



KONŠTRUKČNÁ OPTIMALIZÁCIA ANTÉNNYCH SYSTÉMOV UAS

Barbora Bernátová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Pavol Pecho
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

In this scientific article, we will focus on the impact of various material on radio signal attenuation. In the theoretical part, we will take a closer look at the history of unmanned aerial systems, basic types of unmanned aerial vehicles and their practical usage. Furthermore, this paper describes the advantages of using the UAV for calibration the ILS and describes how electromagnetic signal transmission works. In preparation for the practical part, the article explains frequency bands and antennas, used in UAV communication. In the experimental part, the properties of individual materials and their impact on the performance of the radio modules are analysed. The outcome of the work is an analysis of signal attenuation measurements at three different frequencies. The measurement results showed that the greatest signal attenuation in each case was caused by the carbon due its conductivity. In terms of strength and permeability, we found that the PET-G cover increased the signal strength compared to the measurements without the cover. This analysis may helps in the design of covers for antenna systems and the UAV construction that ILS will calibrate in the UHF frequency band.

Keywords

Unmanned Aerial Systems, ILS, Antenna system, Radio signal.

1. Úvod

Odvetvie bezpilotných systémov (UAS) je v letectve pomerne mladé, no jeho potenciál je v civilnej aj obrannej oblasti rýchlo napredujúci. Technológia UAS sa rýchlo rozvíja a našla uplatnenie pri prieskume rôznych oblastí, monitorovaní, záchranných úkonoch a taktiež aj kalibrácii leteckých systémov.

UAS je súhrn všetkého, čo zabezpečuje fungovanie bezpilotného prostriedku (UAV), vrátane systému GPS, kamery, pozemnej stanice a riadiaceho systému, ktorý funguje ako komunikačný kanál medzi vysielačom a UAV [20]. Štandardne bezpilotný letecký systém je zložený z troch hlavných zložiek:

- Autonómny alebo človekom ovládaný riadiaci systém alebo vysielač,
- Bepilotné lietadlo (UAV),
- Systém príkazov a riadenia, označovaný ako systém komunikácie medzi vysielačom a UAV [21].

1.1. Delenie UAV

Bepilotné prostriedky sa klasifikujú podľa hmotnosti, spôsobu riadenia a podľa typu krídla. Nasledujúci text sa zameriava na delenie UAV, z hľadiska nosných plôch.

1.1.1. Bepilotný prostriedok s pevnou nosnou plochou

UAV s pevným krídlom je najvhodnejším bezpilotným prostriedkom na dlhý dolet s väčšou rýchlosťou. Aerodynamický tvar krídla umožňuje plynulé obtekanie vzduchu a tým vzniká

rozdiel tlakov na hornej a dolnej časti krídla. Rozdiel tlakov vytvára vztlačovú silu, potrebnú na udržanie sa vo vzduchu. UAV s pevným krídlom sú využívané nielen na komerčné a obranné účely, ale aj vo vedeckom odvetví, ako je kartografia, stavebníctvo a lesníctvo. Nevýhodou bezpilotných lietadiel s pevným krídlom je, že na vzlet vyžadujú vzletovú a pristávaciu dráhu. Okrem toho takéto UAV je schopné letieť len smerom dopredu, takže nemá rovnaké manévrovacie schopnosti ako rotorové UAV [1]. Pri lete UAV s pevným krídlom pôsobia na konštrukciu sily:

- Aerodynamický vztlak (vertikálna zložka sily)
- Aerodynamický odpor (pôsobí v horizontálnej osi UAV)
- Tiažová sila (vertikálna sila pôsobiaca nadol)
- Ťah (silá, ktorá poháňa UAV dopredu)
- Valivý odpor (sila vznikajúca pri dotyku podvozku s dráhou) [2]

1.1.2. Viacrotorové bezpilotné prostriedky

Viacrotorové UAV využívajú rotujúce krídla na vytváranie vztlaku. Takéto UAV sa dokážu vznášať and jedným miestom, poskytujú lepšiu manévrovateľnosť počas letu. Avšak majú obmedzený výdrž a rýchlosť, čo ich robí nevhodnými pre rozsiahle prieskumy a mapovanie [3].

1.1.3. Hybridné systémy a ornitoptéry

Hybridné UAV kombinujú vlastnosti pevných krídel a rotorov. Dokážu vertikálne vzlietať a pristávať ako multikoptéry, no vďaka aerodynamickému profilu krídel dokážu letať na dlhšie

vzdialenosti. Ornitoptéry napodobňujú let vtákov alebo hmyzu a používajú kývavé nosné plochy [3].

1.2. História bezpilotných prostriedkov

História bezpilotných systémov siaha až do 19. storočia, kedy Rakúsko použilo balóny bez posádky na bombardovanie Benátok. Tieto balóny, nesúce 11 až 14 kg výbušniny, mali dopadnúť na určené miesto a vybuchnúť. Aj keď útok kvôli náhlej zmene vetra zlyhal, ovplyvnil budúci vývoj UAS.

Prvý bezpilotný prostriedok s rádiovým navádzacím systémom vyvinul Archibald Low počas prvej svetovej vojny. Táto technológia, ktorá nahradila pilota operátorom na zemi, sa v praxi neuplatnila, ale vďaka inovatívnej myšlienke je A. Low považovaný za otca rádiových navádzacích systémov.

Najznámejším UAV druhej svetovej vojny bola nemecká raketa V-1. Tieto riadené strely, používané na demoralizáciu britskej spoločnosti, využívali autopilota na reguláciu výšky a rýchlosti letu. Autopilot bol vybavený gyroskopmi, kompasom a barometrom pre riadenie sklonu, náklonu, smeru výšky.

Vo Vietnamskej vojne boli UAV prvýkrát použité na prieskumné účely, pretože špiónážne satelity a lietadlá SR-73 Blackbird v tom čase ešte neboli pripravené na prevádzku.

Prelom nastal v 70. rokoch minulého storočia, kedy sa UAV stali dostupnejšími pre verejnosť. Rádiom riadené komponenty boli minimalizované, a to vzbudilo záujem vlastníť rádiovo ovládaný model, čo umožnilo rýchlejší rozmach UAV.

V roku 2006 bolo prvýkrát povolené komerčné používanie UAV, čo má za následok prudký nárast záujmu a dopytu verejnosti po bezpilotnom prostriedku [4].

2. Anténny systém UAV

Vzhľadom na to, že cieľom práce je meranie priepustnosti signálov, je nevyhnutné vysvetliť základné typy antén a pochopiť šírenie elektromagnetických vln. Anténa je kľúčovým prvkom v bezdrôtovej komunikácii, umožňujúca vysielanie alebo príjem elektromagnetických vln. Antény by mali byť umiestnené tak, aby minimalizovali aerodynamický odpor a elektromagnetické interferencie od iných elektronických zariadení na palube, ktoré by mohli ovplyvniť kvalitu signálov, a zároveň by mali byť chránené pred možnými poškodeniami, ktoré by mohli nastať počas vzletu alebo pristávania. Umožňujú bezpilotným prostriedkom komunikovať s riadiacou stanicou na zemi a prenášať dôležité dáta, ako je video, GPS, informáciu o polohe a výške a podobne.

2.1. Šírenie elektromagnetických vln cez materiály

Elektromagnetické vlny vznikajú kmitaním elektrického náboja a majú elektrickú aj magnetickú zložku. Prenášajú svoju energiu cez vákuum rýchlosťou $3 \cdot 10^8$ m/s. Keď elektromagnetická vlna narazí na atómy materiálu, energia tejto vlny sa absorbuje. Absorpcia energie spôsobuje, že vibrujúce elektróny v atóme vytvoria novú elektromagnetickú vlnu. Hoci tieto vibrácie prebiehajú len veľmi krátky čas, oneskorujú pohyb vlny cez médium. Akonáhle je energia elektromagnetickej vlny opätovne vyžiarená atómom, prechádza malou oblasťou medzi atómami, kde sa opakovane absorbuje a vyžiari. Tento proces absorpcie a reemisie spôsobuje, že výsledná rýchlosť elektromagnetickej

vlny je menšia, ako rýchlosť šírenia elektromagnetickej vlny vo vákuu [5].

Výber materiálu má významný vplyv na útlm signálu, a preto je dôležité zhodnotiť vlastnosti materiálov a vybrať ten, ktorý je najvhodnejší pre danú aplikáciu.

2.1.1. Balzové drevo

Balzové drevo je jedným z najľahších materiálov na svete s veľmi nízkou hustotou, ktorá sa v závislosti od rôznych druhov pohybuje od 40 do 340 kg/m³. Okrem nízkej hmotnosti, má značnú odolnosť voči ťahu, tlaku a ohybu a zároveň je balzové drevo veľmi pružné [6].

2.1.2. Polyaktidové vlákno a PET-G

Polyaktidové vlákno (PLA) alebo kyselina polymliečna je biologicky odbúrateľný plast, získaný z biologicky odbúrateľných zdrojov (kukuričný škrob alebo cukrová trstina), ktorý sa používa pri modelovaní UAV pomocou 3D tlačne. Hlavnou nevýhodou PLA je jeho nedostatočná pevnosť, ktorú ovplyvňuje priľnavosť vrstiev, ktorá vzniká pri vyšších teplotách tlačne.

Polyetylénereftalát (PET) alebo upravená verzia PET-G, pričom „G“ znamená „modifikovaný glykol“, ktorého výsledkom je pevný materiál, ktorý odoláva vysokým teplotám, UV žiareniu a podobne [7].

2.1.3. Extrudovaný polystyrén

Tento ľahký extrudovaný penový polystyrén je odolný voči mechanickému zaťaženiu, dokáže zniesť zaťaženie v tlaku 300 kPa a je vhodný na výrobu modelov, a na všeobecné modelárske aplikácie [8].

2.1.4. Uhlíkové vlákno

Uhlíkové vlákna sú v leteckom priemysle známe svojou pevnosťou, ľahkosťou a tuhosťou a vodivosťou. Pre elektrickú vodivosť platí, že uhlíkové vlákna budú lepšie viesť elektrickú energiu paralelne, so smerom vlákna. Väčšina kompozitných štruktúr sa vyrába ukladaním vrstiev v rôznych orientáciách tak, aby sa dosiahli potrebné fyzikálne požiadavky na zaťaženie. Preto kompozity z uhlíkových vlákien vykazujú vysokú vodivosť v rovine, ale vodivosť cez hrúbku je nižšia [6].

2.1.5. Sklolaminát

Sklolaminát nie je magnetický ani elektricky vodivý, a preto je sklenené vlákno z väčšej časti transparentné pre rádiové vlny a elektromagnetické signály. Sklolaminát ponúka množstvo výhod z hľadiska jeho pevnosti, odolnosti a je skvelou voľbou ako ochranný kryt pre antény a iné telekomunikačné zariadenia [9].

2.2. Charakteristika frekvenčných pásiem

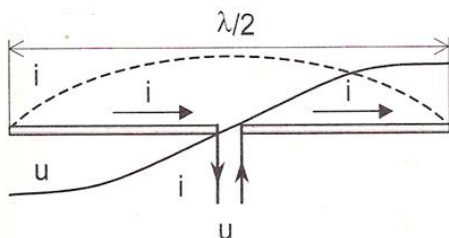
Frekvenčným pásmom označujeme špecifický rozsah frekvencií v elektromagnetickom spektre. Toto spektrum sa delí na pásma od veľmi nízkych frekvencií (VLF), až po extrémne vysoké frekvencie (EHZ). Každé frekvenčné pásmo má hornú a dolnú hranicu. Na prenos bezdrôtového signálu pre rôzne účely sú pridelené rôzne frekvenčné pásma tak, aby umožňovali

vzájomnú koexistenciu a využívanie bez chaosu. Frekvencia a vlnová dĺžka sú tiež v nepriamom vzťahu, čím vyššia je frekvencia, tým kratšia je vlnová dĺžka. Pri výbere antény pre bezpilotný prostriedok je dôležité zvážiť frekvenčné pásmo, v ktorom bude UAV pracovať. Rôzne typy antén sú navrhnuté tak, aby efektívne pracovali v rôznych frekvenčných pásmach, a preto si ďalej vysvetlíme základné typy antén [10].

2.2.1. Všesmerová anténa

Je to typ antény, ktorá prijíma alebo vysiela signály vo všetkých smeroch, teda vytvárajú 360° vyžarovací diagram v tvare šišky, ktorý zabezpečuje čo najširšie pokrytie signálom [11].

Jednou z najjednoduchších a najrozšírenejších všesmerových antén je dipólová anténa, ktorá sa vyznačuje svojou jednoduchou konštrukciou a efektívnosťou. Ako už názov napovedá, dipólová anténa sa vo svojej základnej konštrukcii skladá z dvoch vodivých prvkov (zvyčajne tyče alebo kovové drôty). Tieto vodivé prvky sú oddelené izolátorom a napájané na koaxiálny kábel, ktorým prechádza elektrický prúd v oboch vodičoch. Dĺžka prvkov je práve polovica vlnovej dĺžky. Na oboch koncoch dipólu je maximum striedavého napätia U a uprostred preteká maximálny striedavý prúd I . Teda pozdĺž anténneho vodiča nie je rozloženie prúdu rovnomerné, ale klesajúce. To znamená, že všetky časti dipólu nevyžarujú vysokofrekvenčnú energiu s rovnakou účinnosťou, pričom dĺžka dipólu je rovná polovici vlnovej dĺžky, ak je dipól rezonančný. Rezonancia nastáva, keď sa elektrický signál šíri z jedného konca vodiča na druhý a späť za rovnaký čas, ako je perióda jedného cyklu frekvencie [13].



Obrázok 1. Priebeh striedavého prúdu a napätia v dipóle [14]

2.2.2. Smerová anténa

Smerová anténa vysiela alebo prijíma signály len v určitom smere, teda sústreďujú vysokofrekvenčnú energiu do jedného smeru. Vďaka tomu sú výkonnejšie ako všesmerové antény a vhodnejšie na prenos na veľké vzdialenosti [15].

Yagi-Uda anténa je vhodná pre situácie, kedy je potrebný vysoký zisk a malý uhol vyžarovania. Anténa sa skladá z dipólu, reflektora a direktora [16].

2.3. Kalibrácia ILS pomocou bezpilotného prostriedku

ILS je základným navigačným systémom, ktorý umožňuje pilotom automaticky pristáť s lietadlom za zníženej viditeľnosti, počas letov podľa prístrojov (IFR). Na udržanie certifikácie ILS, musia letiská vykonávať pravidelné kalibračné kontroly, ktoré

zahŕňajú lety s posádkou a pozemné merania. Avšak tieto operácie majú svoje obmedzenia, ako napríklad vysoké finančné náklady a negatívny vplyv na životné prostredie pri leteckých kontrolách, zatiaľ čo pozemná operácia je obmedzená z hľadiska dosiahnutej vzdialenosti a výšky. Pozemné kalibračné operácie ILS sa vykonávajú pomocou stožiarov, ktoré nesiahajú vyššie ako približne 25 metrov od zeme. Použitie bezpilotných prostriedkov na kalibráciu ILS prináša úsporu času a nákladov, zníženia emisií a hluku, zvýšenie kapacity letiska rozšírenie pozemných meraní ILS. ILS sa skladá z lokalizéru a zostupový maják [17].

2.3.1. Lokátorová anténa

Lokalizér vysiela veľmi krátke vlny na frekvencii 108,10 – 111,95 MHz, avšak frekvencia lokalizéru je len na nepárnych desiatinných číslach, s odstupom kanálov 50 kHz [18]. Výsledná veľkosť lokátorovej antény, pracujúcej vo VHF pásme, bude 1,30 m a teda rameno dipólu bude zodpovedať dĺžke 0,65 m.

2.3.2. „Glideslope“ anténa

Zostupový maják zabezpečuje pre pilota vertikálne navádzanie na dráhu. Anténny systém kooperujúci s pozemným UHF vysielačom pracuje v pásme 329,30 – 335,00 MHz, s odstupom medzi jednotlivými kanálmi 50 kHz [18]. Výsledná veľkosť „glideslope“ antény je 0,44 m, pričom každé rameno dipólu bude mať približne 20 cm.

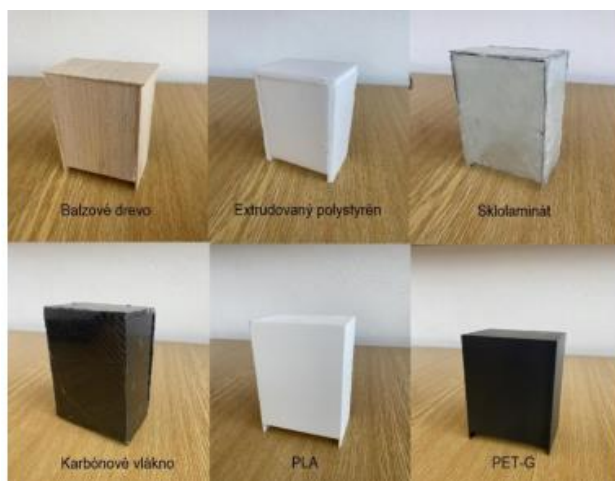
3. Metodika a metódy skúmania

Prvým krokom úspešného merania priepustnosti signálu je výber vhodných materiálov pre kryt. Na samotné meranie signálu na každej frekvencii, bola definovaná vzdialenosť medzi vysielačom a prijímačom 50 metrov. Vysielaný signál bude vyžarovaný z rádiových modulov, ktoré budú napájané na zdroj energie, batériu. Počas merania budú vysielané signály o rôznej veľkej frekvencii (433 MHz, 868 MHz, 5,8 GHz). Podľa konkrétnej frekvencie sa následne pripojí príslušný rádiový modul alebo SDR prijímač. Vhodným SDR prijímačom pre realizáciu tejto metódy merania je HackRF One.

3.1.1. Vyhotovenie krytu antény

Pred začatím výroby krytu pre rádiové moduly, bolo nutné zmerať ich dĺžku, šírku a výšku tak, aby veľkosť krytu ostala zachovaná pre každý rádiový modul (vysielač). Na základe týchto meraní sme jednotlivé časti krytu vyrezali z balzového dreva a extrudovaného polystyrénu. Následne sa tieto časti zlepením spojili do požadovaného tvaru. Ďalšie kryty z PLA a PET-G materiálu bolo nutné navrhnuť v Autodesk Inventor. Po dokončení návrhu sa model krytu importoval do 3D tlačiarne.

Lamináciu uhlíkového a skleneného vlákna sme vyrobili pevný a odolný kompozit. Proces laminácie pozostával z postupného ukladania vlákien, za použitia epoxidovej živice. Následne sa stvrdnutá tkanina vybrúsila na požadovanú veľkosť a zlepená lepidlom z tavnej pištole.



Obrázok 2. Kryty pre anténu vyrobené z rôznych materiálov [Autor]

3.1.2. Meranie rádiovým modulom RA-02 LoRa

Na meranie útlmu signálu boli použité dva identické rádiové moduly RA-02 LoRa so všesmerovou anténou, pracujúcou na frekvencii 433 MHz. Keďže tento rádiový modul pracuje ako vysielateľ a prijímač, použili sme ho na obe funkcie. Vysielateľ sme umiestnili na statív 50 metrov od prijímača. Jeho poloha bola pevne zaistená, aby počas merania nedošlo k zmene polohy antény. Meranie prebiehalo v exteriéri bez prekážok medzi vysielateľom a prijímačom. Počas merania sme na vysielateľ postupne umiestňovali šesť rôznych krytov a sledovali zmeny v sile signálu. Výsledky merania boli zaznamenané softvérom Arduino, ktorý zobrazoval hodnotu sily signálu v dBm.

3.1.3. Meranie rádiovým modulom RFD868x

Postup merania útlmu signálu na 868 MHz frekvencii bol v zásade identický s meraním na 433 MHz. Opäť sme vysielateľ umiestnili na statív vo vzdialenosti 50 metrov od prijímača a sledovali sme zmeny v sile signálu pri prechode rôznymi materiálmi. Pomocou softvéru RFD900Tools sme zaznamenali hodnoty a následne prepočítali na dBm.

3.1.4. Meranie rádiovým modulom FX2-ultimate

Na meranie útlmu signálu sme použili vysielateľ FX2-ultimate a umiestnili ho 50 metrov od SDR zariadenia. Vysielateľ bol vybavený všesmerovou anténou s frekvenciou 5,8 GHz, ktorá je určená na prenos video alebo veľkého objemu dát na krátke vzdialenosti, a preto je citlivá na prekážky v okolí. Pomocou SDRsharp softvéru sme dekodovali prijímaný signál, pretože SDR zariadenie len transformuje analógový signál z antény na digitálny signál, pomocou analógovo-digitálneho prevodníka.

4. Výsledky

Výsledky merania ukázali, že útlm signálu sa líši v závislosti od frekvencie a materiálu krytu antény.

4.1.1. Výsledky merania na 433 frekvencii

Výsledok merania na 433 MHz frekvencii ukazuje, že kryt nemá výrazný vplyv na šírenie rádiových vln, na tejto frekvencii. Najviac útlmu signálu spôsobuje kryt z uhlíkového vlákna, pričom signál je len o 2 dBm slabší než signál šíriaci sa cez

balzové drevo. Najľahším a zároveň najmenej škodlivým krytom pre šírenie signálov je kryt z balzového dreva, ktorý nespôsobil žiaden útlm signálu, v porovnaní s meraním bez krytu. Výsledky merania sú zaznamenané v tabuľke 1.

Tabuľka 1. Nameraná sila signálu na 433 MHz frekvencii [Autor]

Materiál krytu	Sila signálu (dBm)
Balzové drevo	-84
Extrudovaný polystyrén	-84,5
PLA	-85
PET-G	-85
Sklolaminát	-85
Uhlíkové vlákno	-86
Bez krytu	-84

4.1.2. Výsledky merania na 868 MHz frekvencii

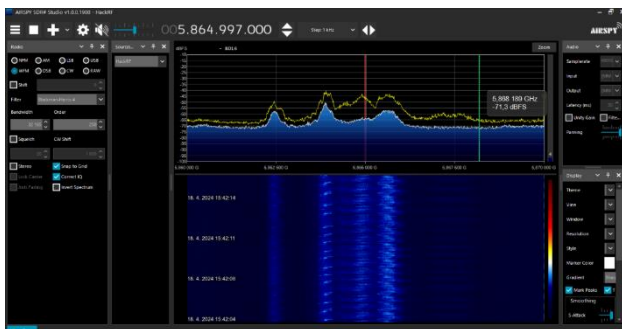
Pri meraní intenzity signálu rádiovým modulom RFD868x s monopól anténou sme zistili, že anténa bez krytu vysiela signál s rovnakou silou, ako anténa zakrytá PLA krytom, či krytom z balzového dreva a extrudovaného polystyrénu. Naopak, kryt z uhlíkového vlákna mal na vysielač signálu najnegatívnejší vplyv a absorboval najviac rádiových signálov spomedzi ostatných krytov. Pri analýze grafov sme sa zamerali na hodnotu „RSSI Local“, ktorá indikuje silu prijímaného signálu. Pre konverziu sily signálu do jednotiek dBm, sme použili priemernú hodnotu signálu a výsledky sú zahrnuté v tabuľke 2.

Tabuľka 2. Prepočítané sily signálu na dBm [Autor]

Materiál krytu	Sila signálu (dBm)
Balzové drevo	-51,5
PLA	-51,5
PET-G	-52
Sklolaminát	-53
Uhlíkové vlákno	-59,5
Extrudovaný polystyrén	-51,5
Bez krytu	-51,5

4.1.3. Výsledky merania na 5,8 GHz

Posledným meraním bolo dokázané, že so zvyšujúcou sa frekvenciou dochádza k podstatne väčšiemu útlmu signálu. Výsledné merania naznačujú, že anténa bez krytu vysiela signály s menšou silou, než anténa s PET-G krytom. Na druhej strane, kryt z uhlíkového vlákna najviac tlmi vysielač signál. V spodnej časti obrázku 2 je zobrazený spektrogram signálu z rádiového modulu FX2-ultimate s PET-G krytom, vysielačného z 50 metrov. Spektrogram zobrazuje grafické znázornenie intenzity prijatých signálov v reálnom čase, ako funkciu frekvencie na vodorovnej osi a času na zvislej osi. Farebná škála znázorňuje intenzitu signálu, teda čím je farba modrejšia, tým je signál slabší.



Obrázok 3. Spektrogram signálu s PET-G krytom [Autor]

5. Zhrnutie výsledkov

Na základe vykonaných meraní môžeme konštatovať, že kryt vyrobený z uhlíkového vlákna spôsoboval najväčší útlm signálu na všetkých troch frekvenciách. Toto zistenie naznačuje, že tento materiál absorbuje rádiové vlny a dochádza k značnému poklesu sily signálu, čo môže mať za následok zhoršenie kvality prenosu dát alebo znížený dosah. V praxi sa kryt z uhlíkových vlákien neodporúča používať na ochranu anténnych systémov v UAV. Použitie uhlíkového vlákna v trupovej časti UAV by minimalizovalo elektromagnetické interferencie generované palubnými prístrojmi alebo motormi, čím by sa zabezpečil spoľahlivejší prenos dát z paluby do riadiacej stanice na zemi.

Ďalším zistením bolo, že všetky testované materiály výrazne neovplyvňujú silu signálu na frekvencii 433 MHz. To umožňuje použitie širšej škály materiálov bez významného vplyvu na silu signálu. Podobne aj pri 868 MHz frekvencii dochádza k menšej interakcii s nevodivými materiálmi. Stále ide o relatívne dlhú vlnovú dĺžku, takže vplyv materiálu na silu signálu je síce väčší ako pri 433 MHz, ale stále neobmedzujúci.

Pri meraniach na 5,8 GHz frekvencii bol nameraný nárast sily signálu použitím PET-G krytu, oproti meraniu bez krytu. Túto skutočnosť odôvodňujeme tým, že PET-G kryt izoluje elektromagnetické rušenie od okolia a tým zvyšuje intenzitu signálu [19].

6. Záver

Na základe tohto článku sme si rozobrali princíp šírenia elektromagnetických vln cez rôzne materiály. V súvislosti s prípravou sme si vysvetlili, akým spôsobom boli kryty vyrobené a následne použité v meraniach.

Naším prvotným cieľom bolo navrhnuť a otestovať materiály na troch rôznych frekvenciách. Merania boli vykonané rádiovými modulmi RA-02 LoRA pre 433 MHz frekvenciu, RFD868x pre 868 MHz frekvenciu a FX2-ultimate pre 5,8 GHz frekvenciu. Metóda merania, ktorá bola použitá, je priama metóda merania.

Výsledky ponúkajú poznatky o vplyve materiálov na šírenie rádiových vln na frekvenciách, ktoré sa využívajú v bezpilotných systémoch. Výsledky práce môžu byť užitočné pri navrhovaní krytov pre anténne systémy a konštrukcie UAV, ktoré bude kalibrovať ILS v UHF frekvenčnom pásme. Keďže jedným z meraní bolo meranie v UHF pásme a to korešponduje s frekvenčným pásmom zostupového majáka, naše meranie je relevantné.

Referencie

- [1] VERGROUW, B. – HUUB, N. – GEERT, B. – BART, C. 2016. Drone Technology: Types, Payloads, Applications, Frequency Spectrum Issues and Future Developments. The Hague: T.M.C. Asser Press. 2016. s. 21-45. ISBN 978-94-6265-131-9 978-94-6265-132-6
- [2] SUK, Michal. 2023. Vývoj konštrukcie experimentálneho hybridného UAV dlhého doletu s pevnou nosnou plochou. [diplomová práca]. Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta PEDAS, Katedra leteckej dopravy, 2023. 158 s.
- [3] VERGROUW, B. – HUUB, N. – GEERT, B. – BART, C. 2016. Drone Technology: Types, Payloads, Applications, Frequency Spectrum Issues and Future Developments. The Hague: T.M.C. Asser Press. 2016. s. 21-45. ISBN 978-94-6265-131-9 978-94-6265-132-6.
- [4] VYAS, Kashyap. A Brief History of Drones: From Pilotless Balloons to Roaming Killers [online]. 29. jún 2020. [cit.2024-04-22]. Dostupné na: <https://interestingengineering.com/innovation/a-brief-history-of-drones-the-remote-controlled-unmanned-aerial-vehicles-uavs>
- [5] The Physics Classroom Website [online]. [cit. 2024-04-22]. Dostupné na: <https://www.physicsclassroom.com/mmedia/waves/em.cfm>
- [6] COMPOSITE ENVISIONS. 2020. How Well Carbon Fiber and Other Fibers Shield Radio Waves [online]. 2020. [cit. 2024-04-18]. Dostupné na: <https://compositeenvisions.com/document/how-well-carbon-fiber-and-other-fibers-shield-radio-waves/>
- [7] PETG vs PLA Filament: The Main Differences [online]. [cit. 2024-04-22,]. Dostupné na: <https://all3dp.com/2/petg-vs-pla-3d-printing-filaments-compared/>
- [8] STYROPAN. Extruded polystyrene XPS – Characteristics, advantages & applications [online]. [cit. 2024-04-18]. Dostupné na: <https://www.styropan.gr/en/products/thermal-insulation/extruded-polystyrene/about>
- [9] TENCOM. Is Fiberglass Conductive? And Other Common Questions About FRP [online]. [cit. 2024-04-22]. Dostupné na: <https://www.tencom.com/blog/is-fiberglass-conductive>
- [10] JEMENGINEERING. 2020. Frequency Bands & Applications [online]. 2020. [cit. 2024-04-18]. Dostupné na: <https://jemengineering.com/blog-frequency-bands-and-applications/>
- [11] ITM COMPONENTS. Omnidirectional and Directional Antennas - What's the Difference? [online]. [cit. 2024-04-18]. Dostupné na: <https://itm-components.co.uk/blogs/news/69156739-there-are-two-main-types-of-antennas-do-you-know-the-difference>
- [12] AGARWAL, T. 2022. Dipole Antenna : Design, Working, Types & Its Applications [online]. 2022. [cit. 2024-04-18]. Dostupné na: <https://www.elprocus.com/dipole-antenna/>

- [13] AGARWAL, T. 2022. Dipole Antenna : Design, Working, Types & Its Applications [online]. 2022. [cit. 2024-04-18]. Dostupné na: <https://www.elprocus.com/dipole-antenna/>
- [14] SEHNAL, J. Antény [online]. [cit. 2024-04-18]. Dostupné na: <https://docplayer.cz/17470011-Anteny-zpracoval-ing-jiri-sehnal-1-napajeci-vedeni-2-charakteristicke-vlastnosti-anten-a-zakladni-druhy-anten.html>
- [15] NOVOTECH. Omnidirectional Antenna vs Directional Antenna Explained [online]. [cit. 2024-04-22]. Dostupné na: <https://novotech.com/learn/m2m-blog/blog/2023/03/29/want-to-end-the-great-debate-directional-vs-omnidirectional-antennas/>
- [16] JAKUBÍČEK M. 2013. Yagiho anténa napájaná vlnovodem integrovaným do substrátu [bakalárska práca]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 2013. 98 s.
- [17] ALTIGATOR. Airport Automatic Landing Systems: ILS, Calibration Using Drones [online]. 2018. [cit. 2024-04-18]. Dostupné na: <https://altigator.com/en/ils-calibration-drone-air-traffic-management-uav/>
- [18] LANDING SYSTEM. Pozemné vybavenie - Instrument Landing System (ILS) [online]. [cit. 2024-04-22]. Dostupné na: https://landingsystem.com/sk/pozemne_vybavenie.html
- [19] ELEKTROLAB. Elektromagnetické a rádiovlnové rušenie a spôsoby ich redukcie. [online]. [cit. 2024-04-10]. Dostupné na: <https://www.elektrolab.eu/blog/elektromagneticke-a-radiofrekvencne-rusenie-a-sposoby-ich-redukcie>
- [20] PILOT INSTITUTE. What's the Difference Between Drones, UAV, and UAS? Definitions and Terms. [online]. 22. marec 2020. [cit. 2024-04-18]. Dostupné na: <https://pilotinstitute.com/drones-vs-uav-vs-uas/>
- [21] Unmanned Aerial Systems (UAS) | SKYbrary Aviation Safety [online]. [cit. 2024-04-18]. Dostupné na: <https://skybrary.aero/articles/unmannedaerial-systems-ua>