

Szabolcsi Róbert¹

UAV repülési magasságának mérése extrém alacsony repülési pályákon

A pilóta nélküli légi járművek (UAV-k) közeljövőben várható gyors és széles körű elterjedése, és azok városi, épített környezetben végrehajtott repülései előrevetítik az extrém kis repülési magasságok mérését, akár a méteres nagyságrendben is. A cikk az UAV-k automatikus repülés-szabályozásában is használható mérési eljárásokkal, módszerekkel és eszközökkel foglalkozik, amelyek kis méret, kis tömeg és kis energiaigény mellett is lehetővé teszik az UAV valós, föld-felszíntől mért repülési magasságának, illetve a tereptárgyaktól mért távolságának pontos, megbízható mérését. A cikkben a szerző két mérési módszert mutat be és hasonlítja össze, ezek az ultrahangos távolság- (magasság-) mérés elvén, valamint a Föld kapacitásának mérésén alapuló mérési módszerek. E mérési módszerek és mérési eszközök segítségével az UAV-k részére magasságstabilizáló rendszer (terepkövető rendszer) is megtervezhető.

Kulcsszavak: UAV, extrém kis repülési magasságok, ultrahangos magasság-/távolságmérés, Föld kapacitásának mérése, A/C hidkapcsolások

UAV Altitude Measurement at Extremely Low Flight Paths

The predicted intensive use of UAVs in urban area projects need measurements of the extremely low flight altitudes of the UAVs in the range of metres. This article deals with those measurement techniques that are applicable aboard on UAVs with small sizes, small weights and low level of electrical energy consumption. The ultrasonic range finders will be discussed, and the old fashioned method based on Earth capacitance measurement will be subjected to review. Relying on these techniques, the UAV height control system and also the UAV terrain-following system can be designed.

Keywords: UAV, extremely low flight altitudes, ultrasonic height/range finders, Earth capacitance measurement, A/C bridges

¹ Egyetemi tanár, Óbudai Egyetem; e-mail: szabolcsi.robert@bgk.uni-obuda.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2494-3746>

1. Bevezetés

A közeljövőben a pilóta nélküli légi járművek (*Unmanned Aerial Vehicle, UAV*) repüléseinek tömeges megjelenésére és elterjedésére számíthatunk az épített környezetben is, ahol a természetes és mesterséges tereptárgyak felett, de adott esetben emberek felett kell átrepülni a légi járművek. A hobbicélú UAV-repülések egyik nagyon gyakori városi formája a selfie-fotó készítése, és a készített fotók minél gyorsabb továbbítása és megosztása valamilyen közösségimédia-felületen. E repülések tipikusan néhány méteres, esetleg néhány száz méteres földközeli magasságokon zajlanak, adott esetben rövid ideig tartanak, jellemző rájuk, hogy emberek felett repülnek át az UAV-k. Az ilyen városi UAV-alkalmazások egyes kiemelten veszélyes repülési fázisai (például felszállás, leszállás szeles időben) során hasznosak lehetnek az UAV fedélzeti automatikus repülésszabályozó rendszerek, amelyek segítik az UAV-kezelő munkáját, és lényeges mértékben javítják a repülésbiztonságot.

E repülések során felmerül azonban a kérdés: milyen módszerrel, és milyen eszközzel lehetséges a repülési magasság megbízható, pontos mérése az UAV fedélzetén? Természetesen, a magasságmérés a repülésben a korai évektől jellemző volt. Előbb barometrikus műszerekkel, esetleg légjelrendszerrel, majd rádiótechnikai eszközökkel, később pedig inerciális mérőrendszerekkel vagy GPS-rendszerekkel mérték a repülési magasságot.

A fenti felsorolásból is jól látható, hogy a repülési magasság mérése számos módszer, illetve számos mérőműszer vagy mérőrendszer áll rendelkezésünkre. A kérdés csak az, hogy e mérőrendszerek az UAV fedélzetén használhatók-e vagy pedig sem?

Nyilvánvaló, hogy egy szabadidős célú, selfie-UAV, amelynek felszálló tömege a 100 g-tól (AEE Pocket *Selfie Drone*) az 1000 g nagyságrendig terjedő (DJI Mavic Air, DJI Mavic Pro, DJI Mavic Pro2, DJI Mavic 2 Zoom stb.) tartományban van, nem képes tetszőleges magasságmérő platformot befogadni. Más szóval, a mérőrendszer tömege kritikus az UAV maximális felszálló tömegének számítása során.

Könnyű belátni, hogy a magasságmérés eszközei az UAV fedélzetén minimális tömegűnek kell legyenek. Ideális esetben, akár az UAV-fedélzetén egyébként is alkalmazott kamera képei alapján is lehetséges a magasságmérés, és egyéb fontos információ nyerése (például összeütközés-veszélyes repülési helyzetek detektálása).

A szerző célja olyan mérési módszerek és eszközök bemutatása és alkalmazhatóságuk vizsgálata, amelyek az UAV kis magasságú repülései során megbízhatóan képesek érzékelni akár a kis értékű repülési magasságot is, tömegük és méretük alapján beépíthetők az UAV-k fedélzetére, és az UAV térbeli mozgásának dinamikájához illesztve jól szolgálják a kis magasságú repülések automatizálását és a veszélyes repülési helyzetek kezelését.

2. Szakirodalmi áttekintés

A légi járművek hagyományos repülésszabályozása a korai évektől az aerometrikus (barometrikus) mérés technikára,² majd az inerciális navigációs mérőrendszerekre (gyorsulásmérők, mechanikus giroszkópok) épült.³ A légi járművek mérete és teljesítményviszonyai lehetővé

² John H. Blakelock: *Automatic Control of Aircraft and Missiles*. New York, John Wiley & Sons, 1965.

³ Brian Dickinson: *Aircraft Stability and Control for Pilots and Engineers*. London, Sir Isaac Pitman & Sons Ltd, 1968.

tették, hogy nagy tömegű és nagy méretű érzékelő- és mérőrendszereket is alkalmazzanak a fedélzeten.⁴ Egy-egy robotpilóta-rendszer tömege még a szenzorrendszerek tömege nélkül is meghaladhatta a 100 kg-os nagyságrendet.⁵ Az 1960-as években használt giroszkópikus műhorizont és -irányszög mérőrendszerek együttes tömege szintén megközelítte a 100 kg-os tömeget. A hagyományos repülésszabályozás kezdeti szakaszában⁶ az automatizálás alapvetően az Euler-szögek⁷ (dőlésszög, bólintó szög, irányaszög) állandó értéken tartását jelentette,⁸ majd e funkciók fokozatosan egészültek ki egyéb repülési paraméterek állandó értéken tartásával (repülési magasság, repülési sebesség, útirányszög), vagy előre megadott értékük (automatikus leszállás, terepkövetés stb.) követésének irányítástechnikai folyamataival.⁹

Az UAV-k automatikus repülésszabályozása során szintén találkozhatunk úgy az egyes repülési paraméterek értéktartásával,¹⁰ mint a repülési paraméterek referenciaértékeinek követésével, amellyel Magnus Vetergren foglalkozott behatóan.¹¹

Az UAV-k automatikus repülésszabályozása során figyelemmel kell lennünk az előírásokra is, amelyek – katonai repülésben – részletesen szabályozzák az automatizálendő repülési üzemmódokat, és megadják az UAV-k elvárt képességeit is. Ilyen fontos szabvány a NATO STANAG 4586 (Ed. 3) dokumentum.¹²

Meg kell említenünk az EU küszöbön álló és nemzetállami ratifikálásra váró szabályozási rendeleteit is,¹³ amelyek részletesen foglalkoznak az UAV-k – főleg nem állami célú – repüléseinek szervezésével, a légi jármű típus- és légi alkalmassági tanúsításának kérdéseivel,¹⁴ és az UAV-kezelők (operátorok) elvárt képességeivel, a képzésükkel és a tanúsításukkal is.¹⁵

A Föld elektromos viselkedését¹⁶ koncentrikus gömbfelületű kondenzátorként mutatják be. Repülőgépek fedélzetén kísérleti jelleggel használták a Föld kapacitásának mérését.¹⁷ Az 1940-es években különféle bombázórepülőgépek (Harrow, Wellington, Lancaster, Halifax, Stirling) fedélzetén alkalmazták e magasságmérési elvet, és alacsony, körülbelül 150 láb (feet) repülési magasságig megbízhatóan mérték a magasságot. A mérési elv egy váltakozó

⁴ Эдуард А. Асланян: Системы автоматического управления полётом летательных аппаратов. Часть I, Киев, Киевское Высшее Военное Авиационное Инженерное Училище, 1984.

⁵ Александр А. Красовский – Юрий А. Вавилов – Александр И. Сучков: Системы автоматического управления летательных аппаратов. Москва, Издание ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1986.

⁶ Donald McLean: *Automatic Flight Control Systems*. New York – London – Toronto – Sydney – Tokyo – Singapore, Prentice-Hall International Ltd., 1990.

⁷ Robert C. Nelson: *Flight Stability and Control*. McGraw-Hill Companies, Inc., 1998.

⁸ Tiberiu Hacker: *Flight Stability and Control*. New York, American Elsevier, 1970.

⁹ Brian L. Stevens – Frank L. Lewis – Eric N. Johnson: *Aircraft Control and Simulation: Dynamics, Control Design and Autonomous Systems*. 3rd Edition, Wiley-Blackwell, 2015.

¹⁰ Pillar Eng: *Path Planning, Guidance and Control for a UAV Forced Landing*. Queensland University of Technology, 2011.

¹¹ Magnus Vestergren: *Automatic Takeoff and Landing of Unmanned Fixed Wing Aircraft. A System Engineering Approach*. MSc Thesis, Linköping University, 2016.

¹² NATO STANAG 4586 (Ed. 3) – *Standard Interfaces of UAV Control System (UCS) for NATO Interoperability*. 9 November 2012. NSA/123582012)4586.

¹³ A Bizottság (EU) 2019/945 felhatalmazáson alapuló rendelete (2019. március 12.) a pilóta nélküli légi jármű-rendszerekről és a pilóta nélküli légi jármű-rendszerek harmadik országbeli üzembentartóiról.

¹⁴ A Bizottság (EU) 2019/947 végrehajtási rendelete (2019. május 24.) a pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról.

¹⁵ *Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Part-UB – UAS operations in the 'open' and 'specific' categories*. EASA, Annex II to ED Decision 2019/021/R., Issue 1, 2019.

¹⁶ A Föld mint kondenzátor. Elérhető: www.netfizika.hu/a-fold-mint-kondenzator (A letöltés dátuma: 2020. 05. 07.)

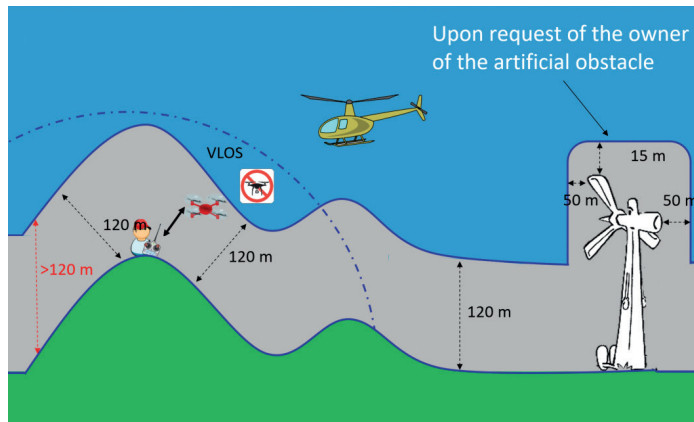
¹⁷ Hamilton A. M. Clark – Philip B. Vanderlyn: *Double-Ratio A.C. Bridges with Inductively-Coupled Ratio Arms*. *Proceedings of the IEE Part III: Radio and Communication Engineering*, 96. (1949), 41. 189–202.

áramú Wheatstone-hídra épült, aminek hídágát a jelzőműszerként is szolgáló egységben egyenlítették ki.¹⁸

Ezt az elvet elevenítette fel a munkájában A. P. Kozlov,¹⁹ aki modell-UAV fedélzetén építette ki a Föld kapacitását mérő rendszerét. Az ultrahangos távolság/magasságmérés elvével²⁰ és eszközeivel²¹ irodalmak foglalkoznak részletesen.²²

3. A SUAV kis magasságú repülése nem épített és épített környezetben

Az UAV épített környezetben kívüli repülését az 1. ábra mutatja be.²³



1. ábra

UAV repülési tartománya nem épített környezetben. Forrás: Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) i. m. (15. lj.) alapján.

Az 1. ábrán is jól látható, hogy az adott kategóriájú UAV vizuális látómezőn belül, a földfelszíntől mért 120 m (400 feet) repülési magasság alatt repülhet, és az UAV-kezelőtől maximum 120 m távolságra távolodhat el. A mesterséges tereptárgyak felett – a tulajdonos kérésének megfelelően – pedig azoktól mért legalább 15 m valós repülési magasságban repülhet.

¹⁸ Walter L. Watton – Max E. Pemberton: *A Direct-Capacitance Aircraft Altimeter. Proceedings of the IEE, Part III: Radio and Communication Engineering*, 96. (1949), 41. 203–210.

¹⁹ Aleksandr. P. Kozlov: *Automatic Control System of Low-Altitude Flight UAV. Proceedings of the 2nd International Conference "Methods and Systems of Navigation and Control" (MSMNC)*, Kiev, Ukraine, 2012.

²⁰ Donald P. Massa: *Choosing an Ultrasonic Sensor for Proximity or Distance Measurement Part 2: Optimizing Sensor Selection*. 1999. Elérhető: www.fierceelectronics.com/components/choosing-ultrasonic-sensor-for-proximity-or-distance-measurement-part-2-optimizing (A letöltés dátuma: 2020. 05. 07.)

²¹ *Complete Guide for Ultrasonic Sensor HC-SR04 with Arduino*. Elérhető: <https://randomnerdtutorials.com/complete-guide-for-ultrasonic-sensor-hc-sr04/> (A letöltés dátuma: 2020. 05. 07.)

²² *This article focuses on the HC-SR04 ultrasonic proximity sensor, highlighting its specs and common applications*. 2019. Elérhető: <https://maker.pro/custom/tutorial/hc-sr04-ultrasonic-proximity-sensor-datasheet-highlights> (A letöltés dátuma: 2020. 05. 07.)

²³ *Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) i. m. (15. lj.)*

A 2. ábrán az UAV repülési tartománya látható épített környezetben. Általános szabály, hogy az emberek feletti átrepülést el kell kerülni. Ha ez nem lehetséges, akkor megadott felszállótömeg-értékig át lehet repülni az emberek felett, de a repülési idő minimalizálására kell törekedni. Tömegrendezvényeknek helyet adó létesítmények (például sportpályák, stadionok) felett tiltott a repülés. Városi környezetben is él a 120 m-es szabály: repülni csak vizuális látótávolságon (VLOS) belül 120 m magasságra vagy 120 m távolságra lehet az UAV-val.



2. ábra

UAV repülési tartománya épített környezetben. Forrás: Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM). i. m. (15. lj.) alapján

Az EU 2019/945 és az EU 2019/947 szabályozások és azok várható nemzeti ratifikációi várhatóan javítják a jogbiztonságot, és tiszta, áttekinthető helyzetet teremtenek az UAV-felhasználók és -üzemeltetők számára. A szabályozás egyik erőssége az európai közös gondolkodás az UAV/UAS-rendszerek tervezése, gyártása és üzemeltetése területén is. A szabályozás többéves jogalkotási folyamat, amelyet részletekbe menő társadalmi viták előztek meg, és a jogszabályalkotásban természetesen részt vettek a nemzetállamok képviselői is.

Könnyen belátható, hogy az UAV, de akár a SUAV, vagy a μ UAV kategóriában a repülés egyes fázisai, de főleg selfie-fotózás, esetén a teljes repülés extrém alacsony repülési magasságon történik, amikor az UAV-kezelő kézi beavatkozására adott esetben nagyon kevés idő áll rendelkezésre. Gondoljunk bele, hogy egy, akár agresszív manőverekre is képes UAV ezen a magasságon „kitör”, és nagy függőleges sebességgel zuhanni kezd. A tipikus, néhány méteres repülési magasságról az UAV tizedmásodperc nagyságrendű idő alatt akár le is zuhanhat. Ez az idő adott esetben még az UAV-kezelő holtidejétől is kisebb, ami szinte kizárja, hogy kézi irányítással az UAV-kezelő képes lenne eredményesen beavatkozni és elkerülni a lezuhanást. Ebből következik, hogy az UAV magasságának szabályozására, korlátozására, a veszélyes repülési üzemmódok végrehajtására célszerű megfelelően megtervezett és megépített robotpilótát alkalmazni.

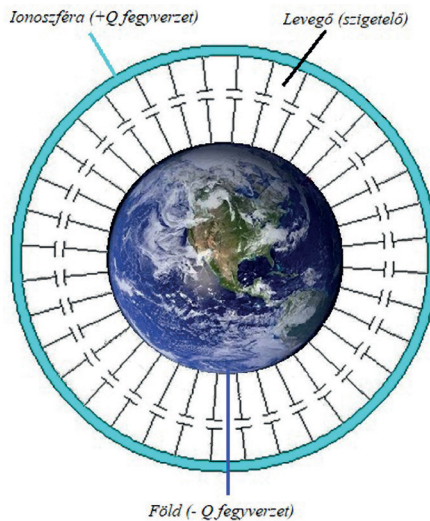
A NATO STANAG 4586 (Ed. 3) szabvány a katonai repülésben eleve olyan UAV repülés-szabályozó képességeket sorol fel tételesen, amire a kereskedelmi forgalomban is kapható robotpilóták nem feltétlenül alkalmasak, vagyis eme UAV-képesség-halmaz csak speciális automatikus repülésszabályozó rendszerrel biztosítható, amely képes az UAV extrém kis értékű repülési magasságát is érzékelni.

4. Repülési magasság érzékelése a Föld kapacitásának mérése segítségével

Az 1940-es években, amikor még nem álltak rendelkezésre repülőfedélzeti kis magasságú rádiomagasságmérők, intenzív kutatások kezdődtek a kis értékű repülési magasság mérésére. Az egyik ígéretes projektet Walter L. Watton és Max E. Pemberton mutatták be.²⁴ A magasságmérés során a Föld villamos tulajdonságát használjuk fel, mert a földfelszín, az ionoszféra és közöttük a szigetelő levegő koncentrikus felületű gömbkondenzátor-moddal írható le.

4.1. A Föld villamos viselkedése, és kapacitásának mérése, számítása

A Föld felszínén, illetve a Földet körülvevő atmoszférában lejátszódó töltésváltást fizikai folyamatok és események (különböző időjárási jelenségek, viharok stb.) és az atmoszférát érő külső hatások (például a Nap ionizáló sugárzásai) következtében az atmoszféra külső határán, az ionoszférában (a Földfelszíntől mért 60–1000 km magasságban) főleg pozitív töltések (ionok) halmozódnak fel. Ily módon létrehozzák a Föld körül egy képzeletbeli gömbkondenzátor külső pozitív fegyverzetét, míg a Föld felszíne a rajta kialakuló valós elektrontöbblet miatt a gömbkondenzátor belső negatív fegyverzetének is tekinthető (3. ábra).



3. ábra

A Föld kapacitása. Forrás: a szerző szerkesztése

A 3. ábrán jól látható, hogy a két fegyverzet között villamos mező alakul ki, és a szétválasztott és az egyes fegyverzeteken felhalmozódó töltések miatt a fegyverzetek között kapacitív hatás alakul ki. Bár nem tekinthető homogénnek és időinvariánsnak a villamos tér, és a Föld

²⁴ Watton–Pemberton i. m. (18. l.)

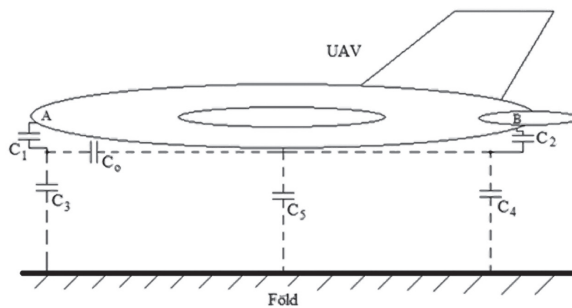
formáját sem szferoidnak tekintjük, mégis elfogadott a Föld kapacitásának számítása az alábbi egyenlettel:

$$C = \frac{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}}, \quad (1)$$

ahol: a vákuum dielektromos állandója; $R_1 = 6371$ km – a Föld sugara; $R_2 = 6471$ km – az ionoszféra távolsága a Föld középpontjától. Ismeretes azonban, hogy a Föld alakja nem ideális gömb, valamint ismert a tény is, hogy a Föld és az ionoszféra közötti kapacitás értéke számos más körülménytől is függ, és folyamatosan változik, mégis e kapacitás értékét 1,8 F értékkel szokás figyelembe venni.

Ebben a fizikai rendszerben az egymással szemben elhelyezkedő kondenzátorfegyverzetek között villamos mező alakul ki, így bármilyen, villamos értelemben vezető tárgyat helyezünk el ebben a mezőben, közte és a Föld felülete között is ébred kapacitív hatás, ami mérhető is.²⁵ Ezen elven alapszik Walter L. Watton és Max E. Pemberton munkája alapján egy olyan magasságmérő rendszer, amely kis repülési magasságokon lehetővé teszi a valós repülési magasság mérését (4. ábra).

A Watton és Pemberton cikkében leírt mérési módszer lényege, hogy a légi jármű két, egymástól a lehető legnagyobb távolságra elhelyezkedő pontján (például orr-rész és farokrész, mint az a 4. ábrán is látható; vagy a szárnyak végein, mint az A. P. Kozlov munkájában is látható²⁶) feszültségforrásra kapcsolt elektródát, más szóval kondenzátorfegyverzetet helyezünk el. Az elektródák alakja lehet sík, de lehet valamilyen kiálló fémes tárgy, gömb vagy félgömb is. Szintén elvárás, hogy a mérőrendszer elemeit a légi jármű fémes vázszerkezetétől a megfelelő szigeteléssel le kell választani, és úgy kell őket elhelyezni, hogy a fedélzeti villamos rendszerek által létesített villamos mezők a lehető legkisebb mértékben befolyásolják a Föld villamos mezejének mérését. A fedélzeten elhelyezett elektródák (fegyverzetek) potenciálja lényeges mértékben eltér a Föld potenciáljától, így az elektródák és a Föld felszíne között, ami az UAV-repülések során sík fegyverzetként fogható fel, az eltérő töltöttségük miatt kapacitív hatás észlelhető, ami a megfelelő műszerezettséggel mérhető is (4. ábra).



4. ábra

Az UAV-fedélzeti elektródákhoz kapcsolódó kapacitások. Forrás: a szerző szerkesztése

²⁵ Simonyi Károly: Villamosságtan. Budapest, Akadémiai Kiadó, 1983.

²⁶ Kozlov i. m. (19. l.) 2.

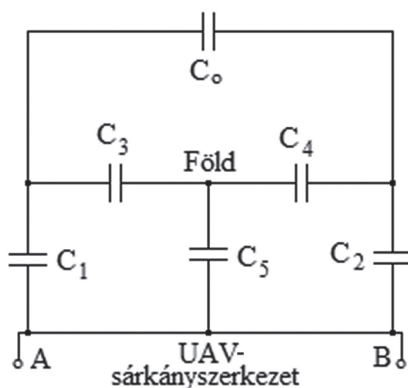
A 4. ábrán az alábbi jelöléseket alkalmaztuk: C_5 az UAV valós repülési magasságán mért „UAV–Föld” rendszer kapacitása; C_0 az UAV-fedélzeti elektródák között mért állandó kapacitás; C_1 és C_2 az „UAV elektróda – UAV valós magasság” között mért kapacitások; C_3 és C_4 részkapacitások, az „UAV elektróda – Föld” teljes kapacitás részcéltékei.

A 4. ábrán látható kapacitások függenek a Föld felszínétől mért valós repülési magasságtól, de ez a matematikai függvénykapcsolat sokszor nehezen írható le. Mindazonáltal, a C_3 , a C_4 , és a C_5 kapacitások azok amelyek szignifikáns mértékben függenek a repülési magasságtól.²⁷ Ismeretes, hogy a légmagos síkkondenzátor kapacitása az alábbi képlettel számítható:²⁸

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}, \quad (2)$$

ahol A a fegyverzet felülete, és d az elektródák közötti távolság.

Ha az UAV-t tekintjük referenciapontnak, akkor a 4. ábrán látható kapacitások villamos helyettesítő kapcsolási vázlatát az alábbi módon adhatjuk meg (5. ábra):



5. ábra

Az UAV kapacitásrendszerének villamos elrendezése. Forrás: a szerző szerkesztése

Az 5. ábrán jól látható, hogy a C_3 (H), a C_4 (H), és a C_5 (H) kapacitások egy közös ponttal csillagkapcsolást képeznek. Alakítsuk át ezt a csillagkapcsolást vele ekvivalens deltakapcsolássá a következő transzformációs képletek segítségével:

$$\Delta C_0(H) = \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4 + C_5}, \quad (3)$$

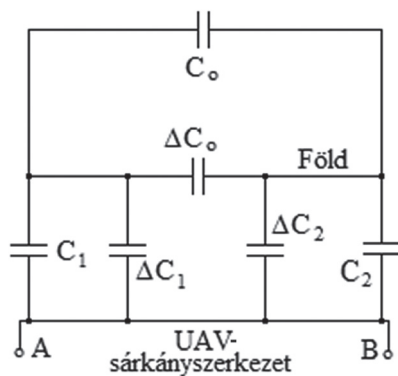
$$\Delta C_1(H) = \frac{C_3 C_5}{C_3 + C_4 + C_5}, \quad (4)$$

$$\Delta C_2(H) = \frac{C_4 C_5}{C_3 + C_4 + C_5}. \quad (5)$$

²⁷ Watton–Pemberton i. m. (18. lj.) 204.

²⁸ Simonyi i. m. (25. lj.) 199. 449.

Az átalakított villamos kapcsolás a 6. ábrán látható.



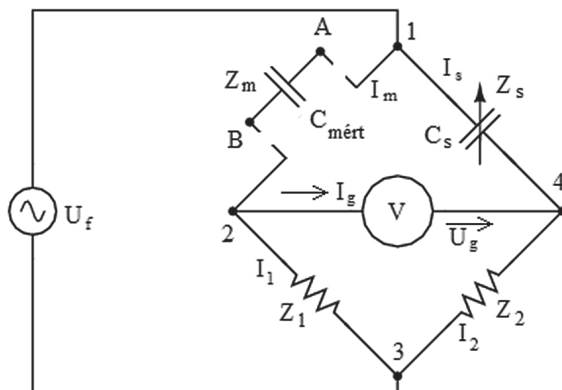
6. ábra

Az UAV kapacitásrendszerének ekvivalens átalakítása. Forrás: a szerző szerkesztése

A 6. ábrán jól látható, hogy a C_0 és a ΔC_0 kapacitások párhuzamosan kapcsolódnak egymáshoz, ezért az eredő mért kapacitásuk a következő összefüggés segítségével számítható:

$$C_{\text{mért}}(\text{H}) = C_0 + \Delta C_0(\text{H}) = C_0 + \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4 + C_5}. \quad (6)$$

A (6) egyenletben C_0 állandó kapacitás, míg a ΔC_0 kapacitás a repülési magassággal együtt változik. A repülési magasság mérése tehát közvetett módon történik, a mérés visszavezetett kapacitásmérésre, amely a gyakorlatban sokszor váltakozó áramú Wheatstone-hidak segítségével történik (7. ábra).



7. ábra

Kapacitásmérés váltakozó áramú Wheatstone-híd segítségével. Forrás: a szerző szerkesztése

A híd egyik ágába bekötjük a mérendő $C_{\text{mért}}(\text{H})$ kapacitást, míg a mellette elhelyezkedő ágban található a C_s hangolható kondenzátor. A másik két ágban a \bar{Z}_1 és a \bar{Z}_2 szintén ismert komplex

impedanciákat kapcsoljuk a mérőáramkörbe. A váltakozó áramú mérőhíd akkor kiegyenlített, ha a hídágban nem folyik áram, vagyis:

$$\bar{I}_g = 0, \quad (7)$$

más szóval,

$$\bar{U}_g = \bar{U}_4 - \bar{U}_2 = 0, \rightarrow \bar{U}_4 = \bar{U}_2. \quad (8)$$

Ebben az esetben a Wheatstone-híd egy áramosztóvá alakul, amelynek ágaiban 2-2 komplex impedancia található. A híd kiegyenlített állapotának feltétele, hogy:

$$\bar{Z}_1 \bar{Z}_s = \bar{Z}_2 \bar{Z}_m. \quad (9)$$

Legyenek az egyes ágak impedanciái az alábbiak:

$$\bar{Z}_1 = R_1; \bar{Z}_2 = R_2; \bar{Z}_s = -j \frac{1}{\omega C_s}; \bar{Z}_m = -j \frac{1}{\omega C_{mért}}. \quad (10)$$

A (10) komplex impedanciákat helyettesítsük be a (9) egyenletbe:

$$-j \frac{R_1}{\omega C_s} = -j \frac{R_2}{\omega C_{mért}}, \quad (11)$$

ily módon a keresett $C_{mért}$ kapacitás értéke:

$$C_{mért} = \frac{R_2}{R_1} C_s. \quad (12)$$

Ha a hídág nem, vagy nem teljesen kiegyenlített, a hídágban az alábbi \bar{U}_g feszültség mérhető

$$\bar{U}_g = \bar{U}_2 - \bar{U}_4 = \bar{U}_f \frac{\bar{Z}_1}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_m} - \bar{U}_f \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_s} = \bar{U}_f \left(\frac{R_1}{R_1 - j \frac{1}{\omega C_{mért}}} - \frac{R_2}{R_2 - j \frac{1}{\omega C_s}} \right) = f(C_{mért}). \quad (13)$$

A (13) egyenlet alapján könnyű belátni, hogy a mérőhíd mérőágában mért feszültség függ a $C_{mért}$ (H) mérendő kapacitás értékétől. Az \bar{U}_g komplex effektív feszültségjel a továbbiakban már jól használható információt hordoz a repülési magasságról, és akár analóg, akár digitális DSP-eszközökkel már jól kezelhető.

Watton és Pemberton az Avro Lancaster bombázó-repülőgépen tesztelt magasságmérő rendszerre az alábbi mért ΔC_0 kapacitásváltozás-értékeket közölte (1. táblázat):²⁹

²⁹ Watton–Pemberton i. m. (18. l.) 207.

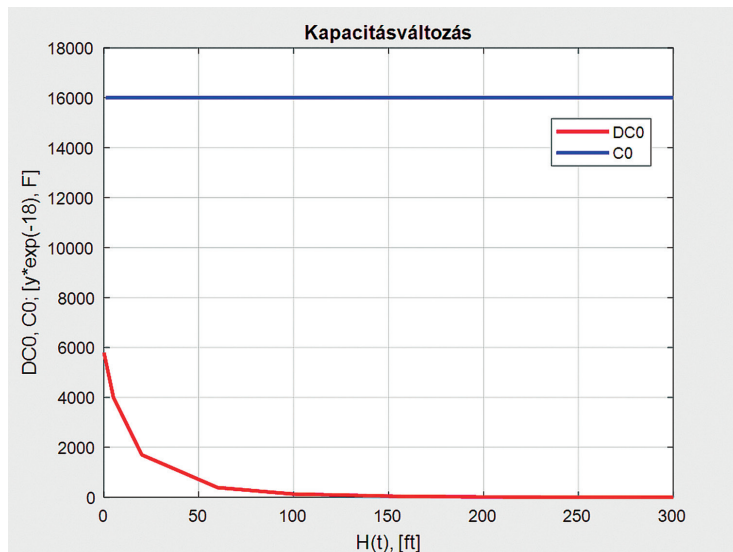
1. táblázat

Földkapacitás megadott repülési magasságon. Forrás: Watton–Pemberton i. m. (18. lj.) 207.

Repülési magasság (ft)	Mért kapacitásváltozás, ΔC_0 , [10^{-18} F]
300	(2 ÷ 2)
250	(7 ÷ 5)
200	(17 ÷ 5)
160	34
100	130
60	390
20	1700
5	4000
0	5800

A fenti táblázatból is kiténik, hogy a kapacitásmérés elvén alapuló kis repülési magasságok mérése (0 ÷ 150 ft) repülési magasságtartományban valósulhat meg viszonylag jó pontossággal. Nagyobb repülési magasságok mérésére ez a mérési elv nem használható.

Korábban említettük, hogy e mérési módszer alkalmazásának feltétele, hogy a fedélzeti nagyfeszültségű elektródák egymástól minél távolabb helyezkedjenek el. A Walter L. Watton és Max E. Pemberton cikkében bemutatott példa esetén az elektródákat a szárnyak végein, egymástól 101 ft (láb) távolságban helyezték el, és a fedélzeti elektródák közötti állandó kapacitás $C_0=16000 \cdot 10^{-18}$ F értékű volt értékű volt³⁰. A C_0 és a ΔC_0 kapacitásváltozásokat a 8. ábra³¹ mutatja be.³²



8. ábra

Az UAV mért kapacitásának változása. Forrás: a szerző MATLAB-scriptje

³⁰ Watton–Pemberton i. m. (18. lj.) 207.

³¹ MATLAB R2020a, User's Guide. The MathWorks Inc., 2020.

³² MATLAB R2020a Control System Designer/Control System Toolbox 10.8, User's Guide. The MathWorks, Inc., 2020.

A. P. Kozlov cikkében egy modell UAV-n építettek ki hasonló, kapacitív elvű mérőrendszert a magasság érzékelésére.³³ A mérőrendszer jelei alapján a magasságstabilizáló rendszer egyik lehetséges koncepcióját is lefektette a szerző.

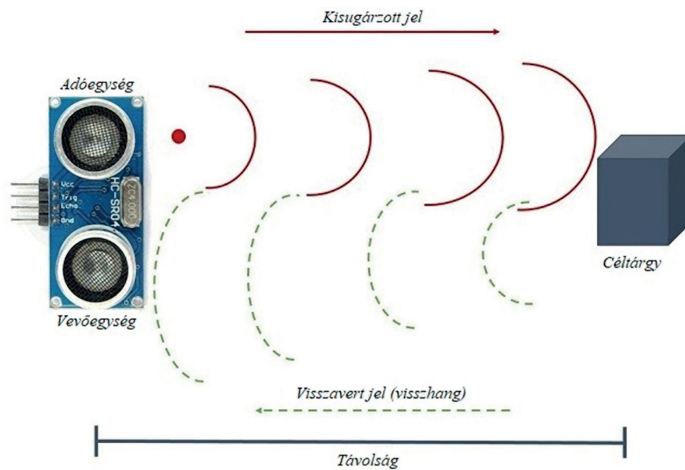
A földközeli, kis repülési magasságok tehát jól mérhetők a fedélzeti nagyfeszültségű elektródák (kondenzátorok) és a földfelszín közötti kapacitás érzékelésével és mérésével. E magasságmérési módszer nagy előnye, hogy gyakorlatilag földfelszíni zérus magasságig képes érzékelni a repülési magasságot. Maga a mérőrendszer autonóm, külső jelforrás- vagy egyéb mérőrendszer nem szükséges a működéséhez. A mérési módszer hátránya, hogy az UAV fedélzetén esetenként nagy tömegű elektródarendszert kell kiépíteni, amely így csökkenti az UAV hasznos terhet, és ez korlátok közé szoríthatja e mérési módszer lehetséges alkalmazását.

4.2. Magasságmérés ultrahangos távolságmérőkkel

Az ultrahang tartományát már régóta használjuk különféle célokra. Az 1940-es évektől intenzív kísérletezés után megszülettek az első ultrahangkészülékek, amelyeket először főleg orvosi, diagnosztikai és gyógyászati célokra használtak.

Napjainkban az ipari és különösképpen a járműipari alkalmazások széles palettája igazolja a kutatók vízióját az ultrahang sokrétű alkalmazásáról.³⁴ Az ultrahangos (UH) távolságmérők a kis tömegüknek és kis energiaigényüknek köszönhetően mára széles körben terjedtek el,³⁵ és a mikrovezérlők (például Arduino) is képesek a jeleiket kezelni.

Az ultrahangos lokáció elve megegyezik a rádiolokáció elvével: az adó kisugárzott jele visszaverődik a céltárgyról, és a vevő érzékeli a visszavert jelet (visszhang), majd az idő és a hang terjedési sebessége alapján számítja a távolságot (9. ábra).



9. ábra

Az ultrahangos távolságmérés elve. Forrás: a szerző szerkesztése

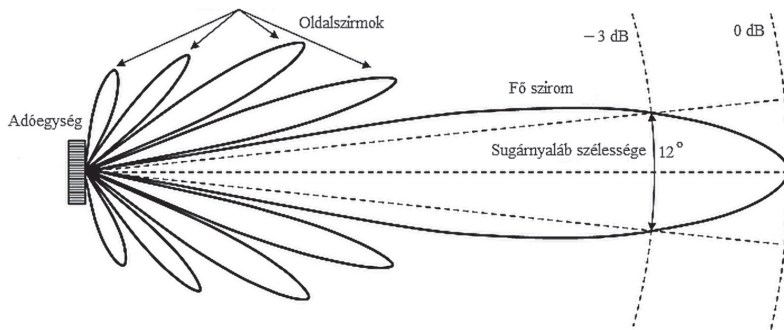
³³ Kozlov i. m. (19. lj.) 3.

³⁴ Massa i. m. (20. lj.)

³⁵ Complete Guide for Ultrasonic Sensor HC-SR04 with Arduino. i. m. (21. lj.)

A járműiparban főleg távolságmérésre használják az UH-szenzorokat. A gépjárművek vezetést támogató rendszerei (például parkolóautomaták, tolatóautomaták, összeütközést elkerülő rendszerek stb.) főleg erre a szenzorra épülnek. Nyilvánvaló, hogy a megfelelő térlátást biztosító és a beépíteni szükséges UH-szenzorok számát a gyakorlatban igyekeznek csökkenteni, de még így is előfordulnak 8-12 db UH-szenzorral és egyéb érzékelővel (például radar, FLIR-rendszer, hőkamerák stb.) is ellátott gépjárművek.³⁶ Könnyű belátni, hogy ebben az esetben az egyes UH-szenzorok nagy látószöggel kell rendelkezzenek, így viszont – ugyanazon kisugárzott teljesítmény mellett – az érzékelési távolság csökkenni fog.

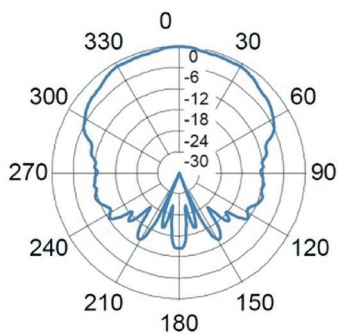
Hasonlóképpen, az UAV-k fedélzetén is használják az UH-távolságérzékelőket, főleg a valós repülési magasság mérésére. Ebben az esetben, mivel az UAV repülése úgy a bedöntés, mint a bőlintó mozgása szerint is korlátozott, célszerű olyan UH-szenzort választani, amely a kisugárzott teljesítményt jórészt az iránykarakterisztika fő szírnán adja le (10. ábra).



10. ábra

Az ultrahangos távolságmérő adóegységének iránykarakteristikája. Forrás: a szerző szerkesztése

Az ultrahangos távolságmérők vevőegységével szemben azt az általános követelményt lehet megfogalmazni, hogy főként a mozgó tárgyak detektálása esetén széles térszögben kell érzékelje a céltárgyakat (11. ábra).



11. ábra

Az ultrahangos távolságmérő vevőegységének iránykarakteristikája. Forrás: a szerző szerkesztése

³⁶ This article focuses on the HC-SR04 ultrasonic proximity sensor, highlighting its specs and common applications. i. m. (22. l.j.)

A 11. ábrán jól látható, hogy a vevőegység a $\pm 30^\circ$ szögtartományban, megadott távolságon belül, gyakorlatilag 0 dB jelszint mellett érzékeli a céltárgyat, de még a $\pm 60^\circ$ szögtartományban is -6 dB a visszavert jelek erőssége, és az elülső $\pm 90^\circ$ (180°) térrészben a jelerősség -12 dB. Ez a tulajdonság jól alkalmazható olyan esetben, amikor az UH-szenzort térképezésre használjuk, és követelmény, hogy az érzékelő nagy térszögben „lásson” előre.

5. Következtetések

A cikk a pilóta nélküli légi járművek (UAV-k) kis repülési magasságainak mérésére alkalmazható mérés technikai elvekkel, módszerekkel és eszközökkel foglalkozott. A bemutatott magasságmérési módszerek lehetővé teszik, hogy kis méretű, kis tömegű és olcsó mérőrendszereket alakítsunk ki az UAV fedélzetén, amelyek megbízhatóan képesek akár extrém kis értékű, akár centiméter nagyságrendű repülési magasságokat is érzékelni.

A Föld villamos mezejének és a Föld kapacitásának mérése egy olyan autonóm mérési elv, amely főként kis repülési magasságokon lehetővé teszi a valós repülési magasság mérését.

Az ultrahangos távolságmérők talán a leginkább széles körben elterjedt távolságmérő eszközök. Kis méretűk, megbízható működésük és a kereskedelmi forgalomban kapható, széles körben elterjedt mikrovezérlőkhöz (például Arduino) is egyszerűen illeszthetők, ezért a járműipar széles körben támaszkodik erre a mérési eljárásra. Az UAV-k automatikus repülésszabályozásában is méltó helyet kapott az ultrahangos távolság- (magasság-) mérés, és az UAV-k épített városi környezetben való megjelenése egyre inkább előrevetíti olyan „láss és kerüld el” képesség kialakítását, amelyben az UH-szenzoroknak kulcsszerepe lesz.

Felhasznált irodalom

Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Part-UAS – UAS operations in the 'open' and 'specific' categories. EASA, Annex II to ED Decision 2019/021/R., 2019. Elérhető: www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/AMC%20%26%20GM%20to%20Part-UAS%20%E2%80%94%20Issue%201.pdf (A letöltés dátuma: 2020. 05. 07.)

Асланян, Эдуард А. Системы автоматического управления полётом летательных аппаратов.

Часть I, Киев, Киевское Высшее Военное Авиационное Инженерное Училище, 1984.

Blakelock, John H.: *Automatic Control of Aircraft and Missiles.* New York, John Wiley & Sons, 1965.

Clark, Hamilton A. M. – Philip B. Vanderlyn: Double-Ratio A.C. Bridges with Inductively-Coupled Ratio Arms. *Proceedings of the IEE Part III: Radio and Communication Engineering*, 96. (1949), 41. 189–202. DOI: <https://doi.org/10.1049/pi-3.1949.0040>

Complete Guide for Ultrasonic Sensor HC-SR04 with Arduino. Elérhető: <https://randomnerdtutorials.com/complete-guide-for-ultrasonic-sensor-hc-sr04/> (A letöltés dátuma: 2020. 05. 07.)

Dickinson, Brian: *Aircraft Stability and Control for Pilots and Engineers.* London, Sir Isaac Pitman & Sons Ltd, 1968.

Eng, Pillar: *Path Planning, Guidance and Control for a UAV Forced Landing.* Queensland University of Technology, 2011.

Hacker, Tiberiu. *Flight Stability and Control.* New York, American Elsevier, 1970.

- Kozlov, Aleksandr. P.: *Automatic Control System of Low-Altitude Flight UAV*. Proceedings of the 2nd International Conference "Methods and Systems of Navigation and Control" (MSMNC), Kiev, Ukraine, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/msnmc.2012.6475117>
- Красовский, Александр А. – Юрий А. Вавилов – Александр И. Сучков: Системы автоматического управления летательных аппаратов. Москва, Издание ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1986.
- Massa, Donald P.: *Choosing an Ultrasonic Sensor for Proximity or Distance Measurement Part 2: Optimizing Sensor Selection*. 1999. Elérhető: www.fierceelectronics.com/components/choosing-ultrasonic-sensor-for-proximity-or-distance-measurement-part-2-optimizing (A letöltés dátuma: 2020. 05. 07.)
- MATLAB R2020a Control System Designer/Control System Toolbox 10.8, User's Guide. The MathWorks, Inc., 2020.
- MATLAB R2020a, User's Guide. The MathWorks Inc., 2020.
- McLean, Donald. *Automatic Flight Control Systems*. New York – London – Toronto – Sydney – Tokyo – Singapore: Prentice-Hall International Ltd., 1990.
- Nelson, Robert C. *Flight Stability and Control*. McGraw-Hill Companies, Inc., 1998.
- NATO STANAG 4586 (Ed. 3) – *Standard Interfaces of UAV Control System (UCS) for NATO Interoperability*. 9 November 2012. NSA/123582012)4586.
- Simonyi Károly: *Villamosságtan*. Budapest, Akadémiai Kiadó, 1983.
- Stevens, Brian L. – Frank L. Lewis – Eric N. Johnson: *Aircraft Control and Simulation: Dynamics, Control Design and Autonomous Systems*. 3rd Edition, Wiley-Blackwell, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119174882>
- This article focuses on the HC-SR04 ultrasonic proximity sensor, highlighting its specs and common applications*. 2019. Elérhető: <https://maker.pro/custom/tutorial/hc-sr04-ultrasonic-proximity-sensor-datasheet-highlights> (A letöltés dátuma: 2020. 05. 07.)
- Vestergren, Magnus: *Automatic Takeoff and Landing of Unmanned Fixed Wing Aircraft. A System Engineering Approach*. MSc Thesis, Linköping University, 2016.
- Watton, Walter L. – Max E. Pemberton: A Direct-Capacitance Aircraft Altimeter. *Proceedings of the IEE, Part III: Radio and Communication Engineering*, 96. (1949), 41. 203–210. DOI: <https://doi.org/10.1049/pi-3.1949.0041>

Internetes forrás

A Föld mint kondenzátor. Elérhető: www.netfizika.hu/a-fold-mint-kondenzator (A letöltés dátuma: 2020. 05. 07.)

Jogi források

- A Bizottság (EU) 2019/945 felhatalmazáson alapuló rendelete (2019. március 12.) a pilóta nélküli légitársaság-rendszerekről és a pilóta nélküli légitársaság-rendszerek harmadik országbeli üzembentartóiról
- A Bizottság (EU) 2019/947 végrehajtási rendelete (2019. május 24.) a pilóta nélküli légitársaságokkal végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról