

Makkay Imre¹

ELEKTROAKUSZTIKAI ELJÁRÁSOK LÉGIJÁRMŰVEK FELDERÍTÉSÉRE²

A légi járművek helyzetének, mozgásának meghatározása az általuk kibocsátott hanghullámok is lehetőséget adnak. Ez a korai légvédelemben használt eljárás – korszerű eszközökkel – különösen értékes lehet a csekély radar visszaverő felülettel rendelkező objektumok felderítése esetén. Néhány példán keresztül olyan – ma még nem széles körben alkalmazott – elektroakusztikai eljárásokat mutatunk be, amelyek a légvédelem mellett a polgári repülés szervezői számára is hasznos információkkal szolgálnak.

ELECTRO-ACOUSTIC PROCEDURES FOR AIRCRAFT DETECTION

Determination of the position and movement of the aircraft, the sound waves emitted by them allow. It is used for air defense early in the process - modern instruments - may be particularly valuable in the case of objects in low radar reflectivity. Through a few examples - are still not widely used - electroacoustic procedures are presented, in addition to the air defense provide useful information for the organizers of civil aviation.

BEVEZETÉS

A különböző céllal (személyek, terhek szállítása) a levegőben lévő járművek helyzetét, mozgását a jármű vezetőjének jelentése, lesugárzott helyzetinformációi alapján, vagy külső (földi, légi) érzékelők segítségével tudjuk követni. A (jó szándékú) repülőgépek a szükséges információkat, jelzéseket maguk küldik a légi irányítás számára – szolgálva ezzel a saját és más repülőgépek biztonságát.

Az idegen, nem kommunikáló légi járműveket „légi célokat” az árulkodó jeleik – hang, hő, radar, lidar, látható kép – alapján lehet felderíteni és követni. A „footprint” a légi célok számára életveszélyt jelent, ezért mindent megtesznek annak csökkentésére.

A repülések kezdetekor a motorzaj alapján határozták meg a repülőgépek irányát hallótölcse és „fülő állomásokkal”. Az őket hamarosan kiszorító RADAR (Radio Direction and Ranging) a nevében is jelzett irány és távolságmérés segítségével már térbeli helyzetet is tudott közölni és hatótávolsága, pontossága egyre javult. A radar rádióhullámokat bocsát ki, majd veszi a repülőgép fémből, vezető anyagból készült alkatrészei által reflektált jeleket. A repülőgép felépítése, alakja nagymértékben befolyásolja a visszavert jel nagyságát. A radar számára ideális a sík fémlapokból összeállított sarokreflektor, vagy a Luneberg-lencse – ezek verik a legtöbb jelet vissza. A katonai repülőgépek konstruktőrei ennek ellenkezőjére, a kis „hatásos radarkeresztmetszet” elérésére, a „lopakodásra” törekednek: különleges elnyelő anyagokkal borítják a fémfelületeket, kerülnek a derékszöget, ahol csak lehet, műanyagot alkalmaznak, a hajtómű hőjét gondosan árnyékolják. A továbbiakban a légi járművek nem-radaralapú felderítésének egyik lehetőségét, az elektroakusztikai eszközöket és eljárásokat tekintjük át részletesebben.

¹ nyugállományú okleveles mérnök ezredes, egyetemi tanár, drmi48@gmail.com

² Lektorálta: Dr. Szilvássy László alezredes, egyetemi docens, NKE Katonai Repülő Tanszék, szilvassy.laszlo@uni-nke.hu

A légi járművek által keltett zaj a környezetvédők egyik célpontja – nem véletlenül. A levegőből szinte akadálytalanul felénk tartó hanghullámok forrását keresve önkéntelenül is felnézünk az égre – és jó eséllyel meg is találjuk annak okozóját. Ez igaz nem csak a „csíkot húzó” nagyságokra, hanem a jóval kisebb és alacsonyabban repülő „General Aviation” tagjaira. A szorgalmasan hallgatózók/bosszankodók felismerik a gázturbinás, turbó-propelleres, dugattyús hajtóműveket – a hivatásukat innen választóknak még a típus-, állapot-, (lajstromjel) sem marad titokban.

A hang felismerése az emberi agy képességén alapul – így ismerjük fel akár a telefon torz hangjából is azt, akinek a „hangképe” már emlékeinkben szerepel. A technikai eszközökkel végzett hangfelismeréshez a spektrális összetevőkre bontás és azzal való matematikai műveletek szükségesek. [1] A radartechnikában is teret nyert spektrum spektrumának – azaz a cepstrumnak [2][3] – a kiszámítását ma már jelprocesszorok végzik, olyan biztonsággal, hogy akkor is felismerik a személyt/járművet, ha annak hangját mesterségesen próbálják eltorzítani. A repülésirányításban sikerrel alkalmazzák az azonos csatornán folytatott, több résztvevős kommunikáció tagjainak azonosítására. [4] Az „akusztikus ujjlenyomat” alapján akár az azonos típusú légijárművek között is lehet különbséget találni – ha erre van szükség.

A kültéri akusztikus felderítést általában nem tudjuk környezeti zajtól mentes közegben végrehajtani. Az egyik lehetséges technikai megoldás az átlagzaj „szembefordítása”, azaz kivonása a hasznosítandó jelből, a másik, az erőteljes térbeli szelekció alkalmazása. A gyakorlatban ezek kombinációját használják – az adott feladathoz illeszkedve. A háttérzajban végzett hangfelismerés elmélete és megvalósítása található meg John H.L. Hansen DSPL-92-5 munkájában. [5]

A légijárművek hangja a következő összetevőkből épül fel:

- a sárkányszerkezet (szárny, törzs, kerekek, kiálló alkatrészek) és a levegő aerodinamikai súrlódása, légörvényei által keltett zaj – ami megfigyelhető a hajtómű nélkül sikló (vitorlázó) repülőgépeknél. A teljesítményszintje alacsony, viszont a frekvenciája jellegzetesen magas, „sziszegő” tartományú, ami a háttérzajtól való megkülönböztetést elősegítheti;
- a hajtómű saját zaja, ami a működése közben keletkező súrlódás, gyors égés, gázok be és kiáramlása következtében jön létre. Ennek nagyságrendje általában jóval meghaladja a sárkányszerkezeten keletkező zajokat – kivéve az egyre elterjedőben lévő elektromotoros hajtást. [6] Ez utóbbi hangja gyakorlatilag észlelhetetlen – mint ahogy a jól ki egyensúlyozott villanymotor hangját néhány méterről alig halljuk;
- a légsavarok és a levegő közötti súrlódás a lapátokról leváló örvényekkel együtt szintén alacsony teljesítményszintű, közepes és magas hangtartományú zajt produkál. A hang magassága, intenzitása függ a légsavar fordulatszámától, a légsavar alakjától és a lapátok számától. A helikopterek rotorjának jellegzetesen „csattogó” hangja a motorzajt is felülmúlhatja;
- a zajok legnagyobb hányadáért a haladást biztosító légtömeg mérete és sebessége a felelős. A torlósugaras és gázturbinás hajtásnál kis átmérőn préselődik ki nagy légtömeg – ez jelentős zajjal jár. Az ideális, ha a repülőgép sebességét legfeljebb ötszörösen haladja meg a hajtásra szolgáló légtömeg sebessége – ez csak a nagyméretű légsavart használó merevszárnyú repülőgépeknél valósítható meg.



1. ábra A zajforrások egy fel/leszálló repülőgépnél ³

A légi járművek által keltett zaj csökkentésére világszerte nagy kutató potenciálokat mozgósítanak – az eredményeikben szerepelnek azok a „tovább már nem csökkenthető” értékek, melyek a felderítés számára biztos támpontokat adhatnak. [7][8][9][10]

Hangfelderítéssel a légi jármű repülése közben keletkezett zaj intenzitása, spektruma/cepstruma, és a forrás iránya/helyzete határozandó meg. Összehasonlítva már korábban vett, eltárolt hangképekkel, a légi jármű kategóriája, típusa, egyedi azonosítója is felismerhető. A dB (SPL – sound pressure level) – akusztikus hangnyomás alapértéke a 0 dB, mely az emberi hallásküszöböt jelenti (egy szűnyog hangja 3 m-ről). Az elektronikai erősítő technikákkal ennek töredékéből lehet hangot elérni – ráadásul „szelektíven”, ami a cél-hangforrás kiemelését és a zavaró környezet elnyomását jelenti.

Ma már számos olyan légi járművel találkozhatunk – a hobby/sport, vagy akár a felderítő/támadó légi cél kategóriában – amelyekről nem, vagy csak nagyon alacsony szintű radarjel verődik vissza. Ilyenek a siklóernyősök (PG – ParaGlider) amelyek nem igényelnek (nem használnak) kiépített repülőteret – pár lépés után már a levegőben vannak és a leszállásuk is hasonlóan történik. A „gyalogos” változatot magaslatról, vagy csőrlésből/vontatásból indítva használják a motorral ellátottak (PPG – Powered ParaGlider) pedig saját erőből szállnak fel. A PG csak műanyag, a PPG műanyag és fém motoralkatrészeket tartalmaz – tehát a radarok számára még a pilótával együtt is kis visszaverő felületet jelentenek. Az aerodinamikai eredetű zaj, amit a vászon, zsinórzat és a pilóta kelt, bár igen kis intenzitású, de nagyon jellegzetes – mint ahogy a közelünkben elrepülő rovarok, madarak szárnyai, keltette hangokat magunk is felismerjük.

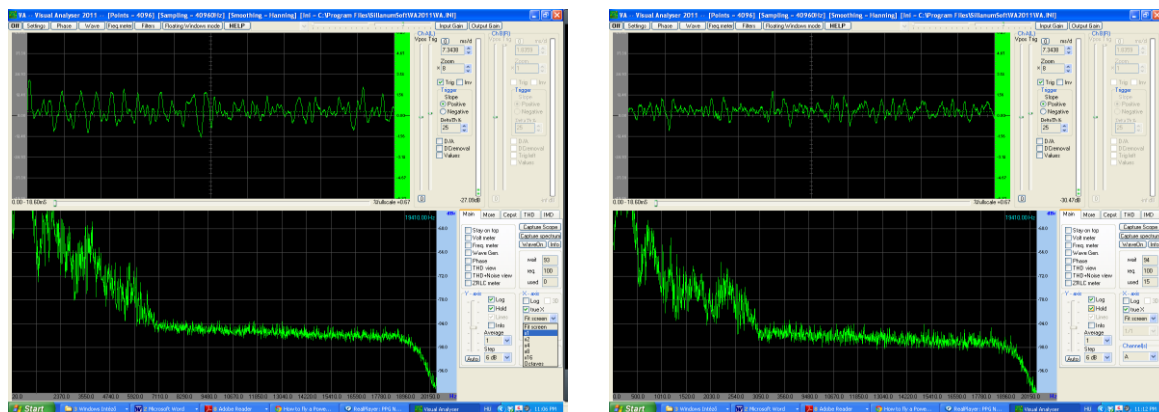
³ http://www.aviationexplorer.com/aircraft_noise.html



2. ábra Egy motoros siklóernyős szinte bárhol fel/le tud szállni és bármire (?) képes⁴

A motoros változatokat már messziről meghalljuk – csendes estéken, napnyugta előtt gyakran megjelennek. A főleg kétütemű „rezós” motorokkal repülő PPG-k megkülönböztetésére már gyakorlott fül és némi műszerezettség szükséges. A manapság elterjedő elektromos hajtású PPG hangja markánsan megkülönböztethető a belsőégésű motoros társaktól.

A „hanglenyomat” illusztrálására vizuálisan is összehasonlítottunk két PPG motor hangját [11] [12] – az eredeti környezeti zajjal együtt. Jól látható a belsőégésű motoros változat alapvetően kipufogója által keltett zaj – és ennek hiánya az elektromotoros hajtásnál. Mindkettőnél megtalálható viszont a légcsavarzaj – az elektromosnál csak ez hallható (a videó végén egészen közelről).



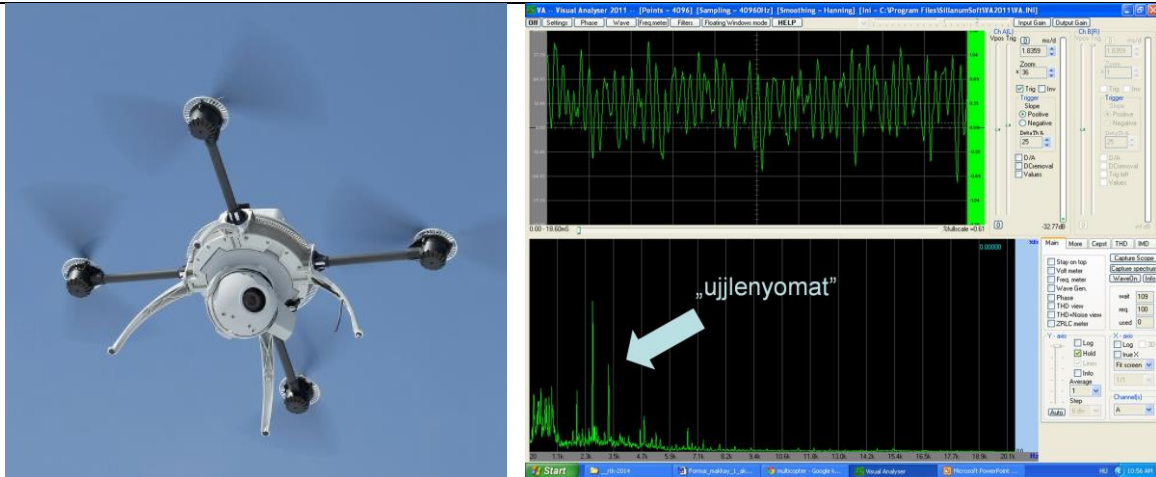
3. ábra Egy kétütemű Solo 210 és egy 10 kW-os elektromos hajtású PPG hangjának amplitúdó és spektrum képe

5

A pilóta nélküli légi járművek, UAV-k (Unmanned Air Vehicles) egy csoportja – a forgószárnyas hajtóművel rendelkezők – szintén jellegzetes hangforrást képviselnek, amelyek alapján felderíthetők/követhetők. A zaj a légcsavarok forgásakor keletkező turbulens légáramlásból származik, amiből a megfelelő szűrőkkel a forrás „ujjlenyomata” is meghatározható.

⁴ <http://finddellschanze.com/powered-paraglider-shooting/>

⁵ a szerző mérései – Visual Analyser 2011 programmal <http://www.sillanumsoft.org/>



4. ábra „Kíváncsiskodó” négyrotoros⁶ – és egy másik (Micro Q4) hangképe⁷

A „multikopterek” egyre népszerűbbek és az alkalmazási köreik is szélesednek – az egyszerű modellezői elvárásoktól a munkavégzésig – ami azt jelzi, hogy „felnőttek” lettek és ideje komolyan venni a védelmi rendszabályokat is. Az illegális információszerzéstől a hasonló kategóriájú küldemények célba juttatásáig számos negatív lehetőséget is kínálnak ezek az – önmagukban egyébként ragyogó – műszaki megoldások.

Amit tehát a kísérleteink eredményei is igazolni látszanak: a légi járművek hangmintái alkalmassak lehetnek a felderítésre és azonosításra – az egyébként kis felderítési valószínűséggel rendelkező eszközök esetében is. Ez a határőrizet, objektum és területvédelem számára fejlesztendő eszközökben és rendszerekben „professzionális” képességek formájában jelenhet meg.

IRÁNYMÉRÉS

Amennyiben a hangforrás azonosítása sikeres, az észlelés helyéhez viszonyított iránya és további mozgása lehet a felderítés célja. A hangfelderítő állomásokat – általában háromszög elrendezésben – alkalmazva, a kijelölt légtér határait megközelítő/átlépő légi járműveket lehet felderíteni. [12]



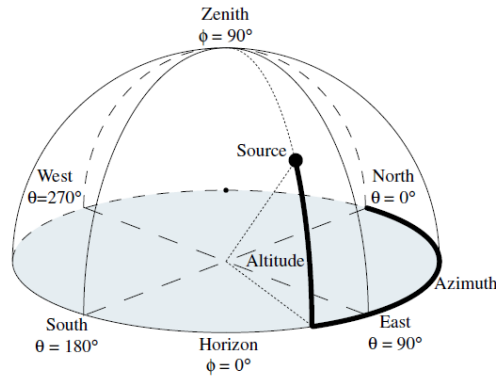
5. ábra. A mikrofonok egy 3D irány meghatározásra alkalmas állomáson⁸

⁶ <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/military-robots/aeryon-scout-quadrotor-spies-on-bad-guys-from-above>

⁷ a szerző mérései – Visual Analyser 2011 programmal <http://www.sillanumsoft.org/>

⁸ <http://www.roosnek.nl/figs/antenna.jpg>

Az iránymérési eljárások kiterjedhetnek a gömbkoordináták meghatározására, amivel a sugárforrás elevációs (hely-) szögét és magasságát is lehet mérni – ennek elméleti alapjait Brent C. Kirkwood „Acoustic Source Localization Using Time-Delay Estimation” című munkájában részletesen kifejti. [14]



6. ábra A 3D érzékelő-elrendezéssel az oldalszög és a helyszög is meghatározható ⁹

A repülőterek és környékeik védelmére telepített mérő/ellenőrző akusztikai állomások az engedélyekben szereplő hangnyomás regisztrálásán túl a siklópálya adatait, az emelkedés, süllyedés mértékét és profilját is képesek érzékelni. [15] Az akusztikai alapú felderítés hasonló berendezéseket használ – kiegészítve az ismeretlen (azimut és helyszög szerinti) térbeli helyzetet meghatározásával. [16]

A szélsőséges meteorológiai viszonyok – szél, csapadék, dörgés, villámlás – kedvezőtlenül befolyásolják a felderítés eredményességét. A szél – irányától függően – erősítheti, vagy gyengítheti a hangokat, a csapadékos időben megnövekedő háttérzaj, pedig nehezebbé teszi a hasznos jelek kiválogatását.

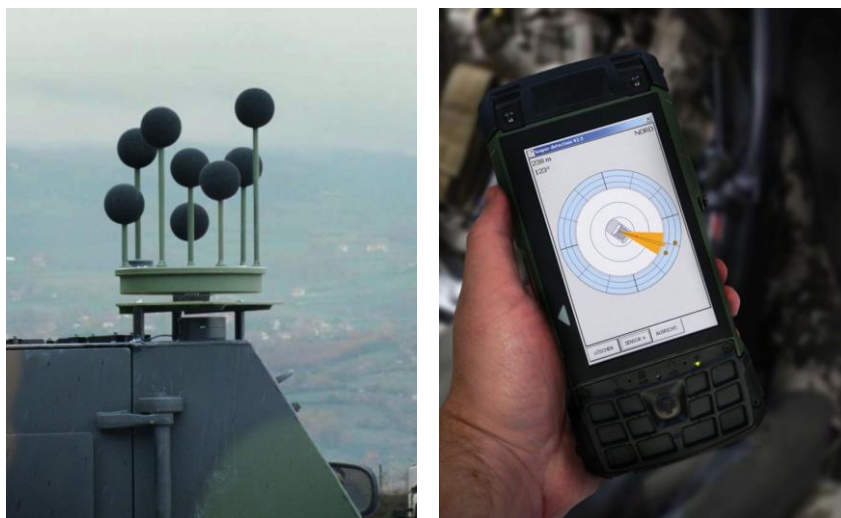
A védelmi szféra jelenleg is használ akusztikai alapú felderítő és helymeghatározó eszközöket. A harctéri hangfelderítő komplexumok a harcjárművek, kézi, és nehézfegyverek hangjára vannak „élesítve” **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** [17] [18] Az alkalmazásuk mellett szól, hogy kiforrott irány-meghatározó algoritmussal és megjelenítőkkel rendelkeznek, valamint a mostoha időjárási körülményeknek is ellenállnak.



⁹ Figure 3.4 alapján http://brentkirkwood.com/science/documents/BCK_MS_Thesis_Final_20030811.pdf

7. ábra A RAYTHEON „Boomerang” felderítő eszköz mikrofonjai és kijelzője ^{10 11}

Az egyik legerősebb haditechnikai cég a Rheinmetall is jelen van az ASLS – Acoustic Shooter Locating System [20] azaz a lövés helyének hang alapú meghatározására szolgáló berendezésével.



8. ábra A Rheinmetall ASLS berendezésének mikrofonjai és kijelzője ¹²

Hasonló célú az USA-ban elterjedt „ShotSpotter [19] technika, amelyet a nagyvárosok és kiemelten fontos objektumok védelmére használnak. A lövők irányát/helyzetét meghatározó berendezések fejlett jelfelismerő algoritmusokkal dolgoznak, melyek – feltehetően – a légi járművekre is ráhangolhatók.

Pakisztánban a hegyek között nehéz szünetmentes radar fedettséget biztosítani. Az elektroakusztikai alapú légvédelmi felderítő rendszer kifejlesztését az ország felszínének – radar szempontból – kedvezőtlen átszeldelt viszonyai tették szükségessé. [21]



9. ábra Mérési összeállítás Pakisztánban a repülőgépek hang alapú detektálására ¹³

A „Tracking, and Identifying Airborne Threats with Netted Sensor Fence” – munkában [22] a

¹⁰ http://www.raytheon.com/newsroom/feature/rtn13_bbn/

¹¹ <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-15208>

¹² http://www.armyrecognition.com/july_2011_news_defense_army_military_industry_uk/german_acoustic_shooter_locating_system_asls_from_rheinmetall_now_ready_for_market_2607111.html

¹³ <http://imranhkhani.com/wp-content/uploads/2011/05/acoustic3.jpg>

„hanglenyomat” meghatározása fontos szerepet kap – a radar, infra és látható fény tartományok mellett – a légi járművek felderítő rendszerében. Amíg a radar a távolfelderítést végzi, az infra a – a hatótávolságán belül lévő célok követésére és alakja, mozgása alapján a felismerésére és követésére szolgál. A hangfelderítő rendszer az irány meghatározását és az azonosítást végzi. Mindhárom felderítő elem – bár elhelyezésüket illetően nem feltétlenül kell egy ponton települniük – közös adathálózatban dolgozva megerősítik, kiegészítik egymás információit.



10. ábra Akusztikai szenzorok és helyük a komplex felderítő rendszerben ¹⁴

KÖVETKEZTETÉSEK

A hangfelderítés a radar visszaverő felülettel nem, vagy nagyon kismértékben rendelkező légi célok felderítésének egyik alternatíváját jelentheti.

Önállóan és a többi felderítési móddal együtt is tud működni – az adatok központi feldolgozásához térkoordináta és egyedi jellemzők (intenzitás, típus, azonosított jármű) szolgáltatásával.

A jelenlegi csekély számú kész megoldáshoz a közeljövőben várhatóan több új – akár hazai – fejlesztés fog csatlakozni. Jelen írásmű is ehhez kívánt segítséget, útmutatást adni – a teljesség igénye nélkül.

¹⁴ Weiqun Shi, Gus Arabadjis, Brett Bishop, Peter Hill, Rich Plasse and John Yoder: Detecting, Tracking, and Identifying Airborne Threats with Netted Sensor Fence The MITRE Corporation Bedford, Massachusetts U.S.A (Fig. 1., Fig.3.)

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Dr. GORDOS GÉZA – TAKÁCS GYÖRGY: Digitális beszédfeldolgozás Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983 MŰ: 3443-k-8386 pp.:343
- [2] MARK R. BELL – ROBERT A. GRUBBS JEM modeling and measurement for radar target identification (online), url: <https://engineering.purdue.edu/~mrb/SelPub/JEMPaper.pdf> (2014. 03. 10.)
- [3] WIKIPEDIA Cepstrum (online), url: <http://en.wikipedia.org/wiki/Cepstrum> (2014. 03. 10.)
- [4] L9: CEPSTRAL ANALYSIS (online), url: <http://research.cs.tamu.edu/prism/lectures/sp/l9.pdf>
- [5] EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE SPEAKER SEGMENTATION FOR AIR TRAFFIC CONTROL EEC Note No. 01/2008 (online), url: http://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/document/eec/report/2008/004_Speaker_segmentation_for_ATC.pdf (2014. 03. 10.)
- [6] JOHN H. I. HANSEN et. al. Morphological Constrained Feature Enhancement with Adaptive Cepstral Compensation (online), url: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.44.9150&rep=rep1&type=pdf> (2014. 03. 10.)
- [7] MAKKAY IMRE Elektromos hajtású repülőgépek konstrukciós megoldásai , Repüléstudományi Közlemények Különszám 2012. (e-dok) url: http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2012_cikkek/62_Makkay_Imre-Elektromos_hajtasu.pdf (2014. 03. 10.)
- [8] H.H. BROUWER S.W. RIENSTRA Aeroacoustics research in Europe: The CEAS-ASC report on 2007 highlights (online), url: <http://www.win.tue.nl/ceas-asc/Hilites/HL2007-JSV-318-2008-625-654.pdf> (2014. 03. 10.)
- [9] BERA JÓZSEF – POKORÁDI LÁSZLÓ Helikopterzaj elmélete és gyakorlata (online) url: <http://mek.oszk.hu/12000/12084/12084.pdf> (2014. 03. 10.)
- [10] BERA JÓZSEF – POKORÁDI LÁSZLÓ Repülési zaj kezelésének bizonytalansága Repüléstudományi Közlemények Különszám 2013 http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2013_cikkek/2013-2-55-Bera_Jozsef-Pokoradi_Laszlo.pdf (2014. 03. 10.)
- [11] VI PARAGLIDING PPG Noise (online) url: <http://www.youtube.com/watch?v=qUR1DFkMogY> (2014. 03. 10.)
- [12] MAYAMIKAN Electric paramotor 03 First flight (online) url: http://www.youtube.com/watch?v=1_utt219pk (2014. 03. 10.)
- [13] N. ROOSNEK Passive ranging with four microphones in a spatial configuration (online) url: http://www.roosnek.nl/passive_range.html (2014. 03. 10.)
- [14] BRENT C. KIRKWOOD Acoustic source localization using time-delay estimation (online) url: http://brentkirkwood.com/science/documents/BCK_MS_Thesis_Final_20030811.pdf (2014. 03. 10.)
- [15] TOPSONIC – AIRCRAFT NOISE AND FLIGHT TRACK MONITORING SYSTEM (online) url: <http://topsonic.aero/en/aircraft-noise-flight-track-monitoring-system.html> (2014. 03. 10.)
- [16] REAL-TIME 3D AUDIO DIRECTION FINDING (online) url: http://adsc.illinois.edu/sites/default/files/files/ADSC_Highlight_3D_Audio.pdf (2014. 03. 10.)
- [17] MASS HIGH TECH Local firms aim at city's gunshot-detection deal (online) url: <http://www.bizjournals.com/boston/blog/mass-high-tech/2007/02/local-firms-aim-at-citys-gunshot-detection.html?page=all> (2014. 03. 10.)
- [18] WIKIPEDIA Boomerang (countermeasure) (online) url: [http://en.wikipedia.org/wiki/Boomerang_\(countermeasure\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Boomerang_(countermeasure)) (2014. 03. 10.)
- [19] SHOTSPOTTER FLEX (online) url: <http://www.shotspotter.com/solutions/shotspotter-flex> (2014. 03. 10.)
- [20] RHEINMETALL No chance for snipers (online) url: http://www.rheinmetall-defence.com/en/rheinmetall_defence/public_relations/themen_im_fokus/keine_chance_fuer_heckenschuetzen/artikel_heckenschuetzen.php (2014. 03. 10.)
- [21] IMRAN H. KHAN Remote acoustic detection of aircraft (online) url: <http://imranhkhan.com/2011/05/05/remote-acoustic-detection-of-aircraft/> (2014. 03. 10.)
- [22] WEIQUN SHI et. al. Detecting, tracking and identifying airborne threats with netted sensor fence (online) url: http://cdn.intechopen.com/pdfs/15915/InTech-Detecting_tracking_and_identifying_airborne_threats_with_netted_sensor_fence.pdf (2014. 03. 10.)