

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Aparatura pro měření vyzařovací charakteristiky antén
pomocí UAV

Bc. Filip Prakesch

Diplomová práce
2023

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Filip Prakesch**
Osobní číslo: **I20186**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Téma práce: **Aparatura pro měření vyzařovací charakteristik antén pomocí UAV**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování

Navrhněte, realizujte a ověřte aparaturu pro měření vyzařovacích charakteristik antén ve vzdálené zóně s použitím bezpilotního prostředku kategorie mikro-UAV (kvadroptéry). Při návrhu uvažujte konfigurace pro měření planárních aktivních elektronicky vychylovaných anténních řad při vysílání i na příjmu. Aparaturu realizujte pro měření v pásmu X. Při řešení realizujte palubní vysílač a přijímač v pásmu X vysílající CW signál bez modulace, případně s modulací 1kHz. Navrhněte algoritmy pro zpracování signálu přijatého radarem/palubním přijímačem a jejich interpretaci na základě záznamu trajektorie letu.

Rozsah pracovní zprávy: **50**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

PARINI, Clive, Stuart GREGSON, John MCCORMIK a Daniël JANSE VAN RENSBURG. *Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements*. United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2014. ISBN 978-1849195607.

BALANIS, Constantine A. *Modern antenna handbook*. Hoboken, NJ: Wiley, 2008. ISBN 04-700-3634-6.
QuadSAT to Introduce UAV Antenna Testing Technology at SATELLITE 2020. *Microwave journal* [online]. 2020: Microwave journal, 2020 [cit. 2020-10-06]. Dostupné z: <https://www.microwavejournal.com/articles/33597-quadsat-to-introduce-its-uav-antenna-testing-technology-at-satellite-startup-pavilion>

Ardu Pilot [online]. 2016 [cit. 2020-10-06]. Dostupné z: <https://ardupilot.org/>

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavel Šedivý**

Datum zadání diplomové práce: **8. listopadu 2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **20. května 2022**

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Jan Pidanič, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 19. listopadu 2021

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 15. 05. 2022

Filip Prakesch

Poděkování

Zde chci poděkovat všem, kteří mi pomohli, poradili a podpořili mě při vytváření této práce. Děkuji vedoucímu práce Pavlu Šedivému za jeho rady, pomoc a trpělivost a dále pak své rodině.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá návrhem, realizací a testováním aparatury pro měření vyzařovacích charakteristik antén ve vzdálené zóně s použitím bezpilotního prostředku kategorie mikro-UAV.

Práce obsahuje teorii k měření antén, pravidla letového provozu mikro-UAV, chyby působící na měření, návrh zařízení, popis vytvořených programů, ukázkou měření a výsledků.

Klíčová slova

Pracoviště pro měření antén ve vzdálené zóně, vyzařovací charakteristika antény, vzdálená zóna, anténa, mikro-UAV, SDR

Title

Micro-UAV unmanned vehicle based far field antenna test range measuring equipment.

Annotation

This master thesis focuses on the design, implementation, and testing of a micro-UAV unmanned vehicle based far field antenna test range measuring equipment.

Theses covers antenna measurement theory, impact of micro-UAV flight rules, errors impact on measurement, equipment design, custom software description, proof of concept test results.

Keywords

Antenna Far field test range, antenna radiation pattern, far-field zone, antenna, Micro-UAV unmanned vehicle, SDR

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
Úvod	11
1 Antény	13
1.2 Charakter elektromagnetického pole v okolí antén	13
1.1.1 Reaktivní zóna	13
1.1.2 Blízká zóna	13
1.1.3 Vzdálená zóna.....	13
1.2 Polarizace.....	14
1.2.1 Lineární polarizace	14
1.2.2 Kruhová polarizace.....	15
1.2.3 Eliptická polarizace	16
1.2.4 Polarizační měření pro vyzařovací charakteristiku	16
1.2.5 Polarizační vlastnosti navržené měřicí aparatury	17
1.3 Vyzařovací charakteristika antény ve vzdálené zóně	17
1.3.1 Popis částí vyzařovací charakteristiky antény	19
1.4 Radiokomunikační rovnice.....	20
1.5 Ztráty nepřizpůsobením.....	21
1.6 Měření antén	22
1.6.1 Měření v blízké zóně	22
1.6.2 Měření CATR.....	22
1.6.3 Měření ve vzdálené zóně	23
1.6.4 Měření ve vzdálené zóně za pomoci UAV.....	23
1.6.5 Signály používané k měření antén	24
2 Teorie provozu UAV	24
2.1 Normy a nařízení letového provozu UAV.....	25
2.2 Tethering.....	28
3 Chyby měření působící na přesnost a správnost	28
3.1 Náhodné chyby, pomalu korelované	29
3.1.1 Nepřesnost lokalizačních systémů v modu Standalone.....	29
3.1.2 Nepřesnost lokalizačních systémů při použití GPS s RTK	29

3.1.3	Odrazy způsobené prostředím	30
3.2	Náhodné chyby, rychle korelované	31
3.2.1	šum.....	31
3.2.2	Ztráty způsobené šířením vlny volným prostředím	32
3.2.3	Vliv zemské atmosféry	32
3.3	Systematické chyby	33
3.3.1	Ztráty vedením.....	33
3.3.2	Polarizační ztráty	33
3.4	Důvody zanedbání ztrát	34
4	Návrh postupu měření	34
5	Měřicí soustava	35
5.1	Kvadrokoptéra	36
5.2	Návrh konstrukce.....	36
5.3	Měřicí aparatura.....	36
5.3.1	Anténa.....	37
5.3.2	Software-defined radio	37
5.3.3	Single board computer.....	38
5.4	Reálné zapojení měřicí soustavy	39
6	Měřená soustava	40
6.1	Měřená anténa (Ridge horn)	40
6.2	ISM pásmo.....	41
6.3	Držák na připevnění antén	41
6.4	Reálné zapojení měřené soustavy	42
7	Návrh programů pro měření	43
7.1	Skupina programů generující letový plán.....	43
7.1.1	Bezpečnostní otázky	44
7.1.2	Hlavní program.....	47
7.2	Program na straně měřicí aparatury	50
7.2.1	Program pro měření přijímací antény	50
7.2.2	Program pro měření vysílací antény	52
7.2.3	Program na straně měřené soustavy	53
8	Zpracování	53
8.1	Program pro zpracování měřených dat	54

8.2 Program pro vizualizaci měření.....	57
8.3 Program pro úpravu a zobrazení dat z testování funkčnosti řešení	60
9 Komunikace a ovládání měřicí aparatury	61
10 Testování funkčnosti navrhovaného řešení.....	61
10.1 Lokalita.....	61
10.2 Testování	62
10.2.1 Postup testování.....	62
10.2.2 Letové plány	64
10.3 Výsledky.....	66
10.3.1 Vertikální řez	66
10.3.2 Horizontální řez	71
10.4 Ověření měřicí aparatury	74
10.4.1 Použitá platforma (kvadrokoptéra).....	74
10.4.2 Určení polohy (GNSS/GPS).....	75
10.4.3 Konfigurace SDR	75
Závěr	76
Literatura	77
Příloha A – Výkresová dokumentace ochranné konstrukce	81
Příloha B – Výkresová dokumentace víka ochranné konstrukce	82
Příloha C – Programy napsané v jazyku Matlab	83
Příloha D – Programy napsané v jazyku Python	83

Seznam zkratek

AESA	Active Electronically Scanned Array
AWGN	Additive White Gaussian Noise
CATR	Compact Antenna Test Range
CDMA	Code division multiple access
CSV	Comma Separated Values
DGPS	Differential Global Positioning Systems
DSP	Digital Signal Processing
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EU	European Union
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IDE	Integrated Development Environment
ISM	Industrial, Scientific, Medical
MCTR	Military Control Zone
PPP	Precise Point Positioning
RTK	Real Time Kinematic
SDR	Software Defined Radio
SNR	Signal Noise Ratio
UAS	Unmanned Aircraft System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
USB	Universal Serial Bus

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Lineární polarizace	15
Obrázek 2 - Kruhová polarizace	15
Obrázek 3 - Eliptická polarizace	16
Obrázek 4 - Ukázka horizontální a vertikální vyzařovací charakteristiky	17
Obrázek 5 - Vyzařovací diagram v polárních souřadnicích	20
Obrázek 6 - Vyzařovací charakteristika v kartézských souřadnicích	20
Obrázek 7 - Compact antenna test range [5]	23
Obrázek 8 - Doklad o absolvování online výcviku [7].....	25
Obrázek 9 - Zóny omezení letového provozu [8].....	26
Obrázek 10 - Upřesnění omezení letového provozu [8].....	26
Obrázek 11 - Doklad o absolvování online výcviku [9].....	27
Obrázek 12 - Závislost chyby v úhlu na vzdálenosti měření.....	30
Obrázek 13 - Vliv zemské atmosféry na útlum signálu [14].....	33
Obrázek 14 - Diagram měření antén, které vysílají.....	35
Obrázek 15 - Diagram měření antén, které přijímají.....	35
Obrázek 16 - Kvadrokoptéra HORNET [15]	36
Obrázek 17 - Ochranná konstrukce	36
Obrázek 18 - Zapojení měřící aparatury	37
Obrázek 19 - Anténa JCG401 [17]	37
Obrázek 20 - Adalm Pluto SDR [18].....	38
Obrázek 21 - Raspberry Pi Zero 2 W [20].....	38
Obrázek 22 - Pixracer [22]	39
Obrázek 23 - Zapojení měřící aparatury (pohled ze vnější části).....	39
Obrázek 24 - Zapojení měřící aparatury (pohled ze vnitřní části).....	39
Obrázek 25 - Připevnění měřící aparatury ke kvadrokoptéře.....	40
Obrázek 26 - Měřená anténa (Ridge Horn)	40
Obrázek 27 - Útlum odrazu měřené antény (Ridge Horn)	41
Obrázek 28 - Držák měřené antény	41
Obrázek 29 - Upevnění použité antény ke stativu (Ridge horn)	42
Obrázek 30 - Reálné zapojení měřené aparatury	42
Obrázek 31 - Měřící řetězec, logické zapojení software	43
Obrázek 32 - Tvar letového plánu	44
Obrázek 33 - Lokace antény při zadání zeměpisné šířky a zeměpisné délky.....	45
Obrázek 34 - Lokace startu kvadrokoptéry (oranžová) vůči lokaci antény (modrá).....	45
Obrázek 35 - (vlevo) výšeč v horizontální poloze, (vpravo) výšeč ve vertikální poloze	46
Obrázek 36 - Ukázka vygenerovaných bodů pro letový plán	50
Obrázek 37 - Ukázka výstupu po měření	52
Obrázek 38 - Diagram předávání dat mezi programy zpracování.....	54
Obrázek 39 - Ukázka transformovaných hodnot.....	57
Obrázek 40 - Ukázka zobrazení naměřených hodnot.....	58
Obrázek 41 - Lineární zobrazení barevné 3D mapy.....	59

Obrázek 42 - Zobrazení jednoho řezu	59
Obrázek 43 - FileZilla [32]	61
Obrázek 44 - Zobrazení lokace testování	62
Obrázek 45 - Nastavení měřicího pracoviště.....	63
Obrázek 46 - Vzlet kvadrokoptéry	63
Obrázek 47 - Let kvadrokoptéry.....	63
Obrázek 48 - Vertikální řez, pohled shora.....	64
Obrázek 49 - Vertikální řez, pohled ze strany	65
Obrázek 50 - Horizontální řez, pohled shora.....	65
Obrázek 51 - Horizontální řez, pohled ze strany	65
Obrázek 52 - Frekvenční spektrum jednoho přijatého vzorku vertikálního řezu	67
Obrázek 53 - Vertikální vyzařovací charakteristika antény	67
Obrázek 54 - Nestacionarita amplitudy v jednom časovém okamžiku	68
Obrázek 55 - Vertikální upravená vyzařovací charakteristika antény.....	68
Obrázek 56 - Spektrogram vertikálního řezu	69
Obrázek 57 - Normovaná vertikální vyzařovací charakteristika antény	69
Obrázek 58 - Upravená normovaná vertikální vyzařovací charakteristika antény.....	70
Obrázek 59 - Vertikální upravená anténní charakteristika v polárních souřadnicích.....	70
Obrázek 60 - Frekvenční spektrum jednoho přijatého vzorku horizontálního řezu	71
Obrázek 61 - Horizontální vyzařovací charakteristika antény	71
Obrázek 62 - Horizontální průměrovaná vyzařovací charakteristika antény	72
Obrázek 63 - Spektrogram horizontálního řezu	72
Obrázek 64 - Normovaná horizontální vyzařovací charakteristika antény	73
Obrázek 65 - Průměrovaná normovaná horizontální vyzařovací charakteristika antény....	73
Obrázek 66 - Horizontální normovaná anténní charakteristika v polárních souřadnicích ..	74

Úvod

Měření vyzařovacích charakteristik antén probíhá buď v bezodrazových komorách, nebo na měřících polygonech. Oba typy pracovišť zajišťují potlačení vlivu okolního prostředí a snaží se přiblížit ideálnímu prostředí bez vícecestného šíření. Tato diplomová práce se zabývá alternativou k pracovištím pro měření antén v exteriéru, ve vzdálené zóně, a to s použitím bezpilotního systému kategorie mikro-UAV. V lokacích, kde je přijatelná úroveň vícecestného šíření je levnější alternativou fixních pracovišť. Dále pak umožňuje ověření reálných vyzařovacích charakteristik v provozním prostředí.

Měření vyzařovacích charakteristik pomocí UAV je novou metodou, která se teprve v současné době začíná rozvíjet. Je využívána v aplikacích, kde klasické metody nelze aplikovat (vyhodnocení vlivu prostředí). Často je použita v kombinaci s měřením antén využívající provozní signály a při vyhodnocování chování celých rádiových systémů například datových sítí, či satelitních komunikací. [1]

Cílem této diplomové práce je navrhnout a realizovat měřící aparaturu pro měření vyzařovacích charakteristik pomocí UAV ve vzdálené zóně. Tato aparatura připevněna na UAV bude přijímat (vysílat) měřící signál a z velikosti jeho amplitud získávat vyzařovací charakteristiku měřené antény. UAV bude po dobu měření, autonomně, pod dohledem pilota, provádět letový plán navržený se zásadami měření ve vzdálené zóně. Generace letového plánu a následné vyhodnocené naměřených hodnot bude prováděno mimo letový hardware, na osobním počítači (off-line).

První kapitola shrnuje teoretická východiska práce, zaměřuje se na vlastnosti antén, jejich vliv na měření a způsoby jejich měření.

Druhá kapitola se zaměřuje na Teorii provozu UAV. Je zde upřesněno, jaké UAV se v práci využívá. Dále jsou tu vyjmenovány kategorie UAV dle České legislativy a jejich omezení. Poslední část této kapitoly je věnována alternativní metodě provozu UAV, a to za pomoci tetheru.

Ve třetí kapitole jsou popsány chyby ovlivňující přímo měřené vlastnosti antén a jsou zde popsány i chyby ovlivňující přijímaná data.

Ve čtvrté kapitole je popsán návrh postupu měření. Je zde vysvětleno proč navrhované řešení bylo koncipováno pro příjem i vysílání za minimálního zásahu do aparatury.

V páté kapitole je naznačeno zapojení komponentů měřící soustavy. Dále se tato kapitola zabývá stručným popisem komponentů a vysvětlením proč byly vybrány.

V šesté kapitole je naznačeno zapojení komponentů měřené soustavy. Je zde ukázána anténa, která se použila při testování. Dále je zde vysvětleno pásmo kmitočtů využité k testování nazvané ISM.

V sedmé kapitole je naznačeno logické zapojení a předávání informací v měřící aparatuře. Kapitola dále popisuje funkce jednotlivých programů pro vytváření letového plánu a měření signálů s ukázkami důležitých částí jednotlivých kódů.

V osmé kapitole je vysvětlena funkce programů pro zpracování a zobrazení měřených hodnot. Dále jsou zde popsány důležité části těchto programů.

V deváté kapitole je popsána komunikace a ovládání měřící aparatury pomocí osobního počítače.

V desáté kapitole je popsáno reálné měření a testování měřící aparatury, jsou zde prezentovány výsledky a chyby které se vyskytly při testování.

1 Antény

Antény jsou radiotechnické mikrovlnné subsystemy, které jsou schopny vyzařovat elektromagnetické vlnění do volného prostoru, a naopak z volného prostoru takové vlnění přijímat. Charakterizují se tím, že mají prostorovou selektivitu, tedy přijímají a vysílají v určitých směrech lépe než v jiných, tuto vlastnost lze znázornit vyzařovací charakteristikou. Dále mají frekvenční selektivitu, kdy se antény chovají jako frekvenční filtr a také jsou polarizačně selektivní, jejich geometrická konstrukce a natočení v prostoru určuje, jak dobře přijímají různé polarizace.

1.2 Charakter elektromagnetického pole v okolí antén

Elektromagnetické pole mění svůj charakter na základě vzdálenosti od antény, rozlišujeme tři základní zóny, kde se tento charakter mění odlišně:

1.1.1 Reaktivní zóna

Je to zóna v těsné blízkosti od antény, intenzita elektrického pole E a magnetického pole H není ve fázi, převládají zde reaktivní složky intenzit, které ale rychle klesají se vzdáleností. Elektrické pole E má krom příčné i podélnou složku šíření. Poloměr této zóny je přibližně:

$$R \sim 0,62 \sqrt{\frac{d^3}{\lambda}} \quad (1.1)$$

kde d maximální rozměr vyzařovací části antény,
 λ vlnová délka,
 R vzdálenost mezi vysílací a přijímací anténou.

1.1.2 Blízká zóna

Zde začínají převládat vyzařovací složky intenzit polí. Vyzařovací diagram se zde stále mění se vzdáleností. Poloměr této zóny je:

$$R < \frac{2d^2}{\lambda} \quad (1.2)$$

1.1.3 Vzdálená zóna

Zde jsou vektory a fázory Intenzit elektrického pole E a magnetického pole H kolmé na směr šíření a kolmé mezi sebou, vyzařovací charakteristika je tedy nezávislá na vzdálenosti, fáze se zde mění lineárně:

$$R > \frac{2d^2}{\lambda} \quad (1.3)$$

Tato práce se výhradně zabývá měřením charakteristik pomocí UAV, ve vzdálené zóně. v blízké zóně lze také využít možnosti měření pomocí UAV, ale vznikají problémy, které značně ztěžují návrh řešení.

Jedním z problémů je, že při měření v blízké zóně získáváme komplexní amplitudy. Ty jsou závislé na přesnosti lokace měřicí sondy, protože obsahují fázovou složku. Běžně se vyskytující lokalizační systémy na UAV však poskytují přesnost měření pozice v řádu metrů, které nejsou dostačující. Tyto přesnosti začnou být přijatelné, až při měření ve vzdálené zóně, na vzdálenostech stovek metrů. Kde po přepočtu do úhlové polohy, dosahují chyby přesnosti maximálně jednoho stupně.

Při měření v blízké zóně, je dále nutné dbát a počítat s ovlivňováním měření samotou měřicí sondou, trup UAV může nepříznivě ovlivnit vyzařování měřené antény.

Dalším problémem je nutnost pro fázové měření v blízké zóně, zajistit dostupnost referenčního signálu, který je koherentní se signálem vysílaným měřenou anténou, což je u měření antén pomocí UAV značně složité.

1.2 Polarizace

Polarizace popisuje vztah mezi směrem šíření a směrem kmitání vektorů intenzit polí E a H, při šíření volným prostorem. Vektory intenzit polí ve vzdálené zóně jsou ortogonální, tedy kolmé na směr šíření a kolmé mezi sebou. Ortogonalita platí na všechny typy polarizací. Tvar polarizace závisí na geometrii antén a orientaci v prostoru. Obecná polarizace je eliptická ostatní polarizace jsou její zvláštní případy. [2]

1.2.1 Lineární polarizace

Je stav kdy vektory polí periodicky kmitají a nemění svůj směr během šíření. Rozlišujeme horizontální a vertikální lineární polarizaci (Obrázek 1). Obě lineární polarizace mají obdobný zápis, pouze se zamění roviny x a y. Vektor intenzity pole E, který má horizontální polarizaci kmitá kolmo k rovině dopadu. Vektor intenzity pole E, který má vertikální polarizaci kmitá v rovině dopadu: [2]

$$E_x = E_{x0} e^{j(\omega t - kz)} \quad E_y = E_z = 0 \quad (1.4)$$

kde E_{x0} fázor komplexní složky pole E_x v rovině $z = 0$,
 kz k-tá vlnoplocha kolmá na rovinu z .

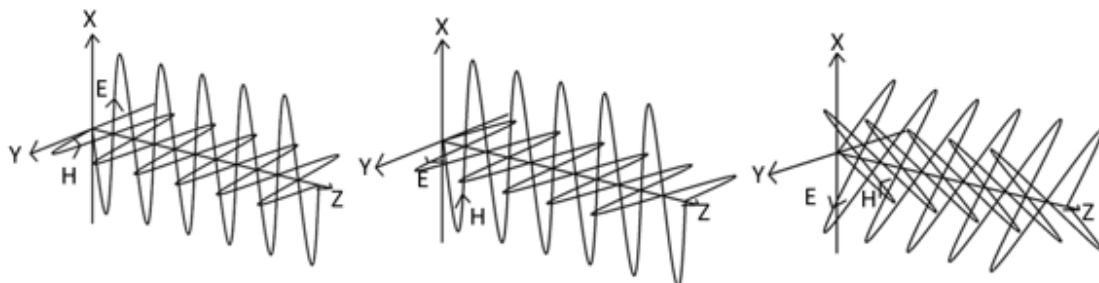
Pro obecně natočenou vlnu dosadíme:

$$E_{x0} = E \cos(\alpha) \quad E_{y0} = E \sin(\alpha) \quad (1.5)$$

Polarizace pro vektory intenzity pole H:

$$H_x = -\frac{E_y}{Z} \quad H_y = H_z = 0 \quad (1.6)$$

kde Z impedance.



Obrázek 1 - Lineární polarizace

1.2.2 Kruhová polarizace

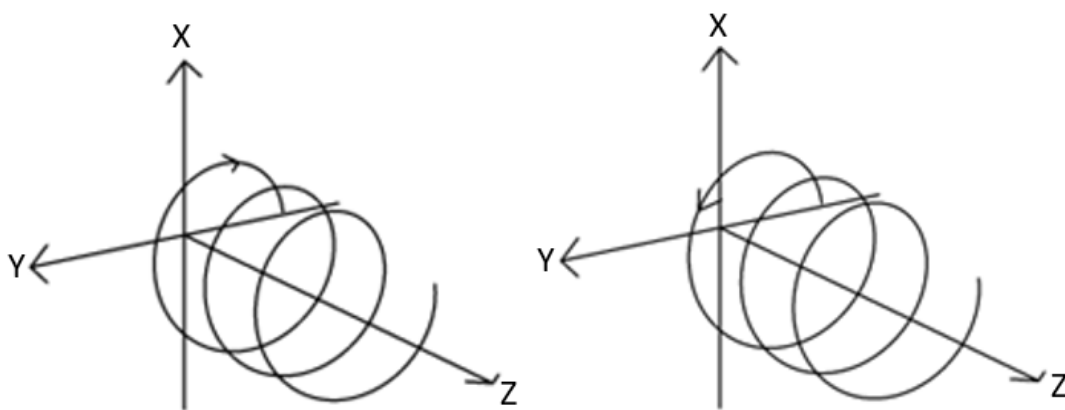
Je stav kdy vektory intenzity pole E , E_x a E_y jsou fázově posunuty o 90 stupňů, ale mají stejnou amplitudu. Rozlišujeme pravotočivou a levotočivou kruhovou polarizaci (Obrázek 2), které mají obdobný zápis, pouze se zamění roviny x a y . Otočení o 360 stupňů provede polarizace za vzdálenost jedné vlnové délky λ : [2]

$$E_x = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 e^{j(\omega t - kz)} \quad E_y = -j \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 e^{j(\omega t - kz)} \quad E_z = 0 \quad (1.7)$$

kde E_{x0} fázor komplexní složky pole E_x v rovině $z = 0$,
 kz k -tá vlnoplocha kolmá na rovinu z .

Polarizace pro vektory pole H :

$$H_x = \frac{-E_y}{Z} \quad H_y = \frac{E_x}{Z} \quad H_z = 0 \quad (1.8)$$



Obrázek 2 - Kruhová polarizace

1.2.3 Eliptická polarizace

Je stav kdy E_x a E_y jsou fázově obecně posunuty a mají různé amplitudy. Rozlišujeme pravotočivou a levotočivou eliptickou polarizaci (Obrázek 3): [2]

$$E_x = a_x \cos(\omega t - kz) \quad E_y = a_y \cos(\omega t - kz + \delta) \quad E_z = 0 \quad (1.8)$$

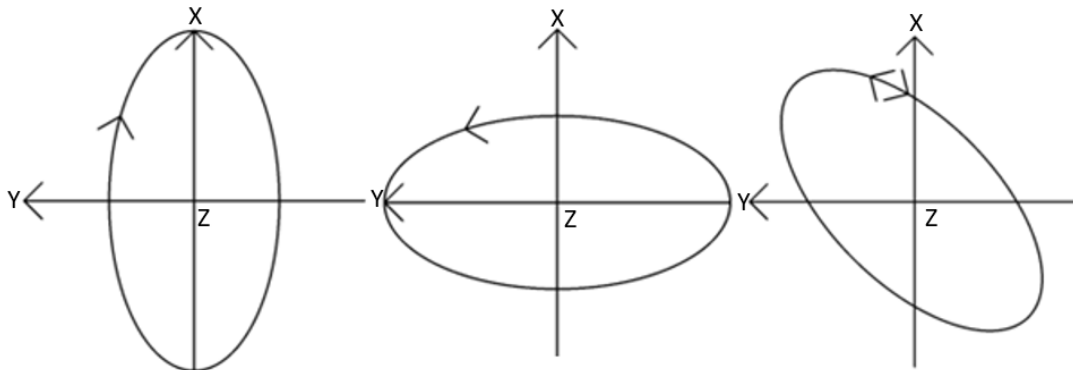
kde δ fázový posun,
 $a_{x,y}$ amplituda vektoru $E_{x,y}$.

Po vyloučení $\omega t - kz$:

$$\left(\frac{E_x}{a_x}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{a_y}\right)^2 - 2\frac{E_x E_y}{a_x a_y} \cos(\delta) = \sin^2(\delta) \quad (1.9)$$

Pokud je fázový posun $\delta = \pi/2$, je hlavní osa elipsy totožná s osami x nebo y a a_x/a_y osový poměr je pak: [2]

$$\left(\frac{E_x}{a_x}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{a_y}\right)^2 = 1 \quad (1.10)$$



Obrázek 3 - Eliptická polarizace

1.2.4 Polarizační měření pro vyzářovací charakteristiku

Při měření vyzářovací charakteristiky antén je důležité, aby měřicí anténa poskytovala dostatečně polarizačně selektivní měření charakterizované složky vyzářování, aby bylo možné zajistit správnost měření, při dvou základních natočení jednotlivých antén měřícího řetězce vůči sobě.

Co-polarizace představuje měření, kdy obě antény měřícího řetězce mají stejnou polarizaci a jsou vůči sobě stejně natočeny. Například měřená anténa má lineární horizontální polarizaci a měřicí anténa má také lineární horizontální polarizaci. z takového měření,

získáme vyzařovací charakteristiku antény v požadované polarizaci, ze které jsme schopni určit další vlastnosti jako například směrovost. [2]

Cross-polarizace představuje měření, kdy antény mají stejnou polarizaci, ale jsou vůči sobě ortogonálně natočeny. Například měřená anténa má kruhovou pravotočivou polarizaci a měřicí anténa má kruhovou levotočivou polarizaci. z takového měření, získáme vyzařovací charakteristiku antény, zobrazující její schopnost, vysílat v nežádoucí polarizaci. [2]

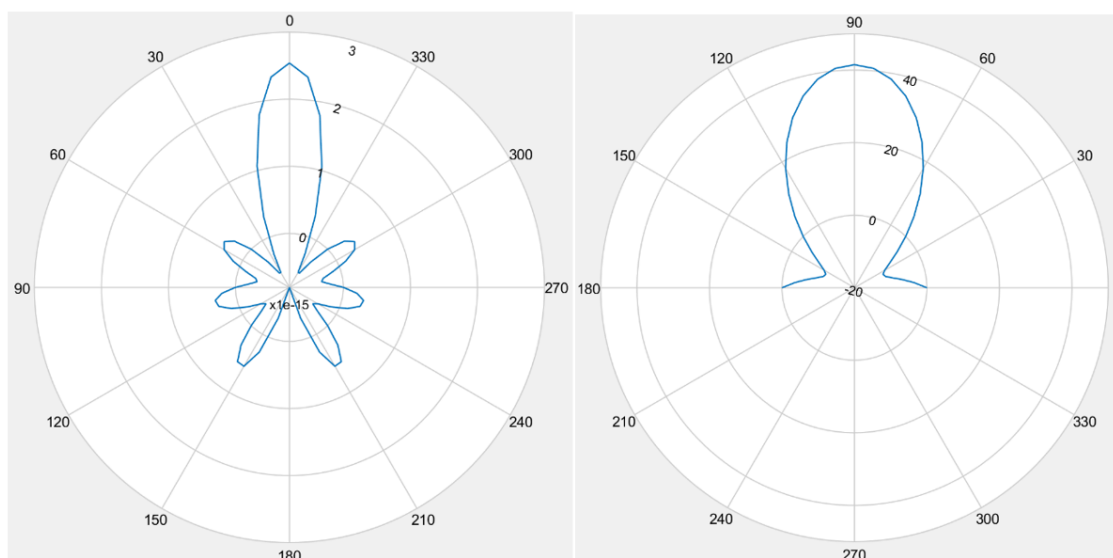
1.2.5 Polarizační vlastnosti navržené měřící aparatury

V návrhu řešení měření jsou obě antény, měřená i měřicí vybrány jako dostatečně polarizačně selektivní. Pro měření byla zvolena anténa s dominantně lineární polarizací. Obecný návrh počítá i s měřením ostatních polarizací, na základě změny měřicí antény, bez nutnosti zásahu do navrženého řešení.

Návrh řešení, rozděluje měření co-polarizace a cross-polarizace, s lineárně polarizovanou anténou do dvou měřících cyklů, které se liší natočením měřicí antény v prostoru. Z důvodu, kdy je lineární polarizace velmi závislá na poloze a natočení antén, je v návrhu dosaženo toho, že měřicí aparatura v průběhu letu stále sleduje měřenou anténu. Dále je v návrhu možné nastavit rychlost pohybu UAV v prostoru pro nastavení velikosti náklonu měřicí aparatury.

1.3 Vyzařovací charakteristika antény ve vzdálené zóně

Vyzařovací charakteristika antény je vlastnost měřené antény, o kterou se tato práce primárně zajímá. Charakterizuje, intenzitu elektromagnetického pole, v jednotlivých směrech, dané vyslaným výkonem a prostorovým úhlem. Zobrazuje se v lineární, nebo logaritmické míře (Obrázek 4). [2]



Obrázek 4 - Ukázka horizontální a vertikální vyzařovací charakteristiky

Vyzařovací charakteristiku lze získat buď poměrovou, nebo normovací metodou.

Při poměrové metodě normujeme naměřené amplitudy k maximálním amplitudám, které by za daných podmínek vyzářila referenční anténa. V maximu této charakteristiky je pak zisk antény. [2]

Referenční anténa je buď izotropní, tedy všesměrová, kdy její směrová charakteristika je všude konstantní. V maximu její vyzařovací charakteristiky bude 1. Druhou možností je použití jednoduchého dipólu, kdy v maximu vyzařovací charakteristiky bude 0. [2]

Při normovací metodě najdeme u změřených amplitud maximum, které položíme rovno 1 a ostatní hodnoty vydělíme tímto maximem. Tato metoda, poskytuje stejný tvar vyzařovací charakteristiky antény, jako metoda předchozí. Není zapotřebí však do měřicího řetězce zahrnout referenční anténu. Pro návrh byla vybrána tato metoda. [2]

Tvar charakteristiky ovlivňuje řada faktorů, jako je geometrie antény, nosné konstrukce antény, umístění antény od země a jiných odrazných objektů. [2]

Antény mají jednu základní prostorovou vyzařovací charakteristiku, představující měření v co-polarizaci, normalizace jsou vztaženy k této vyzařovací charakteristice. Druhou příčnou polarizaci, představuje měření v cross-polarizaci, která slouží pro poměr mezi těmito charakteristikami. [2]

Normovaná vyzařovací charakteristika pro základní polarizaci E_Φ :

$$|f_\Phi(\Phi, \Theta)|^2 = \frac{S_\Phi(\Phi, \Theta)}{\max|S_\Phi(\Phi, \Theta)|} \quad (1.11)$$

kde $S_\Phi(\Phi, \Theta)$ hustota výkonu pro polarizaci E_Φ ,
 $\max|S_\Phi(\Phi, \Theta)|$ maximální hustota výkonu pro polarizaci E_Φ .

Normovaná vyzařovací charakteristika pro příčnou polarizaci E_Θ :

$$|f_\Theta(\Phi, \Theta)|^2 = \frac{S_\Theta(\Phi, \Theta)}{\max|S_\Theta(\Phi, \Theta)|} \quad (1.12)$$

kde $S_\Theta(\Phi, \Theta)$ hustota výkonu pro polarizaci E_Θ ,
 $\max|S_\Theta(\Phi, \Theta)|$ maximální hustota výkonu pro polarizaci E_Θ .

Z vyzařovací charakteristiky se dají vypočítat důležité parametry antény jako je směrovost a zisk.

Směrovost antény

Podíl mezi maximální hustotou výkonu vyzářenou anténou ve vzdálenosti R, ku průměrné hustotě výkonu vyzářené anténou ve vzdálenosti R udává směrovost antény. Je to tedy vlastnost určující, jak moc dokáže anténa koncentrovat vyzářený výkon v určitém směru. V bezztrátovém prostředí můžeme směrovost vypočítat jako: [2]

$$D = \frac{S_{\max}(R)}{S_{\text{str}}(R)} = \frac{\max|S_{\theta}(R, \Phi, \theta)|4\pi R^2}{P_{\text{cel}}} = \frac{4\pi}{\int_{\Phi=0}^{2\pi} \left[\int_{\theta=-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} |f(\theta, \Phi)|^2 \cos\theta d\theta \right] d\Phi} \quad (1.13)$$

kde $S_{\max}(R)$ maximální hustota výkonu ve vzdálenosti R,
 $S_{\text{str}}(R)$ průměrná hustota výkonu ve vzdálenosti R,
 P_{cel} celkový vyzařovaný výkon antény,
 $|f(\theta, \Phi)|^2$ směrová charakteristika antény.

Zisk antény

Pokud je směrovost vynásobena účinností antény, získáme zisk antény. Účinnost udává jak dobře, dokáže anténa přeměnit výkon k ní dodaný na výkon, který anténa vyzáří. Účinnost je vždy menší než 1, protože se v anténě vykytují ztráty. Jedná se například o ztráty způsobené nedokonalostmi přizpůsobení vedení, nedokonalou vodivostí materiálů a nepřesnostmi tvarů antén:

$$\eta = \frac{P_{\text{vyz}}}{P_{\text{cel}}} \quad (1.14)$$

kde η účinnost
 P_{vyz} výkon vyzářený anténou,
 P_{cel} celkový výkon dodaný do antény.

Pro zisk antén G, platí rovnice:

$$G = \eta D \quad (1.15)$$

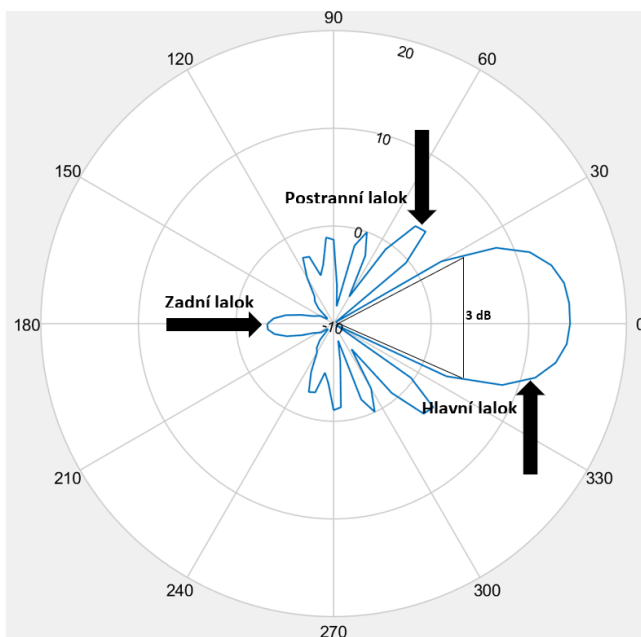
kde D směrovost antény,
 η účinnost antény.

1.3.1 Popis částí vyzařovací charakteristiky antény

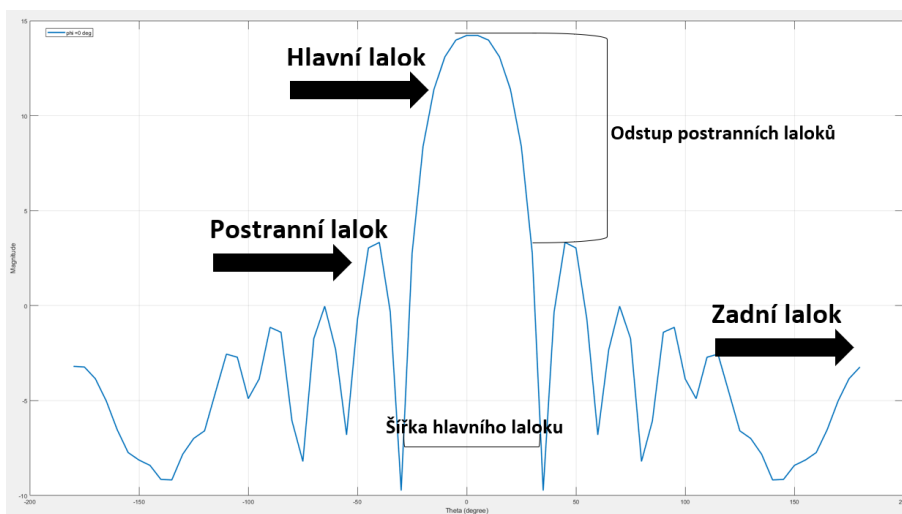
Vyzařovací charakteristiku antény, lze rozdělit na několik částí (Obrázek 5, Obrázek 6). První obrázek zobrazuje úhlovou výseč, ve které je vyzářena největší část výkonu se říká hlavní lalok. Z něj lze určit parametr, zvaný šířka vyzařovacího svazku. Tento parametr udává úhel, který indikuje pokles výkonu na hlavním laloku o polovinu. Z důvodů geometrie a konečných rozměrů antény, nelze veškerý vyzářený výkon však do tohoto svazku směřovat.

Ve vyzařovací charakteristice se tedy objevují další laloky. Ty se nazývají postranní a jsou nežádoucí. Mezi těmito laloky a lalokem hlavním lze určit jejich odstup zobrazující, jak daná anténa dokáže koncentrovat energii do hlavního směru vyzařování vůči ostatním směrům. V charakteristice se někdy objevuje ještě jeden druh laloku a to, takzvaný zadní lalok.

Nachází se na opačné straně vyzářovací charakteristiky, než je lalok hlavní. Pokud se v charakteristice vyskytuje můžeme určit předozadní poměr, určující o kolik je hlavní lalok silnější než zadní.



Obrázek 5 - Vyzářovací diagram v polárních souřadnicích



Obrázek 6 - Vyzářovací charakteristika v kartézských souřadnicích

1.4 Radiokomunikační rovnice

Nejdůležitější rovnicí pro antény je rovnice radiokomunikační. Udává model šíření vlny volným prostorem, který zahrnuje všechny významné parametry antén, jako jsou například zesílení a útlumy, na této cestě:

$$P_p = P_v G_v G_p f_p^2(\Phi_p, \Theta_p) f_v^2(\Phi_v, \Theta_v) \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \frac{1}{L} \quad (1.16)$$

kde P_v výkon vysílací antény,
 P_p výkon přijímací antény,
 G_v zisk vysílací antény,
 G_p zisk přijímací antény,
 f_p výkonová charakteristika přijímací antény,
 f_v výkonová charakteristika vysílací antény,
 λ vlnová délka,
 R vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem,
 L ztráty.

1.5 Ztráty nepřizpůsobením

Jedním z kvalitativních parametrů antén jsou pak ztráty způsobené nepřizpůsobením antény k zapojenému vedení. Pokud by anténa byla dokonale impedančně přizpůsobena na připojený kabel, veškerý výkon dodaný do antény by bylo možné vyzářit. V reálném světě však anténa není nikdy dokonale přizpůsobena a vznikají odrazy. Hodnotu ztrát nepřizpůsobením udává poměr mezi výkonem odražené vlny a výkonem vlny dodané do antény zobrazené v dB: [3]

$$RL = 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_i} \right) \quad (1.17)$$

kde P_r výkon odražené vlny,
 P_i výkon dodaný do antény.

Čím menší hodnota tím méně výkonu se odrazí od antény zpět do vedení.

Poměr napětí stojatých vln

Pokud dojde k odrazu vlny od antény zpět do vedení, vytvoří se zde stojatá vlna. Je to vyslaná vlna upravená vlnou odraženou. Poměr mezi maximem a minimem napětí této vlny je vyjádřen jako: [3]

$$VSWR = \left(\frac{V_{max}}{V_{min}} \right) \quad (1.18)$$

kde V_{max} maximální napětí stojaté vlny,
 V_{min} minimální napětí stojaté vlny.

Tato hodnota by se pro dokonale přizpůsobenou anténu měla rovnat 1.

1.6 Měření antén

Měření antén se v závislosti na frekvenci a velikosti antén běžně provádí buď v bezodrazových komorách, či na měřících polygonech. Bezodrazové komory simulují ideální podmínky pro šíření elektromagnetických vln. Měřící stanoviště na polygonech jsou také konstruována s cílem potlačit nežádoucí vlivy působící na měření. Měření se dá také provádět v místech již instalované měřené antény, což umožňuje právě, návrhové řešení, tj. měření pomocí UAV. Takové měření poskytuje možnost vyhodnocení reálného vlivu prostředí na měřenou anténu. Měření rozdělujeme do zón podle charakteru elektromagnetické vlny popsané výše.

1.6.1 Měření v blízké zóně

První zóna se nazývá blízká a měří se zde komplexní amplitudy charakteristik antén. Komplexní amplituda se skládá z velikosti intenzity polí, tedy amplitudy a fáze. Pro zajištění lineárních charakteristik je nutná transformace do vzdálené zóny. Při měření je nutné zahrnout i ovlivňování měřící sondy, měřenou anténou. Další nevýhodou je nutnost složité aparatury, jako je obvodový vektorový analyzátor, který je určen pro měření s parametřů obvodů v oblasti vysokých kmitočtů. Při měření v blízké zóně je potřeba přesný poziční systém pro pohyb sondy a měřené antény. Pro transformaci je nutné znát typ měřící plochy. Nejčastěji se používají typy rovinná, válcová a kulová plocha. [4]

Rovinná plocha se používá pro antény, které mají vysoký zisk. Rozložení vzorků na této ploše nejčastěji odpovídá pravoúhlé nebo polární mříži. Pravoúhlá mříž má vysokou citlivost na polohu měřícího zařízení. [4]

Měření na válcové ploše se používá pro antény, které jsou směrové pouze ve vertikální rovině. Sonda se pohybuje pouze ve vertikální rovině, měřená anténa se otáčí kolem své osy. [4]

Měření na kulové ploše se využívá pro antény, které jsou jen málo směrové. Sonda je zde stacionární, měřená anténa se pohybuje ve směrech Θ, Φ . [4]

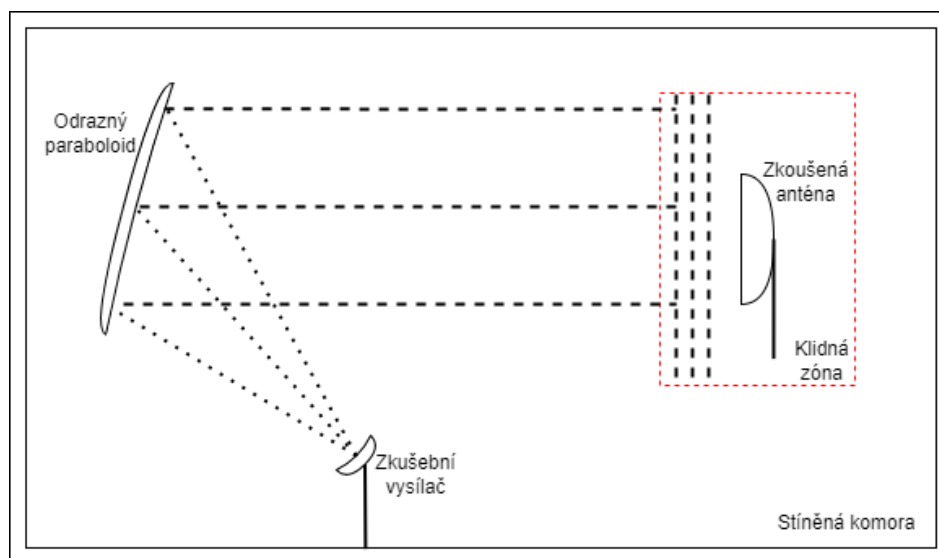
Měření v blízké zóně se provádí většinou pro měření rozměrově velkých antén, kdy podmínky vzdálené zóny jsou splněny až ve velkých vzdálenostech. Pro měření v blízké zóně se většinou používá bezodrazová komora.

1.6.2 Měření CATR

Pro měření vzdálené zóny na malé vzdálenosti je využívá CATR.¹ Je toho dosaženo, za pomoci odrazů (Obrázek 7). Měření prohýbá v bezodrazové komoře, obsahující reflektující paraboloid, který mění sférickou vlnu na vlnu plochou a tím simuluje prostředí vzdálené zóny. Takovýto způsob měření je velmi závislý na vysílací anténě a odrazné ploše. Pro zajištění ploché vlny je zapotřebí, aby v klidné zóně, kde se nachází zkoumaná anténa, byly

¹CATR = Compact antenna test range

jen minimální odrazy. Amplituda a fáze mohou zde mít odchylky maximálně ± 1 dB a ± 5 stupňů. [5]



Obrázek 7 - Compact antenna test range [5]

1.6.3 Měření ve vzdálené zóně

Měření ve vzdálené zóně provádíme většinou na vnějších měřicích polygonech. Ve vzdálenosti až několik km, se vybuduje měřicí pracoviště, které se skládá ze dvou základních částí. První část zahrnuje nepohyblivou věž, na které je umístěna v určité výšce nad zemí měřicí anténa. Druhá část je tvořena měřenou anténou, umístěnou na polohovacím zařízení, které umožňuje s touto anténou hýbat v požadovaných směrech.

Měření ve vzdálené zóně lze provádět i ve bezodrazové komoře, bez nutnosti použití systému CATR. Vše však závisí na velikosti měřených antén a dodržení podmínky (1.3).

1.6.4 Měření ve vzdálené zóně za pomoci UAV

UAV nahrazuje věž s měřicí anténou. Řešení je pak méně finančně nákladné než stavba měřicího polygonu. Touto metodou lze měřit antény, které jsou již v provozu. Nevýhodou je omezení v podobě počasí, dále pak z dodržení nařízení letového provozu v místě měření. V některých prostorách je provoz UAV, bez patřičného povolení, plně zakázán. Pro ovládání UAV i v autonomním režimu je potřebná přítomnost vyškoleného pilota. [6]

Počasí

Při měření ve vzdálené zóně na testovacím polygonu, je ovlivnění počasí zanedbatelné a můžeme provádět měření za jakýchkoli podmínek, vyjma velmi silných bouří. Měření antén pomocí UAV je počasím ovlivněno podstatně více. Na UAV negativně působí jak povětrnostní podmínky, tak déšť. Silný vítr ovlivňuje spotřebu energie UAV a stabilitu letu v prostoru, která může způsobit až ztrátu ovladatelnosti. Také teploty ovlivňují výdrž baterií.

1.6.5 Signály používané k měření antén

Pro měření vyzařovací charakteristiky antén můžeme použít nemodulované spojité signály, například \cos , které jsou velmi jednoduché na vytvoření, ale neposkytují žádnou ochranu proti rušení.

Dále můžeme použít běžně využívané jednoduché modulace, pro zajištění ochrany proti rušení, zvýšení flexibility výběru frekvencí a zvýšení rozlišovací schopnosti zkoumaného signálu od jiných přijímaných signálů.

Modulace je změna charakteru nosné vlny v čase za pomoci modulačního signálu. Nejčastěji používaná modulace je amplitudová. Jedná se o spojitou modulaci, kde je měněna její amplituda. Hlavní výhodou této modulace spočívá v její jednoduchosti, kdy k vytvoření stačí vynásobení modulačního signálu se signálem nosným. Další výhodou je dostatečná selektivita amplitudové modulace při její demodulaci.

Pro měření antén můžeme také použít provozní signály, které se používají při měření signálů za provozu.

Například systémy, které během svého pracovního cyklu své mody mění (pulzní radar), který po určitou dobu $\frac{\tau}{T}$ vysílá a po zbytek pracovního cyklu T přijímá, využívají místo spojitých modulací, modulace pulsní.

Pseudonáhodné kódy, jsou do budoucna zamýšleny jako alternativa k předchozím signálům. Vezmou se determinované signály, jejichž statické vlastnosti se blíží vlastnostem signálů náhodných a použijí se k modulaci nosných vln. Takto namodulované signály jsou širokopásmové a jsou detekovatelné pomocí korelací i pokud jsou utopené v šumu. Kvůli své velké šířce pásma nejsou plně zarušeny úzkopásmovými signály a zároveň z důvodu malé spektrální výkonové hustoty, takové signály neruší. Pseudonáhodné signály jsou další možností, jak zvýšit selektivitu při použití CDMA.

2 Teorie provozu UAV

Bezpilotní letoun, je zařízení, které umí létat, a to bez pomoci člověka na jeho palubě. Řízení může být pilotem pomocí rádiového ovladače na dálku, nebo může nezávisle vykonávat letový plán. [7]

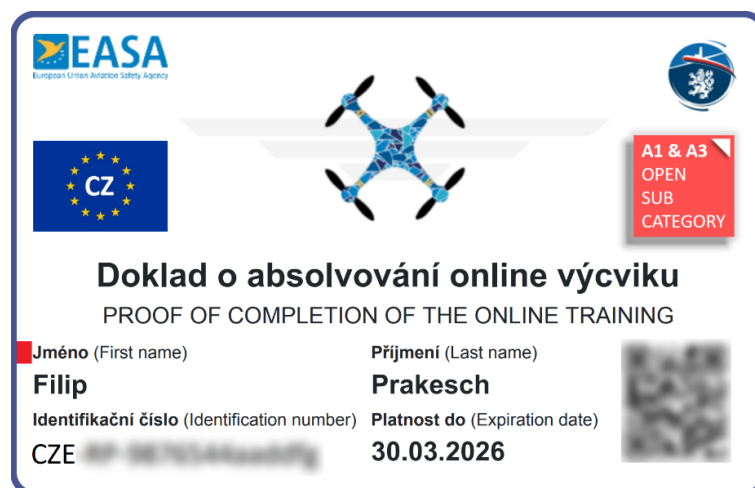
Označení bezpilotního letounu (UAV) postihuje více kategorií zařízení. Tato práce využívá v návrhu zařízení zvané kvadrokoptéra, protože využívá k pohybu prostorem čtyři nezávislé motory. Pro takový letoun platí však stejné normy a postupy, jako pro ostatní UAV a je zapotřebí se nimi řídit.

2.1 Normy a nařízení letového provozu UAV

Normy a nařízení vztahující se na UAV zastřešuje v Evropské Unii EASA². V České republice je zastoupena Úřadem pro civilní letectví. Nařízení (EU) 2019/947 a 2019/945 přijímají přístup na základě posouzení rizika a rozlišují tři kategorie provozu UAV, Open, Specific, Certified. [7]

Kvadroptéra použitá v práci bude používána v kategorii Open. Tato kategorie, má své příslušné podkategorie A1, A2, A3, do které spadají třídy letounů nesoucí označení C0, C1, C2, C3, C4. [7]

Jednou z povinností provozovatele letounu, v této kategorii je registrace a označení příslušného zařízení registračním číslem. Dále je nutné projít školením pilota stávající se z online výcviku a složení teoretické zkoušky. Po úspěšném výcviku je přidělen pilotu doklad (Obrázek 8). Tyto nařízení se nevztahují na letouny označená jako hračky, obsažené v podkategorii A1, ve třídě C0 a C1. [7]



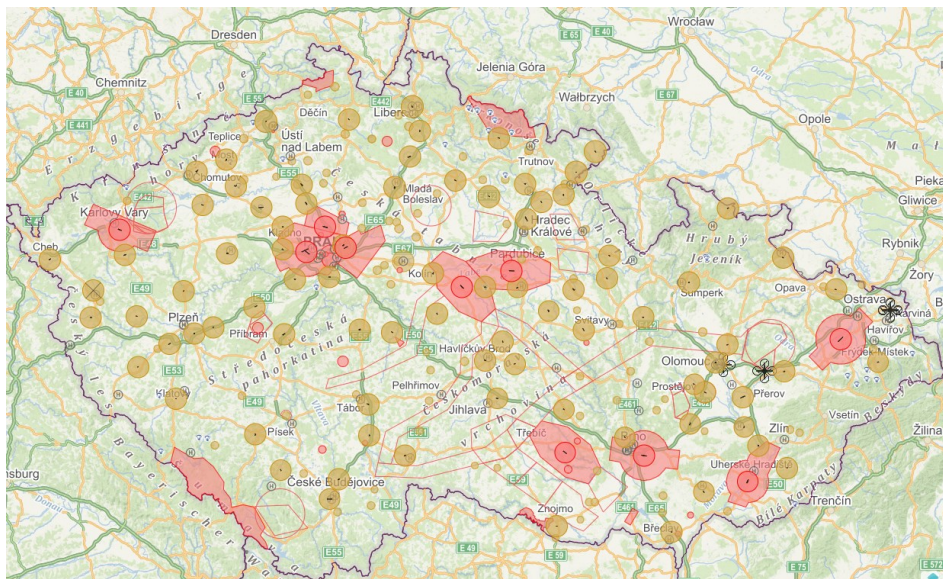
Obrázek 8 - Doklad o absolvování online výcviku [7]

Normy a nařízení pro kategorii Open:

První z nařízení o provozu bezpilotního letounu je, že UAV nesmí narušit omezení vyplývající z uspořádání vzdušného provozu. Letoun tedy nesmí být používán v místě kde je vzdušný prostor regulován, nebo je jeho provoz výslovně omezen, např. povolenou výškou. Úřad pro civilní letectví má na svém webu odkazy na aplikace, které ukazují regulované zóny i s příslušnými omezeními, která v daných lokalitách musí být dodržena. Mapa regulace vzdušného provozu v České republice (Obrázek 9, Obrázek 10) ukazuje příklad regulace. Pro dodržení tohoto nařízení by letouny měli mít funkci geo-fencing³. [7] [8]

² European Union Aviation Safety Agency = Evropská agentura pro bezpečnost letového provozu

³ Geo-fencing = funkce zabráňující letu v zakázaných oblastech.



Obrázek 9 - Zóny omezení letového provozu [8]

Let dronu do 0,91 kg je možné uskutečnit pod ochrannými pásmy letiště (OP), ne však nad 100 m nad zemí. OP nejsou graficky znázorněna a klesají směrem k letišti až na zem. Doporučujeme létat pod úrovní nejvyšších bodů okolních překážek.

Let dronu nad výškou OP nebo let s těžším dronem je možný jen při dodržení podmínek provozovatele letiště viz VFR příručka a po koordinaci s letištní službou AFIS nebo RADIO (nejsou-li poskytovány, tak přímo s provozovatelem letiště).

V případě, že ATZ je překryto některým z dalších prostorů např. typu CTR, TMA, P, R, D, TRA nebo TSA, je nutné dodržet podmínky všech překrývajících se prostorů!

Obrázek 10 - Upřesnění omezení letového provozu [8]

Dále pak pilot má povinnost neustále držet vizuální kontakt s letounem a provádět kontrolu prostoru ve kterém se pohybuje, aby snížil riziko vzniku nehod, nebo omezení vzdušného provozu. Pilot je povinen přerušit let, pokud nastane takové riziko. [7]

Je zakázáno létat více jak 120 m nad nejbližším bodem terénu a tato hranice může být dále omezena zeměpisnou normou. V případě překážek vyšších, než 120 m je za souhlasu majitele překážky (Obrázek 11), možné létat až 15 m nad ní. [7]



Obrázek 11 - Doklad o absolvování online výcviku [9]

Vybrané nařízení pro podkategorie:

A1

Letouny s maximální vzletovou hmotností nižší než 250 g a nejsou soukromě zhotoveny. Do této podkategorie spadají třídy C0 a C1. [7]

Přelétání nad shromážděním osob je zakázáno, přelet nad nezapojenými osobami je povolen, ale pilot by se tomuto přeletu měl vyhýbat. [7]

A2

Letouny s maximální vzletovou hmotností nižší než 2 kg, a u kterých se předpokládá létání v blízkosti osob. Let musí být od nezapojených osob prováděn ve vzdálenosti minimálně 5 m, za předpokladu že má zapojenou funkci nízkorychlostního režimu. V opačném případě musí být let prováděn v minimální vzdálenosti 50 m. Do této kategorie spadá třída C2. [7]

Přelétání nad shromážděním osob je zakázáno., přelet nad nezapojenými osobami je zakázán. [7]

Provozovatel musí zajistit informování všech zapojených osob o rizicích provozu a získat jejich výslovný souhlas se svou přítomností. [7]

V této podkategorii operuje kvadrokoptéra využitá v této práci.

A3

Letouny s maximální vzletovou hmotností nižší než 25 kg, a u kterých se předpokládá že v dosahu bezpilotního letadla, nebudou ohroženy žádné osoby nezapojené do provozu. Provoz musí být prováděn v minimální vzdálenosti 150 m od obydlených oblastí. Do této kategorie spadají třídy C2, C3 a C4. [7]

Přelétání nad shromážděním osob a. přelet nad nezapojenými osobami je zakázán. [7]

Provozovatel musí zajistit informování všech zapojených osob o rizicích provozu a získat jejich výslovný souhlas se svou přítomností. [7]

2.2 Tethering

Hlavní nevýhoda využití bezpilotních letounů a speciálně multikoptér⁴ spočívá v jejich výdrži a užitečné nosnosti. Baterie připevněné k trupu multikoptéry zvyšují zátěž a její výdrž se tak snižuje. Průměrná doba letu mise na jedno nabití se pohybuje okolo 30 minut. Poté je nutné misi přerušit bezpečně přistát, vyměnit baterii a obnovit misi. Tato nevýhoda se dá potlačit za pomoci přístupu koncepce letu zvané tethering. [10]

Základní funkce spočívá v tom, že multikoptéra je propojena se základnovou stanicí, dodávající energii, lehkým napájecím kabelem. Tento kabel může ve svém svazku obsahovat i kabel datový. [10]

Výhodou tohoto přístupu je, že lze dosáhnout přímé komunikace mezi multikoptérou a základnovou stanicí, nehrozí ztráta spojení, délka mise není závislá na výdrži baterie a zvyšuje se bezpečnost. Délka kabelu přesně vymezuje nebezpečnou zónu, kam až může multikoptéra v případě poruchy, nebo nehody spadnout a způsobit tak nebezpečí či škodu. Multikoptéra se při tomto přístupu, také může chovat jako vertikální sonda, kdy vyletí do určené výšky a zde bude ve stacionární pozici přijímat vertikální řez vyzařovací charakteristiky měřené antény. Pohyb v tomto případě bude vykonávat přímo měřená anténa. [10]

Nevýhodou tohoto přístupu je, omezení pracoviště měření na délku kabelu. V současné době legislativa nerozlišuje tetherovanou multikoptéru od bateriově napájené. Vztahují se tedy na ně všechna pravidla a zákazy jako na běžné multikoptéry, například pilot musí projít stejným školením. Tento přístup je málo univerzální, a proto nebyl v návrhu využit. [10]

3 Chyby měření působící na přesnost a správnost

Při každém měření fyzikálních veličin jsou výsledky ztíženy chybami. Tyto chyby ovlivňují jak měřené veličiny, například útlum výkonu signálu způsobený šířením vlnným prostorem, tak naměřená metadata. Jedná se například o přesnost určení polohy kvadroptéry, kdy běžně využívané lokační zařízení mají přesnost v řádu metrů.

Chyby lze podle charakteru jejich chování v čase nebo při opakovaném pozorování rozdělit na náhodné a systematické. Náhodné chyby, pokud se mění v určitém časovém rámci pozorování velmi pomalu, jsou silně korelované. Tyto chyby se svým chováním podobají chybám systematickým a lze je potlačit stejným způsobem.

⁴ Multikoptéra = Podkategorie rádiově řízených vrtulníků. Do této podkategorie patří zařízení rozdělená podle počtů nezávislých motorů, jako jsou kvadroptéry či hexakoptéry.

Způsob potlačení chyb

Systematické chyby se dají kalibrovat, normovat, či je lze pouze uvažovat že se vyskytují.

Náhodné chyby, které jsou ve vybraném časovém rámci rychle korelované, lze potlačit pomocí průměrování.

Náhodné chyby, které jsou ve vybraném časovém rámci pomalu korelované, lze potlačit pomocí kalibrace, normování, či je nutné najít konfigurace kde nebudou významné.

3.1 Náhodné chyby, pomalu korelované

3.1.1 Nepřesnost lokalizačních systémů v modu Standalone

Na nepřesnost lokalizačních systémů působí řada faktorů, jako aktuální stav ionosféry, počet připojených družic, lokalita měření, či terén a počasí. Pro návrh řešení byla využita GPS na kvadrokoptéře v modu Standalone.

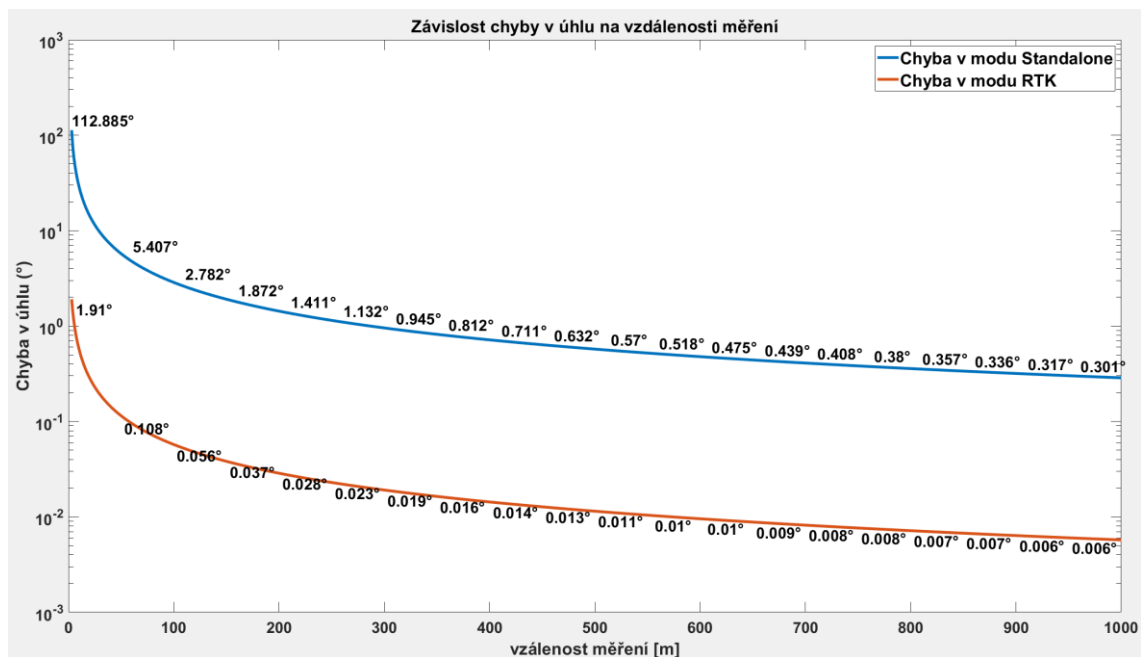
Tento mód, vypočítává lokalitu pouze na základě informací z připojených družic. Přesnost takové konfigurace se pohybuje v řádu metrů a není možné za čas letu, který vymezuje baterie kvadrokoptéry tuto přesnost zvýšit a stabilizovat.

Tento mód však lze i tak použít za předpokladu měření na velké vzdálenosti stovek metrů a přepočtu chyby lokace, na chybu v úhlu. Pro přesné měření a měření na krátké vzdálenosti by bylo nutné použít GPS v modu RTK.

3.1.2 Nepřesnost lokalizačních systémů při použití GPS s RTK

V tomto modu GPS přijímá stejně jako v modu Standalone, data z družic, ale dále přijímá data ze základnové stanice. Tyto data se použijí ke korekci. Základnová stanice, přijímá data, o poloze družic a stavu ionosféry přes internet. Pro vytvoření základnové stanice lze využít například mobilní telefon. Tato metoda dosahuje přesnosti v cm. [11]

Závislost chyby v úhlu na vzdálenost měření (Obrázek 12), ukazuje srovnání modu Standalone při typické chybě 5 m s modem RTK, který má typickou chybu 10 cm. Je patrné, že mód Standalone je možné efektivně využít ve vzdálenosti od 300 metrů. RTK dosahuje chyby v úhlu méně než stupeň už ve 4 metrech.



Obrázek 12 - Závislost chyby v úhlu na vzdálenosti měření

Mód RTK však významně zvyšuje složitost systému, a to z důvodů nutnosti přidání základnových stanic, vytvoření nového datového kanálu mezi základnovými stanicemi a GPS připevněné ke kvadroptéře a nutnost přítomnosti GPS s podporou RTK módu. Přináší tedy i vyšší náklady. Mód RTK je tedy více vhodný pro komerční měření, čí pro měření ve blízké zóně, kde je kladen větší důraz na přesnost měření. Pro testování navrhované řešení je mód Standalone dostačující a přináší výhodu v podobě zlehčení dosažení vzdálené zóny pro měřené antény.

3.1.3 Odrazy způsobené prostředím

Pokud vlna dopadne na rovinný terén, který nemá stejnou impedanci, část se odrazí pod stejným úhlem a část se absorbuje v místě dopadu. Odražená vlna bude mít jinou fázi než vlna přímá. Vzájemná fáze mezi přímou a odraženou vlnou v místě dopadu se dá vyjádřit: [12] [13]

$$\Delta\psi = \pi \left(\frac{4h \sin(\theta)}{\lambda} + 1 \right) \quad (3.1)$$

kde $\Delta\psi$ vzájemná fáze,
 θ elevace přijímací antény,
 h výška antény,
 λ vlnová délka.

Liché násobky π vzájemné fáze se v místě příjmu budou odečítat, dojde tedy k zeslabení signálu. Čím vyšší je poměr $\frac{h}{\lambda}$, tím vyšší je citlivost změny elevace přijímací antény na rychlost střídání zesílení a zeslabení signálů. Pro velmi malé úhly (0.1 až 3 stupně), mezi

terénem a paprskem, kdy se velmi hrbolatý terén jeví jako dokonale vodivá plocha, nastane, úplný odraz a změna fáze o 180 stupňů. Důsledkem nastanou i největší změny signálů. Pro vyšší úhly se odrazy již tolik neprojeví. Protože v návrhu řešení je přijímací anténa instalována na kvadroptéře, lze vyhodnotit reálný vliv odrazů v daném prostředí za pomoci měření na více vzdálenostech, které měření pomocí kvadroptéry umožňuje snadno a rychle zhotovit. [12]

Ačkoli jsou odrazy náhodné, dají se kompenzovat dodatečným zpracováním, a to za podmínky že prostředí, ve kterém se měří je neměnné. Při opakujících se měření budou odrazy od terénu zaznamenány na stejných pozicích a při zpracování je bude možné lokalizovat a vyhodnotit, zda se mohou vyfiltrout či nikoli. [12]

3.2 Náhodné chyby, rychle korelované

3.2.1 šum

Signál generovaný z různých elektrických i mechanických zdrojů, který nenesé žádnou užitečnou informaci, má náhodný charakter a negativně ovlivňuje signály užitečné. Důležitým parametrem vycházející ze šumu je odstup signálu od šumu. SNR^5 udává, jak je užitečný signál rozlišitelný od šumu udávaný v dB.

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (3.2)$$

kde P_s výkon signálu,
 P_n výkon šumu.

Šum se nedá plně odstranit, pouze potlačit. V návrhu řešení rozlišujeme dva typy šumu, které přispívají k malým chybám při měření.

AWGN

Aditivní bílý Gaussovský šum, se přičítá k užitečnému signálu. V celém spektru má konstantní výkonovou spektrální hustotu a amplitudy mají normální rozložení. Způsobuje malé odchylky naměřených hodnot při opakovaných měřeních.

Tepelný šum

Může vznikat na více místech měřicího řetězce. Ve vodičích dochází k tepelnému pohybu atomů, to způsobuje kolísání hustoty elektronů, což vytváří tepelný šum.

Šum dopadající na anténu, závisí na šumové teplotě antény, ta závisí na teplotě prostředí.

⁵ SNR = Signal Noise Ratio

$$N_v = kT_a B \quad (3.3)$$

kde N_v vnější šum,
 T_a efektivní šumová teplota antény,
 k Boltzmannova konstanta,
 B šířka pásma.

Z důvodu jeho velké šířky pásma, vzhledem k šířce pásma měření se dá považovat za konstantní.

3.2.2 Ztráty způsobené šířením vlny volným prostředím

Hustota výkonu vlny klesá v závislosti na vzdálenosti v důsledku rozpínání ve vyzářeném prostředí. [12]

Protože jsou tyto ztráty závislé výhradně na vzdálenosti, bude jejich vliv na chyby měření uniformní přes všechna provedená měření a je tedy možné tento vliv potlačit korekcí naměřených dat.

Rozlišujeme homogenní prostředí, kde pokles hustoty výkonu je vyjádřen jako ztráty prostředím ku rozpínání vlny v prostoru: [12]

$$S(R) \sim \frac{e^{(-2\alpha R)}}{R^2} \quad (3.4)$$

kde R vzdálenost měření,
 α ztrátový koeficient prostředí.

Z logaritmického vztahu získáme ztráty útlumem prostředím: [12]

$$L = 10 \log_{10}[e^{(-2\alpha R)}] = (20\alpha R) \log_{10}(e) = 8,64\alpha R = L_0 R \quad (3.5)$$

kde L_0 měrný útlum prostředím.

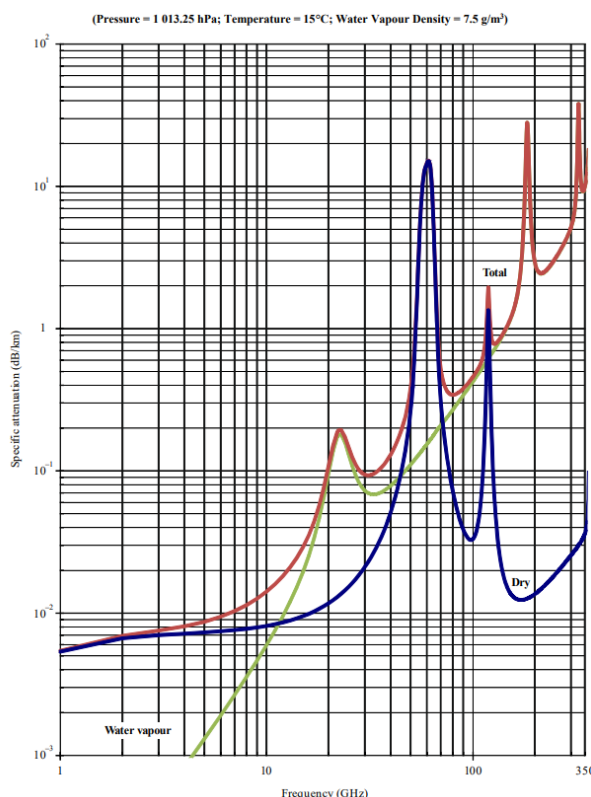
V nehomogenním prostředí musíme sčítat ztráty v malých částech kde je prostředí přibližně homogenní: [12]

$$L(R) = \int_0^R L_0(R) dR \quad (3.6)$$

3.2.3 Vliv zemské atmosféry

Zemská atmosféra se skládá z několika vrstev, které odlišně ovlivňují šíření signálů. Toto rušení je obecně závislé na denní době, lokalitě měření, počasí, hustotě atmosféry

a vzdálenosti (Obrázek 13). Graf ukazuje, že vliv zemské atmosféry je významný až od frekvence 50 GHz, proto je tento vliv v návrhu zanedbán.



Obrázek 13 - Vliv zemské atmosféry na útlum signálu [14]

3.3 Systematické chyby

3.3.1 Ztráty vedením

Ztráty způsobené nepřizpůsobením vedení, vodivými, magnetickými a dielektrickými ztrátami, jsou systematické ztráty způsobené nepřesností a nedokonalostí součástek. Dají se kompenzovat.

3.3.2 Polarizační ztráty

Vznikají tehdy, když se polarizace a její natočení, vektorů intenzit polí E a H vyslaného signálu neshodují s polarizací a jejím natočením vektorů intenzit polí E a H, které by vyzářila přijímací anténa, pokud by vysílala. Pokud je natočení těchto vektorů jiné, ale polarizace se shodují, například vyslaná vlna má polarizaci pravotočivou kruhovou a přijímací anténa je na tuto polarizaci nastavena, polarizační ztráty budou maximálně jednotky dB. Pokud se však polarizace nebudou shodovat, ztráty budou vysoké. [12]

Neshodu a nesprávné natočení způsobuje samotný let kvadrokoptéry, která pro pohyb ve vertikální rovině využívá náklonu trupu. Velké rychlosti a rychlé změny dráhy letu budou mít za dopad větší náklony.

Navrhované řešení je primárně koncipováno jako kontinuální let kvadrokoptéry v prostoru, při kterém probíhá měření. Kvůli uvažování polarizačních ztrát je v návrhu možnost upravit let do podoby, kdy kvadrokoptéra bude podnikat při letu zastávky, kde po určitou dobu setrvá ve vodorovné poloze. Při tomto druhu letu, bude natočení kvadrokoptéry záviset primárně na povětrnostních podmínkách

3.4 Důvody zanedbání ztrát

Důvody proč výše uvedené ztráty nemají velký dopad na návrh měřicí aparatury jsou dva. Zprvče většina ztrát je velmi slabá. Jedná se například o ztráty vyzařováním do postranních laloků, které mají hodnoty 1 až 2 dB. Nejsilnější působí ztráty šíření volným prostorem, které jsou závislé na vzdálenosti. Dále polarizační ztráty, které jdou potlačit správným natočením a použitím stejné polarizace na obou stranách měřicího řetězce.

Zadruhé, pokud budeme měřit v konstantní vzdálenosti a v menších časových intervalech za sebou, budou ztráty také konstantní. Proměnné ztráty se mohou vyskytnout pouze v případech, kdy budeme měření opakovat na jiných vzdálenostech či za jiných atmosférických podmínkách. Například pokud měření provedeme ve vzdálenosti 300 m a druhé provedeme ve vzdálenosti 1 km. Dále pokud provedeme měření při čisté atmosféře a další měření bude provedeno za hustého deště.

4 Návrh postupu měření

Navrhované řešení, měření vyzařovací charakteristiky antény ve vzdálené zóně, se skládá ze tří částí.

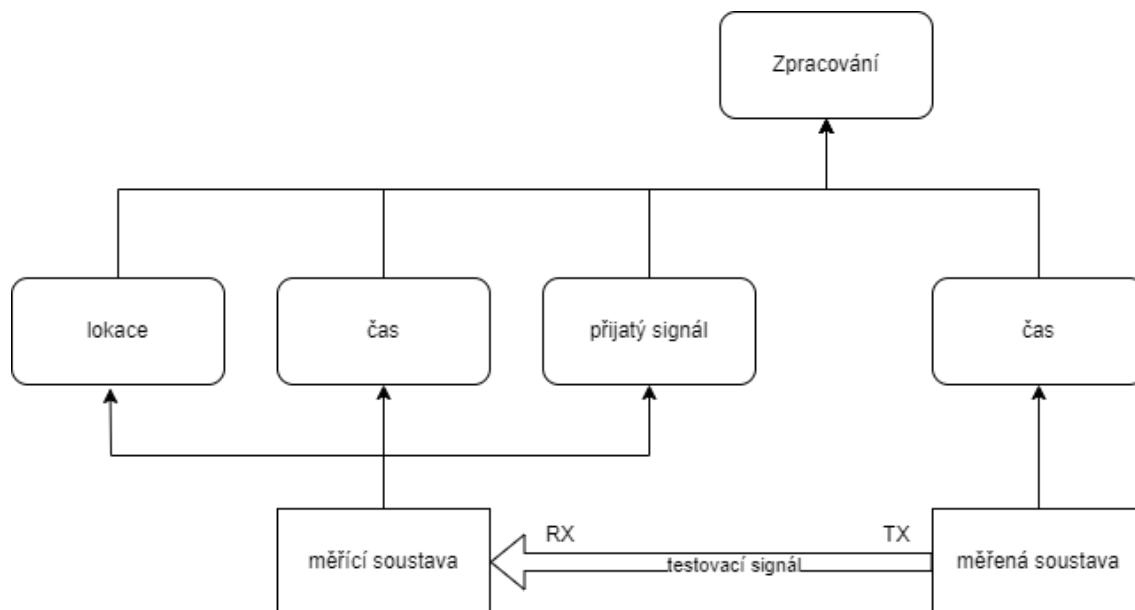
První část zahrnuje měřicí soustavu. Měřicí soustava představuje zapojení navržené měřicí aparatury a kvadrokoptéry, ke které je měřicí aparatura připevněna. Kvadrokoptéra zajišťuje let v prostoru. Měřicí aparatura provádí příjem či vysílání testovacích signálů a jejich následné ukládání.

Druhá část zahrnuje měřenou soustavu. Měřená soustava představuje aparaturu s měřenou anténou, které provádí vysílání, či příjem testovacích signálů.

Třetí část zahrnuje zpracování, které je prováděno off-line, mimo měřicí soustavu.

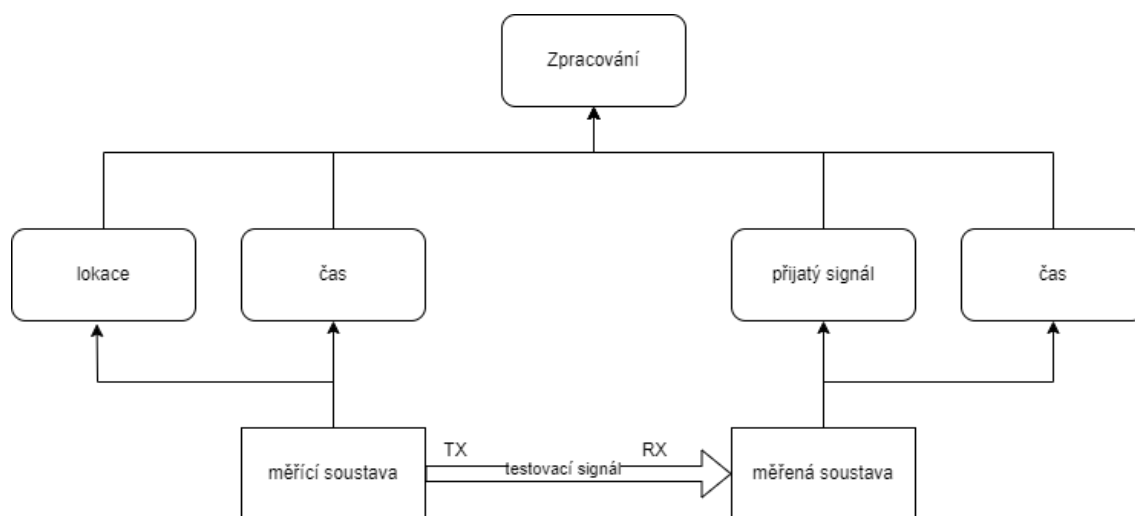
Navrhované řešení (Obrázek 14), je primárně koncipováno, s cílem měřit antény, které jsou schopny vysílat. Měřicí soustava za pomoci kvadrokoptéry vykoná autonomní let, při kterém kontinuálně přijímá testovací signál, vyslané měřenou anténou a spojí je s lokacemi a časem ve kterém byly přijaty. Po provedení měření, jsou získaná data zpracována a vyhodnocena.

Většina antén je recipročních, tj. pro vysílání a příjem mají stejnou vyzařovací charakteristiku. Je tedy možné si vybrat, zda bude měřená anténa přijímat, nebo vysílat. Moderní aktivní elektronicky vychylované antény (AESAs), však recipročné nejsou a je nutné měřit obě vyzařovací charakteristiky na příjmu i vysílání samostatně.



Obrázek 14 - Diagram měření antén, které vysílají

Z toho důvodů, bylo navrženo i druhé řešení (Obrázek 15). Měřicí soustava za pomoci kvadrokoptéry vykoná autonomní let, při kterém kontinuálně vysílá testovací signál a ukládá lokace a čas jeho vyslání. Měřená anténa tento signál kontinuálně přijímá a s časem ukládá. Získaná data jsou poté zpracována a vyhodnocena.



Obrázek 15 - Diagram měření antén, které přijímají

5 Měřicí soustava

Měřicí soustava se skládá z kvadrokoptéry, ochranné konstrukce a měřicí aparatury.

5.1 Kvadrokoptéra

Kvadrokoptéra od firmy Robodrone Industries s.r.o. typu hornet, která byla v práci použita (Obrázek 16), byla dodána školou a vyznačuje se upravitelností rámu. Běžné komerční multikoptyéry takové úpravy téměř neumožňují, jelikož se jedná o zavřené systémy. [15]



Obrázek 16 - Kvadrokoptéra HORNET [15]

5.2 Návrh konstrukce

Konstrukce (Obrázek 17), byla navržena pro usazení a ochranu měřicí aparatury na rámu kvadrokoptyéry a nahrazuje její původní dno. Konstrukce se skládá ze dvou částí, hlavní ochranné konstrukce a víka. Konstrukce byla vytisknuta na 3D tiskárně. Návrh byl vypracován v programu AutoCAD od firmy Autodesk a držel se zásad spojenými s navrhováním součástí určené pro použití na UAV. [16]

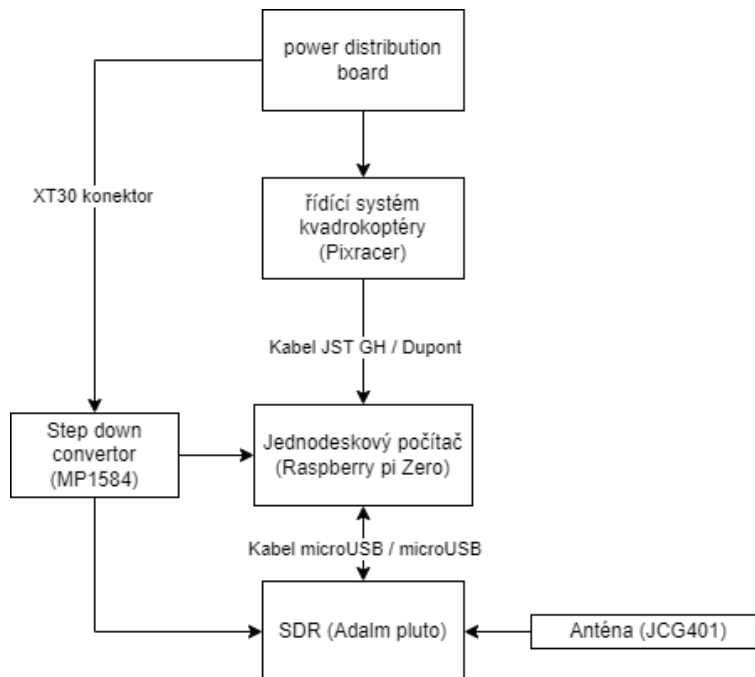


Obrázek 17 - Ochranná konstrukce

5.3 Měřicí aparatura

Měřicí aparatura má zapojení podle následujícího diagramu (Obrázek 18). Power distribution board zajišťuje distribuci energie z baterie kvadrokoptyéry do měřících přístrojů.

Kvadrokoptéra je ovládána pomocí letového kontroléru Pixracer, primárně navrženého na ovládání závodních multikoptér a jiných malých UAV. Na Raspberry Pi je spuštěn hlavní program. Software defined radio (SDR) je měřicí zařízení, které přijímá a předzpracovává signál z měřené antény. Raspberry Pi Zero 2 W i Adalm Pluto vyžadují 5V napájení, baterie kvadrokoptéry dodává 11.3 V, do řetězce byl proto přidán Step down konvertor zajišťující snížení napětí.



Obrázek 18 - Zapojení měřicí aparatury

5.3.1 Anténa

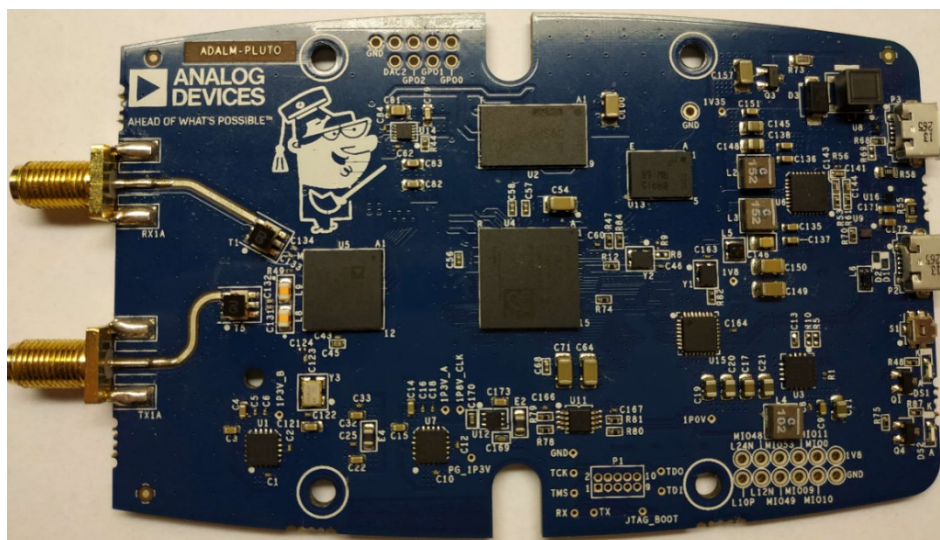
Pro měření byla použita anténa (Obrázek 19), dodávaná přímo s SDR Adalm Pluto.



Obrázek 19 - Anténa JCG401 [17]

5.3.2 Software-defined radio

Software defined radio nebo zkráceně SDR, je systém, který slouží pro příjem signálů. Některá SDR mají obvody umožňující i vysílání. SDR nahrazuje většinu analogových obvodů klasického přijímače/vysílače softwarovým řešením využívající zpracování signálů digitálně (například A/D konverzi, filtraci, či digitální demodulaci). Pro návrh řešení bylo vybráno SDR v podobě Adalm Pluto od firmy Analog Devices Inc. (Obrázek 20). [18]



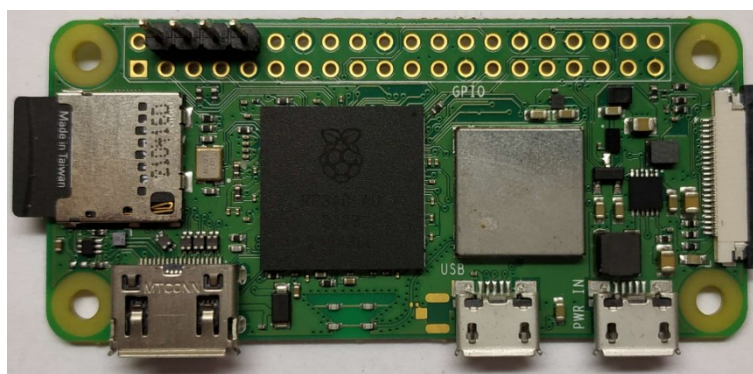
Obrázek 20 - Adalm Pluto SDR [18]

Adalm Pluto je plně duplexní, dovoluje tedy přijímat a vysílat zároveň. Může vysílat a přijímat v rozsahu frekvencí 325MHz až 3.8GHz. Tyto hodnoty jdou však upravit nastavením firmware, po kterém se rozsah frekvencí změní na 70MHz až 6GHz. Pro měření na vyšších kmitočtech by bylo nutné do návrhu zahrnout pevný místní oscilátor.

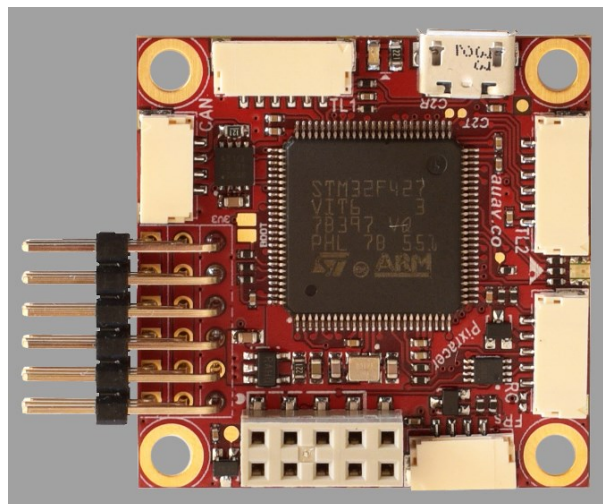
Adalm pluto dokáže spouštět a vykonávat programy samo z připojeného flash disku Bez nutnosti ovládání jiným zařízením. Takové programy však musí být kompilovány a jejich úprava, například nastavení centrální frekvence měření, by vyžadovala vždy novou kompilaci. Pro zvýšení všestrannosti je v návrhu pluto ovládáno přes single board computer. [19]

5.3.3 Single board computer

Jednodeskový počítač, je takový, kde veškeré komponenty a obvody jsou přímo na jediné desce. Takové řešení umožňuje zmenšit celkovou velikost počítače za cenu nižších výkonů. Pro rozměry, hmotnost a energetickou nenáročnost, bylo vybráno Raspberry Pi Zero 2 W (Obrázek 21). Další Single board computer použitý v návrhu je open hardware Pixracer (Obrázek 22). Tento letový kontrolér je dodáván se stavebnicí kvadrokoptéry. [20] [21] [22]



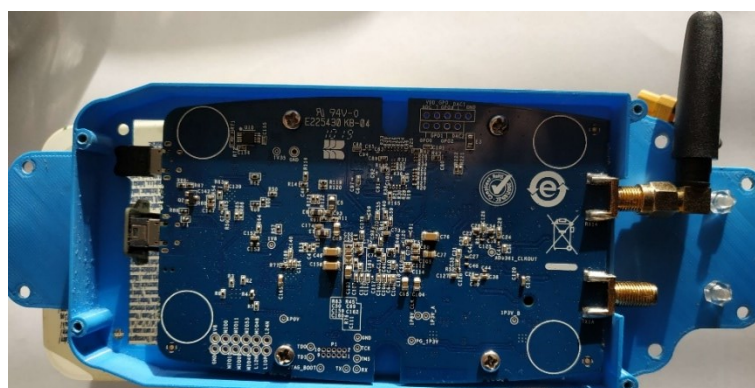
Obrázek 21 - Raspberry Pi Zero 2 W [20]



Obrázek 22 - Pixracer [22]

5.4 Reálné zapojení měřící soustavy

Celá měřící aparatura je připevněna k ochranné konstrukci po obou stranách (Obrázek 23, Obrázek 24). Ochranná konstrukce je připevněna na spodní straně kvadrokoptéry (Obrázek 25).



Obrázek 23 - Zapojení měřící aparatury (pohled ze vnější části)



Obrázek 24 - Zapojení měřící aparatury (pohled ze vnitřní části)

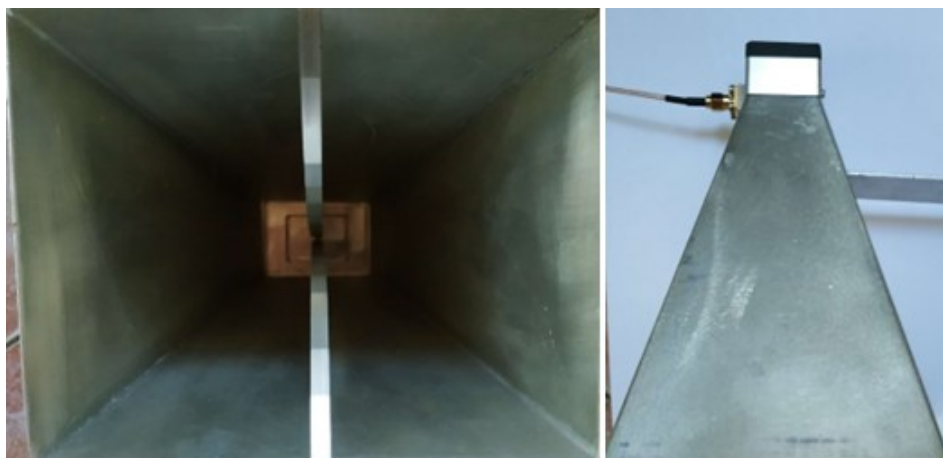


Obrázek 25 - Připevnění měřicí aparatury ke kvadrokoptěře

6 Měřená soustava

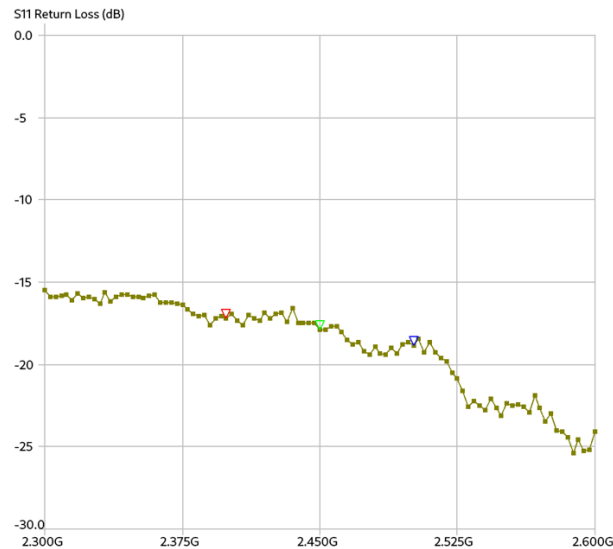
Měřená soustava pro odzkoušení funkčnosti navrhovaného řešení se skládá z měřené antény (Obrázek 26), SDR Adalm pluto, stativu (Obrázek 29), držáku pro uchopení antén ke stativu (Obrázek 28) a osobního počítače.

6.1 Měřená anténa (Ridge horn)



Obrázek 26 - Měřená anténa (Ridge Horn)

Útlum odrazu měřené antény (Ridge Horn) má na frekvenci 2.4 GHz hodnotu -18 dB a hodnotu poměru stojatých vln 1.319 (Obrázek 27). Z hodnot útlumu odrazů měřené antény, bylo navrženo provedení testování funkčnosti navrhovaného řešení ve frekvenčním pásmu ISM.



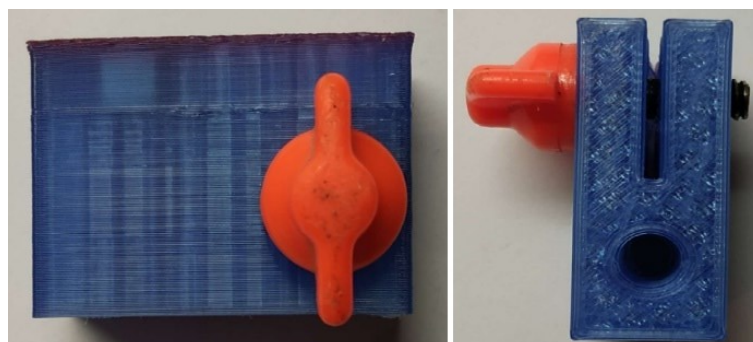
Obrázek 27 - Útlum odrazu měřené antény (Ridge Horn)

6.2 ISM pásmo

ISM je skupina volných frekvenčních pásem určená pro nelicencované nízko výkonové bezdrátové spojení. Frekvenční oblast pásma ISM, které bylo pro testování vybráno je 2.4-2.4835GHz. Hlavním důvodem, proč byla tato oblast vybrána je z důvodu vysílání bez nutnosti licence. Dalším důvodem je to, že Adalm pluto dokáže v této oblasti vysílat a přijímat bez nutnosti zásahu do software a bez nutnosti přidání dalších zařízení typu směšovač. Nevýhodou použití toho pásma, je možné měření rušení pocházející od, zařízení využívajících Wi-Fi. K potlačení možnosti příjmu takového rušení pomohl výběr lokace, kde testování probíhalo. [23]

6.3 Držák na připevnění antén

Použitá anténa byla ke stativu (Obrázek 29) připojena pomocí držáku vyrobeného na 3D tiskárně (Obrázek 28).



Obrázek 28 - Držák měřené antény



Obrázek 29 - Upevnění použité antény ke stativu (Ridge horn)

6.4 Reálné zapojení měřené soustavy

Měřená anténa připevněná na stativu je spojena s SDR Adalm pluto, které se stará o vysílání, či příjem testovaného signálu. Obsluha této aparatury probíhá přes osobní počítač (Obrázek 30).

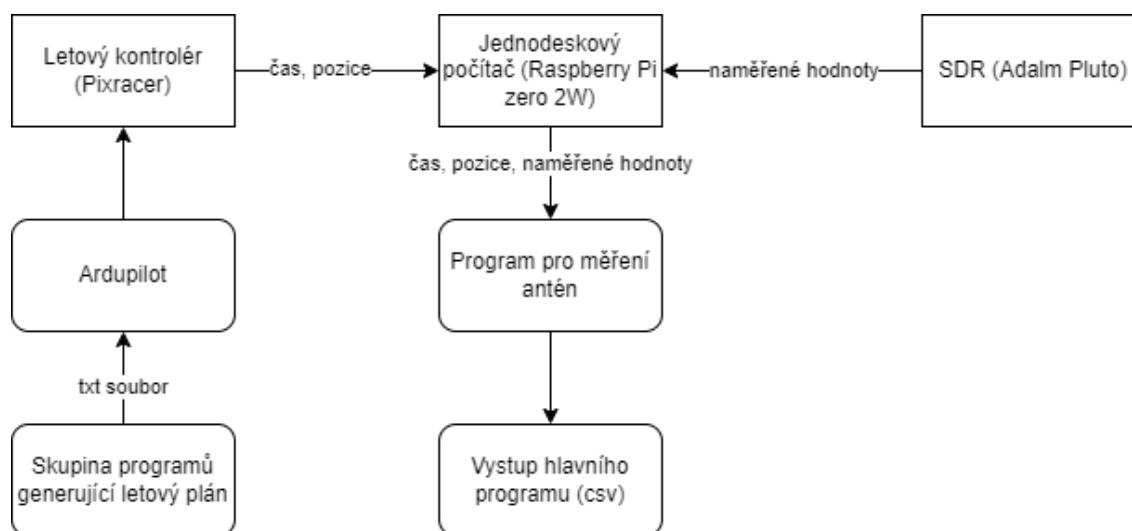


Obrázek 30 - Reálné zapojení měřené aparatury

7 Návrh programů pro měření

Diagram (Obrázek 31), zobrazuje logický řetězec předávání informací v měřicí soustavě. Do soustavy vstupují programy, které byly pro tuto práci vytvořeny. Skupina programů generující letový plán a hlavní program pro měření antén, běžící na jednodeskovém počítači.

Navržené řešení vytváří pomocí skupiny programů letový plán, který je nahrán do programu Ardupilot. V programu Ardupilot je provedena kontrola, že vygenerované body letového plánu jsou správně nastavené. Po kontrole je letový plán, přes program Ardupilot nahrán do letového kontroléru. Za letu při spuštění režimu auto, letový kontrolér vykoná letový plán, zároveň na jednodeskovém počítači běží program pro měření antén. Ten sbírá data naměřených hodnot z SDR a lokace kvadrokoptéry, které pak ukládá je ve formátu csv na SD kartu jednodeskového počítače.

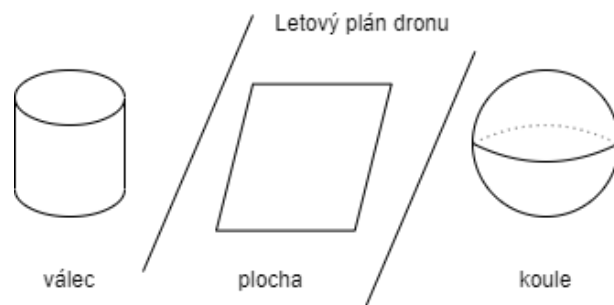


Obrázek 31 - Měřicí řetězec, logické zapojení software

7.1 Skupina programů generující letový plán

Tato skupina programů (bezpecnostni_otazky.m, draha_letu_dronu.m, vyska.m, confirm.m, getstring.m, getinteger.m, getfloat.m), vytváří letovou dráhu, ve formátu bodů v prostoru, které kvadrokoptéra při plnění mise v autonomním režimu proletí. Každý bod se skládá z hodnot nadmořské výšky, zeměpisné šířky a zeměpisné délky.

Letová dráha, dodržuje tvar, jednoho ze tří obrazců (Obrázek 32). Pro všeobecné měření se vybírá tvar dráhy v podobě koule, kdy jednotlivé generované body jsou ve stejných vzdálenostech od měřené antény a není potřeba dodatečných geometrických převodů. Pro měření anténních polí v lineární konfiguraci je možné použít tvar dráhy letu v podobě plochy, která je kolmá na měřené anténní pole.



Obrázek 32 - Tvar letového plánu

Body letové dráhy jsou zapsány do textového souboru, ve formátu, který vyžaduje program Ardupilot, běžící na letovém kontroléru. V programu se kromě generace bodů letového plánu měří také celková dráha, kterou je kvadrokoptéra schopna uletět na připojenou baterii. Pokud by další bod již nebyl schopen uletět, je vytvořen nový textový soubor, který v sobě bude mít následující generované body. Všechny programy, které generují body letového plánu, byly napsány v prostředí Matlab.

7.1.1 Bezpečnostní otázky

Tento program (`bezpecnostni_otazky.m`) zajišťuje uživatelské rozhraní pro zadání hodnot ve správném tvaru, potřebných ke generaci bodů letového plánu. Tyto hodnoty jsou dále předány hlavnímu programu, který provádí samotnou generaci. Program `bezpecnostni_otazky.m` využívá čtyři pomocné programy `confirm.m`, `getstring.m`, `getinteger.m` a `getfloat.m`.

Hodnoty jsou zadávány v následujícím pořadí: první zadanou hodnotou je scénář, pak se vyplňuje lokace měřené antény v prostoru, poté je zde nepovinný údaj počáteční lokace startu kvadrokoptéry. Dále se vyplňují úhly a vzdálenost ve které bude měření probíhat. Poté následuje vyplnění hodnot počtu bodů v rovině a počtu výšek a poslední hodnotou je pak rychlost kterou kvadrokoptéra poletí.

Scénář

Scénář udává, v jakém geometrickém obrazci se bude letový plán generovat. Je zadáván ve formě slova.

Lokace měřené antény

Tyto hodnoty udávají lokaci měřené antény v prostoru, zadávané ve stupních pro zeměpisnou šířku a délku a v metrech pro výšku nad povrchem země. Takto zadaná lokace se využije jako střed geometrického obrazce letového plánu.

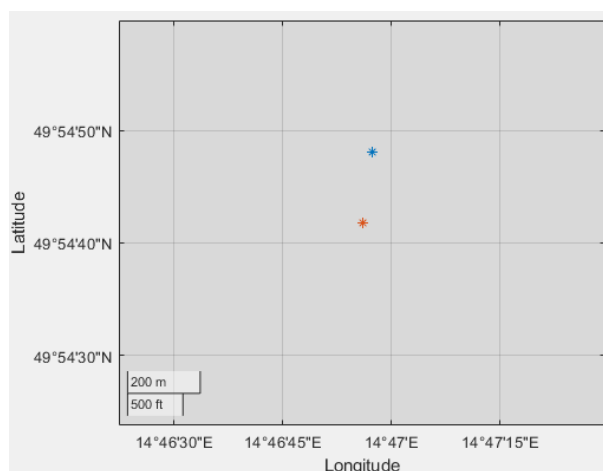
Po zadání těchto hodnot program vygeneruje obrázek ukazující, kde se anténa má nacházet, fungující jako ujistňující ochrana, že lokace byla správně zadána (Obrázek 33).



Obrázek 33 - Lokace antény při zadání zeměpisné šířky a zeměpisné délky

Lokace startu kvadrokoptéry

Hodnoty udávají lokaci startu kvadrokoptéry, zadávané ve stupních pro zeměpisnou šířku a délku a v metrech pro výšku nad povrchem země nejsou povinné. Přispívají však k přesnějšímu výpočtu celkové uletěné dráhy kvadrokoptéry. Pokud tyto hodnoty zadat nechceme, budou se rovnat lokaci antény, pokud je zadáme, program vygeneruje obrázek ukazující lokaci kvadrokoptéry vůči měřené anténě (Obrázek 34). Tento obrázek opět funguje jako ujistňující ochrana, správně zadaných hodnot.



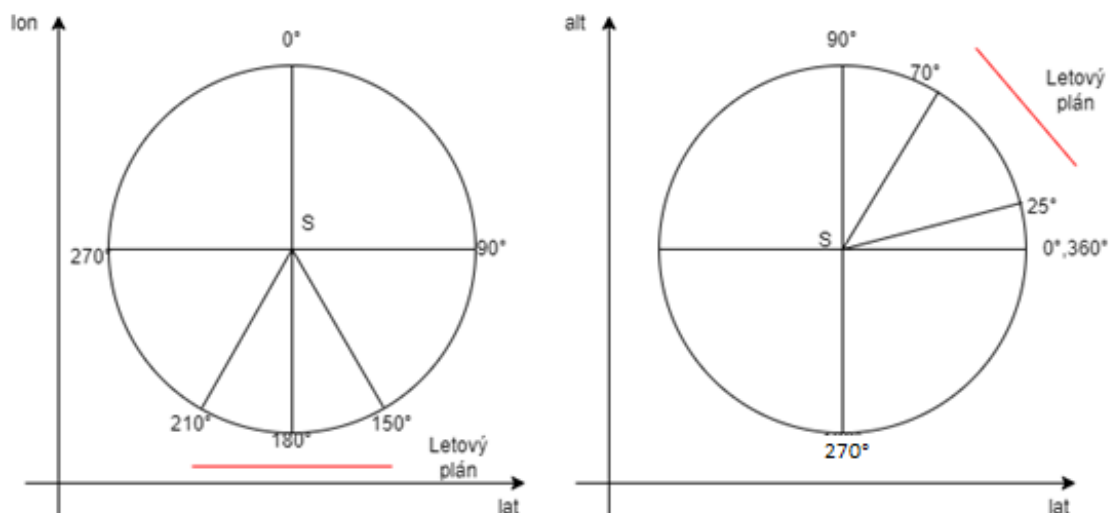
Obrázek 34 - Lokace startu kvadrokoptéry (oranžová) vůči lokaci antény (modrá)

Úhly měření

Úhly měření se zadávají ve stupních a určují v jaké oblasti výseče ohraničené vybranými úhly bude měření probíhat. Někdy totiž není nutné, aby měření probíhalo v rozsahu 0 až 360 stupňů. Zadání v horizontální pozici, probíhá z pohledu středu kružnice. Pokud tedy chceme provádět měření ve výseči ohraničené úhly 150 a 210 stupňů (Obrázek 35), zadáváme pro ohraničení zleva úhel 150 stupňů. Pokud při zadávání úhly otočíme, získáme letový plán měření, který povede přes všechny úhly krom výseče mezi 150 a 210 stupni.

Hodnota 0 stupňů zobrazuje sever, pokud tedy měřená anténa má natočení na západ, zadáváme výšeče okolo 270 stupňů.

Zadávání výšeče měření výšek je rozděleno horizontální rovinou, ve výšce antény, kde se nachází stupeň 0. Ohraničení shora je zde možné nastavit od této roviny do kolmé roviny značící 90 stupňů. Pokud je možno generovat letový plán pod úroveň výšky antény, může být ohraničení zdola nastaveno mezi 270 a 360 stupni. Pokud zadáme ohraničení zdola mezi 0 a 90 stupni, bude se měřit výšeč v horní části kružnice.



Obrázek 35 - (vlevo) výšeč v horizontální poloze, (vpravo) výšeč ve vertikální poloze

Vzdálenost měření

Vzdálenost měření udává poloměr geometrického tvaru letového plánu, ve kterém bude měření probíhat a je zadávána v metrech.

Počty bodů a výšek

Tyto hodnoty určují, kolik bodů letového plánu má program vygenerovat v jedné výšce a kolik má vygenerovat výšek. Pokud nastavíme 100 bodů a 10 výšek, měl by vygenerovaný textový soubor obsahovat 1000 bodů. Program má však nastavená omezení, například jak vysoko a nízko může kvadrokoptéra letět, a proto se některé body nemusí zapsat. Celková dráha, kterou je kvadrokoptéra schopna na baterii uletět také omezuje počet bodů zapsaných v jednom textovém souboru.

Pokud nechceme explicitně zadávat hodnoty počtu bodů a výšek, můžeme zadat hodnotu přesnosti udávanou v metrech. Podle ní program vygeneruje tolik bodů a výšek, aby odchylka vzdálenosti dráhy letu kvadrokoptéry nepřesáhla právě tuto přesnost.


```

% uhel bodu na zaklade vyseci
uhel=mod(vysece(2)-vysece(1)+360,360);
% presnost ktere musime dosahnout
ratio=1-(presnost/vzdalenost);
n=1;
while cosd(uhel/2/n) <ratio
    n=n+1; % generace bodu
end
pocetybodu(1)=n+1;

```

Rychlost letu

Tato hodnota udává rychlost, kterou bude kvadrokoptéra při vykonávání letové plánu dodržovat a zadává se v m/s. Nastavení této hodnoty ovlivňuje chybovost měření. Velké rychlosti totiž mohou způsobit velký náklon kvadrokoptéry a tím dají vzniknout polarizačnímu útlumu, který byl popsán v kapitole 3.

7.1.2 Hlavní program

Hlavní program (`draha_letu_dronu.m`) používá tři neoficiální přídatky, obsahující funkce, které byly do programu Matlab nahrány. Jedná se o funkci `closest_value` [24], která je obsažena v pomocné funkci `výška`, o funkci `readhgt` [25] a o funkce `direct` a `inverse`, které jsou součástí Geodetic Toolbox [26]. Dále pak hlavní program využívá pomocný program `vyska.m`.

Readhgt

Funkce, která v zadaném rozmezí zeměpisných šířek a délek stáhne soubory⁶ obsahující nadmořské výšky terénu v zvolené oblasti. Jelikož tyto mapy pracují v jiné přesnosti počtu dat než program samotný, je poté využita funkce `closest_value`, pro namapování a přičtení výšky měřené antény k nejbližší hodnotě získané z `readhgt` mapy. Tento proces je dále prováděn pro výšku startu kvadrokoptéry a pro generaci výšek bodů letového plánu. Tato funkce přispívá k ochraně vůči srážce se zemí.

Scénář

Na základě zvoleného scénáře, se provede generace bodů ve zvoleném geometrickém tvaru. Tato část kódu je identická pro výpočet všech tří geometrických tvarů použitých v práci. Liší se pouze ve zvoleném vzorci výpočtu vzdálenosti ve funkci `direct`. Při výběru koule, bude vzdálenost bodů od měřené antény vždy stejná. Na základě výpočtu přepony pravoúhlého trojúhelníku je vypočítána vzdálenost bodů válce. Výpočet plochy je prováděn přes výpočet odchylky mezi kružnicí a tečnou a opět vypočítání přepony pravoúhlého trojúhelníku.

Tato část kódu funguje na principu, kdy se prvně vypočítají příspěvky úhlů mezi jednotlivými body, a výškami. Poté je v cyklech volána funkce `direct`. Ta vypočítá

⁶ Použitá funkce [24] stahuje výšková data z <https://srtm.kurviger.de>.

zeměpisnou šířku, délku a nadmořskou výšku jednotlivých bodů, a to na základě zadání zeměpisné šířky, délky, nadmořské výšky měřené antény a azimutu, elevace, vzdálenosti jednotlivých bodů od měřené antény.

```
elseif strcmp(scenar, 'koule')
    % vycet prispvku uhlu
    hstep=mod(vysecl-vysecp+360,360)/(hpocet-1);
    vstep=mod(vysech-vysecd+360,360)/(vpocet-1);
    body=zeros(hpocet,3,vpocet);
    for i=1:hpocet
        for j=1:vpocet
            [x,y,z]=direct(deg2rad(rdrlat), ...
                            deg2rad(rdrlon), ...
                            rdralt, ...
                            deg2rad(vysecp+(i-1)*hstep), ...
                            deg2rad(vysecd+(j-1)*vstep), ...
                            vzdalenost);
            body(i,1,j)=rad2deg(x);
            body(i,2,j)=rad2deg(y);
            body(i,3,j)=z;
        end
    end
end
```

Po generaci bodů na základě scénáře následuje jejich transformace do sloupců a přeskládání pozice hodnot, aby body při změně výšek navazovali na sebe a kvadrokoptéra tak letěla kontinuálně.

```
for i=0:2:vpocet-1
    n=i*hpocet;
    tlat(n+1:n+hpocet)=flip(tlat(n+1:n+hpocet));
    tlon(n+1:n+hpocet)=flip(tlon(n+1:n+hpocet));
end
```

Celková dráha letu

V této části kódu probíhá výpočet celkové dráhy letu, využívající funkci inverse. Tato funkce vrací azimut, elevaci a vzdálenost dvou bodů v prostoru. Program ji využívá pro získání vzdálenosti mezi aktuálním a předešlým bodem letového plánu. Tyto hodnoty jsou přes jednotlivé body sčítány a jsou použity dále pro rozhodování, zda se bod má stále zapsat v aktuálním textovém souboru, nebo se již má vytvořit soubor nový a zapsat se tam.

```

while ntotal<=length(xx)
    nindex=4;
    drahaulet=0;
    prev=[tolat, tolon, toalt];
    [az21,va21,delkaodstartu]=inverse(deg2rad(prev(1)), ...
        deg2rad(prev(2)), ...
        deg2rad(prev(3)), ...
        deg2rad(takeoff(1)), ...
        deg2rad(takeoff(2)), ...
        deg2rad(takeoff(3)));
    drahaulet=drahaulet+delkaodstartu;

```

Následuje část kódu pro vygenerování textového souboru, použitého pro ukládání. Jako první hodnoty jsou zde zapsány řádky nastavující rychlost kvadrokoptéry, nastavení směřování přední části kvadrokoptéry směrem měřené antény a lokace měřené antény, ve formátu, který vyžaduje program Ardupilot.

Další část kódu zabezpečuje, aby nebyly zapsány body, které nelze použít. Jedná se o body pod úrovní nadmořské výšky terénu a body které jsou ve výšce přesahující 120 m nad úrovní terénu země.

```

while ntotal<=length(xx)
    current=[tlat(ntotal), tlon(ntotal), tht(ntotal)];
    h1=vyska(a, current(1), current(2));
    if ~(tht(ntotal)>=h1+safezone ...
        && ...
        tht(ntotal)<=h1+120)
        ntotal=ntotal+1;
        continue;
% pokud bod je pod urovni AMSL + safezone anebo nad 120m
nezapise se
end

```

Poslední část programu rozhoduje, které body se zapíší v aktuálním textovém souboru a které budou zapsány v novém. Konec programu slouží přímo pro zápis do souboru (Obrázek 36).

QGC WPL 110											
1	1	0	178	0.000000	3	0	0	0.000000	0.000000	0.000000	1
2	1	0	114	2.000000	0	0	0	0.000000	0.000000	0.000000	1
3	1	0	201	0.000000	0	0	0	49.913358	14.782611	526.000000	1
4	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913021	14.782913	551.000147	1
5	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913032	14.782940	551.000147	1
6	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913044	14.782966	551.000147	1
7	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913056	14.782992	551.000147	1
8	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913070	14.783016	551.000147	1
9	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913084	14.783039	551.000147	1
10	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913099	14.783061	551.000147	1
11	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913114	14.783081	551.000147	1
12	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913131	14.783101	551.000147	1
13	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913148	14.783119	551.000147	1
14	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913165	14.783135	551.000147	1
15	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913184	14.783150	551.000147	1
16	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913202	14.783164	551.000147	1
17	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913221	14.783176	551.000147	1
18	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913241	14.783186	551.000147	1
19	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913261	14.783195	551.000147	1
20	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913281	14.783202	551.000147	1
21	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913301	14.783208	551.000147	1
22	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913321	14.783211	551.000147	1
23	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913342	14.783214	551.000147	1
24	1	0	16	0.000000	0	0	0	49.913362	14.783214	551.000147	1

Obrázek 36 - Ukázka vygenerovaných bodů pro letový plán

7.2 Program na straně měřící aparatury

Program byl napsán v jazyku python v prostředí Pycharm. Napsány byly dvě verze, jedna řešící měření vysílacích antén (Program_merici_aparatura_prijem.py) a druhá řešící měření přijímacích antén (Program_merici_aparatura_vysilani.py).

Program každou sekundu načítá 1024 naměřených hodnot ze SDR, dále načítá pomocí protokolu Mavlink hodnoty lokací GPS, ve kterých naměřené hodnoty byly snímány. Tyto hodnoty jsou spárovány a uloženy do csv souboru pro další zpracování.

Je načítáno více hodnot z důvodu možného použití měření antén s pracovním cyklem (například pulzní radar), kdy by nebylo zaručeno snímání 1 správné hodnoty. Dalším důvodem je získání hodnot variance a průměrů z většího množství dat.

7.2.1 Program pro měření přijímací antény

Tento program využívá tři přídatné knihovny. Knihovnu numpy [27], pro matematické funkce a práce s vektory. Knihovnu adi [28] pro komunikaci s SDR a knihovnu pymavlink [29] pro komunikaci s letovým kontrolerem.

main

Tato metoda obsahuje inicializaci hodnot potřebných pro nastavení SDR. Je zde nastavena šířka pásma měření, vzorkovací frekvence, centrální frekvence, na které bude vysílat měřená anténa a počet vzorků. Dále je zde volána funkce čištění bufferu SDR, pro zabránění měření nesprávných hodnot. Je zde také umístěn cyklus, který určuje kdy začne probíhat měření.

Při spuštění bude program v tomto cyklu čekat na splnění podmínky změny výšky kvadrokoptéry.

```
# cekani programu nez kvadrokoptera zmeni vysku (m)
while GPS.wait_for_scan()[2]<vz+2:
    print('cekani na vzlet kvadrokoptery')
    time.sleep(1)
```

Poslední částí metody main je hlavní cyklus, který donekonečna provádí hlavní úlohu programu.

```
# main loop
while True:
    signal_data=signal.uprava_sig()
    GPS_data= GPS.wait_for_scan()
    csv_save(signal_data,GPS_data)
```

signal_processing

Tato třída získává naměřená data ze SDR. Data jsou ve formě IQ složek signálu, kdy jsou prvně zapsány I složky signálu a poté Q složky signálu.

```
# metoda pro prijem pres pluto
def pluto_RX(self):
    samples = self.sdr.rx()
    return samples

def uprava_sig(self):
    P_IQ = self.pluto_RX()
    return P_IQ
```

wait for scan

Tato třída zajišťuje navázání komunikace s letovým kontrolerem a získávání dat z protokolu Mavlink, který je v pythonu zastoupen knihovnou pymavlink. Program zde čeká na heartbeat, což je signál obsahující údaje o kvadrokoptěře a jeho poloze, který musí povinně každý autopilot kvadrokoptéry v pravidelném intervalu vysílat spolupracujícím blokům avioniky.

```
# příjem GPS dat z mavlink
def wait_for_scan(self):
    NMEA_buff = self.the_connection.recv_match(type='GPS_RAW_INT',
                                                blocking=True)

    lat= NMEA_buff.__dict__.get('lat')/1e7
    long= NMEA_buff.__dict__.get('lon')/1e7
    alt= NMEA_buff.__dict__.get('alt')/1e3
    time=NMEA_buff.__dict__.get('time_usec')
    hdop=NMEA_buff.__dict__.get('eph')
    return lat,long,alt,time,hdop
```

csv_save

Zde jsou naměřené hodnoty a jejich lokace ukládány za sebou do csv souboru.

Výstupní csv soubor

Ukázka výstupu je zobrazena níže (Obrázek 37), jsou zde za sebou zapsány hodnoty zeměpisné šířky, délky a výšky měřených lokací, dále pak čas, chyba GPS a samotné naměřené hodnoty IQ složek.

49.913358	14.782610	543.14	56167000	121	85.0	4.0	259.99999	5.0000000	106.00000	10.000000	493.00000	205.0	16.0	722.0	369.99999
49.913357	14.782611	545.14	57767000	121	45.000000	85.0	12.999999	130.0	205.0	265.0	96.999999	10.000000	185.00000	100.0	5.0000000
49.913357	14.782611	545.43	58167000	121	64.999999	148.99999	205.0	740.00000	880.99999	9.0	25.999999	196.0	25.0	157.0	115.99999
49.913357	14.782611	545.68	59767000	121	629.00000	34.0	234.00000	221.00000	234.00000	463.99999	234.00000	364.99999	1369.0	49.0	32.000000
49.913357	14.782611	545.64	60167000	121	90.0	53.0	117.00000	53.0	257.00000	866.0	260.99999	10.000000	71.999999	205.0	304.99999
49.913357	14.782610	545.62	62767000	121	25.0	130.0	109.00000	49.0	103.99999	58.000000	4.0	269.00000	51.999999	364.99999	53.0
49.913357	14.782608	545.61	63167000	121	17.0	64.999999	415.99999	260.99999	145.0	207.99999	313.99999	290.00000	45.000000	181.0	25.0
49.913356	14.782602	545.58	63767000	121	181.0	404.0	16.0	60.999999	72.999999	85.0	205.0	245.00000	68.0	181.0	113.00000
49.913354	14.782594	545.55	64167000	121	64.999999	81.0	49.0	32.000000	36.999999	164.0	82.000000	185.00000	148.99999	5.0000000	45.000000
49.913337	14.782524	545.31	65767000	121	148.99999	181.0	229.00000	25.999999	212.0	17.0	51.999999	200.00000	32.000000	36.999999	145.0
49.913330	14.782495	545.2	66167000	121	234.00000	722.0	241.00000	259.99999	106.00000	9.0	232.99999	202.0	145.0	936.00000	49.0
49.913293	14.782339	544.66	67767000	121	377.0	181.0	170.00000	85.0	196.99999	34.0	36.0	740.00000	12.999999	884.00000	229.00000
49.913282	14.782292	544.5	68167000	121	17.999999	212.0	45.000000	17.0	100.0	769.0	109.00000	617.00000	196.99999	212.0	64.999999
49.913236	14.782093	543.85	69767000	121	148.99999	226.0	60.999999	185.00000	389.00000	754.00000	125.00000	361.0	72.999999	145.0	64.999999
49.913224	14.782042	543.68	70167000	121	340.0	5.0000000	36.0	28.999999	17.0	148.99999	169.0	410.0	64.0	34.0	169.0
49.913176	14.781837	543.02	71767000	121	12.999999	200.00000	40.000000	169.0	96.999999	337.0	178.0	409.0	9.0	245.00000	180.00000
49.913164	14.781786	542.85	72167000	121	50.000000	103.99999	221.00000	64.999999	10.000000	88.999999	122.00000	25.0	82.000000	106.00000	34.0
49.913115	14.781578	542.17	73767000	121	692.0	205.0	305.99999	16.0	609.99999	2.0000000	103.99999	493.00000	10.000000	125.00000	245.00000
49.913103	14.781526	542.0	74167000	121	192.99999	520.0	207.99999	72.999999	401.00000	436.00000	17.0	468.00000	207.99999	25.999999	369.99999
49.913054	14.781318	541.31	75767000	121	333.0	36.999999	325.0	170.00000	164.0	72.999999	405.00000	103.99999	85.0	325.0	257.00000
49.913041	14.781265	541.14	76167000	121	10.000000	128.00000	136.0	25.0	25.0	232.00000	82.000000	164.0	28.999999	170.00000	162.0
49.912992	14.781057	540.44	77767000	121	196.0	20.000000	100.0	296.0	533.0	25.999999	28.999999	20.000000	9.0	425.00000	25.0

Obrázek 37 - Ukázka výstupu po měření

7.2.2 Program pro měření vysílací antény

Tento program (Program_merici_aparatura_vysilani.py) funguje na podobném principu jako program předchozí. Místo funkce příjmu signálu, je zde funkce vysílání a ukládají se zde do csv pouze lokace vysílaných signálů. Vysílání začíná ihned po startu programu.

signal_processing

Obsahuje metodu pro vysílání signálů a vytváří se zde signály, které jsou použity k vysílání.

```
def pluto_TX(self):
    samples=self.sdr.tx(self.signal_sin())
    return samples
```

Je zde napsána metoda pro jednoduchý sin signál, metoda pro AM modulaci a metoda pro qpsk modulaci.

```
# metoda pro signal, sin
def signal_sin(self):
    t = np.linspace(0,1,self.num_symbols) # casova osa
    As = 1 # amplituda signalu
    fs = 100e3 # frekvence signalu
    phis = 0 # faze signalu
    samples = As*np.sin(fs*2*np.pi*t + phis) # predpis funkce sin
    samples *= 2**14 # pluto potrebuje data mezi +/- 2^14
    return samples
```

7.2.3 Program na straně měřené soustavy

Program využitý pro vysílání (Program_merena_antena_vysilani.py) a pro příjem (Program_merena_antena_prijem.py) na straně měřené soustavy je pouze modifikovaná verze předchozích programů. Není zde obsažena metoda GPS, protože lokace měřené antény je neměnná. Data se tu ukládají pouze s časem, ve kterém byly přijaty. Základ programů popsanych v kapitole 7.2 vychází již z existujících kódů, převzatých ze stránky pysdr.org [30].

8 Zpracování

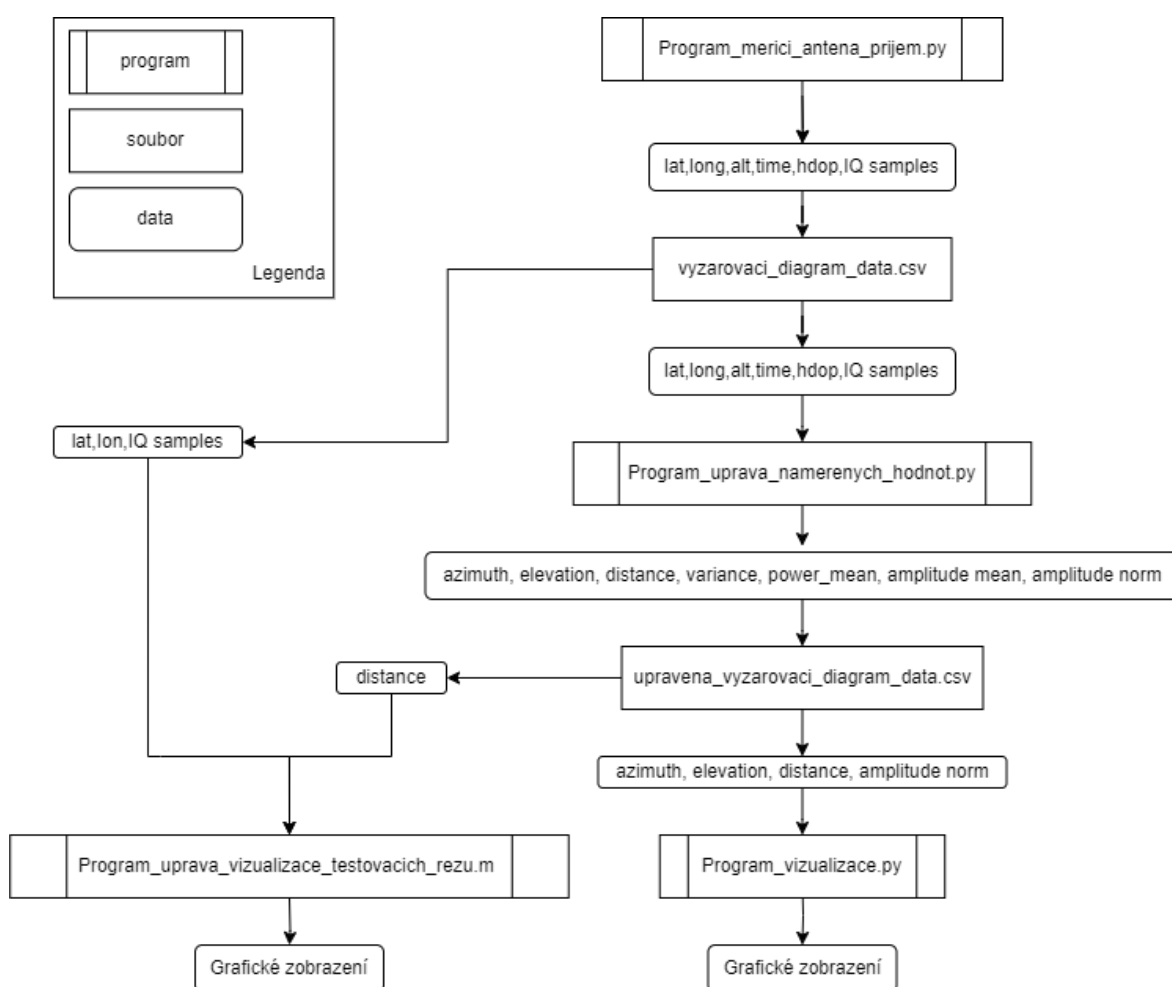
Zpracování a vyhodnocení naměřených hodnot se provádí mimo měřící řetězec na osobním počítači (off-line). Pro tyto účely byly napsány dva programy v jazyku python (Program_uprava_namerenych_hodnot.py, Program_vizualizace.py). Pro zpracování a vyhodnocení naměřených hodnot při testování funkčnosti navrženého řešení byl napsán třetí program, a to v jazyku Matlab (Program_uprava_vizualizace_testovacich_rezu.m). Tento program byl napsán pro vizualizaci podrobnějších analýz.

Výsledkem prvního programu je csv soubor obsahující azimut, elevaci a vzdálenost jednotlivých měřených bodů od měřené antény. Tato transformace z hodnot zeměpisné šířky, délky a výšky nad terénem se provádí z důvodu následného využití v programu vytvářející vizualizaci. Z naměřených vektorů vzorků pro jeden bod měření se dále vypočítává variance, která dovoluje případnou filtraci hodnot. Vysoká hodnota variance může indikovat chybu měření, například způsobenou odrazem signálů od překážky.

Další vypočítané hodnoty jsou průměry výkonu a amplitudy jednotlivých bodů měření. Poslední vypočítanou hodnotou programu je normovaná amplituda, která má v maximum hodnotu 1.

Druhý program načítá hodnoty azimutu, elevace, vzdálenosti a normované amplitudy z csv souboru vytvořeného předcházejícím programem a vytváří z nich grafické zobrazení.

Třetí program načítá hodnoty zeměpisné šířky, délky a IQ složky z csv souboru, který obsahuje neupravené naměřené hodnoty. Dále pak načítá vzdálenost ze souboru, který byl upraven prvním programem. Z těchto dat vytváří třetí program grafické zobrazení. Předávání dat mezi programy a soubory použité při zpracování, zobrazuje následující diagram (Obrázek 38).



Obrázek 38 - Diagram předávání dat mezi programy zpracování

8.1 Program pro zpracování měřených dat

Program `Program_uprava_namerenych_hodnot.py` využívá dvě přídavné knihovny. Knihovnu `numpy`, pro matematické funkce a práce s vektory a knihovnu `AltAzRange` [31] pro transformaci hodnot.

dataload

Metoda dataload načítá zeměpisnou šířku, délku a výšku nad povrchem, měřené antény z txt souboru vygenerovaného pro letový kontrolér, dále pak načítá lokace prvního a posledního generovaného bodu. Ty jsou využity při redukci chybných dat, která jsou způsobena zapnutím a vypnutím programu při startu a při přistání.

```
# nacteni lokace merene anteny z vygenerovanych bodu
drahaletudronu.m
def dataload():
    with open('bodyletu1.txt', 'r') as fp:
        for i, line in enumerate(fp):
            if i == 3:
                antena_lok= map(float,line.split()[8:11])
            elif i == 4:
                prvni_bod= map(float,line.split()[8:11])
            else:
                posledni_bod= map(float,line.split()[8:11])
    return antena_lok, prvni_bod, posledni_bod
```

datasave

V této metodě probíhá načtení hodnot z csv souboru vytvořeného programem pro měření antén. Dále se zde transformované hodnoty ukládají do nového csv souboru, chybné hodnoty ze začátku a z konce souboru jsou vynechány. Načítání a transformace probíhá přes funkci mapka, která volá transformační metodu azimuth_distance.

```
def mapka(line):
    lat_d,long_d,alt_d,time,hdop,*power=map(float,line)
    l_real, l_imag = power[:len(power) // 2], \
        power[len(power) // 2:]
    vysledek = list(map(lambda x: complex(x[0], x[1]), \
        zip(l_real, l_imag)))
    amp=list(map(lambda x : np.abs(x), vysledek))
    powerv = list(map(lambda x: x ** 2, amp))
    lla_data=azimuth_distance(lat_d,
        long_d,
        alt_d,
        lat_r,
        long_r,
        alt_r)
    return *lla_data,np.var(powerv), \
        s.mean(powerv), s.mean(amp)
```

Vynechávání bodů, které nejsou součástí měření, funguje na principu porovnání vzdálenosti mezi naměřenými lokacemi programu pro měření přijímací antény (draha_letu_dronu.m) vzaté ze začátku souboru a prvním vygenerovaným bodem programu pro generování letových bodů. Protože se kvadrokoptéra bude při letu blížit k prvnímu vygenerovanému

bodu, bude se vzdálenost mezi jednotlivými naměřenými body a prvním vygenerovaným bodem zmenšovat. Jakmile přeletí první vygenerovaný bod, vzdálenost se začne zvětšovat a hodnoty se budou již zapisovat do csv souboru. Stejný, princip funguje i naměřené body od konce souboru a poslední vygenerovaný bod.

```
# zapis hodnot do noveho csv
with open("radiation_pattern_data.csv", "r") as fcsv, \
    open("lla2aed.csv", "w", newline='') as fcsv2:
    seznam = list(csv.reader(fcsv, delimiter=';'))

    current, prev, zacatecni_index = None, None, 0
    while current is None or prev is None or current < prev:

lat_d, long_d, alt_d, *_ = map(float, seznam[zacatecni_index])
    current, prev, zacatecni_index = \
        azimuth_distance(prvni_lat, prvni_lon, prvni_alt,
                        lat_d, long_d, alt_d) [2], \
                        current, zacatecni_index+1

    current, prev, koncovy_index = None, None, len(seznam)-1
    while current is None or prev is None or current < prev:

lat_d, long_d, alt_d, *_ = map(float, seznam[koncovy_index])
    current, prev, koncovy_index = \
azimuth_distance(posledni_lat, posledni_lon, posledni_alt,
                    lat_d, long_d, alt_d) [2], \
                    current, koncovy_index-1
    seznam = seznam[zacatecni_index-2:koncovy_index+2+1]

    premapovany_seznam = list(map(mapka, seznam))
    maximum = max(map(lambda x : x[-1], premapovany_seznam))
    writer = csv.writer(fcsv2, delimiter=';')
    writer.writerow(('azimuth', 'elevation',
                    'distance', 'variance',
                    'power_mean', 'amplitude_mean',
                    'amplitude_norm'))
    for line in premapovany_seznam:
        writer.writerow((*line, line[-1]/maximum))
```

azimuth_distance

Poslední metoda v programu vypočítává na základě pozice měřené antény a pozic bodů měření, azimut, elevaci a vzdálenost mezi těmito body. Výstup programu pro zpracování je ukázán níže (Obrázek 39).

```
def azimuth_distance(lat_d,long_d,alt_d,lat_r,long_r,alt_r):
    satellite = AltAzimuthRange()
    satellite.target(lat_d,long_d,alt_d)
    satellite.observer(lat_r,long_r,alt_r)
    Azimuth_distance=satellite.calculate()
    return Azimuth_distance.get('azimuth'),\
           Azimuth_distance.get('elevation'),\
           Azimuth_distance.get('distance')
```

220.41	0.41	158.07	29733.098	175.10058	11.733148709924503	0.9186256286233622
220.4	0.39	160.07	32018.869	178.90722	11.874756018577672	0.9297125163928104
220.36	0.24	178.1	35251.519	192.11230	12.338627654122618	0.9660305059911682
220.36	0.23	180.1	37202.927	183.49804	11.86706333282077	0.9291102314935098
220.32	0.07	206.86	39234.321	184.41699	11.976254908096994	0.9376591881255563
220.32	0.06	208.44	35337.731	187.79394	12.150221554275996	0.9512795916213806
220.31	0.01	218.51	35396.154	185.50878	12.044319571979939	0.9429881877140146
220.31	0.01	219.11	32994.282	175.86230	11.771150137162522	0.9216008815455025
220.22	0.01	220.92	39802.789	192.72363	12.167774501221935	0.9526538678127978
220.19	0.01	220.88	33849.495	182.07812	11.983289718743423	0.938209965884544
219.82	0.01	220.38	34570.022	186.79785	12.088102722684793	0.9464161102038521
219.78	0.01	220.34	28600.829	181.71875	12.099842256023333	0.9473352357054098
219.42	0.01	220.11	31889.220	190.84863	12.384156465581317	0.9695951018282042
219.38	0.01	220.09	33082.524	179.21289	11.851451542692285	0.9278879346595333
219.04	0.0	219.97	36012.311	187.74804	12.100808397669296	0.9474108780158248
219.0	0.0	219.96	30987.294	174.03613	11.651806284057539	0.9122570707073967
218.61	0.0	219.94	27828.833	174.48730	11.763266571144804	0.9209836520218798
218.53	0.0	219.94	32027.096	181.63574	11.945240221773869	0.935230949429831

Obrázek 39 - Ukázka transformovaných hodnot

8.2 Program pro vizualizaci měření

Program pro vizualizaci měření (Program_vizualizace.py) vytváří z azimutu, elevace a naměřených amplitud, interpolovanou matici, která se následně graficky zobrazí. Interpolace byla zavedena z důvodu, kdy měření pomocí hlavního programu neprobíhá v přesných polohách. Měřené hodnoty tedy nejsou v přesných mřížkách a není možné zobrazovat například řezy vyzařovací charakteristiky v určité elevaci věrně. Pokud data jsou velmi hrubá, dají se zjemnit použitím klouzavého průměru. Pokud data obsahují pouze jediný řez vyzařovací charakteristiky, je zde metoda, která zobrazí pouze je, bez použití interpolačních metod. Program využívá tři přídatné knihovny. Knihovnu numpy, pro matematické funkce a práce s vektory, knihovnu matplotlib pro zobrazení grafu a knihovnu scipy pro importování funkcí interpolace.

vizualizace

V této metodě se načítají hodnoty z csv souboru generovaného programem pro zpracování měřených dat. Načítání probíhá stejným způsobem jako v předešlém programu.

zobrazení

V této metodě dochází k zobrazení naměřených interpolovaných hodnot. Jsou zde implementovány podmínky pro zaručení, že hodnoty azimutu a elevace jsou kladné.

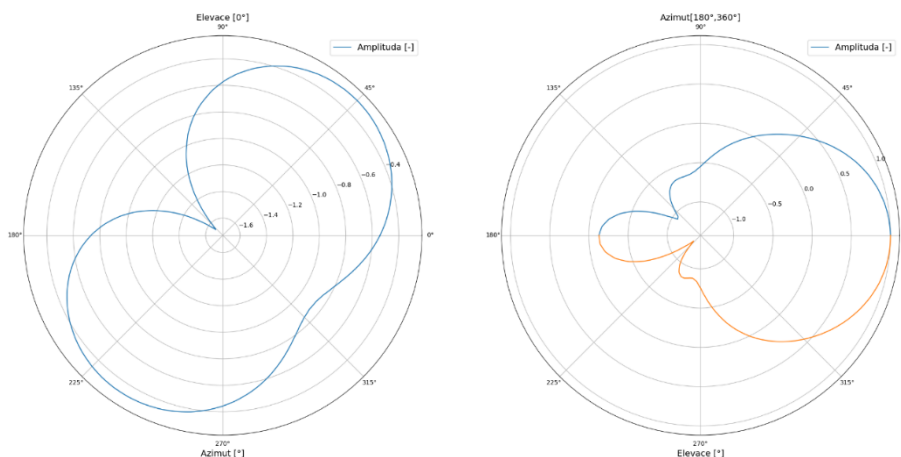
```
# hodnota azimax udava v jakych mezich se vykresli
charakteristika

azimin, elemin = min(azimuths), min(elevations)
if azimin < 0 :
    azimuths = list(map(lambda x: x+180, azimuths))
if elemin < 0:
    elevations = list(map(lambda x: x+90, elevations))
azimax = max(azimuths)
```

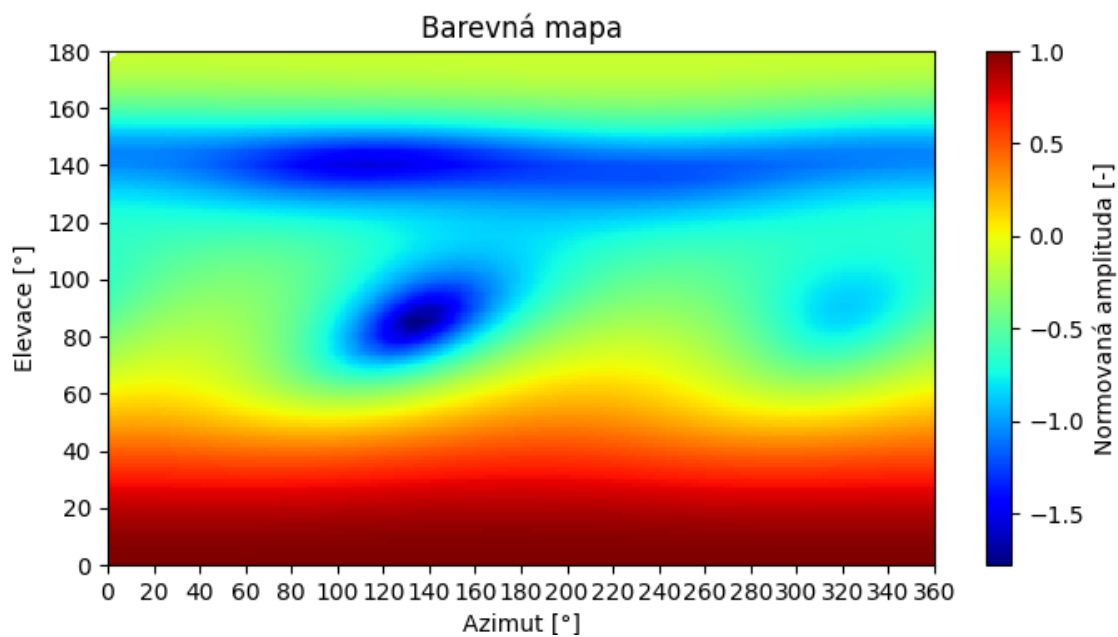
Poté zde je použita interpolace, která ze všech naměřených hodnot udělá matice velikosti 360x180 bodů.

```
xi = np.linspace(0, 180, 180)
yi = np.linspace(0, 360, 360)
xi, yi = np.meshgrid(xi, yi)
zi = griddata((azimuths, elevations),
              smoothed_amplitude_norms,
              (yi, xi), method='linear')
```

Následuje zobrazení řezu v elevaci, azimutu a zobrazení vyzářovací charakteristiky jako barevné mapy (Obrázek 40, Obrázek 41).



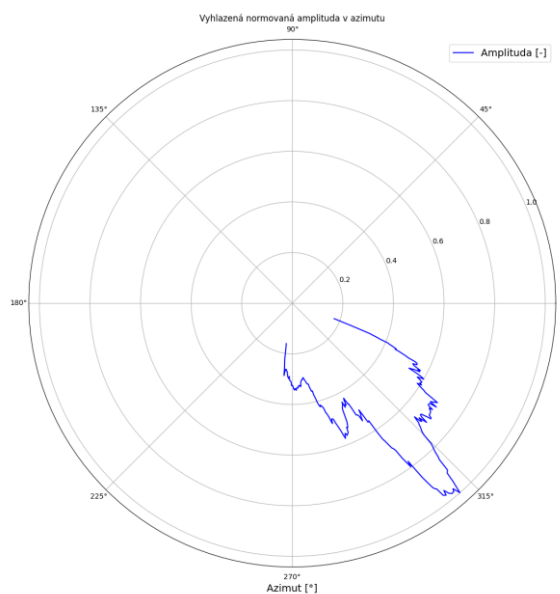
Obrázek 40 - Ukázka zobrazení naměřených hodnot



Obrázek 41 - Lineární zobrazení barevné 3D mapy

zobrazení_jednoho_rezu

V této metodě dochází k zobrazení naměřených hodnot, pro data, která obsahují pouze jeden řez vyzářovací charakteristiky. Je zde implementována podmínka, aby se zobrazil pouze graf pro daný řez (Obrázek 42).



Obrázek 42 - Zobrazení jednoho řezu

8.3 Program pro úpravu a zobrazení dat z testování funkčnosti řešení

Program `Program_uprava_vizualizace_testovacich_rezu.m`, načítá ze souboru vzdálenosti jednotlivých bodů měření mezi měřenou anténou a měřicí anténou, upraveného pomocí programu `Program_uprava_namerenych_hodnot.py`. Z těchto vzdáleností se najde minimum a vypočítá se vektor koeficientů kompenzujících vliv vzdálenosti.

```
hu2 = readmatrix('vertikalni_rez_upravene.csv');
distance = hu2(:,3);
mindist = min(distance);
distance_koef=distance/mindist;
```

Další část kódu načítá IQ data z neupraveného souboru, který vytvořil program `Program_merici_aparatura_prijem.py` a upraví je do podoby imaginárních čísel. Tyto čísla představují naměřený přijatý signál v každém měřeném časovém okamžiku. Ve for end cyklu je zde pro všechny naměřené časové okamžiky aplikována Fourierova transformace. Z té se zjistí hodnota maxima, která slouží pro zobrazení vyzařovací charakteristiky antény.

```
hu = readmatrix('vertikalni_rez_neupravene.csv');
dv = hu(:, 6:1029) + 1i * hu(:, 1030:end);
dvs = size(dv);
fft_signal_max = zeros(dvs(1), 1);
signal_fft3 = zeros(dvs(1), 1);

for i = 1:dvs(1)
    signal = dv(i, :);
    signal_fft3(i, :) = fftshift(fft(signal));
    signal_fft = fftshift(fft(signal));
    maximum=max(signal_fft); %*distance_koef
    fft_signal_max(i) = (10 * log10(abs(maximum)));
end
```

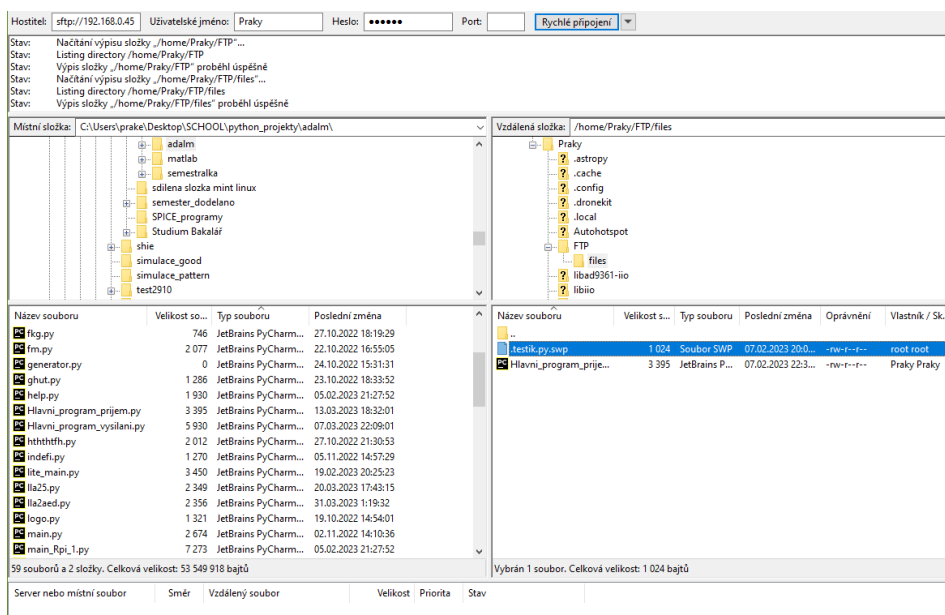
Ostatní části kódu slouží k vykreslení grafů a přidání zvýraznění minima a maxima do těchto grafů. K čitelnějšímu zobrazení hodnot je zde použit výběr maxima ze tří po sobě jdoucích prvků. Tato metoda byla využita na základě menšího počtu vzorků v celém měření a tři vzorky odpovídají změně úhlu o 1 stupeň, výběr z více vzorků by již významně zkreslil zobrazení výsledků.

```
n = length(dv);
max_values = zeros(1, ceil(n/3));
for i = 1:3:n
    end_idx = min(i+2, n);
    three_numbers = dv(i:end_idx);
    max_values((i+2)/3) = max(three_numbers);
end
```

9 Komunikace a ovládání měřící aparatury

Hlavní program (Program_merici_aparatura_prijem.py) pro měření běžící na jednodeskovém počítači je spouštěn v operačním systému Raspberry Pi OS Lite. Tento systém byl vybrán z důvodu, snížení náročnosti na výkon jednodeskového počítače a z důvodu kdy není potřeba k měření plně grafické prostředí. Byly do něj doinstalovány modifikace potřebné pro spouštění hlavního programu pyadi-iiio, pymavlink a libio.

Komunikace mezi jednodeskovým počítačem a osobním počítačem probíhá přes protokol ssh. V návrhu byly vytvořeny dva způsoby tohoto propojení. Prvním z nich je možnost komunikace přes lokální síť. Pro možnost navázání komunikace bez přístupu k zařízení vytvářející lokální síť jako je router, byla na jednodeskový počítač instalována aplikace, která vytvoří z jednodeskového počítače lokální hotspot. K vytvořenému hotspotu se následně připojí osobní počítač. Soubory jsou mezi jednotlivými počítači předávány za pomoci programu FileZilla (Obrázek 43). [32] [33]



Obrázek 43 - FileZilla [33]

10 Testování funkčnosti navrhovaného řešení

Po otestování jednotlivých funkcí a částí navrhovaného řešení v kontrolovaném prostředí, byl celý návrh testován v reálných podmínkách. Byly naměřeny a odzkoušeny dva řezy anténní vyzářovací charakteristiky, jeden horizontální řez a jeden vertikální řez.

10.1 Lokalita

Pro testování funkčnosti práce byla vybrána lokalita blízko Přelouče. Ve vybraných částech této lokality, nejsou žádná nadzemní vedení elektrického proudu znemožňující testování

a žádné překážky znemožňující přímou viditelnost. Omezení testování, které tato lokalita přinesla, bylo pouze jediné. Lokalita se nachází v MCTR LKPD (koncový řízený okrsek letiště Pardubice) a je zde omezena maximální letová výška na 100 m nad úroveň země. Testování probíhalo v menší výšce, než je 100 m a nebylo tedy ovlivněno tímto omezením.

Měřicí pracoviště osazené testovací anténou, bylo umístěno se souhlasem majitele na soukromé zahradě. Testovací lety probíhaly nad přilehlým plotem (Obrázek 44).



Obrázek 44 - Zobrazení lokace testování

10.2 Testování

Testování probíhalo v modu, kdy stacionární měřicí pracoviště vysílalo signál pomocí testované antény, aparatura připevněna ke kvadrokoptéře tento signál přijímala a ukládala. Zapojení měřicího pracoviště je ukázáno na následujícím obrázku (Obrázek 45). Anténa byla upevněna na stativu ve výšce 1.5 metrů nad zemí. Testování probíhalo na anténě Ridge Horn.

10.2.1 Postup testování

Měřicí aparatura připevněna ke kvadrokoptéře byla před letem zapnuta a nastavena. Na měřicím pracovišti, byl vytvořen letový plán, který byl následně do Pixracer nahrán. Poté byl spuštěn program `Program_merena_antena_vysilani.py` zajišťující vysílání na měřicím pracovišti a pomocí ssh zapnut program `Program_merici_aparatura_prijem.py`, na měřicí aparatuře připevněné ke kvadrokoptéře zajišťující příjem signálu. Kvadrokoptéra byla poté přesunuta na místo startu, kde následoval její vzlet (Obrázek 46). Po dosažení výšky 10 m nad zemí byl spuštěn režim autopilota, který vykonal uložený letový plán (Obrázek 47). Po vykonání mise, se s kvadrokoptérou bezpečně přistálo. Byla stažena naměřená data a na měřicím pracovišti proběhlo jejich následné zpracování do podoby výsledků.



Obrázek 45 - Nastavení měřicího pracoviště



Obrázek 46 - Vzlet kvadrokoptéry



Obrázek 47 - Let kvadrokoptéry

10.2.2 Letové plány

Z důvodu, že instalované vybavení bylo na hraně nosnosti použité kvadrokoptéry (viz. 10.4), byly pro testování navrženého řešení použity dva řezy v neúplném tvaru.

Realizovaný rozsah testovacích letů ověřil funkčnost navrženého řešení za použití vertikálního a horizontálního řezu. Jsou to nejjednodušší formy měření vyzářovací charakteristiky antény a poskytují dostatečné informace o tom, zda navržené řešení funguje správně či nikoliv.

Realizace neúplných řezů nezanesla při ověření funkčnosti konceptu chybu. Zásadní informací, zda navrhované řešení funguje bylo, že se signál začne zeslabovat, pokud se měřicí anténa na kvadrokoptéře, bude oddalovat od hlavního směru vyzářování, a ne jak vypadá úplná vyzářovací charakteristika antény.

Vertikální řez

Vertikální řez zobrazený (Obrázek 48, Obrázek 49), byl testován od -2 do 60 stupňů elevace vůči měřené anténě. Kvadrokoptéra vystoupala ze země do výšky 60 metrů. Azimut tohoto vertikálního řezu, byl 315 stupňů vzdálenost mezi měřenou a měřicí anténou byla v naměřeném maximum 36 metrů. Pro ostatní body byl kompenzován vliv vzdálenosti. Z důvodu povětrnostních podmínek a nízké přesnosti GPS použité na kvadrokoptéře, nemělo stoupání kvadrokoptéry přesný tvar přímky.



Obrázek 48 - Vertikální řez, pohled shora



Obrázek 49 - Vertikální řez, pohled ze strany

Horizontální řez

Horizontální řez (Obrázek 50, Obrázek 51), byl testován od 265 do 345 stupňů azimutu. Elevace tohoto měření byla rovna 14 stupňů vůči měřené anténě. Kvadrokoptéra vystoupala tedy 30 m nad zem. Vzdálenost mezi měřenou a měřící anténou byla 86 metrů. Elevace byla zvolena tak, aby kvadrokoptéra byla výše nad zemí a v případě chyb autopilota, bylo možné zareagovat a převzít kontrolu.



Obrázek 50 - Horizontální řez, pohled shora



Obrázek 51 - Horizontální řez, pohled ze strany

10.3 Výsledky

Pro oba řezy byl použit sinusový signál s frekvencí 100kHz vysílaný na frekvenci 2.45GHz. Z přijatého signálu se ukládají vektory 1024 komplexních vzorků, v jednotlivých okamžicích měření.

Naměřené výsledky byly upraveny programem `Hlavni_program_uprava_signalu.py`. Program `Program_uprava_vizualizace_testovacich_rezu.m` byl použit k normování naměřených hodnot vertikálního řezu, aby odpovídaly hodnotám naměřeným ve stejných vzdálenostech. Dále byl využit k zobrazení pomocných grafů (Obrázek 52 až Obrázek 66). Z naměřených dat byly dále ručně odstraněny vzorky neodpovídající fyzikálnímu chování antény způsobené interferencemi, které byly způsobeny měřením v testovacím pásmu ISM. Vzorky byly vyhodnoceny na základě pozorování normované vyzařovací charakteristiky. Běžné hodnoty normovaných amplitud vyzařovací charakteristiky se blíží k jedničce, jakmile se blíží k vzorku, který se při normování vybral za maximum. Protože však v naměřených datech byl chybný vzorek, po nanormování se hodnoty v okolí maxima pohybovali v řádu hodnot 0.2. Naměřený vzorek byl vymazán a charakteristika byla znovu nanormována, kdy již trend hodnot odpovídal předpokladům.

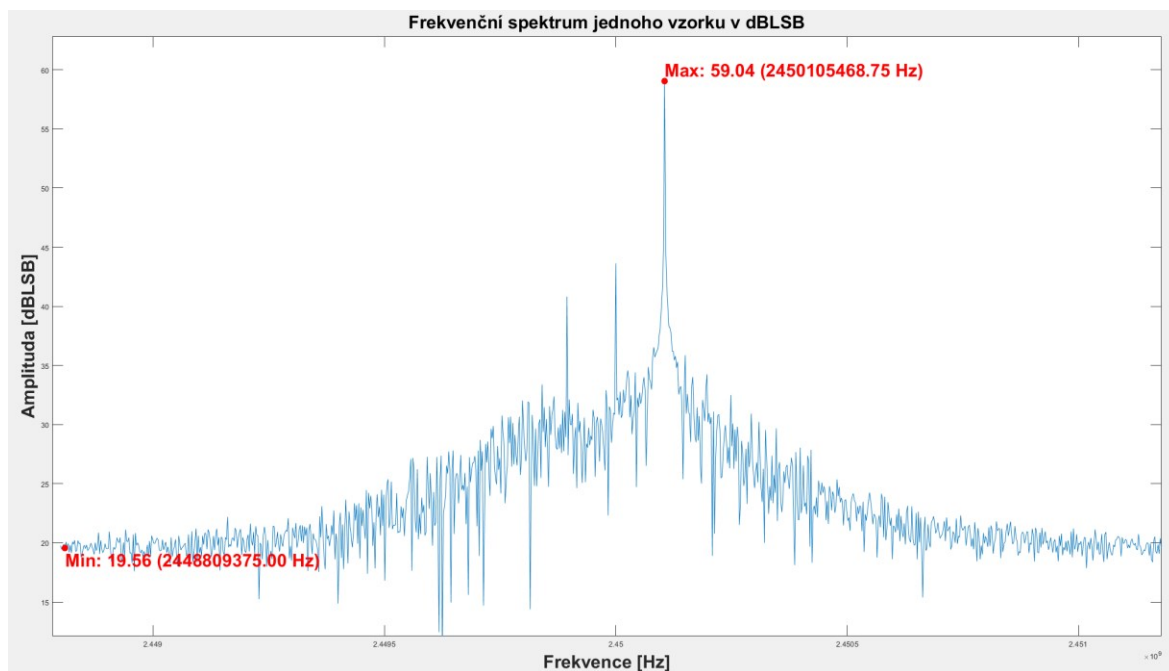
10.3.1 Vertikální řez

Frekvenční spektrum jednoho přijatého vzorku je vidět níže (Obrázek 52). Přijatý signál na frekvenci 2.45001GHz má amplitudu 59 dBLSB⁷. Jedná se o vzorek přijatý v místě maxima vyzařování měřené antény a ukazuje že měřicí aparatura skutečně přijala vysílaný signál. Ve spektru se dále objevuje stejnosměrná složka, na frekvenci 2.45GHz, kvůli použité modulaci, kdy signál je posunut o 100kHz a není zde potlačená nosná frekvence. Na velikost její amplitudy má vliv i SDR Adalm pluto, které se při přijetí silného signálu začíná zahlcovat a způsobuje tak její zesílení.

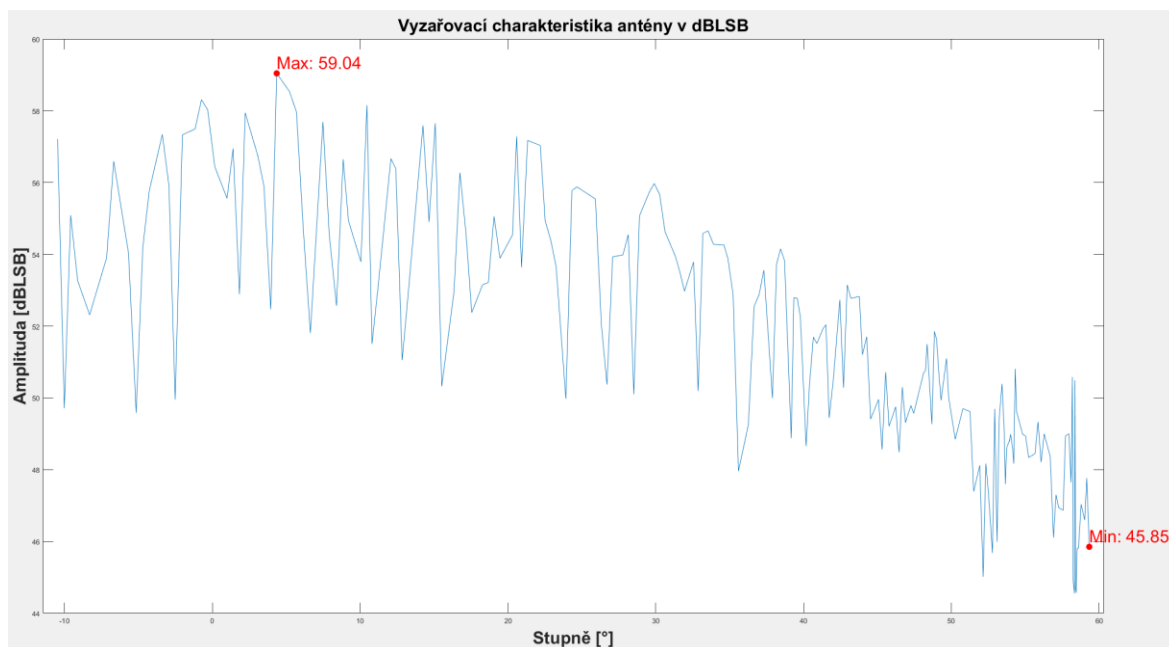
Naměřená vertikální vyzařovací charakteristika (Obrázek 53) ukazuje, jak se síla antény zvětšuje, když se kvadrokoptéra přibližuje k maximu v elevaci 4 stupňů, při vzletu ze země a pak klesá, jakmile se od maxima vzdaluje, ve výšce 60 m má vzorek přijatého signálu hodnotu 48 dBLSB. Vyzařovací charakteristika je tvořena z maxim jednotlivých vzorků, poskládaných, jak byly v čase naměřeny za sebou. Kvalitu naměřených hodnot ovlivnil přijatý šum a špatné nastavení Adalm pluto. Jak je vidět níže (Obrázek 54) Adalm pluto nevysílalo kontinuálně, proto jsou ve výsledcích vidět nepravidelné velké propady (Obrázek 53). Amplituda naměřených vzorků, zobrazených v lineárních jednotkách, v jednom časovém okamžiku (Obrázek 54), ukazuje příjem signálu, který je z části tlumený a z části nikoli. V tlumené části je stále přítomný přijímaný signál, což může být důsledek chyby navrhnutého programu pro příjem signálu.

⁷ dBLSB = Jednotka měření signálu vzhledem k nejméně významnému bitu naměřeného signálu.

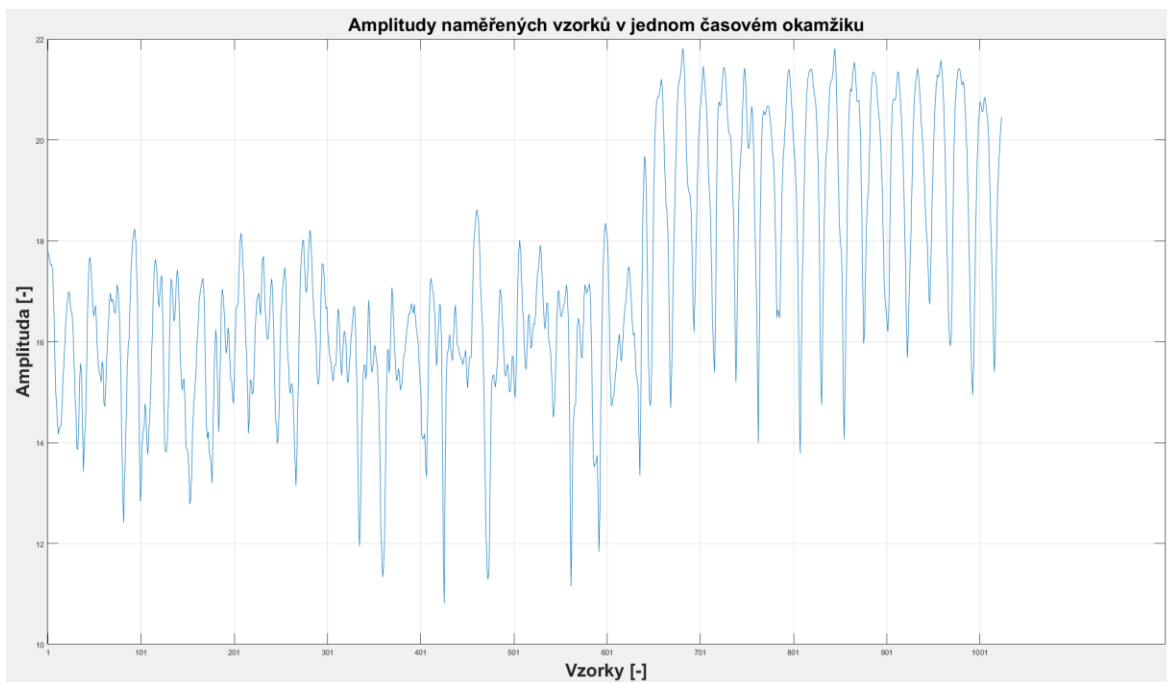
Tento program (Program_merici_aparatura_prijem.py), provádí čištění bufferu pouze před začátek měření, a ne v jeho průběhu. Pokud tedy Adalm pluto na vysílací straně nevysílá, může stále přijímač zaznamenat měřený signál. Pro lepší zobrazení výsledků byl signál vyhlazen, pomocí vybrání maximálních hodnot z třech po sobě jdoucích vzorků (Obrázek 55).



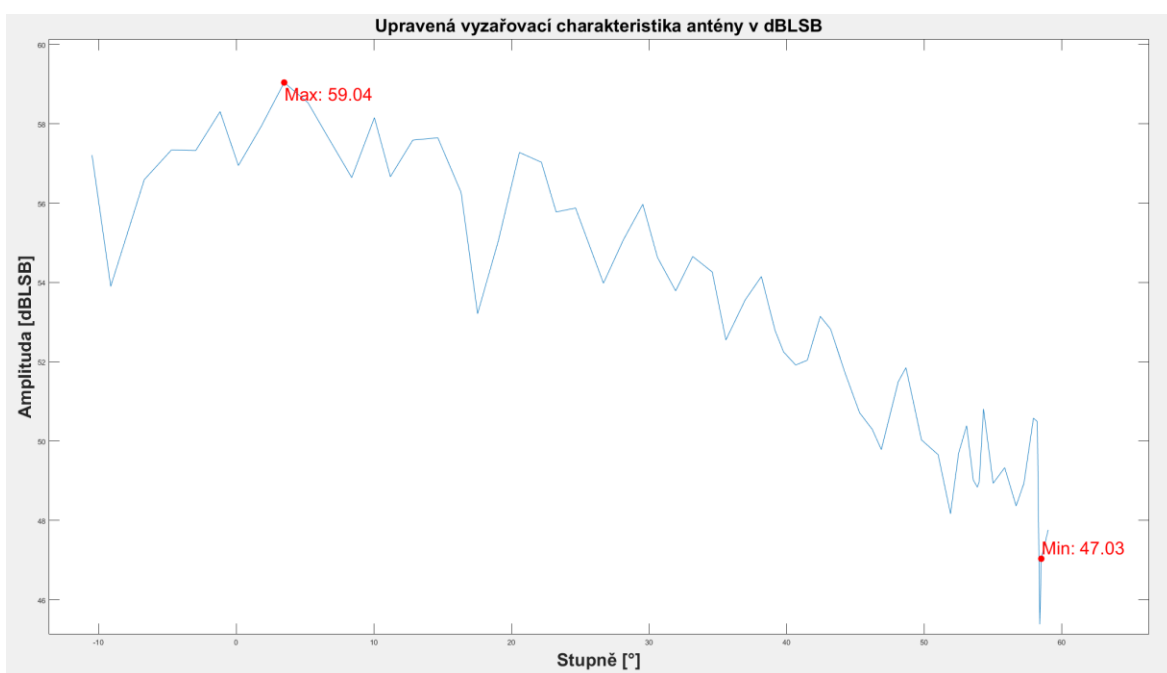
Obrázek 52 - Frekvenční spektrum jednoho přijatého vzorku vertikálního řezu



Obrázek 53 - Vertikální vyzařovací charakteristika antény

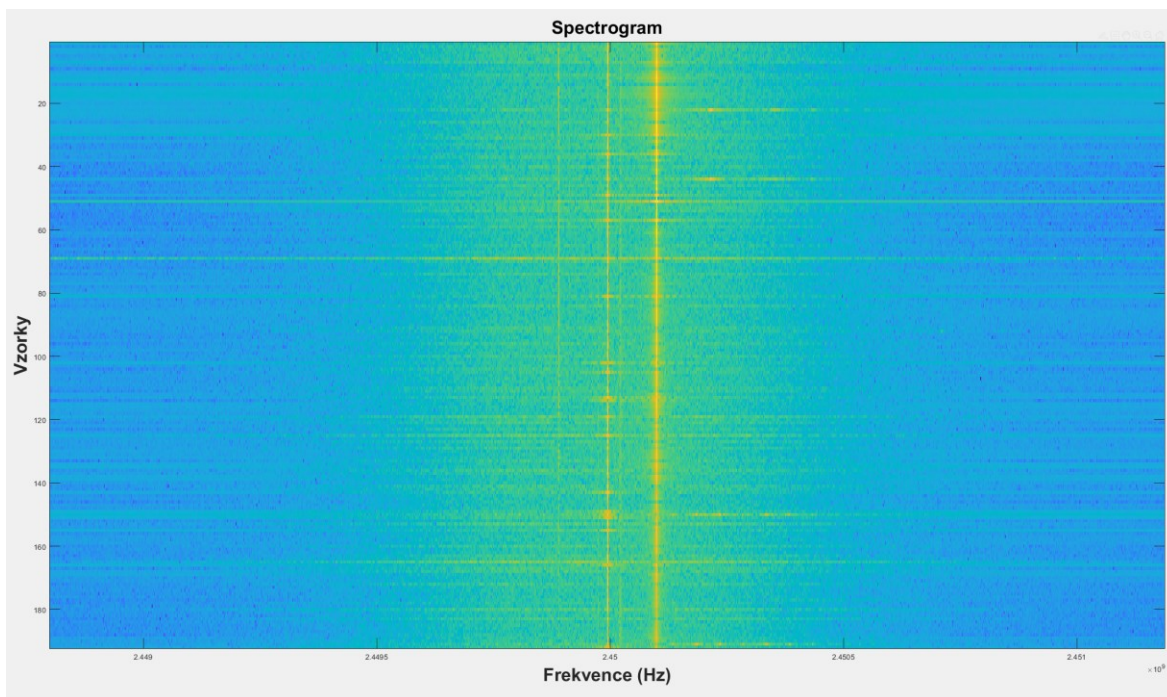


Obrázek 54 - Nestacionarita amplitudy v jednom časovém okamžiku



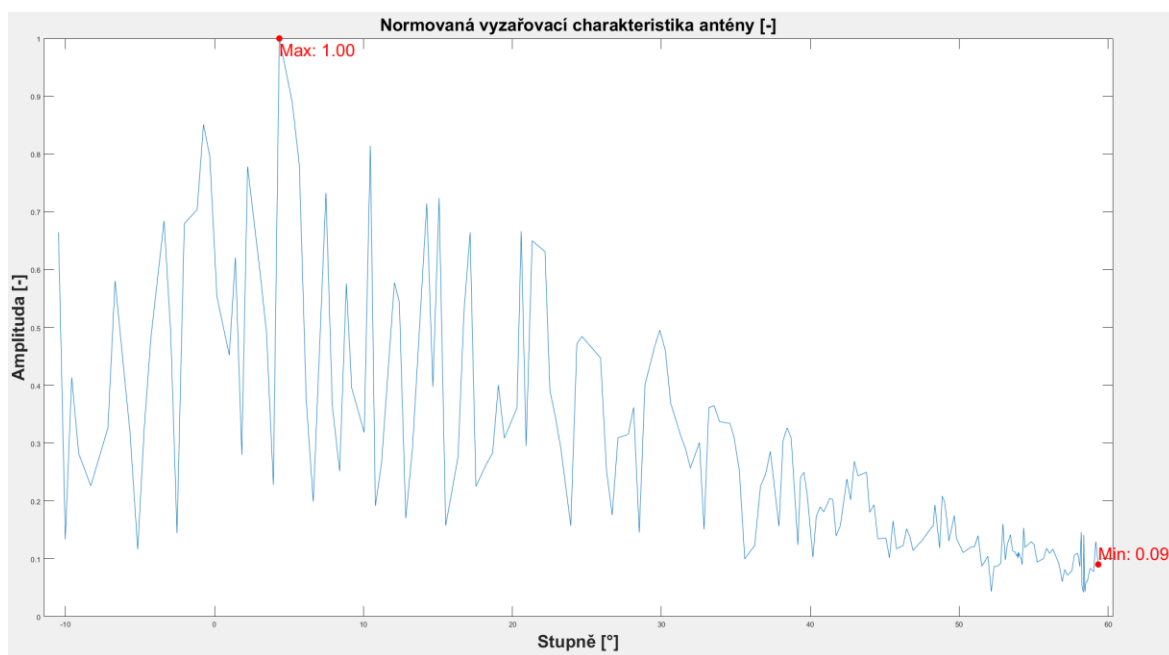
Obrázek 55 - Vertikální upravená vyzářovací charakteristika antény

Spektrogram (Obrázek 56) ukazuje že sin signál byl přijímán přes všechny vzorky v čase pouze s jinou intenzitou.

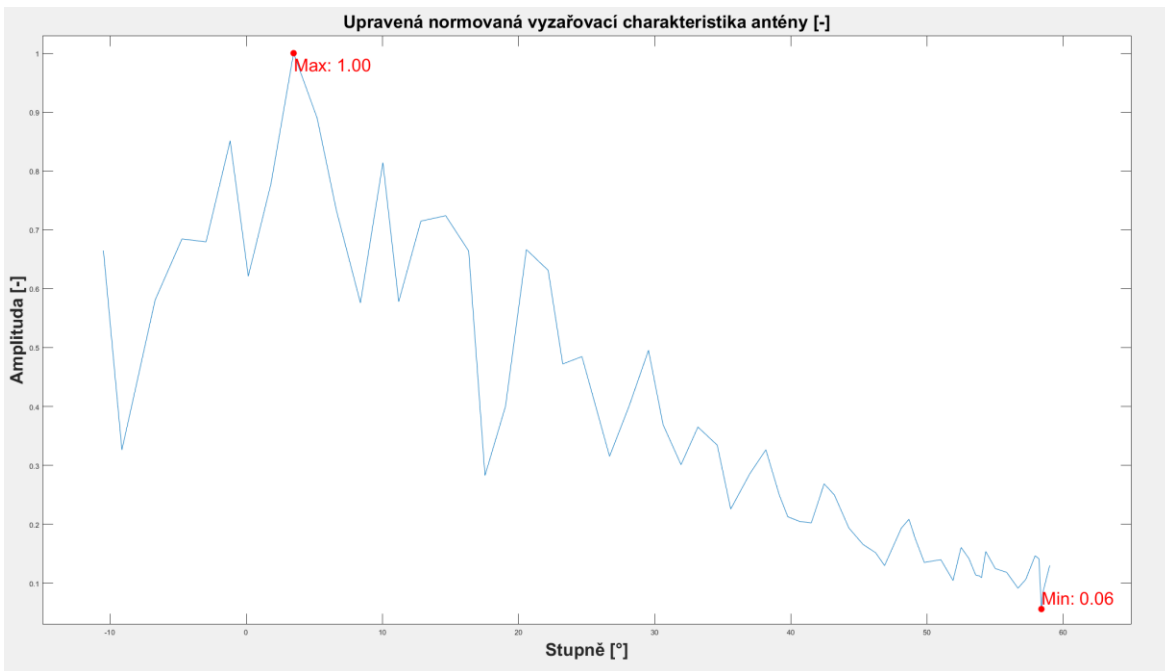


Obrázek 56 - Spektrogram vertikálního řezu

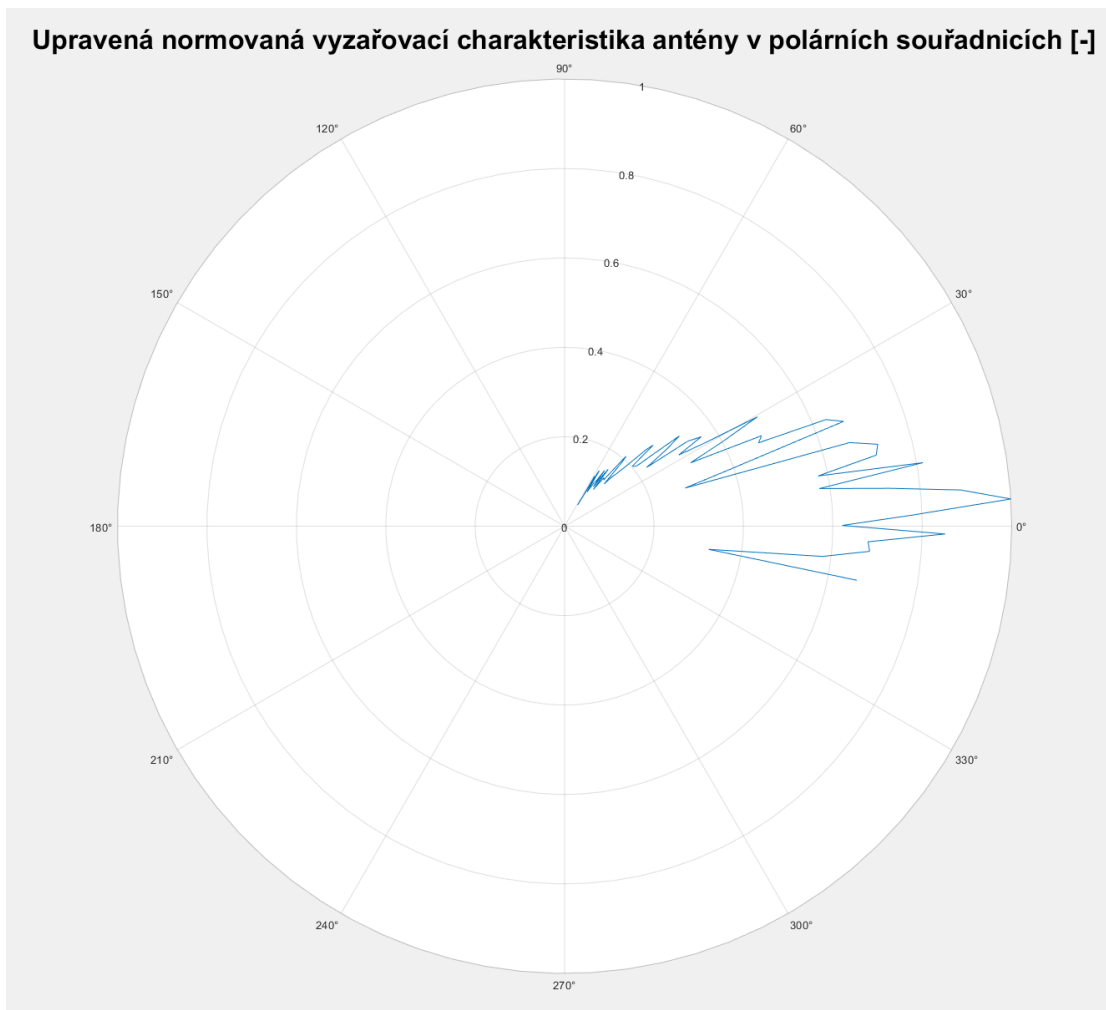
Na normované vyzařovací charakteristice (Obrázek 57, Obrázek 58, Obrázek 59) je lépe vidět, jak měřená anténa vysílá.



Obrázek 57 - Normovaná vertikální vyzařovací charakteristika antény



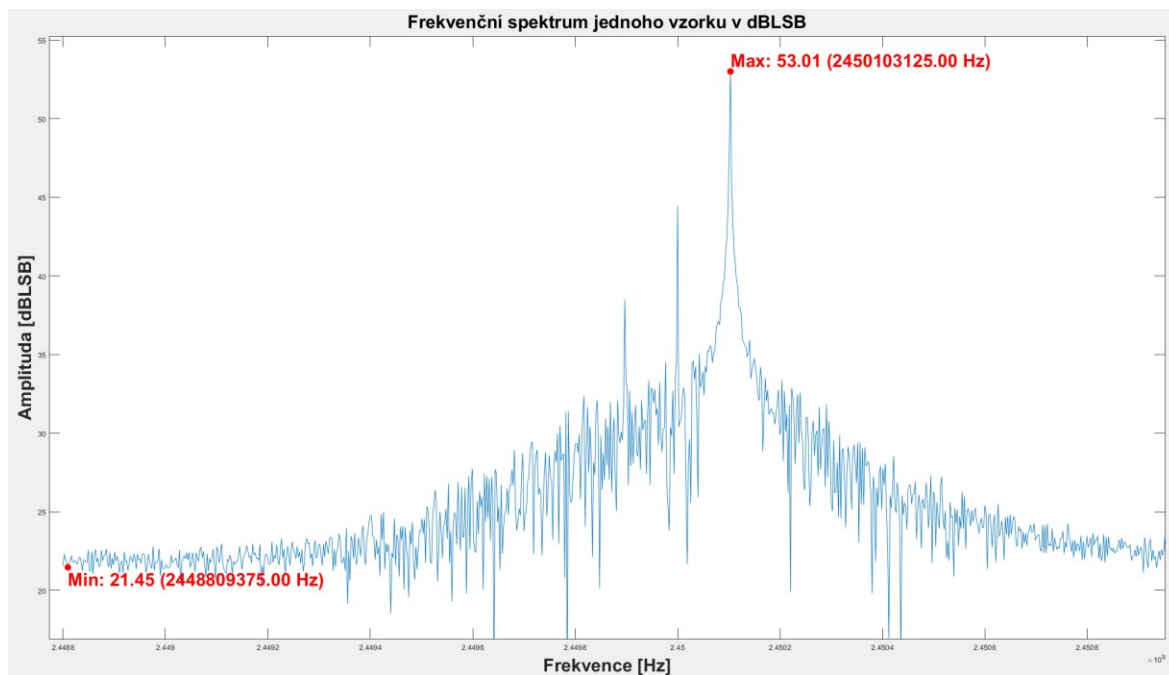
Obrázek 58 - Upravená normovaná vertikální vyzářovací charakteristika antény



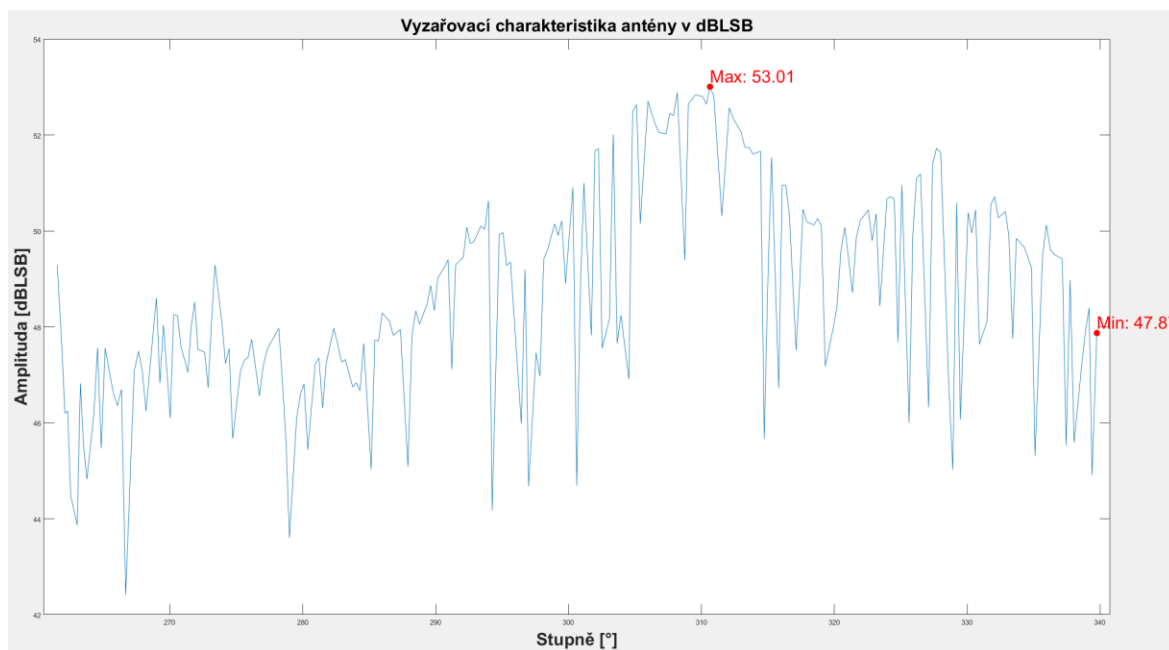
Obrázek 59 - Vertikální upravená anténní charakteristika v polárních souřadnicích

10.3.2 Horizontální řez

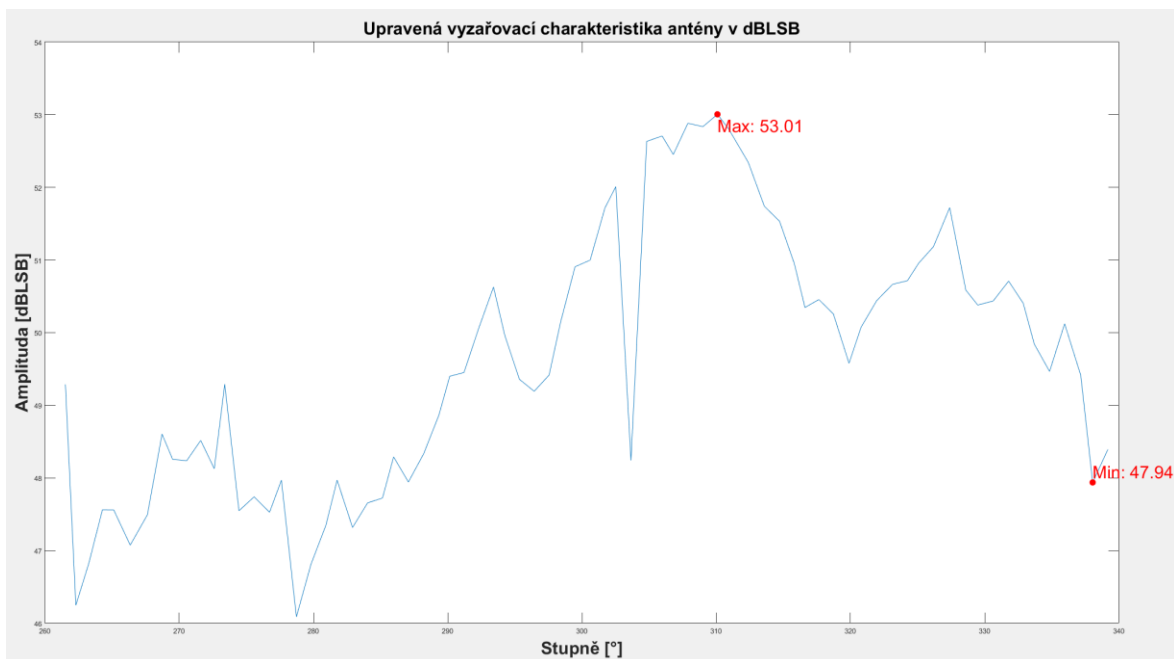
Z naměřené vyzářovací charakteristiky vyplývá že anténa v úhlu elevace 18 stupňů vyzářuje nejvíce do oblasti kolem 310 stupňů azimutu (Obrázek 66). V maximu má amplitudu rovnou 53 dBLSB (Obrázek 60 , Obrázek 61, Obrázek 62, Obrázek 64, Obrázek 65) a signál byl přijat přes všechny vzorky v čase (Obrázek 63).



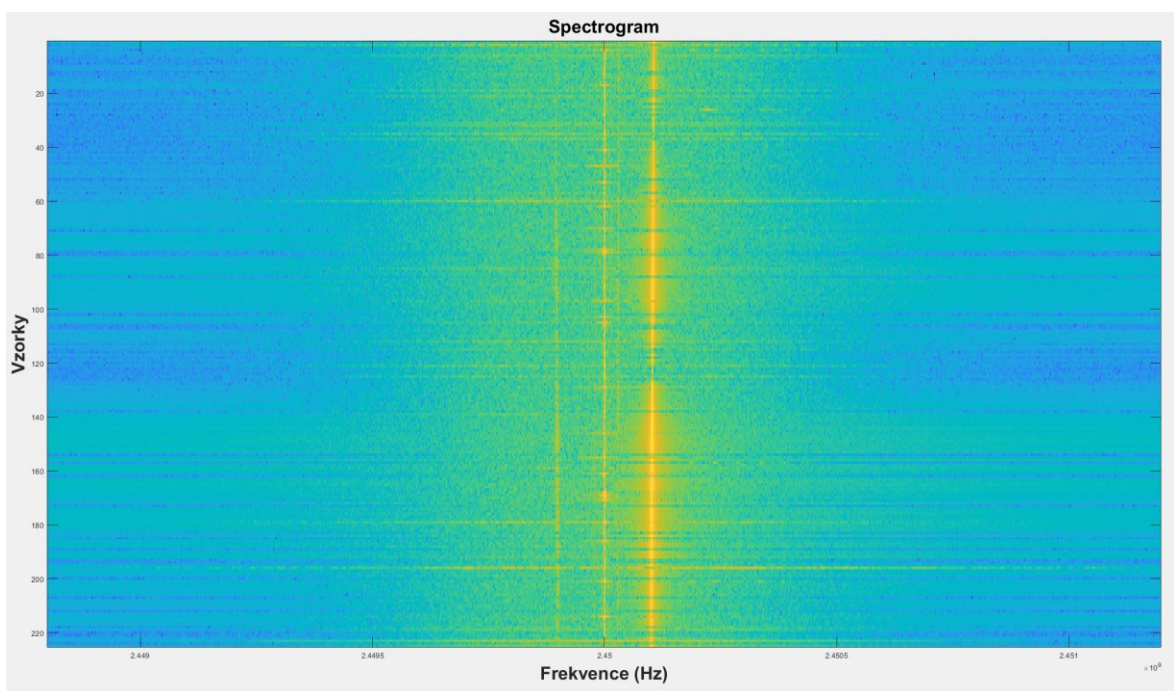
Obrázek 60 - Frekvenční spektrum jednoho přijatého vzorku horizontálního řezu



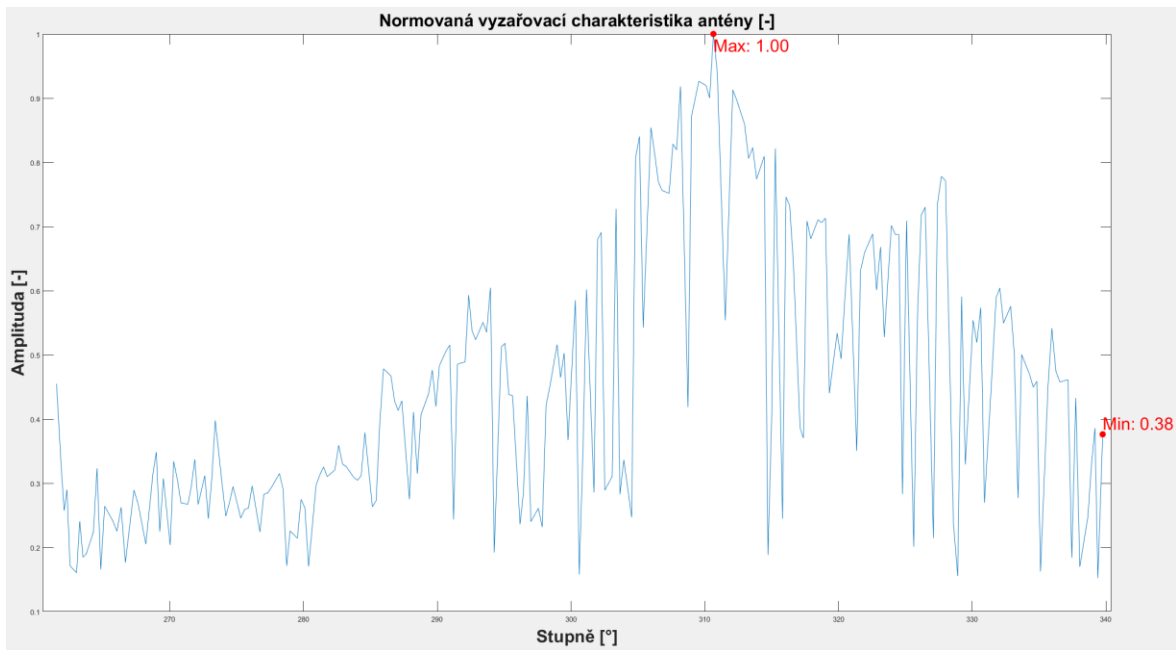
Obrázek 61 - Horizontální vyzářovací charakteristika antény



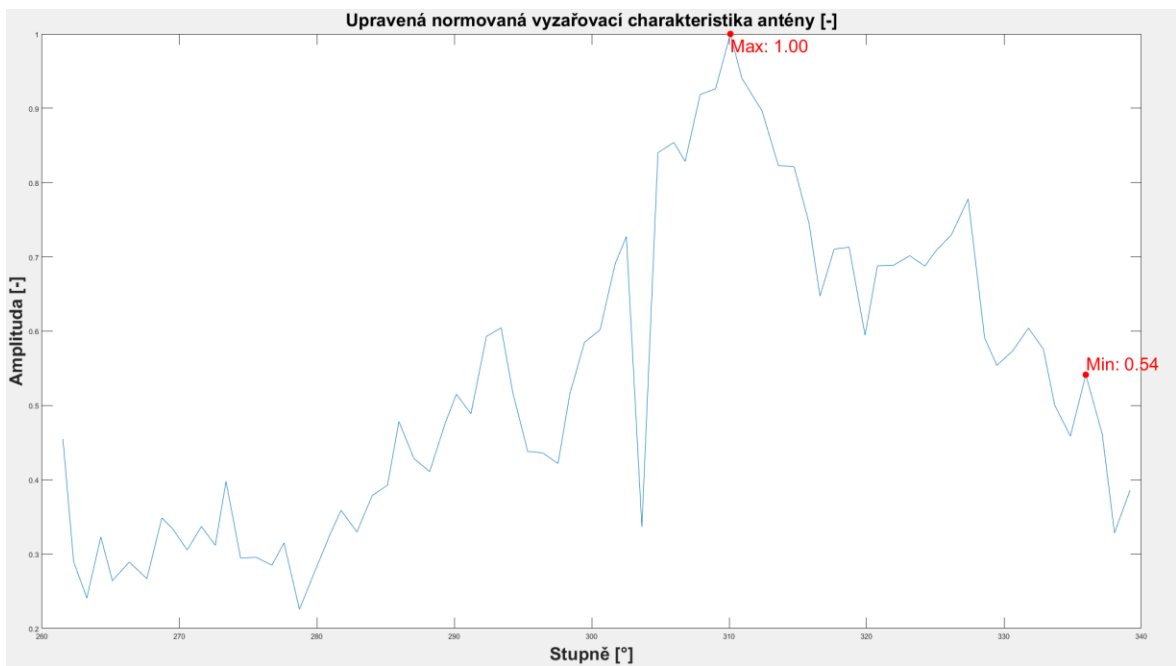
Obrázek 62 - Horizontální průměrovaná vyzářovací charakteristika antény



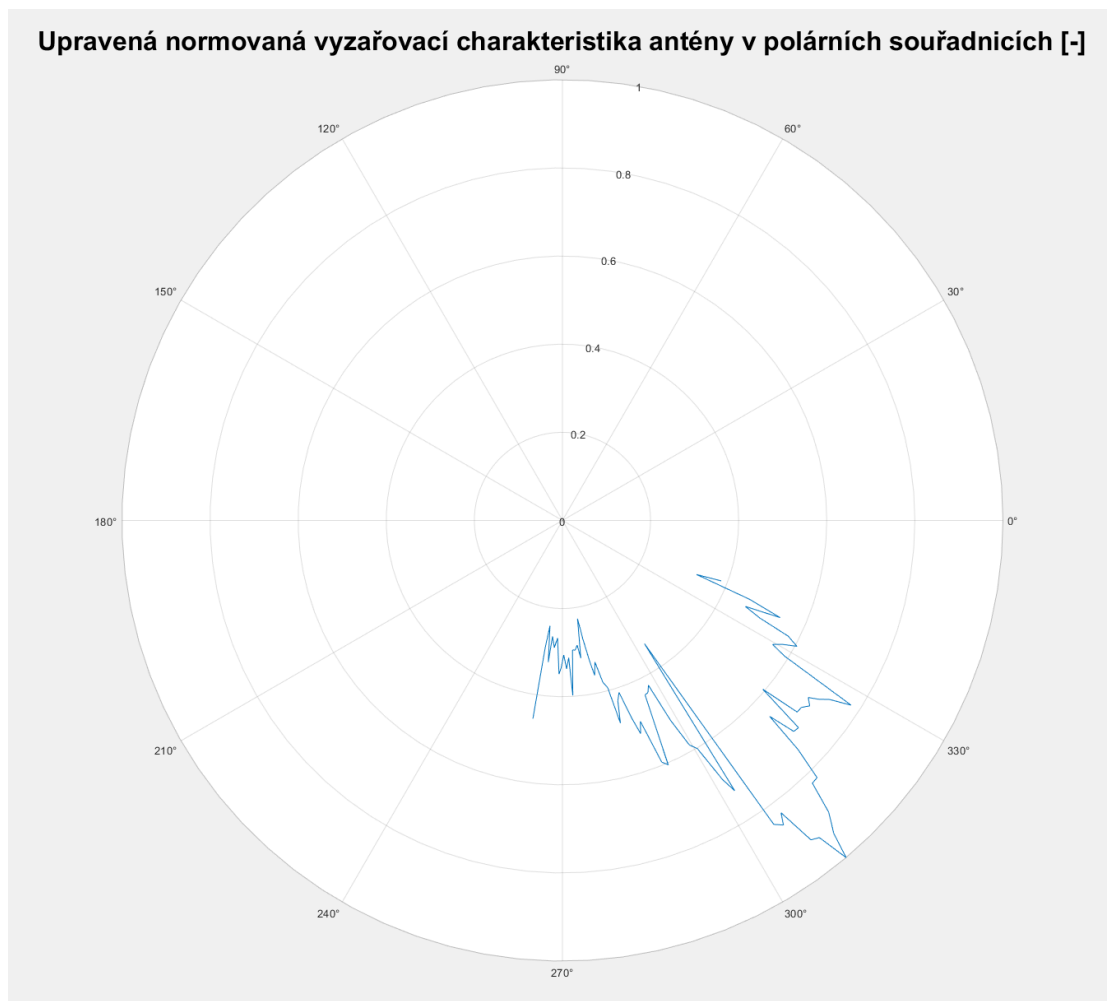
Obrázek 63 - Spektrogram horizontálního řezu



Obrázek 64 - Normovaná horizontální vyařovací charakteristika antény



Obrázek 65 - Průměrovaná normovaná horizontální vyařovací charakteristika antény



Obrázek 66 - Horizontální normovaná anténní charakteristika v polárních souřadnicích

10.4 Ověření měřicí aparatury

Výše schnuté výsledky prezentují funkčnost navrženého řešení. Sestavená měřicí aparatura je schopná měřit a ukládat úroveň elektrického pole i metadata (polohu) nezbytné pro vyhodnocení vyzářovacích diagramů antény. Použitá aparatura identifikovala faktory limitující realizaci a přesnost měření. Jednotlivé vlivy budou shrnuty v následujících oddílech.

10.4.1 Použitá platforma (kvadrokoptéra)

Z testování vyplynulo, že měřicí aparatura dokáže úspěšně komunikovat s autopilotem kvadrokoptéry (Ardupilot) a přijímat z ní GPS data. Při ověřování funkčnosti navrženého řešení bylo kladně ověřeno, že autopilot funguje podle předpokladů a dokáže úspěšně vykonávat zadané mise letu.

Z testování bylo dále zjištěno, že prvním faktorem limitující realizace jednotlivých měření způsobuje použité UAV, které mělo nosnost blízkou instalovanému vybavení.

Kvadrokořptěra byla tedy velmi citlivá na vliv větru. Pro snížení citlivosti na povětrnostní podmínky byly z kvadrokořptěry odstraněny nepodstatné části. Odstraněny byly spodní chrániče motorů, kamera a vysílač kamery. Po odstranění nadbytečné váhy, bylo možné s kvadrokořptěrou létat a testovat navrhované řešení. V průběhu testování však několikrát došlo ke ztrátě ovládaní a samovolnému pádu kvadrokořptěry. V důsledku rychlejšího manévru, či poryvu větru došlo k výpadku stabilizace, kvadrokořptěra neměla dostatečný vztlak se ve výšce udržet a následovalo tvrdé přistání. Navržená konstrukce byla schopna ochránit instalované vybavení i v případě těchto tvrdých přistání. Kvadrokořptěra tedy i po odlehčení létala se zatížením na hranici nosnosti a při vybití baterii se tato hranice snížila do kritických hodnot. Pro měřicí aparaturu by bylo vhodné využít kvadrokořptěru s vyšší nosností nebo pokud by to motory na kvadrokořptěře podporovali, zvýšit jejich výkon, nahrazením tříčlánkových Li-Po baterii, čtyřčlánkovými.

10.4.2 Určení polohy (GNSS/GPS)

Dalším faktorem byla chyba měření zanesená nepřesností použité GPS a špatně zvolenou vzdáleností měření. Měření probíhalo v bližší vzdálenosti než 300 m od měřené antény, do výsledků byla tedy zanesena chyba nepřesnosti při převodu lat, lon na úhel (viz. 3.1.2). Testování ukázalo, že chyba nepřesnosti GPS se projevuje nejvýrazněji při určení výšky nad zemí. Přesnost určení vertikální polohy je totiž ovlivněna viditelností pouze satelitů nad horizontem. Pro potlačení této chyby, by měla být použita GPS s modem RTK. Další možností je použití DGPS, které nezanáší nutnost úpravy měřicí aparatury a úprava dat pomocí diferencí se provádí až při zpracování výsledků měření.

10.4.3 Konfigurace SDR

Posledním faktorem, který zanesl chybu do měření je špatné nastavení Adalm pluto. Z důvodu špatného nastavení zesílení testovací antény a menší vzdálenosti došlo k tomu, že se přijímač na Adalm pluto začal zahlcovat. To se projevilo zesílením stejnosměrné složky na mezní frekvenci měření. V důsledku použití cyklu while místo proprietární funkce (tx_cyclic_buffer) v programu (Program_merena_antena_vysilani.py), vysílání neprobíhalo kontinuálně a společně s nevymazáváním hodnot bufferu po každém přijetí signálu v časovém oknu na straně vysílání, došlo ke zhoršení kvality výsledků a přidání nežádoucích propadů vyzařovací charakteristiky. Tyto chyby byly z programů odstraněny: Nové verze programů se již však nepodařilo otestovat při testovacím měření. Jejich funkčnost však byla otestována bez letového úsilí.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout, realizovat a otestovat aparaturu pro měření vyzařovacích charakteristik antén pomocí UAV. Základ byl postaven na platformě Adalm pluto a bylo využito kvadrokoptéry Hornet.

Teoretická část se zaměřila na nejdůležitější části měření vyzařovacích charakteristik antén a na legislativu provozu kvadrokoptéry.

Praktická část zobrazila navržené řešení, ukázala zapojení měřicí aparatury a byly zde vysvětleny nejdůležitější části kódu.

Návrh se podařilo splnit, z přidaných výsledků je vidět že aparatura dokáže změřit vyzařovací charakteristiku antény a uložit je ve formátu csv na SD kartu a programy vytvořené k úpravě, dokážou s těmito daty pracovat a upravovat je. Pro další vývoj a pro běžné využití dále navrhuji několik změn a vylepšení.

Platforma (kvadrokoptéra), která byla v návrhu použita, by měla být nahrazena za takovou, která má vyšší nosnost, aby se snížila její citlivost na vliv větru a vybíjení baterii. Pokud by měla být nadále využívána platforma typu Hornet, měla by být vyšetřena možnost využití silnějších baterií. Vyšší nosnost otevírá možnosti dalšího zpřesnění navržené měřicí aparatury, z důvodu, kdy bude možné přidat další měřicí komponenty do měřicího řetězce navržené aparatury.

Pro reálné využití doporučuji zahrnout do navrhovaného řešení GPS pracující v modu RTK. To zajistí vysokou přesnost měření polohy a otevře možnost vytvořit nastavbu na navržené řešení s cílem využití měřicí aparatury pro měření v blízké zóně.

Z testování navrženého řešení vyplývá, že SDR v podobě Adalm pluto v konfiguraci zapojení navržené měřicí soustavy funguje a je možné ho využít. V současné konfiguraci však je využitelný pouze do frekvence 6GHz. Pro další rozvoj navržené aparatury doporučuji zahrnout do měřicího řetězce místní oscilátor, zajišťující konverzi na vyšší kmitočty a případně další komponenty, které zlepší kvalitu přijatého a vyslaného signálu (filtry, zesilovače).

Pro uživatelský komfort při častém používání navrhovaného řešení doporučuji z programů vytvořit samostatné aplikace.

Literatura

- [1] Using Drones to Verify Antenna Performance. In: *Microwave Journal* [online]. Norwood(Massachusetts): Microwave Journal, 2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.microwavejournal.com/articles/39933-using-drones-to-verify-antenna-performance>
- [2] KUPČÁK, Dominik. *Antény radiolokátorů pro řízení letového provozu: Teoretické základy šíření a vyzařování elektromagnetických vln*. Pardubice, 1986.
- [3] VSWR & Return Loss – Explained. In: *Siretta Limited* [online]. Reading (United Kingdom): Siretta Limited, 2022 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.siretta.com/2022/10/vswr-return-loss-explained/>
- [4] *Reaktivní, blízká a vzdálená zóna antény* [online]. Brno, 2010 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26823. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [5] CAI, Zhanghua, Yantao ZHOU, Zibin WENG, Lie LIU, Francesco PAULIS a Yihong QI. Corrugated horn with stable phase center for Ka-band compact antenna test range measurement systems. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering* [online]. 2022, **32**(5), 2-3 [cit. 2023-01-29]. ISSN 1096-4290. Dostupné z: doi:10.1002/mmce.23092
- [6] KEAN, John. Antenna Radiation Pattern Measurement with a Drone. In: *CAVELL, MERTZ & ASSOCIATES, INC.* [online]. Manassas, Virginia: Cavell Mertz & Associates Inc., 2017 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: https://cavellmertz.com/wp-content/uploads/2018/03/N_428_20171012-Real-World-Results-for-a-Signal-Measurement-Drone.pdf
- [7] BEZPILOTNÍ SYSTÉMY: Školicí materiál ÚCL ve formě FAQ - nejčastěji kladených dotazů k problematice. In: *Úřad pro civilní letectví* [online]. Praha: Úřad pro civilní letectví, 2022 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: https://www.caa.cz/wp-content/uploads/2022/12/FAQ-DRONES_CS.pdf?cb=9fed2ca656703560382d2ecaafef3930
- [8] DronView. In: *DronView* [online]. Praha: Řízení letového provozu České republiky, 2016 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://dronview.rlp.cz/>
- [9] UAS.OPEN.010: MAXIMUM HEIGHT. In: *Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems* [online]. Cologne, Germany: EASA, 2022 [cit. 2023-03-26].

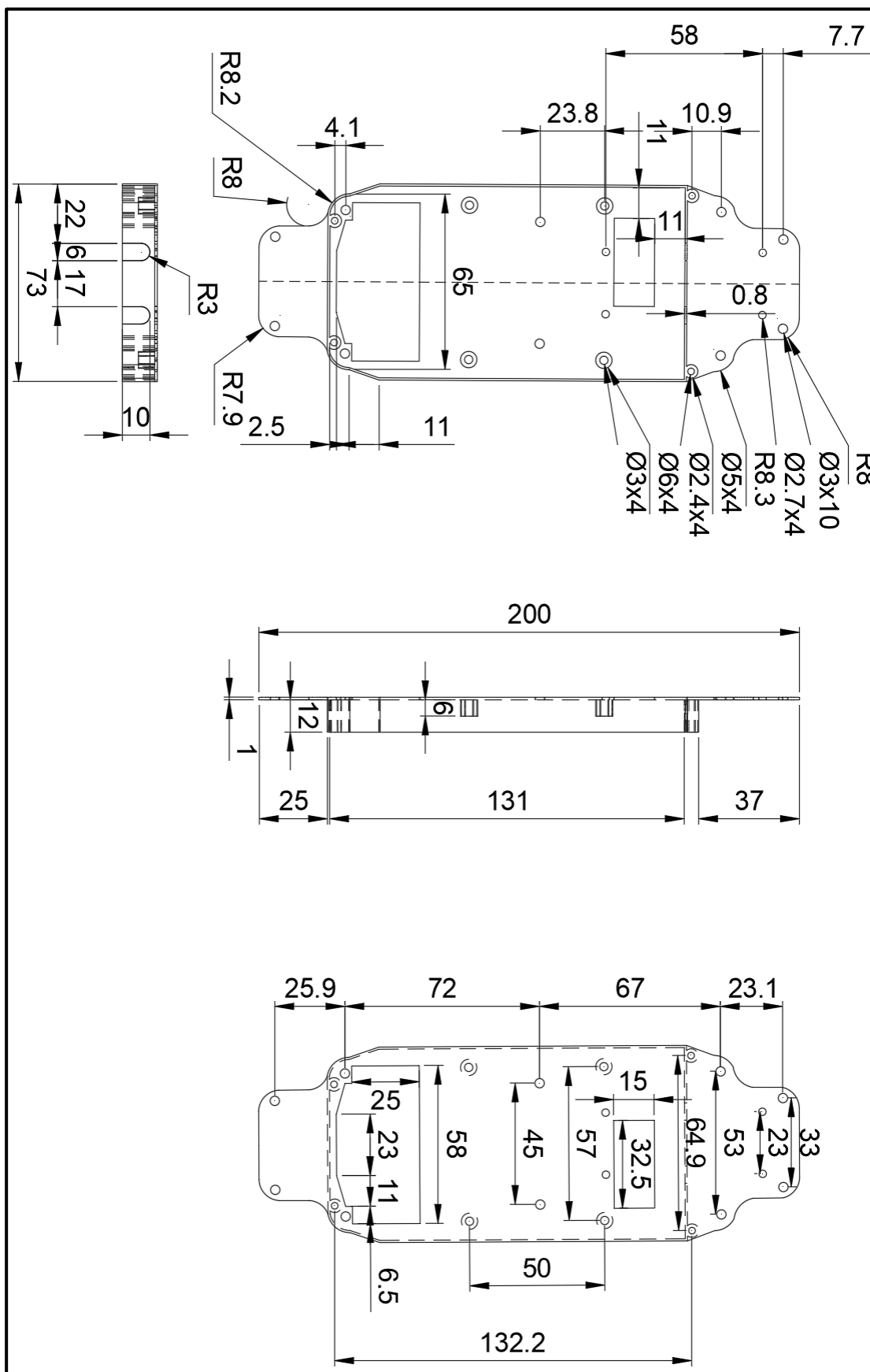
Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/online-publications/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems?page=5>

- [10] What Are The Benefits Of Tethered Drones?. In: *ELISTAIR* [online]. Stoughton (Massachusetts): ELISTAIR, 2020 [cit. 2022-06-23]. Dostupné z: <https://elistair.com/tethered-drones-benefits/>
- [11] What is GPS RTK?. In: *Sparkfun* [online]. Niwot, Colorado: SparkFun Electronics, 2022 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/what-is-gps-rtk/all>
- [12] BEZOUŠEK, Pavel a Pavel ŠEDIVÝ. *Radarová technika*. 1.11. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-3036-9.
- [13] KUPČÁK, Dominik. *Antény radiolokátorů pro řízení letového provozu: Základy techniky radiolokačních antén*. Pardubice, 1986.
- [14] FIGURE 5: Specific attenuation due to atmospheric gases. In: *Recommendation ITU-R P.676-11 (09/2016)* [online]. Geneva: International Telecommunication Union, 2016 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-11-201609-I!!PDF-E.pdf
- [15] Robodrone HORNET. In: *Robodrone* [online]. Brno: Robodrone Industries s.r.o., 2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.robodrone.com/index.php/drones/uav-hornet>
- [16] *Autodesk AutoCAD* [online]. San Francisco: Autodesk, 2023 [cit. 2023-06-04]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/autocad/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- [17] *GSM Antenna JCG401* [online]. Jiaxing, Zhejiang, China: JIAXING JINCHANG ELECTRONIC TECHNOLOGY CO., 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: https://wiki.analog.com/_media/university/tools/pluto/users/jcg401.pdf
- [18] ADALM-PLUTO Detailed Specifications. In: *Analog Devices Wiki* [online]. Wilmington (Massachusetts): One Analog Way, 2021 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: <https://wiki.analog.com/university/tools/pluto/devs/specs>
- [19] ADALM-PLUTO Prerequisites. In: *Analog Devices Wiki* [online]. Wilmington (Massachusetts): One Analog Way, 2019 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: <https://wiki.analog.com/university/tools/pluto/prerequisites>

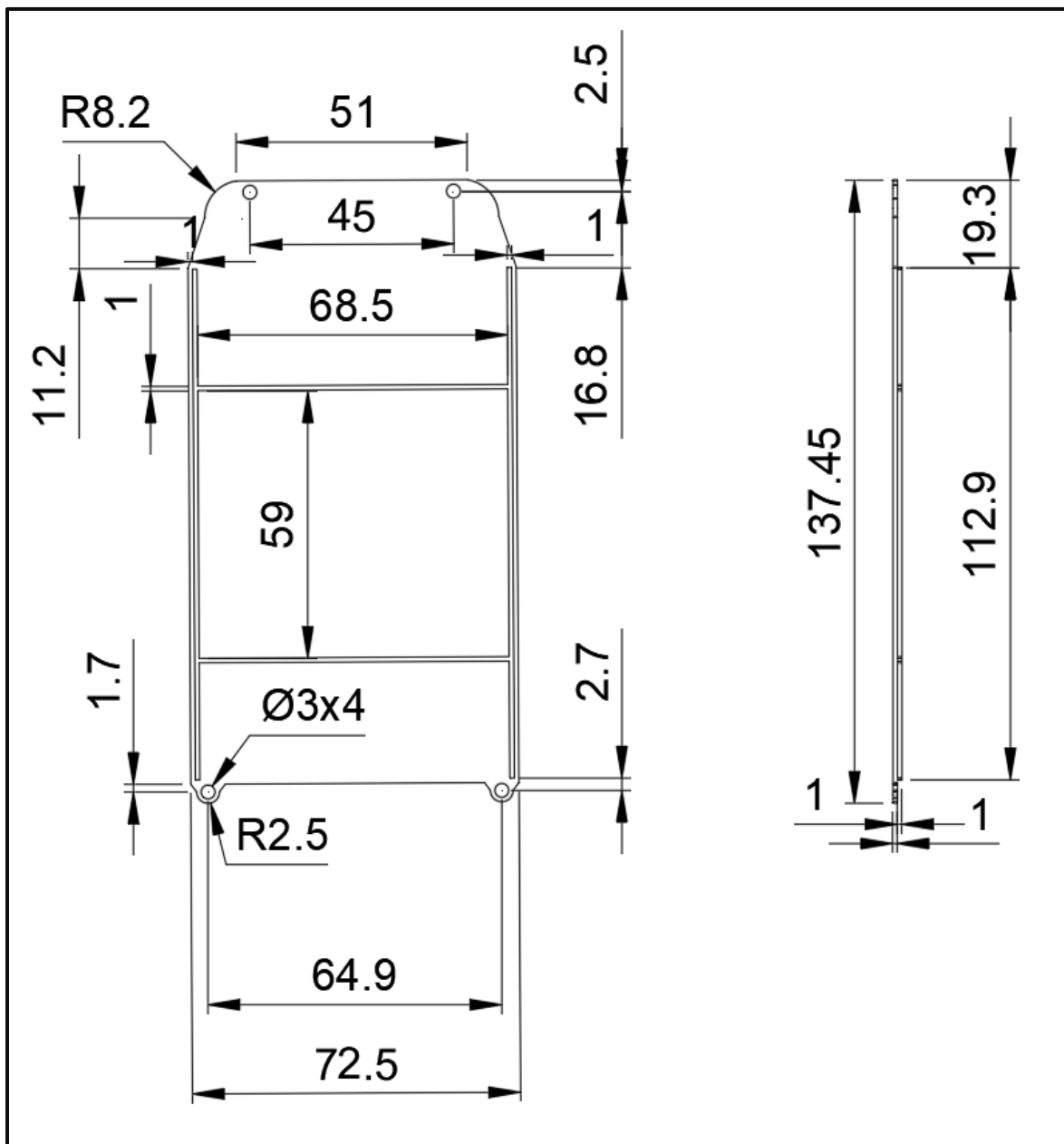
- [20] Raspberry Pi Zero 2 W. In: *Raspberry Pi* [online]. Cambridge: Raspberry Pi Foundation, 2021 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-zero-2-w/>
- [21] PX4 Autopilot. In: *GitHub* [online]. -: -, - [cit. 2023-08-08]. Dostupné z: <https://github.com/PX4>
- [22] MRo Pixracer. In: *PX4 Autopilot User Guide (main)* [online]. San Francisco: Dronecode Foundation, - [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: https://docs.px4.io/main/en/flight_controller/pixracer.html
- [23] ISM radio band. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-07-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/ISM_radio_band
- [24] BERNARD, Benjamin. Binary search for closest value in an array. In: *MATLAB Central File Exchange* [online]. Natick (Massachusetts): MathWorks, 2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/37915-binary-search-for-closest-value-in-an-array>
- [25] BEAUDUCEL, François. READHGT: Import/download NASA SRTM data files (.HGT). In: *MATLAB Central File Exchange* [online]. Natick (Massachusetts): MathWorks, 2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36379-readhgt-import-download-nasa-srtm-data-files-hgt>
- [26] CRAYMER, Mike. Geodetic Toolbox. In: *MATLAB Central File Exchange* [online]. Natick (Massachusetts): MathWorks, 2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/15285-geodetic-toolbox>
- [27] *NumPy* [online]. Austin (Texas): NumFOCUS, Inc., 2005 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <http://www.numpy.org/>
- [28] *Pyadi-iio* [online]. Wilmington (Massachusetts): One Analog Way, 2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://pypi.org/project/pyadi-iio/>
- [29] *Pymavlink* [online]. -: ArduPilot Dev Team, 2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://pypi.org/project/pymavlink/>
- [30] LICHTMAN, Marc. PlutoSDR in Python. In: *PySDR: A Guide to SDR and DSP using Python* [online]. -: -, - [cit. 2023-08-22]. Dostupné z: <https://pysdr.org/content/pluto.html>

- [31] *AltAzRange* [online]. -: Filip Tomczyk, 2020 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z:
<https://pypi.org/project/AltAzRange/>
- [32] Raspberry Pi Automatic Hotspot and Static Hotspot Installer. In: *Raspberry Connect* [online]. -: -, - [cit. 2023-04-02]. Dostupné z:
<https://www.raspberrypi.com/projects/65-raspberrypi-hotspot-accesspoints/183-raspberry-pi-automatic-hotspot-and-static-hotspot-installer>
- [33] *FileZilla®*, *the free FTP solution* [online]. -: -, - [cit. 2023-04-02]. Dostupné z:
<https://filezilla-project.org/>

Příloha A – Výkresová dokumentace ochranné konstrukce



Příloha B – Výkresová dokumentace víka ochranné konstrukce



Příloha C – Programy napsané v jazyku Matlab

bezpecnostni_otazky.m

draha_letu_dronu.m

confirm.m

vyska.m

getstring.m

getinteger.m

getfloat.m

Program_uprava_vizualizace_testovacich_rezu.m

Příloha D – Programy napsané v jazyku Python

Program_merena_antena_prijem.py

Program_merena_antena_vysilani.py

Program_merici_aparatura_prijem.py

Program_merici_aparatura_vysilani.py

Program_vizualizace.py

Program_uprava_namerenych_hodnot.py