépked a program körbe, majd le a rétegenkénti pontok és a rétegek között. A 10. ábrán a program által kirajzolt útvonal vizualizációja látszik. Ezen megfigyelhető a rétegek száma, valamint a rétegenkénti pontok száma is, illetve a pontok sorrendje is.

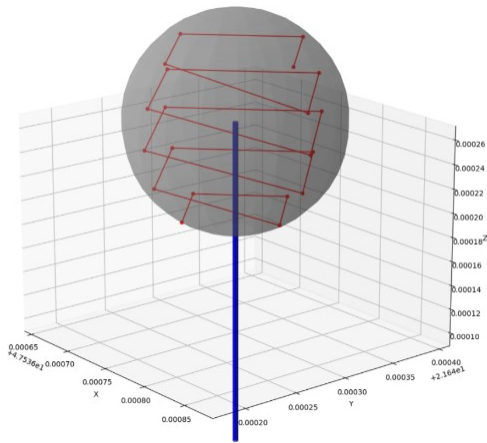
É: 47.53683407, K: 21.64029000, magasság: 36.00, irány: 180.00
É: 47.53678427, K: 21.64035854, magasság: 36.00, irány: 252.00
É: 47.53670369, K: 21.64033236, magasság: 36.00, irány: 324.00
É: 47.53670369, K: 21.64024764, magasság: 36.00, irány: 36.00
É: 47.53678427, K: 21.64022146, magasság: 36.00, irány: 108.00
É: 47.53685027, K: 21.64029000, magasság: 32.00, irány: 180.00
É: 47.53678928, K: 21.64037395, magasság: 32.00, irány: 252.00
É: 47.53669059, K: 21.64034188, magasság: 32.00, irány: 324.00
É: 47.53669059, K: 21.64023812, magasság: 32.00, irány: 36.00
É: 47.53678928, K: 21.64020605, magasság: 32.00, irány: 108.00
É: 47.53685027, K: 21.64029000, magasság: 28.00, irány: 180.00
É: 47.53678928, K: 21.64037395, magasság: 28.00, irány: 252.00
É: 47.53669059, K: 21.64034188, magasság: 28.00, irány: 324.00
É: 47.53669059, K: 21.64023812, magasság: 28.00, irány: 36.00
É: 47.53678928, K: 21.64020605, magasság: 28.00, irány: 108.00
É: 47.53683407, K: 21.64029000, magasság: 24.00, irány: 180.00
É: 47.53678427, K: 21.64035854, magasság: 24.00, irány: 252.00
É: 47.53670369, K: 21.64033236, magasság: 24.00, irány: 324.00
É: 47.53670369, K: 21.64024764, magasság: 24.00, irány: 36.00
É: 47.53678427, K: 21.64022146, magasság: 24.00, irány: 108.00

9. ábra: A program által kiszámolt útvonal pontjai [szerző saját szerkesztése]

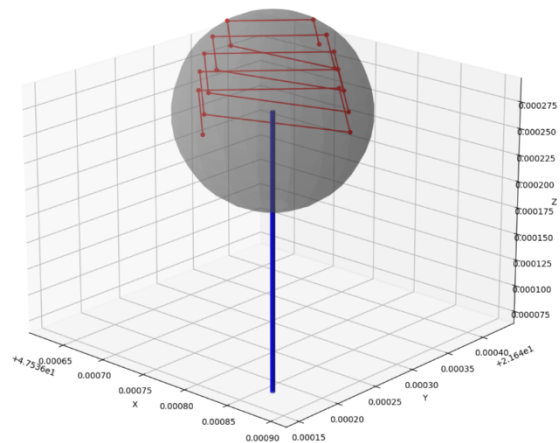


10. ábra: Az útvonalterv vizualizációja, a mértékegységek illeszkedése miatt koordinátákban [szerző saját szerkesztése]

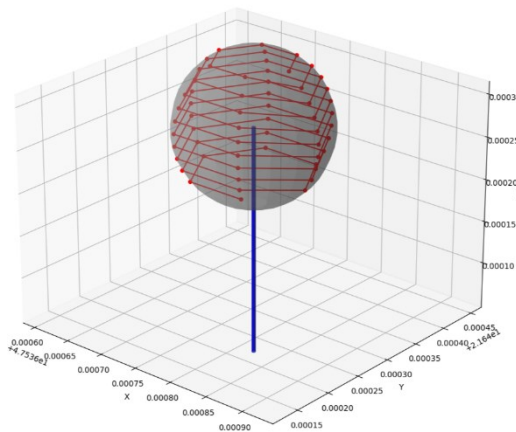
További példákat mutatok a program használatára, a változók megváltoztatásával (lásd 11-13. ábrák). Látható, hogy a lefedettség, a mérési rétegek és a mérési pontok számának változtatása milyen hatással van az útvonaltervre.



11. ábra: Az útvonalterv vizualizációja, 5 réteg, rétegenként 4 pont, 90% lefedettség [szerző saját szerkesztése]



12. ábra: Az útvonalterv vizualizációja, 5 réteg, rétegenként 4 pont, 50% lefedettség [szerző saját szerkesztése]



13. ábra: Az útvonalterv vizualizációja, 10 réteg, rétegenként 6 pont, 80% lefedettség [szerző saját szerkesztése]

4.1.3 A Flight Plan applikáció DJI drónokhoz

A kutatási munkában az útvonal repüléséhez szükségem van egy alkalmazásra, mely a generált útvonalat képes a drónnal végrehajtani. Ehhez számomra egy megfelelő applikáció a Flight Plan for DJI Drones, mely IOS operációs rendszert futtató telefonokhoz és tabletekhez elérhető [53]. Mivel a drón távirányítójához egyébként is kell csatlakoztatni egy készüléket, hogy a telemetriai adatokat valós időben lássuk, a drón által szolgáltatott kamera képét vegyük, beállításokat végezzünk a drónon vagy kalibráljunk, így ez teljesen kézen fekvő megoldás az Inspire 1-hez.

Az applikációban a drón kezelője is létrehozhat útvonalat, akár egy pont leszúrásával a térképen, de a pont koordinátaival is megadható. A pontokhoz rengeteg beállítási lehetőség van,

ilyenek a magasság, sebesség, állási idő, kamerafelvétel indítása, leállítása, gimbal vezérlése, POI¹⁵ beállítása, mely felé fog a drónunk fordulni és a gimbalját állítani. Ezt a POI pontot is fel tudjuk venni koordináták alapján is. Az applikációban az elkészített Flight Plan-eket tudjuk lokálisan a készülékre is, illetve az applikáció felhőjébe is menteni. Ezeket a Flight Plan-eket csv¹⁶ formátumban menti el az alkalmazás, a kutatásomban ezt használom ki, hogy az applikációtól független Python programban én is létre tudjak hozni ilyen csv fájlokat, melyeket megnyitva rögtön használhatok.

4.1.3.1 Az útvonaltervek csv formátuma

A Flight Plan applikáció a Flight Plan-eket pontosvesszővel tagolt formátumban menti el és olvassa be. Ahhoz, hogy létre tudjak hozni egy ilyen útvonalat az applikáción kívül ismernem kell a mentés szintaxisát [54]. Ezt a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat: A csv fájl formátuma [szerző saját szerkesztése]

Latitude	Longitude	Altitude	Speed	Pause time	Heading	take Picture	gimbal Angle	yaw Angle	POI Target
----------	-----------	----------	-------	------------	---------	--------------	--------------	-----------	------------

A 3. táblázat egy sora tehát egy pont tulajdonságait foglalja össze, az értékeket egymástól pontosvesszővel elválasztva. Új pontokat hozzáadni új sorok kitöltésével lehet. A program tehát a legfelső sorban lévő ponttól fog lefelé haladni az utolsóig a repülés végrehajtása során. Nekem néhány funkcióra ezekből nincsen szükség, így azok helyére nullát ír a program.

4.1.3.2 A csv formátum lementése

A már előzőleg generált és vizuálisan megjelenített útvonaltervet a Python programban a /save paranccsal tudja a felhasználó egy megadott néven elmenteni csv formátumban. A megfelelő végrehajtás érdekében elegendő a Latitude, Longitude, Altitude, Speed, Pause time, Heading értékeket megadni, a többi alapérték, azaz 0 marad. Sebességnek 2 [m/s]-ot ad meg alapértelmezetten a program, állási időnek pedig 10 [s]-ot, mely elegendő a mérésre, de ezeket is lehet a programkódban változtatni az értékek átírásával.

Gyakorlati példa képpen a 4.1.2.2. pontban használt adatokkal a programot futtatva majd a /save paranccsal lementve és egy tetszőleges nevet adva neki az alábbi csv fájlt kapjuk,

¹⁵ Point of Interest – Hasznos Hely

¹⁶ Comma-separated values – Pontosvesszővel tagolt formátum

amit a Google Táblázatok applikációjában nyitottam meg (lásd 14. ábra). Ez az alkalmazás automatikusan rendezi a csv formátumból a táblázatot, így jól átlátható lesz.

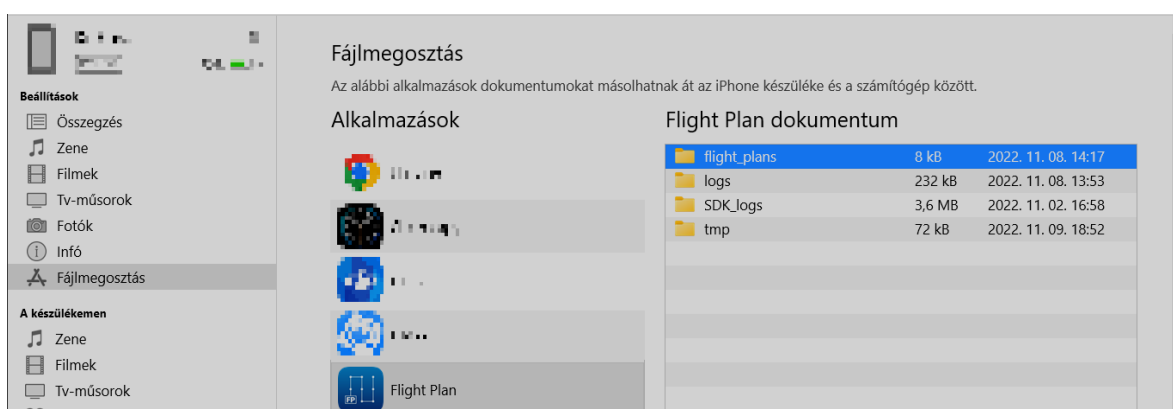
4.75368340699999761e+01	2.164029000000000025e+01	3.60000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	1.8000000000000000e+02	0.0000000000000000e+00
4.75367842699999829e+01	2.164035854000000011e+01	3.60000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	2.5200000000000000e+02	0.0000000000000000e+00
4.7536703690000000306e+01	2.16403323599999880e+01	3.60000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	3.2400000000000000e+02	0.0000000000000000e+00
4.7536703690000000306e+01	2.16402476399999834e+01	3.60000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	3.6000000000000000e+01	0.0000000000000000e+00
4.75367842699999829e+01	2.16402214599999935e+01	3.60000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	1.0800000000000000e+02	0.0000000000000000e+00
4.753685027000000218e+01	2.164029000000000025e+01	3.20000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	1.8000000000000000e+02	0.0000000000000000e+00
4.753678928000000070e+01	2.164037395000000075e+01	3.20000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	2.5200000000000000e+02	0.0000000000000000e+00
4.75366905899999919e+01	2.164034188000000011e+01	3.20000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	3.2400000000000000e+02	0.0000000000000000e+00
4.75366905899999919e+01	2.16402381199999936e+01	3.20000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	3.6000000000000000e+01	0.0000000000000000e+00
4.753678928000000070e+01	2.16402060499999975e+01	3.20000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	1.0800000000000000e+02	0.0000000000000000e+00
4.753685027000000218e+01	2.164029000000000025e+01	2.80000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	1.8000000000000000e+02	0.0000000000000000e+00
4.753678928000000070e+01	2.164037395000000075e+01	2.80000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	2.5200000000000000e+02	0.0000000000000000e+00
4.75366905899999919e+01	2.164034188000000011e+01	2.80000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	3.2400000000000000e+02	0.0000000000000000e+00
4.75366905899999919e+01	2.16402381199999936e+01	2.80000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	3.6000000000000000e+01	0.0000000000000000e+00
4.753678928000000070e+01	2.16402060499999975e+01	2.80000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	1.0800000000000000e+02	0.0000000000000000e+00
4.75368340699999761e+01	2.164029000000000025e+01	2.40000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	1.8000000000000000e+02	0.0000000000000000e+00
4.75367842699999829e+01	2.164035854000000011e+01	2.40000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	2.5200000000000000e+02	0.0000000000000000e+00
4.7536703690000000306e+01	2.16403323599999880e+01	2.40000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	3.2400000000000000e+02	0.0000000000000000e+00
4.7536703690000000306e+01	2.16402476399999834e+01	2.40000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	3.6000000000000000e+01	0.0000000000000000e+00
4.75367842699999829e+01	2.16402214599999935e+01	2.40000000000000000e+01	2.0000000000000000e+00	1.0000000000000000e+01	1.0800000000000000e+02	0.0000000000000000e+00

14. ábra: Útvonalterv csv formátumban [szerző saját szerkesztése]

4.1.3.3 A csv fájl feltöltése a Flight Plan applikációba

A Python program által létrehozott csv fájl feltöltésére összesen 3 lehetőséget dolgoztam ki, ebből kettővel felhőbe lehet indirekt módon, egy módszerrel pedig az applikáció belső könyvtárába direkt módon.

1. Belső, lokális könyvtárba való feltöltés: Ekkor a Python programot futtató PC-hez csatlakoztatva a készüléket, melyen a Flight Plan alkalmazás telepítve van. Az IOS operációs rendszerrel együttműködő iTunes alkalmazásban a telefon tárhelyén ki kell keresni az applikáció könyvtárát és ebben a flight_plans mappába kell feltölteni a csv fájlt.



15. ábra: Útvonalterv mentése iTunes-on keresztül [szerző saját szerkesztése]

2. Az alkalmazás felhő szolgáltatásába való feltöltés: A Python program által létrehozott csv fájlt interneten az alkalmazás weboldalán a felhasználó fiókjába bejelentkezve lehet

feltölteni, amit ezután az összes ugyanazon fiókba bejelentkezett készüléken meg lehet nyitni [55]. A kutatás során ezt a megoldást alkalmaztam a legtöbbször.

3. A Python program /upload parancsával egy már előre lementett csv fájlt a fájl nevének begépelésével a saját Google Drive kiválasztott mappába tölthető fel. A felhő utasításkészletéhez való hozzáférést a Google API biztosítja. Ezen parancs futtatásakor a feltöltés befejeztét követően a már feltöltött fájlok nevét és azonosító számát (id) kiírja a felhasználónak. Ezután a Google Drive-ról bármilyen eszközre letölthető és használható.

```
>>/upload
név: TDK
title: TDK.csv, id: 1KZtmfC1DgISPX7hBRHKzkbZWma67I3bo
title: TDK.xlsx, id: 1qxTJhj0-k8WYkYp93f1_k5-prnf64dEe1
title: probakedd4.csv, id: 1Bhe--efaBDsq4DbQ3wddRhAd38Gz5PX2
title: 1111.xlsx, id: 1Uyh1FEixJU9eqwgEhMRi-vCjGvVtOeRs
title: 100.csv, id: 10AFgewpd34-1N8HceeR0Li9E_veka5g0
title: demo.csv, id: 1vTA_lomUSBVcsMU5Lx5kg6tDHyrwVqii
title: 3.csv, id: 1dKvDm-vXUGQb2avjo0kza0sSvay_mtLE
```

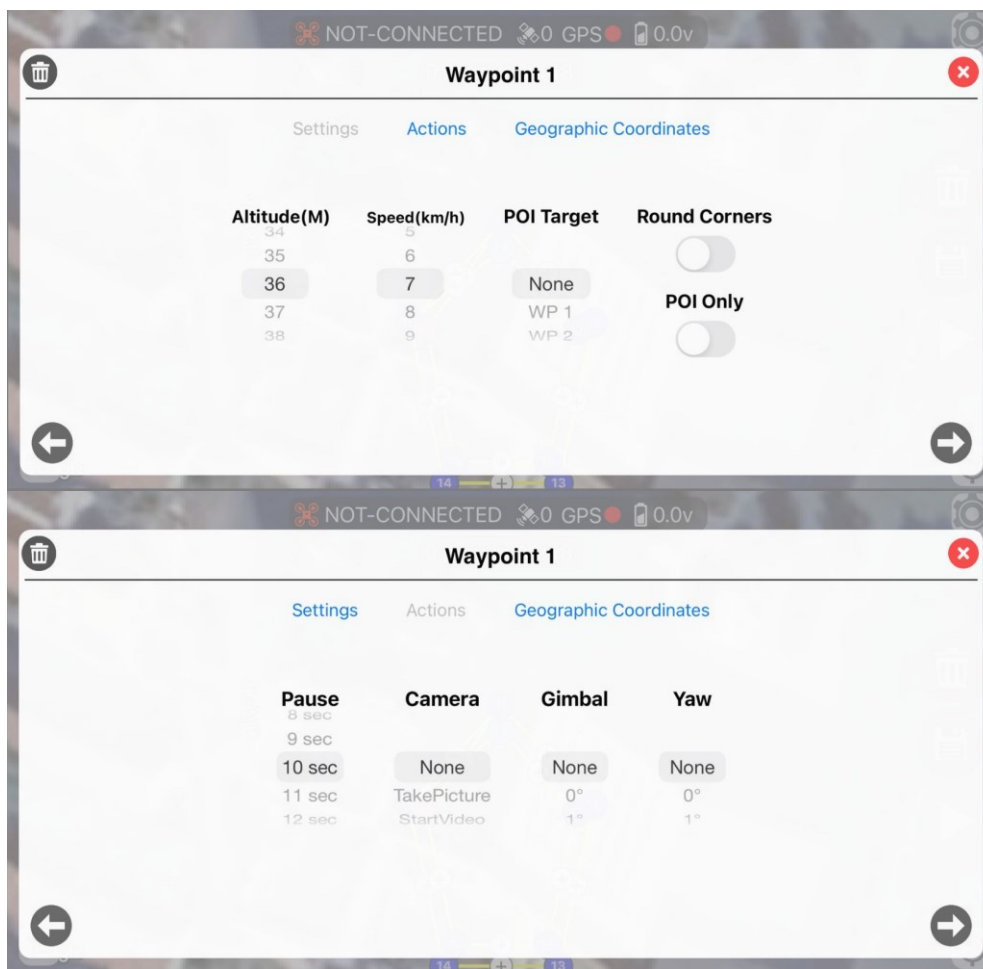
16. ábra: A /upload parancs használata [szerző saját szerkesztése]

4.1.3.4 Útvonalterv betöltése a Flight Plan applikációba

Ha valamilyen módon a csv formátumú útvonal már le lett mentve a készülék belső tárhelyére vagy az applikáció felhőjébe, akkor azt meg lehet nyitni, mint aktív útvonaltervet. Ekkor a Flight Plan-t felülnézetből láthatjuk csak. A pontokat egyenként is le lehet ellenőrizni, hogy milyen koordinátái vannak, mekkora magasságon, mekkora sebességgel menjen közöttük a drón, illetve milyen egyéb műveleteket végezzen (lásd 17-18. ábra).



17. ábra: A Flight Plan applikációban megnyitott útvonalterv [szerző saját szerkesztése]



18. ábra: Az útvonal pontjainak beállítási lehetőségei [szerző saját szerkesztése]

A 17. ábrán a pontok valóságban való közelsége miatt néhány pont egyben látszik, de az a működést nem befolyásolja. A pontokból mutató kis nyilak mind a repülési rétegek középpontjába mutatnak, ez a funkció fogja a drónt is abba mindig a mérendő objektum irányába fordítani.

4.1.3.5 Útvonalterv végrehajtása

A Flight Plan leellenőrzése mellett a drónt szükséges felkészíteni a repülésre. Ehhez a propellereket és az akkumulátort felhelyezzük a drónra, majd be kell kapcsolni azt. A tranzmitterhez (távírányítóhoz) csatlakoztatott eszközön ekkor megjelenik a kamerakép, illetve a drón elvégzi magán a szükséges ellenőrzéseket. Érdeemes a drón iránytűjét bekalibrálni, melyet az eszköz utasításai alapján könnyen elvégezhet a felhasználó, ezzel is növelve a drón pontosságát.

A tesztelés során többnyire manuálisan szálltam fel és le a drónnal, de van lehetőség teljesen automata működésre is. A Flight Plan applikációban a drón autonóm repülését az

útvonalterv kiválasztása után a jobb oldalon lévő START gombbal lehet elindítani. Ekkor még az applikációban be kell állítani, hogy az utolsó ponton való áthaladás után, azaz az útvonal végrehajtását követően a drón mit tegyen. Ha semmit nem állít be a felhasználó, akkor a drón egy helyben fog lebegni az utolsó pontban, az RTF¹⁷ módban az első pontba repül vissza, a RTH¹⁸ módban a kiindulási bázispontba fog visszarepülni és ott le is szállni, a Land módban pedig rögtön leszáll a drón az utolsó pont koordinátáit tartva (lásd 19. ábra). A START gomb megnyomásának és az útvonalrepülés elindításának előfeltétele az, hogy a drón módválasztó kapcsolója F módban legyen, különben az út nem hajtható végre. Ezen kívül még a kamera mód is állítható, hogy merre nézzen az a repülés közben. A tesztek alatt a POI-Custom módot használtam, ekkor a kamera a POI kijelölt pontba fog nézni végig, mely a mérési gömb középpontja.



19. ábra: Útvonalterv végrehajtása előtti beállítások [szerző saját szerkesztése]

Az útvonal magassági tartományát, az útvonal hosszát és időtartamát is látható ekkor, a hossz jelen esetben azért 0,0 km, mert a repülési pontok nagyon közel vannak egymáshoz, közöttük lévő távolságuk összege nem éri el a 100 métert. A repülés várható ideje nagyon közeli a valósághoz, maximum 15 mp-es eltérés tapasztalható egy összesen 10 pontból álló, 2 réteges útvonalon.

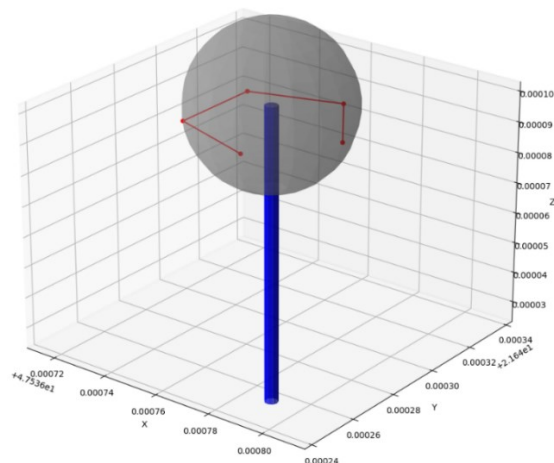
4.2 Teszt utak repülése drónnal

A rendszer teszteléséhez elengedhetetlen a tesztutak repülése, ezzel tudok következtetéseket levonni az autonóm repülés pontosságáról és megbízhatóságáról. A teszteket lakott területtől legalább 150 méteres távolságban hajtottam végre, magánbirtokon repülve, maximum 11 méter magasan. A dolgozat szerzője rendelkezik az Európai Unióban elfogadott A1/A3 távpilóta

¹⁷ Return to First – Visszatérés az első pontba

¹⁸ Return to Home – Visszatérés a bázis pontba

jogosítvánnyal. Szemléltetésképpen egy jól átlátható, 1 rétegű, 5 pontból álló út repülése látható a 20. ábrán. A repülési magasság 11 méter, a mérés sugara 3 méter, melyet a drón kis hibával, de végig tudott tartani. Legnagyobb függőleges eltérés 30 cm volt, de ezt egyből tudta a drón korrigálni amikor megállt a mérési pontban.



20. ábra: Egyrétegű, 5 pontból álló útvonalterv vizualizációja [szerző saját szerkesztése]



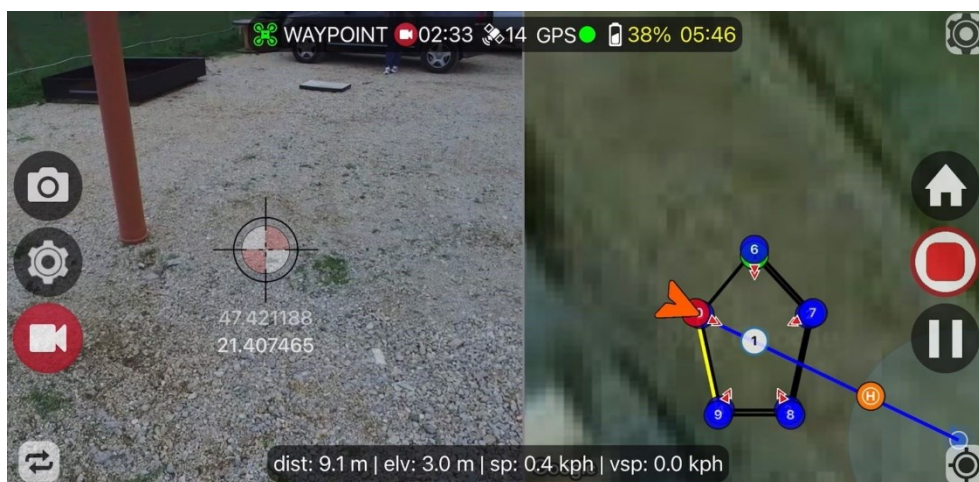
21. ábra: Egyrétegű, 5 pontból álló vonalterv végrehajtása [szerző saját szerkesztése]

Több, 2 és 3 rétegű útvonalak repülését is teszteltem, ezeket is sikerrel teljesítette a drón. Ilyenkor egy-egy réteg utolsó pontja után a következő rétegbe ereszkedik le és megy annak első pontjába.

A drón felszállástól leszállásig történő autonóm repülését is teszteltem, talajszinten elindítva az út repülését és a RTH, azaz a visszatérés a bázisra pontot beállítva a drón teljesen autonóm módon is képes végig repülni a missziót.

4.2.1 Ismétlési pontosság tesztelése

Mivel a mérések megismételhetősége nagyon fontos a mérési adatok kiértékeléséhez, így az ismétlési pontosságot is megvizsgáltam. A drónnal ekkor 4-szer repültem végig ugyanazt a 2 rétegű (6 m és 3 m) missziót és mindig ugyanabban a mérési pontban való lebegését vizsgáltam (lásd 22. ábra). Ezeket a teszt repüléseket 3 méter magasan hajtottam végre, így tudtam mérni az első repüléshez képest a többi repülést. A drónt a tesztek között nem kapcsoltam ki, szenzorait nem kalibráltam újra, viszont minden teszt új le- és felszállással ment végbe.



22. ábra: Ismétlési pontosság tesztelése [szerző saját szerkesztése]

A tesztek kiértékelve elmondható, hogy a drón körülbelül 1 m-es pontossággal tudja lerepülni ezeket az utakat többször, egymás után. Ez egy 8 vagy annál nagyobb sugarú mérési gömbnél nem olyan jelentős hiba, a spektrum analízátoros mérésekre ez nincs jelentős ráhatással.

4.2.2 Repülhető tesztek száma egy akkumulátorral

A DJI Inspire 1-hez 2 fajta „okos-akkumulátor” tartozik. A kettő között a különbség a kapacitásuk, a TB47-es típusú 4500, míg a TB48-as 5700 mAh-ás [26]. A nagyobbik

akkumulátorral körülbelül 18, a kisebbekkel 15 perc repülési idő érhető el. A drón a minimális töltöttségi szintet elérve biztonsági funkcióként azonnal bekapcsolja a RTH módot és a bázison landol. Ez az akkumulátor töltöttségi érték megváltoztatható, de nem ajánlott túl alacsonyra venni, ha messzire repülünk a drónnal. A tesztek alatt maximum 20 méterre repültem el a bázistól, így ez az érték nálam 10 %-ra volt beállítva.

Az alábbi 4. táblázatban adott 4 méter sugarú útvonal maximális darabszámú lerepülhetőségét vizsgálja 1-6 réteges utak esetén, rétegenkénti 5 mérési ponttal, 7 km/h-ás maximális sebességgel a pontok között és 15 perces repülési idő esetén:

*4. táblázat: Repülési idők összehasonlítása a rétegek növelésével, 10 [s] várakozási idővel
[szerző saját számítása, szerkesztése]*

Rétegek száma [db]	Pontok száma [db]	Repülési idő [s]	Maximális repülhető mennyiség [db]
1	5	86	10
2	10	173	5
3	15	259	3
4	20	346	2
5	25	432	2
6	30	518	1

Tehát levonható az a következtetés, hogy 2 akkumulátor használatával bonyolultabb, 4-5 rétegből álló mérésekből 4-5 db végezhető, alacsony rétegszámúból pedig akár egy tucat is. Ezen értékek nagyban növelhetőek kisebb várakozási idő beállításával, például 4 mp esetén az 5. táblázat foglalja össze a lehetséges értékeket.

*5. táblázat: Repülési idők összehasonlítása a rétegek növelésével, 4 [s] várakozási idővel
[szerző saját számítása, szerkesztése]*

Rétegek száma [db]	Pontok száma [db]	Repülési idő [s]	Maximális repülhető mennyiség [db]
1	5	54	16
2	10	110	8
3	15	165	5
4	20	220	4
5	25	274	3
6	30	329	2

Így a repülési idők átlagosan az eredeti értékek 63,43 %-ra csökkentek, így nagy mértékű javulás érhető el az utak mennyiségi teljesítésében, persze ehhez mérlegelni kell a

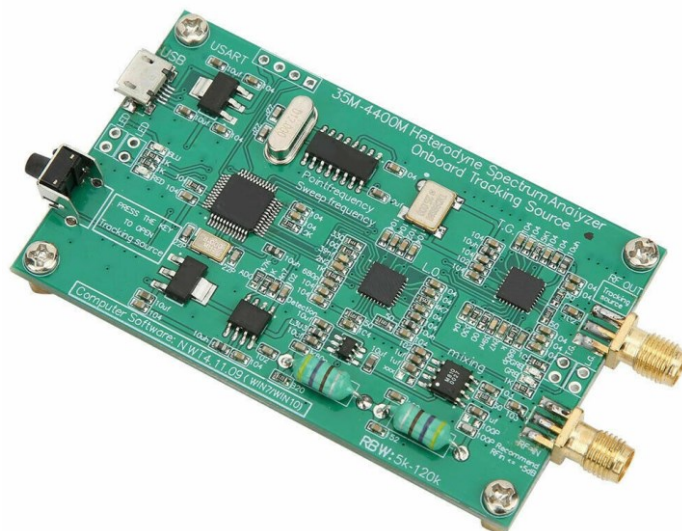
mérési idő hatását a minél pontosabb mérések elvégzése érdekében. A maximálisan teljesíthető utak száma átlagosan 75,55 %-kal javult így.

4.3 A mérőrendszer

A mérőrendszer kiválasztása kulcsfontosságú a projekt sikeressége szempontjából. Mivel a mérőrendszert a drón-platformra helyezve szeretném használni, így annak speciális feltételeknek kell megfelelnie. Ebben az alfejezetben a mérőrendszerhez választott eszközöket fogom bemutatni és a szempontokat, hogy miért volt szükséges ezeket választanom. Emellett a vezetékes és vezeték nélküli mérési módszer felépítését és működését is részletezni fogom, valamint bemutatom a mérőprogramot is.

4.3.1 Spektrum analízátor

A kutatásban olyan spektrum analízátor használata szükséges, melyet a drónon el tudok helyezni, és az ezt gond nélkül elbírja. A rádiófrekvenciás mérésekhez a kutatásban a minimum „L” sávú méréseket céloztam meg, azaz az 1-2 GHz-es frekvenciatartományt. Éppen ezért nehéz olyan eszközt találni, mely kielégíti a súlyra és mérési tartományra vonatkozó szükségletemet. A kutatásra kiválasztott eszköz, egy USB-s spektrum analízátor, melynek működési tartománya 35 MHz és 4,4 GHz közötti [56]. Ez a kutatáshoz megfelelő, kis méretű és tömegű készülék. Nem utolsó sorban ára is igen kedvező nagyobb társaihoz képest.



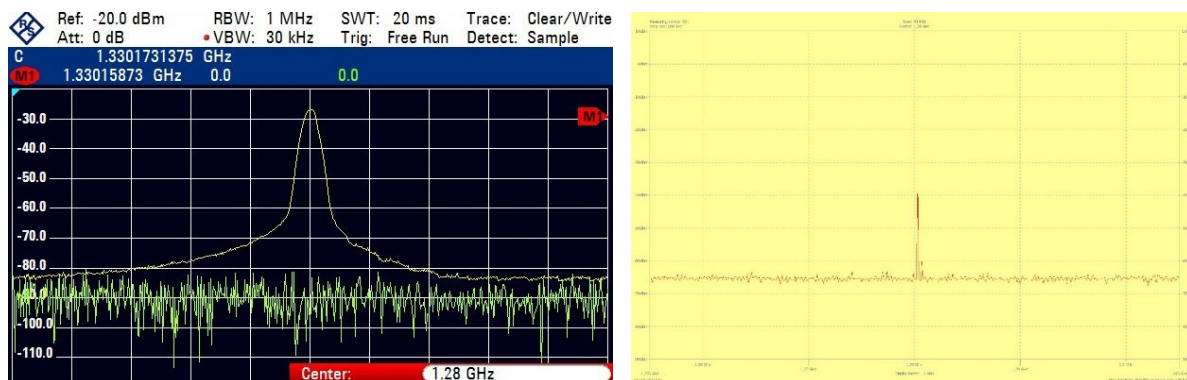
23. ábra: USB spektrum analízátor [56]

Ez egy sweep típusú spektrum analízátor, azaz frekvenciapásztázó funkcióval van ellátva. A használatához a Win NWT4 programra van szükségünk, mely soros USB porton fog

kommunikálni az eszközzel. Ez a program Windows operációs rendszerre elérhető. Így egy Linuxot futtató Raspberry Pi 4 microcomputerrel összekötve emulátort használva és egy kis méretű akkumulátorról működtetve őket felszerelhetők a drónra így a mérések valós időben lesznek elvégezhetőek.

4.3.2 Laboratóriumi mérések spektrum analízátorral

A spektrum analízátort laboratóriumi körülmények között is teszteltem egy későbbi terepen elvégzett radar mérés paramétereivel. A teszt során a Raytheon ASR 23SS passzív radarantenna paramétereit használtam, 1280 és 1330 MHz-es adófrekvenciát, 100 mikroszekundumos impulzusszélességet és 370 MHz-es impulzusismétlési frekvenciát. Az USB spektrum analízátor referenciájaként a Rohde & Schwarz FSH4 spektrum analízátort használtam, a kapott eredmények a 24. ábrán láthatóak.



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

Kijelenthetem, hogy az „olcsó” spektrumanalízátor megfelelően működik, és alkalmas az ilyen típusú mérésekhez. Még fordított polarizációs méréseknél is helyesen méri a körülbelül 25-30 dBm-el gyengébb várható jelet. A spektrum analízátor teljesítményének növelése érdekében egy alacsony zajszinttel rendelkező előerősítő alkalmazásával az analízátor érzékenyebbé tehető kisebb teljesítményű elektromágneses sugárzás mérésére is.

4.3.3 RF előerősítő alkalmazása

A rádiófrekvenciás teljesítményerősítő egy olyan elektronikus erősítő, mely az alacsony teljesítményű rádiófrekvenciás jelet nagyobb teljesítményű jellé alakítja, ezáltal kevésbé erős spektrumkomponenseket is be tudunk mérni. Az erősítő kiválasztásánál nagy figyelmet kell

fektetni a megfelelő működési tartományra, mely a jelenlegi esetben az analízátor 35-4400 MHz-es mérési tartománya, de legalább tudnia kell az „L” sávot.

A választott eszköz egy LNA (Low Noise Amplifier) RF erősítő, mely 50-4000 MHz-es közötti tartományban működik, ez kielégíti a projekt igényeit [57]. Nem utolsó sorban pedig ez is egy költséghatékony megoldás. Tápfeszültséggel a Raspberry Pi GPIO 5V és GND pinout-jai látják el.



25. ábra: LNA 50-4000 MHz RF erősítő [57]

A tesztek alapján az „L” sávban 10 dBm-es jelerősítés érhető el alacsony teljesítményű vett jelek esetén, ami a rendszerbe integrálva megfelelő a mérésekhez. Az alacsony jelszinteknél, még egy 10 dBm-es jelnövekedés is sokat jelent a jel-zaj viszony még szebb elhatárolásában.

4.3.4 Vevőantenna

A drón-platformon használt vevőantenna egy üregrezonátoros „L” sávú microstrip antenna, melyet az egyetemen fejlesztettek ki hallgatók egy másik projektben [58]. Az antenna 1-2 GHz közötti RF jel vételére és adására alkalmas.



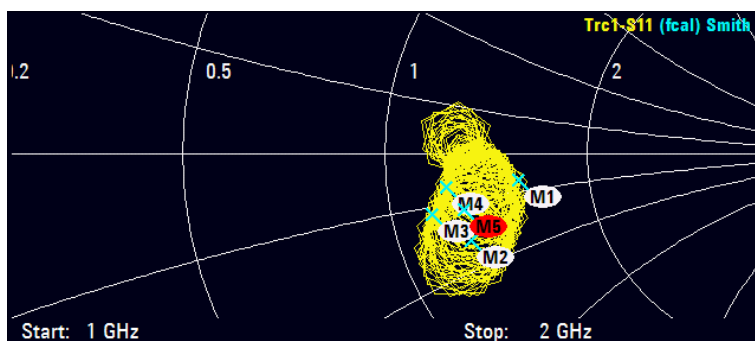
26. ábra: „L” sávú microstrip antenna [szerző saját szerkesztése]

4.3.4.1 „L” sávú antenna impedanciavizsgálata

Az antenna impedanciavizsgálatához a Rohde & Schwarz FSH4 műszert használtam, mellyel a microstrip antenna impedanciáját 1 GHz és 2 GHz között vizsgáltam. Az impedanciamérés eredményei az 6. táblázatban láthatóak, a mérés Smith-diagramja a 27. ábrán.

6. táblázat: „L” sávú antenna impedanciamérési eredményei

f (GHz)	1.05	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.99
Z (Ω)	60,6+ j8,68	60,3+ j7,55	66,9- j1,07	62,9- j3,16	65,7+ j2,53	77,4- j6,93	63,4- j18,6	57,0- j11,6	60,7- j6,66	64,0- j11,9
VSWR	1,28	1,27	1,32	1,28	1,25	1,53	1,57	1,39	1,24	1,31



27. ábra: „L” sávú antenna Smith-diagramja 1-2 GHz között [szerző saját szerkesztése]

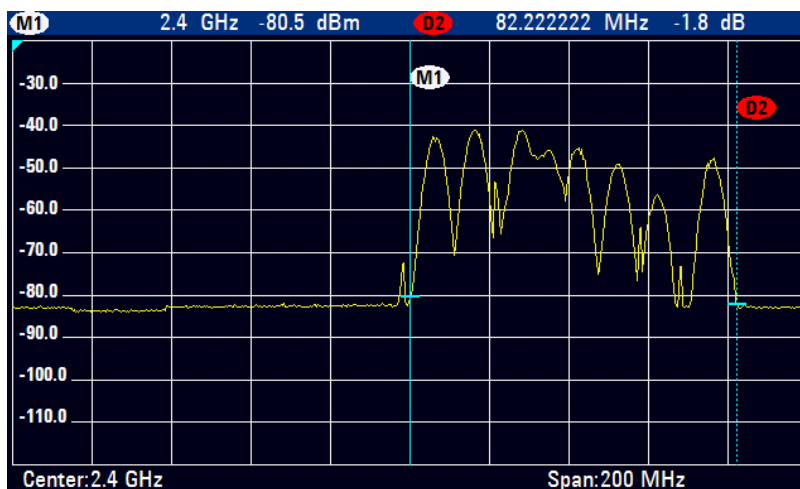
Az L sávú antenna impedancia mérésénél 1-1,4 GHz között jó hatásfokkal 60 Ω hatásos ellenállás és 10 Ω alatti induktív impedancia értékkel használható. 1,5 és 2 GHz frekvencia között a VSWR= 1,3-1,57 között változik, tehát az illesztés rosszabb lesz. Az in-situ tesztkövetelményeinket ezen mérési adatok kielégítik.

4.3.5 A használt drón-platform RF vizsgálata

A projektben használt eszközöket is megvizsgáltam az általuk kibocsátott RF jelek tekintetében. Ehhez a Rohde & Schwarz FSH4 műszer spektrum analízátor funkcióját használtam és a méréseket 20 MHz és 3,6 GHz között végeztem, a tanszéken rendelkezésre álló vevőantennák és a műszer mérési tartományának maximumát kihasználva. Ez a frekvenciatartomány majdnem teljesen lefedi a drónra helyezett USB spektrum analízátor mérési tartományát, mely 35-4400 MHz. Így csak a 3,6-4,4 GHz közötti spektrumot nem tudtam vizsgálni, de a drón dokumentálása alapján ebben a tartományban nem történik kommunikáció.

Méréseket végeztem a drón különböző fordulatszámra felpörgetett BLDC motorjairól. A motorok fordulatszáma a mérések közben használt magasságtartó funkció közben 3050 ± 50 rpm, a motorok szabályozását végző ESC-k pedig PWM-jelet küldve szabályozzák a fordulatszámot, ami 50 Hz-es ismétlődést mutat, és csak az impulzusok hosszúsága változik. Tehát a motorok nagyságrenddel a MHz-es tartomány alatti EM teret tudnak csak létrehozni működésük során, mely drón-platform alapú mérésekre nincsen hatással. Ezt a laboratóriumi spektrum analízátoros méréssel is sikerült bizonyítani, mert a mért spektrumra a 20 MHz-es mérési küszöbfrekvencia felett nem volt hatása a motorok üzemelésének.

A drón távirányítóval történő kommunikációja az adatlapja szerint 2,400-2,483 GHz közötti Wi-Fi tartományon történik, melyet a laboratóriumi mérés során sikerült mérni. Ráadásul a mérőrendszer vezeték nélküli kommunikációja is, melyet 4.3.6.2-es pontban fogok bemutatni, a 2,4 GHz-es Wi-Fi tartományon történik. Ezen tartomány a laboratóriumban max hold funkcióval trace-lt vett jele a 28. ábrán látható.



28. ábra: A drón-platform működése közben kialakuló EM tere [szerző saját szerkesztése]

Ezzel megállapítottam, hogy a drón-platform működése közben keletkező EM terek a 2,4 GHz-es Wi-Fi tartományon kívül nem tudják befolyásolni a méréseket, a teszteknel ettől a tartománytól távol eső frekvenciákat sugárzó antennákat vizsgáltam.

4.3.6 A mérés elvégzése

A spektrum analízátoros drón-platform alapú mérés végrehajtásának 2 módját is kidolgoztam a kutatásban:

- Vezetékes megoldás: kis magasságokhoz és korlátozott mérési távolságokhoz alkalmazható
- Vezetéknélküli megoldás: nagyobb mérési távolságokhoz és bonyolultabb földrajzi viszonyok között is alkalmazható

4.3.6.1 Vezetékes mérési megoldás

Ezen mérési eljárás során a drón-platformra csak a vevőantenna van felszerelve és az egy megfelelően hosszú (a tesztek során 23 m-es) 50 Ω impedanciájú koaxiális kábellel van összekötve a talajszinten lévő spektrum analízátorral, ami pedig egy PC-n vagy Raspberry Pi-on keresztül vezérelhető a WinNWT program segítségével. Az előerősítő ebben az esetben a talajszinten a spektrum analízátor elé van közvetlenül bekötve, így nem szükséges a drónra külső, 5 V DC-t biztosító áramforrás felhelyezése ezzel is növelve a repülési kapacitását.



29. ábra: Vezetékes mérési megoldás használata gyakorlatban [szerző saját képe]

A vevőantenna felfogatásához, valamint a koaxiális kábel elvezetéséhez a Siemens Solid Edge 3D tervező programjában terveztem alkatrészeket, melyhez a Műszaki Kar hallgatói hozzáférést biztosít [59]. Ezen alkatrészek kinyomtatásához saját tulajdonomban lévő Creality

Ender 3 V2-es 3D nyomtatómat használtam PLA filamenttel [60]. A nyomtatott alkatrészek megfelelőek és elég strapabíróak voltak a tesztekhez (lásd 30. ábra).

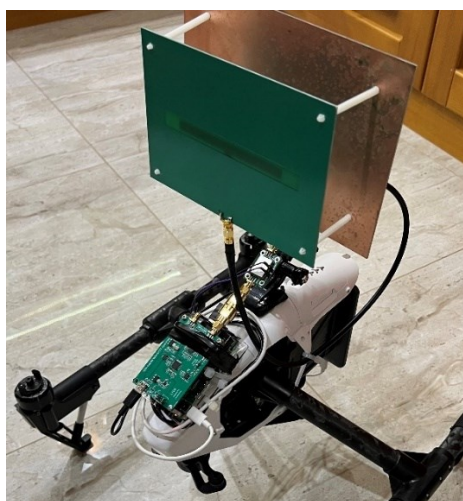


30. ábra: Drón-platformra felszerelt antenna és 3D nyomtatott alkatrészek, a vezetékes mérési eljárás során [szerző saját képe]

Ezen eljárási mód során azt tapasztaltam, hogy ugyan a hosszabb koaxiális kábel miatt van veszteség, viszont egy stabil mérési mód kisebb magasságoknál és a mérés során fellépő időjárási körülményeknek, mint a szél és turbulencia jobban ellenáll a drón-platform.

4.3.6.2 Vezeték nélküli mérési eljárás

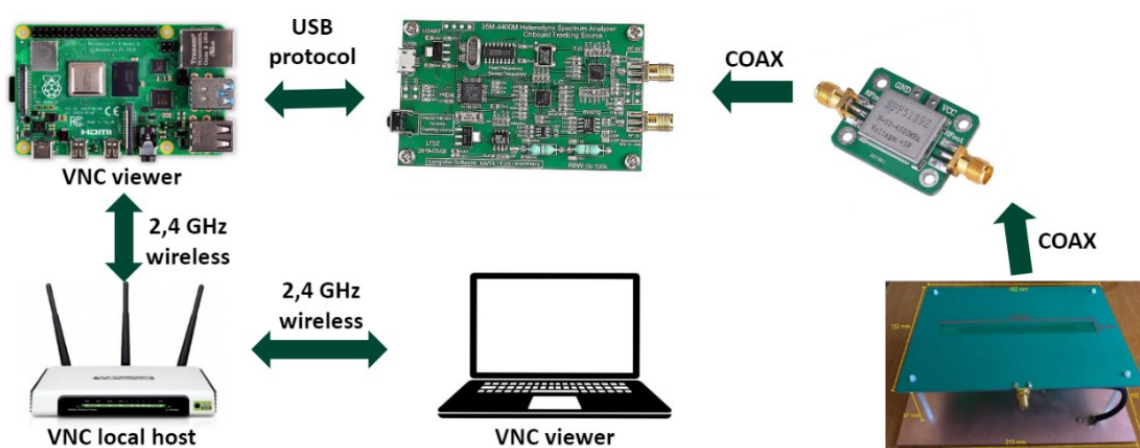
A vezeték nélküli mérési eljárás során a drón-platformon kap helyet a vevőantenna, a spektrum analizátor, a Raspberry Pi 4, az előerősítő, valamint az ezeket 5V DC tápfeszültséggel ellátó akkumulátor (lásd 31. ábra).



31. ábra: Drón-platformra felszerelt mérési rendszer, a vezeték nélküli mérési eljárás során [szerző saját képe]

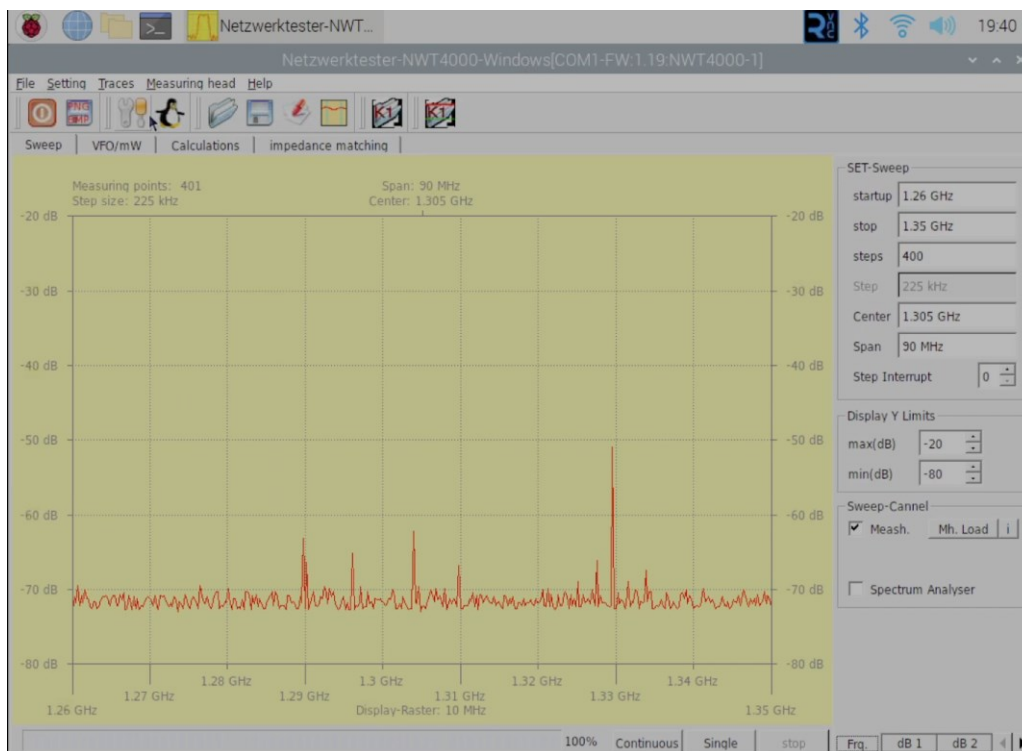
Tápellátásként stabil 5V DC szükséges a mérőrendszernek, melyet külső akkumulátor vagy akár a drónoknál ismert 4 cellás Li-Po akkumulátor is elláthat egy feszültségszabályozó IC-vel. A tesztek során egy Varta márkájú 5000 mAh névleges kapacitású külső akkumulátort használtam, melyet a drón hátuljára erősítettem, ezzel kiegyensúlyozva azt. A tesztek alapján a mérőrendszert ez a megoldás legalább 2 óra hosszúságú ideig tudja üzemeltetni.

A Raspberry Pi 4-hez, így az analízátor programjához is valós idejű hozzáférés és vezérelhetőség érdekében egy helyi hálózatot hoztam létre egy 2,4 GHz-es Wi-Fi router segítségével. A Raspberry Pi-hoz való hozzáférés internetelés nélküli megoldása azért fontos, mert ezen sugárzók gyakran lakott területen kívül helyezkednek el, ahol gyakran nincsen mobilhálózati lefedettség sem. Az internet nélküli 2,4 GHz-en létrehozott kapcsolat a Raspberry Pi és a router között a routerre csatlakoztatott PC-n keresztül VNC szerver használatával érhető el, lásd 32. ábra [61].



32. ábra: Vezeték nélküli mérési eljárás elvi működése [szerző saját szerkesztése]

A létrehozott lokális szerveren keresztül egy virtuális asztalt létrehozva lehet a Raspberry Pi Linux alapú operációs rendszerén emulátorral futtatott WinNWT programon keresztül a méréseket valós időben elvégezni, valamint a mérési eredményekhez hozzáférni és lementeni (lásd 33. ábra). A gyakorlati tesztelés során a UAV platformmal 50 m-es repülési távolságban is stabil kapcsolat volt, mely kielégíti az in-situ igényeinket, de a spektrum mérés kapcsolat hiányában is elvégezhető és a kapcsolat helyreállításával az adatok ismételt lementhetőek.



33. ábra: VNC szerveren létrehozott virtuális asztal a WinNWT 4 alkalmazással [szerző saját szerkesztése]

4.3.7 WinNWT4 program

A WinNWT 4 egy olyan nyílt forráskódú program, mely segítségével az USB-s spektrum analizátort lehet működtetni [62]. Használata nagyban hasonlít az ipari, professzionálisabb társaihoz, rengeteg beállítási lehetőséggel rendelkezik.

Mérési módszerek közül választhatunk Continuous és Single mérés közül, utóbbi egyszer pásztázza végig a kiválasztott frekvenciatartományt, míg előbbi folyamatosan pásztázza azt. A frekvenciatartományt a kezdő-, illetve végfrekvenciával is meg lehet adni, de a középfrekvencia, valamint a frekvenciatartomány szélességével is megadható. Ennek megadását követően a mérés felbontását is be lehet állítani, a tesztek során 400-500 közötti step-eket használtam, ez megfelelően nagy felbontást biztosít, még elegendően gyors működés mellett. Természetesen az Y tengely felbontását is lehet változtatni igényeim szerint, azaz meg lehet adni a minimális és maximális dB értékét (lásd 34. ábra).

SET-Sweep

startup 1.275 GHz

stop 1.285 GHz

steps 500

Step 20 kHz

Center 1.28 GHz

Span 10 MHz

Step Interrupt 0

Display Y Limits

max(dB) -20

min(dB) -80

34. ábra: WinNWT 4 program spektrum mérési beállítási lehetőségei [szerző saját szerkesztése]

Emellett a programban markereket is lehet megadni, akár manuálisan vagy a program képes automatikusan a maximális/minimális értékekhez is hozzárendelni azokat. Az analizátorhoz használt koaxiális kábel hossza is megadható, valamint a kábel vesztesége ($dB \text{ loss}/100 \text{ m}$), mely megadásának segítségével képes kompenzálni a mérések során fellépő veszteségeket (lásd 35. ábra). Ez a vezeték nélküli mérési módszer esetén 0,2 m-es kábelhosszt és 6,9 dB/100 m-es veszteséget jelent a kábel paramétereinek alapján.

Bandwidths / Values

☒ dB Maximum

☐ dB Minimum

☐ 3dB Bandwidth

☐ Invers

☐ Quality Q

☐ 6dB Bandwidth

☐ 60dB Bandwidth

☐ Shape-Faktor

☐ SWR Display

SWR without cable loss

cable length 0.2 m

Loss 6.9 db/100m

35. ábra: WinNWT 4 program mérési marker és -veszteség beállítási lehetőségei [szerző saját szerkesztése]

A programban a mért eredmények lementhetőek, .n4k formátumban, mely a program saját csv formátuma. Ez egy 2 hasábos táblázat, melynek az első hasába a frekvencia értékeket tartalmazza a kezdő frekvenciától a végfrekvenciáig, második hasába pedig az adott

frekvencián mért értéket (lásd 36. ábra). Ennek az adatkiértékelés szempontjából még nagy jelentősége lesz, melyet a 5. pontban fejtek ki.

f [MHz]	dB
1278.90	-72.56
1279.13	-71.61
1279.35	-71.8
1279.58	-71.04
1279.8	-72.37
1280.03	-72.37
1280.25	-71.61
1280.48	-71.42
1280.7	-72.37
1280.93	-69.71
1281.15	-70.85
1281.38	-72.18
1281.6	-69.52

36. ábra: WinNWT 4 programból lementett mérési eredmény (részlet) [szerző saját szerkesztése]

4.4 Drón-platform tesztelése valós körülmények között

A drón-platform tesztelésére nagy hangsúlyt fektettem, ehhez nagy segítségemre volt, hogy a Mechatronikai Tanszéknek 2 alkalommal is lehetősége volt a HungaroControl Püspökladányi Radarállomásán a féléves karbantartások során különböző közeltéri antenna/radar méréseket elvégezni. Ezek során a HungaroControl karbantartást vezető munkatársa engedélyezte a drónnal történő mérési eljárások elvégzését.

A radarállomáson a passzív „L” sávú primer antenna mérését céloztam meg, mely adófrekvenciája 1280 és 1330 MHz, impulzusismétlési frekvenciája 370 MHz, röviden 1, míg hosszabb impulzusszélességen 100 μ sec-en sugároz. Maximális adóteljesítménye a 16 TX modulós változatának 46 kW, nyalábszélessége 1,25°, és percnként 5-6-szor fordul körbe a radomon belül. A radarantenna képes az adójelet modulálni, így a katalógusban szereplő adófrekvenciákhoz képest kisebb mértékű eltérést tapasztalhatok, erre a HungaroControl munkatársa is felhívta a tesztek során a figyelmemet. Ez az amerikai gyártmányú Raytheon ASR 23SS primer antenna a 37. ábrán látható a radom belsejében a Püspökladány melletti radarállomáson.



37. ábra: Raytheon ASR 23SS passzív primer radarantenna a Püspökladányi Radarállomáson
[szerző saját képe]

4.4.1 Első püspökladányi mérés

Az első püspökladányi mérésekre 2023. április 3-4-én került sor, mely során még a mérés vezetékes megoldását teszteltem. Sajnos az időjárási körülmények nagyon szélsőségesek voltak mind a két napon, a szellőkések sebessége meghaladta a 60 km/h-át, valamint a radarantenna radomja körül nagy mértékű turbulencia volt jelen, így sajnos a mérések során nem tudtam megfelelő magasságig emelkedni – a nagy szellőkések miatt a drón motorjai túlterheltté váltak a pozíciótartás során (lásd 38. ábra).



38. ábra: A drón-platform POV kameraképe a püspökladányi vezetékes módszer tesztelése során [szerző saját képe]

A felmerülő körülmények miatt ekkor még nem tudtam megfelelő mennyiségű és minőségű mérési adatot gyűjteni a radarantennáról, viszont a drón normál időjárási körülmények között megfelelően működik és képes az „L” sávú microstrip antennát megfelelő magasságig feljuttatni a korábbi tesztjeim alapján.

4.4.2 Második püspökladányi mérés

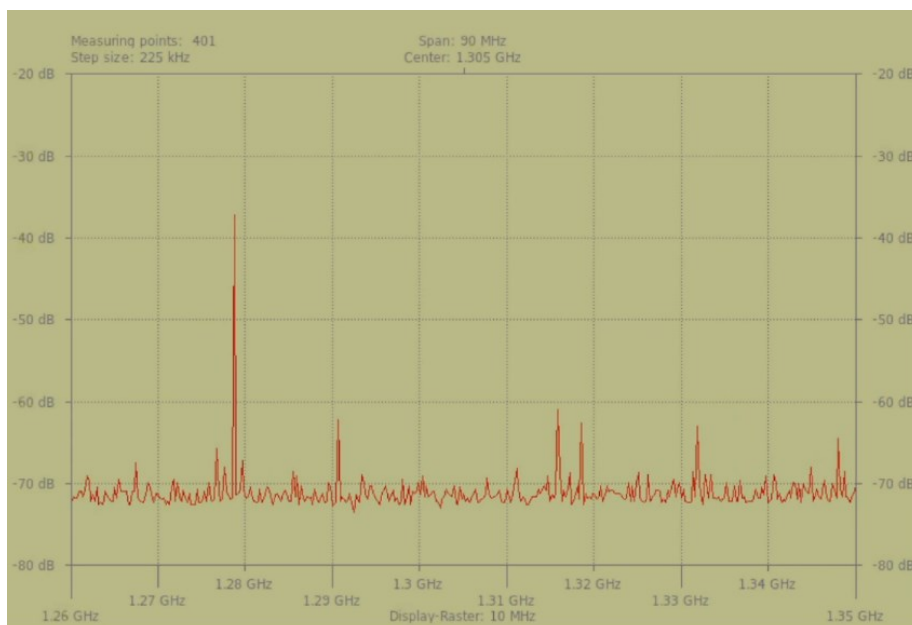
A második püspökladányi tesztre 2023. október 3-án került sor, ekkor már a drón-platform vezeték nélküli mérési megoldását teszteltem. Az időjárási körülmények ekkor már megfeleltek a tesztek elvégzéséhez, ugyan nem volt teljes szélcsend, viszont a drón képes 30 km/h-át meg nem haladó szélleseknek stabilan ellenállni és a GPS pozícióját tartani (lásd 39. ábra).



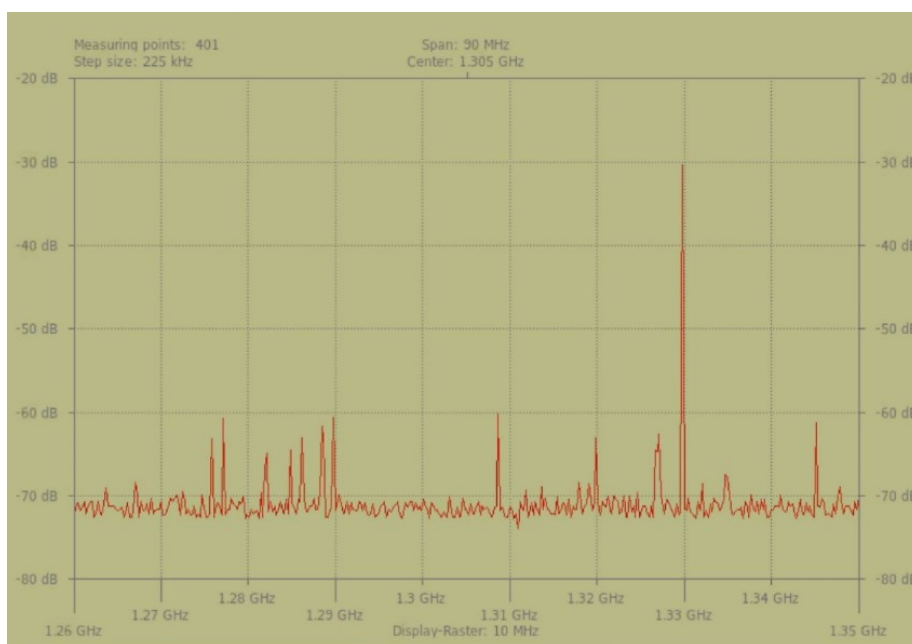
39. ábra: Vezeték nélküli mérési megoldás használata gyakorlatban [szerző saját képe]

A mérés során a létrehozott 2,4 GHz-es Wi-Fi kapcsolat stabilan működött 50m-es hatótávolságig, de a kapcsolat megszakadása ellenére is képes volt a drón mérést elvégezni. A mérési platform reptetése során a WinNWT 4 program használata során egy maximum kb. 1 másodperces késleltetést tapasztaltam, ami a mérésre egyáltalán nincsen hatással, megfelel az in-situ követelményeknek, azaz terepen egyszerűen és stabilan használható megoldás.

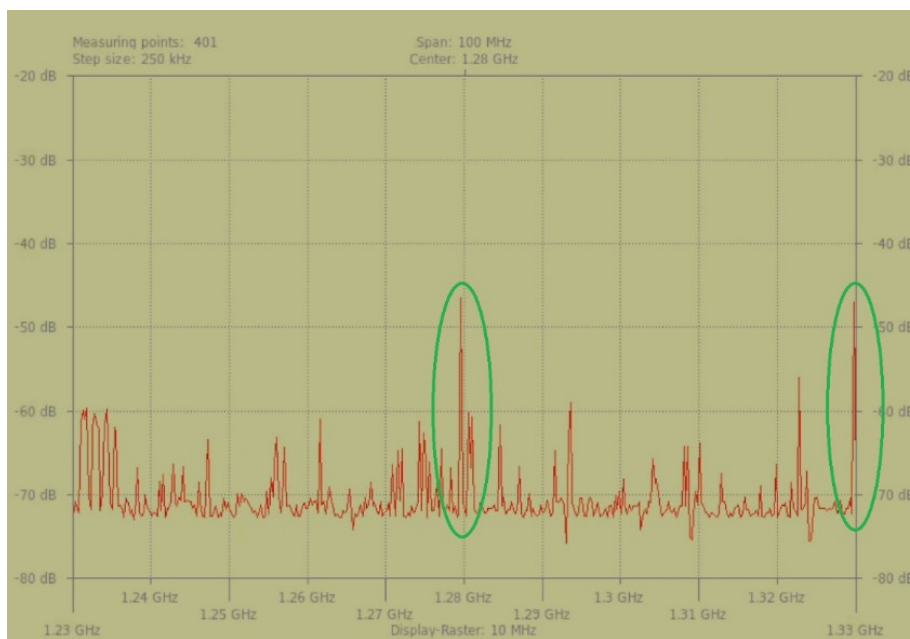
A tesztmérések során sikeresen mérte a drón-platform a primer antenna 1280 és 1330 MHz-es adófrekvenciáit is, legalább -40 dBm jelerőséggel a -70 dBm körüli alapjelhez képest (lásd 40-41. ábrák), sőt a két adófrekvenciát egyszerre is képes volt az eszköz befogni (lásd 42. ábra).



40. ábra: Raytheon ASR 23SS radar 1280 MHz-es adófrekvenciájának mérési eredménye
[szerző saját képe]



41. ábra: Raytheon ASR 23SS radar 1330 MHz-es adófrekvenciájának mérési eredménye
[szerző saját képe]



42. ábra: Raytheon ASR 23SS radar 1280 és 1330 MHz-es adófrekvenciájának mérési eredménye [szerző saját képe]

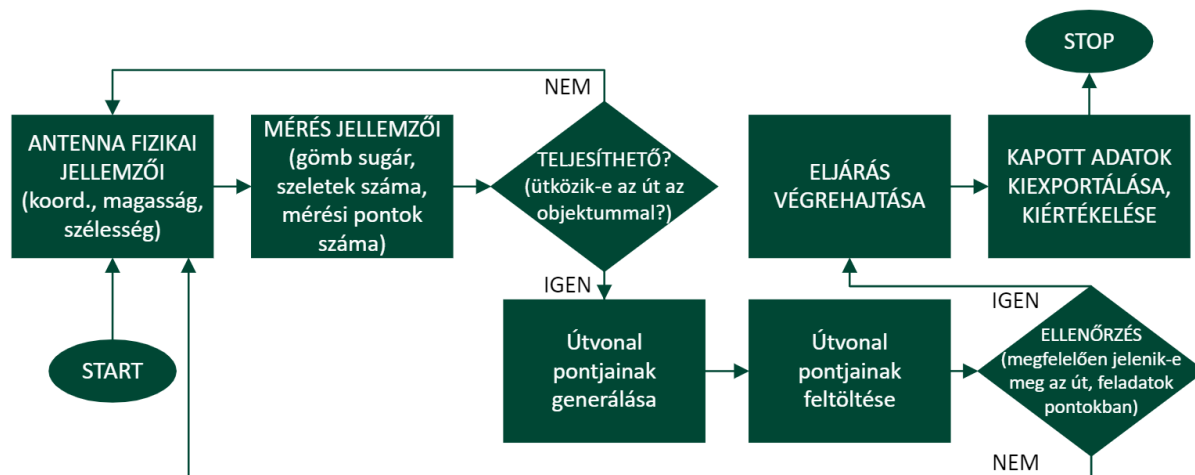
Azaz kijelenthetem, hogy a drón-platform alapú mérési eljárás működőképes és az in-situ tesztek során sikeresen mérte a radarantenna adófrekvenciáit.

4.5 Teljes mérési eljárás ismertetése

A 4. fejezetben eddig bemutatott pontokra alapozva fogom a teljes mérési eljárást bemutatni. A mérési eljárás első lépéseként a mérni kívánt antenna földrajzi koordinátáit, valamint magasságát és térbeli kiterjedését is ismerni kell a felhasználónak. Ezeket az adatokat a fejlesztett útvonaltervező programba megadva a mérés jellemzőinek megadása a következő lépés. Ehhez a mérési gömb sugarát, a mérés rétegeinek a számát, valamint a rétegenkénti mérési pontok számát is meg kell adnunk. Az összes paraméter megadását követően a Python program legenerálja az útvonaltervet, ha az teljesíthető és nem ütközik a mérési útvonal az objektummal vagy a talajjal, ellenkező esetben figyelmeztet a hibára és az adatok újbóli megadását kéri.

Sikeres útvonalgenerálást követően az útvonal lementhető és a 4.1.3.3 pontban bemutatott módszerek egyikével feltölthető a drón autonóm repülését támogató alkalmazásba. Ebbe beimportálva a repülési tervet egy manuális ellenőrzés végrehajtása szükséges a váratlan hibák elkerülése végett. Az útvonal pontjainak, valamint a drón felszállás előtti ellenőrzését követően az autonóm repülési terv végrehajtható. A drón pontonként fog végig repülni az

útvonalterven és azokban meghatározott hosszúságú időt fog eltölteni, ezalatt az állási idők alatt készülnek el a spektrum mérések minden pontban és lesznek a mérési eredmények pontonként lementve. A mérési eljárás folyamatábrája a 43. ábrán látható:



43. ábra: Mérési eljárás folyamatábrája [szerző saját szerkesztése]

A továbbiakban a drón-platform alapú mérési adatok kiértékelésének menetét és módszerét fogom kifejteni az 5. fejezetben.

5. Mérési eredmények kiértékelése

A mérések során gyűjtött és lementett eredményeket adatkiértékelési szempontból ábrázolni szeretném, mellyel nagyban megkönnyíthető a mérési eredmények kiértékelése és megértése. Mivel a drón-platformmal egy adott repülési tervet repülve, annak bizonyos pontjaiban mérjük a sugárzókat, így egy-egy antenna mérésnél több mérési eredmény is keletkezik, melyeket egyesével vizsgálva, - mint ahogyan azt a 38-40. ábrákon is tettem, - bonyolult és körülményes lenne. A mérési eredmények megértésének megkönnyítése céljából vizualizálni szeretném az eredményeket.

5.1 Fejlesztett Python program a mérési eredmények vizualizációjára

Az eredmények vizualizációjára egy, a mérési gömbnek megfelelően szerelném a mérési eredményeket megjeleníteni. A mérési eredmények egyértelműen helyfüggőek, mert a mért értékek egy-egy adott mérési pontban történtek. Valamint minden mérési pontban kapott eredmény egy frekvencia-jelerősség felbontás. Ahhoz, hogy ezeket a változókat egy ábrán tudjam megjeleníteni, egy mozgóképet szükséges létrehozni, melynek a futási ideje a spektrum

mérések frekvenciájának lesz megfeleltetve. Azaz a mozgókép a mérések frekvenciafelbontásának függvényében fog változni, hogy közben a mérési gömbön minden mérési pontban a mért eredmény fog látszódni az adott frekvencián, oly módon, hogy egy hőterkép szerűen ábrázolva a mérési pontok középpontját fog a mérési pontokba helyezett hőpontok sugara változni, azaz nagyobb hőpontnagyság nagyobb jelerősséget jelent.

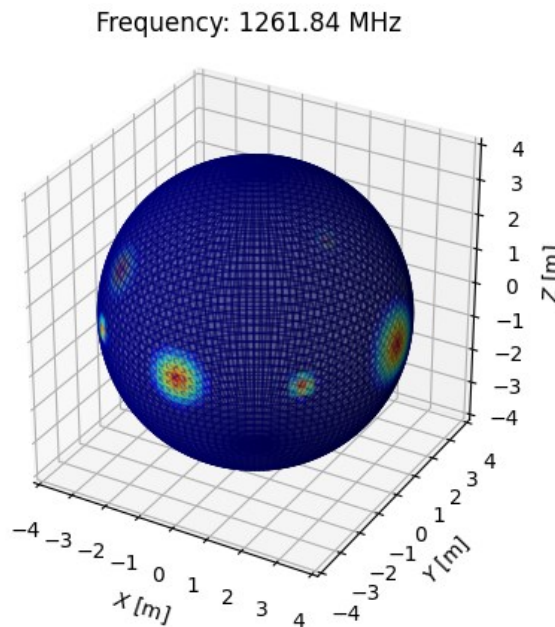
Ehhez egy adott mérés során kapott eredményeket egy táblázatba kell foglalni. A 36. ábrán bemutatott egy mérési ponthoz tartozó eredmény szerűen fogom megtenni, oly módon, hogy a táblázat első oszlopa a frekvenciafelbontás lesz a mérés frekvenciatartománya szerinti növekvő sorrendben. A táblázat további oszlopai pedig a mérési eredményei a pontoknak, oly módon, hogy azok jobbsodrású rendszert alkotnak és ha több mérési réteg van, akkor először mindig a legfelső mérési réteg eredményei vannak felsorolva egymás utáni oszlopokban, majd az alatta következő mérési réteg eredményei és így tovább. Tehát az így kapott táblázat mindig annyi soros, amekkora a frekvenciafelbontása a méréseknek és annyi oszlopos, ahány mérési pont van, plusz az első oszlop mindig a frekvenciafelbontás. Ezt a táblázatot kell csv formában lementeni, hogy a fejlesztett program tudja kezelni. Például egy 5 pontból álló 1 rétegű mérés eredményéhez tartozó csv fájl részlete a 44. ábrán látható.

```
1279.9;-46.15;-54.13;-70.28;-68;-52.61
1279.92;-48.05;-55.65;-71.04;-69.33;-54.89
1279.94;-51.66;-58.69;-71.23;-70.47;-57.17
1279.96;-55.84;-64.2;-71.23;-71.42;-61.92
1279.98;-60.21;-69.71;-70.47;-72.18;-67.43
1280;-70.47;-71.42;-72.37;-70.85;-72.18
1280.02;-69.14;-70.66;-62.68;-68.95;-69.52
1280.04;-57.93;-64.96;-72.37;-71.61;-65.91
1280.06;-53.37;-61.16;-68.19;-71.8;-60.59
1280.08;-49.76;-56.98;-71.23;-70.85;-56.6
1280.1;-47.48;-54.51;-65.72;-68.19;-53.37
```

44. ábra: 1 rétegű, 5 pontból álló mérés eredménye (részlet) [szerző saját szerkesztése]

A fejlesztett programhoz a már útvonaltervező programhoz hasonlóan a numpy és matplotlib könyvtárakat használtam. Használatakor meg kell adni a beolvasandó csv fájl nevét, valamint a mérés paraméterei közül a rétegek számát, a rétegenkénti pontok számát, valamint a mérés sugarát. Az ábrázolás intenzitását is lehet változtatni, ez azért előnyös, mert ha kisebb teljesítményű sugárzót vizsgálata történik, akkor is az alapzajhoz képest jobb vizualizáció tapasztalható.

A fejlesztett program normalizálja a mérési eredményeket, így a mérési pontok egymáshoz képest bekövetkező változását fogja a felhasználónak megjeleníteni. A kapott vizualizáción a pillanatnyi adott frekvencia is látható, valamint a gömbhöz tartozó koordináta rendszer, aminek az origója a gömb középpontja és az X, Y és Z tengelyek, melyek mértékegysége méter (lásd 45. ábra).

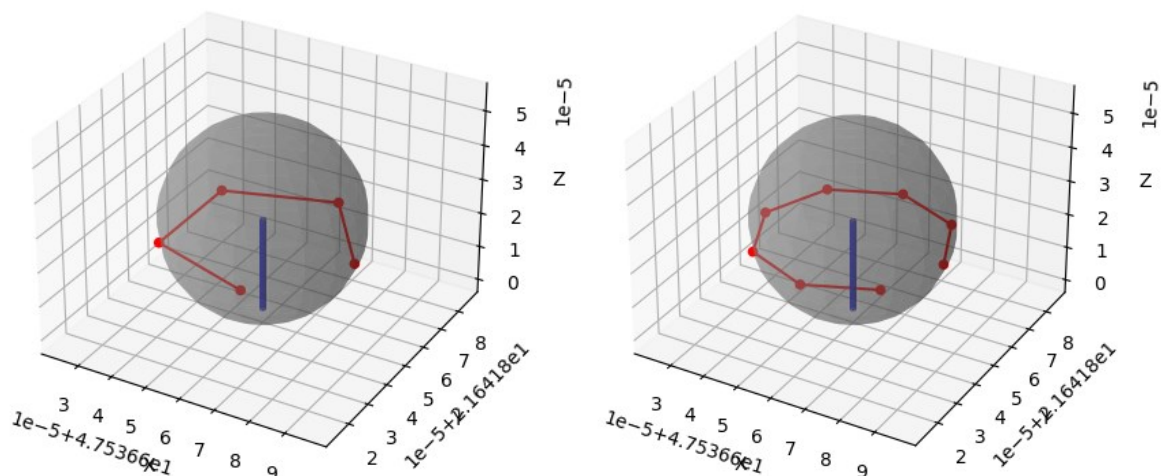


45. ábra: 1 rétegű, 8 pontból álló mérés eredmény vizualizációja [szerző saját szerkesztése]

Ezzel az eredményértékelő megoldással nem csak a projektben fejlesztett drón-platform mérési eredményeit lehet feldolgozni, de egyéb technikákkal történő, akár kézi spektrum analízátoros mérésekhez is alkalmazható, azaz univerzális megoldás lehet az adatok értékelésére.

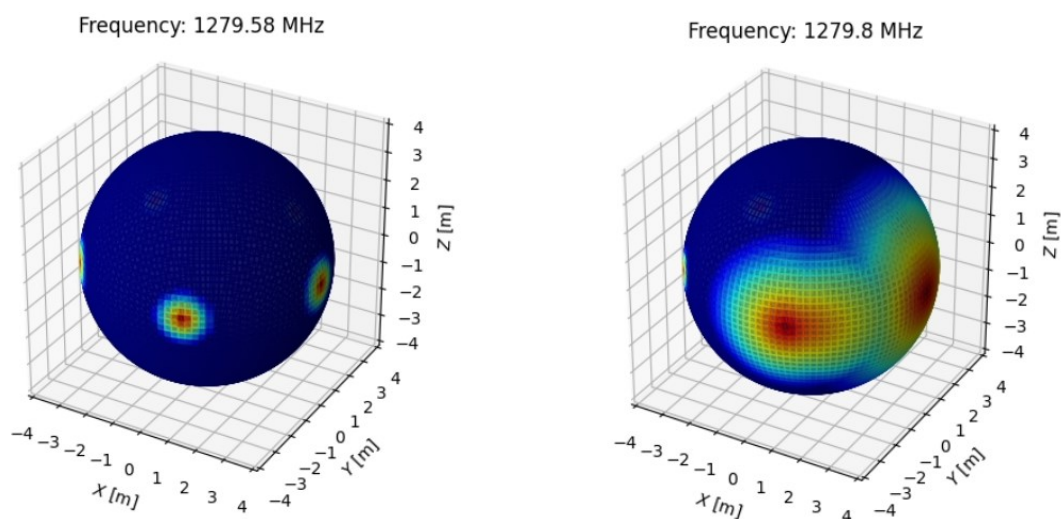
5.2 Tesztrepülések során nyert adatok kiértékelése

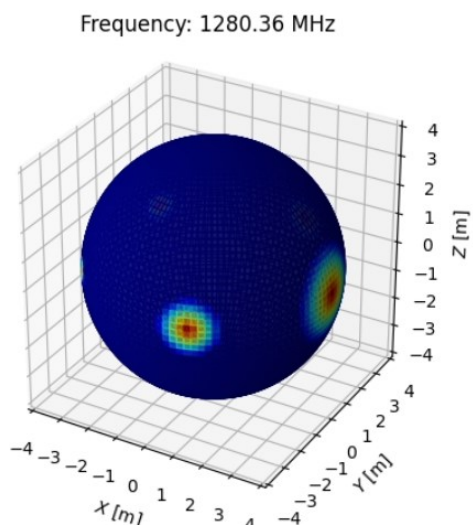
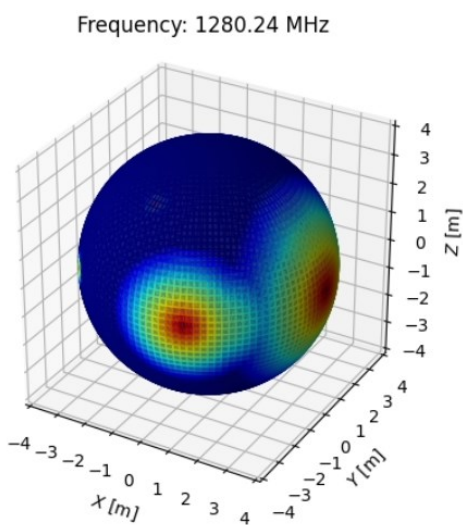
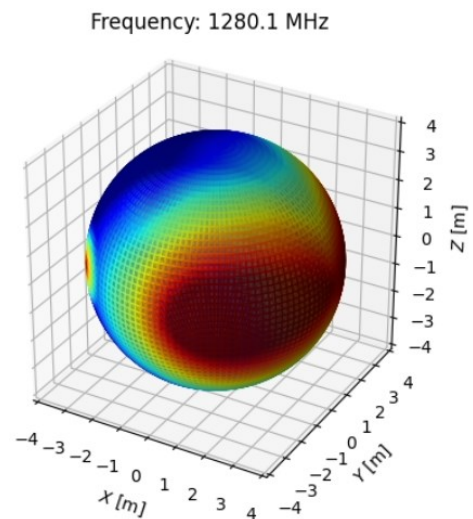
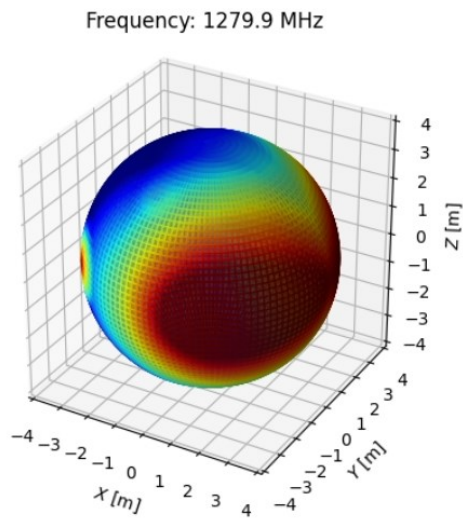
A mérési eredmények kiértékeléséhez a drón-platformmal történő mérési adatok gyűjtése elengedhetetlen. Ehhez a Műszaki Kar Mechatronikai Tanszékének belső udvarán állítottam fel egy „L” sávú tesztantennát (lásd 26. ábra), melyet a drón-platform segítségével mértem körbe 1 rétegben, a sugárzó antenna középpontjának magasságában, 5 és 8 db mérési pontot alkalmazva (lásd 46. ábra). A sugárzott jel 1280 MHz-es frekvenciájú, modulálás mentes, és 0 dBm erősségű volt.



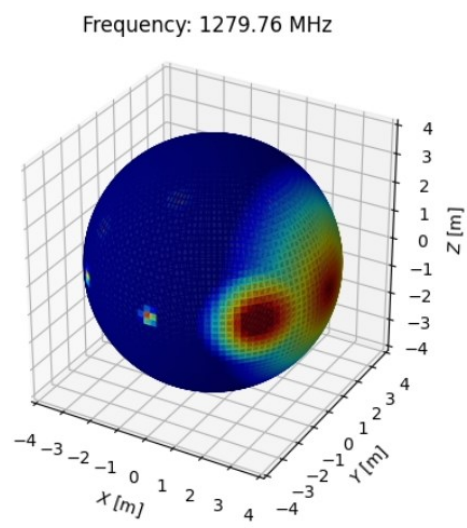
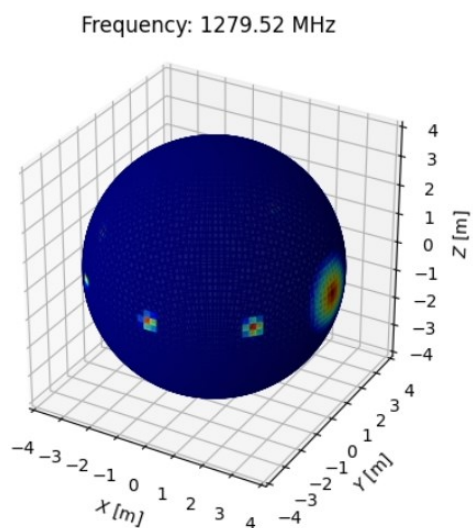
46. ábra: 1 rétegű, 5 és 8 pontból álló mérési útvonaltervek vizualizációja [szerző saját szerkesztése]

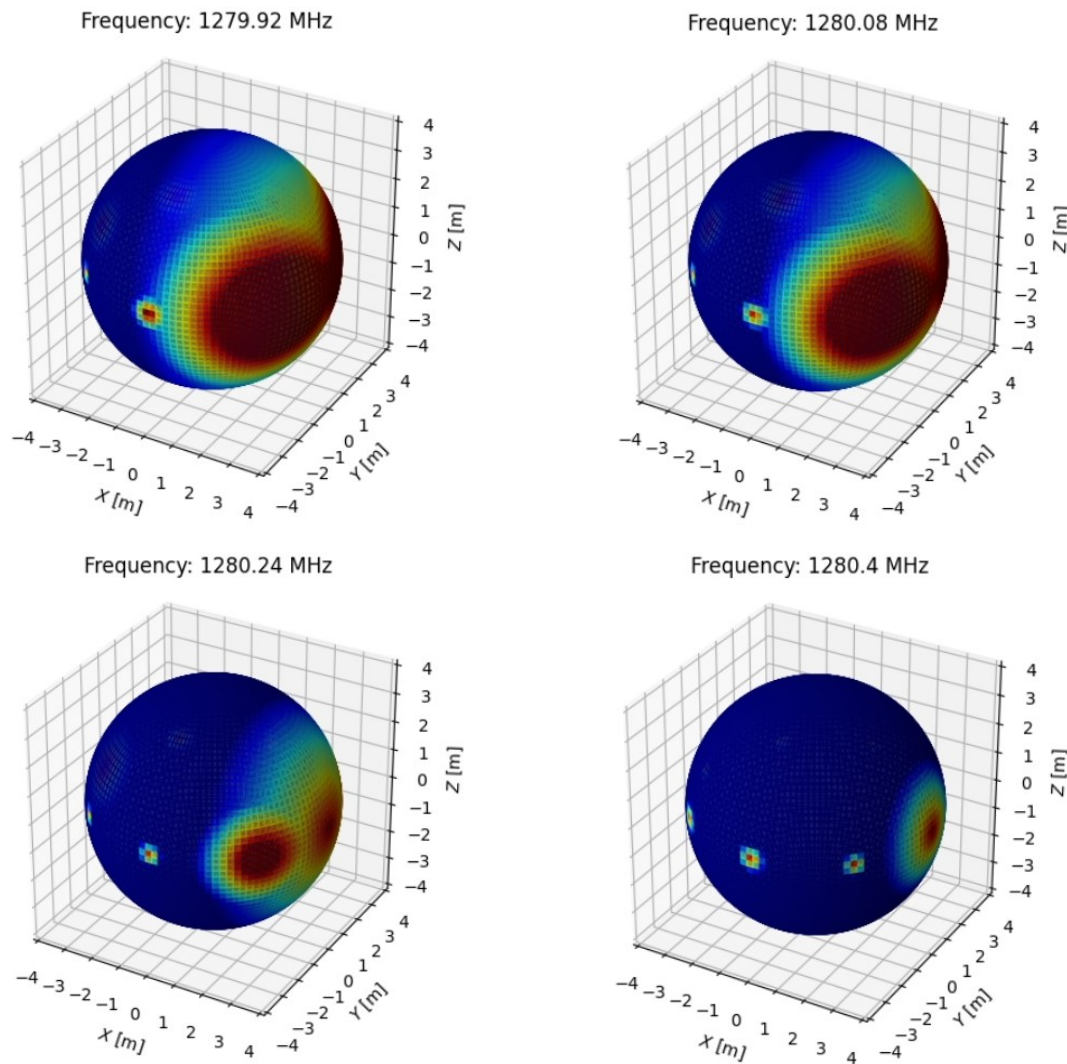
A drón-platform ezen a teszten is megfelelően működött a vezeték nélküli mérési módszert alkalmazva, a mérési pontokban 10 mp-es átlagos állási idővel a mért adatokat lementve, azok a repülést követően azonnal kinyerhetőek voltak, hogy a fejlesztett programba adatvizualizáció szempontjából beimportálható legyen. A vizualizációk mozgóképéből lementett képernyőképek a 47-48. ábrán láthatóak szemléltetésképpen. Az sugárzásra használt antenna főnyalábját a tesztelés során fixen a (3;0;0) [m] koordinátájú pont felé irányítottam, miközben az antenna az origóban helyezkedett el.





47. ábra: 1 rétegű, 5 pontból álló mérés eredményének vizualizációja [szerző saját szerkesztése]





48. ábra: 1 rétegű, 8 pontból álló mérés eredményének vizualizációja [szerző saját szerkesztése]

A kapott eredményeket kielemezve belátható, hogy a sugárzó antenna legnagyobb jelerőssége a főnyalábban lévő mérési pontban helyezkedik el. Ehhez a ponthoz szomszédos két pontban a mért jelerősség a vártak megfelelően kisebb, viszont még jóval a zajhatár felett mérhető érték. A sugárzó antennákra merőlegesen elhelyezkedő mérési pontokban nem mért az analizátor a zajhatár felett sugárzott jelet, illetve az antenna mögött elhelyezkedő mérési pontokban sem, de ez a várható eredmény ennél a típusú antennánál. Tehát a mérések és az adatvizualizáció is megfelelően működnek, az antenntípusnak megfelelő elvárt eredményt produkálták.

6. Továbbfejlesztési lehetőségek

A projekt egy komplex megoldást kínál sugárzók 3 dimenziós feltérképezésére, viszont a kutatás folytatásához használható néhány továbbfejlesztési lehetőséget is bemutatok. A drón-platform tekintetében egy RTK¹⁹ alapú GPS rendszer integrálásával nagyban megnövelhető a GPS alapú repülés pontossága. Ezt a technológiát a precízió mezőgazdaságban általánosan alkalmazzák már és akár centiméteres pontosság is elérhető vele.

A drón-platform alapú mérési eredményekhez célom még real-time feldolgozás kifejlesztése, mely már repülés közben a mérést követően egyből megkezdheti az adatkiértékelő programba importálni a mérési eredményeket, ezzel az útvonalrepülést követően azonnal kézhez lehet kapni a mérés eredményeit, így azonnali visszajelzést tud a felhasználó szolgáltatni a sugárzókról.

A legjobb mérési eredményekhez egy több drónból álló drónraj alkalmazása kézenfekvő lenne, melyek az RTK alapú helymeghatározó rendszerükkel és kiegészített szenzorokkal egymáshoz képest is centiméteres pontossággal repülve képesek lennének interferometrikus multimérések elvégzésére, így a sugárzókat egyszerre lehet feltérképezni a drónraj nagyságától függően több irányból. Ehhez a drónok útvonalrepülésének és mérésének tökéletes szinergiája szükséges [2].

Ezek mellett célom még adott feladatokra, antenna típusra és frekvenciára optimalizálható dinamikus szűrők és erősítők használata a mérési platformon. Ezek használatával még jobban ki lehet szűrni a hamis jeleket, lejjebb vinni a zajszintet és még szebb eredményeket produkálni a spektrum mérések során. Természetesen a jelenlegi rendszerről, valamint a továbbfejlesztési lehetőségekről is tesztelés során lehet meg tudni a legtöbb információt, melyekkel finom hangolni lehet az eszközöket, így ki szeretném emelni a további in-situ tesztek jelentőségét a projekt szempontjából.

7. Összegzés [1][2][3]

A kutatás során kitűzött célokat sikerült teljesítenem. A drón-platform a felállított in-situ mérési követelményeknek megfelel, használata a tesztek alapján könnyű, gyors és sok típusú sugárzó méréséhez testreszabható.

¹⁹ Real time kinematic

Az útvonaltervező program az elvártan megfelelően működik, a méréshez az in-situ céloknak megfelelően pontos útvonalat tud generálni, melyet könnyen tudunk a programba feltölteni. Sok beállítási lehetőségével a mérés jellege könnyen változtatható, bárhol használható és biztonsági funkcióknak köszönhetően minimálisra csökkenthető az esetleges hibás, ütközést előidéző útvonalak száma.

A tesztelések alatt sok tapasztalatot gyűjtöttem a rendszer megbízhatóságáról, pontosságáról és kapacitásáról egyaránt. Ehhez sok órányi tesztanyag gyűjtése volt szükséges, mely során tanulmányozva a komplex mérési rendszer működését elmondható, hogy egy stabil, egymással megfelelően kommunikáló és megbízható platformot hoztam létre az útvonaltervezéstől a drón üzemeléséig és a mérésig.

A választott mérőeszköz az előerősítővel és a Raspberry Pi-jal megfelelően működik, sikerült a vezeték nélküli mérési módszert is kidolgozni a projektben, mely a tesztek alapján stabil kapcsolatot biztosít in-situ körülmények között is.

A projekt során a problémák megoldásánál a mechatronikai mérnöki szinergia jelentős mértékben megjelent. A rendszer komplex működéséhez szükséges részfeladatok kidolgozásánál gépészeti, informatikai, szoftvertechnológiai és irányítástechnikai problémákat is érintettem. A fejlesztett drón-platform újdonsága abban rejlik, hogy tetszőleges antennákra testre szabható, könnyen használható in-situ mérési módszert dolgoztam ki.

A dolgozatban bemutatott szempontok nagyban hozzájárultak a projekt eredményeihez és sikerességéhez. Összességében elmondható, hogy a felmerülő problémák feldolgozása során törekedtem mindig olyan megoldásokat találni, melyek nem csak kielégítik a felmerülő igényeket, de gazdaságosak is.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet fejezem ki a konzulensemnek, Sarvajcz Kornél Tanár Úrnak, akinek az önzetlen segítsége nélkül a kutatás nem jöhetett volna létre. Tanácsaival, szakmai hozzáértésével és biztatásával nagyban hozzájárult a dolgozatom elkészüléséhez. Emellett szeretném köszönetemet kifejezni szüleimnek, akik támogatásukkal hozzájárultak az egyetemi éveim alatt elért teljesítményeimhez, valamint kutatásom és TDK dolgozatom befejezéséhez is.

Irodalomjegyzék

- [1] K. Á. Kis, „Antennák spektrum analízátoros mérése drón segítségével”, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Kari TDK, Mechatronikai szekció, 2022
- [2] K. Á. Kis, I. Balajti, K. Sarvajcz, „Drón platform alapú in situ mérési eljárás kidolgozása antennákhoz”, XXIV. Energetika-Elektrotechnika – ENELKO és XXXIII. Számítástechnika és Oktatás – SzámOkt Multi-konferencia, 2023., pp. 29-35. [Online], Elérhető: <https://ojs.emt.ro/enelko-szamokt/issue/view/59> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 06.]
- [3] 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.
- [4] DND Telecom Center, „Antenna típusok és felhasználási lehetőségeik”, [Online], Elérhető: <https://www.dnd.hu/blog/antenna-tipusok-es-felhasznalasi-lehetosegeik> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 09.]
- [5] Somogy Megyei Kormányhivatal, „Tájékoztató az elektromágneses terek egészségügyi hatásairól”, [Online], Elérhető: <https://www.kormanyhivatal.hu/download/c/c3/a3000/T%C3%A1j%C3%A9koztat%C3%B3%20az%20elektrom%C3%A1gneses%20terek%20eg%C3%A9szs%C3%A9g%C3%BCgyi%20hat%C3%A1sair%C3%B3l.pdf> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]
- [6] „Elektroszmoggal kapcsolatos kutatások, tanulmányok, publikációk”, [Online], Elérhető: <https://elektroszmog-meres.hu/elektroszmog-kutatasok/> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 09.]
- [7] „Elektromágneses hullám” kép, [Online], Elérhető: <http://www.vilaglex.hu/Erdekes/Html/ElekSmog.htm> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]
- [8] „Az elektromágneses spektrum tartományai”, [Online], Elérhető: http://eta.bibl.u-szeged.hu/2173/2/az_elektromgneses_spektrum.html [Hozzáférés dátuma: 2022. 11. 11.]
- [9] International Telecommunication Union, ITU-T K.83, „Monitoring of electromagnetic fields, Telecommunication Standardization Sector of ITU”, (2022), [Online], Elérhető: <https://www.itu.int/rec/T-REC-K.83/en> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]
- [10] B. Szekeres, L. Nagy, „Antennák és hullámterjedés Jegyzet”, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Szélessávú Hírközlő Rendszerek Tanszék, pp. 52. [Online], Elérhető: https://vik.wiki/images/3/30/Antenna_konyv_teljes.pdf [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]
- [11] Dr. Heinrich Hertz, „Electric waves”, 1893., pp. 175-185. és fig. 35-36. [Online], Elérhető: https://books.google.hu/books?id=d_UAAAAMAAJ&pg=PA183&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]
- [12] K. Á. Kis, K. Sarvajcz, „Drón automatizálás ipari vagyonvédelmi és mezőgazdasági célra való felhasználáshoz”, Acta Academiae Nyiregyhaziensis 7., pp. 235-242., [Online], Elérhető: <https://www.nye.hu/acta> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]
- [13] Légter.hu Tanácsadó Korlátolt Felelősségű Társaság, DRÓN TÖRVÉNY 2021 – ÉRTHETŐEN SZAKÉRTŐKTŐL [Online], Elérhető: <https://legter.hu/blog/dron-torveny-2021-erthetoen-szakertoktol/> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]

- [14] Szegedi P., Békési B., „Az UAV-on alkalmazható szenzorok”, XIV. Természet-, Műszaki és Gazdaságtudományok Alkalmazása Nemzetközi Konferencia. Szombathely, Nyugat-magyarországi Egyetem, 2015. pp. 175–182. [Online]. Elérhető: http://publicatio.nyme.hu/613/1/TTK_14_Nemzetkozi_Konf_Eloadasok_201500516.pdf [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]
- [15] Szegedi P., Békési B., „Sensors on board of the Unmanned Aerial Vehicles, In Proceedings of 19th International Scientific Conference Transport Means”, Kaunas, 2015. pp. 219–222.
- [16] Dr. Palik Mátyás, „Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek”, Nemzeti Közszerológati Egyetem, 2013, ISBN: 978-615-5057-64-9, pp. 25-63. [Online], Elérhető: http://www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/UAV_handbook_Secon_edition.pdf [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]
- [17] Csóré Attila, Major Gábor, „A pilóta nélküli légi járművek (UAV) evolúciója”, Repüléstudományi Közlemények, 33. évf. 1. sz. 2021. pp. 171–191. DOI: 10.32560/rk.2021.1.13
- [18] „Winston Churchill és a hadügyért felelős külügyminiszter egy de Havilland Queen Bee rádióvezérelt drón kilövésére vár”, 1941. június 6-án. [Online], Elérhető: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Winston_Churchill_and_the_Secretary_of_State_for_War_waiting_to_see_the_launch_of_a_de_Havilland_Queen_Bee_radio-controlled_target_drone,_6_June_1941._H10307.jpg [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]
- [19] Ujjady A., Major G., „A civil drónszabályozáson innen, a katonain túl”, Repüléstudományi Közlemények, 33. évf. 2. sz. 167–180. 2021. DOI: 10.32560/rk.2021.2.12 [Online], Elérhető: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/5596/4738> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]
- [20] Britannica.com, John F. Guilmartin, „AQM-34 Firebee military aircraft” [Online], Elérhető: <https://www.britannica.com/technology/AQM-34-Firebee> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]
- [21] Békési B., Szegedi P., „Napjainkban fejlesztett fegyverrendszerek megjelenése a jövő hadszínterein, a tudásalkalmazás és fejlesztés szempontjából”, Repüléstudományi Közlemények 2015/3. pp. 105–116. [Online], Elérhető: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_3/2015-3-08-0223_Bekesi_B-Szegedi_P.pdf [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]
- [22] Békési B., Szegedi P., „Napjaink fegyverrendszer fejlesztési trendjei”, Economica (Szolnok), 2015. 4/2. pp. 158–168. (ISSN: 1585-6216)
- [23] Major G., „A pilóta nélküli légijármű rendszerek nemzetbiztonsági célú felhasználásával kapcsolatos kutatások”, Repüléstudományi közlemények (2015), pp. 115-120., [Online]. Elérhető: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_1/2015-1-10-0181-Major_Gabor.pdf [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]
- [24] Gajdács L., Major G., „Katonai célú drónok fejlesztése a jelenkorban, a jövőt vizionálva”, Szemelvények a katonai műszaki tudományok eredményeiből III. (2022) Budapest: Ludovika Egyetemi Kiadó, pp 101-120.
- [25] Dji, „Inspire 1 User Manual”, 2017.02., [Online], Elérhető: [https://dl.djicdn.com/downloads/inspire_1/en/INSPIRE+1+V2.0+User+Manual+\(%E5%8F%91%E5%B8%83\).pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/inspire_1/en/INSPIRE+1+V2.0+User+Manual+(%E5%8F%91%E5%B8%83).pdf) [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]

- [26] M.M. Seizgain, "Investigation of the Effects of Pollution Caused by the Emission of Electromagnetic Waves on Human Health", International Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology, vol. 9, no. 2, pp. 227-233, 2022.
- [27] Jangid P., Rai U., Sharma R.S., Singh R., „The role of non-ionizing electromagnetic radiation on female fertility: A review”. Int. J. Environ. Health. Res. 2023 Apr; 33(4):358-373. doi: 10.1080/09603123.2022.2030676. Epub 2022 Feb 8. PMID: 35132884.3.2
- [28] M. L, A. S, S. K. Menon and K. U. Menon, "Electromagnetic Radiation Exposure from Mobile Phone Under Different Operational Scenarios," 2022 URSI Regional Conference on Radio Science (USRI-RCRS), Indore, India, 2022, pp. 1-4, doi: 10.23919/URSI-RCRS56822.2022.10118449
- [29] J. -E. Shen, "Analysis of the Harm of Electromagnetic Wave Pollution and its Protection Strategies," 2020 Cross Strait Radio Science & Wireless Technology Conference (CSRSWTC), Fuzhou, China, 2020, pp. 1-2, doi: 10.1109/CSRSWTC50769.2020.9372621.
- [30] National Integrated Health Associates, „How to reduce EMF and Electrosmog Exposure”, [Online], Elérhető: <https://info.nihadc.com/integrative-health-blog/how-to-reduce-emf-and-electrosmog-exposure> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 11.]
- [31] "IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz," in IEEE Std C95.1-2019 (Revision of IEEE Std C95.1-2005/ Incorporates IEEE Std C95.1-2019/Cor 1-2019), vol., no., pp.1-312, 4 Oct. 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8859679.
- [32] Remondino, Fabio, Barazzetti, Luigi, Nex, Francesco, Scaioni, Marco, Sarazzi, D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling-Current status and future perspectives. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXXVIII-1/C22. 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011.
- [33] Boon, Marinus & Greenfield, Richard & Tesfamichael, Solomon. (2016). Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry produces accurate high-resolution orthophotos, point clouds and surface models for mapping wetlands. South African Journal of Geomatics. 5. 186. 10.4314/sajg. v5i2.7.
- [34] Lin Cheng, Zhou Ravi Radhika, Hasheminasab, Seyyed Meghdad, Flatt John, Troy Cary, Habib Ayman. (2019). Evaluation of UAV LiDAR for Mapping Coastal Environments. Remote Sensing. 11. 2893. 10.3390/rs11242893.
- [35] J. M. Montoya, A. Olsson, S. -G. Mårtensson and J. Chilo, "Drone Gas Concentration Measurement System for Landfills," 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Dubrovnik, Croatia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/I2MTC43012.2020.9129192.
- [36] D. Marchisotti and E. Zappa, "Feasibility Study of Drone-Based 3-D Measurement of Defects in Concrete Structures," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 71, pp. 1-11, 2022, Art no. 5010711, doi: 10.1109/TIM.2022.3170969.
- [37] T. Wang, S. Hao and X. Ma, "Water Velocity and Level Monitoring Based on UAV Radar," 2021 IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), Chongqing, China, 2021, pp. 1232-1236, doi: 10.1109/IMCEC51613.2021.9482041.

- [38] G. Mai et al., "LeapDetect: An Agile Platform for Inspecting Power Transmission Lines from Drones," 2019 International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW), Beijing, China, 2019, pp. 1106-1109, doi: 10.1109/ICDMW.2019.00164.
- [39] "IEEE Approved Draft Guide for Unmanned Aerial Vehicle-based Patrol Inspection System for Transmission Lines," in IEEE P2821/D6, July 2020, vol., no., pp.1-50, 25 Sept. 2020.
- [40] S. Dill, E. Schreiber, M. Engel, A. Heinzl and M. Peichl, "A drone carried multichannel Synthetic Aperture Radar for advanced buried object detection," 2019 IEEE Radar Conference (RadarConf), Boston, MA, USA, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/RADAR.2019.8835814.
- [41] O. Tunç, S. Baykut and I. Erer, "Synthetic Aperture Radar Imaging Using a Low-Cost Radar Mounted on a Mini Drone," 2023 31st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Istanbul, Turkiye, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU59756.2023.10224045.
- [42] E. Giusti, S. Ghio and M. Martorella, "Drone-based 3DInISAR: Experimental Results," 2023 IEEE Radar Conference (RadarConf23), San Antonio, TX, USA, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/RadarConf2351548.2023.10149656.
- [43] K. T. J. Klein, F. Uysal, M. C. Cuenca, M. P. G. Otten and J. J. M. de Wit, "Radar-Aided Navigation System for Small Drones in GPS-Denied Environments," 2021 IEEE Radar Conference (RadarConf21), Atlanta, GA, USA, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/RadarConf2147009.2021.9455317.
- [44] S. Park, H. T. Kim, S. Lee, H. Joo and H. Kim, "Survey on Anti-Drone Systems: Components, Designs, and Challenges," in IEEE Access, vol. 9, pp. 42635-42659, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3065926.
- [45] P. J. B. Morris and K. V. S. Hari, "Detection and Localization of Unmanned Aircraft Systems Using Millimeter-Wave Automotive Radar Sensors," in IEEE Sensors Letters, vol. 5, no. 6, pp. 1-4, June 2021, Art no. 6001304, doi: 10.1109/LSSENS.2021.3085087.
- [46] I. Lam et al., "Time-Frequency Analysis using V-band Radar for Drone Detection and Classification," 2023 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Kuala Lumpur, Malaysia, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/I2MTC53148.2023.10176027.
- [47] QuadSat – Drone based antenna measurements and calibration, [Online], Elérhető: <https://quadsat.com/> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 12.]
- [48] „Approximate Metric Equivalents for Degrees, Minutes, and Seconds”, [Online], Elérhető: https://www.usna.edu/Users/oceano/pguth/md_help/html/approx_equivalents.htm [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 05.]
- [49] „Matplotlib”, Python library, [Online], Elérhető: <https://matplotlib.org/> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 05.]
- [50] „NumPy”, Python library, [Online], Elérhető: <https://numpy.org/> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 05.]
- [51] „PyDrive”, Python library, [Online], Elérhető: <https://pypi.org/project/PyDrive/> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 05.]
- [52] matebalazs.hu, Mi az az API?”, [Online], Elérhető: <https://matebalazs.hu/api-application-programming-interface.html> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 05.]
- [53] Beyond the Cube, „Flight Plan for Dji drones” app, [Online], Elérhető: <https://apps.apple.com/us/app/flight-plan-for-dji-drones/id1076425143> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 08.]

- [54] Beyond the Cube, „Flight Plan for Dji drones Instructions”, [Online], Elérhető: <http://flightplan.beyondthecube.ca/instructions> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 05.]
- [55] Csv Flight Plan feltöltéséhez bejelentkezési felület, Beyond the Cube, [Online], Elérhető: http://flightplan.beyondthecube.ca/users/sign_in?h=true [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 08.]
- [56] Ebay.com, 35-4400M USB Spectrum Analyzer, [Online], Elérhető: 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 [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 10.]
- [57] Fruugo.hu, “RF erősítő, alacsony zajszint LNA 50-4000 MHz”, [Online], Elérhető: https://www.fruugo.hu/rf-erosito-alacsony-zajszint-lna-50-4000mhz-spf5189z-rf-erosito-a-hf-vhf-uhf-radiojel-erositeschezh/p-137068600-289240157?language=hu&ac=KelkooCSS&asc=pmax&gclid=Cj0KCQjwpompBhDZARIsAFD_Fp-luGq_7wl3T-yFqi9L_YtPA61IPFbSgFnoR-MQHFPxgbEz79jrG1QaAlAmEALw_wcB [Hozzáférés dátuma: 2023. 10. 08.]
- [58] A. Jubangaliyeva, E. Shoshi, P. E. Pinto, N. A. Bealallo, A. Masuk and I. Balajti, "Circular Loop, E-patch, Blade, and Spiral Array Antennas for Cyber-Physical System Applications," 2022 23rd International Radar Symposium (IRS), Gdansk, Poland, 2022, pp. 372-377, doi: 10.23919/IRS54158.2022.9904985.
- [59] Siemens Solid Edge, [Online], Elérhető: <https://solidedge.siemens.com/en/> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 08.]
- [60] „Creality Ender 3 V2 3D nyomtató”, [Online] Elérhető: https://store.creality.com/eu/products/ender-3-v2-neo-3d-printer?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAo7KqBhDhARIsAKhZ4ujOgoUEgNEHP77FChbPKMWd26kt0Qil-vusvGxxtqUBAUMOeqJVgwgaArUBEALw_wcB [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 08.]
- [61] RealVNC [Online], Elérhető: <https://www.realvnc.com/en/connect/download/viewer/> [Hozzáférés dátuma: 2023. 10. 08.]
- [62] WinNWT4, [Online], Elérhető: <https://www.dl4jal.de/> [Hozzáférés dátuma: 2023. 11. 08.]