

DESIGN OF UAV DETECTION SYSTEM UTILIZING COMMUNICATION MONITORING

NÁVRH SYSTÉMU DETEKČIE UAV PROSTREDNÍCTVOM MONITOROVANIA KOMUNIKÁCIE

Martin Brodniansky
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
brodnianskym@gmail.com

Andrej Novák
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
andrej.novak@fpedas.uniza.sk

Abstract

Aim of the paper is to design a system capable of detecting unmanned aerial vehicles utilizing radio communication sensing. The need to detect UAVs is caused by combination of their compact size, sensing capabilities, autonomous nature, ways of misusing them or their spread among unprofessional users unaware of their own risky handling of UAV. All these factors can lead to serious security threats and risk to human lives or infrastructure. In this paper, radio communication detection system is proposed as part of a robust system where radio detection is supplemented by other methods, to maximise probability of UAV detection. Significant attention was dedicated to deeper analysis of current progress in the area of radio communication detection systems as well as acoustic, visual and radar detection. Based on this analysis, all systems were compared together based on probability of detection and distances of detection. Comparison together with different properties of detection methods were basic stepping stone for final system proposal. Robust detection system was successfully designed with radio detection as its primary component, radar detection serving primarily as localizer of UAV, acoustic system serving as backup for detection of UAVs without radio communication and visual system for final confirmation of UAV, its model and presence of camera or load.

Keywords

UAV, drone detection, radio detection, unmanned aerial vehicle

1. Úvod

Tento článok je zameraný na analýzu a skúmanie detekcie bezpilotných prostriedkov. Úlohou je navrhnúť optimálny systém detekcie UAV za pomoci monitorovania ich komunikácie. Dôvodom voľby zamerania je narastajúci počet bezpilotných prostriedkov vo vzdušnom priestore, využívaných v profesionálnej ale aj amatérskej sfére. Faktory ako ich kompaktnosť, dostupnosť, autonómnosť a jednoduchosť zneužitia prispievajú k bezpečnostným rizikám a hrozbe pre ľudské zdravie alebo infraštruktúru. Ako príklad možno uviesť niekoľko oblastí z praxe, ktoré v minulosti boli negatívne zasiahnuté bezpilotnými prostriedkami a systém na ich detekciu by v nich bolo možné uplatniť. Spomenúť možno letiská a letectvo všeobecne [1], ohrozenie života a možné usmrtenie s najväčším rizikom v miestach konania hromadných podujatí [2], ohrozovanie súkromia najmä v súvislosti s UAV, ktoré sú vybavené kamerou [3], kriminálne a teroristické činy v podobe UAV pašujúcich drogy alebo nesúcich výbušné zariadenie [1][4][5] prípadne možné kybernetické útoky. [6]

V teoretickej fáze bola pozornosť venovaná najmä analýze rádiových frekvenčnej metódy, súčasnému stavu poznania a princípu jej fungovania. Existujúce práce pristupujú k metóde rádiových detekcie rôznymi spôsobmi najmä z dôvodu rozličných cieľov ich prác. Možno spomenúť prácu venujúcu sa tvorbe databázy rádiových frekvenčných signálov UAV, ktorá má slúžiť na učenie neurónovej siete a rozpoznávanie UAV v rádiových signáloch. [7] Autorii ďalšej práce sa zamerali na detekciu rádiových stopy

UAV v ultra-širokopásmovom spektre, charakterizáciu pohybu UAV v priestore a určenie bodu, v ktorom prekročí chránenú oblasť. [8] Veľmi častým aspektom v prácach je využitie neurónových sietí, ktoré sú schopné v spracovanom signáli schopné identifikovať UAV a prípadne aj jeho typ. Medzi prácami možno ďalej nájsť také, ktoré sa venujú detekcii na krátku vzdialenosť a v interiéri budov, [8] práce zamerané na detekciu UAV v exteriéri na dlhú vzdialenosť, [9] práce venované detekcii UAV v prostredí s interferenciou, [10] a špecifickou je aj práca, ktorej cieľom je detekcia a lokalizácia ovládacej stanice UAV [11] [18] [19].

V našom článku sme sa ďalej venovali aj rozboru alternatívnych metód, vďaka čomu boli identifikované spôsoby, ktoré by mohli eliminovať nedostatky rádiových detekcie [20]. Získané dáta a informácie boli využité k porovnaniu metód a návrhu systému detekcie, ktorého primárnym komponentom je rádiový systém doplnený o alternatívne systémy. Pojem alternatívne systémy označuje akustickú, radarovú a vizuálnu detekciu a ich cieľ je doplniť rádiovú metódu s cieľom maximalizovať pravdepodobnosť detekcie UAV.

2. Metodika

Na základe poznatkov z teoretickej časti sa práca zamerala na analýzu rádiových frekvenčnej detekcie a rovnako alternatívnych metód. Cieľom analýzy je akumulácia dát a informácií dostatočných pre hlbšie porovnanie rádiových metód a alternatívnych metód detekcie. Aby mohli byť relevantné

odborné práce zbierané efektívne, bolo potrebné v prvom rade určiť kritéria výberu prác. Bezpilotné prostriedky boli z toho dôvodu rozdelené do tried na základe *Delegovaného nariadenia komisie (EÚ) 2019/945 z 12. marca 2019 o bezpilotných leteckých systémoch a o prevádzkovateľoch bezpilotných leteckých systémov z tretích krajín a taktiež Rozhodnutia č. 2/2019 zo 14.11. 2019, ktorým sa určujú podmienky vykonania letu lietadlom spôsobilým lietať bez pilota a vyhlasuje zákaz vykonania letu určených kategórií lietadiel vo vzdušnom priestore Slovenskej republiky. [12][13]*

Tabuľka 1: Rozdelenie bezpilotných prostriedkov do tried a prevádzkových kategórií. Zdroj: [12][13].

Trieda UAV	MTOM	Prevádzková kategória	Prevádzkové obmedzenia
C0	< 250 g	A1	Maximálna horizontálna rýchlosť je 19 m/s. Zákaz preletu nad zhromaždeniami ľudí. Minimalizácia preletov nad nezúčastnenými osobami.
C1	< 900 g		
C2	< 4 kg	A2	Vzdialenosť viac ako 50 metrov od nezúčastnených osôb.
C3	< 25 kg (typický rozmer < 3 m)	A3	Vzdialenosť viac ako 50 metrov od nezúčastnených osôb.
C4	< 25 kg		

Pre účely práce boli zvolené triedy C0, C1 a C2, ktoré sa radia do prevádzkovej kategórie A1, A2 a zahŕňajú UAV od 0 g až do 4 kg. Výber článkov sa zamerlal primárne na skupinu, ktorá obsahuje percentuálne vyjadrenie pravdepodobnosti detekcie UAV a vzdialenosť, na ktorú systém dokázal UAV detegovať. V rámci skúmania prác a dát sa práca zamerla aj na to, v akom prostredí boli vykonané merania. Dôvodom bolo zistiť, či pri zvolených prácach autori vykonávali experimenty v reálnom prevádzkovom prostredí, v prítomnosti interferencie, alebo za podmienok výskytu viacerých UAV vo vzdušnom priestore. Dáta boli akumulované systematických vyhľadávaním v databázach Scopus a Web of Science, na základe určených kľúčových slov, relevantných k danej skúmanej problematike. Články boli organizované do tabuliek podľa konkrétnej problematiky a obsahujú základné informácie ako autora, rok vydania, kľúčové slová, metodiku a v neposlednom rade, samozrejme, výsledky práce.

Práca sa ďalej venovala vyhodnoteniu každej metódy detekcie, na základe zozbieraných dát. Cieľom vyhodnotenia bolo zhrnutie informácií získaných z prác. Posledná časť práce mala v prvom kroku za cieľ porovnať metódy detekcie na základe získaných dát o pravdepodobnosti detekcie UAV a vzdialenosti, na ktorú sú systémy schopné UAV efektívne detegovať. Porovnanie je vykonané na základe aritmetického priemeru hodnôt pravdepodobnosti, ktoré autori prác dosiahli pri konkrétnych vzdialenostiach detekcie. Na základe porovnania

pravdepodobnosti je vytvorené vyhodnotenie, aká metóda je najvhodnejšia pri akej vzdialenosti detekcie. Pre účely návrhu systému bol načrtnutý jednoduchý scenár, v ktorom by mal byť systém využitý. Následne opierajúc sa o informácie z predošlých krokov bol navrhnutý robustný systém detekcie UAV, kombinujúci všetky metódy s cieľom maximalizovať pravdepodobnosť detekcie UAV.

3. Návrh systému detekcie a jeho prevádzka

Pre účely práce bol navrhnutý jednoduchý scenár detekcie. Systém bol navrhnutý pre účely monitorovania chránenej oblasti s rádiusom 100 metrov. Aby bolo možné oblasť spoľahlivo monitorovať a chrániť pred potenciálne nebezpečnými UAV, bolo potrebné monitorovať širšiu oblasť než len vymedzený rádius 100 metrov. Z toho dôvodu bola sledovaná oblasť až do vzdialenosti 3 kilometre. Keďže sledovaná oblasť je rozsiahla, bol rádiový frekvenčný systém detekcie doplnený o ďalšie systémy aby bola pravdepodobnosť detekcie maximálna.

3.1. Pravdepodobnosť detekcie

Systém detekcie je založený na štyroch rôznych metódach, ktoré majú rôzne vlastnosti, výhody, nevýhody a preto rôzne úrovne pravdepodobnosti detekcie UAV, v rôznych podmienkach. Z toho dôvodu bolo potrebné pravdepodobnosti spracovať a na ich základe určiť ako najlepšie vybrané metódy skombinovať pre maximálny účinok.

Pri porovnaní systémov bolo postupované spôsobom, kedy sa celý 3000 metrov dlhý rozsah detekcie rozdelil na segmenty. Segmenty nie sú v celej vzdialenosti detekcie jednotné. Dôvodom je, že akustický a vizuálny systém detekcie sú schopné spoľahlivo na kratšiu vzdialenosť a pravdepodobnosť detekcie sa preto výrazne mení už pri zmenách vzdialenosti o niekoľko metrov. Do vzdialenosti 10 metrov sú preto segmenty dlhé 5 metrov a do 200 metrov sú segmenty dlhé 10 metrov. Od vzdialenosti 200 metrov do 1500 metrov sú už segmenty jednotne dlhé 100 metrov a v časti od 1500 metrov do 3000 metrov je to 250 metrov. Voľba dĺžok segmentov sa opierala o vzdialenosť, na ktoré dokázali spoľahlivo detegovať bezpilotné prostriedky autori vybraných prác.

Ďalším krokom v postupe bolo určenie priemernej pravdepodobnosti detekcie metód, vzhľadom na konkrétnu vzdialenosť detekcie. Pre tieto účely boli využité všetky práce, ktoré obsahovali percentuálne vyjadrenie pravdepodobnosti detekcie a vzdialenosti, na ktorú bola daná pravdepodobnosť dosiahnutá. Takýmto spôsobom bola určená pravdepodobnosť všetkých štyroch vybraných metód, v celom rozsahu od 0 metrov do 3000 metrov. Príkladom môže byť pravdepodobnosť detekcie pomocou rádiový frekvenčnej metódy, na vzdialenosť 100 metrov. Najskôr je potrebné určiť s akou pravdepodobnosťou boli v každej práci autori schopní detegovať UAV na túto vzdialenosť a následne je z hodnôt vytvorený aritmetický priemer.

Tabuľka 2: Priemerná pravdepodobnosť detekcie RF systému, na vzdialenosť 100 metrov. Zdroj: Autori.

	Detekcia nízko letiacich UAV pomocou DNN [14]	Detekcia fyzických charakteristík UAV v RF komunikácii [15]	Detekcia UAV na základe stopy v rádiovom spektre [16]	Detekcia UAV na pomocou Wi-Fi signálu a rádiovkej stopy [17]	Priemerná pravdepodobnosť
100 m	0,931	0,900	0,952	1,000	0,946

Samotné porovnanie bolo vykonané v prostredí programu Microsoft Excel, kde bola vytvorená tabuľka s celým rozsahom vzdialeností a pravdepodobnosťami jednotlivých metód. Algoritmus potom určil, ktorá metóda má najvyššiu pravdepodobnosť detekcie UAV na základe konkrétneho segmentu vzdialenosti.

S využitím výsledkov z tabuľky bolo v kombinácií s poznatkami o vybraných metódach potrebné určiť, ako budú metódy skombinované s cieľom maximalizovať spoľahlivosť systému. Na základe pravdepodobností sú metódy najspoľahlivejšie pri nasledovných vzdialenostiach:

Tabuľka 3: Vzdialenosti, v ktorých boli vybrané metódy najspoľahlivejšie. Zdroj: Autori.

Vzdialenosť [m]	Metóda
5 – 80	RFD
90 – 150	AD
160 – 180	RFD
190 – 500	RD
600 – 1400	RFD
1500 – 3000	RD

Z dôvodu známych vlastností systémov nebude zloženie systému pevne založené len na predchádzajúcej tabuľke. Účelom návrhu bude využitie predností systémov tak aby čo najlepšie doplnili rádiový systém.

3.2. Rádiový detekcia

Metóda je primárnym komponentom systému a na základe porovnania pravdepodobností môže v systéme spoľahlivo fungovať vo vzdialenosti od 0 metrov do 1400 metrov. Dôvodom pre takýto spôsob využitia metódy v systéme je celková spoľahlivosť rádiového systému a konkrétne výhody oproti ostatným metódam. Rádiová detekcia má oproti akustickej alebo vizuálnej metóde výrazne väčší dosah. Okrem toho nie je citlivá na hlučné prostredie a nie je obmedzená poveternosťnými podmienkami alebo zlou viditeľnosťou. V porovnaní s radarovou detekciou je výhodou rádiovkej detekcie, že ju neobmedzuje RCS bezpilotného prostriedku a nie je pre ňu problematická ani detekcia roja blízko letiacich UAV. U radarovej detekcie sa navyše ukázalo, že je vyššia šanca na falošne pozitívne hlásenia, kedy si systém zamení letiaceho vtáka s UAV, čo u rádiovkej detekcie tak isto nie je problém.

3.3. Vizuálna detekcia

Vizuálna detekcia je systém s najkratším dosahom avšak oproti ostatným metódam poskytuje špecifické výhody, ktoré ostatné metódy v súčasnosti poskytnúť nemôžu. Na základe získaných dát môžeme vidieť, že vizuálna detekcia dokáže spoľahlivo fungovať v rozsahu od 0 metrov do 50 metrov. Výhodou systému

je najmä fakt, že prevádzkovateľovi systému detekcie poskytuje vizuálny materiál pre overenie, či sa skutočne jedná o UAV, či je vybavené kamerou, nákladom a o aký model bezpilotného prostriedku sa jedná. Tieto výhody sú zároveň primárny účel, pre ktoré je vizuálna detekcia zakomponovaná do systému.

3.4. Akustická detekcia

Akustická detekcia podľa získaných dát poskytuje spoľahlivú detekciu v rozsahu od 0 metrov do 150 metrov. Najväčšou výhodou, ktorú poskytuje v kombinácii s radarovou a vizuálnou detekciou je schopnosť detegovať aj UAV, ktoré nekomunikuje v rádiovom spektre. Výhoda je zároveň primárny dôvod prečo je v systéme akustická detekcia využitá. Okrem toho však systém vo svojom rozsahu poskytuje spoľahlivú detekciu a aj identifikáciu bezpilotných prostriedkov.

3.5. Radarová detekcia

Radarová detekcia poskytuje z hľadiska vzdialenosti najpriaznivejšie hodnoty a na základe analyzovaných dát je možné spoľahlivo detegovať letiace objekty až na vzdialenosť 3000 metrov. Radarová detekcia je v systéme využitá dvoma spôsobmi, z ktorých jeden je možné opísať ako systém včasného varovania. Radar by prevádzkovateľovi systému poskytoval v dostatočnom predstihu informácie o letiacich objektoch, ktoré sa nachádzajú v okolí chránenej oblasti až do vzdialenosti 3000 metrov. Okrem toho je systém výhodný z hľadiska poskytnutia informácií o pozícii UAV. To sa dá dosiahnuť aj s rádiovou alebo akustickou detekciou avšak lokalizácia by vyžadovala rozmiestnenie viacerých senzorov aj mimo chránenej oblasti, čo nemusí byť možné za každých podmienok.

3.6. Princíp prevádzky systému

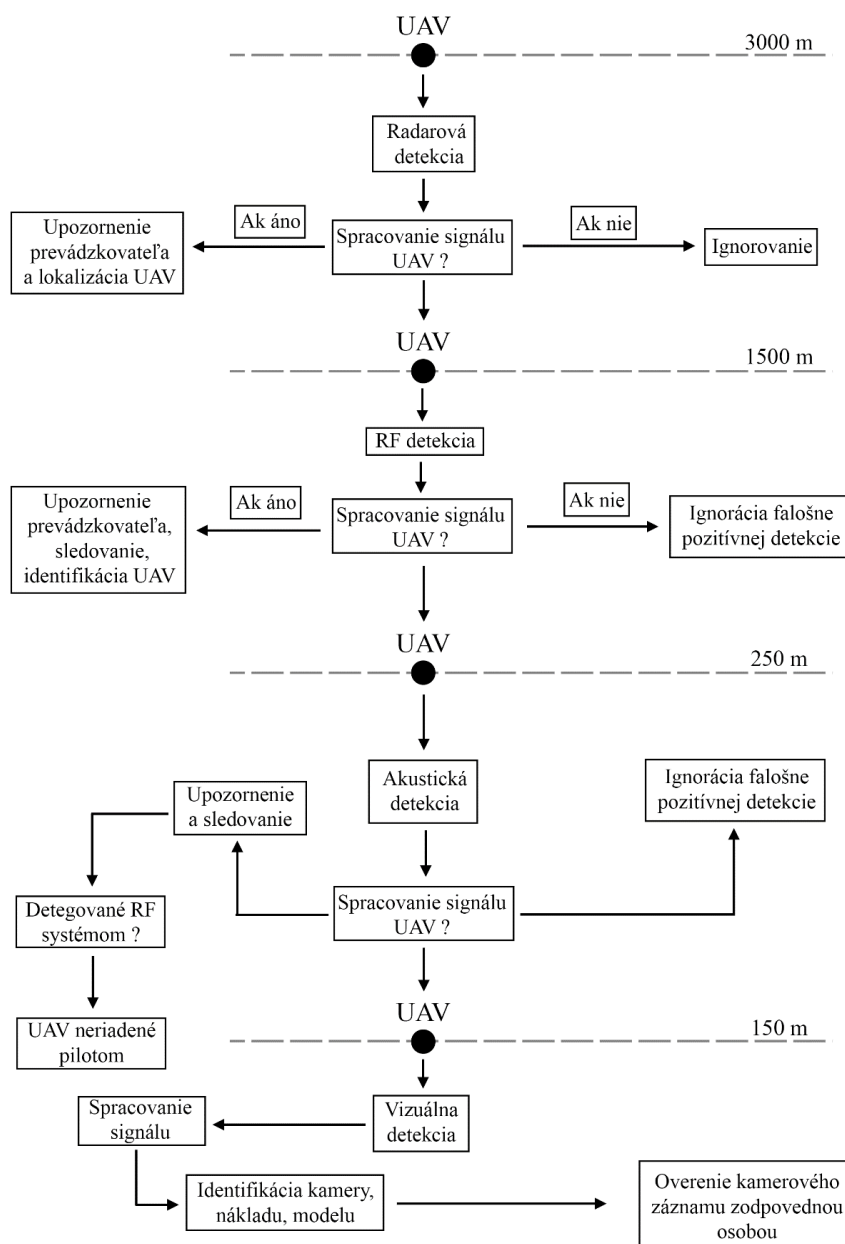
UAV, ktoré sa približuje k chránenej oblasti je ako prvé detegované radarovým systémom, ktorý pôsobí v rozsahu 0 metrov až 3000 metrov. Ďalšou hranicou je 1500 metrov, kedy je UAV detegované rádiovým systémom. Vzdialenosť bola predĺžená z 1400 metrov na 1500 metrov vďaka tomu, že rádiové senzory sa nachádzajú na obode, 100 metrov ďaleko od centra chránenej oblasti. Po rádiovkej detekcii nasleduje akustická, ktorej hranica sa nachádza vo vzdialenosti 250 metrov od centra. Vzdialenosť bola tak isto predĺžená umiestnením mikrofónov na obvod chránenej oblasti. Poslednou hranicou je vzdialenosť 150 metrov od centra, kedy je už možné UAV detegovať aj pomocou kamerového systému.

V predošlej časti práce bol načrtnutý scenár detekcie, v ktorom je cieľom systému chránenie vymezenej oblasti s rádiom 100 metrov. Z dôvodu lepšieho situačného prehľadu a možnosti včasnej reakcie na vzniknuté situácie systém monitoruje oblasť až do vzdialenosti 3000 metrov. Fungovanie systému bude ďalej popísané na základe modelovej situácie, kedy sa bude k objektu

približovať bezpilotný prostriedok DJI Phantom. Bepilotný prostriedok začína let mimo sledovanej oblasti, teda za hranicou 3000 metrov.

Po prekonaní hranice 3000 metrov je letiaci objekt detegovaný radarom a získané dáta sú spracované procesorom, ktorého úlohou je určiť či sa jedná o UAV alebo nie. Systém pri detekcii UAV upozorní prevádzkovateľa systému a poskytuje aktuálne informácie o jeho pozícii. V prípade, že sa UAV ďalej približuje a prekoná hranicu 1500 metrov, je detegované rádiovým systémom. Dáta zo systému sú opäť spracované procesorom a umelou inteligenciou, ktorej úlohou je opakovane rozhodnúť a overiť či sa jedná o UAV. Rádiová detekcia má v systéme väčšiu váhu, preto potvrdí alebo vyvráti predošlú detekciu UAV radarom. Okrem toho je možné systém využiť aj na identifikáciu

modelu bezpilotného prostriedku. V prípade, že sa UAV ďalej približuje, bude na hranici 250 metrov detegované akustickým systémom. Úlohou systému je opäť vykonať overenie či sa jedná o bezpilotný prostriedok. Pokiaľ by došlo k situácii, že UAV nevyužíva rádiovú komunikáciu a vyhne sa detekcii rádiovým systémom, akustický systém toto UAV deteguje a upozorní prevádzkovateľa systému. Poslednou hranicou je vzdialenosť 150 metrov od centra chránenej oblasti, kde UAV deteguje kamerový systém. Opäť spracuje získané obrazové dáta a tie poskytne zodpovednej osobe, ktorá vďaka nim môže overiť či sa skutočne jedná o UAV. Okrem toho je možné na základe obrazového materiálu určiť či je bezpilotný prostriedok vybavený kamerou, nákladom a presne identifikovať model.



Obrázok 1: Vývojový diagram systému detekcie UAV. Zdroj: Autori.

4. Záver

V práci sa na základe analýzy úspešne podarilo identifikovať potrebu detekcie bezpilotných prostriedkov a citlivé oblasti, pre ktoré je takýto systém užitočný.

V praktickej časti bol na základe poznatkov z teórie venovaný priestor hlbšej analýze odbornej literatúry, relevantnej k metódam detekcie UAV. Hlavným zámerom analýzy bolo zistiť aké vlastnosti mali systémy navrhnuté autormi, so zameraním na pravdepodobnosť detekcie UAV a vzdialenosť detekcie. Metódy boli následne porovnané a analýza spoločne s porovnaním slúžili ako nástroj pre vypracovanie návrhu systému detekcie UAV. Návrh má formu robustného systému, ktorý zahŕňa rádiovú metódu detekcie doplnenú o alternatívne metódy.

Rádiová detekcia je primárnym komponentom systému a na základe porovnania pravdepodobností môže v systéme spoľahlivo fungovať vo vzdialenosti od 0 metrov do 1400 metrov. Rádiová detekcia má oproti akustickej alebo vizuálnej metóde výrazne väčší dosah. Okrem toho nie je citlivá na hlučné prostredie a nie je obmedzená poveternostnými podmienkami alebo zlou viditeľnosťou. V porovnaní s radarovou detekciou je výhodou rádiovú detekcie, že ju neobmedzuje RCS bezpilotného prostriedku a nie je pre ňu problematická ani detekcia roja blízko letiacich UAV. U radarovej detekcie sa navyše ukázalo, že je vyššia šanca na falošne pozitívne hlásenia, kedy si systém zamení letiaci objekt s podobným RCS za UAV, čo u rádiovú detekcie tak isto nie je problém. Celkovo možno rádiovú detekciu označiť za spoľahlivú metódu.

Možnosťou ďalšieho výskumu by boli najmä praktické experimenty a ďalšia optimalizácia systému na základe ich výsledkov. Okrem toho je u systému potenciál modulárnosti. Znamená to, že systém by mohol byť prispôsobovaný na základe konkrétnych prevádzkových podmienok. Z toho dôvodu je priestor aj v oblasti výskumu metodiky, na základe ktorej by bol systém prispôsobovaný podmienkam a prostrediu detekcie.

Referencie

- [1] UK Parliament, House of Commons library (2019). Civilian Drones [Online]. Dostupné na internete: <https://commonslibrary.parliament.uk/research-briefings/cbp-7734/>
- [2] Yaacoub, Jean-Paul et al. "Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations." *Internet of Things* vol. 11 (2020): 100218. doi:10.1016/j.iot.2020.100218
- [3] Vacca, A., Onishi, H., & Cuccu, F. (2017). Drones: Military weapons, surveillance or mapping tools for environmental monitoring? advantages and challenges. A legal framework is required. Paper presented at the Transportation Research Procedia, , 25 51-62. doi:10.1016/j.trpro.2017.05.209 Retrieved from www.scopus.com
- [4] Horsman, G. (2016). Unmanned aerial vehicles: A preliminary analysis of forensic challenges. *Digital Investigation*, 16, 1-11. doi:10.1016/j.diin.2015.11.002
- [5] Airspace Magazine. How Many Drones Are Smuggling Drugs Across the U.S. Southern Border? [Online]. Dostupné na internete: <https://www.airspacemag.com/flight-today/narcodrones-180974934/>
- [6] TOWNSEND, K. (2019). Sky-high concerns: Understanding the security threat posed by drones [Online]. Dostupné na internete: <https://blog.avast.com/what-security-threats-are-posed-by-drones>
- [7] Mohammad Al-Sa'd, et al., RF-based drone detection and identification using deep learning approaches: an initiative to-towards a large open source drone database, *Future Gener. Comput. Syst.* 100 (2019) 86e97, <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.05.007>.
- [8] Digulescu, A., Despina-Stoian, C., Stănescu, D., Popescu, F., Enache, F., Ioana, C., . . . Șerbănescu, A. (2020). New approach of uav movement detection and characterization using advanced signal processing methods based on uwb sensing. *Sensors (Switzerland)*, 20(20), 1-18. doi:10.3390/s20205904
- [9] Yang, S., Qin, H., Liang, X., & Gulliver, T. A. (2019). An improved unauthorized unmanned aerial vehicle detection algorithm using radiofrequency-based statistical fingerprint analysis. *Sensors (Switzerland)*, 19(2) doi:10.3390/s19020274
- [10] M. Ezuma, F. Erden, C. Kumar Anjinappa, O. Ozdemir and I. Guvenc, "Detection and Classification of UAVs Using RF Fingerprints in the Presence of Wi-Fi and Bluetooth Interference," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 60-76, 2020, doi: 10.1109/OJCOMS.2019.2955889.
- [11] Huang, X., Yan, K., Wu, H. -, & Wu, Y. (2019). Unmanned aerial vehicle hub detection using software-defined radio. Paper presented at the IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, BMSB, , 2019-June doi:10.1109/BMSB47279.2019.8971851 Retrieved from www.scopus.com
- [12] EUR-Lex. Delegované nariadenie komisie (EÚ) 2019/945 z 12. marca 2019 o bezpilotných leteckých systémoch a o prevádzkovateľoch bezpilotných leteckých systémov z tretích krajín [Online]. Dostupné na internete: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947&from=EN>
- [13] Dopravný úrad. Rozhodnutie č. 2/2019 zo 14.11. 2019, ktorým sa určujú podmienky vykonania letu lietadlom spôsobilým lietať bez pilota a vyhlasuje zákaz vykonania letu určených kategórií lietadiel vo vzdušnom priestore Slovenskej republiky [Online]. Dostupné na internete: <http://nsat.sk/wp-content/uploads/2019/11/R2-2019.pdf>

- [14] Cao, C., Hou, Q., Gulliver, T. A., & Lan, Q. (2020). A passive detection algorithm for low-altitude small target based on a wavelet neural network. *Soft Computing*, 24(14), 10693-10703. doi:10.1007/s00500-019-04574-3
- [15] Yang, S., Qin, H., Liang, X., & Gulliver, T. A. (2019). An improved unauthorized unmanned aerial vehicle detection algorithm using radiofrequency-based statistical fingerprint analysis. *Sensors (Switzerland)*, 19(2) doi:10.3390/s19020274
- [16] Nguyen, P., Truong, H., Ravindranathan, M., Nguyen, A., Han, R., & Vu, T. (2017). Matthan: Drone presence detection by identifying physical signatures in the drone's RF communication. Paper presented at the MobiSys 2017 - Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, 211-224. doi:10.1145/3081333.3081354 Retrieved from www.scopus.com
- [17] Nie, W., Han, Z., Zhou, M., Xie, L., & Jiang, Q. (2021). UAV detection and identification based on WiFi signal and RF fingerprint. *IEEE Sensors Journal*, doi:10.1109/JSEN.2021.3068444
- [18] Novák, A., Novák Sedlačková, A., Janovec, M., 2020. Komunikačné systémy v letectve EDIS - Žilina, Žilinská univerzita v Žiline, 2020, ISBN 978-80-554-1737-0
- [19] Novák, A., 2015. Komunikačné, navigačné a sledovacie zariadenia v letectve, Bratislava, DOLIS, 2015, ISBN 978-80-8181-014-5
- [20] Novák, A. 2005. Radio direction finding in air traffic services. *Promet-Traffic&Transportation* 17 (5), 273-276