

Békési Bertold László alezredes – Szilvássy László ezredes
– Major Gábor alezredes – Gajdács László százados – Jámbor Krisztián:

MUNKADRÓNOK EGY MODERN LÉGIKIKÖTŐ MINDENNAPJAIBAN¹

DOI: [10.35926/HSZ.2023.3.3](https://doi.org/10.35926/HSZ.2023.3.3)

ÖSSZEFOGLALÓ: Rohamosan fejlődő világunkban egyre nagyobb igény mutatkozik a légi szállítási volumen növelésére, ami a légijárművek eszközparkjának számszerű növekedése mellett a légikikötők területi, minőségi és szolgáltatásbéli fejlődését hozza magával. Az emberi munkaerő véges kapacitása generálja a következő feladatot, miszerint milyen megoldás kínálható ennek a kiváltására és tehermentesítésére. Kézenfekvőnek tűnik a már oly sok helyen sikerrel használt pilóta nélküli légijárművek alkalmazása, de nyomban érkezik a repülésbiztonság oldaláról, hogy „miként integrálható egy ember által és egy ember jelenléte nélküli légi eszköz egy és ugyanazon légtérbe, egy munkaterületre?”. A szerzők az ennek kutatására létrejövő projektben keresik a választ, hogy milyen légijármű milyen feladatokra és milyen szenzorok segítségével lehet leginkább hatékony részese egy modern repülőtér koncepciójának.

KULCSSZAVAK: drón, infravörös érzékelés, elektromágneses spektrum, szenzor, LoRa CSS, vevő érzékenysége

A SZERZŐKRŐL:

- ▶ Dr. Békési Bertold László alezredes (PhD), egyetemi docens (Nemzeti Közszerológiai Egyetem HHK Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék) (ORCID: 0000-0002-5709-789X; MTMT: 10026197)
- ▶ Dr. Szilvássy László ezredes (PhD), egyetemi docens, tanszékvezető (Nemzeti Közszerológiai Egyetem HHK Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék) (ORCID: 0000-0002-0455-4559; MTMT: 10025449)
- ▶ Major Gábor alezredes, tanársegéd (Nemzeti Közszerológiai Egyetem HHK Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék) (ORCID: 0000-0003-2927-127X; MTMT: 10047342)
- ▶ Gajdács László százados, tanársegéd (Nemzeti Közszerológiai Egyetem HHK Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék), PhD-hallgató (NKE KMDI) (ORCID: 0000-0003-2334-6859; MTMT: 10063406)
- ▶ Jámbor Krisztián szakoktató (Nemzeti Közszerológiai Egyetem HHK Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék) (ORCID: 0000-0002-6406-0841; MTMT: 10086158)

BEVEZETŐ

A repülés szépségét és a magasba emelkedés igényét már az ókori Daidalosz és Ikarosz mítoszában is megcsodálhatjuk. A hit, az akarat, az elszántság az ipari, technikai fejlődéssel párosulva elhozta a levegőnél nehezebb eszközök levegőbe juttatásának lehetőségét és hatékony kihasználását a légi szállításban.

¹ A TKP2021-NVA-16 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Az elmúlt évtizedek technológiai fejlődésének köszönhetően – számos más terület mellett – a pilóta nélküli légitársaságok (UAV/UAS²) hatalmas technológiai fejlődésen mentek/mennek keresztül, amely folyamat töretlen. Ezek az eszközök felépítésükben, működésükben csaknem azonosak az ember által vezetett repülőgépekkel, helikopterekkel.³ A drónok olyan repülő robotok, amelyek között vannak néhány grammos és többtonnás felszállótömeggel a levegőbe emelkedő, bázisuktól alig százméternyire eltávolodni képes, valamint akár a kontinensek közötti távolságok átszelésére is alkalmas konstrukciók. Napjainkra kialakultak a merev, a forgó-, sőt a csapkodószárnyú kis, illetve a hangsebességet is meghaladó sebességgel repülő változataik. A merev szárnyú modell kialakítása megfelel a repülőgépekének, ahol a felhajtóerő a levegőbe emelkedve az előre haladó szárnyakon keletkezik. Ami a forgószárnyas csoportba tartozókat illeti, működési elvük megegyezik a helikopterekével, tehát az alkalmazott forgószárnylapátok – mint szárnyak – forgás következtében termelnek szükséges felhajtóerőt.⁴

Az emberi kezelőszemélyzet nélküli, távolról irányított vagy autonóm módon működő halálos vagy nem halálos hasznos terhet hordozó légitársaságok szintén drónoknak minősülnek.⁵ A működésükhöz szükséges információkat a környezetükből gyűjtik, szenzorok segítségével érzékelik pozíciójukat, és egy döntési folyamat eredményeként korrigálják működésüket, helyzetüket, mozgásukat a háromdimenziós térben.^{6, 7} A ballisztikus vagy félballisztikus járművek, a tüzérségi lövedékek, a torpedók, az aknák és a műholdak ugyanakkor nem tekinthetők drónnak.⁸

Tehát a pilóta nélküli légitársaságok szerepe egyre jelentősebb a légi, a földi és a tengeri műveletekben is. A drónok – a bombákat hatástalanító robotoktól a mini tengeralattjáróig, a hajófedélzetről indítható felderítőhelikopterektől 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.⁹

² Unmanned Aerial Vehicle/Unmanned Aircraft System, pilóta nélküli légitársaság/pilóta nélküli légitársaság-rendszer, drón. ICAO Circular 328. International Civil Aviation Organization, 2011. https://www.icao.int/meetings/uas/documents/circular%20328_en.pdf (Letöltés időpontja: 2023. 02. 19.)

³ Békési László: A pilóta nélküli légitársaságokkal kapcsolatos alapismeretek. Repüléstudományi Közlemények, 2016/3., 159–176. www.repulestudomany.hu/folyoirat/2016_3/2016-3-11-0354_Bekesi_Laszlo.pdf (Letöltés időpontja: 2022. 12. 11.)

⁴ Békési Bertold: Pilóta nélküli légitársaságok jellemzése, osztályozásuk. In: Palik Máttyás (szerk.): Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek. Nemzeti Közszerződési Egyetem, Budapest, 2013, 65–109.

⁵ Suraj G. Gupta et al.: Review of Unmanned Aircraft System (UAS). International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET), Volume 2, Issue 4, 04. 2013, 1646–1658. <https://www.uvxuniversity.com/wp-content/uploads/2014/04/Review-of-Unmanned-Aircraft-System-UAS.pdf> (Letöltés időpontja: 2022. 12. 16.)

⁶ Péter Szegedi – Bertold Békési: Sensors on Board of the Unmanned Aerial Vehicles. In: Proceedings of 19th International Scientific Conference Transport Means, Kaunas, 2015, 219–222.

⁷ Jacob Fraden: Handbook of Modern Sensors – Physics, Designs, and Applications. Fifth edition, Springer, 2016. <https://rizkia.staff.telkomuniversity.ac.id/files/2017/11/Handbook-of-modern-sensors-physics-designs-and-applications-Fraden-Jacob-Springer-2016.pdf> (Letöltés időpontja: 2022. 11. 05.)

⁸ M. Hassanalian – A. Abdelkefi: Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress in Aerospace Sciences, 2017/91., 05. 2017, 99–131. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376042116301348?via%3Dihub> (Letöltés időpontja: 2022. 08. 28.)

⁹ Békési Bertold – Szegedi Péter: Napjaink fegyverrendszer-fejlesztési trendjei. *Economica*, 4/2., 2015, 174–184. https://www.researchgate.net/publication/348400303_Napjaink_fegyverrendszer_fejlesztési_trendjei (Letöltés időpontja: 2023. 02. 17.)

A pilóta nélküli légitársaságok és rendszerek tervezésének, földi és légi üzemeltetésének¹⁰ kulcskérdése a repülésbiztonság, a megbízhatóság^{11, 12} és a biztonság általában. A pilóta nélküli légitársaságok fejlődéstörténetét a hasznosítás szemszögéből megfigyelve leszögezhető, hogy az eddigi életrészek három részre oszthatóak. Az első, amikor fegyverként alkalmazva különféle pusztító eszközöket szereltek rá, helyeztek el benne, és azok segítségével kívánták rombolni, pusztítani a szemben álló fél erőit és eszközeit.¹³ A következő felhasználási mód, amikor légi célként vetették be a légvédelmi erők békeidő kiképzésének biztosítására, harcserű körülményeket nyújtva számukra. A harmadik terület pedig, amikor különféle szenzorokat elhelyezve alkalmassá tették az eszközt a levegőből történő információszerezésre és a megszerzett információ továbbítására, elősegítve ezzel a megalapozott döntések meghozatalát különböző vezetési szinteken, illetve felhasználási területeken.¹⁴ 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 „felnőttté vált, önálló” eszköz „nem igényli” a folyamatos felügyeletet.¹⁵

A megjelenő „problémát” megértve egymástól függetlenül több nemzetközi légi közlekedési és repülésbiztonsági szervezet, valamint nemzeti hatóság kezdte kutatni – az élet szinte minden területén egyre nagyobb szerephez jutó – pilóta nélküli légitársaság-rendszerek szabályozási kérdéseit. Mivel repülőeszközökről van szó, ezért elsősorban a légi közlekedéssel foglalkozó hatóságoknak okoz fejtörést a drónok integrálása a légtérbe. A jogi „értelmezés” és a használható kategóriákba sorolás mellett a drónok technikai fejlődésének íve, iránya, valamint az eszközök képessége, kinézete, felszereltsége, felszerelhetősége és a tudása is megjósolhatatlan jelen pillanatban. A folyamatos fejlődésnek köszönhetően akár rövid időn belül is hatalmas változások következhetnek be, amelyek nagymértékben befolyásolhatják a légitársaságok jövőjét és a repülésről alkotott véleményünket, elképzeléseinket.¹⁶

¹⁰ Békési Bertold et al.: UAV-k légi és földi üzemeltetése. *Economica*, 2013/2., 99–117. <https://ojs.lib.unideb.hu/economica/article/view/4422/4242> (Letöltés időpontja: 2023. 02. 18.)

¹¹ Bertold Békési et al.: Investigation of the Reliability of UAVs. In: *Proceedings of the 16th International Conference Transport Means 2012*. Kaunas, Lithuania, 2012, 101–103.

¹² Reg Austin: *Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment*. John Wiley and Sons, Ltd., Publication, 05. 2010. <https://perpus.univpancasila.ac.id/repository/EBUPT200208.pdf> (Letöltés időpontja: 2023. 02. 18.)

¹³ Major Gábor – Tóth Zoltán: A pilóta nélküli légitársaságok együttműködésének lehetőségei a szárazföldi erőkkel egyes katonai műveletekben. *Repüléstudományi Közlemények*, 2022/1., 61–75. <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/6049/5143> (Letöltés időpontja: 2022. 11. 27.)

¹⁴ Major Gábor: A pilóta nélküli légitársaság-rendszerek nemzetbiztonsági célú felhasználásával kapcsolatos kutatások. *Repüléstudományi Közlemények*, 2015/1., 115–120. http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_1/2015-1-10-0181-Major_Gabor.pdf (Letöltés időpontja: 2022. 11. 18.)

¹⁵ Gajdács László – Major Gábor: Katonai célú drónok fejlesztése a jelenkorban, a jövőt vizionálva. In: *Földi László (szerk.): Szemlények a katonai műszaki tudományok eredményeiből III*. Ludovika Egyetemi Kiadó, Budapest, 2022, 101–120. https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/bitstream/handle/20.500.12944/18471/07_Gyozo-Molnar_Arpad_121-128.pdf?sequence=1 (Letöltés időpontja: 2023. 02. 18.)

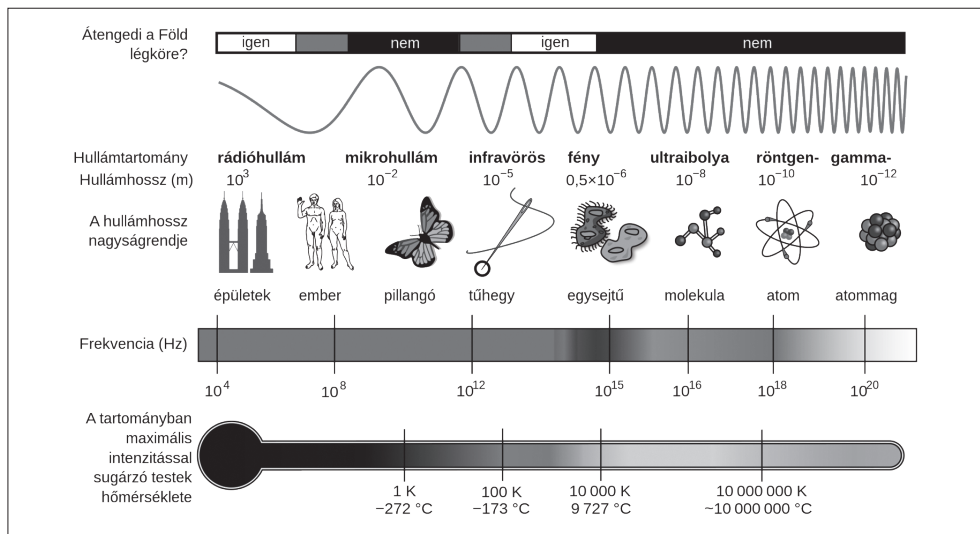
¹⁶ Ujjady András – Major Gábor: A civil drónszabályozáson innen, a katonain túl. *Repüléstudományi Közlemények*, 2021/2., 167–180. <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/5596/4738> (Letöltés időpontja: 2023. 02. 18.)

DRÓNOKKAL KORSZERŰBB LEHET EGY REPÜLŐTÉR?

A repülőtér biztonságos működéséhez számos elengedhetetlen részmunkafolyamat szükséges. Ezek végrehajtása jelenleg emberi erő bevonásával és egy erre felkészített gépjármű segítségével történik. A drónképességek közé sorolhatók az olyan munkák, szolgáltatások, amiket véleményünk szerint arra „felkészített” pilóta nélküli légi járművekkel hatékonyan lehet elvégezni, például felszállópálya-ellenőrzés, madár- vagy vadriasztás, „Follow me” funkció,¹⁷ légszennyezettség- és ABV-mérés, őrzésvédelem, gurulóutak, felszállópálya és légi járművek jégtelenítése, légi járművek sérüléseinek ellenőrzése, repülőtéri tápegységek/vezetékek ellenőrzése stb. A felkészítés alatt a megfelelő szenzorok, kiegészítő elemek megtalálását, kalibrálását, „megtanítását”, mindezeknek a megfelelő hordozó platformra történő illesztését, diverzifikálását és a szükséges jogi környezet, eljárási, alkalmazási módok kidolgozását értjük. A továbbiakban az infravörös érzékelésről és a szenzorokról teszünk említést, amelyek alkalmazása a pályázatunk keretében megvalósuló mintadrón elemeinek részét fogja képezni.

Infravörös érzékelés

Az infravörös (IR¹⁸) sugárzás is használható a drónok segítségével a repülőtér, annak létesítményei és berendezései megfigyelésére, mivel az IR-sugárzás képes megmutatni azt, amit az emberi szem nem lát.



1. ábra Az elektromágneses spektrum, amely különböző tulajdonságokat mutat a frekvenciák és a hullámhosszok tartományában¹⁹

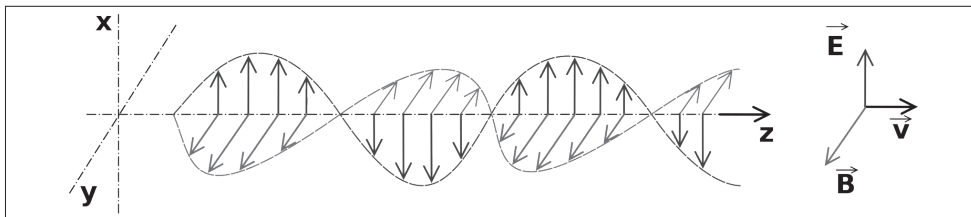
¹⁷ Békési Bertold – Seres József: Drónok alkalmazásának lehetőségei. Repüléstudományi Közlemények, 2020/3., 5–19. <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/5199/4364> (Letöltés időpontja: 2022. 10. 02.)

¹⁸ Infrared.

¹⁹ A hullámok szerepe a kommunikációban. Nemzeti Köznevelési Portál. https://www.nkp.hu/tankonyv/fizika_10_nat2020/lecke_05_026 (Letöltés időpontja: 2022. 09. 24.)

Az elektromágneses sugárzás az elektromágneses mező hullámaiból áll, amelyek a térben terjednek, és elektromágneses sugárzási energiát hordoznak. Idetartoznak: rádióhullámok, mikrohullámok, infravörös, látható fény, ultraibolya, röntgen- és gamma-sugárzás (1. ábra).

Az elektromágneses hullámok két egymásra merőleges elektromos (E) és mágneses (B) mező eredőjéből származnak, amelyek egymást gerjesztik.



2. ábra Elektromos (E) és mágneses (B) mezők²⁰

Az elektromágneses hullámokat jellemzően a következő két fizikai tulajdonsággal írják le: a frekvenciájával (f) és a hullámhosszával (λ). A frekvencia mértékegysége a hertz (Hz) és prefixumai, a kilo- (kHz, 10^3 Hz), a mega- (MHz, 10^6 Hz) és a giga- (GHz, 10^9 Hz). A hullámhossz mértékegysége a méter (m), a prefixumai pedig a kilo- (km, 10^3 m), a milli- (mm, 10^{-3} m), a mikro- (μm , 10^{-6} m) és a nano- (nm, 10^{-9} m). Az elektromágneses hullámok $299\,792\,458\text{ m/s} \approx 3 \times 10^8\text{ m/s}$ sebességgel terjednek, amit fénysebességnek is neveznek, jele: c .²¹

A hullámhossz és a frekvencia fordítottan arányos: azaz minél rövidebb a hullámhossz, annál nagyobb a frekvencia, és fordítva. Ezt az összefüggést a következő egyenlet adja meg:

$$c = \lambda f \quad (1)$$

Ez az összefüggés egy fontos tényt tükröz: minden elektromágneses sugárzás – függetlenül a hullámhosszától vagy frekvenciájától – fénysebességgel terjed.

Az infravörös tartomány $0,7\text{--}300\ \mu\text{m}$ hullámhosszú. Ez a tartomány a következő sávokra oszlik:

- közeli infravörös (NIR²²): $0,7\text{--}1,5\ \mu\text{m}$;
- rövid hullámhosszú infravörös (SWIR²³): $1,5\text{--}3\ \mu\text{m}$;
- középhullámú infravörös (MWIR²⁴): $3\text{--}8\ \mu\text{m}$;
- hosszú hullámhosszú infravörös (LWIR²⁵): $8\text{--}15\ \mu\text{m}$;
- távoli infravörös (FIR²⁶): $15\ \mu\text{m}$ -nél hosszabb.²⁷

²⁰ Les ondes électromagnétiques dans le domaine de la communication. Le CEA. <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/physique-chimie/essentiel-sur-ondes-electromagnetiques-communication.aspx> (Letöltés időpontja: 2022. 06. 12.)

²¹ Christopher Seamount: Applications of Electromagnetic Waves. http://fiden-2.phys.uaf.edu/webproj/213_fall_2017/Christopher_Seamount/page1.html (Letöltés időpontja: 2022. 06. 12.)

²² Near Infrared.

²³ Short Wavelength Infrared.

²⁴ Mid Wavelength Infrared.

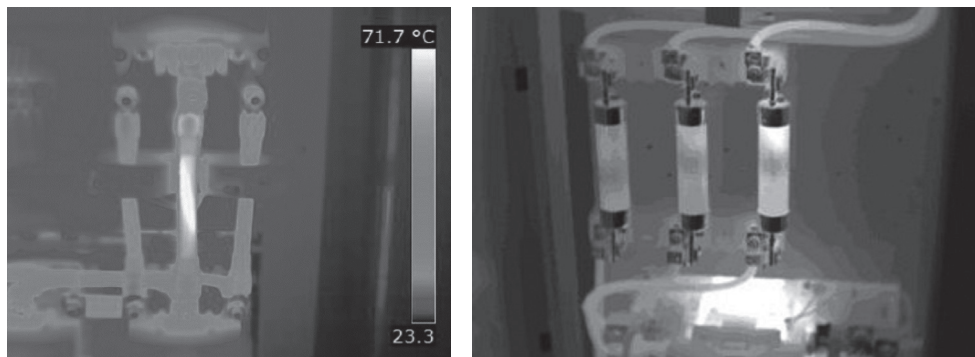
²⁵ Long Wavelength Infrared.

²⁶ Far Infrared.

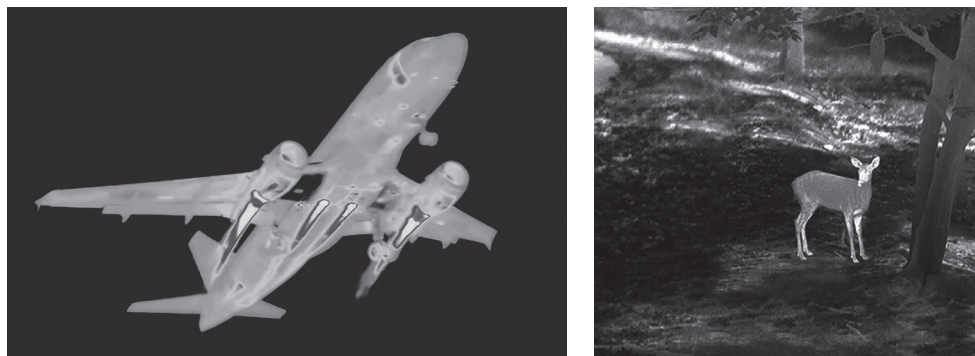
²⁷ Electromagnetic waves. Centre for Remote Imaging, Sensing & Processing (CRIPS). <https://crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/em.htm> (Letöltés időpontja: 2022. 06. 12.)

A NIR-t és SWIR-t visszavert infravörös tartománynak is nevezik, utalva a földfelszínről visszavert napsugárzás fő infravörös komponensére, az MWIR-t és az LWIR-t pedig termikus infravörösnek.^{28, 29}

A repülőtéren és létesítményei, illetve berendezései megfigyelésére az MWIR- és az LWIR-sávokban működő IR-kamerát használhatunk. Ezekkel a kamerákkal vagy IR-kamerákkal felszerelt drónokkal észlelhetjük az eltéréseket a normál működéstől. Egy ipari elektromos biztosítóberendezés terminálja túlzott felmelegedésének (3. ábra), a repülőgép motorjai és a repülőgép vázszerkezete eltéréseinek (4. ábra, a), a repülőtérré behatolóknak (4. ábra, b) ellenőrzésére láthatunk példákat. Ez a módszer képes megelőzni például a tüzet azáltal, hogy időben észleli egy transzformátor vagy egy csatlakozó felmelegedését, amely később tüzet okozhat.



3. ábra Túlmelegedés egy ipari elektromos biztosítékblokkban lévő terminálon^{30, 31}



4. ábra Különböző IR-fotók: a – repülőgép; b – behatoló a repülőtérré^{32, 33}

²⁸ Uo.

²⁹ Nagy István et al.: Műszaki diagnosztika II. Termográfia. BME-OMIK, Budapest, 2007, 70–153.

³⁰ Infrared thermography. Wheeler Power System. <https://wheelerpowersystems.com/infrared-thermography/> (Letöltés időpontja: 2022. 09. 25.)

³¹ Yuvaika Esa Sejahtera: Thermal Imaging Cameras Explained. <https://yuvaikaesasejahtera.com/general/thermal-imaging-cameras-explained/> (Letöltés időpontja: 2022. 09. 25.)

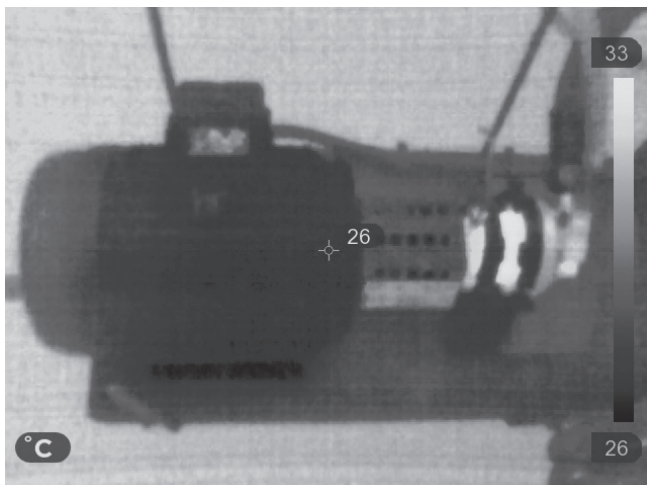
³² Coburn Dukehart: Tyrone Turner Takes Thermal Imaging Up, Up and Away. National Geographic, 03. 03. 2014. <https://www.nationalgeographic.com/photography/article/tyrone-turner-thermal-imaging> (Letöltés időpontja: 2022. 09. 25.)

³³ Guide TU620 Hőkamera. Z-shop. <https://z-shops.eu/termek/guide-tu620-hokamera-celtavcsol/> (Letöltés időpontja: 2022. 09. 25.)

Az infravörös kamerákkal felszerelt drónok vizuális képet mutatnak, így nagy területen összehasonlítható a hőmérséklet. Képes a mozgó célpontok valós időben történő befogására és folyamatos követésére, valamint képes a meghibásodások megelőzésére. Ez megvalósítható azáltal, hogy a termokamera érzékeli a magasabb hőmérsékletű alkatrészt, ami a meghibásodás előjele lehet, így megelőzhető egy későbbi akár nagyobb anyagi kárral rendelkező meghibásodás, leállás is. Például egy jól működő villanymotorról készült kép látható az 5. ábrán. Ha a csapágy túlmelegedne, az jól kivehető lenne az infraképen.

A túlmelegedést okozhatja:

- túl sok vagy kevés kenőanyag;
- szennyeződés a kenőanyagban;
- túlterhelés;
- csapágysérülés stb.



5. ábra Villanymotor infravörös képe³⁴ (Fotó: Szilvássy László)

A termokamera más módszerek számára hozzáférhetetlen vagy veszélyes területeken történő mérésre vagy megfigyelésre is alkalmazható. A termográfia roncsolásmentes vizsgálati módszer, ami használható tengelyek, csövek és más fém- vagy műanyag alkatrészek hibáinak detektálására, de akár sötét területeken lévő tárgyak felderítésére is.

MIT KEZDJÜNK A FEDÉLZETI SZENZOROK ADATAIVAL?

Ebben a fejezetben az egyik jövőbeli forogatókönyvünket vizsgáljuk meg, ahol a méréseink eredményeként viszonylag hosszú időközönként kis mennyiségű adatot kapunk, és a fedélzeti tárolás mellett azt egy földi állomásra is le szeretnénk sugározni. Eleinte az állomások – az érzékelőt tartalmazó egység, azaz az úgynevezett *sensornode* és az átvjáró – közötti várható távolság bő 10 km volt, majd egy nagyobb távolságot is áthidalni képes megoldásban gondolkodtunk. A követelmények időközben finomodtak, és jelenleg a legvalószínűbb legnagyobb áthidalandó távolság 2 km, ami később persze újra valamivel nagyobb is lehet.

³⁴ Nagy István, Baksai Gábor, Sólyomvári Károly: Műszaki diagnosztika II. Termográfia, BME-OMIK, 2007, 82.

Mivel a követelmények a felmerülő igényeknek megfelelően rugalmasan változhatnak, ezért olyan rendszerre van szükségünk, amely ezt egy bizonyos mértékig követni is tudja. Emiatt a szenzorrendszerünk a távközlési hálózatoktól megszokottan réteges felépítésű, hogy megkönnyítse a jövőbeli módosításokat, így a rádiós (fizikai) rendszert viszonylag egyszerű optimalisabbra változtatni. Megnövekedett adatmennyiségnél ez szükséges is lehet, ugyanis előállhat olyan eset, amikor az átvitel az adott környezetben a szabályozás miatt nem lehetséges, noha fizikailag a rendszer erre képes lenne. Előbb azonban vizsgáljuk meg, miért is van erre szükség.

A légi jármű fedélzetén végzett valamennyi mérés sarkalatos pontja az, hogy mit kezdünk a kapott adatokkal. Tárolhatjuk a fedélzeten, vagy továbbíthatjuk egy földi állomásra, illetve a redundancia miatt tehetjük egyidejűleg mindkettőt is. Az UAV fedélzeti rendszerei redundanciájának kérdéseit Békési és Wühl munkái vizsgálják^{35,36} és adnak válaszokat a felmerülő biztonsági kihívásokra.

Mik lehetnek a fő peremfeltételek abban az esetben, ha továbbítjuk az adatokat? Például használhatnánk a meglévő kommunikációs infrastruktúrát vagy a mobiltelefonos rendszereket, amelyeknek várhatóan van egy adótornya a közelben, és a legtöbb helyen elérhető, bár áramkimaradás vagy a külső időszinkron kiesése esetén használhatatlan lehet. Vagy használhatunk független rádiórendszereket. A vezeték nélküli kommunikáció (átvitel) tervezésénél mindig felmerül a kérdés, hogy mekkora legyen az átviteli sebesség, mennyi legyen az áthidalható távolság, illetve szóba kerülhet az energiafogyasztás kérdése is. Ezek közül ugyanis csak kettőt választhatunk, mert csak kettőre lehetséges optimalizálni, mert a nagyobb adatátviteli sebesség és távolság több energiát igényel.

A teljesebb kép érdekében a legfontosabb tényezők a következők: átviteli távolság, topológia, adatátviteli sebesség, szabályozó szervezet által meghatározott maximális paraméterértékek, akkumulátor élettartama, fejlesztési költség, egységköltség, méret, tömeg, interoperabilitás (együttműködési képesség), szolgáltatásminőség és skálázhatóság.

Az IOT³⁷ és az M2M³⁸ technológiákban bárki számára elérhető jó megoldások léteznek erre a célra: például a mobilrendszerek (4G/5G), Zigbee, Bluetooth, Wi-Fi és az LPWAN.³⁹ Az LPWAN-ok kis teljesítményigényű nagy kiterjedésű hálózatok, melyek egyaránt léteznek engedélykötelessként (LTE, NB-IoT) és nem engedélykötelessként (Sigfox, LoRa). Nem szándékozunk azonban meglévő kommunikációs infrastruktúrát felhasználni, hogy minél nagyobb mértékben csökkentjük a függőségünket a külső infrastruktúrától, ezért elsődleges célokra a LoRa-t választottuk a nem licencelték közül. Ugyanakkor ennek is megvannak a maga korlátai. Azért, hogy megfeleljünk az EU-ban érvényben lévő szabályozásoknak, az átvitel kitöltési tényezője – csatornától függően – maximum napi 0,1–1% lehet.^{40,41}

³⁵ Bertold Békési: Redundancy on Board of UAVs – Energy Systems. Proceedings of the 16th International Conference Transport Means 2012. Kaunas, Lithuania, 2012, 158–161.

³⁶ Bertold Békési – Tibor Wühl: Redundancy for micro UAVs – control and energy system redundancy. Proceedings of the International Conference Deterioration, Dependability, Diagnostics 2012. Brno, Czech Republic, University of Defence, 2012, 123–130.

³⁷ Internet of Things.

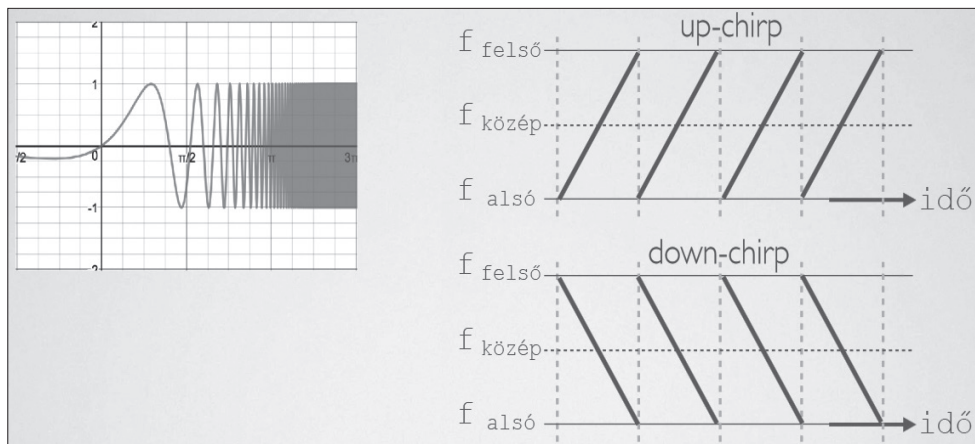
³⁸ Machine-to-Machine.

³⁹ Low Power Wide Area Networks.

⁴⁰ Eric Bourbeau: LoRa – LoRa Documentation. 2018. <https://lora.readthedocs.io/en/latest/#> (Letöltés időpontja: 2022. 08. 26.)

⁴¹ LoRaWAN™ 1.0.3 Specification. LoRa Alliance, 2018. <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan1.0.3.pdf> (Letöltés időpontja: 2022. 09. 05.)

A LoRa a Long Range (nagy hatótávolság) rövidítése, és a Semtech cég fejlesztette ki. Modulációként a LoRa a CSS⁴² néven elterjedt szórt spektrumú technikát használja (6. ábra). Az EU-ban a 868 MHz-es ipari, tudományos és orvosi (ISM⁴³) sávot használja.



6. ábra Lora CSS idő- és frekvenciatartományban⁴⁴ (Szerkesztette: Jámbor Krisztián)

A 6. ábrán szereplő angol nyelvű kifejezések (*up-chirp* és *down-chirp*) alatt a spektrumban történő felfelé, illetve lefelé seprést értik. Mielőtt azonban egy megoldást használnánk, meg kell vizsgálnunk, hogy az megfelel-e a követelményeinknek. Első ránézésre a hatótávnak bőven meg kellene felelnie, hiszen a LoRa-rendszert mindenhol úgy kezelik, mint amely képes 20 km távolságot áthidalni. Ráadásul a világsúcs bő 700 km-es távolság volt. A helyzet azonban ennél árnyaltabb. Előfordulhat, hogy egy nem optimálisan kialakított rendszer ritkán lakott területen nem tud 400–500 m távolságnál többet megbízhatóan áthidalni optikai rálátással sem – terepi mérés 2022 őszén 1,5 m magasan elhelyezett körsugárzó antennákkal.⁴⁵

Tehát ez a vizsgálat nem egyszerű feladat, mivel számos tényezőt figyelembe kell venni. Ha egy egyszerű becslést szeretnénk végezni, akkor egyszerűbb megoldásra van szükségünk. A rádióátviteli csatorna minőségének egyik egyszerűbben kezelhető mutatója a *link budget*,⁴⁶ amely az adó teljesítményből (TX⁴⁷), a szabadtéri veszteségből (FSPL⁴⁸ – energiaveszteség a szabad térben, miközben a jel az adótól a vevőig halad), az antennaerősítésből, a vevő érzékenységből (RX⁴⁹) áll. A vizsgálatot nyílt terepet figyelembe véve végezzük, nem vesszük figyelembe a lakott területeken és a közelükben található épületek hatásait.

⁴² Chirp Spread Spectrum.

⁴³ Industrial, Scientific and Medical. Az egyik engedélymentes sáv, amely 863–870 MHz között található.

⁴⁴ Bourbeau: i. m. 40.

⁴⁵ Allaga Dániel saját mérései alapján.

⁴⁶ A kapcsolat költségvetése, a teljesítmények és a veszteségek összege az adótól a vevőig.

⁴⁷ Transmitter Power.

⁴⁸ Free Space Loss.

⁴⁹ Receiver Sensitivity.

Ha meg szeretnénk becsülni a szolgáltatásunk maximális hatósugarát, hogy ellenőrizhessük, vajon a megoldás megfelel a követelményeinknek, akkor ezt a paramétert kell tüzetesebben megvizsgáljunk. Alkalmos-e arra, hogy megbecsüljük egy kapcsolat maximális távolságát vagy alkalmazhatóságát egy adott távolságon? Természetesen a kivitelezésnél más paramétereket is figyelembe kell vennünk, de egy hozzávetőleges becslésnek megfelel.

Az EU-s előírások korlátozzák e paraméterek némelyikét: Az adóteljesítmény 25 mW-ra (14 dBm) és a maximális antennanyereség 2,15 dBi-re van korlátozva. Ezt persze csökkentheti az a tény, ha nem áll rendelkezésre megfelelő energia.

Az effektív izotróp kisugárzott teljesítmény ($EiRP^{50}$) a következő egyenlet segítségével határozható meg (a kábel veszteségét rövid kábelt tekintve 1 dB értékkel vettük figyelembe):

$$\begin{aligned} EiRP &= TX - \text{kábel veszteségek} + \text{antenna erősítés} = \\ &= 14 \text{ dBm} - 1 \text{ dB} + 2,15 \text{ dB} = 15,15 \text{ dBm} \end{aligned} \quad (2)$$

A szabadtéri veszteség (FSPL) kiszámítására létezik egy széles körben használt logaritmikus képlet:

$$\begin{aligned} FSPL_{dB} &= 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) - 20 \log_{10} \frac{4\pi}{c} = \\ &= 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(868) + 120 - 147,55 \end{aligned} \quad (3)$$

ahol d – a vevő és az adó közötti távolság méterben; f – a frekvencia MHz-ben (innen $a + 120$ dB, eredetileg hertzben van megadva); c – a fény sebessége vákuumban. Ez 97,24 dB 2 km-en.

A vevő érzékenységének egyenletét használva:

$$RX = 10\log_{10}(kTB) + 10\log_{10}(BW) + NF + SNR = -174 + 10\log_{10}(125\ 000) + 6 - 7,5 \quad (4)$$

ahol kTB – a teljes termikus zajteljesítmény szobahőmérsékleten számolva; BW – sáv szélesség Hz-ben (125 000); NF – zajtényező dB-ben (úgynevezett zajszám,⁵¹ ökol szabályként általában 6 dB-lel számolunk az átjárókon, a gyakorlatban azonban az érték valamivel alacsonyabb); SNR^{52} – jel-zaj viszony, amely $-7,5$ dB-nek felel meg az $SF7$ használatával (lásd az 1. táblázatot). A szórás tényező (SF^{53}) a szimbólumsebesség és a chipsebesség aránya, amely a 7–12 közötti tartományban lehet.⁵⁴

⁵⁰ Effective Radiated Power – az az energia, amelyet az adó egy megadott adóteljesítmény esetén kibocsátana, ha az antenna minden irányba egyenletesen sugározna (izotróp sugárzó). Az antennanyereség és az adóteljesítmény szorzata. Itt a logaritmikus tárgyalás miatt az összegük szerepel.

⁵¹ Az eszközünk negatívan befolyásolja a jel-zaj arányt, így a kimeneten rosszabb SNR-t kapunk, mint a bemeneten.

⁵² Signal to Noise Ratio.

⁵³ Spreading Factor.

⁵⁴ Eduardo Sallum et al.: Improving Quality-Of-Service in LoRa Low-Power Wide-Area Networks through Optimized Radio Resource Management. Journal of Sensor and Actuator Networks, 2020/1., 08. 02. 2020. <https://www.mdpi.com/2224-2708/9/1/10> (Letöltés időpontja: 2022. 08. 26.)

⁵⁵ 20 byte/csomag és a kódolási arány = 4/5 érték esetén.

1. táblázat Jel-zaj viszony (SNR) a szórási tényező értékek (SF) szerint
(Készítette: Békési Bertold alezredes)

SF	Chipek/szimbólum	Jel-zaj viszony	Átviteli idő ⁵⁵ [ms]	Bitsebesség [bps]
7	128	-7,5	56,5	5469
8	256	-10	-103	3125
9	512	-12,5	185,3	1758
10	1024	-15	371	977
11	2048	-17,5	741	537
12	4096	-20	1318,9	293

Ahogy az elemi információnak a bit, úgy a chip a szórt spektrumú átviteleknél az adatsozotatnak az alapvető bináris eleme, és elkerülendő a félreértést, szándékosan nevezik a bittől eltérően. A bit az információ legkisebb egysége. Amennyiben egy csatornán át szeretnénk vinni, egy vagy több bitet összefogva valamilyen szimbólumokkal reprezentáljuk. Ebből az is látható, hogy a szimbólumsebesség kisebb vagy egyenlő a bitsebességgel, hiszen több bitet is magába foglalhat. Esetünkben a szimbólum az ún. *chirp*, ami alapesetben egy f_{min} -től f_{max} -ig tartó lineáris seprést jelent a frekvenciában up-chirp esetén, f_{max} -tól f_{min} -ig tartó seprést pedig *down-chirp* esetén. Az adathordozó *chirp*-ök ciklikusan eltoltak frekvenciában (lásd 6. ábra).

A szórt spektrumú átvitel ötlete onnan ered, hogy az adatot valamilyen sávészélességben szétterítjük a frekvenciaspektrumban, így az sokkal redundánsabb lesz, sokkal kevésbé lesz érzékeny a zavaró hatásokra. Ugyanezt a hatást keskenyebb sávon csak nagyobb kisugárzott teljesítménnyel érhetnénk el, ami jobban zavarná a környező átviteli csatornákat. A szórási tényező két dolgot határoz meg:

- a chipek számát szimbólumonként 2^{SF} ;
- illetve a nyers bitek számát, amely egy szimbólumba kódolható, azaz amit a szimbólum reprezentál.

A magasabb szórási tényező növeli a jel-zaj viszonyt és a rádió érzékenységét, ezzel az átviteli távolságot és a csomagok átviteli idejét, épp ezért viszont csökkenti az adatátviteli sebességet és növeli az energiafelhasználást. A vevő antennanyereség sem lehet tetszőlegesen nagy és nemcsak a fizikai adottságok korlátozzák, hanem a szabályozások is.

A teljes termikus zajteljesítmény egyenletét használva:

$$kTB = 30 + 10 \log_{10} (k \times T \times B) \quad (5)$$

ahol k – a Boltzmann-állandó [Joule/K], T – a hőmérséklet Kelvinben, B – a csatorna sávészélessége hertzben, és +30 dB, hogy dBW helyett dBm-ben kapjuk az eredményt. A mi -174 dBm értékünk azt jelenti, hogy a hőmérséklet 290 K, a (referencia) sávészélesség pedig 1 Hz.⁵⁶

Az Rx érzékenységünk $-124,5$ dBm-nek felel meg. Ebből kiszámíthatjuk a kapcsolat költségvetését (*link budget*) antennaerősítés nélkül.

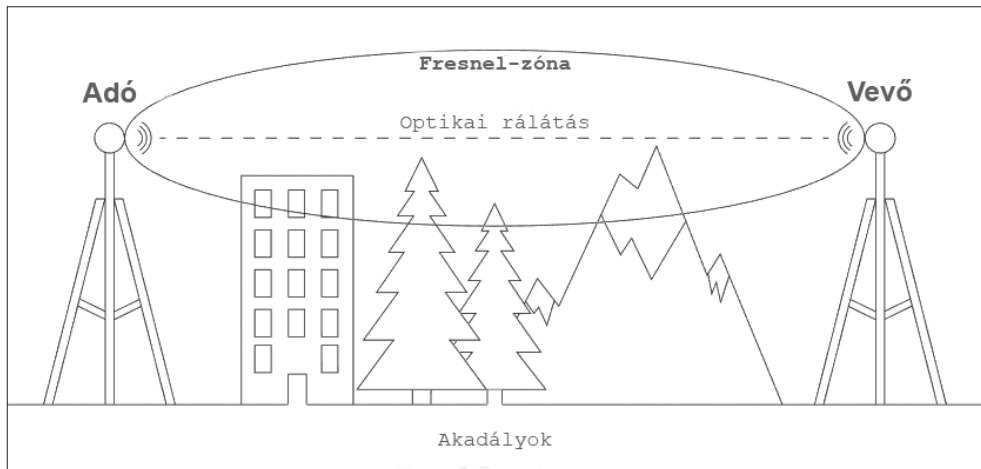
⁵⁶ Dennis Layne: Receiver Sensitivity and Equivalent Noise Bandwidth. High Frequency Electronics, 2014. https://www.highfrequencyelectronics.com/index.php?option=com_content&view=article&id=553:receiver-sensitivity-and-equivalent-noise-bandwidth (Letöltés időpontja: 2022. 11. 22.)

$$\text{kapcsolat költségvetése} = \text{vevőérzékenység} - \text{adóteljesítmény} \quad (6)$$

Mivel az adóteljesítmény 14 dBm, a kapcsolat költségvetése $-138,5$ dB. Ez a megoldás első megközelítésben alkalmazható, és még mindig van mozgáster a strukturális csillapításokra. Természetesen ez csak egy durva becslés közvetlen látótávolsággal, a gyakorlatban más tényezők is vannak, amelyek csillapítóként hatnak – például az említett strukturális csillapítások vagy a *fading* jelenség általi akár 20–30 dB csillapítás, nagyobb távolságok esetén a földfelszín görbületét is figyelembe kell venni stb. Azaz egy második körben érdemes ezt a vizsgálatot pontosabban is elvégezni, most azonban csak azt szeretnénk tudni, hogy ez a megoldás eleve kizárandó-e.

Az antennák elhelyezéséhez tanácsos megvizsgálni a Fresnel-zónát is. Ez az adó és a vevő közötti szabad tér egy bizonyos ellipszis alakú területe, és az ezen a területen lévő akadályok a szabad látószögtől függetlenül negatívan hatnak a jelre. (Tehát nem feltétlenül elég a közvetlen optikai rálátás.)

Ökölszabályként a Fresnel-zónának (7. ábra) mindig mentesnek kellene lennie az akadályoktól, viszont ez a gyakorlatban általában nem megvalósítható, ezért „az a szabály”, hogy 40%-os elzáródás felett a jelvesztés jelentős lesz,⁵⁷ tehát a zóna keresztmetszetének legalább 60%-ban szabadnak kell lennie.



7. ábra Fresnel-zóna⁵⁸ (Szerkesztette: Jámbor Krisztián)

Ennek a 60%-ban szabad keresztmetszetű zónának a sugarát a következő képlettel lehet kiszámítani (a sík nem veszi figyelembe a Föld görbületét):

$$F_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{60\% \times c \times D}{f}} = 8,656 \sqrt{\frac{0,6 \times d [\text{km}]}{f [\text{GHz}]} } = 8,656 \sqrt{\frac{1,2}{0,868}} = 10,18 \text{ m} \quad (7)$$

⁵⁷ Bourbeau: i. m. 40.

⁵⁸ Piotr Daniłowski: What is the real range of LoRa? Yosensi.io, 22. 12. 2021. https://yosensi.io/posts/what_is_the_real_range_of_lora/ (Letöltés időpontja: 2021. 12. 22.)

Az egyik forgatókönyvünkben sokkal több olyan adatot kapunk a mérésekből, amelyet nem tudnánk a LoRa-n keresztül küldeni a távközlési szabályozások megsértése nélkül, ezért a fedélzeten tároljuk is az adatokat egy nem felejtő memóriában a későbbi kiértékeléshez, és csak egy részét visszük át. Későbbi terveink szerint, ha mégis valós időben lenne szükségünk az összes adatra, akkor egy másik rádiósávon és berendezésen keresztül továbbítanánk.

KÖVETKEZTETÉSEK

A pilóta nélküli légi jármű-rendszerek jelentős előnyei miatt számtalan publikáció, tanulmány és pályázat foglalkozik a drónok alkalmazásának lehetőségével. Ebben a tanulmányban a szerzők áttekintették és összefoglalták az infravörös érzékelés alapjait, valamint megvizsgálták az egyik jövőbeli forgatókönyvet, ahol viszonylag hosszú időközönként kis mennyiségű adatot kell majd mérni, és a fedélzeti tárolás mellett azt egy földi állomásra is lesugározni. A szerzők kezdeti feltételezései szerint kezdetben az állomások (érzékelőcsomópont és átjáró) közötti várható távolság 10+ km, most viszont realisan a legmegvalósíthatóbb távolság 2 km, ami később, a projekt előrehaladtával természetesen nagyobb is lehet. Az alkalmazni kívánt szenzorrendszer rétegzett, hogy megkönnyítse a jövőbeli módosításokat, így a rádiós rendszert viszonylag egyszerűbb optimalizálni. Mindezen eszközök egy, a projekt feladatainak elvégzéséhez szükséges nagy (kb. 8 kg) teherbírású drón beszerzését teszik szükségessé, a piackutatási és a beszerzési folyamat elkezdődött. A *quadrocopter* megérkezése, üzembe helyezése és a rendszerek installálása után következhetnek azok a valós mérések, amelyeket addig elméleti síkon kell szimulálni, értékelni, elemezni a bemutatott elméleti alapok és kiinduló paraméterek ismeretében.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- A hullámok szerepe a kommunikációban. Nemzeti Köznevelési Portál. https://www.nkp.hu/tankonyv/fizika_10_nat2020/lecke_05_026
- Austin, Reg: *Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment*. John Wiley and Sons, Ltd., Publication, 05. 2010. <https://perpus.univpancasila.ac.id/repository/EBUPT200208.pdf>
- Békési Bertold: *Pilóta nélküli légi járművek jellemzése, osztályozásuk*. In: Palik Mátyás (szerk.): *Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek*. Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Budapest, 2013, 65–109.
- Békési Bertold: *Redundancy on Board of UAVs – Energy Systems*. Proceedings of the 16th International Conference Transport Means 2012. Kaunas, Lithuania, 2012, 158–161.
- Békési Bertold – Novák Mátyás – Kárpáti Attila – Zsigmond Gyula: *Investigation of the Reliability of UAVs*. Proceedings of the 16th International Conference Transport Means 2012. Kaunas, Lithuania, 2012, 101–103.
- Békési Bertold – Papp István – Szegedi Péter: *UAV-k légi és földi üzemeltetése*. *Economica*, 2013/2., 99–117. <https://ojs.lib.unideb.hu/economica/article/view/4422/4242>
- Békési Bertold – Seres József: *Drónok alkalmazásának lehetőségei*. *Repüléstudományi Közlemények*, 2020/3., 5–19. <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/5199/4364>; DOI: 10.32560/rk.2020.3.1
- Békési Bertold – Szegedi Péter: *Napjaink fegyverrendszer fejlesztési trendjei*. *Economica*, 4/2., 2015, 174–184. https://www.researchgate.net/publication/348400303_Napjaink_fegyverrendszer_fejlesztési_trendjei; DOI: 10.47282/ECONOMICA/2015/8/4/2/4603

- Békési Bertold – Wühl Tibor: *Redundancy for micro UAVs – control and energy system redundancy*. Proceedings of the International Conference Deterioration, Dependability, Diagnostics 2012. Brno, Czech Republic, University of Defence, 2012, 123–130.
- Békési László: *A pilóta nélküli légitárművekkel kapcsolatos alapismeretek*. Repüléstudományi Közlemények, 2016/3., 159–176. www.repulestudomany.hu/folyoirat/2016_3/2016-3-11-0354_Bekesi_Laszlo.pdf
- Bourbeau, Eric: *LoRa – LoRa Documentation*. 2018. <https://lora.readthedocs.io/en/latest/#>
- Daniłowski, Piotr: *What is the real range of LoRa?* Yosensi.io, 22. 12. 2021. https://yosensi.io/posts/what_is_the_real_range_of_lora/
- Dukehart, Coburn: *Tyrone Turner Takes Thermal Imaging Up, Up and Away*. National Geographic, 03. 03. 2014. <https://www.nationalgeographic.com/photography/article/tyrone-turner-thermal-imaging>
- Electromagnetic waves. Centre for Remote Imaging, Sensing & Processing (CRIPS). <https://crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/em.htm>
- Fraden, Jacob: *Handbook of Modern Sensors – Physics, Designs, and Applications*. Fifth edition, Springer, 2016. <https://rizkia.staff.telkomuniversity.ac.id/files/2017/11/Handbook-of-modern-sensors-physics-designs-and-applications-Fraden-Jacob-Springer-2016.pdf>
- Gajdács László – Major Gábor: *Katonai célú drónok fejlesztése a jelenkorban, a jövőt vizionálva*. In: Földi László (szerk.): *Szemelvények a katonai műszaki tudományok eredményeiből III*. Ludovika Egyetemi Kiadó, Budapest, 2022, 101–120. https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/bitstream/handle/20.500.12944/18471/07_Gyozo-Molnar_Arpad_121-128.pdf?sequence=1
- Guide TU620 Hőkamera. Z-shop. <https://z-shops.eu/termek/guide-tu620-hokamera-celtavcs/>
- Gupta, Suraj G. – Ghonge, Manges M. – Jawandhiya, P. M.: *Review of Unmanned Aircraft System (UAS)*. International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET), Volume 2, Issue 4, 04. 2013, 1646–1658. <https://www.uxvuniversity.com/wp-content/uploads/2014/04/Review-of-Unmanned-Aircraft-System-UAS.pdf>
- Hassanalian, M. – Abdelkefi, A.: *Classifications, applications, and design challenges of drones: A review*. Progress in Aerospace Sciences, 2017/91., 05. 2017, 99–131. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376042116301348?via%3Dihub>; DOI: 10.1016/j.paerosci.2017.04.003
- ICAO Circular 328. International Civil Aviation Organization, 2011. https://www.icao.int/meetings/uas/documents/circular%20328_en.pdf
- Infrared thermography. Wheeler Power System. <https://wheelerpowersystems.com/infrared-thermography/>
- Layne, Dennis: *Receiver Sensitivity and Equivalent Noise Bandwidth*. High Frequency Electronics, 2014. https://www.highfrequencyelectronics.com/index.php?option=com_content&view=article&id=553:receiver-sensitivity-and-equivalent-noise-bandwidth
- Les ondes électromagnétiques dans le domaine de la communication. Le CEA. <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/physique-chimie/essentiel-sur-ondes-electromagnetiques-communication.aspx>
- LoRaWAN™ 1.0.3 Specification. LoRa Alliance, 2018. <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan1.0.3.pdf>
- Major Gábor: *A pilóta nélküli légitármű rendszerek nemzetbiztonsági célú felhasználásával kapcsolatos kutatások*. Repüléstudományi Közlemények, 2015/1., 115–120. http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2015_1/2015-1-10-0181-Major_Gabor.pdf
- Major Gábor – Tóth Zoltán: *A pilóta nélküli légitárművek együttműködésének lehetőségei a szárazföldi erővel egyes katonai műveletekben*. Repüléstudományi Közlemények, 2022/1., 61–75. <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/6049/5143>; DOI: 10.32560/rk.2022.1.4
- Nagy István – Baksai Gábor – Sólyomvári Károly: *Műszaki diagnosztika II. Termográfia*. BME-OMIK, Budapest, 2007, 70–153.

- Sallum, Eduardo – Pereira, Nuno – Alves, Mário – Santos, Max: *Improving Quality-Of-Service in LoRa Low-Power Wide-Area Networks through Optimized Radio Resource Management*. Journal of Sensor and Actuator Networks, 2020/1., 08. 02. 2020. <https://www.mdpi.com/2224-2708/9/1/10>; DOI: 10.3390/jsan9010010
- Seamount, Christopher: *Applications of Electromagnetic Waves*. http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/213_fall_2017/Christopher_Seamount/pagel.html
- Sejahtera, Yuvaika Esa: *Thermal Imaging Cameras Explained*. <https://yuvaikaesasejahtera.com/general/thermal-imaging-cameras-explained/>
- Szegedi Péter – Békési Bertold: *Sensors on Board of the Unmanned Aerial Vehicles*. Proceedings of 19th International Scientific Conference Transport Means, Kaunas, 2015, 219–222.
- Ujjady András – Major Gábor: *A civil drónszabályozáson innen, a katonain túl*. Repüléstudományi Közlemények, 2021/2., 167–180. <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/5596/4738>; DOI: 10.32560/rk.2021.2.12