

USING SDR RECEIVERS FOR UAV DETECTION

VYUŽITIE SDR PRIJÍMAČOV PRE DETEKCIU UAV

Robert Dianovský

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

Andrej Novák

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

Abstract

As the number of unmanned aerial vehicles (UAV) increases, new dangers arise for airports and other facilities. Because of this, the need for UAV detection and monitoring in areas, that might be endangered by their operation, is becoming an important topic. Introductory chapters are dedicated to the identification of potential risks posed by UAV operations and research of existing monitoring methods. The main goal of the paper, about which is this article, is to research the possibility of UAV detection by using accessible amateur SDR (Software-Defined Radio) for intercepting radio communications between UAV and its control station. Possible radio detection and localization methods were proposed based on the analysis of radio transmissions used in unmanned aerial systems. A simple theoretical design of SDR-based detection and localization system for monitoring unauthorized UAVs was developed by choosing appropriate methods. The principles and methods used in the design were experimentally demonstrated in several laboratory experiments. Successful realization of this design would possibly improve the availability of drone monitoring systems and reduce their production costs.

Keywords

Unmanned aircraft, UAV, Detection, Localization, Monitoring, SDR

1. Úvod

Bezpilotné lietajúce zariadenia sú vďaka rýchlemu vývoju technológií v uplynulých rokoch prístupnými pre širokú časť populácie, čím sa postupne stali neoddeliteľnou súčasťou dnešnej spoločnosti. Neodborná prevádzka alebo dokonca úmyselné zneužitie bezpilotných zariadení začalo v poslednej dobe predstavovať vážnu bezpečnostnú hrozbu najmä pre letiská, ale aj iné významné strategické objekty ako napríklad vládne budovy, štadióny, hromadné podujatia, vojenské základne, prístavy a mnohé iné. Nedávne zmeny v legislatíve sa usilujú prevádzku UAS efektívnejšie regulovať, napriek tomu však väčšina nebezpečenstiev pretrváva. Na základe toho vzniká potreba vývoja systémov schopných bezpilotné lietadlá narušajúce zakázaný vzdušný priestor detegovať, monitorovať a prípadne aj eliminovať. Komplexné systémy plniace tieto úlohy v súčasnosti vyvíja viacero svetových výrobcov, vo väčšine prípadov sú to však finančne náročné riešenia a ich použitie sa preto v civilnej sfére vzťahuje skoro výlučne na veľké medzinárodné letiská a iné kritické objekty.

Cieľom bakalárskej práce, z ktorej tento článok vychádza, je predovšetkým vytvoriť prehľad možností bežne dostupných rádiových prijímačov typu SDR v oblasti detekcie a lokalizácie neoprávnených bezpilotných lietadiel, teoreticky navrhnúť spôsob riešenia problematiky a niektoré detekčné a lokalizačné princípy aj prakticky demonštrovať.

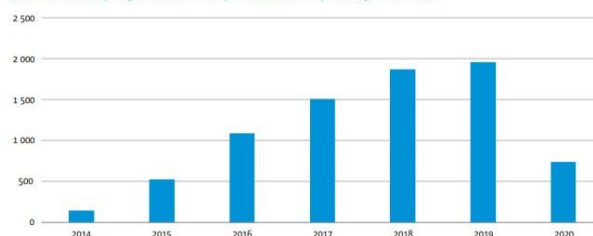
Výsledkom skúmania je návrh teoretického konceptu rádiového detekčného systému, založeného na monitorovaní frekvenčných pásiem SDR prijímačom a experimentálne overenie princípu rádiového zameriavania pomocou amplitúdovej metódy s rotujúcou smerovou anténou.

Riešenie založené na dostupných SDR prijímačoch je technologicky a aj finančne málo náročné, čo vytvára perspektívu zlepšenia dostupnosti systémov rádiového monitorovania UAV.

2. Problematika potreby monitoringu UAV

V predošlých rokoch sa trh s komerčne vyrábanými UAS určenými pre širokú skupinu populácie rozrastá rýchlym tempom, čo je spôsobené najmä znižovaním obstarávacej ceny týchto zariadení a vzrastajúcim záujmom verejnosti o túto technológiu. Bezpilotné lietadlá sú dnes už natoľko rozšírené, že každý mesiac nastane niekoľko vážnych incidentov – narušenie vzdušného priestoru, kolízií, odhalení pašovania kontrabandu, útokov a iných. Graf ukazuje vzrastajúci počet pozorovaní UAV v blízkosti letísk.

Figure A: Reported UAS occurrences between 2014 and 2020
(Source: EASA query from the European Central Repository, ECCAIRS).⁸



Graf 1: Počet hlásených výskytov UAV v okolí letísk. Zdroj: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dju/drone_incident_management_at_aerodromes_part1_website_suitable.pdf

Analýzou doterajších incidentov UAV môžeme identifikovať najväčšie riziká spojené s prevádzkou takýchto zariadení. Týmto sú najmä nasledovné:

- Kolízia s iným lietadlom
- Rušenie leteckých rádiových zariadení
- Škody na zdraví a majetku
- Teroristické útoky
- Ilegálna preprava tovaru
- Nezákonné získavanie informácií a sledovanie

3. Súčasný stav riešenej problematiky

Riziká uvedené vyššie vyvolávajú potrebu monitorovať UAV pohybujúce sa v priestore kde by mohla ich prevádzka predstavovať bezpečnostnú hrozbu. Monitorovanie pozostáva predovšetkým z detekcie prítomnosti UAV a následnom určení a sledovaní jeho aktuálnej polohy. Takéto informácie umožnia bezpečnostným zložkám uskutočniť potrebné opatrenia na eliminovanie vzniknutého rizika, či už priamo zneškodnením narušiteľa s použitím rôznych systémov na prerušenie letu neoprávneného UAV, alebo nepriamo pomocou iných postupov.

3.1. Existujúce metódy monitorovania UAV

Na riešenie detekcie a monitoringu bezpilotných prostriedkov je možné využiť niekoľko dostupných metód, ktoré sa líšia efektívnosťou a komplexnosťou. Súčasný stav monitoringu UAV sú [1], [7]. :

- Optická detekcia
- Radarová detekcia
- Akustická detekcia
- Rádiofrekvenčná detekcia

V komerčných detekčných a monitorovacích systémoch sa zväčša stretávame s kombináciou viacerých detekčných metód, pre zabezpečenie väčšej presnosti a spoľahlivosti systému. V uplynulých rokoch vzniklo niekoľko spoločností zaoberajúcich sa touto problematikou, ako napríklad *Aaronia AG*, *Robin Radar Systems*, *NQDefense*, *Skylock*, *Rohde & Schwarz*, *Drone Shield* a ďalší.

3.2. Rozšírenie systémov monitorovania UAV na európskych letiskách

Vo všeobecnosti systémy detekcie UAV ešte nie sú na letiskách a v podobných objektoch dostatočne rozšírené, hlavnými užívateľmi sú v súčasnosti vládne ozbrojené bezpečnostné jednotky. V rámci práce bol preto vykonaný prieskum rozšírenia aplikácie systémov monitorovania UAV na ochranu pred narušením ochranných pásiem letísk. Predmetom skúmania boli európske medzinárodné letiská nachádzajúce sa v členských štátoch EASA (European Union Aviation Safety Agency). Keďže sa jedná ohľadom bezpečnosti o citlivú tému, ktorá spadá do zabezpečenia perimetra letiska, nebolo možné skúmať letiská jednotlivo. Zber dát bol preto uskutočnený kontaktovaním úradov civilného letectva (alebo iných zodpovedných inštitúcií)

členských štátov EASA prostredníctvom e-mailu s otázkou, či niektoré medzinárodné letiská v ich krajine používajú systémy detekcie neoprávnených UAV. Kontaktovaných bolo spolu 31 členských štátov EASA, pričom na e-mail odpovedalo 13 krajín. Z tohto počtu 8 úradov nemohlo na otázku odpovedať z bezpečnostných alebo iných dôvodov, 5 úradov sa vyjadrilo že na letiskách v ich krajine sa systémy detekcie UAV nenachádzajú. Viaceré krajiny však vyjadrili záujem o riešenie tejto problematiky a chystajú sa v blízkej dobe implementovať takéto systémy na svoje letiská. Vzhľadom na nedostatok údajov prieskum nemá príliš veľkú výpovednú hodnotu, avšak keďže žiadna z krajín nepotvrdila prevádzkovanie systémov detekcie UAS, môžeme predpokladať ich malé rozšírenie na letiskách.

4. Rádiová komunikácia v UAS

Z hľadiska riešenia rádiových frekvenčnej metódy detekcie, čo je primárnym cieľom tejto bakalárskej práce, je nutné oboznámenie sa s charakterom rádiových komunikácií prebiehajúcich v rámci bežne dostupných viacrotorových UAS. Bepilotné lietajúce zariadenia v rámci svojej diaľkovo ovládanej prevádzky komunikujú s riadiacou stanicou rádiovým prenosom. UAV ako aj riadiaca stanica sú preto vybavené rádiovým prijímačom a vysielačom, čím sa zabezpečuje prenos **riadiacich pokynov (C2 link), telemetrických dát a videa** v reálnom čase. Vlastnosti rádiových prenosov v UAS boli skúmané analýzou technických špecifikácií populárnych, bežne dostupných typov dronov.

4.1. Frekvenčné pásma v UAS

V UAV technológiách sú najčastejšie využívané najmä pásma **2,4 GHz** a **5,8 GHz** – pre Wi-Fi a iné komunikačné štandardy, ale menej často taktiež 433 MHz, 915 MHz alebo 27 MHz. Všetky tieto pásma patria medzi tzv. ISM pásma, ktoré nepodliehajú výraznej legislatívnej regulácii. Pri vojenských, modifikovaných, alebo svojpomocne skonštruovaných UAS je možnosť stretnúť sa tiež s inými frekvenciami mimo ISM pásiem.

4.2. Modulácie v UAS

Pre realizáciu rádiového prenosu je nutné zvoliť vhodný spôsob modulácie signálu. Komunikácia súčastí UAS využíva zväčša širokopásmové digitálne modulácie, čo zabezpečuje lepšiu odolnosť proti rušeniu a veľké prenosové rýchlosti. Stretávame sa tu s tromi hlavnými skupinami modulácií: OFDM, DSSS a FHSS. OFDM modulácia sa využíva predovšetkým pre prenos videa, nakoľko ponúka vysokú prenosovú rýchlosť. Pre C2 link a telemetriu sa zvyčajne volia modulácie DSSS alebo FHSS, pre ich vysokú odolnosť voči rušeniu.

4.3. Komunikačné štandardy v UAS

Okrem modulácie je pri rádiovom prenosu nutné použiť aj určitý prenosový štandard alebo protokol, ktorý udáva akým spôsobom sa prenášané informácie kódujú a dekodujú (prípadne aj šifrujú a dešifrujú). V UAS sa využívajú buď štandardizované multifunkčné protokoly ako Wi-Fi alebo Bluetooth, alebo špecializované štandardy (*Lightbridge*, *OcuSync*, *MAVLink*, *FASST*).

5. SDR prijímače

SDR (Software-Defined Radio) zariadenia sú pomerne novým konceptom v oblasti rádiovkej komunikácie, ktorý sa vďaka pokroku v digitálnych a informačných technológiách stal finančne dostupným a mimoriadne praktickým riešením príjmu rádiových signálov všetkých druhov. Vďaka tomu majú mimoriadnu perspektívu v oblasti detekcie a monitorovania neoprávnených bezpilotných prostriedkov. SDR pozostávajú z malého počtu hardvérových komponentov, ktoré vo väčšine prípadov pozostávajú len z jednoduchých vstupných obvodov a A/D prevodníka, pričom hlavné spracovanie signálu je zabezpečované softvérovou časťou systému. Prijímaný signál sa preto čo najskôr premení do digitálnej podoby a takto putuje do softvérovej časti. Táto skutočnosť dáva SDR prijímačom veľkú variabilitu a všestrannosť spracovania signálu, čo umožňuje ich použitie s veľmi širokou škálou frekvencií a neobmedzeným množstvom modulácií, komunikačných protokolov a spôsobov kódovania či šifrovania rádiovkej komunikácie. [2]



Obrázok 1: SDR prijímač HackRF One. Zdroj: https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/41227i18ukL_AC_.jpg

6. Rádiová detekcia

Prítomnosť UAV je možné odhaliť pasívnym monitorovaním frekvenčných pásiem využívaných pri komunikácii v UAS, prijatím tohto prenosu, a následnou aplikáciou vhodnej rádiovkej detekčnej metódy pomocou ktorej dáta z prijímača správne vyhodnotíme. Existuje pomerne veľký počet rádiových detekčných metód, z tohto dôvodu sa venujeme iba niektorým metódam, ktoré sú vhodné pre riešenie detekcie UAV.

6.1. Energetická rádiová detekčná metóda

Jedná sa o jednoduchú a bežnú formu detekcie rádiových signálov, ktorá má nízku náročnosť prevedenia a spracovania dát. Využíva sa sledovanie intenzity (energie) prijímaného signálu vzhľadom na okolitý rádiový šum, po prekročení vopred špecifikovanej úrovne energie sa signál považuje za detegovaný. Na realizáciu energetickú detekčnej metódy nie je potrebné poznať konkrétnejšie vlastnosti signálu (napr. modulácia, komunikačný protokol), postačuje frekvenčné pásmo v ktorom chceme signály detegovať a hraničná úroveň energie určená podľa lokálnych podmienok [3] [8].

6.2. Monitorovanie sietí Wi-Fi

Ďalším možným prístupom je sledovanie aktívnych prístupových bodov Wi-Fi. Túto metódu je možné jednoducho realizovať nielen SDR prijímačmi, ale aj bežnými Wi-Fi adaptérmí pre počítače. Výhodou tohto prístupu je získanie informácií ako napríklad SSID zariadenia a jeho MAC adresa, čo umožní jednoduché a presné určenie typu zdroja signálu (či sa skutočne

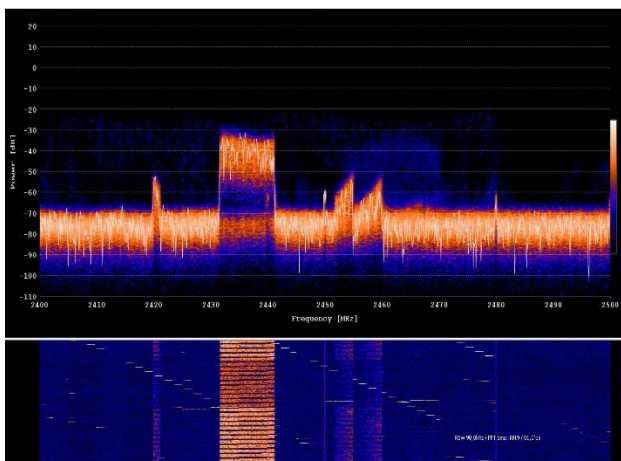
jedná o UAV). Rovnako tu je perspektíva dešifrovania zabezpečenia Wi-Fi siete a možný priamy prístup k telemetrickým údajom UAS. Na druhej strane je táto metóda limitovaná len na určité typy dronov, keďže podmienkou je využívanie Wi-Fi technológie pri komunikácii detegovaného UAS. [4]

6.3. Teoretický návrh riešenia detekcie UAV pomocou SDR

Vzhľadom na svoju spoľahlivosť a jednoduchosť je vhodné ako primárny spôsob detekcie zvoliť energetickú detekčnú metódu. Z vyššie uvedených teoretických poznatkov o technológiách rádiovkej komunikácie v UAS sme dospeli k záveru, že pre dosiahnutie najvyššej pravdepodobnosti detegovania bezpilotného lietajúceho zariadenia je výhodné monitorovanie pásma 2,4 GHz, prípadne 5,8 GHz, čo by malo zabezpečiť detekciu takmer všetkých bežne dostupných UAV. Teoreticky je ideálne sledovanie celého prevádzkového pásma použitého rádioprijímača, avšak takýto prístup kladie vysoké nároky na hardvér samotného SDR zariadenia a aj počítač spracovávajúci zachytený signál. Pre zabezpečenie úplného pokrytia oblasti kde sa má vykonávať detekcia UAV je nutné použiť všesmerovú anténu, t. j. takú, ktorá má vyžarovaciu charakteristiku rovnomernú vo všetkých smeroch, bez akýchkoľvek nepokrytých smerov. Signál prijímaný všesmerovou anténou je privádzaný do vhodného SDR prijímača. Softvér obsluhujúci SDR musí zabezpečiť skenovanie požadovaného frekvenčného pásma a zaznamenávať intenzitu prijímaného signálu na jednotlivých frekvenciách. Pásmo v ktorom očakávame výskyt komunikácie UAS však môže byť využívané aj inými zariadeniami (napr. WLAN siete pri pásme 2,4 GHz), preto je dôležité zabezpečiť odfiltrovanie okolitých známych zdrojov signálov. Systém preto po aktivácii musí urobiť referenčný záznam pozorovaného pásma, s ktorým sa pri jeho prevádzke budú porovnávať aktuálne dáta.

6.4. Demonštrácia energetickej rádiovkej detekcie

Pre overenie funkčnosti navrhovaného riešenia detekcie UAV a demonštráciu takéhoto systému bol uskutočnený jednoduchý experiment. Hardvérové vybavenie pozostávalo zo svojpomocne skonštruovaného **polvlnového dipólu** pre frekvenciu 2450 MHz (približný stred 2,4 GHz Wi-Fi pásma) umiestneného vertikálne a SDR prijímača **HackRF One**. Softvér použitý na merania bol **hackrf_sweep Spectrum Analyzer** umožňujúci skenovanie veľkej časti RF spektra v reálnom čase (v tomto prípade celé 2,4 GHz Wi-Fi pásmo). Experiment spočíval v skenovaní frekvenčného pásma 2,4 GHz pri aktívnom UAS, s cieľom zachytiť ním vysielané rádiové signály. Meranie sa uskutočnilo s tromi rôznymi modelmi UAS – *DJI Inspire 2*, *ZeroUAV HighOne* a *3DR IRIS*. Prenos videa malo zapnuté iba zariadenie DJI Inspire 2, ostatné dve vysielali výlučne telemetrické dáta a C2 link.



Obrázok 2: Detekcia DJI Inspire 2. Zdroj: Vlastné merania, softvér hackrf_sweep Spectrum Analyzer.

Rádiová stopa dronu DJI Inspire 2 bola veľmi dobre detekovateľná. Na spektrograme (Obr. 2) je jasne viditeľný OFDM prenos videa a taktiež menej zrejme FHSS prenosy telemetrie a C2 linku. Detekcia UAV bez aktívneho prenosu videa bola omnoho menej jednoznačná. Počas experimentov so zariadeniami 3DR IRIS a ZeroUAV HighOne sa podarilo zachytiť len krátke, málo zreteľné prenosy typické pre využívanú moduláciu FHSS.

7. Rádiová lokalizácia

Po detekcii prítomnosti neoprávneného UAV v zabezpečovanej lokalite je veľmi prínosné odhaliť aj jeho polohu, čo utvorí lepší prehľad o aktuálnej situácii a najmä pomôže pri realizácii zásahu proti takémuto zariadeniu. Uvádzame iba metódy s najlepším potenciálom pre realizáciu lokalizácie neoprávnených UAV, keďže rádiová lokalizácia je veľmi obsiahla téma ponúkajúca množstvo riešení [9].

7.1. Lokalizácia meraním RSS

Veľmi perspektívnu metódou rádiového určovania polohy UAV je meranie RSS (Relative Signal Strength – relatívna intenzita signálu) z viacerých meracích staníc v monitorovanej oblasti. Uplatňuje sa tu jav znižujúcej sa relatívnej intenzity signálu s narastajúcou vzdialenosťou vysielača od prijímača. Hardvérový je RSS lokalizácia veľmi málo náročná, každá meracia stanica musí byť vybavená iba všesmerovou anténou a SDR prijímačom, naopak na softvérovú stránku je to pomerne náročné riešenie. Meracia stanica zachytí signál vysielač z UAV (najčastejšie prenos videa) a vyhodnotí jeho RSS. Namerané údaje zo všetkých staníc sa odošlú do centrálného počítača kde sa medzi sebou porovnávajú a vytvorí sa odhad polohy zdroja vzhľadom na pozorovacie stanice. [5]

7.2. Rádiové zameriavanie zdroja signálu

Pasívne rádiové zameriavanie spočíva vo väčšine prípadov v určení relatívneho smerníka ku zdroju rádiového signálu (cieľa). Pri zameraní cieľa z viacerých meracích staníc je možné následne trianguláciou vypočítať jeho geografickú polohu. Metódy rádiového zameriavania sú plne pasívne, nevyžadujú teda žiadnu spoluprácu vysielača zameriavaného signálu, ani detailnú znalosť charakteristík tohto signálu. Z tohto dôvodu je rádiové

zameriavanie veľmi univerzálnym a efektívnym nástrojom lokalizácie rádiových cieľov rôzneho druhu. Rozlišujeme viacero metód rádiového zameriavania s rôznymi princípmi fungovania, vhodných na rozličné aplikácie, ktoré môžeme kategorizovať do troch väčších skupín [6]:

- **amplitúdové metódy** (napr. rotujúca anténa, Watson-Watt)
- **frekvenčné metódy** (Doppler, pseudo-doppler zameranie)
- **fázové metódy** (interferometria, korelačná interferometria)

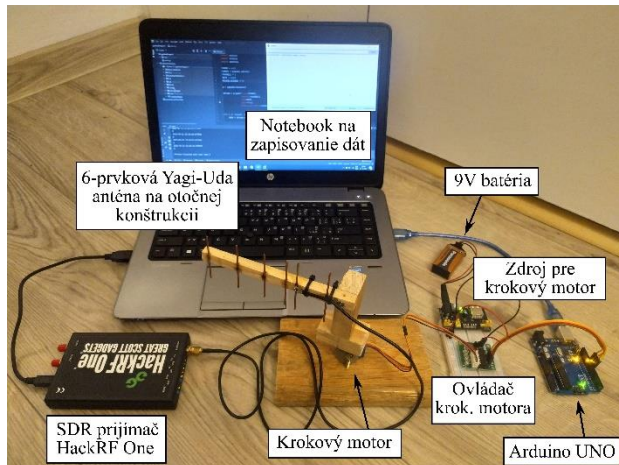
7.3. Teoretický návrh riešenia lokalizácie UAV amplitúdovým rádiovým zameraním rotujúcou anténou

Vzhľadom na charakter a rôznorodosť rádiových signálov vysielačných bezpilotnými zariadeniami je pre riešenie problému lokalizácie detegovaného UAV vhodné použiť amplitúdové rádiové zameriavanie pomocou rotujúcej smerovej antény z viacerých staníc a následnú trianguláciu polohy zdroja signálu. Takéto riešenie určovania polohy má výhodu v podobe jeho jednoduchosti a softvérovej nenáročnosti, na druhej strane však prináša aj nevýhodu potreby merania z viacerých staníc. Smerovú anténu je potrebné umiestniť na podstavec umožňujúci jej riadenú rotáciu o 360° a prenos údajov o aktuálnej polohe antény do softvéru spracovania. Anténa sa musí otáčať čo najväčšou možnou rýchlosťou (s ohľadom na konštrukčné a softvérové obmedzenia) aby bolo možné pomerne presné sledovanie pohybu aj rýchlejšie sa pohybujúcich UAV. Prvým krokom úspešnej lokalizácie je detekcia UAV podľa vyššie popísaného princípu, z čoho získame frekvenciu na ktorej aktuálne cieľ vysiela. Na túto frekvenciu sa následne naladí SDR prijímač pre zameriavanie a zvolí vhodnú pásmovú šírku pre daný typ prenosu. Zameriavací softvér musí dokázať v reálnom čase priradiť údaj o azimute natočenia antény k intenzite prijímaného signálu na požadovanej frekvencii a následne identifikovať kde sa nachádza jeho maximum. Ideálne je keď má signál stálu frekvenciu a intenzitu (napr. OFDM prenos videa v UAV), ak tomu tak nie je (napr. FHSS a DSSS prenosy C2 linku a telemetrie) musíme ošetriť stanovenie intenzity komplikovanými softvérovými algoritmami, v niektorých prípadoch zameriavanie touto metódou dokonca nemusí byť vôbec možné. Výstupom zameriavacej stanice je azimut na ktorom bolo pozorované maximum intenzity sledovaného signálu, čo môžeme považovať za smer k cieľu od meracieho stanoviska. Vhodným prijímačom pre realizáciu tejto metódy je HackRF One, spracovanie signálu je ideálne riešiť prostredníctvom algoritmu na základe GNURadio.

7.4. Demonstrácia rádiového zameriavania a lokalizácie UAV

Za účelom overenia princípov zameriavania metódou rotujúcej antény bola skonštruovaná jednoduchá experimentálna zostava. Zostáva z vertikálne polarizovanej **6-prvkovej Yagi-Uda** smerovej antény umiestnenej na otočnej konštrukcii. Táto je poháňaná krokovým motorom riadeným jedno-čipovým mikropočítačom typu **Arduino UNO**. Kód uložený v mikropočítači cez riadiaci elektrický obvod riadi rýchlosť a rozsah otáčania podľa zadaných požiadaviek, pričom zároveň posiela informáciu o polohe natočenia antény v danom čase cez USB port do počítača. Na monitore sa zobrazí presný časový údaj a jemu zodpovedajúci uhol otočenia od východiskovej polohy,

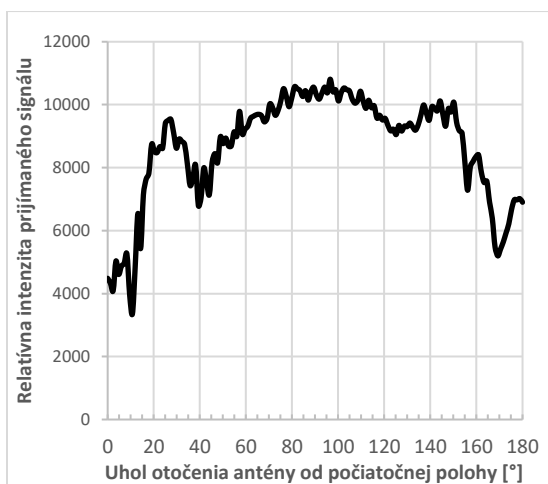
tieto údaje následne uložíme pre ďalšie spracovanie. Príjem signálu má na starosti SDR prijímač **HackRF One** pripojený k laptopu. Spracovanie signálu je realizované transformáciou úplného nespracovaného RAW signálu z SDR na zvukový signál pomocou softvéru SDRSharp. Tento zvukový výstup je priamo úmerný veľkosti intenzity signálu v dB, vďaka čomu je možné použiť ho na presný záznam RSS. Intenzita signálu je následne zapisovaná v nastaviteľných časových intervaloch jednoduchým algoritmom napísaným v programovacom jazyku Python.



Obrázok 3: Experimentálna zostava na demonštráciu rádiového zameriavania rotujúcou anténou. Zdroj: Autori.

7.4.1. Zameriavanie rádiového zdroja

Pri demonštrácii bolo zameriavané UAV typu *DJI Inspire 2*, umiestnené stacionárne na zemi. Počas celého merania komunikovalo so svojou riadiacou stanicou, vrátane prenosu videa. Rozsah otáčania antény pri meraniach bol z praktických dôvodov zvolený na 180°, po dosiahnutí tohto uhla sa rotácia obráti a pokračuje späť ďalších 180°. Skenovaním frekvenčného pásma 2,4 GHz sa pred začatím merania určí frekvencia, na ktorej UAV aktuálne vysiela. Na túto sa naladí SDR prijímač HackRF One pomocou softvéru SDRSharp, následne sa aktivuje zapisovanie RSS signálu a rotácia antény spolu so zapisovaním jej uhla natočenia. Získané dáta sme pre prehľadnosť a jednoduchšie vyhodnotenie spracovali do podoby rôznych grafov.

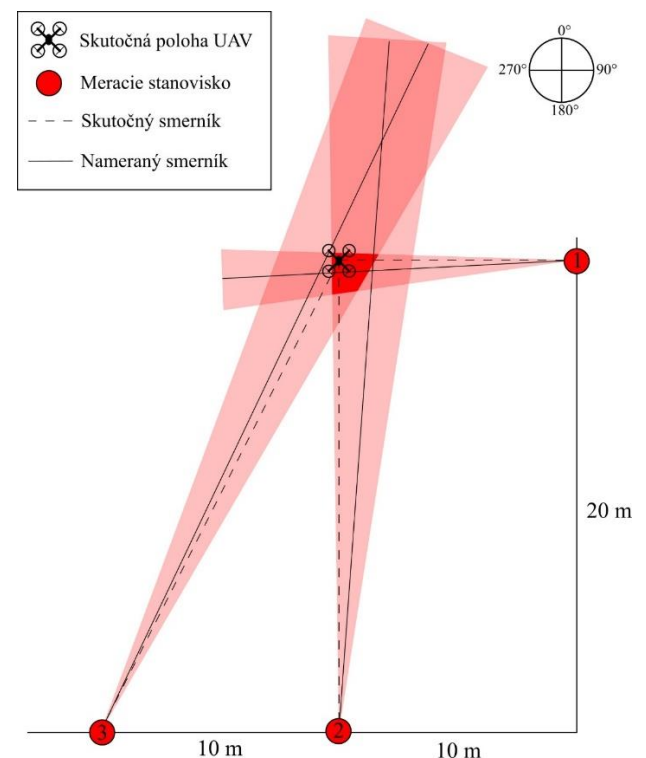


Graf 2: RSS podľa uhla otočenia, rádiový zdroj 90° od referenčného smeru. Zdroj: Autori.

V tomto príklade (Graf 2) je priemerná hodnota relatívneho smerníka ku zdroju signálu približne 95°. Skutočný relatívny smerník k zameriavanému UAV v čase merania bol 90°. Vzniknutá odchýlka mohla byť spôsobená predovšetkým nepresnosťou pri meraní skutočného smerníka, kalibrácií počiatočnej polohy antény, alebo aj vŕhami v otočnom mechanizme, nedokonalosťami pri zázname dát a smerovou charakteristikou použitej antény. Na základe vykonaných meraní odhadujeme chybu zamerania pomocou nami použitej experimentálnej zostavy na najviac $\pm 5^\circ$.

7.4.2. Lokalizácia rádiového zdroja

Opakovaním postupu zameriavania z viacerých rôznych pozícií je možné na základe týchto meraní určiť polohu zdroja signálu – čiže UAV. Pre demonštráciu bol rádiový zdroj – dron *DJI Inspire 2* zameriavaný postupne z troch miest. Na Obr. 4, ktorý znázorňuje tento experiment, sú zaznamenané polohy a vzdialenosti meracích stanovísk voči zameriavanému dronu. Z každého stanoviska sa uskutočnilo rádiové zameranie pomocou rotujúcej smerovej antény. Výsledné smerníky (aritmetický priemer viacerých meraní) sú v nákrese zobrazené čiernymi čiarami od jednotlivých stanovísk. Ružové kužele veľké 5° do oboch smerov od každého zo smerníkov ilustrujú odhadovanú chybu meraní (t. j. rozsah, v ktorom takmer s určitou predpokladáme výskyt cieľa). Prienik týchto troch kužeľov (červená plocha) určuje oblasť v ktorej je najvyššia pravdepodobnosť výskytu lokalizovaného cieľa. V prienikoch dvoch kužeľov (tmavšia ružová) je možnosť výskytu už nižšia. Prienik všetkých kužeľov má rozmery približne 2 x 2 m a zameriavané UAV sa skutočne nachádzalo na jeho okraji. Demonštrácia lokalizácie bola teda úspešná a dokonca aj pomerne presná.



Obrázok 4: Lokalizácia rádiovým zameraním. Zdroj: Autori.

8. Záver

Problematika detekcie a monitorovania UAV je v súčasnosti veľmi aktuálnou témou, vzhľadom na rýchlo rastúci počet UAS a riziká spojené s ich prevádzkou. Momentálne existuje niekoľko vhodných metód na riešenie tohto problému, ich aplikáciou do praxe vznikajú rôzne komerčné systémy zabezpečujúce ochranu objektov pred UAV. Skúmaná problematika má zatiaľ iba veľmi krátku históriu, systémy ochrany pred bezpilotnými prostriedkami sú rozšírené ešte len minimálne.

Jedným z dostupných spôsobov riešenia je rádiový frekvenčný detekcia, ktorá spočíva v zachytávaní rádiových prenosov vysielaných letiacim UAV pre výmenu informácií s riadiacou stanicou. Rádiový frekvenčný detekcia je pomerne ľahko realizovateľná, spoľahlivá, ponúka dosah minimálne rovnajúci sa dosahu sledovaného UAS a tiež aj možnosť jeho lokalizácie. Rádiové určenie polohy narušiteľa je možné uskutočniť niekoľkými rôznymi metódami. Hlavnou nevýhodou rádiový frekvenčný detekcie je neschopnosť odhaliť autonómne UAV, ktoré nekomunikujú so žiadnou riadiacou alebo monitorovacou stanicou.

Bakalárska práca sa venovala predovšetkým skúmaniu možnosti uplatnenia bežne dostupných amatérskych SDR prijímačov v rádiový frekvenčný detekcii a lokalizácii UAV. Najvhodnejším sa ukázal byť prijímač HackRF One, ktorý dokáže pokryť všetky frekvenčné pásma používané v UAS. V rámci práce boli vytvorené teoretické návrhy systémov detekcie a lokalizácie UAV, oba založené na SDR prijímači HackRF One. Základné princípy ktoré sa v týchto návrhoch uplatňujú boli preverené experimentálnymi meraniami. Merania dopadli úspešne, preukázali sme nimi funkčnosť, spoľahlivosť a dostatočnú presnosť zvolených metód pre túto aplikáciu. Potenciálna praktická realizácia predstavených návrhov by si vyžadovala ďalšie skúmanie a zlepšovanie popísaných princíпов a metód. Zameriavacia a lokalizačná časť takéhoto systému by pravdepodobne zostala limitovaná na detekciu UAV s prenosom obrazu, pričom detekčná časť by mala byť účinná na odhalenie takmer akéhokoľvek zariadenia riadeného pilotom na diaľku. Hlavným predpokladom realizácie takéhoto systému by bolo zhotovenie komplexného softvérového riešenia, ktoré by merania vykonávalo a vyhodnocovalo plne automaticky. V prípade úspešného vyvinutia takéhoto systému by sa mohlo jednať o finančne dostupné a spoľahlivé riešenie zabezpečenia objektov proti bezpilotným prostriedkom.

Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra 2014 - 2020 pre projekt: Inteligentné operačné a spracovateľské systémy pre UAV, s ITMS kódom projektu 313011V422, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Referencie

- [1] TAHA, B. a SHOUFAN, A. 2019. Machine Learning-Based Drone Detection and Classification: State-of-the-Art in Research. *IEEE Access*. [Online] 23. September 2019. [cit. 23. Apríl 2021.] https://www.researchgate.net/publication/336008624_Machine_Learning-Based_Drone_Detection_and_Classification_State-of-the-Art_in_Research.

- [2] COLLINS, T. F., et al. 2018. Software-Defined Radio for Engineers. *analog.com*. [Online] 2018. <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Software-Defined-Radio-for-Engineers-2018/SDR4Engineers.pdf>. ISBN-13: 978-1-63081-457-1.
- [3] BELLO, A. 2019. Radio Frequency Toolbox for Drone Detection and Classification. *DigitalCommons*. [Online] 2019. [cit. 28. Február 2021.] https://digitalcommons.odu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1161&context=ece_etds. DOI: 10.25777/9gkm-jd54.
- [4] DEEPSIG. 2020. Introduction to Commercial Drone Signals. *deepsig.ai*. [Online] 14. August 2020. [cit. 15. Marec 2021.] <https://www.deepsig.ai/news/introduction-to-commercial-drone-signals>.
- [5] GELMAN, I. et al. 2019. Adversary UAV Localization With Software Defined Radio. *Worcester Polytechnic Institute*. [Online] Máj 2019. [cit. 3. Máj 2021.] <https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-041719-144214/unrestricted/HassanGelmanLoftusMQP.pdf>.
- [6] ROHDE & SCHWARZ. 2010. Introduction into Theory of Direction Finding. *rohde-schwarz.com*. [Online] 2010. [cit. 16. Marec 2021.] https://cdn.rohde-schwarz.com/us/campaigns_2/a_d/Introduction-Into-Theory-of-Direction-Finding.pdf.
- [7] 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
- [8] Havel, k a kol., 2005. Základný kurz pre personál technického zabezpečenia letových prevádzkových služieb, Bratislava : LPS SR,, 2005.
- [9] Novák, A. 2005. Radio direction finding in air traffic services. *Promet-Traffic&Transportation* 17 (5), 273-276

O autorovi

Robert Dianovský – narodený 28.2.1999 v Leviciach, v rokoch 2014 – 2018 navštevoval Gymnázium Andreja Vrábla v Leviciach. V roku 2018 započal štúdium v študijnom programe letecká doprava na Žilinskej univerzite v Žiline, ktoré trvá do súčasnosti.