

Huszár Péter

## UAV ÉS FÖLDI SZEGMENSE KÖZÖTTI KOMMUNIKÁCIÓ HATÉKONYSÁGÁNAK JAVÍTÁSA

DOI: 10.32560/rk.2019.1.14

*Mikrohullámú rádió-frekvenciás kommunikációs csatorna hatótávolságának és minőségének növelése érdekében gyakran használnak nagy nyereségű, irányított antennákat. Minél erősebben irányított az antenna karakterisztikája annál kisebb térrészre fókuszálja az elektromágneses energiát és annál kritikusabbá válik az adó, illetve a vevő oldali antennák közötti folyamatos optikai rálátás biztosítása. Hasonlóképpen használható ez a megközelítés a pilóta nélküli repülő és azok földi szegmense között kialakított pont-pont mikrohullámú kapcsolatok esetében is. Azonban a pilóta nélküli repülő folyamatos mozgásban van, mely esetenként nagy sebességgel párosulhat. Így felmerül az igény a földi állomás antennájának folyamatos mozgatására, oly módon, hogy az UAV folyamatosan annak fő nyalábjában helyezkedjen el. A publikációmban egy általam fejlesztett globális helymeghatározáson alapuló, automatikus UAV követő antennamozgató platform működési elvét mutatom be.*

**Kulcsszavak:** UAV, automatikus követő antenna, földi állomás

### BEVEZETÉS

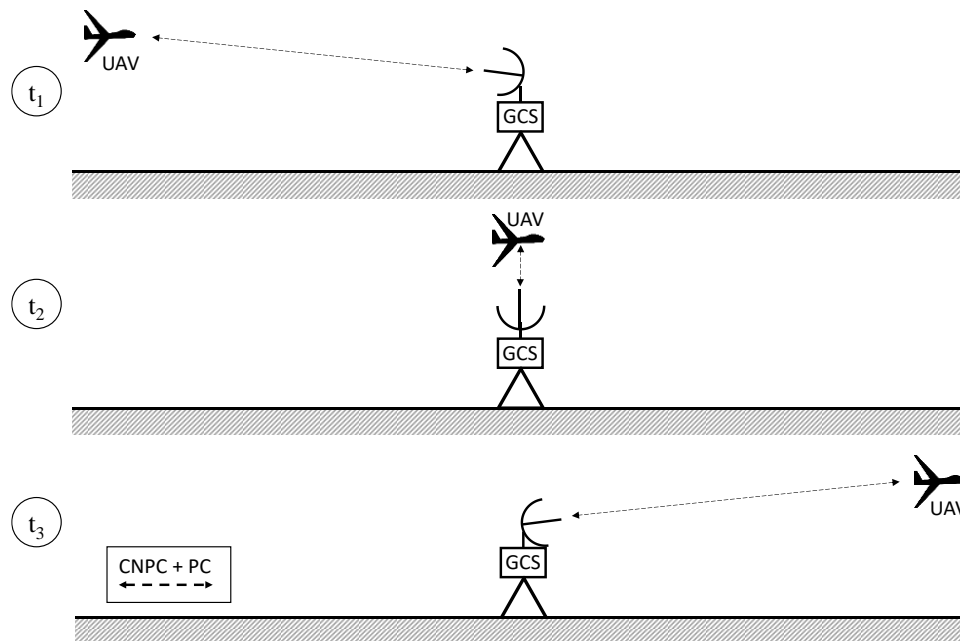
A manapság egyre szélesebb körben elterjedő UAV-k<sup>1</sup> illetve drónok és azok földi szegmense közti kommunikáció jellemzően valamilyen vezeték nélküli, rádiófrekvenciás kapcsolat. E kommunikációs csatornáknak a vivő frekvenciájuk a pár tíz megahertzről egészen több tíz gigahertzig terjed. Egy UAV esetén a kommunikációra szánt pontos vivőfrekvencia kiválasztását számos tényező befolyásolja ám általánosságban elmondható, hogy rövid, illetve mikrohullámú adatátviteli csatornákról beszélhetünk. A frekvencia növelésével, nő a hasznosítható sávszélesség így egyre nagyobb adatmennyiség átvitelére adódik lehetőség, amely alapszükséglet például a nagyfelbontású képek és videók valós idejű közvetítése során. A magasabb frekvencián működő eszközök jellemzően fizikailag is kisebbek és könnyebbek lehetnek, valamint kisebb adóteljesítménnyel képesek megadott hatótávolságot elérni. Hátrányuk viszont, hogy minél magasabb a frekvencia a rádióhullámok annál inkább a fényhez hasonlóan kezdenek el terjedni, így egyre fontosabb az adó és vevő antennák közti optikai rálátás követelménye. A felhasznált antennák nyalábszélességének csökkentésével, azaz irányított antennák használatával az elérhető hatótávolság tovább növelhető azonos adóteljesítmény mellett viszont ennek hatására az antennákkal való precíz célzás egyre kritikusabbá válik. E probléma egy lehetséges megoldását mutatom be e tanulmány során.

---

<sup>1</sup> UAV – Unmanned Aerial Vehicle – pilóta nélküli repülő.

## KÖVETŐ ANTENNA MŰKÖDÉSI ALAPELVE

Egy UAV földi állomás (továbbiakban GCS<sup>2</sup>) antennájának folyamatos UAV-ra irányítása alapvetően két különböző módon történhet. Az egyik lehetőség, hogy az UAV-t és az azon elhelyezett rádió-adót, annak vételi jelerőssége, azaz RSSI<sup>3</sup> alapján követjük. Ez esetben általában több, különböző irányban álló antenna használatára van szükség a földi állomás oldalán. Az általuk vett jelek erősségét összehasonlítva meghatározható az UAV pozíciója az égbolton, melyből megállapítható hogy a fő antennát, melyen keresztül az UAV irányítása (továbbiakban CNPC<sup>4</sup>) és a hasznos teherrel való kommunikáció (továbbiakban PC<sup>5</sup>) zajlik, pontosan hova kell fordítani. Ez a megoldás fizikailag nagyobb és mechanikailag bonyolultabb földi állomást eredményezhet. A másik lehetőség, hogy az UAV követő antennamozgató a saját és az UAV GPS<sup>6</sup> koordinátái alapján végzi el az antenna irányítását. Ez egy kézen fekvő lehetőség, hiszen az UAV fedélzetén minden bizonnyal található valamilyen globális helymeghatározásra alkalmas eszköz és a koordinátái bizonyos időközönként elküldésre kerülnek a földi állomás számára. E koordináták segítségével meghatározhatóak a földi szegmens nagy nyereségű antennájának pontos mozgatásához szükséges információk. A továbbiakban bemutatok egy általam implementált GPS alapú, automatikus UAV követő antennamozgató rendszert, a működés szempontjából fontosabb algoritmusokat, szabványos GPS üzeneteket és azok feldolgozásának módját.



1. ábra Az UAV követő automatikus antennamozgató működésének illusztrációja. A földi állomás (GCS) nagy nyereségű, irányított antennájának fő nyalábját folyamatosan az elhaladó UAV-n tartja. [Készítette a szerző]

<sup>2</sup> GCS – Ground Control Station – földi irányító állomás

<sup>3</sup> RSSI – Received Signal Strength Indicator – vételi jelerősség indikátor

<sup>4</sup> CNPC – Control and Non Payload Communication. Az UAV irányítására használt kommunikációs csatorna.

<sup>5</sup> PC – Payload Communication. A hasznos teher kommunikációs csatornája.

<sup>6</sup> GPS – Global Positioning System – Globális helymeghatározó rendszer.

## GPS ÜZENETEK ÉRTELMEZÉSE ÉS FELDOLGOZÁSA

A GPS vevők általában több különböző szabványnak megfelelő üzenetet képesek küldeni, de a legelterjedtebb az NMEA0183 szabványnak megfelelő kommunikációs protokoll. Az üzenetek értelmezéséhez feltétlenül ismerni kell az említett szabványt és a kommunikációra vonatkozó előírásokat. Az NMEA0183 egy az NMEA<sup>7</sup> által készített szabvány mellyel egységesítette a kommunikációt különböző tengerészetben, repülésben és navigációban használt eszközök között, mint például robotpilóták, GPS vevők, szonárok stb., így lehetővé teszi használói számára az egymással és külső számítógépekkel való információ átvitelt egyaránt. Előír hardveres és kommunikációs protokollra jellemző megkötéseket, definiálja az egyes üzenetek felépítését. A kommunikáció mondatokra épül melyek egymástól függetlenül is értelmezhetőek. Különböző eszközök használhatnak megegyező típusú mondatokat, de lehetőség van saját mondat típusok definiálására is. Az összes alapértelmezett mondat egy „\$” karaktert követő kétbetűs előtaggal kezdődik. Ez meghatározza a küldő eszközt. GPS vevők esetében „\$GP”, GLONASS vevők esetében pedig „\$GL”. Ezt követi három betű, mely az üzenet tartalmának típusát definiálja. Az összes mondat kocsni vissza és soremelés (CR\LF) karakterekkel fejeződik be és nem lehet hosszabb 80 bájtnál. Az egy mondatban szereplő, különböző adatmezők vesszővel vannak elválasztva és sorrendjük mindig azonos. Minden mondat utolsó adatmezője egy checksum<sup>8</sup> mely segítségével az üzenetet vevő fél ellenőrizheti annak helyességét. A checksum egy csillag karaktert követő két bájtos hexadecimális érték, ami az üzenet bájtankénti kizáró-vagy kapcsolatba állításával képezhető a kezdő dollárjel figyelmen kívül hagyásával.

①	\$GPRMC,133227,A,5302.122951,N,00848.874978,E,3.0,27.2,270316,0.4,W,D*3A
②	\$GPGGA,133227,5302.122951,N,00848.874978,E,2,10,0.8,-3.0,M,46.0,M,,*63
③	\$GPGSV,4,1,13,10,19,312,23,12,23,219,23,13,34,151,36,15,61,206,29*76 \$GPGSV,4,2,13,17,37,088,31,18,24,277,26,19,29,126,26,20,05,217,13*77 \$GPGSV,4,3,13,24,57,279,22,28,28,053,29,01,03,032,,04,00,000,*7E \$GPGSV,4,4,13,11,02,019,*41
④	\$GLGSV,3,1,10,74,72,326,20,73,37,063,29,82,16,015,16,75,26,267,24*66 \$GLGSV,3,2,10,65,41,305,23,84,12,127,16,83,32,073,23,71,06,189,15*63 \$GLGSV,3,3,10,72,42,229,27,66,03,345,*6A
⑤	\$GPGSA,A,3,10,12,13,15,17,18,19,20,24,28,,1.1,0.7,0.8*30
⑥	\$GPVTG,27.3,T,27.3,M,2.8,N,5.2,K,D*2B
	\$GPRMC,133228,A,5302.123694,N,00848.875671,E,2.8,27.3,270316,0.4,W,D*3D
	\$GPGGA,133228,5302.123694,N,00848.875671,E,2,10,0.7,-4.0,M,46.0,M,,*64

2. ábra NMEA 0183 üzenetsor részlet (Készítette a szerző)

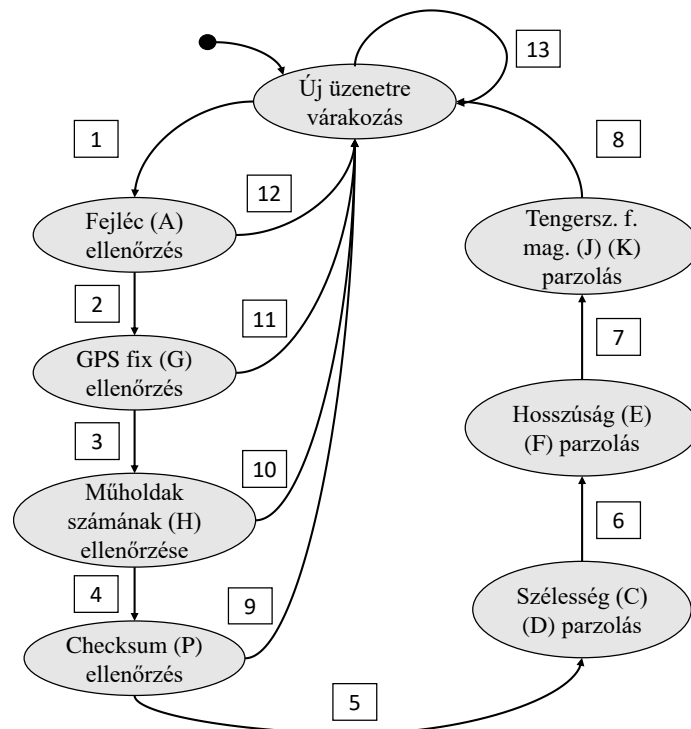
Egy a tesztek során is felhasznált log fájlból kiragadott részletet szemléltet a 2. ábra, mely megfelel az NMEA 0183 által előírt mondatok felépítésének. Megfigyelhetőek a legfontosabb, GPS vevők által használt mondat típusok. Az RMC (1) fejlécű mondat a használt globális helymeghatározó rendszer segítségével meghatározott minimális adatokat tartalmazza. Például a hosszúságot, szélességet, időt és egyéb minőségi jellemzőket. A GGA (2) a jelen alkalmazás szempontjából a legfontosabb üzenet. A mondat típus részletes felépítését és tartalmát a 3. ábra szemlélteti. Tartalmaz minden információt, melyek alapján a földi antennamozgató szegmens el

<sup>7</sup> NMEA: The National Marine Electronics Association

<sup>8</sup> checksum: Ellenőrző összeg, segítségével ellenőrizhető az adatátvitel hibamentessége.



a koordinátáit a GPS vevő, vagy sem. Amennyiben a mező értéke nulla, akkor túl kevés a „lát-ható” műholdak száma tehát az üzenet helymeghatározásra használhatatlan, azzal további műveletet nem végez. Ha e mező értéke egy esetleg kettő, akkor a helymeghatározás minimum három-négy műhold alapján történt tehát annak minősége megfelelő lehet és az adatok vizsgálata folytatódhat. A következő minőségi jellemző a látható műholdak pontos száma (H), melyet vizsgál az algoritmus. A cél, hogy kiküszöbölje az ötnél kevesebb műhold alapján történő helymeghatározást és így biztosítsa a pontos, háromdimenziós helymeghatározással történt koordinátákkal való további műveletvégzést. Végül vizsgálja az üzenet utolsó mezőjét a checksumot (P) Ehhez egy függvény a vett üzenet végén található hexadecimális számot összehasonlítja az adott mondat tartalma alapján generált, saját ellenőrző összeggel. Egyezés esetén az üzenet helyesen ért célba. Ha ezek különböznek, akkor az adatok nem kerülnek felhasználásra. Ha a beérkezett mondat a fenti kritériumok mindegyikének megfelel, akkor jó eséllyel használható adatokkal dolgozhat tovább a szoftver. Egy következő függvény megkeresi a szélességet (C). Ezután a (D) adatmező alapján eldönti a visszatérési érték előjelét. Észak esetén pozitív, dél esetén pedig negatív előjelet kap a szélesség. Végül visszatér a szélességgel fokban, tizedes jegyekkel és a megfelelő előjellel. Ezután megkeresi az (E) adatmezőt, ami a hosszúságot tartalmazza. Azt hasonlóan átalakítja. Előjelét az (F) adatmező határozza meg. kelet esetén pozitív, nyugat esetén pedig negatív előjellel látja el. Végül visszatér a hosszúsággal. Az üzenet (J) adatmezője a tengerszint feletti magasságot, a (K) pedig annak mértékegységét tartalmazza mely meghatározása feltétlenül szükséges a célkövetési algoritmus megfelelő működéséhez. A referenciapont és a követendő cél tengerszint feletti magassága segítségével lehet meghatározni az antenna irányításához szükséges inklinációs szöveget. A fenti lépések elvégzése után kiküszöbölésre kerültek a hibás adatok és rendelkezésre állnak a további műveletek elvégzéséhez szükséges koordináták a hosszúság ( $\lambda$ ), szélesség ( $\varphi$ ) és magasság (h). Az algoritmus állapot átmenet diagramját a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra A GPS üzeneteket feldolgozó algoritmus állapot átmenet ábrája (Készítette a szerző)

ÉI	Állapot váltás feltétele
1	Új üzenet érkezett.
2	Az üzenet fejléce \$GPGGA.
3	A GPS fix (G) mező értéke nagyobb, mint nulla.
4	Helymeghatározáshoz használt műholdak száma (H) legalább öt.
5	A checksum értéke megfelelő. A beérkezett üzenet az összes kritériumnak megfelelt.
6	A szélesség parzolása megtörtént.
7	A hosszúság parzolása megtörtént.
8	A tengerszint feletti magasság parzolása megtörtént.
9	Az üzenet checksumja (P) és a generált checksum nem egyezik meg. Az üzenet hibás.
10	A helymeghatározáshoz használt műholdak száma (H) nem éri el az ötöt.
11	A GPS fix (G) mező értéke nulla. Nem sikerült a helymeghatározás.
12	Az üzenet fejléce nem \$GPGGA.
13	Nem érkezett új üzenet.

2. táblázat A GPS üzeneteket feldolgozó algoritmus állapot váltáshoz szükséges feltételei (Készítette a szerző)

## A GPS KOORDINÁTÁK FELDOLGOZÁSA

A beérkező GPS koordináták alapján közvetlenül nem számíthatók ki az antenna emeléséhez és elfordításához szükséges szögek. Az adott pozíciókat leíró hosszúságot, szélességet és tengerszint feletti magasságot egy lokális derékszögű koordinátarendszerbe kell transzformálni. Egy olyan érintősíkra, mely origójában az antennamozgató platform helyezkedik el és a későbbi számítások valamint vizsgálatok során sokkal szemléletesebb és praktikusabb. Léptéke jobban illeszkedik a mikro és mini UAV-khoz, mint egy Föld méretű, gömbi koordinátarendszeré. Ahhoz, hogy ezt a koordináta transzformációt el tudjuk végezni, be kell vezetni egy köztes koordinátarendszert. Így a feladat megoldásához a következő három koordináta rendszert kell ismerni és használni:

- WGS 84<sup>11</sup> geodéziai koordinátarendszer;
- ECEF<sup>12</sup> koordinátarendszer;
- ENU<sup>13</sup> koordinátarendszer.

A GPS koordinátákat első lépésként át kell transzformálni ECEF koordinátarendszerbe. Ezután tovább kell transzformálni egy az antenna GPS koordinátái által meghatározott origójú lokális ENU koordinátarendszerbe. Az ENU koordináták könnyebben kezelhetőek és értelmezésük egyszerűbb. A WGS 84 referencia ellipszoid egy egyezményes földi vonatkoztatási rendszer, ami definiálja a Föld normál alakját és normál erőterét. Az alkalmazás szempontjából fontos állandói a következők:

- egyenlítői sugár ( $R_{EA}$ );
- lapultság ( $f$ );
- poláris sugár ( $R_{EB}$ );
- első numerikus excentricitás ( $e$ ).

$$R_{EA} = 6378137 \text{ m} \quad (1) [3]$$

<sup>11</sup> WGS84 – World Geodetic System 84, GPS alapú helymeghatározás során használt referencia ellipszoid

<sup>12</sup> ECEF – Earth Centered Earth Fixed – Föld középpontú Földhöz rögzített koordinátarendszer

<sup>13</sup> ENU – East North Up – Kelet Észak Fel koordinátarendszer

$$f = \frac{1}{298.257223563} \quad (2) [3]$$

$$R_{EB} = R_{EA}(1 - f) = 6356752 \text{ m} \quad (3) [3]$$

$$e = \frac{\sqrt{R_{EA}^2 - R_{EB}^2}}{R_{EA}} = 0,08181919 \quad (4) [3]$$

A WGS84 geodéziai koordináta rendszerben egy pontot hosszúsági ( $\lambda$ ) és szélességi ( $\varphi$ ) fokokkal, illetve annak a tengerszint feletti magasságával ( $h$ ) tudunk egyértelműen meghatározni. A hosszúság a kezdő hosszúsági körtől, Greenwich-től mért forgásszög mely  $+180^\circ$  és  $-180^\circ$  tartományban változhat. A szélesség az egyenlítőtől mért szögelfordulás, ez  $+90^\circ$  (Északi-sark) és  $-90^\circ$  (Déli-sark) tartományon belül változhat. A magasság a helyi, függőlegesen mért távolság a referencia ellipszoidtól.

$$Pg = \begin{bmatrix} \lambda \\ \varphi \\ h \end{bmatrix} \quad (5) [3]$$

Az ECEF koordinátarendszer egy háromdimenziós derékszögű koordinátarendszer mely a Földdel együtt forog, annak forgási tengelye körül. Az origója a Föld középpontjában van elhelyezve. Z tengelye a Föld forgástengelye és az Északi-sark irányába mutat. Az X tengelye a Föld felszínét a kezdő hosszúsági kör és az Egyenlítő találkozásában metszi. Y tengelye pedig a jobbsodrás szabályának megfelelően lett kijelölve az előző tengelyek alapján. [1] Benne egy adott „P” pont helyvektorát az alábbi módon írhatjuk fel:

$$P_{ECEF} = \begin{bmatrix} X_{ECEF} \\ Y_{ECEF} \\ Z_{ECEF} \end{bmatrix} \quad (6) [3]$$

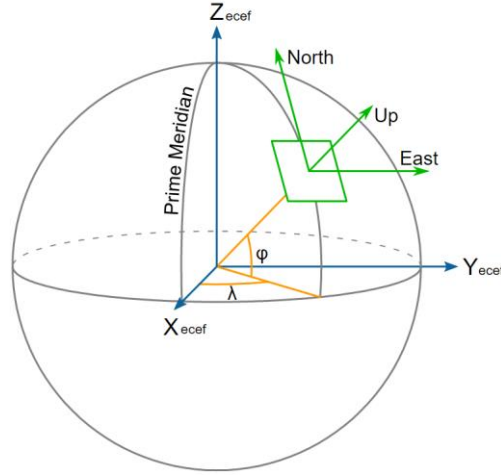
Az ENU koordinátarendszer egy helyi érintősíkon felvett háromdimenziós, jobbsodrású Cartesi koordinátarendszer. Tengelyei az észak, kelet illetve fel irányokba mutatnak. Az origóját pedig a célkövető antenna GPS koordinátái adják majd meg. Ez a fajta koordinátarendszer széles körben használt légi és földi navigációs célokra egyaránt, valamint egyéb földrajzi pozíció meghatározásokra is. Nagyon fontos koordinátarendszer kisméretű UAV-k navigációja során. Benne egy adott helyvektor a következőképpen adható meg: [3]

$$P_{ENU} = \begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix} \quad (7) [3]$$

A kapcsolatot a három használt koordinátarendszer között az 5. ábra szemlélteti. Narancssárgával a GPS által használt szélességi és hosszúsági szögek. Kékkel az ECEF koordinátarendszer tengelyei vannak feltüntetve. Zölddel egy adott lokális érintősík és az ahhoz tartozó tengelyek láthatóak. A koordináták transzformációja csak egyirányú. A sorrend mindig WGS84, ECEF, ENU. Visszatranszformálásra nincs szükség.

A GPS koordináták által meghatározott helyvektor transzformálása az ECEF koordinátarendszerbe az első koordináta transzformáció melyet el kell végezni. Ezt a következő összefüggések alapján tehetjük meg, ha adott egy „P” pont a geodéziai koordinátarendszerben. A számítások

elvégezése után előállnak az  $X_{ECEF}$ ,  $Y_{ECEF}$ ,  $Z_{ECEF}$  koordináták melyekkel folytatni lehet a számításokat.



5. ábra A három használt koordináta-rendszer és egymáshoz képesti viszonyuk [4]

$$P_{ECEF} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N_E + h) \cos\varphi \cos\lambda \\ (N_E + h) \cos\varphi \sin\lambda \\ [N_E(1 - e^2) + h] \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (8) [3]$$

Az ECEF koordináták ENU koordináta-rendszerbe való transzformálásakor szükségünk van az előzőekben leírt transzformációs lépésekre és a geodéziai koordinátákra is mivel itt a két transzformációt együtt kell elvégezni az alábbi módon:

$$P_{ENU} = R_{ENU/ECEF} (P_{ECEF,P} - P_{ECEF,REF}) \quad (9) [5]$$

Ahol  $P_{ECEF, REF}$  a lokális ENU koordináta-rendszer origójának ECEF koordinátái a földi állomás és az antenna pozíciója, mely az ENU koordináta-rendszer origója ként szolgál a továbbiakban. A  $P_{ECEF}$  az irányított antenna által követendő cél, azaz az UAV koordinátái. Az  $R_{ENU/ECEF}$  egy forgatási mátrix ahol a  $\varphi_{REF}$  a lokális ENU koordináta-rendszer szélessége,  $\lambda_{REF}$  pedig a hosszúsága. Ezzel megszorozva az előző két mátrix különbségét megkapjuk a lokális ENU koordináta-rendszerben értendő ENU koordinátákat.

$$P_{ENU} = \begin{bmatrix} E \\ N \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\lambda_{REF} & \cos\lambda_{REF} & 0 \\ -\sin\varphi_{REF}\cos\lambda_{REF} & -\sin\varphi_{REF}\sin\lambda_{REF} & \cos\varphi_{REF} \\ \cos\varphi_{REF}\cos\lambda_{REF} & \cos\varphi_{REF}\sin\lambda_{REF} & \sin\varphi_{REF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{ECEF,P} - X_{ECEF,REF} \\ Y_{ECEF,P} - Y_{ECEF,REF} \\ Z_{ECEF,P} - Z_{ECEF,REF} \end{bmatrix} \quad (10) [5]$$

$$P_E = -(X_{ECEF,P} - X_{REF})\sin\lambda_{REF} + (Y_{ECEF,P} - Y_{REF})\cos\lambda_{REF} \quad (11)$$

$$P_N = -(X_{ECEF,P} - X_{REF})\sin\varphi_{REF}\cos\lambda_{REF} - (Y_{ECEF,P} - Y_{REF})\sin\varphi_{REF}\sin\lambda_{REF} + (Z_{ECEF,P} - Z_{REF})\cos\varphi_{REF} \quad (12)$$

$$P_U = (X_{ECEF,P} - X_{REF})\cos\varphi_{REF}\cos\lambda_{REF} + (Y_{ECEF,P} - Y_{REF})\cos\varphi_{REF}\sin\lambda_{REF} + (Z_{ECEF,P} - Z_{REF})\sin\varphi_{REF} \quad (13)$$

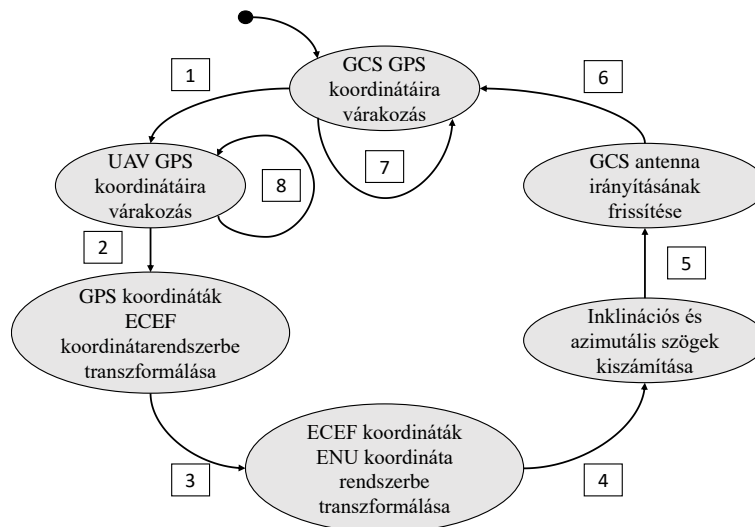
$$r = \sqrt{P_E^2 + P_N^2 + P_U^2} \quad (14)$$

$$\text{azimut} = \arctan\left(\frac{P_E}{P_N}\right) \quad (15)$$

$$\text{inklináció} = \arccos\left(\frac{P_U}{r}\right) \quad (16)$$

## AZ UAV KÖVETÉST MEGVALÓSÍTÓ ALGORITMUS BEMUTATÁSA ÉS TESZTELÉSE

Az elvégzett transzformációk után (11, 12, 13. egyenlet) a további számítások szögfüggvények segítségével már a derékszögű, háromdimenziós ENU koordináta-rendszerben elvégezhető (14, 15, 16. egyenlet). Az algoritmus kiszámítja az azimutális, azaz vízszintes síkban értendő, északról való elfordulást és inklinációs szögeket, valamint a követendő cél távolságát az origótól, vagyis a GCS-től. Az azimutális szöget három bemeneti paramétert alapján számolja. Ezek az E és N koordináták és egy ofszet. Az E és N koordináták tangensének inverze megadja az északról való elfordulást. Az ofszet az antennamozgató platform telepített helyzetének északról való eltéréseinek korrekciójára ad lehetőséget. A kiszámított szöget tovább kell vizsgálni, hogy az melyik térnegyedben értendő és annak megfelelően korrigálni, majd az ofszet hozzáadása után még egyszer meg kell vizsgálni az értéket. Ezzel biztosítva, hogy a visszatérési érték a használt aktuátorok (jelen esetben szervó motorok) működési tartományába esik. Jelenleg ez  $180^\circ$  mindkét szervó esetében. A következő meghatározandó szög, az antenna szükséges emelését adja meg a lokális koordináta-rendszer érintő síkjához (E-N sík) képest. Az E, N és U koordináták alapján az algoritmus kiszámítja a GCS és az UAV közti távolságot majd ebből és a tengerszint feletti magasságból meghatározza az inklinációs szöget és visszatér annak értékével. Utolsó lépésként e két szög kiküldésre kerül a szervó motorok számára, így azok az antennát a kívánt irányba állítják.



6. ábra A koordináta transzformációkat megvalósító algoritmus állapot átmenet ábrája [Készítette a szerző]

Él	Állapot váltás feltétele
1	A GCS GPS koordinátái referencia pontként elmentve.
2	Új beérkező UAV GPS koordináták.
3	A GPS koordináták transzformálása ECEF koordináta-rendszerbe megtörtént.
4	Az UAV koordinátái transzformálva a GCS origójú ENU koordináta-rendszerbe.
5	Az antenna irányításához szükséges inklinációs és azimutális szögek kiszámítása megtörtént.
6	Az antennát mozgató szervó motorok beállítsa frissült.
7	Nincs érvényes GCS GPS koordináta elmentve.
8	Nincs bejövő UAV GPS koordináta.

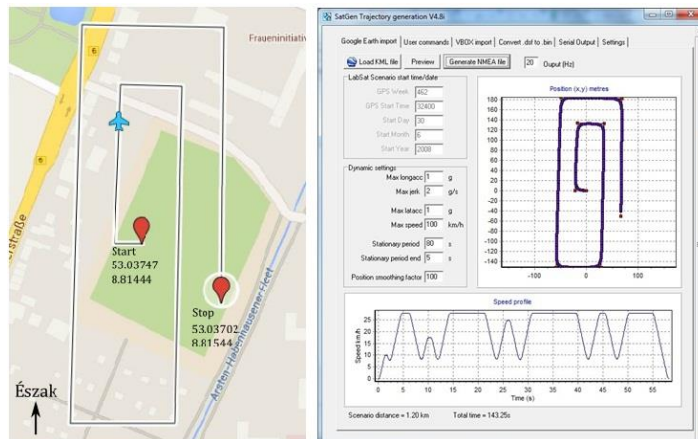
3. táblázat A koordináta transzformációkat megvalósító algoritmus állapot váltáshoz szükséges feltételei

[Készítette a szerző]

Az implementált algoritmust több különböző tesztnek vettem alá. Az első tesztfázisban ideális körülményeket alakítottam ki. GPS-t felhasználó alkalmazások tesztelése valódi GPS vevőkkel, valóságos környezeti körülmények között megismételhetetlen lenne. Az eredmények összehasonlíthatósága és azok alapján történő továbbfejlesztés érdekében a teszteléshez olyan idealizált bemeneti adatokat állítottam elő, amelyekkel a vizsgálatok megismételhetőek és kiszámíthatóak. Az első fázisában referenciaként Google Maps-en kijelölt útvonalak alapján generált, NMEA0183 szabványnak megfelelő GPS logokat használtam. Ezeket a SatGen Trajectory Generator szoftverrel<sup>14</sup> készítettem. A második tesztfázisban, miután megbizonyosodtam a helyes működésről, valódi GPS vevő által, valódi körülmények közt rögzített adatokkal végeztem tesztek.

### Teszt ideális körülmények között

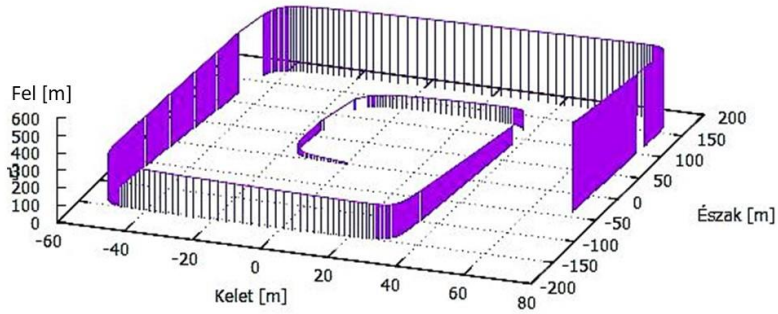
Az első tesztútvonalt során az UAV a 7. ábra közepén látható start pontból indul nyugat felé. Ez a start pont kerül rögzítésre referenciapontként, mint a földi állomás GPS koordinátái és ezek azok a koordináták melyek a későbbiekben az ENU koordinátarendszer origójaként fognak szolgálni. Ezután körülbelül 20 méter megtétele után észak felé veszi az irányt és 140 métert halad kissé észak-keletre, majd megint kelet felé fordul. Így halad tovább az óramutató járásával megegyezően spirálisan az antenna platform körül. Az utolsó koordináta a Stop feliratú pont. Az egyes pontok tengerszint feletti magasságai a kiindulási ponttól folyamatosan növekszik.



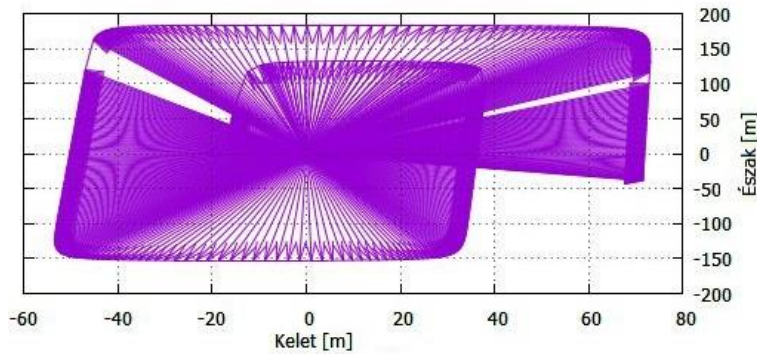
7. ábra Tesztútvonalt kijelölése és szabványos GPS log generálása [Készítette a szerző]

A generált adatokba több helyen szándékosan helyeztem el csoportosan jelentkező hibákat. Megváltoztattam egyes mondatok checksumját és adatmezőket töröltem ki, hogy az algoritmus hibafelismerő képességét is vizsgálni tudjam. A teszt eredményeit a 8. ábra szemlélteti. A 8. ábra alapján látszik, hogy a GPS adatokból a szükséges információkat a szoftver helyesen képes kinyerni. Mind a paroló, mind pedig az ellenőrző függvények megfelelően működnek. Az elhelyezett hibák hatása jól látható. A helyvektorok egyes helyeken hirtelen eltűnnek, majd újra megjelennek. Ebből látszik, hogy a hibás mondatok nem kerültek feldolgozásra. A referenciapont felvétele sikeresen megtörtént, az ENU koordinátarendszer origójában található. Az elvégzett koordináta transzformációk is megfelelően történtek meg mivel a leírt pálya megegyezik a felvett-tel.

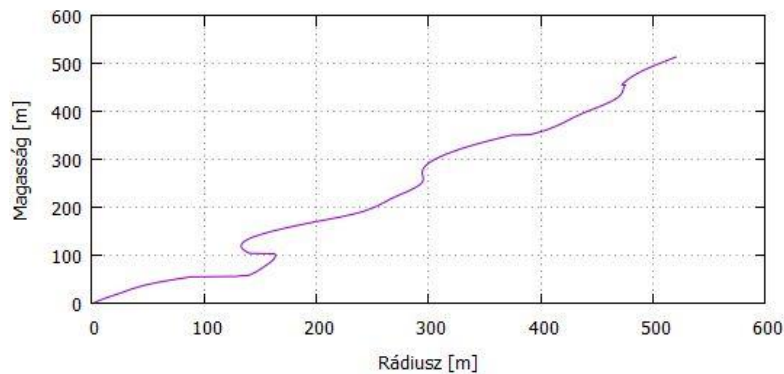
<sup>14</sup> <http://www.labsat.co.uk/index.php/en/products/satgen-simulator-software>



8. ábra Teszt generált bementi adatokkal, az UAV pályája ENU koordinátarendszerben [Készítette a szerző]

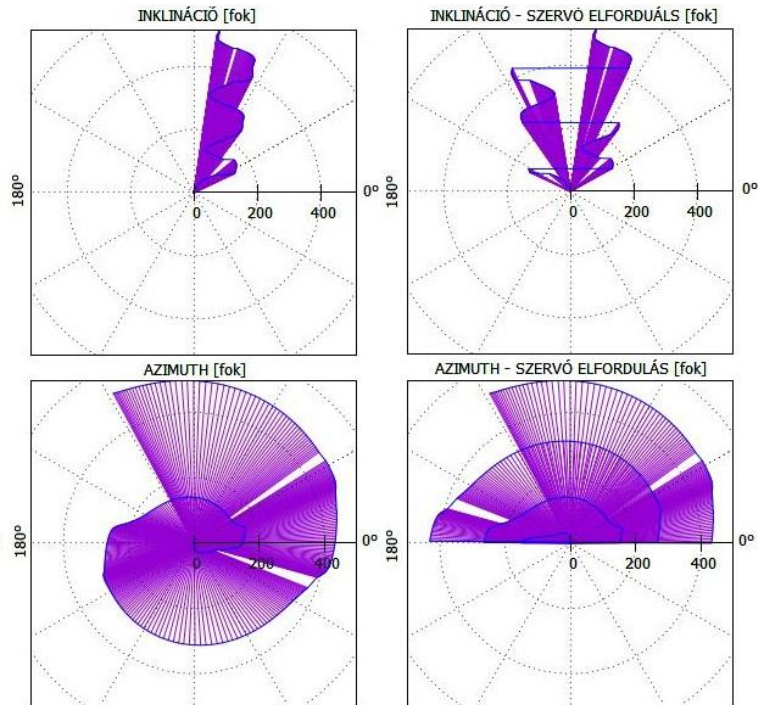


9. ábra Az antenna irányítását reprezentáló vektorok (ENU koordinátarendszer, azimutális sík). [készítette a szerző]



10. ábra Az UAV pillanatnyi tengerszint feletti magassága és a földi szegmenstől mért távolsága. Ez adja meg az inklinációs szervó adott időpillanathoz tartozó beállítási szögét. [Készítette a szerző]

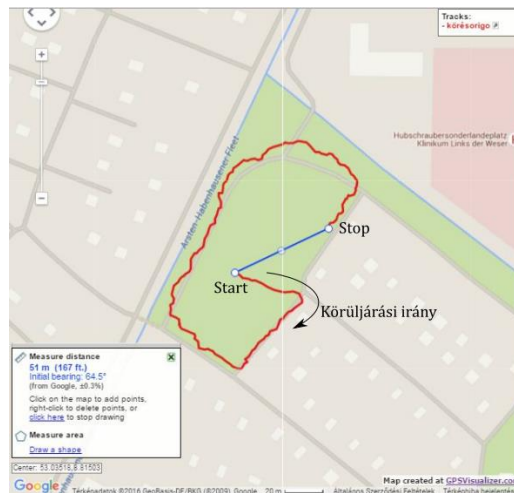
A következő poláris koordinátarendszerek (11. ábra) a kiküldött szervó elfordulásokat szemléltetik. A bal felső „inklináció” poláris diagram az antenna emelését vagy éppen süllyesztését szemlélteti egy olyan ideális esetben, amikor az azimutális síkban mozgó szervómotor végtelemszer képes körbefordulni (11. ábra bal alsó poláris diagram). A jobb oldali ábrák viszont egy valóságos, 180°-os működési tartományú szervó esetét mutatják. Látható, hogy a pálya leírása során az azimutális szervó, amint eléri működési tartományának szélső értékét, az átfordul az inklinációs szervóval együtt és onnantól a pályát középpontosan tükrözve követi (11. ábra jobb felső és jobb alsó poláris diagramjai).



11. ábra Teszt eredmények poláris koordinátarendszerben – Generált bementi adatok [Készítette a szerző]

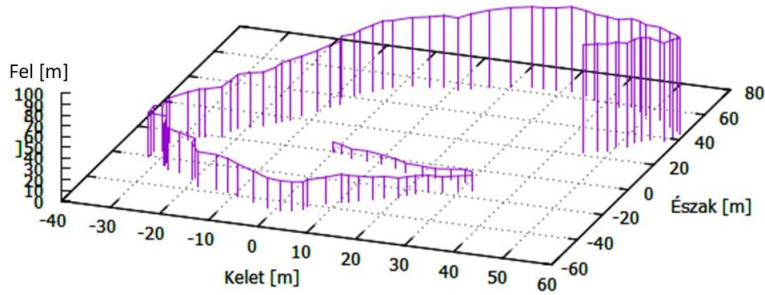
### Teszt valós körülmények között

A második tesztfázisban a GPS logokat a használt vevővel rögzítettem a „Start” pontból kiindulva a „Stop” pontig. Látható, hogy az útvonal már nem olyan szép, éles és határozott, mint az előbbieken. Ezekkel az adatokkal szintén teszteltem az antennamozgató algoritmust.

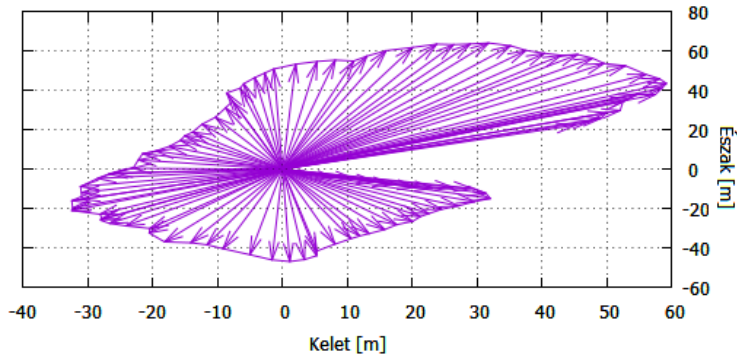


12. ábra A teszt során használt valóságos GPS log [Készítette a szerző]

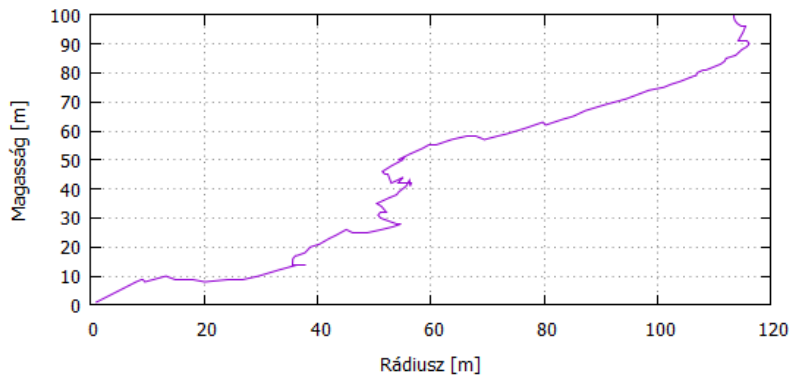
Valóságos adatokkal is a vártaknak megfelelő a működés. Ugyanúgy sikerült a szükséges adatok parzolása, ellenőrzése és a koordináták transzformálása is. Némileg ritkábban küld adatokat a valódi GPS vevő, mint a generálás során előállított tesztadatokat, ez a helyvektorok ritkulásán is látható.



13. ábra Teszt valós bementi adatokkal, az UAV pályája ENU koordinátarendszerben [Készítette a szerző]

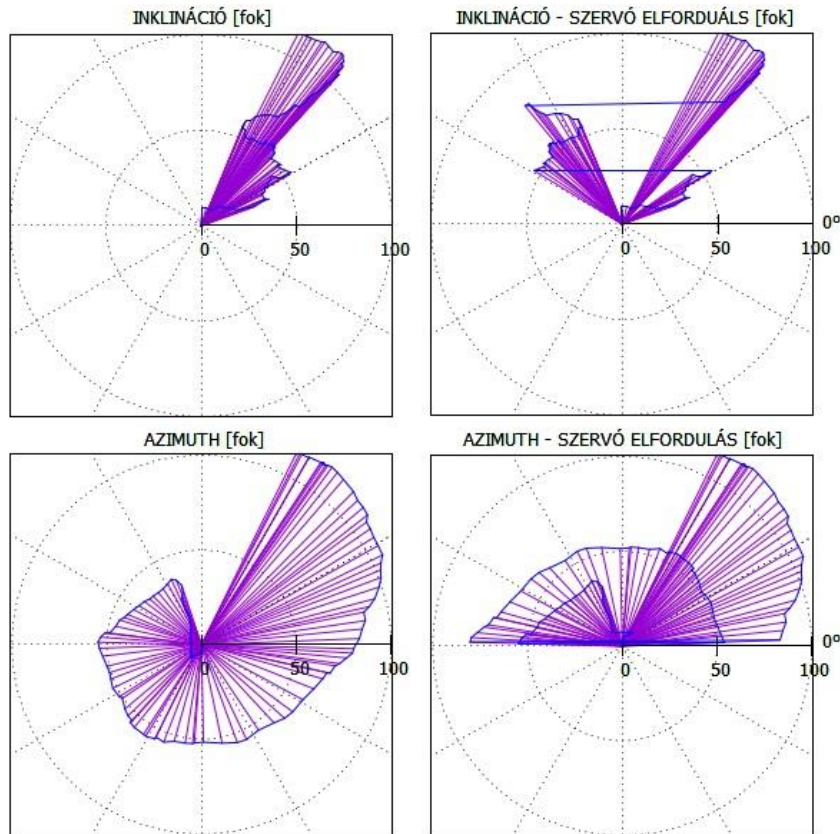


14. ábra Az antenna irányítását reprezentáló vektorok (ENU koordinátarendszer, azimutális sík). [Készítette a szerző]



15. ábra A követendő cél pillanatnyi tengerszint feletti magassága és földi szegmenstől vett távolsága. Ez adja meg az inklinációs szervó adott időpillanathoz tartozó beállítási szögét. [Készítette a szerző]

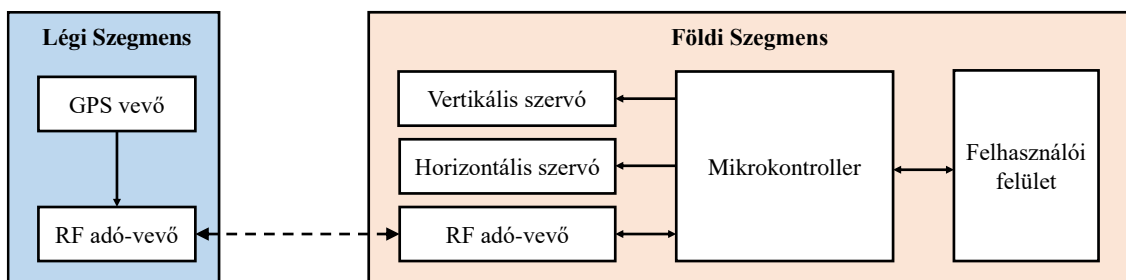
A 16. ábra szemlélteti az inklinációs és azimutális szervók elfordulását az előzőekben részletesen bemutatott 11. ábra hasonló módon. Látható, hogy valódi körülmények között rögzített bemeneti adatokkal is ugyanúgy működik az automatikus antennamozgató.



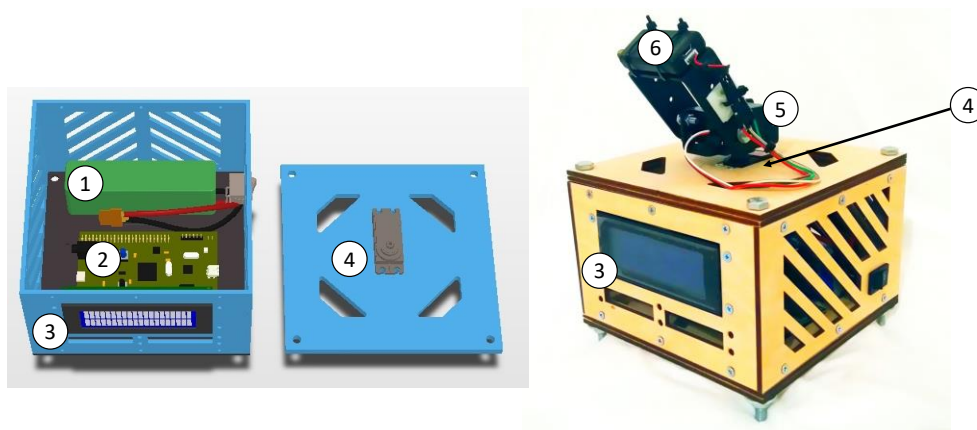
16. ábra Teszteredmények ábrázolása poláris koordinárendszerben – Valós körülmények között rögzített bemeneti adatok esetén [Készítette a szerző]

## AZ UAV KÖVETŐ ANTENNA PLATFORM HARDVERÉNEK MEGVALÓSÍTÁSA

Az UAV követést megvalósító automatikus antennamozgató felépítését szemlélteti a 17. ábra. Működés szempontjából két fő részre osztható a rendszer, egy légi és egy földi szegmensre. A légi szegmens az UAV fedélzetén található GPS vevőt és RF adó-vevőt foglalja magában. A földi szegmens öt fő részre bontható, szintén magában foglal egy az UAV-val való kommunikációra használt RF –adó-vevőt, az antenna mozgatásához szükséges szervó motorokat, a felhasználói felületet és egy mikrokontrollert, mely többek között az előzőekben bemutatott algoritmusokat futtatja. A tesztek és a további fejlesztések érdekében megterveztem és elkészítettem a földi szegmens prototípusát, mely 3D-s terveit és elkészített prototípust a 18. ábra szemléltet.



17. ábra Az automatikus UAV követő antenna platform elvi vázlatja [Készítette a szerző]



18. ábra Az antennamozgató 3D tervei (bal) és az elkészült prototípus (jobb) 1: akkumulátor, 2: mikrokontroller, 3: felhasználói felület, 4: horizontális szervó, 5: vertikális szervó, 6: RF adó-vevő [Készítette a szerző]

### ÖSSZEGRZÉS

A tanulmányban bemutattam egy UAV követő antennamozgató platform GPS alapú működési elvét, a fejlesztés fontosabb lépéseit az ötlettől az elkészült prototípusig. Ismertettem a főbb működtető algoritmusokat, GPS üzenetek feldolgozásának és kiértékelésének lehetséges módjait, valamint a szükséges koordináta transzformációkat. Ezeket implementálva különböző teszteknek vetettem alá. A tesztek során ideális és valós körülmények között is vizsgáltam az automatikus antennamozgató működését, mely eredményei bizonyítják a koncepció működőképességét. A bemutatott megoldás előnye, hogy az UAV fedélzetén megtalálható GPS vevőt és kommunikációs csatornát felhasználva működtethető, így az csak a földi szegmens oldalán igényel kiegészítéseket. Hátránya, hogy működése kizárólag GPS-en alapul, ebből kifolyólag erősen kitett az olyan szándékos vagy véletlen zavarásokkal szemben melyek hatására az UAV GPS koordinátái nem vagy csak hibásan határozhatóak meg. A GPS navigáció problémáira Wühl is felhívja a figyelmet a [6] tanulmányban. A módszer továbbfejlesztéseként kombinálható a bevezető részben említett RSSI alapú UAV követéssel. Ez a diverzifikáció növelheti a rendszer robusztusságát, megbízhatóságát és hibatűrését. Így az egyik megoldás kiesésekor a másik automatikusan átveheti annak szerepét a redundanciának köszönhetően.

### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Klaus Betke: The NMEA 0183 Protocol. 2001
- [2] NMEA Reference manual. SiRF Technology Inc, San Jose, California, 2007. url.: <https://www.sparkfun.com/datasheets/GPS/NMEA%20Reference%20Manual-Rev2.1-Dec07.pdf>
- [3] Guowei Cai et. al.: Unmanned Rotor Craft Systems. Springer, London 2011 pp. 23-34. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-635-1>
- [4] Local Tangent Plane, Wikipedia The Free Encyclopedia, e-dok. url.: [https://en.wikipedia.org/wiki/Local\\_tangent\\_plane\\_coordinates](https://en.wikipedia.org/wiki/Local_tangent_plane_coordinates),
- [5] S.P.Drake: Converting GPS coordinates to navigational coordinates. DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory, Edinburgh Australia, 2002.
- [6] Wühl Tibor: GPS navigációs problémák UAV alkalmazásokban. Hadmérnök, Robothadviselés 6. tudományos szakmai konferencia különszám, 2006. url.: [http://hadmernok.hu/kulonszamok/robothadviseles6/wuhrl\\_rw6.html](http://hadmernok.hu/kulonszamok/robothadviseles6/wuhrl_rw6.html)

**IMPROVING COMMUNICATION EFFICIENCY BETWEEN UAV AND ITS GROUND SEGMENT**

*Using high gain, directional antennas in order to increase link range and quality is a widely used practice in microwave radio-frequency communication. The more directional the antenna is the more focused the electro-magnetic power will be. Hence continuous optical view between the antennas and precise antenna moving and aiming become a critical asset. This is no different in case of point-to-point microwave links between UAVs and their ground control stations. But the UAVs are in continuous movement and they are capable of executing rapid maneuvers. Therefore, a need arises for a device which can track automatically the UAV and point the ground station's antenna at it continuously. In this paper I present in detail a GPS based automatic UAV antenna tracker, which has been developed. I describe the necessary algorithms, and finally how it was tested both with generated and real life inputs.*

**Keywords:** UAV, automatic antenna tracker, ground station,

---

Huszár Péter  
doktorandusz hallgató  
Nemzeti Közszolgálati Egyetem  
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar  
Katonai Műszaki Doktori Iskola  
huszar.peter.92@gmail.com  
orcid.org/0000-0001-6169-3777

Péter Huszár  
PhD student  
National University of Public Service  
Faculty of Military Science and Officer Training  
Doctoral School of Military Engineering  
huszar.peter.92@gmail.com  
orcid.org/0000-0001-6169-3777

---



<http://journals.uni-nke.hu/index.php/reptudkoz/article/view/276/43>