

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIOENGINEERING

VNĚJŠÍ ČÁST PŘIJÍMACÍHO SYSTÉMU DRUŽICOVÝCH SIGNÁLŮ V PÁSMU UHF

EXTERNAL PART OF THE RECEIVING SYSTEM FOR UHF SATELLITE SIGNALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Sýkora

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Urbanec, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Jan Sýkora

ID: 195633

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Vnější část přijímacího systému družicových signálů v pásmu UHF

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s dostupnými designy všesměrových antén v pásmu UHF, vytvořte model antény a optimalizujte ji z hlediska napájení a minimalizace nulového příjmu v nadhlavníku. Navrhněte schéma zapojení předzesilovače, napájecích obvodů a výhybek s přenosem napájení a referenčního GPS signálu po jednom kabelu k přijímači. Vytvořte podklady pro výrobu desek plošných spojů.

Realizujte anténu s vnější jednotkou předzesilovače a napájecích obvodů. Optimalizujte mechanické řešení antény s ohledem na vyrobiteľnosť a použitie moderních metód 3D tisku. Měřením zjistíte parametry všech navržených obvodů, tedy směrové charakteristiky antény, polarizaci a přizpůsobení, u dalších obvodů pak přenos, šumové číslo. Činnost vytvořené vnější části ověřte příjmem reálných družicových signálů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Monteiro, A.: A Parasitic Lindenblad Antenna for 70cm. 2006 [cit. 2018-14-5]. Dostupné z:

<https://www.amsat.org/wordpress/wp-content/uploads/2014/01/70ParaLindy.pdf>

[2] Minicircuits: Ultra Linear Low Noise Monolithic Amplifier PGA-103. [cit. 2018-14-5]. Dostupné z:

<https://ww2.minicircuits.com/pdfs/PGA-103+.pdf>

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 4.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Urbanec, Ph.D.

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá všesměrovými anténami v pásmu UHF, zejména tedy parazitní anténou typu Lindenblad, která byla optimalizována z hlediska nulového příjmu v nadhlavníku a napájení. Dalším bodem této práce bylo navržení předzesilovače a napájecí části s výhybkami pro přenos signálu UHF, referenčního GPS signálu a napájení po jednom koaxiálním kabelu k přijímači. Mechanická část antény byla navržena s ohledem na vyrobiteľnost 3D tiskem. Finálním úkolem bylo ověřit funkčnost sestavy příjmem reálných družicových signálů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lindenblad, UHF, GPS, všesměrová, anténa, RHCP, družice, 3D tisk

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with omnidirectional antennas in the UHF band, especially Lindenblad's omnidirectional antenna and its nulls in the radiation pattern. The aim was to design a preamplifier, power supply circuit and bias tee with the transmission of power supply, UHF signal and reference GPS signal through single coaxial cable towards a receiver. A further requirement was to design a mechanical part of the antenna which holds it together with considering modern manufacturing processes - 3D print. The final task was the measurement of antenna's real parameters.

KEYWORDS

Lindenblad, UHF, GPS, omnidirectional, antenna, RHCP, satellite, 3D print

SÝKORA, Jan. *Vnější část přijímacího systému družicových signálů v pásmu UHF*. Brno, 2020, 65 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Urbanec, PhD.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Vnější část přijímacího systému družicových signálů v pásmu UHF“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Tomáši Urbancovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, velikou trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat mému bývalému kolegovi Jiřímu Myšíčkovi, za konzultace a tisk mechanické části antény. Také bych rád poděkoval všem v mém okolí, kteří mi byli nápomocni svými radami.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 10 |
| 1 Všesměrové antény v pásmu UHF | 11 |
| 1.1 UHF | 11 |
| 1.2 Všesměrové antény v UHF | 12 |
| 1.2.1 Půlvlnný dipól | 16 |
| 1.2.2 Turniketová anténa | 16 |
| 1.2.3 Prutová anténa | 18 |
| 1.2.4 Lindenbladova anténa | 18 |
| 2 Simulace | 21 |
| 2.1 Parazitní Lindenbladova anténa | 21 |
| 2.2 Optimalizace parametrů | 24 |
| 2.3 Porovnání | 29 |
| 3 Návrh výhybek s fantomovým napájením | 35 |
| 3.1 Návrh diplexeru | 35 |
| 3.2 Návrh předzesilovače | 36 |
| 3.3 Návrh výhybky pro fantomové napájení | 36 |
| 4 Návrh mechanické části antény | 42 |
| 4.1 Moderní výrobní postupy | 42 |
| 4.2 Návrh mechanické části antény | 43 |
| 4.3 Finální montáž a pájení DPS | 46 |
| 5 Měření parametrů | 50 |
| 5.1 Měření S11 | 50 |
| 5.2 Měření DPS | 52 |
| Závěr | 57 |
| Literatura | 58 |
| Seznam symbolů, veličin a zkratk | 61 |
| Seznam příloh | 63 |
| A Obsah přiloženého CD | 64 |

Seznam obrázků

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Směrovost dipólu | 14 |
| 1.2 | Kruhová polarizace | 15 |
| 1.3 | Půlvlnný dipól | 16 |
| 1.4 | Směr. char. dipólu | 17 |
| 1.5 | Turniketová anténa | 17 |
| 1.6 | Anténa typu Batwing | 18 |
| 1.7 | SKCUBE cubesat | 19 |
| 1.8 | Anténa typu Lindenblad | 20 |
| 2.1 | Model Parazitní Lindenbladovy antény | 21 |
| 2.2 | S11 Lindenbladovy antény | 22 |
| 2.3 | Směrovosti Lindenbladovy antény | 23 |
| 2.4 | Ladění S11 Lindenbladovy antény | 25 |
| 2.5 | Ladění zisku v nadhlavníku | 26 |
| 2.6 | Ladění nadhlavníku S11 | 27 |
| 2.7 | Ladění AR | 28 |
| 2.8 | Ladění nadhlavníku S11 | 30 |
| 2.9 | Srovnání zisku antén | 31 |
| 2.10 | Ladění nadhlavníku S11 | 32 |
| 2.11 | AR porovnání, příklonná strana | 33 |
| 2.12 | AR porovnání, strana odklonu | 34 |
| 3.1 | UHF/VHF diplexer | 35 |
| 3.2 | Schéma diplexeru | 36 |
| 3.3 | Přenos diplexeru | 37 |
| 3.4 | Schéma předzesilovače | 39 |
| 3.5 | Schéma zapojení Rx diplexeru | 40 |
| 3.6 | DPS LNA a Rx diplexeru | 41 |
| 4.1 | Příklad 3D tiskárny | 42 |
| 4.2 | Mechanická část | 44 |
| 4.3 | Mechanismus držáků direktorů | 45 |
| 4.4 | Spodní centrální díl | 45 |
| 4.5 | Detail úložného mechanismu | 46 |
| 4.6 | DPS LNA | 47 |
| 4.7 | DPS DC části diplexeru | 47 |
| 4.8 | Příprava koax. kabelu | 48 |
| 4.9 | Složená anténa | 49 |
| 5.1 | S11 rozladěné | 50 |
| 5.2 | Koax. kabel upraven | 51 |

| | | |
|------|--------------------------------|----|
| 5.3 | Porovnání S11 hodnot | 51 |
| 5.4 | Měření Rx diplexeru | 53 |
| 5.5 | Měření Rx diplexeru | 53 |
| 5.6 | Měření LNA diplexeru | 54 |
| 5.7 | Měření LNA diplexeru | 54 |
| 5.8 | Měření PGA103+ | 55 |
| 5.9 | Měření celé soustavy | 55 |
| 5.10 | Měření celé soustavy | 56 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Tabulka frekvenčních pásem dle IEEE | 12 |
| 2.1 | Tabulka rozměrů antény typu Lindenblad | 21 |
| 2.2 | Tabulka rozměrů optimalizované antény. | 29 |

Úvod

Jednou z nejdůležitějších schopností, kterou si člověk postupem času svého vývoje osvojil, je komunikace. Přenos nějaké informace mezi dvěma subjekty. Dnes jsme schopni komunikovat v reálném čase s příbuznými na opačné straně planety, dívat se na španělskou telenovelu na Kamčatce, či komunikovat s astronauty na ISS a to zejména díky optickým a družicovým sítím. K rozvoji těchto sítí vedly stále vyšší nároky na rychlost a kvalitu přenosu dat a stále se zvyšující počet uživatelů, který raketově roste každým rokem. V pásmu UHF roste každoročně množství amatérských nanosatelitů - cubesatů, zejména díky zlevňování ceny výnosu nákladu na orbity, kdy se stává vesmírný výzkum čím dál více dostupný. Jsou zde zastoupeny i výzkumné instituce z České a Slovenské republiky, např. 1U cubesaty Lucky-7 a SKCUBE.

První část této práce se zabývá všesměrovými anténami v pásmu UHF, zejména Lindenbladovou anténou, která byla optimalizována z hlediska napájení a nulového příjmu v nadhlavníku.

V druhé části se nacházejí simulace Lindenbladovy antény v programu HFSS, ladění anténních parametrů pro pásmo 70 cm a následné porovnání s předlohou.

Třetí část práce pojednává o návrhu předzesilovače a napájecích prvků s výhybkami pro přenos UHF, GPS a fantomovým napájením po jednom kabelu k přijímači.

Ve čtvrté části je popsán návrh mechanické části antény s ohledem na její výrobitelnost pomocí 3D tisku, jednoduchost a robustnost.

1 Všesměrové antény v pásmu UHF

1.1 UHF

Svět, jaký známe dnes, by nebyl na takové technologické úrovni, kdybychom nebyli schopni rychle a na velké vzdálenosti komunikovat s okolním světem. Za první moderní metodu přenosu informací může být považován elektrický telegraf. Velký rozvoj v oblasti bezdrátových technologií umožnil komunikaci na velmi velké vzdálenosti např. komunikaci mezi kontinenty v reálném čase, nebo s družicemi na vesmírných orbitách (poziční systémy GPS, Galileo), které jsou denně využívány milióny uživatelů. Rover Curiosity či sonda Insight na Marsu jsou také důkazem pokroku a vývoje bezdrátových technologií, kdy je možné jim zasílat instrukce a zpět přijímat vědecká data na vzdálenost ~ 0.36 AU (53 855 233 km) [1][2][3].

Bezdrátová komunikace využívá kmitání elektromagnetických vln vybuzených vysílačem (Tx) a přijímaných přijímačem (Rx), které jsou popsány určitými fyzikálními veličinami např.:

- Intenzita elektrického pole E [V/m]
- Intenzita magnetického pole H [A/m]

Tyto fyzikální veličiny a jejich časové průběhy jsou definovány matematickými vztahy, například délka elektromagnetické vlny popsána rovnicí 1.1 [4].

$$\lambda = \frac{c}{f} [m], \quad (1.1)$$

kde λ je vlnová délka, c rychlost šíření elmag. vlny ve vakuu, f je frekvence. Rychlost elmag. vlny je závislá na prostředí, kterým se šíří. Pokud se šíří hmotným prostředím, bude rychlost vždy menší než rychlost světla ($\sim 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), viz rovnice 1.2

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r} f} [m], \quad (1.2)$$

kde ϵ_r je permitivita prostředí, μ_r je permeabilita prostředí. Vliv prostoru mezi vysílačem a přijímačem není zanedbatelný a může mít velký vliv na kvalitu spojení, zejména atmosférické počasí nebo členitost terénu. Spodní část atmosféry, troposféra zeslabuje rádiové signály, způsobené absorpcí plynů a vodních par v atmosféře. Toto zeslabení je frekvenčně závislé a roste se zvyšující se frekvencí a vzdáleností. Naopak se snižuje se vzrůstající elevací a výškou. Dalším nežádoucím jevem je atmosférická refrakce - ohyb vlny od přímého směru mezi Tx a Rx při průchodu mezi různými prostředími. UHF disponuje malým atmosférickým útlumem, a proto hraje důležitou roli ve středně-dlouhé bezdrátové komunikaci. Bohužel i přes rozsáhlý vývoj v komunikačních službách může být UHF rušeno GSM signály [5][6][7]. Jednotlivá pásma rozdělená dle IEEE (Instituce elektrotechnických inženýrů) jsou přehledně

Tab. 1.1: Tabulka frekvenčních pásem dle IEEE, převzato z[8]

| Název pásma | Frekvenční pásmo |
|----------------|----------------------|
| HF | 3 - 30 MHz |
| VHF | 30 - 300 MHz |
| UHF | 300 - 1000MHz |
| L | 1 - 2 GHz |
| S | 2 - 4 GHz |
| C | 4 - 8 GHz |
| X | 8 - 12 GHz |
| K _u | 12 - 18 GHz |
| K | 18 - 27 GHz |
| K _a | 27 - 40 GHz |
| V | 40 - 75 GHz |
| W | 75 - 110 GHz |
| mm | 110 - 300 GHz |

sepsána v tabulce 1.1 [8]. Pásmu UHF náleží kmitočty mezi 300 MHz - 1 GHz, tedy pásmo decimetrových vln. Toto pásmo je využíváno širokou paletou uživatelů např. systém ILS (přesný přistávací systém), systém EPIRB (určení polohy při tísňové události), systém PPDR (složky IZS), dále slouží pro televizní a telefonní vysílání, satelitní komunikaci, vojenské účely, radary GPR (snímání povrchu Země) a také pro amatérské družicové aplikace [9]. Tato bakalářská práce se věnuje zejména těmto amatérským aplikacím v pásmu 70 cm.

1.2 Všesměrové antény v UHF

Anténa je zařízení, či součást komunikačního řetězce, které mění přivedený střídavý proud na elmag. vlnění a naopak. Anténa je tedy reciproční a může přijímat i vysílat. Mezi hlavní parametry antény patří impedance, zisk, směrovost, polarizace a šířka pásma. Impedance antény - Z je důležitým parametrem antény. Pokud se impedance zdroje a antény liší, vznikají na anténě zpětné odrazy směrem k vysílači, které mají za následek zhoršení PSV (poměr stojatých vln) a snížení přenosu energie. Z toho důvodu se antény přizpůsobují impedančně a výkonově. Komplexní impedance antény Z_a a zdroje Z_s jsou popsány rovnicemi 1.3 a 1.4.

$$Z_a = R_a + j \cdot X_a [\Omega], \quad (1.3)$$

$$Z_s = R_s + j \cdot X_s [\Omega], \quad (1.4)$$

kde R_a a R_s je reálný odpor, X_a a X_s jsou imaginární reaktance. Činitelé odrazu Γ_a a Γ_s jsou definovány:

$$\Gamma_a = \frac{Z_a - Z_s}{Z_a + Z_s} [-] \quad (1.5)$$

$$\Gamma_s = \frac{Z_s - Z_a}{Z_s + Z_a} [-] \quad (1.6)$$

Impedanční přizpůsobení je dáno podmínkou, že reálné a komplexní složky zdroje a antény jsou si rovny. Při této rovnosti nevznikají zpětné odrazy.

$$Z_s = Z_a \quad (1.7)$$

Výkonové přizpůsobení nastává při komplexní sdruženosti impedancí zdroje a antény [11].

$$Z_s = Z_a^* \quad (1.8)$$

Zisk antény - G (Gain) s jednotkou decibel (dB) je úzce spjatý se směrovostí - D (Directivity). Značí poměr vyslaného signálu do různých směrů anténou ku dodanému výkonu. Zisk je také možné vztáhnout k referenční anténě. Jako referenční anténa je využíván izotropní zářič (teoretická dokonale všesměrová anténa). V tomto případě se jedná o dBi jednotku zisku. Další referencí může být použit půlvlnný dipól, poté se jednotka zisku změní na dBd. Směrovost, jak již bylo řečeno značí schopnost antény vyzářit/přijmout energii do/z určitého směru (určitého azimutu a elevace) a zobrazuje se pomocí vertikální, horizontální a prostorové 3D charakteristiky viz Obr.1.1. Antény se dají rozdělit podle způsobu využití:

- Přenosné antény
- Stacionární antény - BTS(vysílače GSM nebo LTE)

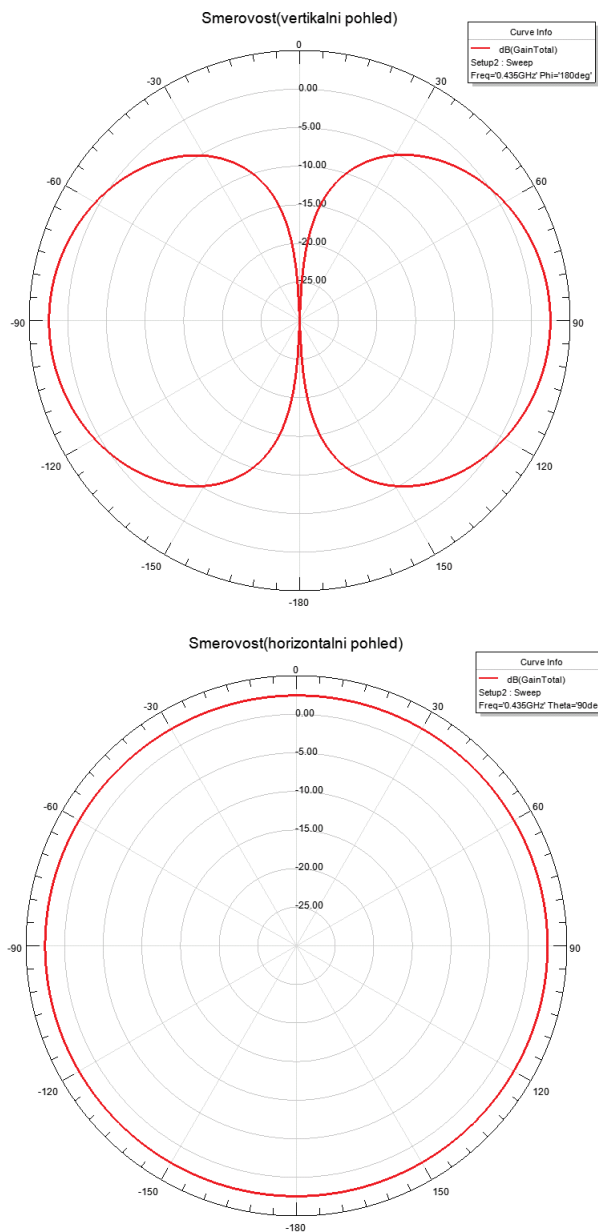
Směrovosti:

- Směrové
- Všesměrové

Fyzické konstrukci:

- Drátové - Anténní dipól, monopól. . .
- Planární - Flíčková či mikropásková anténa
- Reflektorové - Parabolická anténa
- Trychtýřové
- Anténní řady - Yagi-Uda

Polarizace antény je také důležitým parametrem. Pro komunikaci je nutné, aby vysílací a přijímací anténa měly stejnou polarizaci, jinak dochází ke značnému útlumu (3dB kruhová - lineární, dle teorie ∞ vertikální - horizontální). Polarizace udává rovinu, ve které kmitá elektrická složka elmag. vlny. Využívají se tyto polarizace:



Obr. 1.1: Příklad směrových charakteristik($\lambda/2$ dipól).

- Lineární
 - Vertikální
 - Horizontální

- Kruhová
 - RHCP(pravotočivá)
 - LHCP(levotočivá)

- Eliptická

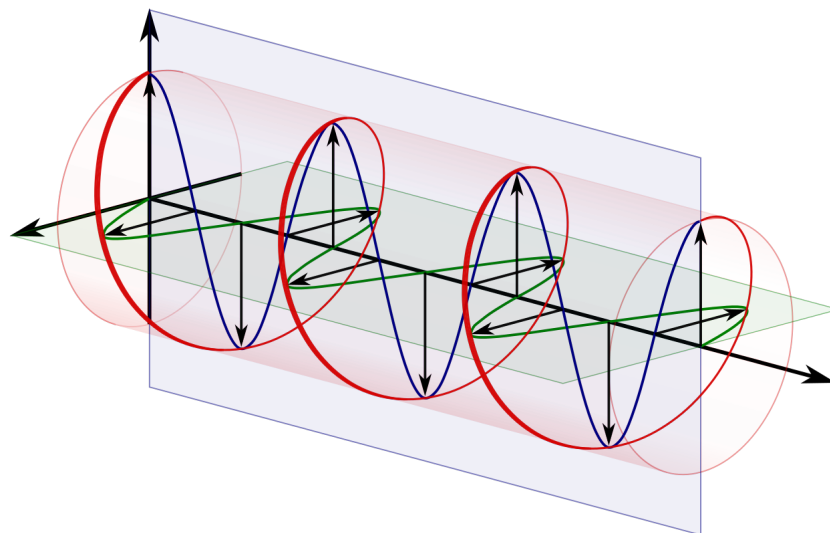
Používá se i natočená lineární polarizace ($\pm 45^\circ$). Kruhové polarizace se hojně využívají pro komunikaci se satelity, jelikož je možné na stejné frekvenci vysílat zároveň RHCP a LHCP vlny. Kruhová polarizace je také více odolná vůči atmosférickým vlivům [12]. Polarizaci je možné popsat osovým poměrem (AR), který udává poměr mezi minimálním a maximálním vektorem intenzity elektrického pole E viz rovnice 1.9 [13].

$$AR = \frac{E_{max}}{E_{min}} [-], \quad (1.9)$$

Pomocí této rovnice je možné rozlišit jednotlivé polarizace:

- $AR = 1$
 - kruhová polarizace (RHCP nebo LHCP)
- $AR = 0$
 - lineární polarizace (vertikální či horizontální)
- $0 < AR < 1$
 - eliptická polarizace

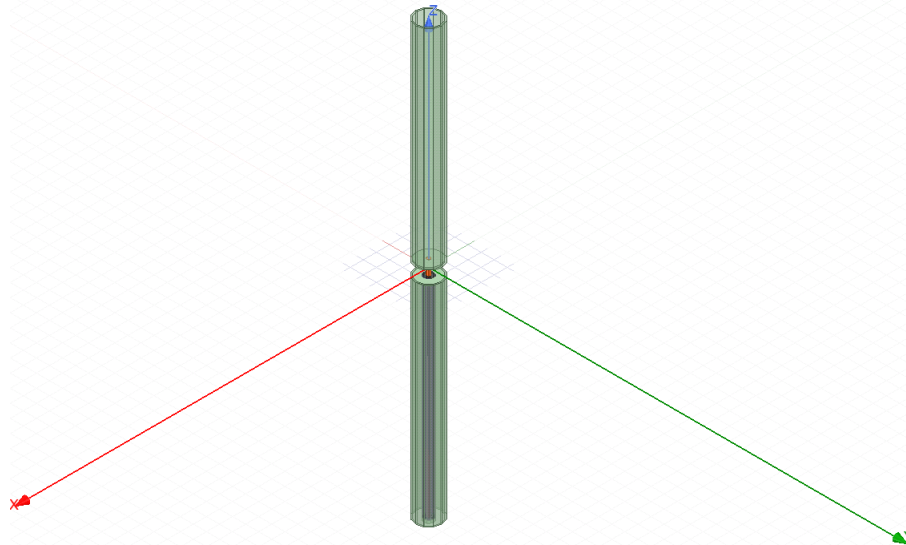
Rozeznat RHCP a LHCP je občas složité, stačí si zapamatovat poučku, pokud se pozorovatel dívá vůči RHCP, viděl by vlnu rotující po směru hodinových ručiček, u LHCP by tomu bylo naopak, viz Obr. 1.2, kde je znázorněna levotočivá polarizace.



Obr. 1.2: Levotočivá polarizace, převzato z [14].

1.2.1 Půlvlnný dipól

Nejčastějším příkladem všesměrové antény v pásmu UHF je půlvlnný dipól. Půlvlnný dipól se skládá ze dvou ramen, každé o délce $\lambda/4$, tedy dohromady mají ramena $\lambda/2$. Dipól může být polarizovaný vertikálně, či horizontálně, záleží do které osy má natočená ramena. Nastává zde však problém příjmu při vysokých elevacích ($\sim 90^\circ$), kde má dipól své minimum (tzv. minimum v nadhlavníku) [15][16]. Příklad dipólu viz Obr.1.3 a jeho směrovost viz Obr.1.4.



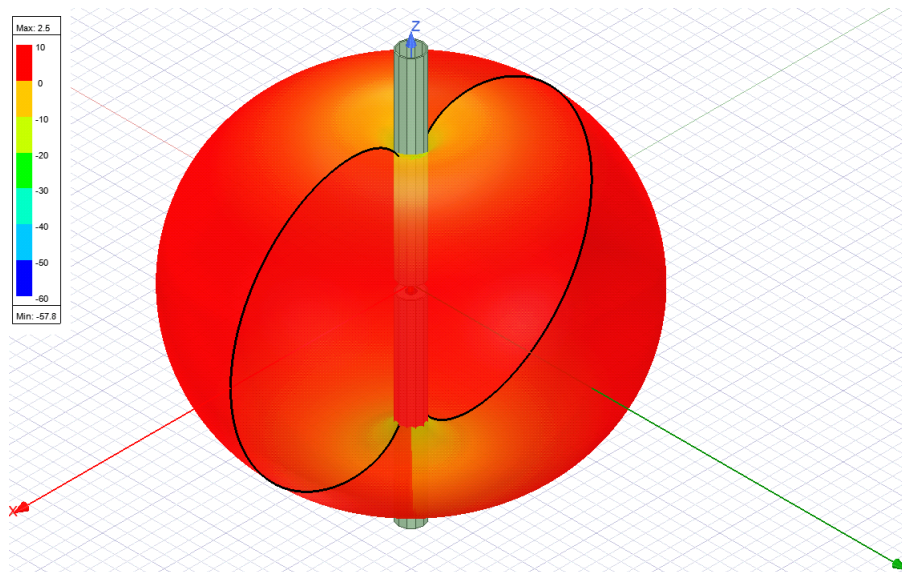
Obr. 1.3: Půlvlnný dipól.

1.2.2 Turniketová anténa

Turniketová anténa neboli křížená dipólová anténa se využívá pro komunikaci s nanosatelity - Cubesaty, a také se využívá pro armádní účely. Skládá se ze dvou identických dipólů, které mají svá ramena lomena do pravého úhlu a jejich fáze je posunuta o 90° . Tuto anténu lze provozovat ve dvou režimech:

- Normální režim
 - anténa vysílá horizontálně polarizované vlny kolmé k ose antény
- Osový režim
 - anténa vyzařuje kruhově polarizované vlny paralelní k ose antény

Nevýhodou této antény je, že vyzařovací výkon je o 3 dB menší než maximální výkon $\lambda/2$ dipólu vyzařující stejný výkon. K eliminaci tohoto problému je možné použití upravené turniketové antény – super turniketové antény - Batwing antenna (anténa typu netopýří křídlo). Ta je tvořena dvěma elementy ve tvaru netopýřího

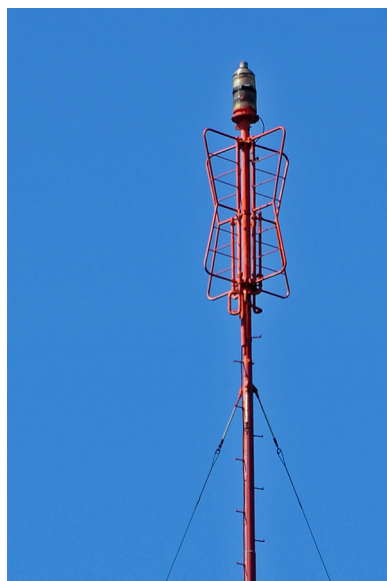


Obr. 1.4: Směr. char. dipólu.

křídla, které jsou umístěny na podpůrném sloupu naproti sobě a tvoří tím dipól. Při umístění až osmi Batwing antén s průměrnými mezerami jedné vlnové délky se zabrání nežádoucímu vyzařování v ose antén a vznikne kolineární anténní pole. Používá se pro pozemní digitální televizní vysílání [17][18]. Příklad turniketové antény viz Obr.1.5, příklad batwing antény viz Obr.1.6.



Obr. 1.5: Turniketová anténa, převzato z [19].



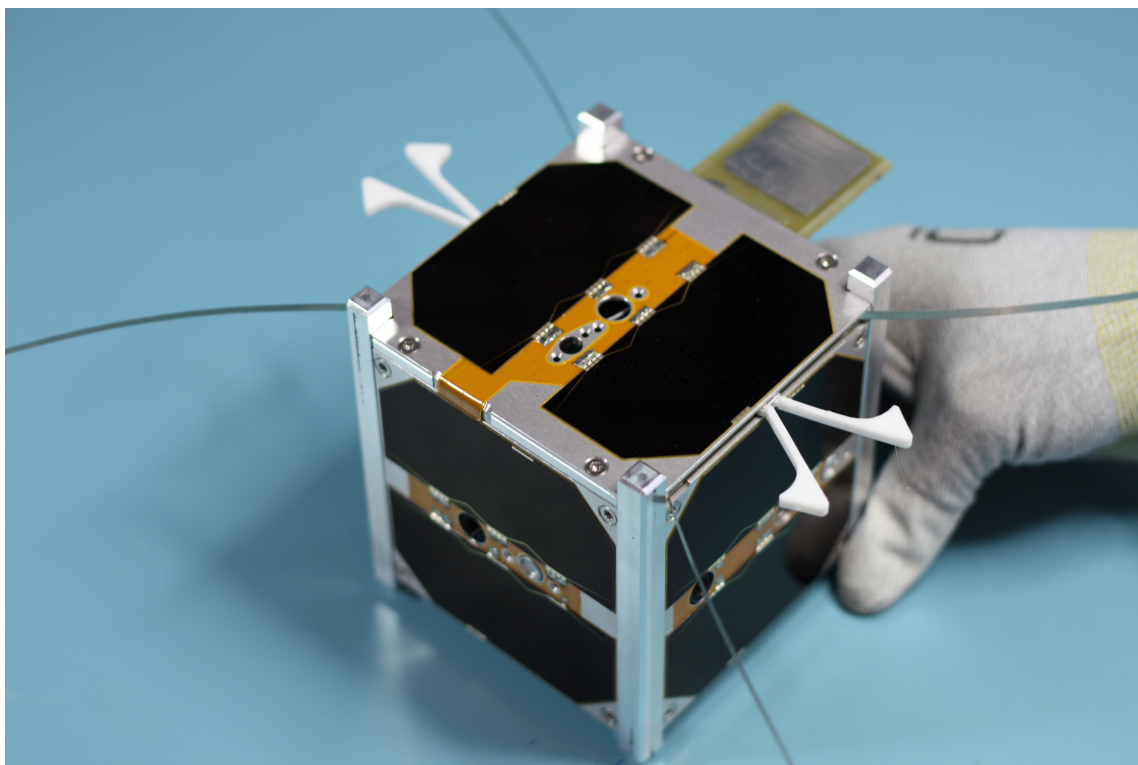
Obr. 1.6: Anténa typu Batwing, převzato z [20].

1.2.3 Prutová anténa

Prutová anténa neboli anténní monopól se skládá z jednoho anténního dipólu, který je namontován nad zemnicí deskou. Délka prutu se odvíjí od vlnové délky použitého spektra. Nejčastěji se ale využívá délka $\lambda/4$. Prutová anténa vysílá či přijímá nejvíce signál kolmý ke své ose ze všech směrů a má vertikální polarizaci. Nejčastěji se používají u malých komerčních vysílaček, nebo pro příjem signálu pro autorádia. Větší verze umístěné na střeších či sloupech slouží pro záchranné složky. Lze použít modifikaci prutu ohybem do tvaru L pro zmenšení rozměrů. Tato metoda je často využívána u nanosatelitů typu Cubesat, kde každý centimetr prostoru je velmi důležitý, proto jsou zde pruty složené a po vypuštění na orbitě se rozloží[21][22]. Příklad prutové antény viz Obr.1.7.

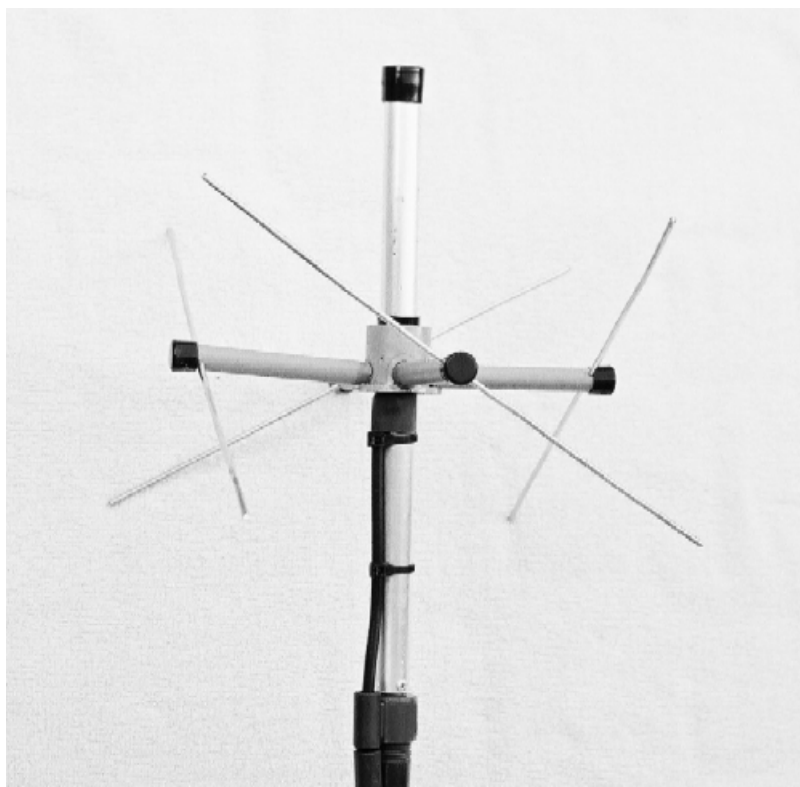
1.2.4 Lindenbladova anténa

Anténu typu Lindenblad, vyvinul Nils Lindenblad okolo roku 1940. Skládá se ze čtyř vyzařovacích dipólů, které jsou napájeny ve fázi a vytvářejí všesměrovou kruhově polarizovanou vyzařovací charakteristiku pro komunikaci se satelity na LEO (Nízká oběžná dráha). Tato práce se zabývá zjednodušeným modelem této antény - Parazitní Lindenbladova anténa viz Obr. 1.8, kde namísto čtyř vyzařovacích dipólů je použit pouze jeden dipól se čtyřmi parazitními direktory, které jsou natočeny o 30° z horizontální roviny a jsou rovnoměrně rozmístěny okolo centrálního dipólu po kružnici o průměru $\lambda/3$ s centrálním dipólem v jejím středu. Direktory přijímají



Obr. 1.7: SKCUBE cubesat, převzato z [23].

energii z elmag. pole centrálního dipólu, což v nich způsobí tok proudu, tudíž nemusejí být připojeny k napájecímu koax. kabelu. V rezonanci má obvyklý model antény impedanci cca 32Ω , což není dobré pro impedanční přizpůsobení [24]. Dále se tato práce zabývá optimalizací tohoto modelu z hlediska napájení. Toto řešení vede k prodloužení životnosti jak přenosné, tak i stacionární parazitní Lindenbladovy antény, kdy je koax. kabel a jeho připojení k dipólu uschováno uvnitř antény viz Obr.4.8. Tím se zamezí nechtěnému zatékání vody a vlhkosti ke spoji. Dále chrání spoj koax. kabelu před působením UV záření a částečně stabilizuje spojení při zhoršených povětrnostních podmínkách.



Obr. 1.8: Anténa typu Lindenblad, převzato z [24].

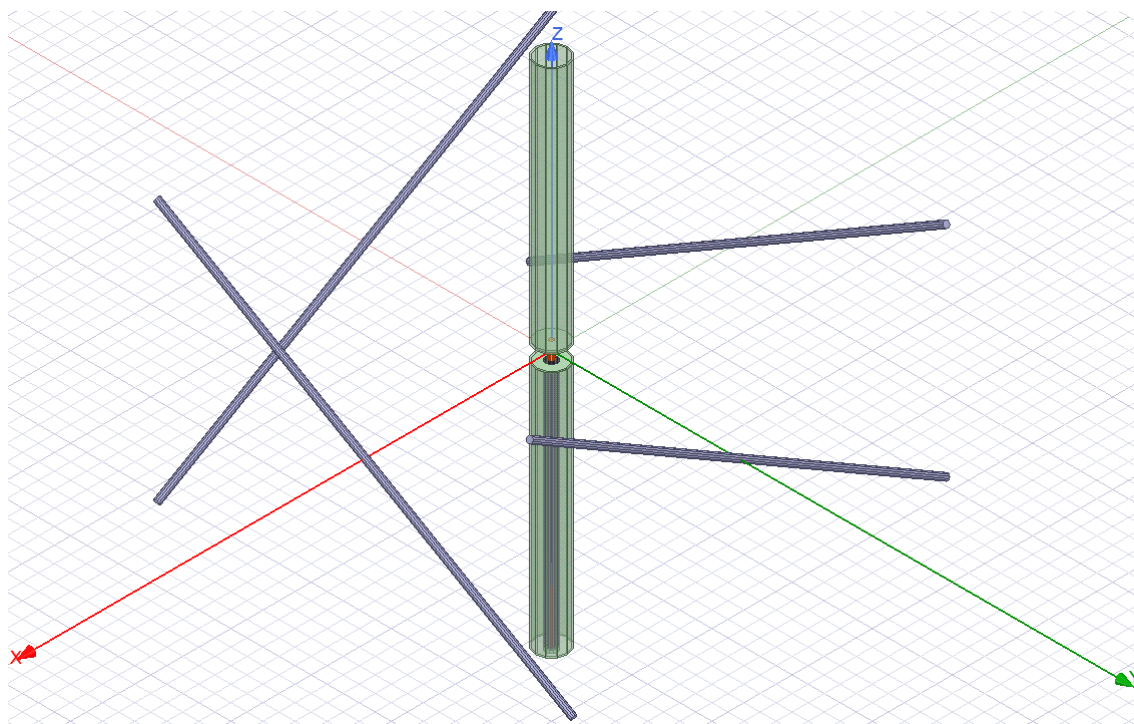
2 Simulace

2.1 Parazitní Lindenbladova anténa

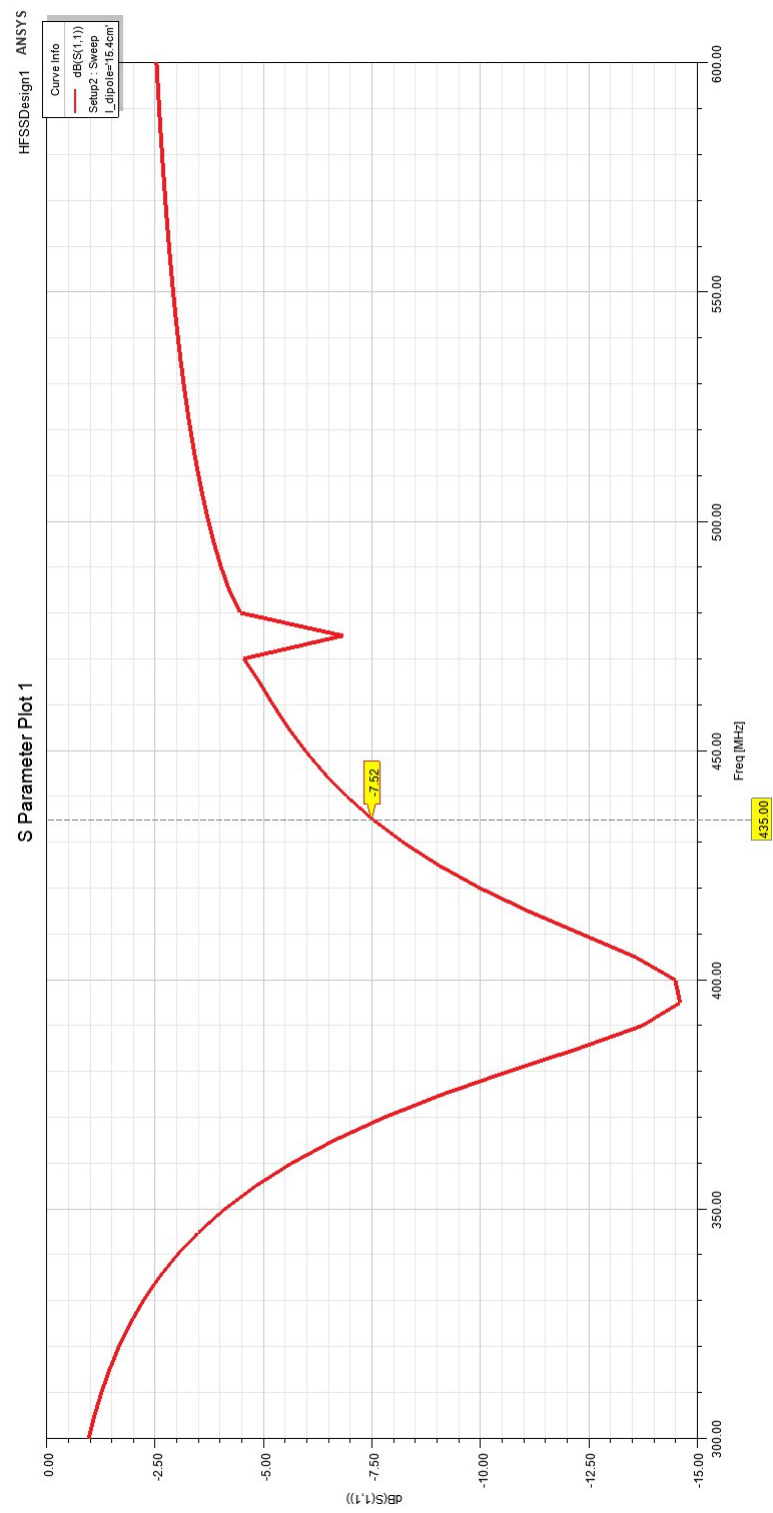
Pro simulace anténních parametrů a charakteristik byl použit program ANSYS HFSS(2019 R3). Prvním krokem bylo vytvořit anténu v programu podle hodnot z Tab. 2.1 s centrálním coax. napájením viz Obr 2.1 a porovnat s údaji v [24]. Bylo zjištěno, že anténa je všesměrová, je naladěna na pásmo UHF a vysílá RHCP, viz Obr. 2.2, Obr.2.3. Anténa však není naladěna na zvolenou frekvenci 435MHz. Tento problém je popsán v kapitole 2.2.

Tab. 2.1: Tabulka rozměrů, převzato z [24].

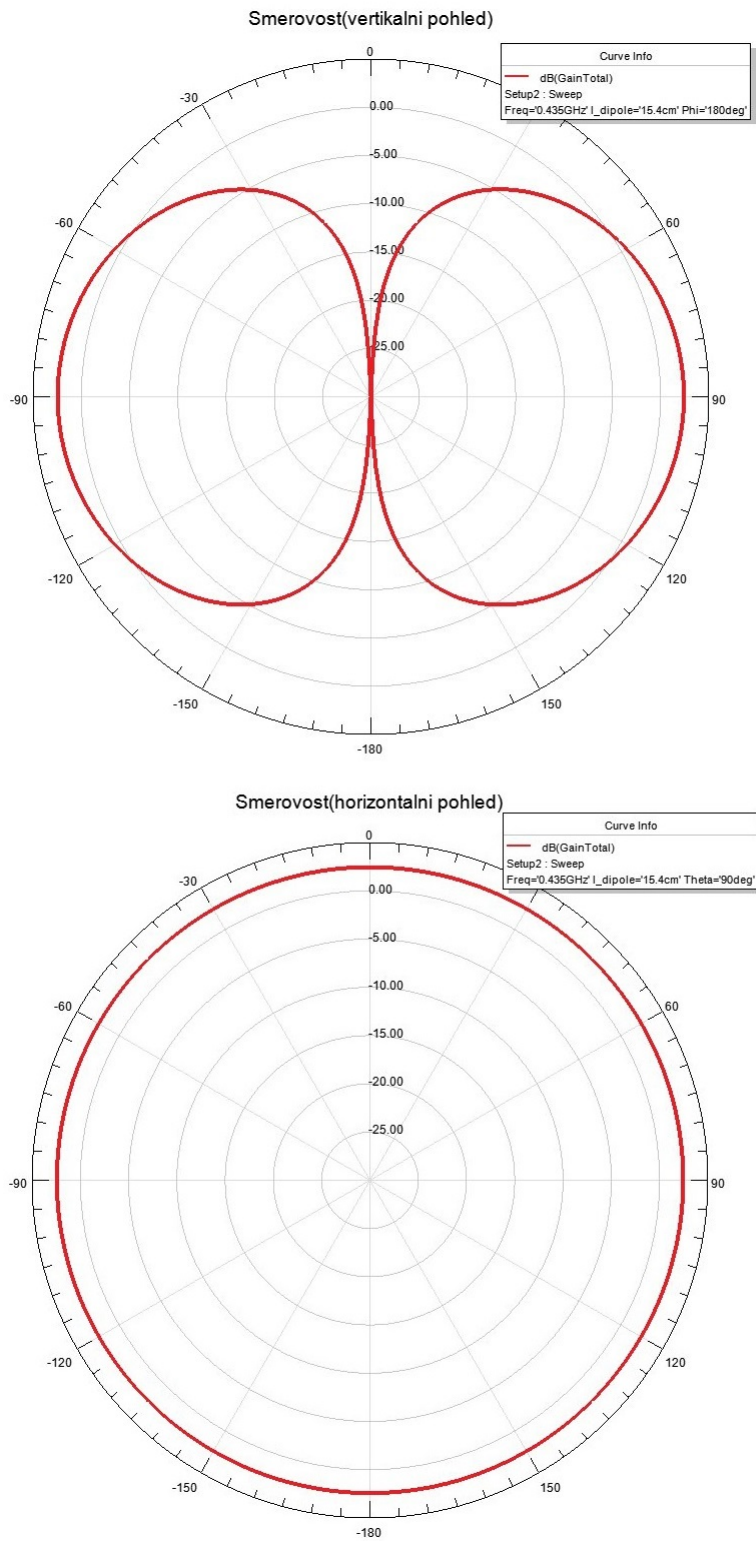
| Popis | Délka [cm] | ~ | Průměr [cm] | ~ | Síla stěny [mm] | ~ | Počet |
|----------|------------|------|-------------|-----|-----------------|---|-------|
| Dipól | 15.399 | 15.4 | 1.905 | 2 | 1.151 | 1 | 2 |
| Direktor | 29.845 | 30 | 0.326 | 0.4 | - | - | 4 |



Obr. 2.1: Model Parazitní Lindenbladovy antény.



Obr. 2.2: Čítnel odrazu S11 Lindenbladovy antény.



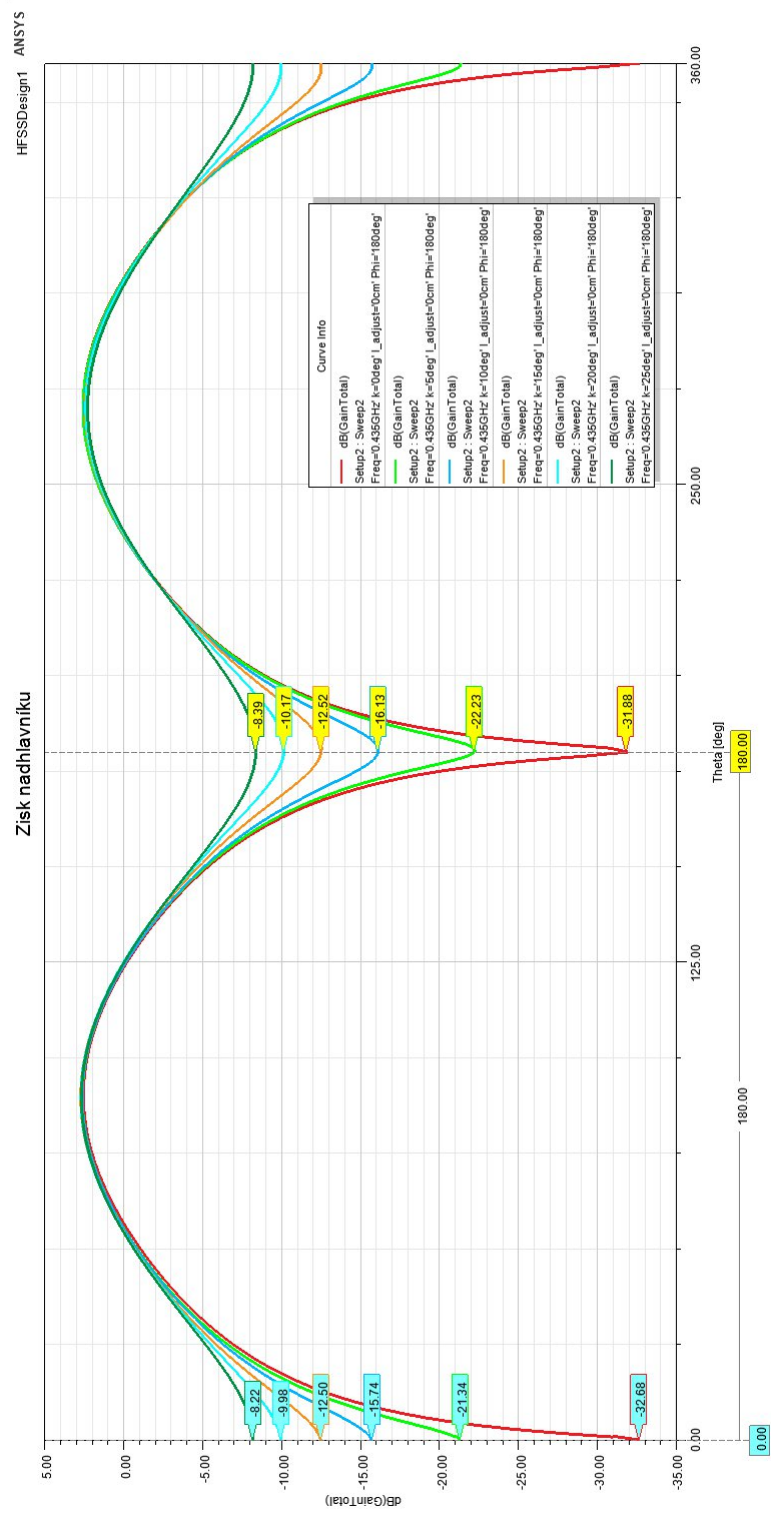
Obr. 2.3: Směrovosti Lindenbladovy antény(XZ a XY pohled).

2.2 Optimalizace parametrů

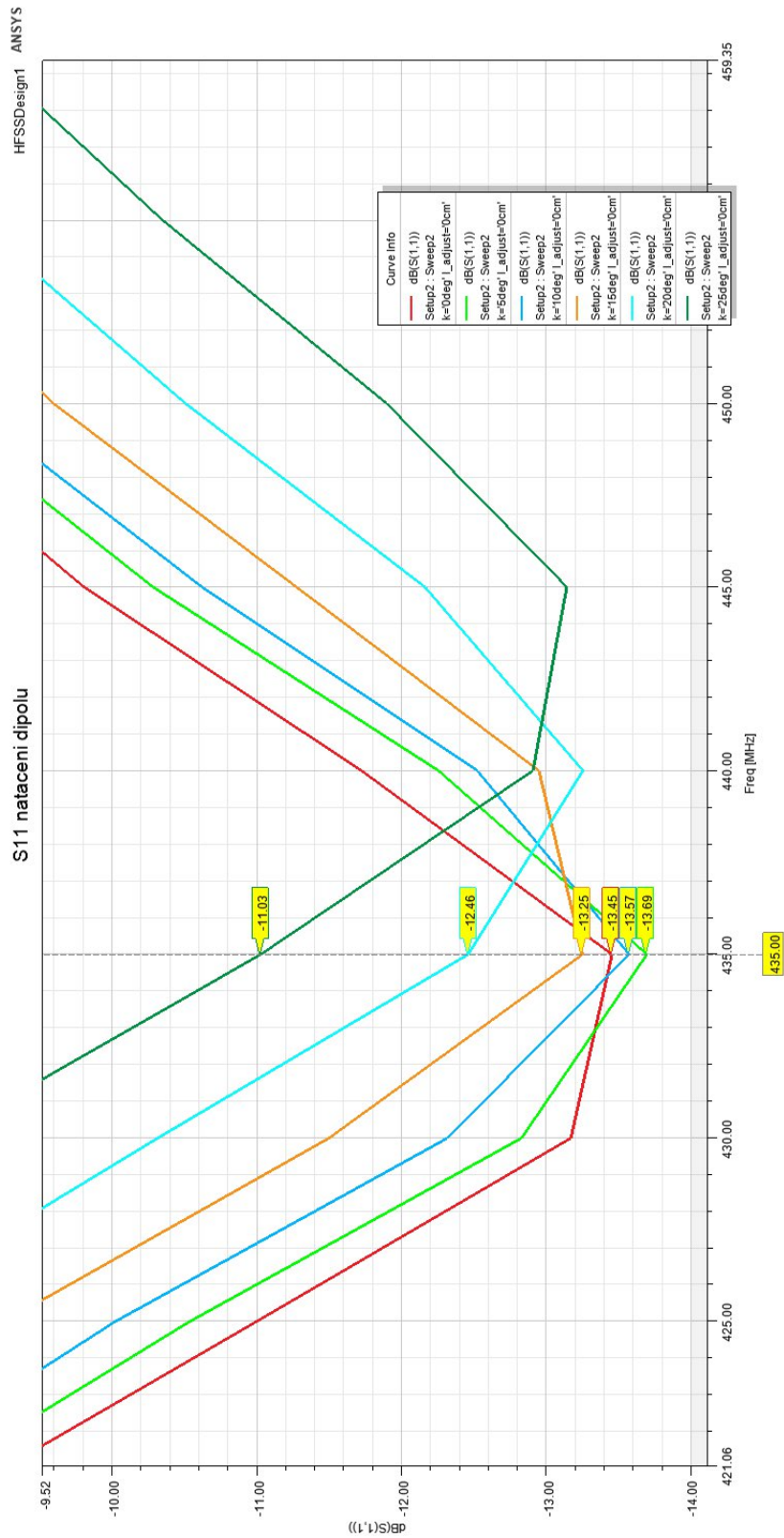
Prvním krokem optimalizace bylo vyladit anténu na zvolený kmitočet $f = 435$ MHz. Toho bylo docíleno zkrácením ramen dipólu na 14 cm, viz Obr. 2.4. Následující bod optimalizace se zabývá nulovým příjmem v nadhlavníku. Parazitní Lindenbladova anténa má většinu svého zisku do 30° elevace, poté výkon klesá, až po své minimum v ose ramen dipólu. Byla zvolena akceptovatelná hodnota v nadhlavníku -15 dB. Simulacemi různých náklonů ramen dipólu byla zjištěna a zvolena hodnota náklonu 15° od svislé osy pro obě ramena viz Obr. 2.5.

Simulacemi různých typů natočení ramen dipólu byla hodnota zajištěna natočením ramen dipólu o 15° , kde hodnota příjmu v nadhlavníku byla $-12,52$ dB. Natáčením ramen docházelo k posunu přizpůsobení S_{11} , viz Obr. 2.6, pro zvolený úhel tento posun není problémem, anténa je stále naladěna na zvolený kmitočet. Úhel 15° byl zvolen, jakožto vhodný kompromis mezi parametry antény a vyrobiteľností mechanické části a její stability, více v kapitole 4.

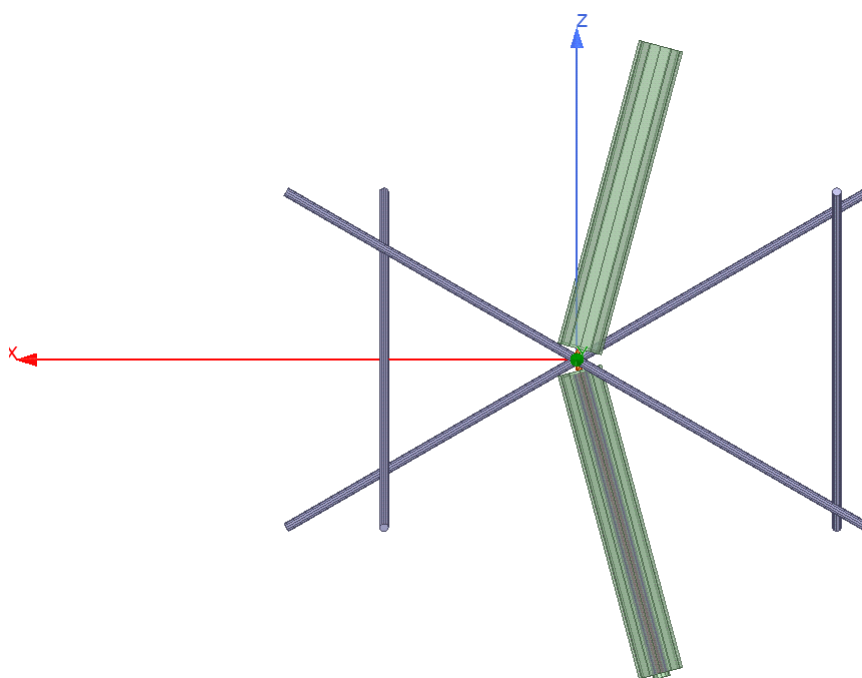
Dalším krokem bylo doladování odstupu RHCP od LHCP a AR. Různé natočení dvojic direktorů vedlo ke zlepšení těchto parametrů. Dvojice protilehlých direktorů, ke kterým se ramena dipólu při/odklání (osa X) byly natočeny pod úhlem 30° , zbylá dvojice z osy Y byla natočena pod úhlem 40° . Posledním krokem optimalizace bylo přiblížení direktoru o $\Delta x = 3$ cm od hodnoty, viz kapitola 1.2.4, směrem k odklánějícímu dipólu (-X), viz Obr. 4.1.



Obr. 2.5: Ladění zisku v nadhlavníku.



Obr. 2.6: Ladění nadhlavníku, posun S_{11} .



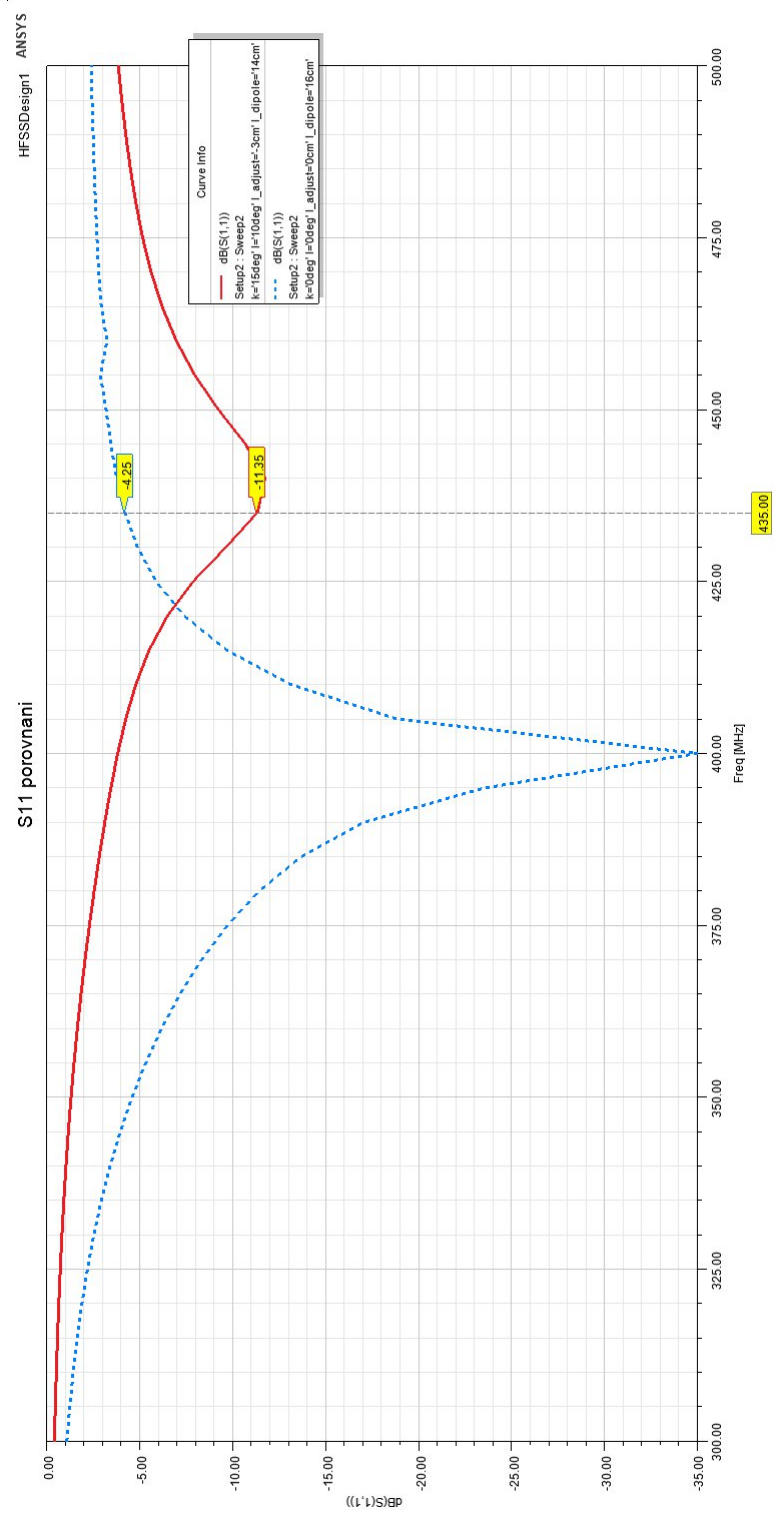
Obr. 2.7: Ladění AR, posun direktoru směrem -X.

2.3 Porovnání

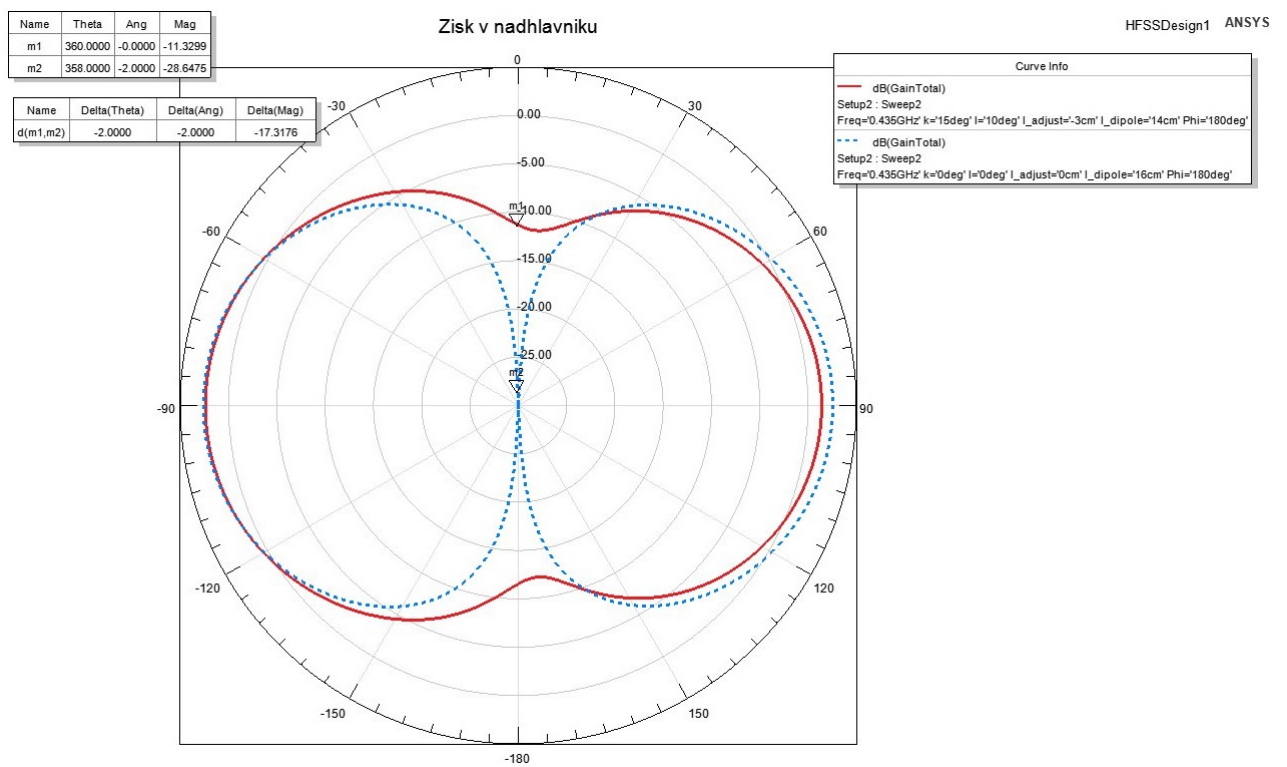
Tato kapitola porovnává parazitní Lindenbladovu anténu podle [24] s optimalizovanou anténou, která byla zadáním této bakalářské práce. Podařilo se vyladit anténu na požadovaný kmitočet $f = 435$ MHz, zajistit minimální hodnotu -15 dB v nadhlavníku, byl zvětšen odstup RHCP od LHCP. S_{11} se u optimalizované antény změnil na hodnotu $S_{11} = -11,35$ dB, což není nejlepší přizpůsobení, ale této aplikaci vyhoví. AR bylo vylepšeno pro zvolené pásmo na hodnotu 1,28, oproti 4,33 viz Obr.2.8, Obr.2.9 Obr.2.10. Konečné rozměry jsou přehledně sepsány v Tab. 2.2 a v příložené dokumentaci viz A.

Tab. 2.2: Tabulka rozměrů optimalizované antény.

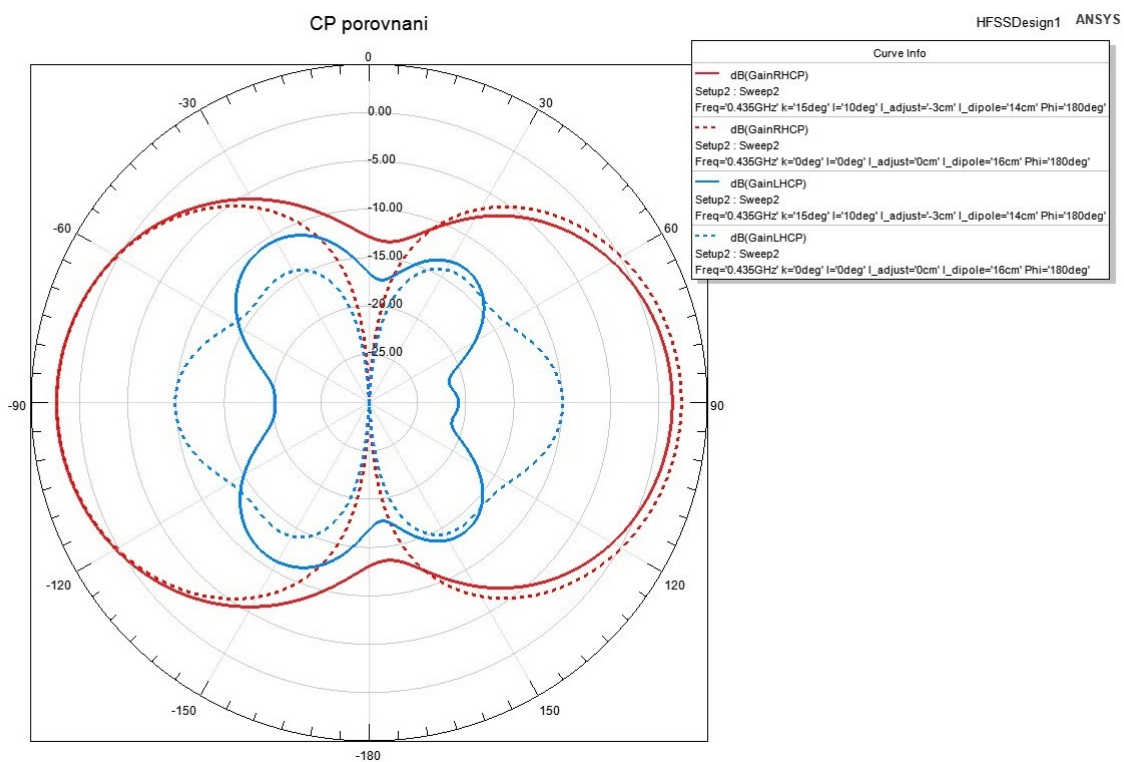
| Popis | Délka [cm] | Průměr [cm] | Síla stěny [mm] | Počet |
|----------|------------|-------------|-----------------|-------|
| Dipól | 14 | 2 | 1 | 2 |
| Direktor | 30 | 0,4 | - | 4 |



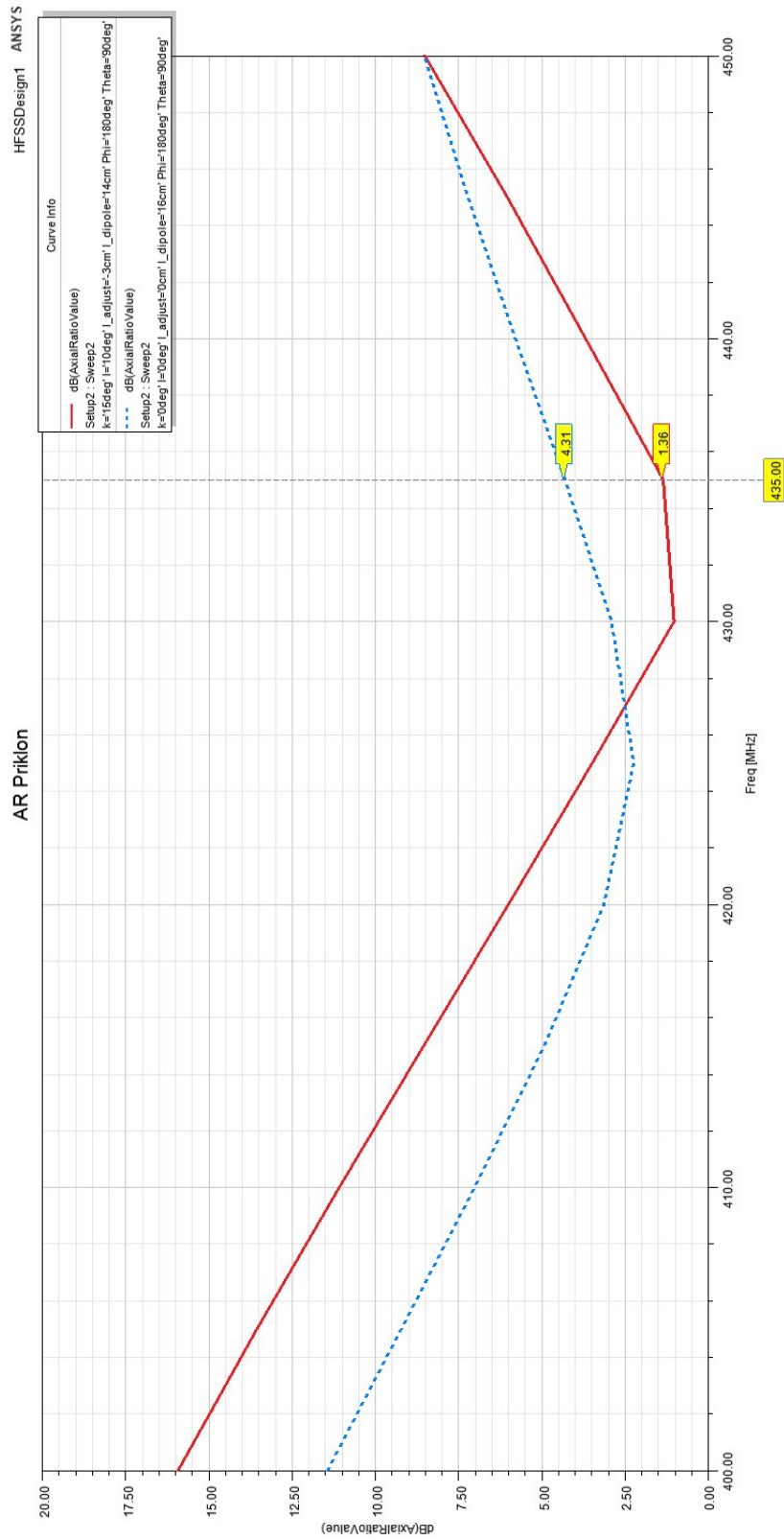
Obr. 2.8: Srovnání S_{11} antén.



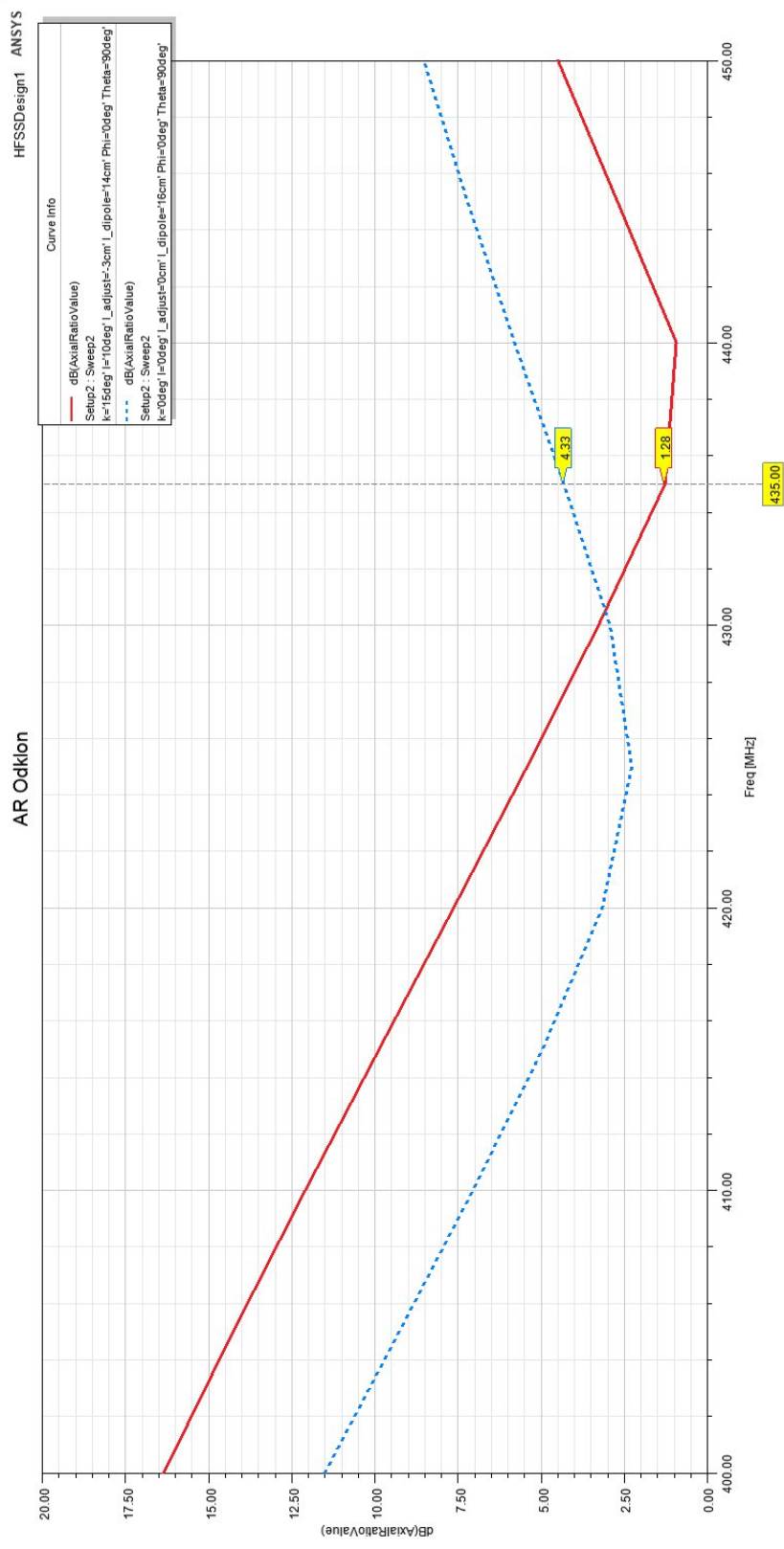
Obr. 2.9: Srovnání zisků antén.



Obr. 2.10: Srovnání CP antén.



Obr. 2.11: AR porovnání, příklonná strana (-X).

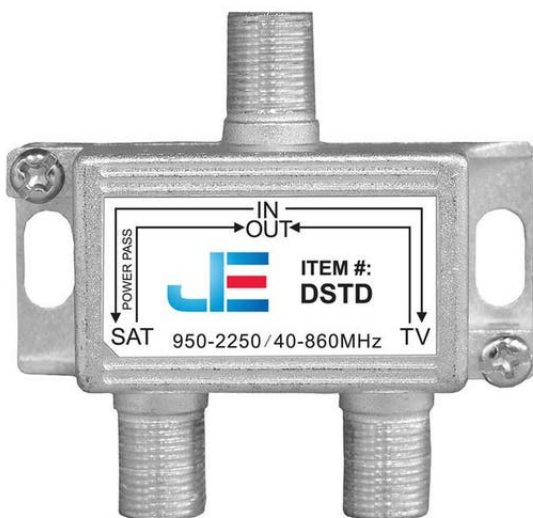


Obr. 2.12: AR porovnání, strana odklonu (X).

3 Návrh výhybek s fantomovým napájením

3.1 Návrh diplexeru

Diplexer je zařízení, které dovoluje po jednom vodiči přenášet více než jeden signál, je však nutné, aby signály měly od sebe frekvenční odstup z důvodu interferencí mezi sebou. Jedná se vlastně o kombinaci filtrů typu HP (horní propust) a DP (dolní propust), viz Obr.3.1. Pro návrh diplexeru bylo nejdříve nutné zvolit jeho centrální frekvenci pomocí rovnice 3.1 [26].



Obr. 3.1: UHF/VHF diplexer, převzato z [25].

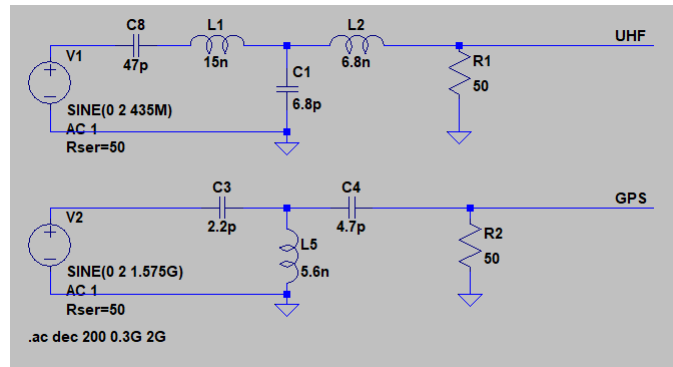
$$F_c = \sqrt{F_L \cdot F_H}, \quad (3.1)$$

kde F_c je centrální frekvence diplexeru, F_L je spodní frekvence, F_H je horní frekvence.

Dosazením do 3.1 signál UHF(435 MHz) a referenční signál GPS v pásmu L1(1575 MHz) získáme centrální frekvenci:

$$F_c = \sqrt{435 \cdot 10^6 \cdot 1575 \cdot 10^6} = 827,73 \text{ MHz}, \quad (3.2)$$

Pro návrh diplexeru byl použit program Diplexer [27]. Tento model byl poté překreslen do programu LTspice XVII od Analog devices na Obr. 3.2 [28], pro ověření funkčnosti návrhu. Poté byly hodnoty upraveny do výrobních řad. Centrální frekvence se touto variací hodnot přesunula na $F_c = 857,46$ MHz, pro tuto aplikaci posun není problémem, F_c je stále mimo obě pásma diplexeru, viz Obr.3.3.



Obr. 3.2: Schéma diplexeru.

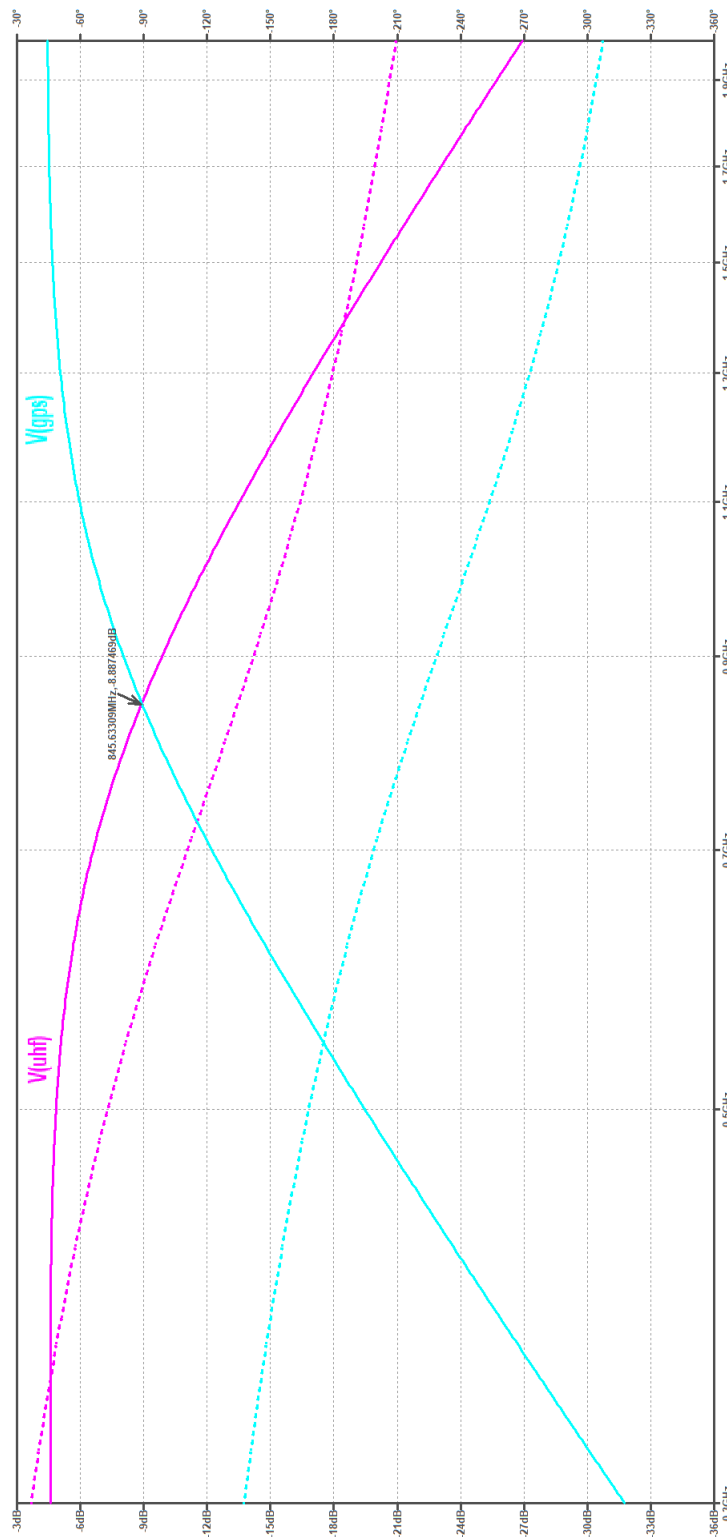
3.2 Návrh předzesilovače

Jako předzesilovač bylo doporučeno použít osvědčené zapojení navržené vedoucím práce, Ing. Tomášem Urbancem, PhD., jelikož návrh předzesilovače nebyl primárním cílem této práce. Toto zapojení bylo rozšířeno o diplexer a napájecí výhybky. Pozice konektorů byly upraveny tak, aby směřovaly k jedné straně. Jelikož toto zapojení má být uloženo blízko antény ve venkovním prostředí, konektory směřují svisle dolů. Tím se zamezí zatékání vody. DPS byly navrženy a upraveny v programu EAGLE. Schéma na Obr.3.4 a na Obr. 3.6.

Druhá část(Rx) se skládá z diplexeru, výhybky, indikační LED a napájecího konektoru pro stejnosměrné napětí viz Obr.3.5.

3.3 Návrh výhybky pro fantomové napájení

Pro napájení předzesilovače PGA103+ je nutné navrhnout výhybku pro potřebu oddělení stejnosměrné a střídavé složky signálu. Toho se docílí přidáním oddělovacího kondenzátoru X_c , jehož reaktance na pracovním kmitočtu je alespoň 4· menší než je charakteristická impedance Z_0 . U oddělovací tlumivky X_{RFC} platí opak, tedy její



Obr. 3.3: Přenos diplexeru.

reaktance musí být alespoň 4· větší než Z_0 . K RFC tlumivce se ještě musí přidat

blokovací kondenzátor o velikosti reaktance 200· menší než Z_0 .

$$X_c \leq \frac{Z_0}{4} [\Omega] \quad (3.3)$$

$$X_{RFC} \geq 4 \cdot Z_0 [\Omega] \quad (3.4)$$

$$X_{CB} = \frac{Z_0}{200} [\Omega] \quad (3.5)$$

Dosazením do rovnic 3.3, 3.4 a 3.5 vyjdou tyto minimální hodnoty:

$$X_c \leq \frac{Z_0}{4} \leq \frac{50}{4} = 12,5 \Omega \quad (3.6)$$

$$X_{RFC} \geq 4 \cdot Z_0 \geq 4 \cdot 50 = 200 \Omega \quad (3.7)$$

$$X_{CB} = \frac{Z_0}{200} = \frac{50}{200} = 0,25 \Omega \quad (3.8)$$

Vyjádřením indukčnosti a kapacity dle [29] se zvýšeným odstupem od minimálních hodnot zmíněných výše (počítáno s $6 \cdot Z_0$) a dosazením je dosaženo těchto hodnot ($f = 435 \text{ MHz}$):

$$X_{uhfRFC} = L \cdot \omega \quad \longrightarrow \quad L = \frac{X_{RFC}}{\omega} \quad \longrightarrow \quad L = \frac{300}{\omega} = 109,7 \text{ nH} \quad (3.9)$$

$$X_{uhfc} = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad \longrightarrow \quad C = \frac{1}{\omega \cdot X_c} \quad \longrightarrow \quad C = \frac{1}{\omega \cdot 8,3} = 44 \text{ pF} \quad (3.10)$$

$$X_{uhfCB} = \frac{1}{\omega \cdot C_{CB}} \quad \longrightarrow \quad C_{CB} = \frac{1}{\omega \cdot X_{CB}} \quad \longrightarrow \quad C_{CB} = \frac{1}{\omega \cdot 0,25} = 1,46 \text{ nF} \quad (3.11)$$

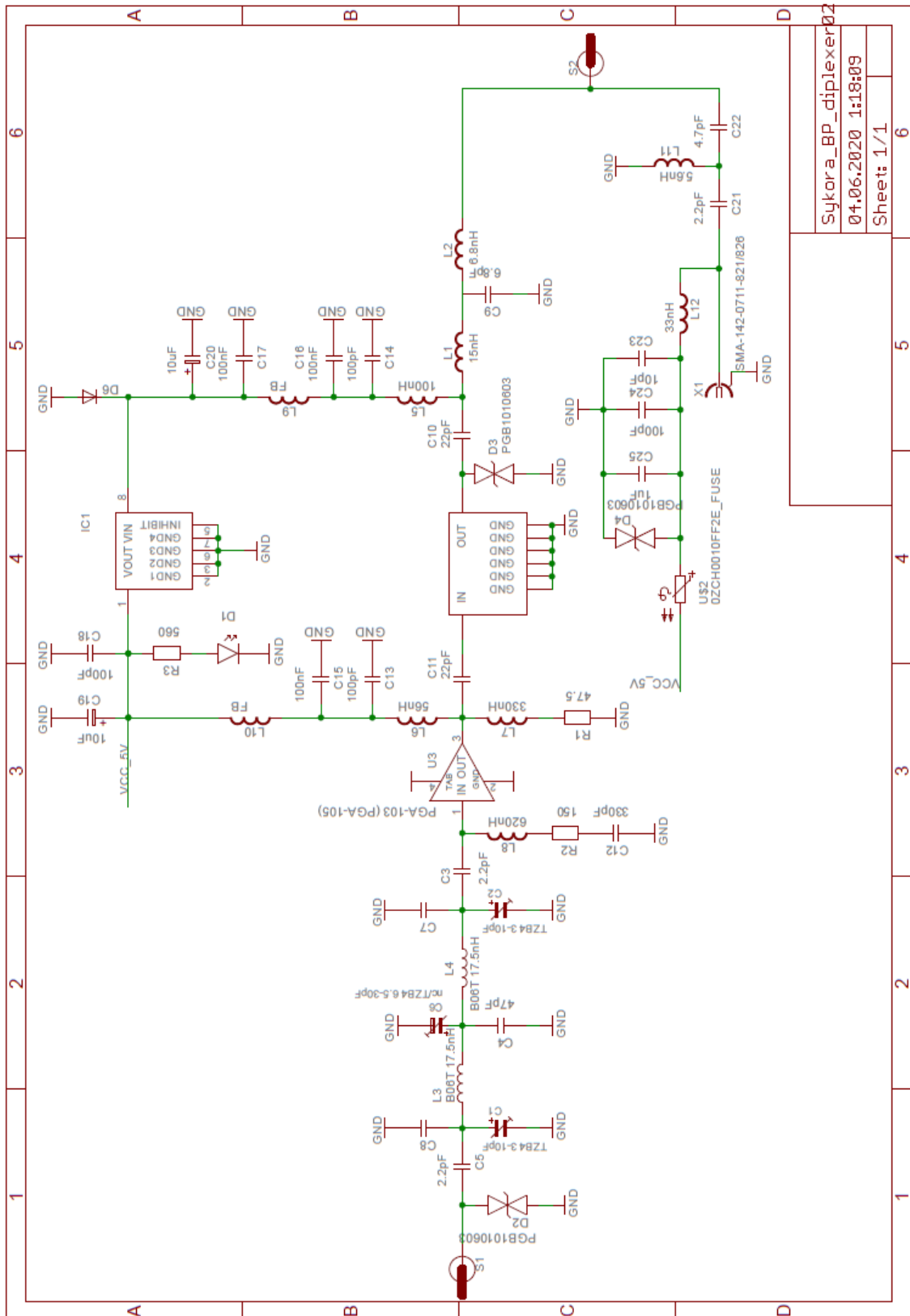
kde $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ je úhlová frekvence, f je frekvence. Pro referenční GPS signál jsou hodnoty vypočítány ($f = 1575 \text{ MHz}$):

$$X_{gpsRFC} = L \cdot \omega \quad \longrightarrow \quad L = \frac{X_{RFC}}{\omega} \quad \longrightarrow \quad L = \frac{300}{\omega} = 30 \text{ nH} \quad (3.12)$$

$$X_{gpsc} = \frac{Z_0}{6} \quad \longrightarrow \quad C = \frac{1}{\omega \cdot X_c} \quad \longrightarrow \quad C = \frac{1}{\omega \cdot 8,3} = 12 \text{ pF} \quad (3.13)$$

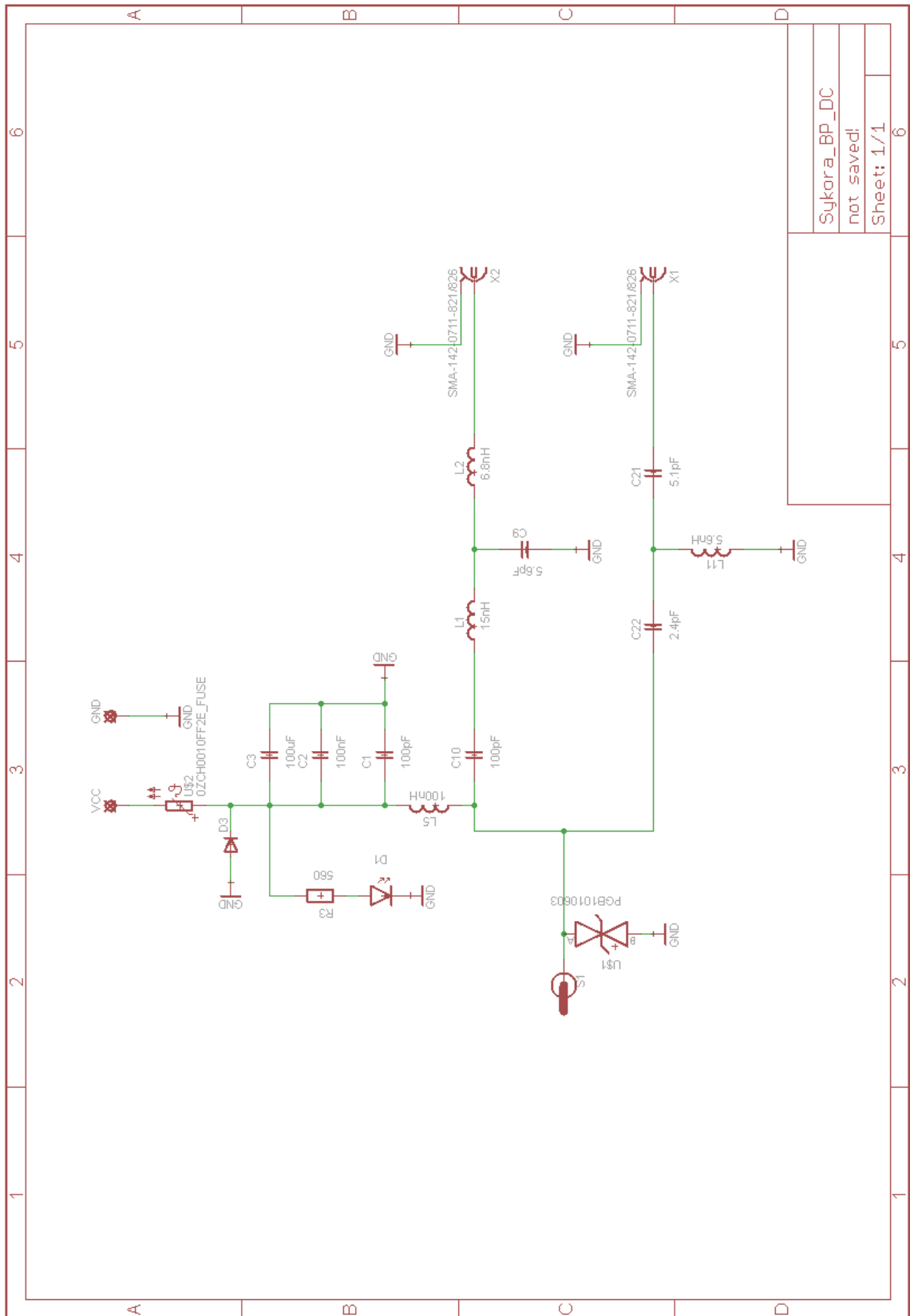
$$X_{gpsCB} = \frac{1}{\omega \cdot C_{CB}} \quad \longrightarrow \quad C_{CB} = \frac{1}{\omega \cdot X_{CB}} \quad \longrightarrow \quad C_{CB} = \frac{1}{\omega \cdot 0,25} = 404 \text{ pF} \quad (3.14)$$

Tyto hodnoty byly zaokrouhleny na hodnoty výrobních řad komponentů.



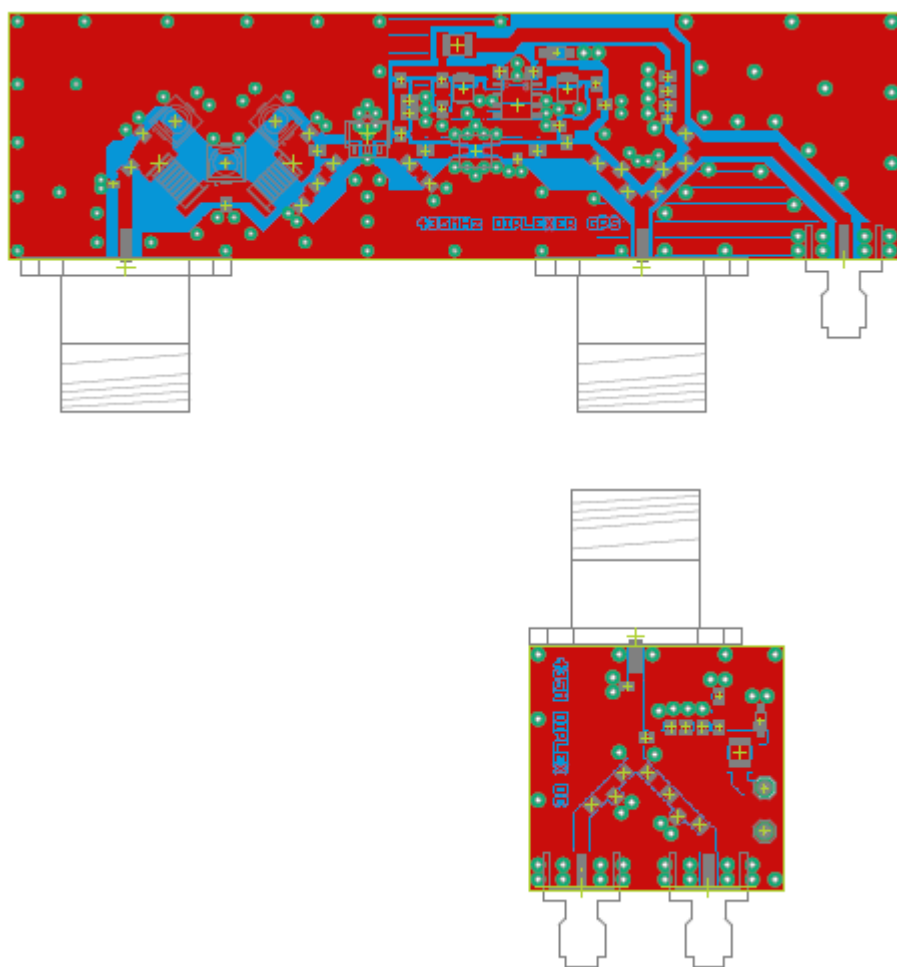
Sykora_BP_diplexer02
 04.06.2020 1:18:09
 Sheet: 1/1

Obr. 3.4: Schéma předzesilovače.



| | |
|--------------|---|
| Sykora_BP_DC | 6 |
| not saved! | 5 |
| Sheet: 1/1 | 6 |

Obr. 3.5: Schéma zapojení Rx diplexeru.



Obr. 3.6: DPS LNA a Rx diplexeru v měřítku 1:1.

4 Návrh mechanické části antény

4.1 Moderní výrobní postupy

V dnešní době probíhá velký rozvoj technologie 3D tisku v mnoha technických odvětvích. Používá se pro rychlé prototypování výrobků ve vývoji, tisknou se ozdoby, postavičky, součástky na další tiskárny atp.

Nejprve je potřeba vytvořit 3D model v některém z CAD programů, kde se namodeluje fyzický model a program poté vyexportuje souřadnice pro 3D tiskárnu. Ta následný výrobek vrstvu po vrstvě vytiskne postupným natahováním tenké vrstvy plastu - filamentu. Filamentů je mnoho druhů, které se liší svými vlastnostmi, kvalitou tisku, stálostí atd. V současné době se začíná experimentovat s tiskem pomocí kovových prášků a dokonce i s tiskem celých domů [31].

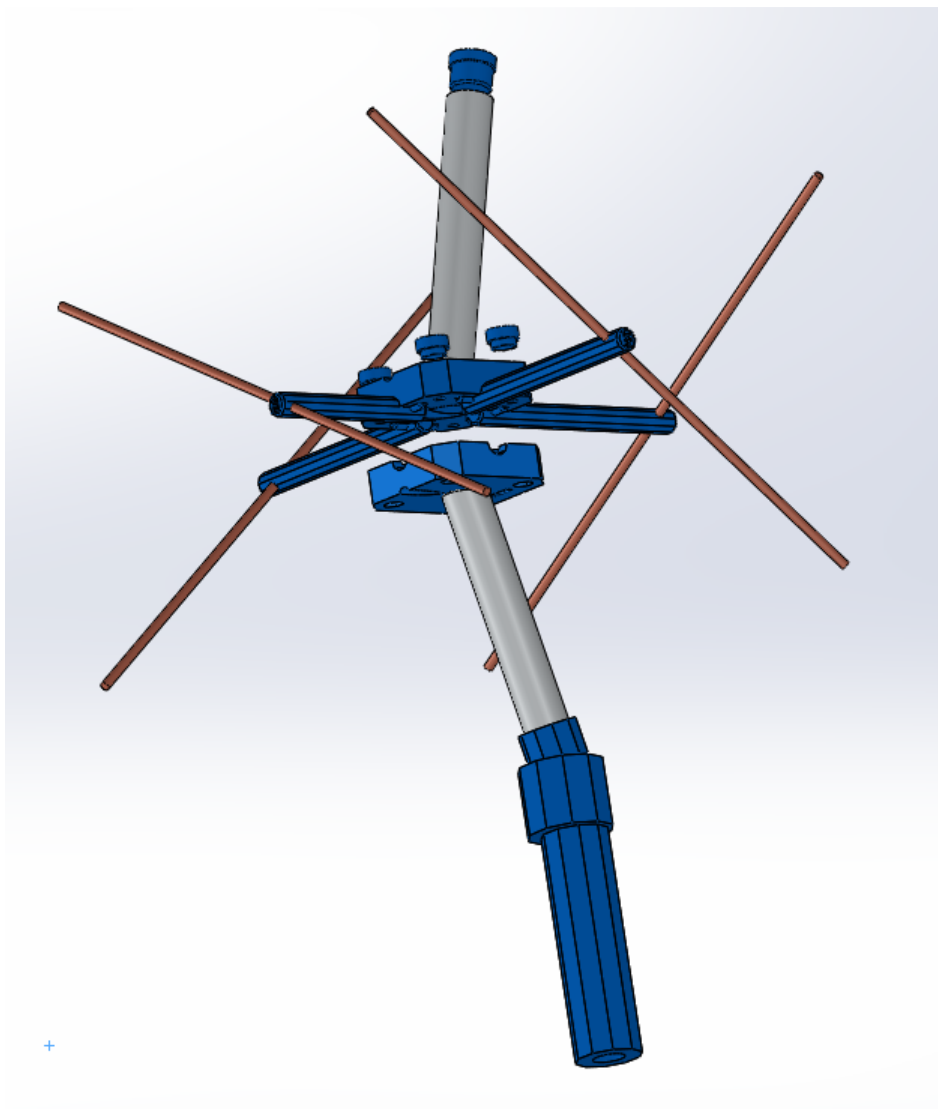


Obr. 4.1: Příklad 3D tiskárny Průša I3, převzato z [30].

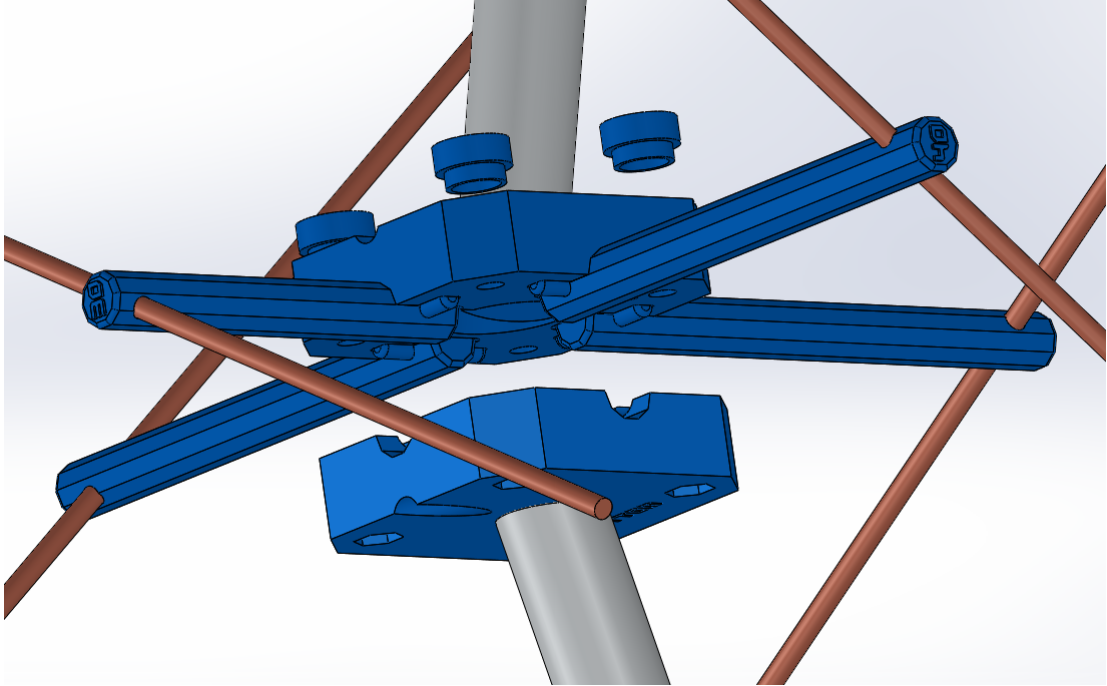
4.2 Návrh mechanické části antény

Tato část práce rozebírá ideu navržené mechanické části antény. Většina návrhů antén typu Lindenblad využívá PVC trubky, či jiné materiály, které je potřeba mechanicky upravit na požadované délky. Také je nutné naměřit úhly natočení direktorů. V návrhu této práce je snaha o minimalizaci součástek a jednoduchou montáž. Proto byl navržen příklopný mechanismus, který se skládá z celkem šesti vytištěných částí a celý návrh se skládá z devíti částí. Celý systém je zobrazen na Obr. 4.2 a detail příklopného mechanismu na Obr. 4.3. Držadla jsou připravena, stačí zasunout rovnoměrně měděný drát (o rozměrech viz Tab. 2.2) do připravené díry a přidat do centrálního systému. Dále není potřeba měřit úhly natočení, jelikož po sevření mechanismu jsou direktory ve správném úhlu natočení.

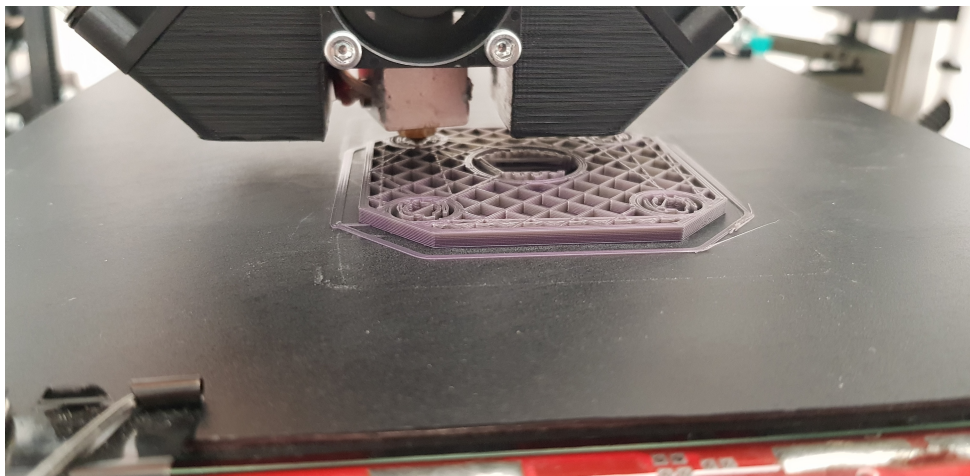
V centrálním mechanismu jsou prostory pro M4 matičky pro následné smontování s koax. kabelem. Pro vrchní díl dipólu byla namodelovaná zarážka, pro M4 šrouby krytky. Posledním dílem je 'madlo', na které drží celou anténu ve správné poloze a úhlech. Na Obr. 4.5 je znázorněno celkové uchycení mechanismu, vložení ramen dipólu a držadel direktorů a také přichycení koax. kabelu k dipólu.



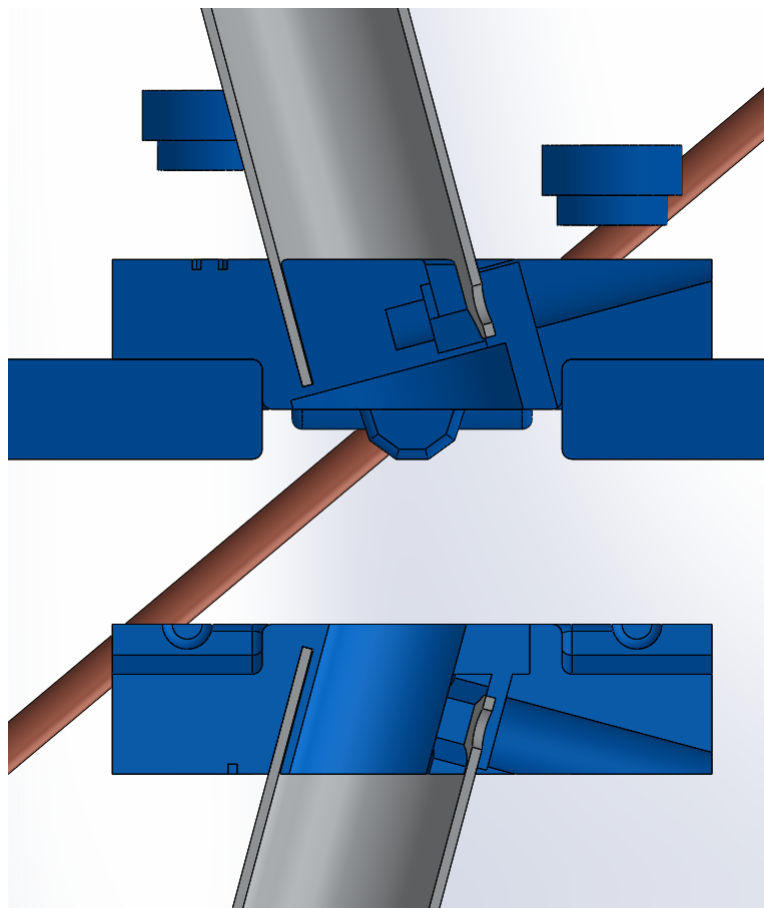
Obr. 4.2: Mechanická část, celý systém.



Obr. 4.3: Mechanismus držadel direktorů.



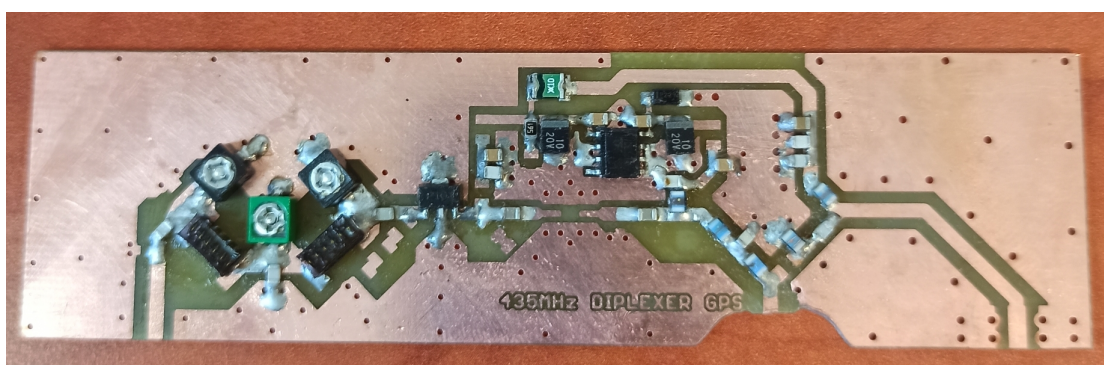
Obr. 4.4: Spodní centrální díl při tisku.



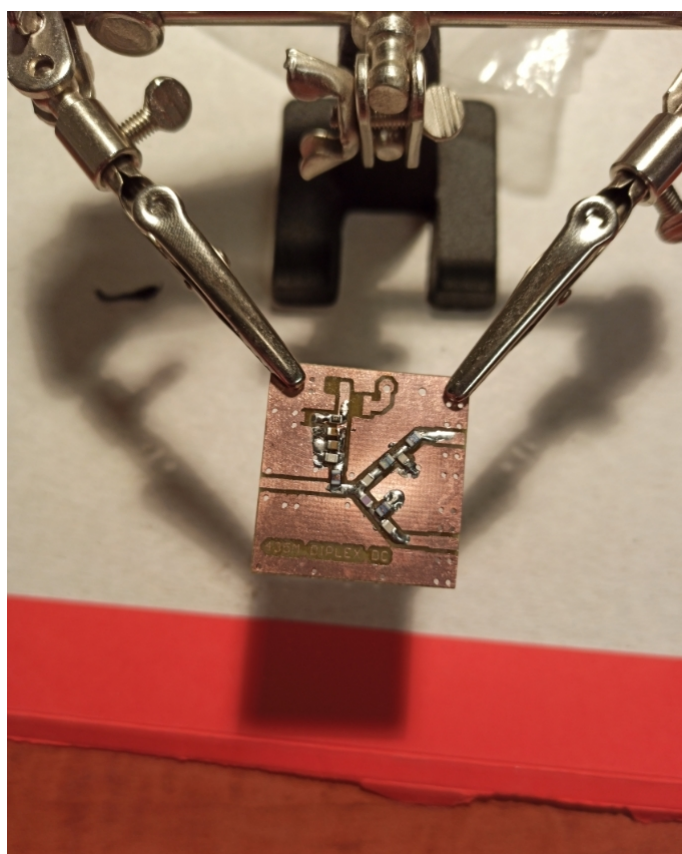
Obr. 4.5: Detail úložného mechanismu.

4.3 Finální montáž a pájení DPS

Navrhnuté DPS byly zaslány do výroby na Ústav radioelektroniky FEKT VUT. Následně bylo nutné k DPS připájet součástky a konektory typu N. Vzhledem k tomu, že byly dodány dva rozdílné typy N-konektorů a jeden z nich nebyl kompatibilní s návrhem, bylo nutné vypilovat část desky tak, aby konektor mohl být použit viz Obr.4.6. Poté byly dopájeny ostatní součástky a příprava oček na koax. kabelu viz Obr.4.7 a Obr.4.8. Posledním krokem bylo složení antény viz Obr.4.9.



Obr. 4.6: DPS s LNA.



Obr. 4.7: DPS Rx části diplexeru.



Obr. 4.8: Příprava koax. kabelu.

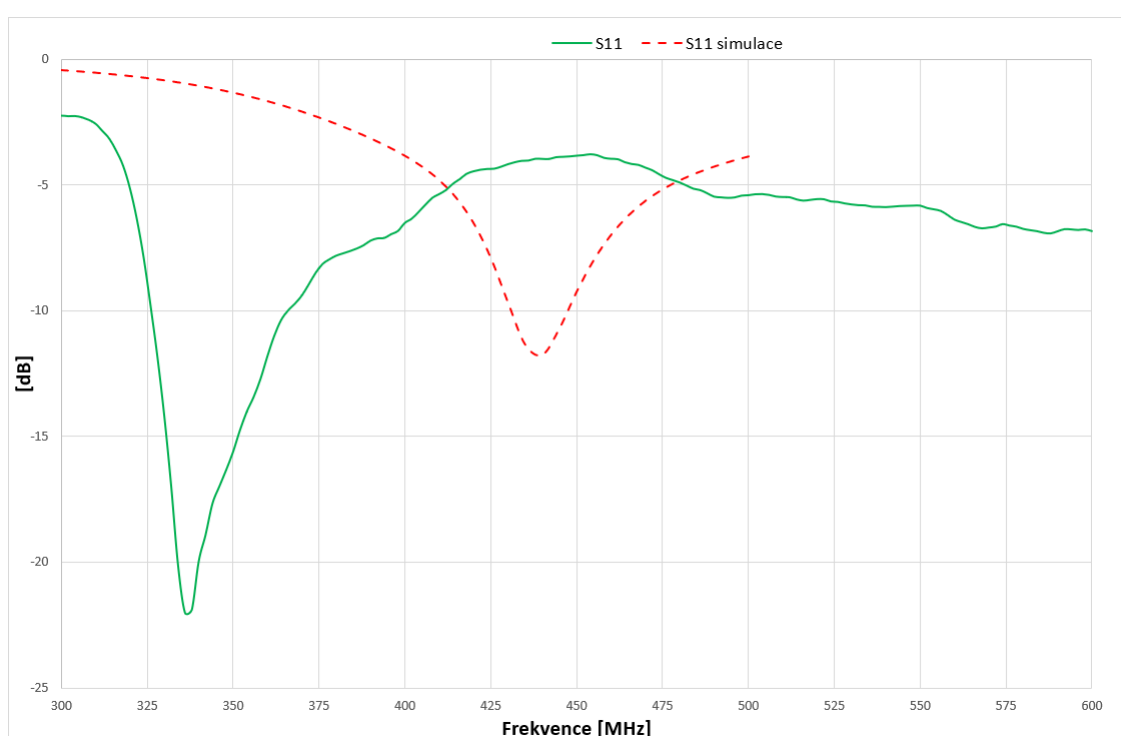


Obr. 4.9: Složená anténa.

5 Měření parametrů

5.1 Měření S11

Jako první bylo měřeno pásmo, na které je anténa naladěna. Bylo zjištěno, že anténa je rozladěna o 100MHz viz Obr.5.1. Příčinou bylo nechtěné prodloužení ramen dipólu o část odizolovaného coax. kabelu viz Obr. 4.8. Z toho důvodu musel být konec coax. kabelu zapraven a co nejvíce zkrácen, viz Obr.5.2. Tento krok měl za následek přemodelování mechanických částí z kapitoly 4.2, aby anténu bylo možné složit. Proto byla v centrálních příklopných držácích vymodelována místa pro maticky viz Obr. 4.5.

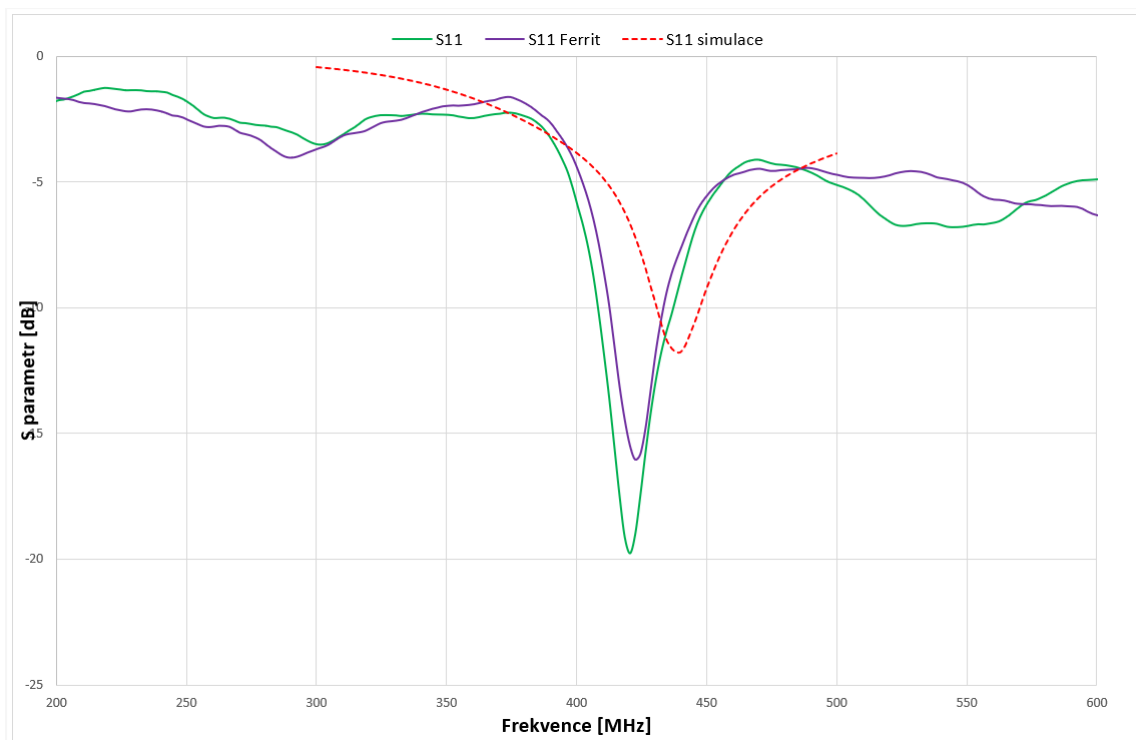


Obr. 5.1: S11 rozladění.

Tento krok se ukázal jako správný. Po zkrácení coax. kabelu byla anténa vyladěna na správný kmitočet viz Obr.5.3. Na tomto obrázku je vidět průběh S11. Poté byl na coax. kabel přidán feritový váleček. Minimum S11 bylo cca o 10 MHz posunuto, než bylo zvolené pásmo, zřejmě způsobené nepřesnostmi při řezání ramen dipólu.



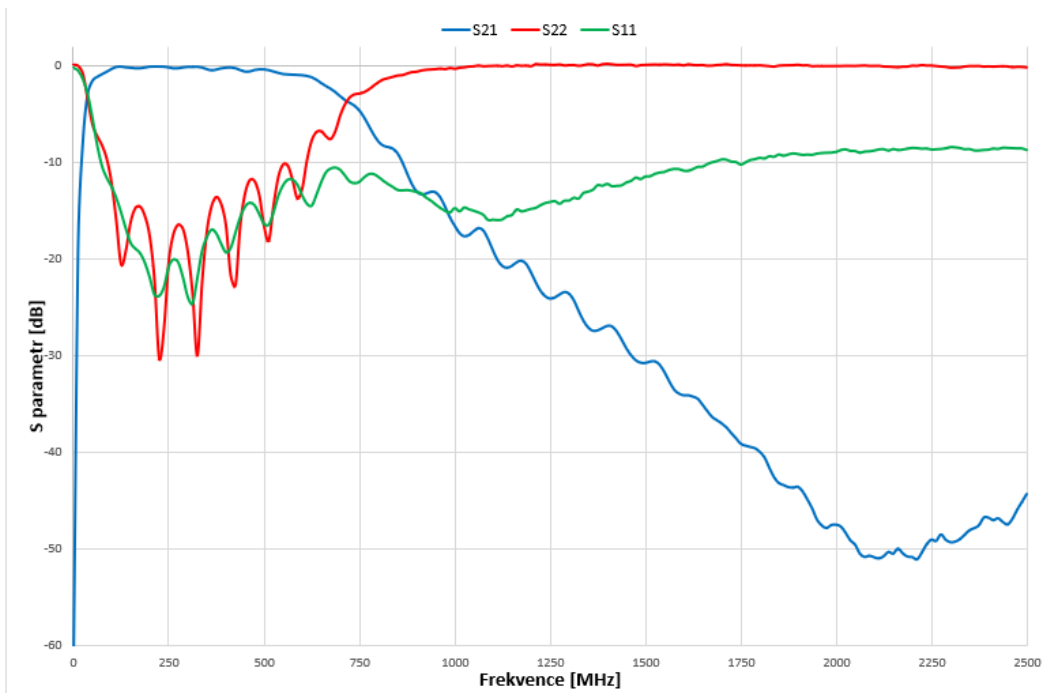
Obr. 5.2: Zapravení koax. kabelu. Foceno před zaizolováním.



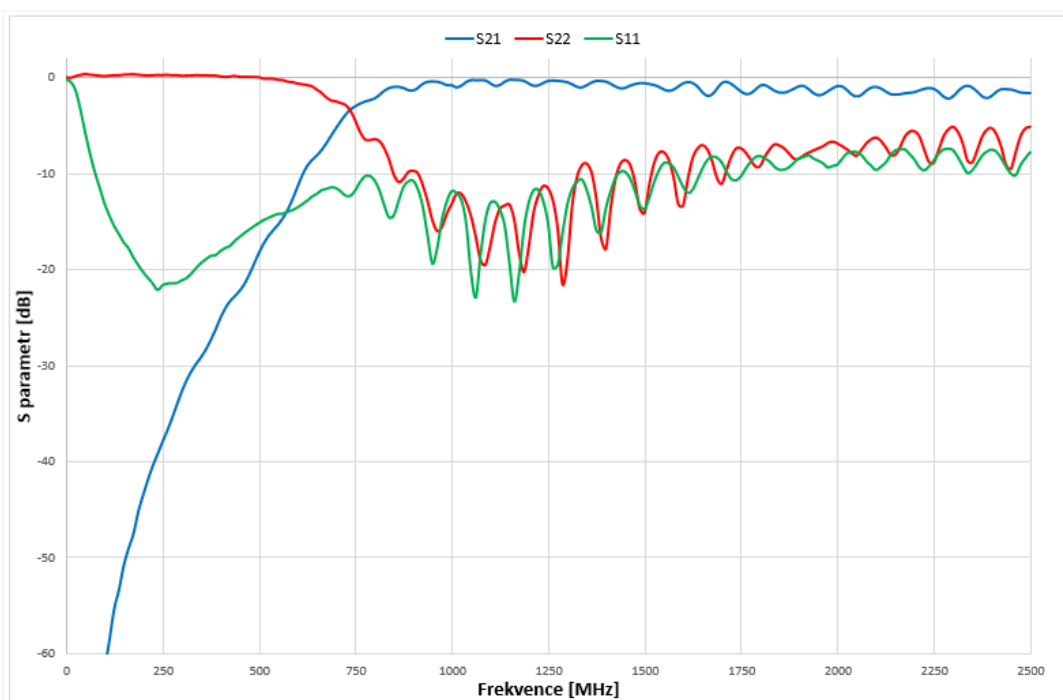
Obr. 5.3: Srovnání naměřených a simulovaných hodnot S11.

5.2 Měření DPS

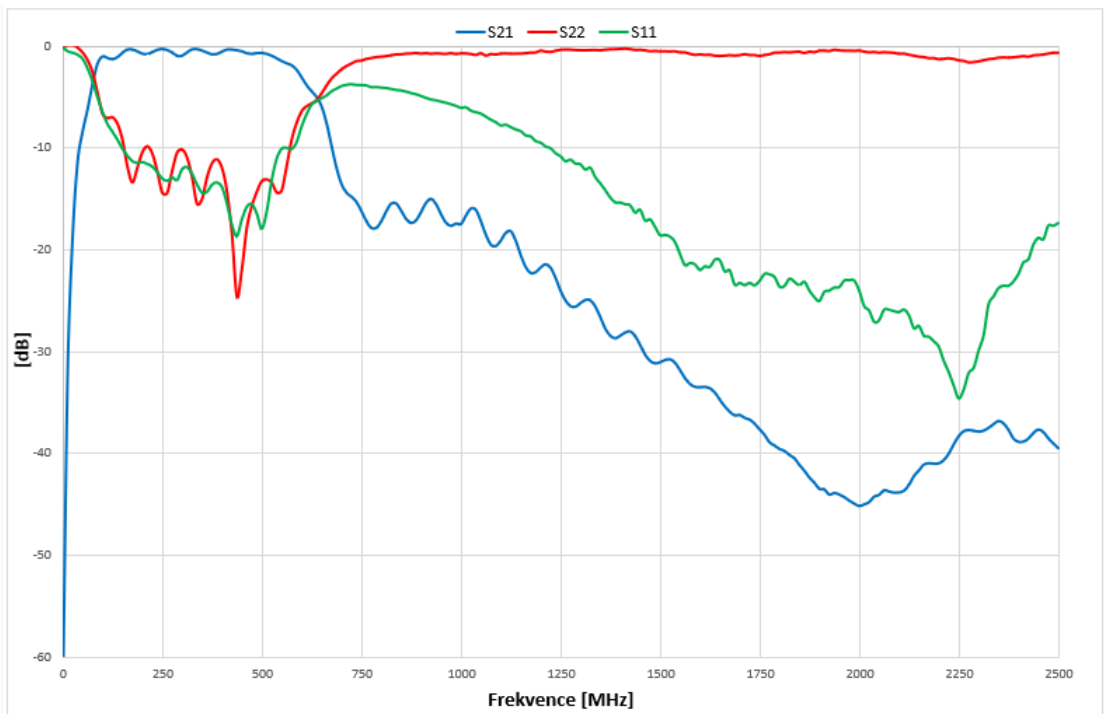
Dalším uskutečněným krokem bylo ověření funkčnosti navrhnutých DPS. Jako první byla ověřila funkčnost diplexerů na Rx desce, viz Obr. 5.4 a Obr. 5.5. Postupně se změřily oba porty (UHF a GPS) diplexeru, kdy druhý neměřený port byl zakončen impedancí $R = 50 \Omega$. Poté byla změřena druhá deska s LNA viz Obr. 5.6 a Obr.5.7. Dalším měřením byl zjištěn zisk LNA zesilovače PGA103+ viz Obr.5.8. Posledním měřením se ověřila funkčnost celé soustavy, tedy sloučení UHF a GPS, přenos do Rx DPS, rozložení signálů zpět na UHF a GPS viz Obr. 5.9 a Obr.5.10.



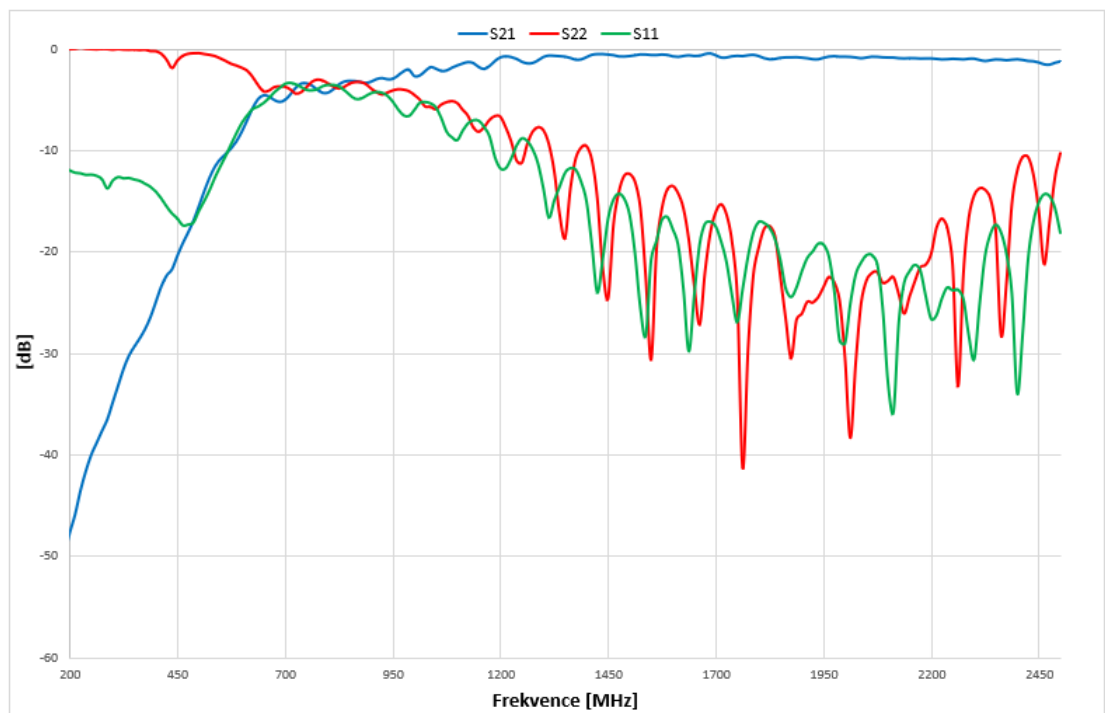
Obr. 5.4: Měření Rx diplexeru(UHF port aktivní).



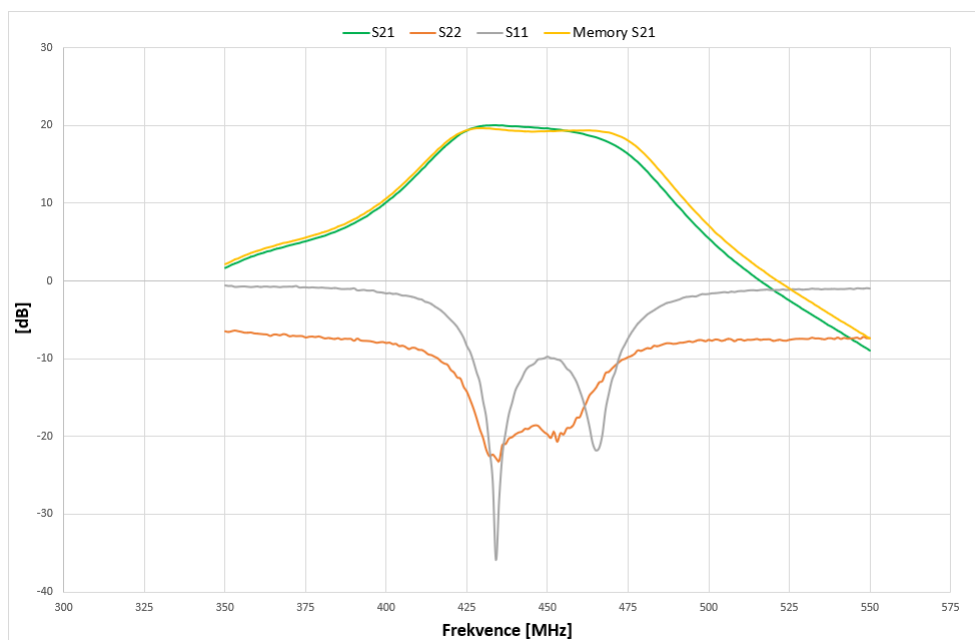
Obr. 5.5: Měření Rx diplexeru(GPS port aktivní).



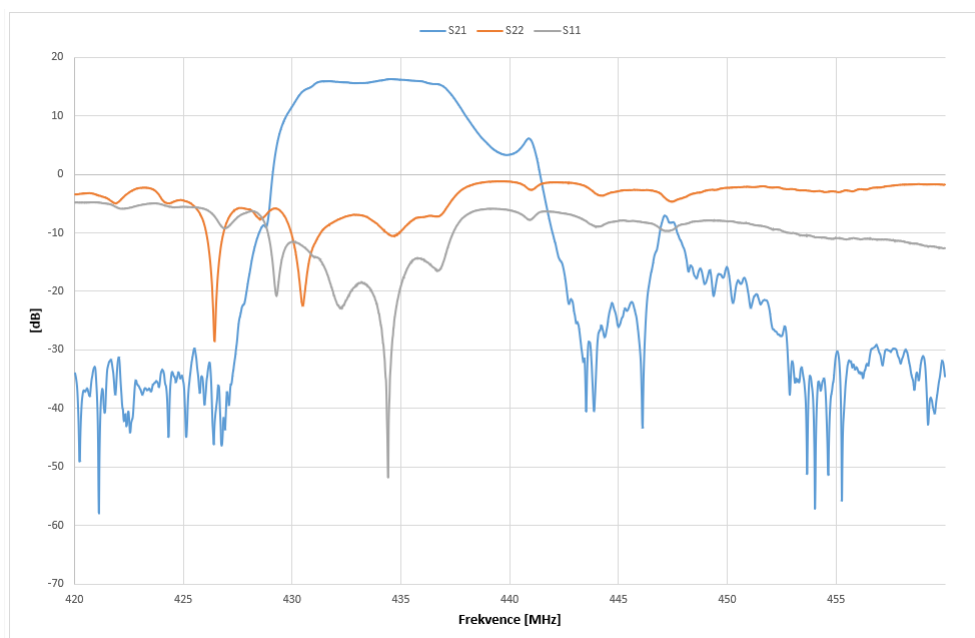
Obr. 5.6: Měření LNA diplexeru(UHF port aktivní).



Obr. 5.7: Měření LNA diplexeru(GPS port aktivní).



Obr. 5.8: Měření LNA zesilovače PGA103+.



Obr. 5.9: Měření celé soustavy, viz Obr. 5.10.



Obr. 5.10: Měření celého systému.

Závěr

Cílem této práce bylo optimalizovat anténu typu Lindenblad z hlediska příjmu v nadhlavníku a napájení. Toho bylo docíleno postupným seznámením s anténní problematikou, rozložením pásem a jejich vlastností, šíření elmag. vln v pásmech a jejich odolností vůči atmosférickým podmínkám. Následovalo hlubší seznámení s pásmem UHF a se všesměrovými anténami na tomto pásmu používanými.

Po nastudování problematiky bylo možné zvážit možnosti optimalizace Lindenbladovy antény. Prvním bodem optimalizace bylo ověření vlastností antény podle [24], toho bylo docíleno v kap.2.1, kdy anténa nebyla naladěna na zvolené pásmo $F = 435$ MHz. Tento problém byl vyřešen zkrácením ramen dipólu o $\Delta x = 2\text{cm}$ na hodnotu $L = 14$ cm viz Obr.2.4. Minimální příjem v nadhlavníku zvolený na hodnotu $S_{11_{Min}} = -15$ dB zajistil stejný náklon obou ramen dipólu ze svislé osy k jedné rovině. Simulacemi různých náklonů byl konečný úhel zvolen na hodnotu 15° , kdy při tomto náklonu vykazovala anténa vhodný činitel odrazu $S_{11} = -12,52$ dB viz Obr.2.5. Následovalo doladování AR, kdy byla zkrácená vzdálenost jednoho direktoru o $\Delta x = 2\text{cm}$ ve směru odklonu dipólů na hodnotu, oproti hodnotě z [24]. Tento krok vyladil AR hodnoty na 1,36 a 1,28 na příklonné/odklonné straně viz Obr.2.11.

Dále se tato práce zabývá optimalizací tohoto modelu z hlediska napájení. Bylo implementováno vnitřní uchycení koax. kabelu k dipólu viz Obr.4.8. Tento krok zamezí nechtěnému zatékání vody a vlhkosti ke spoji a částečně stabilizuje spojení při zhoršených povětrnostních podmínkách.

Následujícím úkolem bylo navrhnout předzesilovač s PGA103+, napájecí vyhybky a diplexer pro přenos UHF a GPS referenčního signálu po jednom vedení k Rx. Předzesilovač bylo doporučeno použít dodaný, viz kap.3.2, jelikož tento návrh nebyl primárním cílem práce. Napájecí vyhybky byly navrženy dle teorie (počítáno s $6 \cdot Z_0$). Diplexer byl navržen s centrální frekvencí $F_c = 857,46$ MHz viz Obr.3.3, kdy při měření byla ověřena funkcionalita návrhu, ale F_c se přesunula na $F_c = 750$ MHz u Rx diplexeru a $F_c = 650$ MHz u LNA diplexeru viz Obr.5.4. Příčinou je možná záměna komponent při pájení či parazitní jevy na DPS. Další parametry nebylo možné změřit, z důvodu omezeného přístupu do laboratoří během karantény při koronavirové krizi.

Předposlední část se zabývala návrhem mechanické části. Byl navržen centrální příklopný systém, ve kterém jsou připraveny prostory pro držadla direktorů, samotný dipól a pro koax. kabel o maximálním průměru 1 cm.

Literatura

- [1] Curiosity Mission. *NASA* [online]. [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/overview/index.html
- [2] Mars Insight mission. *NASA* [online]. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://mars.nasa.gov/insight/mission/overview/>
- [3] CAINI, C., R. FIRRINCIELI, T. DE COLA, I. BISIO, M. CELLO a G. ACAR. Mars to Earth communications through orbiters: Delay-Tolerant/Disruption-Tolerant Networking performance analysis. *International Journal of Satellite Communications and Networking* [online]. 2014, **32**(2), 127-140 [cit. 2020-05-29]. DOI: 10.1002/sat.1043. ISSN 15420973. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/sat.1043>
- [4] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN isbn80-214-1869-9.
- [5] CURRY, G. Richard. *Radar Essentials: A concise handbook for radar design and performance analysis*. Raleigh, NC: SciTech Publishing, 2012. ISBN 978-161-3531-563.
- [6] KORBEL, M. Vliv tvaru Země a atmosféry na činnost leteckých navigačních zařízení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojíního inženýrství, 2010. 37 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Slavomír Vosecký, CSc.
- [7] BO REN, Bo Ren, Longfei Shi LONGFEI SHI, Yuliang Chang YULIANG CHANG, Xuesong Wang XUESONG WANG a Guoyu Wang GUOYU WANG. Polarization statistical properties of electromagnetic waves radiated from communication base stations to UHF band radar. *IET International Radar Conference 2015* [online]. Institution of Engineering and Technology, 2015, 2015, , 5 .-5 . [cit. 2020-05-29]. DOI: 10.1049/cp.2015.1057. ISBN 978-1-78561-038-7. Dostupné z: <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2015.1057>
- [8] IEEE. *521-2019 - IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands* [online]. 14 .2. 2020 [cit. 2020-05-29]. DOI: 10.1109/IEEE-ESTD.2020.8999849. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8999849>
- [9] VYUŽITÍ RÁDIOVÉHO SPEKTRA. *Český telekomunikační úřad* [online]. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <http://spektrum.ctu.cz/>

- [10] ZHONG, Caijun. *Capacity and performance analysis of advanced multiple antenna*. 2010/04/28.
- [11] HANUS, Stanislav a Jiří SVÁČINA. *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika: přednášky*. Vyd. 2., dopl. Brno: Vysoké učení technické, 2002. ISBN isbn80-214-2222-x.
- [12] Polarization. *Link Communications Systems* [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://www.linksystems-uk.com/vsat-polarization/>
- [13] MIKULÁŠEK, Tomáš a Jaroslav LÁČÍK. *Dvoupásmová anténa pro Globální navigační satelitní systém: Dualband Antenna for Global Navigation Satellite System*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009.
- [14] Dave3457. Circular polarization. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9861581>
- [15] SMUTNÝ, M. Anténa pro impulzní širokopásmový signál. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2015. 55 s., 0 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.
- [16] SHRESTHA, S. a N. C. KARMAKAR. Null mitigation of planar RFID tag antennas. In: *2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*. 2015, s. 1-4.
- [17] KAWAKAMI, Haruo. A Review of and New Results for Broadband Antennas for Digital Terrestrial Broadcasting: The Modified Batwing Antenna. *IEEE Antennas and Propagation Magazine* [online]. 2010, **52**(6), 78-88 [cit. 2020-06-01]. DOI: 10.1109/MAP.2010.5723226. ISSN 1045-9243. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5723226/>
- [18] Antenna Theory - Turnstile Antenna. *Tutorialspoint* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/turnstile_antenna_theory.htm
- [19] Turnstile crossed dipole antenna for 430 - 440Mhz (70cm). In: *Giga technology* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: http://www.giga.co.za/ocart/index.php?route=product/product&product_id=370
- [20] Batwing antenna. In: *Bruce's AM log* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://www.bamlog.com/wace.htm>

- [21] ZAKI, S B M, M H AZAMI, T. YAMAUCHI, S KIM, H MASUI a M CHO. Design, Analysis and Testing of Monopole Antenna Deployment Mechanism for BIRDS-2 CubeSat Applications. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2019, **1152** [cit. 2020-06-01]. DOI: 10.1088/1742-6596/1152/1/012007. ISSN 1742-6588. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1152/1/012007>
- [22] PITTELLA, Erika, Stefano PISA a Augusto NASCETTI. *Design of an Antenna System for CubeSat Satellites*. 2013/02/03.
- [23] Projekt SKCUBE. In: *SOSA - Slovenská organizácia pre vesmírne aktivity* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://sosa.sk/sk/projekt-skcube/>
- [24] MONTEIRO, Anthony. A Parasitic Lindenblad Antenna for 70cm. In: *The Radio Amateur Satellite Corporation* [online]. [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.amsat.org/wordpress/wp-content/uploads/2014/01/70ParaLindy.pdf>
- [25] Diplexer UHF/VHF. In: *Summit Source* [online]. [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.summitsource.com/Channel-Plus-CP-2532-Diplexer-2-Way-Signal-Splitter-Combiner-1-GHz-DC-and-IR-Blocking-Bi-Directional-Video-Coaxial-Cable-UHF-VHF-HD-TV-Antenna-Splitter-Combiner-Part-SP2532-P9416.aspx>
- [26] WARD, Peter. Make yourself a Diplexer. *The Geelong Amateur Radio Club* [online]. [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: http://vk3at1.org/technical/Diplexer_1cc.pdf
- [27] *Tonne software* [online]. [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <http://www.tonnesoftware.com/>
- [28] *LTspice XVII* [online]. [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltpice-simulator.html>
- [29] SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Elektřina a magnetismus*. Vyd. 2., opr. a rozš. Praha: Academia, 2002. ISBN isbn80-200-1004-1.
- [30] Original Prusa I3 Multi material 2S. In: *Prusa Research* [online]. [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/original-prusa-i3-multi-material-2/>
- [31] 3D printed homes. *Construction of buildings on demand* [online]. [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://cobod.com/>

Seznam symbolů, veličin a zkratek

| | |
|--------------|--|
| AU | Astronomická jednotka |
| AR | Axial ratio (Osový poměr) |
| BTS | Base Transceiver Station (Základní převodní stanice) |
| CAD | Computer aided design (Počítačově podporované kreslení) |
| DPS | Deska plošných spojů |
| EPIRB | Emergency position-indicating radiobeacon station |
| GPR | Global positioning system |
| GPS | Global System for Mobile (Mobilní signál) |
| GSM | Ground Penetrating radar |
| HFSS | High frequency structure simulator (Vysokofrekvenční simulátor struktur) |
| HPF | High pass filter (Filtr typu horní propust) |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers (Institut elektrotechnických inženýrů) |
| ILS | Instrument Landing System |
| ISS | International Space Station |
| ITU | International Telecommunication Union |
| LHCP | Left hand polarization (levotočivá polarizace) |
| LTE | Long Term Evolution (Přenos mobilních dat) |
| LEO | Low Earth orbit (Nízká oběžná dráha) |
| LNA | Low noise amplifier (Nízkošumový zesilovač) |
| LPF | Low pass filter (Filtr typu dolní propust) |
| PSV | Poměr stojatých vln |
| PPDR | Public Protection and Disaster Relief |
| Rx | Receiver - Přijímač |

| | |
|-------------|--|
| RHCP | Right hand polarization (pravotočivá polarizace) |
| Tx | Tranmitter - Vysílač |
| UHF | Ultra high frequency (Ultra krátké vlny) |

Seznam příloh

A Obsah přiloženého CD

64

A Obsah přiloženého CD

| | |
|---|---------------------------------|
| / | kořenový adresář přiloženého CD |
| ├── 3D model | |
| │ ├── HFSS | Modely antén pro simulace |
| │ │ ├── Antenna_Lindenblad.aedt | |
| │ │ └── Antenna_Sykora.aedt | |
| │ ├── SolidWorks | soubory modelu pro 3D tisk |
| │ │ ├── ARM_30_long.SLDPRT | |
| │ │ ├── ARM_30_short.SLDPRT | |
| │ │ ├── ARM_40.SLDPRT | |
| │ │ ├── Buttons.SLDPRT | |
| │ │ ├── Core_down.SLDPRT | |
| │ │ ├── Core_upper_2.SLDPRT | |
| │ │ ├── Dipol.SLDDRW | |
| │ │ ├── Dipol.SLDPRT | |
| │ │ ├── Direktor.SLDPRT | |
| │ │ ├── Sestava1.SLDASM | |
| │ │ └── Top_button.SLDPRT | |
| │ ├── Antena_dokumentace.PDF | |
| │ ├── Antena_dokumentace_natoceni.PDF | |
| │ ├── Dipol_vrtání.PDF | |
| │ ├── SolidWorks.txt .3 STL | soubory modelu pro 3D tisk |
| │ │ ├── ARM_30_long.STL | |
| │ │ ├── ARM_30_short.STL | |
| │ │ ├── ARM_40.STL | |
| │ │ ├── Buttons.STL | |
| │ │ ├── Core_down.STL | |
| │ │ ├── Core_upper_2.STL | |
| │ │ ├── Cover.STL | |
| │ │ ├── Support_mount.STL | |
| │ │ └── Top_button.STL | |
| ├── DPS | soubory DPS |
| │ ├── Readme.txt | |
| │ ├── Sykora_BP_DC.brd | |
| │ ├── Sykora_BP_DC.sch | |
| │ ├── Sykora_BP_DC.PDF | |
| │ ├── Sykora_BP_DC_schema.PDF | |
| │ ├── Sykora_BP_diplexer02.brd | |
| │ ├── Sykora_BP_diplexer02.sch | |
| │ ├── Sykora_BP_diplexer02.PDF | |
| │ └── Sykora_BP_diplexer02_schmea.PDF | |
| ├── LTSpice | Návrh diplexeru |
| │ └── Draft3.asc | |