

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2022

Bc. Ondřej Povolný



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LOGARITMICKO-PERIODICKÁ ANTÉNA PRO UHF PÁSMO

LOG-PERIODIC ANTENNA FOR UHF BAND

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Povolný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslav Láčák, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Ondřej Povolný

ID: 184069

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Logaritmicko-periodická anténa pro UHF pásmo

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem činnosti logaritmicko-periodických antén. Navrhněte logaritmicko-periodickou anténu pro kmitočtové pásmo 400 MHz až 3 GHz a ve vhodném programu vytvořte její model. Anténu optimalizujte v zadaném kmitočtovém pásmu tak, aby vstupní činitel odrazu byl maximálně -10 dB a zisk alespoň 7 dBi. Diskutujte vliv anténního krytu na vlastnosti antény.

Navrženou anténu realizujte ve dvou kusech a experimentálně ověřte její vlastnosti. Diskutujte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PROCHÁZKA, M. Antény - encyklopedická příručka, Praha: BEN - technická literatura, 2001.
- [2] BALANIS, C., A., Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd Edition, John Wiley and Sons, New Jersey, 2005.
- [3] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z., Antény a šíření rádiových vln. Brno: FEKT VUT v Brně, 2005.

Termín zadání: 11.2.2022

Termín odevzdání: 11.8.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslav Láčik, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Diplomová práce se zabývá návrhem, analýzou a optimalizací logaritmicko-periodické antény pro měření v pásmu UHF. Anténa je v práci představena spolu s návrhovými vztahy, simulována a optimalizována pro minimalizaci vstupního činitele odrazu a maximalizaci zisku. Dále je doplněna krytem a úchytem a výsledky simulací jsou porovnány pro anténu bez krytu. Nakonec je nastíněna konstrukce antény.

KLÍČOVÁ SLOVA

logaritmicko-periodická anténa, EMC, anténa, měřicí anténa

ABSTRACT

Master's thesis is focused on the design, analysis and optimization of a log-periodic dipole antenna for UHF measurements. Antenna is introduced with design equations, simulated and optimized to minimize input port reflection coefficient and maximize gain. After that, the antenna cover and possibility of bolting of the antenna are introduced and the simulation results are compared for the antenna without cover. Finally the antenna construction is introduced.

KEYWORDS

log-periodic dipole antenna, EMC, antenna, measuring antenna

POVOLNÝ, Ondřej. *Logaritmicko-periodická anténa pro UHF pásmo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2022, 69 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslav Láčák, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Ondřej Povolný
VUT ID autora: 184069
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečné práce: Logaritmicko-periodická anténa pro UHF pásmo

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jaroslavu Láčkoví, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	19
1 Logaritmicko-periodická anténa	21
1.1 Popis logaritmicko-periodické antény	21
1.2 Popis návrhu	24
1.2.1 Přehled jednotlivých bodů návrhu	24
1.2.2 Jednotlivé body návrhu	24
2 Návrh a optimalizace antény	29
2.1 Řešení návrhu antény	29
2.2 Software a řešič užitý pro analýzu antény	31
2.3 Analýza antény	33
2.4 Analýza krytu antény	36
2.5 Výroba a měření antény	39
Závěr	47
Literatura	49
Seznam symbolů a zkratk	51
Seznam příloh	53
A Směrové charakteristiky pro anténu bez krytu	55
B Směrové charakteristiky pro anténu bez krytu - rozdělené složky	57
C Směrové charakteristiky pro anténu s krytem	59
D Směrové charakteristiky pro anténu s krytem - rozdělené složky	61
E Směrové charakteristiky pro anténu s krytem a úchytem	63
F Směrové charakteristiky pro anténu s krytem a úchytem - rozdělené složky	65
G Výkres antény	67
H Výkres krytu	69

Seznam obrázků

1.1	Diagram logaritmicko-periodické antény (překresleno a upraveno z [2])	22
1.2	Diagram logaritmicko-periodické antény s vyznačenými konstrukčními parametry (překresleno a upraveno z [2])	23
1.3	Nomogram pro určení σ a τ pro danou směrovost D_0 (převzato z [4])	25
1.4	Nomogram pro určení Z_0/R_{in} pro danou Z_a , parametrem je σ' (převzato z [4])	27
2.1	Anténa v CST se zobrazenými doplňkovými rozměry	32
2.2	Navržená anténa v CST MWS	33
2.3	Závislost S11 na kmitočtu - původní anténa	33
2.4	Závislost S11 na kmitočtu - optimalizace rozteče mezi ráhny S	34
2.5	Závislost S11 na kmitočtu - optimalizace délky zkratu L_{shunt}	34
2.6	Závislost S11 na kmitočtu - optimalizovaná anténa	35
2.7	Závislost zisku na kmitočtu - optimalizovaná anténa	35
2.8	Závislost anténního faktoru na kmitočtu - optimalizovaná anténa	36
2.9	Závislost polohy fázového středu na kmitočtu - optimalizovaná anténa	37
2.10	Navržená anténa v CST s krytem	37
2.11	Závislost S11 na kmitočtu - anténa s krytem	38
2.12	Závislost zisku na kmitočtu - anténa s krytem	38
2.13	Závislost anténního faktoru na kmitočtu - anténa s krytem	39
2.14	Závislost polohy fázového středu na kmitočtu - anténa s krytem	40
2.15	Navržená anténa v CST s krytem a úchytem	40
2.16	Závislost S11 na kmitočtu - anténa s krytem a úchytem	41
2.17	Závislost zisku na kmitočtu - anténa s krytem a úchytem	41
2.18	Závislost anténního faktoru na kmitočtu - anténa s krytem a úchytem	42
2.19	Závislost polohy fázového středu na kmitočtu - anténa s krytem a úchytem	43
2.20	Porovnání závislosti S11 na kmitočtu	44
2.21	Porovnání závislosti zisku na kmitočtu	44
2.22	Porovnání závislosti anténního faktoru na kmitočtu	45
2.23	Porovnání závislosti polohy fázového středu na kmitočtu	46
A.1	Směrová charakteristika pro anténu bez krytu - kmitočty 400 MHz	55
A.2	Směrová charakteristika pro anténu bez krytu - kmitočty 1700 MHz	55
A.3	Směrová charakteristika pro anténu bez krytu - kmitočty 3000 MHz	56
B.1	Směrová charakteristika pro anténu bez krytu - kmitočty 400 MHz	57
B.2	Směrová charakteristika pro anténu bez krytu - kmitočty 1700 MHz	57
B.3	Směrová charakteristika pro anténu bez krytu - kmitočty 3000 MHz	58
C.1	Směrová charakteristika pro anténu s krytem - kmitočty 400 MHz	59

C.2	Směrová charakteristika pro anténu s krytem - kmitočet 1700 MHz .	59
C.3	Směrová charakteristika pro anténu s krytem - kmitočet 3000 MHz .	60
D.1	Směrová charakteristika pro anténu s krytem - kmitočet 400 MHz . .	61
D.2	Směrová charakteristika pro anténu s krytem - kmitočet 1700 MHz .	61
D.3	Směrová charakteristika pro anténu s krytem - kmitočet 3000 MHz .	62
E.1	Směrová charakteristika pro anténu s krytem a úchytem - kmitočet 400 MHz	63
E.2	Směrová charakteristika pro anténu s krytem a úchytem - kmitočet 1700 MHz	63
E.3	Směrová charakteristika pro anténu s krytem a úchytem - kmitočet 3000 MHz	64
F.1	Směrová charakteristika pro anténu s krytem a úchytem - kmitočet 400 MHz	65
F.2	Směrová charakteristika pro anténu s krytem a úchytem - kmitočet 1700 MHz	65
F.3	Směrová charakteristika pro anténu s krytem a úchytem - kmitočet 3000 MHz	66
G.1	Výkres antény	67
H.1	Výkres krytu	69

Seznam tabulek

2.1	Vstupní požadavky na anténu	29
2.2	Zvolené parametry návrhu	29
2.3	Vypočtené hodnoty pro l_n , s_n a w_n	30
2.4	Optimalizované parametry antény	34

Úvod

Tato práce se zabývá návrhem a analýzou logaritmicko-periodické antény pro užití v měřící technice. V první kapitole je logaritmicko-periodická anténa představena, jsou uvedeny základní parametry a principy antény a potřebné návrhové vztahy. Tyto návrhové vztahy jsou následně užity v druhé kapitole pro návrh antény. Anténa je poté simulována v programu CST Studio Suite. Ve stejném programu je následně optimalizována pro splnění požadovaných parametrů. Nakonec je uvedená anténa doplněna o kryt antény a úchyt a výsledky jsou porovnány s anténou bez krytu. Je též nastíněn proces výroby dané antény.

Důležitým požadavkem pro návrh antény je minimalizace činitele stojatého vlnění PSV , čehož je dosaženo minimalizací vstupního činitele odrazu S_{11} . Hodnota S_{11} je požadována nižší, než -10 dB, kterému odpovídá $PSV \approx 2$. Dále je požadována maximalizace zisku antény pro zisk vyšší, než 7 dBi, což je standardní zisk pro uvedený typ antény. Finálně je požadován kmitočtový rozsah antény mezi 400 a 3000 MHz, což odpovídá anténě pro užití v UHF pásmu.

1 Logaritmicko-periodická anténa

V moderní době je pro různé oblasti využití nutný návrh specializovaných typů antén. Jedním z těchto typů je logaritmicko-periodická anténa, užívaná v měřicí technice pro určování vyzařování zdrojů elektromagnetických vln (např. zdrojů rušení v rámci EMC).

Logaritmicko-periodická anténa (v zahraniční literatuře též označována jako log-periodic dipole antenna, LPDA) je anténní soustava s podélným vyzařováním (tj. elektromagnetická vlna je podélná). Původní koncept logaritmicko-periodické antény byl představen v roce 1960 v [1] s popisem návrhu uvedeným v [2] a opraveným v [3]. V této kapitole bude uvedena anténa představena spolu s provedeným návrhem dle zadaných parametrů.

1.1 Popis logaritmicko-periodické antény

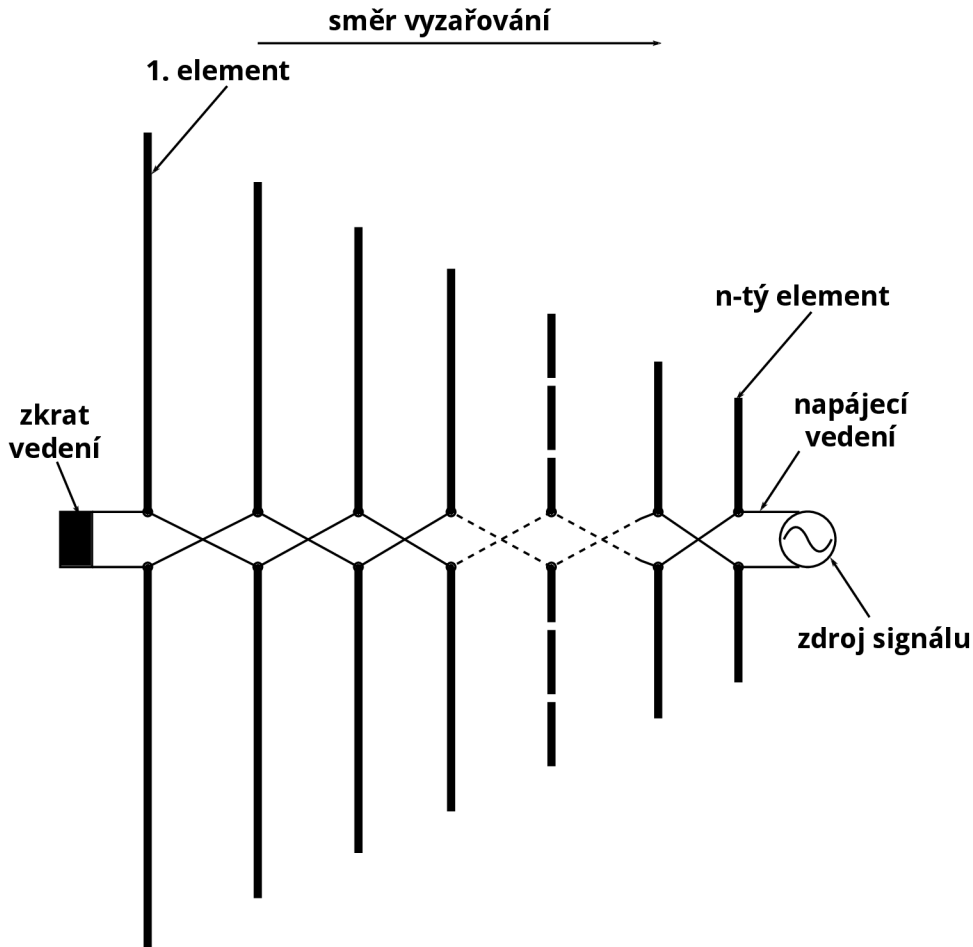
Diagram antény zobrazen na obrázku 1.1. V dalším textu platí, že pro nejdelší element (tj. element s nejnižším rezonančním kmitočtem) je jeho index $n = 1$.

Logaritmicko-periodická anténa je širokopásmová anténa se standardní šířkou pásma pohybující se kolem $f_{\max} : f_{\min} > 2 : 1$ při udržení nízkého činitele odrazu S_{11} a přibližně konstantní charakteristické impedance v celém kmitočtovém pásmu.

U logaritmicko-periodické antény jsou veškeré elementy aktivní a buzeny z jednoho zdroje. Pro každý vysílaný kmitočet je pak možné definovat aktivní oblast, ve kterém jsou umístěny elementy antény, které jsou svou délkou blízké $\lambda/2$. Tato aktivní oblast se podílá na vyzařování antény. Elementy, pro které platí $l \ll \lambda/2$, poté vykazují kapacitní charakter a jejich schopnost vyzařovat je omezena, z tohoto důvodu je jejich příspěvek k vyzařování v dopředném směru minimální. Tyto elementy se však budou podílet na vyzařování antény jako pomocné direktory, dovolující vysokou směrovost ve směru hlavního laloku. Podobně elementy, pro které platí $l \gg \lambda/2$, poté vykazují induktivní charakter a mají též omezenou schopnost vyzařovat na kmitočtu aktivní oblasti a nebudou se podílet na vyzařování na daném kmitočtu, jejich funkce však bude jako reflektory omezující vyzařování do zpětného směru (vznikem destruktivní interference budící elektromagnetické vlny) a tím zmenšení zpětného a postraních laloků antény.

Uvedená aktivní oblast se opakuje periodicky pro celou pracovní šířku pásma antény, což dovoluje výše uvedenou širokopásmovost antény. Tato širokopásmovost je však vykoupena nižším ziskem antény, standardně v rozsahu 7 – 12 dBi[4]. Nižší zisk je způsoben menším počtem aktivních prvků, které se podílí na vyzařování, u logaritmicko-periodické antény však postačuje v rámci jejího určení (měřicí antény).

Konstrukční parametry antény jsou zobrazeny na obrázku 1.2.



Obr. 1.1: Diagram logaritmicko-periodické antény (překresleno a upraveno z [2])

Označení logaritmicko-periodická anténa vyplývá z konstrukce antény – veškeré konstrukční parametry antény (tj. délka elementu l_n , vzdálenost mezi elementy s_n , vzdálenost elementu od prvního R_n průměr elementu d_n a šířka mezi svorkami napájení ramen dipólu g_n) definovány pomocí logaritmické závislosti na převrácené hodnotě činitele škálování τ , viz [3]. Tato závislost je uvedena ve vztahu (1.1).

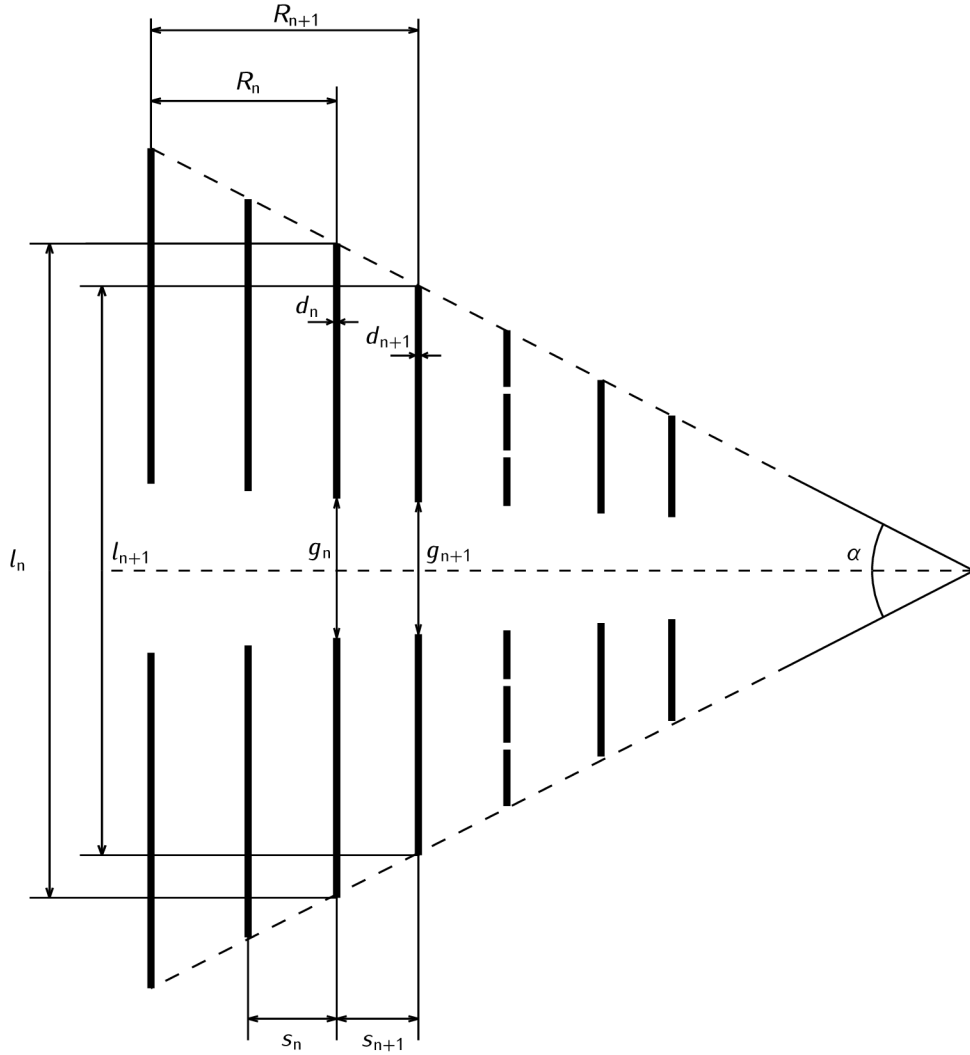
$$\tau = \frac{l_2}{l_1} = \frac{l_{n+1}}{l_n} = \frac{d_{n+1}}{d_n} = \frac{s_{n+1}}{s_n} = \frac{R_{n+1}}{R_n} = \frac{g_{n+1}}{g_n} \quad (1.1)$$

Parametr τ představuje jeden z návrhových parametrů antény a periodu, po které se opakují prvky podléjící se na vyzařování antény. Z (1.1) platí vztah

$$\tau = \frac{l_{n+1}}{l_n} = \frac{f_n}{f_{n+1}} \quad (1.2)$$

a po zlogaritmování (1.2) a úpravě platí vztah

$$\log(f_{n+1}) = \log(f_n) - \log(\tau) \quad (1.3)$$



Obr. 1.2: Diagram logaritmicko-periodické antény s vyznačenými konstrukčními parametry (překresleno a upraveno z [2])

tj. rezonanční kmitočty antény narůstá periodicky, a to vždy po $|\log(\tau)|$ (viz např. [6]).

Periodičnost elementů je možné pozorovat v oscilacích závislosti S_{11} na kmitočtu, a to vysokým poklesem S_{11} pro kmitočty s vlnovou délkou λ_n , pro které platí, že

$$\lambda_n = 2l_n \quad (1.4)$$

Na uvedených kmitočtech je element, kolem kterého je určena aktivní oblast, v rezonanci. Ze závislosti S_{11} na kmitočtu je možné pozorovat i logaritmickou závislost, kdy rozestupy mezi poklesy narůstají logaritmicky s rostoucím kmitočtem.

Dalšími důležitými parametry, které se objevují při návrhu logaritmicko-periodické antény, jsou vrcholový úhel antény α a činitel vzdáleností σ . Pro σ platí vztah (1.5)

$$\sigma = \frac{R_n - R_{n+1}}{2l_n} \quad (1.5)$$

a protože je z diagramu 1.2 patrné, že

$$s_n = R_n - R_{n+1} \quad (1.6)$$

je možné vztah (1.5) přepsat užitím (1.6) do podoby

$$\sigma = \frac{s_n}{2l_n} \quad (1.7)$$

Pro α následně platí vztah

$$\alpha = \cot\left(\frac{1 - \tau}{4\sigma}\right) \quad (1.8)$$

1.2 Popis návrhu

Původní algoritmus návrhu logaritmicko-periodické antény je uveden v [2]. Součástí uvedeného článku je nomogram, který zobrazuje závislost směrovosti antény D_0 na τ a σ . V původním článku je však chyba způsobující, že reálné směrovosti antén vycházely v průměru o 1 – 2 dB větší, než teoretický návrh. Tato chyba byla uvedena a opravena v [3]. V této práci je užit již opravený nomogram a postup, uvedený např. v [4].

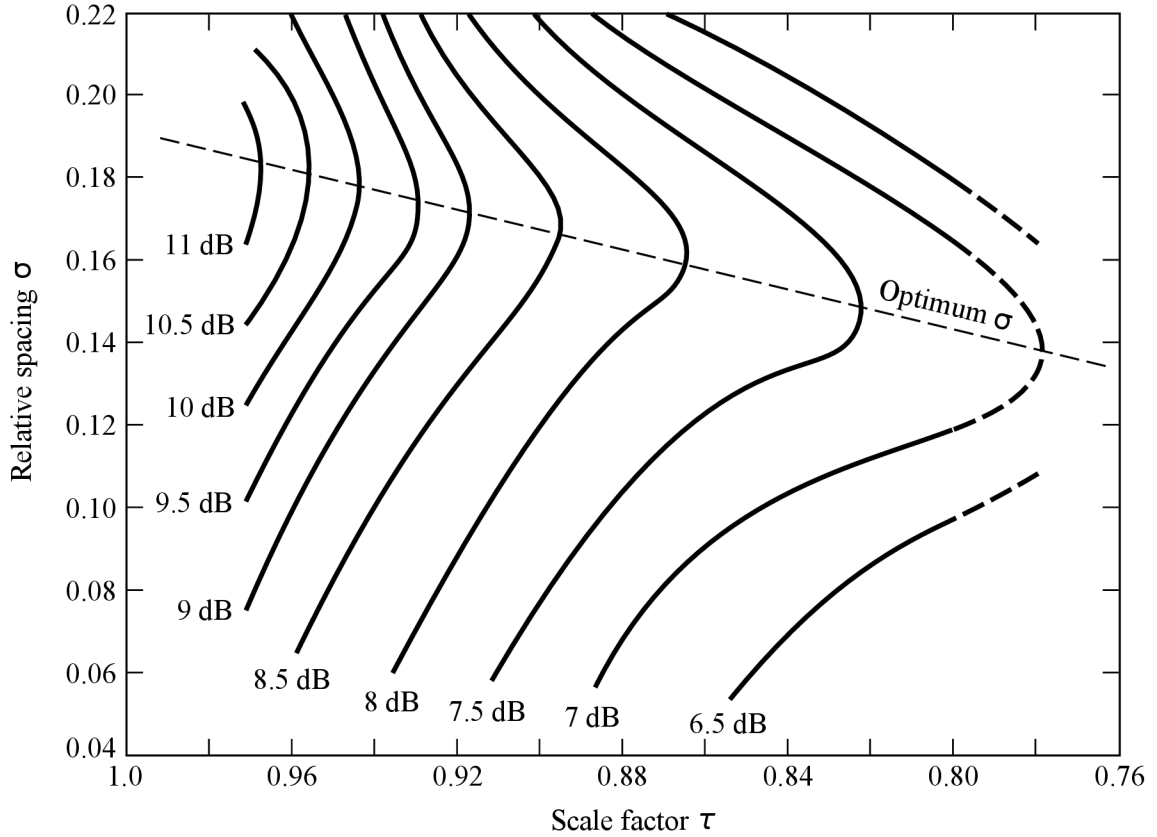
1.2.1 Přehled jednotlivých bodů návrhu

Vstupními parametry návrhu jsou dolní (f_{min}) a horní (f_{max}) mezní kmitočety, směrovost antény, vstupní impedance R_{in} a předpokládaný průměr prvního elementu d_1 . Proces návrhu je možné rozdělit do následujících fází:

1. určení parametrů τ , σ z nomogramu 1.3,
2. určení α (1.8),
3. určení šířky pásma aktivního regionu antény B_{ar} (1.10),
4. určení šířky návrhového pásma B_s (1.12),
5. určení celkové délky antény L (1.13) a počtu elementů N (1.16),
6. určení délek l_n (1.17) a vzdáleností mezi středy s_n (1.18) jednotlivých elementů,
7. určení průměrné charakteristické impedance elementů Z_a (1.19) a relativní střední vzdálenosti σ' (1.22),
8. určení charakteristické impedance napáječe Z_0 ,
9. určení vzdálenosti středů mezi vodiči napájecího vedení S (1.24),
10. určení činitele stojatého vlnění PSV (1.25).

1.2.2 Jednotlivé body návrhu

Parametry σ a τ jsou určeny pomocí nomogramu na obrázku 1.3, kde parametrem je směrovost antény. Při řešení je vhodné volit hodnoty σ a τ , které v uvedeném



Obr. 1.3: Nomogram pro určení σ a τ pro danou směrovost D_0 (převzato z [4])

nomogramu leží na přímce označené jako "Optimal σ ", pro kterou platí (viz [5])

$$\sigma = 0,243\tau - 0,051 \quad (1.9)$$

Pro jednoduchost je možné v literatuře nalézt i tabelované optimální hodnoty parametrů (např. v [6]), které jsou užity i při řešení v této práci.

Pro určení vrcholového úhlu α je užít vztah (1.8). Jak je z (1.8) a obrázku 1.3 patrné, se zvyšujícím se požadavkem na směrovost rostou i hodnoty σ a τ , což má za následek zmenšování hodnoty α .

Pro určení B_{ar} , tj. šířky pásma týkající se prvků antény, které jsou právě naladěné, platí vztah

$$B_{ar} = 1,1 + 7,7(1 - \tau)^2 \cot(\alpha) \quad (1.10)$$

Standardně je logaritmicke-periodická anténa navrhována na větší šířku pásma, než by byla dána známým vztahem

$$B = \frac{f_{max}}{f_{min}} \quad (1.11)$$

z tohoto důvodu určujeme šířku návrhového pásma jako součin 1.10 a 1.11, tj.

$$B_s = B_{ar}B \quad (1.12)$$

Pro celkovou délku antény L platí vztah

$$L = \frac{l_1}{2} \left(1 - \frac{1}{B_s}\right) \cot(\alpha) \quad (1.13)$$

kde

$$l_1 = \frac{\lambda_{max}}{2} \quad (1.14)$$

je délka nejdelšího elementu antény (rezonujícím na nejnižším mezním kmitočtu f_{min} s největší vlnovou délkou λ_{max}). Pro λ_{max} tedy platí

$$\lambda_{max} = \frac{v}{f_{min}} \quad (1.15)$$

kde v je rychlost šíření elektromagnetické vlny v médiu, ve kterém je anténa umístěna. Pro účely práce považujeme $v = c$, tj. rychlosti světla ve vakuu, pokud není řečeno jinak.

Nyní je možné ze získaných parametrů určit počet elementů antény N , a to vztahem

$$N = 1 + \frac{\ln(B_s)}{\ln\left(\frac{1}{\tau}\right)} \quad (1.16)$$

V případě, že $N \notin \mathbb{N}$, je možné užít počet elementů, který odpovídá $\lfloor N \rfloor$, případně $\lceil N \rceil$. Délku jednotlivých elementů je následně možné určit úpravou ze vztahu (1.1), platí vztah

$$l_{n+1} = l_n \tau \Rightarrow l_1 \tau^n \quad (1.17)$$

Výsledek vztahu (1.17) je pak možné určit po úpravě vztahu (1.5) na

$$s_n = 2l_n \sigma \quad (1.18)$$

k určení vzdáleností mezi středy jednotlivých elementů. Pokud anténa nemá koaxiální napáječ, je v tuto chvíli návrh u konce. Pro anténu s koaxiálním napáječem je nutné určit rozteč mezi středy ráhen.

Nejdříve je určena průměrná charakteristická impedance elementů Z_a a relativní střední vzdálenost mezi elementy σ' . Pro Z_a platí vztah

$$Z_a = 120 \left[\ln\left(\frac{l_n}{d_n}\right) - 2,25 \right] \quad (1.19)$$

kde d_n je průměr n -tého elementu. V ideálním případě požadujeme, aby docházelo v závislosti na τ k zužování průřezů elementů. V praxi ([4], [5]) je však možné buď udržovat průřez elementů konstantní, případně užít pouze několik proměnlivých průřezů (např. 3 pro nízké, střední a vysoké kmitočty požadovaného pásma), pro které platí

$$\frac{l_n}{d_n} = \text{konst.} \quad (1.20)$$

Průřezy volíme jako kompromis mezi kompromitací přenosových vlastností antény a mechanické konstrukce. Pro design užitý v práci (jedna z možných navržených možností konstrukce, zmíněná v [5]) je užit motivu antény vytvořeného z vodivého plechu konstantní tloušťky t , kdy se mění v závislosti na l_n šířka elementů w_n , čímž je možné zajistit podmínku pro zužování elementů. Pro výpočet w_n je užit vztah

$$w_n = \frac{l_n}{t} \quad (1.21)$$

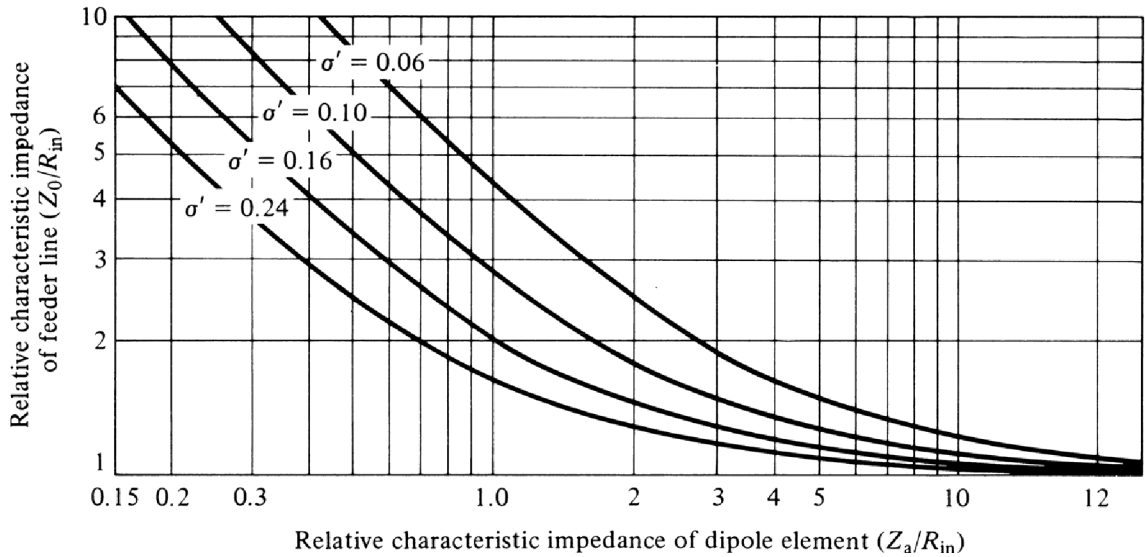
a pro výpočty je považováno, že $d_n = t$. Pro relativní střední vzdálenost mezi elementy platí vztah

$$\sigma' = \frac{\sigma}{\sqrt{\tau}} \quad (1.22)$$

Charakteristickou impedanci napáječe je možné určit dvěma způsoby. První možností, která je uvedena v [10], je užit vztah

$$Z_0 = \frac{R_{in}^2 \sqrt{\tau}}{8Z_a \sigma} + R_{in} \sqrt{\left(\frac{R_{in} \sqrt{\tau}}{8Z_a \sigma}\right)^2 + 1} \quad (1.23)$$

pro získání charakteristické impedance minimalizující činitel stojatého vlnění PSV . Druhou možností, navrženou v [2] je určení poměru mezi charakteristickou impedancí napáječe a vstupní impedance pomocí nomogramu, uvedeného na obrázku 1.4. Charakteristická impedance napáječe je následně užitá pro určení vzdálenosti



Obr. 1.4: Nomogram pro určení Z_0/R_{in} pro danou Z_a , parametrem je σ' (převzato z [4])

středů mezi ráhny S , pro kterou platí vztah

$$S = d_b \cosh\left(\frac{Z_0}{120}\right) \quad (1.24)$$

kde d_b je průměr ráhen. Finálně je nutné určit, jaká hodnota činitele stojatého vlnění PSV byla tímto získána. Činitel stojatého vlnění představuje poměr mezi maximem a minimem stojaté vlny získané interferencí odražené a přímé vlny šířící se na vedení. Platí vztah

$$PSV = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad (1.25)$$

kde ρ

$$\rho = \left| \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right| \quad (1.26)$$

je činitel odrazu, Z_1 , Z_2 jsou poměřované impedance. V tomto případě přejde vztah (1.26) na

$$\rho = \left| \frac{Z_0 - R_{in}}{Z_0 + R_{in}} \right| \quad (1.27)$$

2 Návrh a optimalizace antény

Anténa byla navržena v souladu s postupem představeným v kapitole 1.2. Následně byl návrh otestován v programu CST Studio Suite®, kde byla provedena potřebná analýza ve stavu bez i s uvažovaným krytem.

2.1 Řešení návrhu antény

Vstupní požadavky jsou shrnuty v tabulce 2.1. Návrh antény byl proveden pro smě-

Parametr	hodnota
f_{min}	400 MHz
f_{max}	3 GHz
S_{11}	< -10 dB
G	> 7 dBi

Tab. 2.1: Vstupní požadavky na anténu

rovost $D_0 = 7,5$ dB (z důvodu závislost σ a τ na D_0). Zvolené parametry jsou shrnuty v tabulce 2.2.

Parametr	hodnota
D_0	7,5 dB
R_{in}	50 Ω
d_b	10 mm
t	2 mm
d_n	2 mm

Tab. 2.2: Zvolené parametry návrhu

Z tabulky v [6] byly pro navrhovanou směrovost určeny činitelé τ a σ , tj. hodnoty $\tau = 0,824$, $\sigma = 0,146$. Z těchto parametrů byla určen vrcholový úhel α pomocí vztahu 1.8.

$$\alpha = \cot\left(\frac{1 - 0,824}{4 \cdot 0,146}\right) = 0,2927 \text{ rad} \quad (2.1)$$

Dále je určena šířka pásma B pomocí vztahu (1.11)

$$B = \frac{3 \cdot 10^9}{400 \cdot 10^6} = 7,5 \quad (2.2)$$

a šířka pásma aktivního regionu B_{ar} vztahem (1.10).

$$B_{ar} = 1,1 + 7,7(1 - 0,824)^2 \cot(0,2916) = 1,892 \quad (2.3)$$

Výsledky (2.2) a (2.3) jsou dosazeny do vztahu (1.12) pro určení navrhované šířky pásma B_s .

$$B_s = 1,895 \cdot 7,5 = 14,19 \quad (2.4)$$

Dále byla určena vlnová délka pro nejnižší rezonanční kmitočet požadovaného pásma λ_{max} pomocí vztahu

$$\lambda_{max} = \frac{3 \cdot 10^8}{400 \cdot 10^6} = 0,75 \text{ m} \quad (2.5)$$

a z λ_{max} je určena délka nejdelšího elementu l_1 vztahem (1.14).

$$l_1 = \frac{0,75}{2} = 0,375 \text{ m} \quad (2.6)$$

Výsledky (2.4), (2.6) a (2.1) byly dosazeny do vztahu (1.13) pro získání celkové délky antény L .

$$L = \frac{0,375}{2} \left(1 - \frac{1}{14,21}\right) \cot(0,2916) = 0,5807 \text{ m} \quad (2.7)$$

Následně byl určen počet elementů antény N vztahem (1.16).

$$N = 1 + \frac{\ln(14,21)}{\ln\left(\frac{1}{0,824}\right)} = 14,71 \approx 15 \quad (2.8)$$

Navržená anténa má tedy 15 elementů, jejich délky byly určeny vztahem (1.17), rozteče mezi středy vztahem (1.18) a jejich šířky pomocí vztahy (1.21). Jejich hodnoty jsou shrnuty v tabulce 2.3 (značení je konzistentní s obrázkem 1.2).

n	l_n [mm]	$s_{(n,n+1)}$ [mm]	w_n [mm]	n	l_n [mm]	s_n [mm]	w_n [mm]
1	375,0	109,9	24,14	9	79,70	23,27	5,130
2	309,0	90,23	23,89	10	65,67	19,18	4,227
3	254,6	74,35	16,39	11	54,11	15,87	3,483
4	209,8	61,26	13,50	12	44,59	13,07	2,870
5	172,9	50,48	11,13	13	36,74	10,77	2,365
6	142,5	41,60	9,169	14	30,28	8,876	1,949
7	117,4	34,27	7,555	15	24,95	—	1,606
8	96,72	28,24	6,226				

Tab. 2.3: Vypočtené hodnoty pro l_n , s_n a w_n

Protože je anténa napájena pomocí koaxiálního kabelu, byla určena vzdálenost mezi ráhny antény. Nejdříve byla určena průměrná charakteristická impedance elementů vztahem

$$Z_a = 120 \left[\ln \left(\frac{375 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \right) - 2,25 \right] = 56,06 \, \Omega \quad (2.9)$$

Pro minimalizaci PSV byla charakteristická impedance napáječe určena vztahem 1.23 dle [10].

$$Z_0 = \frac{50^2 \sqrt{0,824}}{8 \cdot 56,06 \cdot 0,146} + 50 \sqrt{\left(\frac{50 \sqrt{0,824}}{8 \cdot 56,06 \cdot 0,146} \right)^2 + 1} = 95,49 \, \Omega \quad (2.10)$$

Následně byla určena teoretická hodnota PSV pro ověření, zda byl dodržen požadavek na maximální hodnotu dle vztahů 1.27 a 1.25.

$$\rho = \left| \frac{95,49 - 50}{95,49 + 50} \right| = 0,3127 \quad (2.11)$$

$$PSV = \frac{1 + 0,08492}{1 - 0,08492} = 1,909 \quad (2.12)$$

Dále byla určena rozteč mezi středy ráhen, a to vztahem (1.24).

$$S = 10 \cdot 10^{-3} \cdot \cosh \left(\frac{95,49}{120} \right) = 13,33 \cdot 10^{-3} \, \text{m} \quad (2.13)$$

Nakonec je anténa doplněna zátěží zkratující konec antény dle [5], a to o délce dle vztahu (2.14).

$$L_{\text{shunt}} = \frac{\lambda_{\text{max}}}{8} \quad (2.14)$$

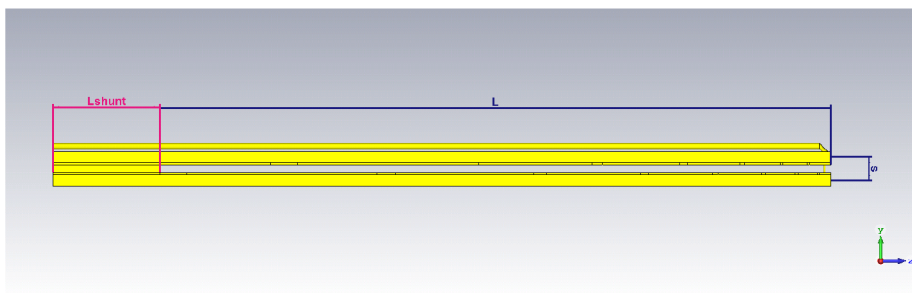
a po dosazení do (2.14) dostáváme

$$L_{\text{shunt}} = \frac{0,75}{8} = 93,75 \, \text{mm} \quad (2.15)$$

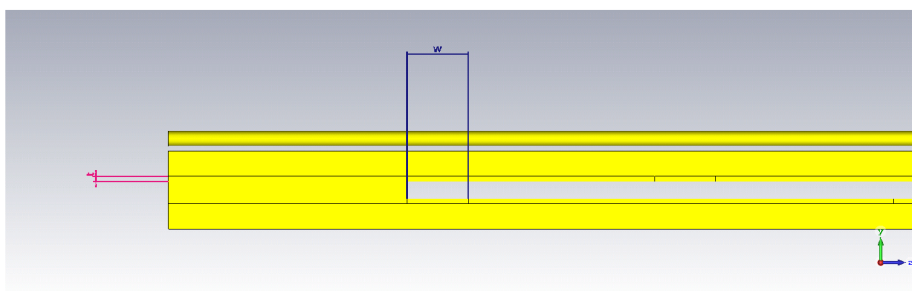
Doplňkové rozměry, které nebyly uvedeny na obrázku 1.2, jsou uvedeny na obrázku 2.1.

2.2 Software a řešič užitý pro analýzu antény

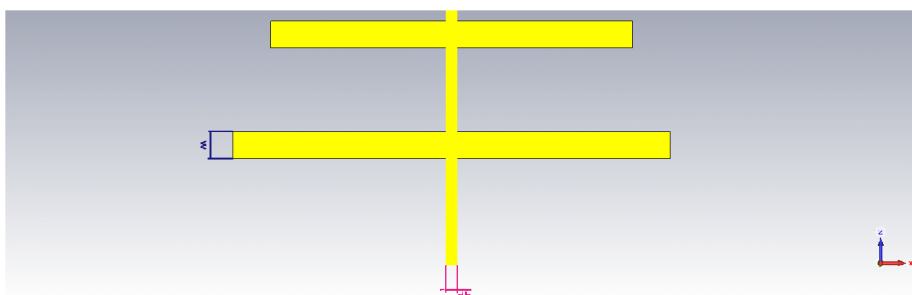
Pro analýzu antény byl užit software CST Microwave Studio (CST MWS), vyvinutý společností Dassault Systèmes [7]. Jedná se o komplexní systém pro analýzu a vývoj trojrozměrných elektromagnetických struktur, a to v pásmu od nízkých kmitočtů (v řádu jednotek Hz) až po viditelné spektrum elektromagnetického záření (v řádu THz). Kromě elektromagnetické analýzy je CST MWS schopen analýzy i mechanické



(a) Pohled zleva



(b) Pohled zleva - detail



(c) Pohled zvrchu - detail

Obr. 2.1: Anténa v CST se zobrazenými doplňkovými rozměry

či termodynamické pro pozorování vlivu elektromagnetických vln na okolí (např. analýza vyzářování a ohřevu tkání).

Pro analýzu struktur v UHF pásmu nabízí CST MWS několik možných řešičů, jejich přehled je možné nalézt na [8]. Volba řešiče je důležitá z mnoha důvodů, mezi nejdůležitější patří přesnost výsledků, algoritmická složitost, škálovatelnost a chování řešiče v určitých situacích (např. struktura obsahující nehomogenní dielektrikum, specifickou okrajovou podmínku apod.). Základními řešiči, mezi kterými bylo rozhodováno jsou:

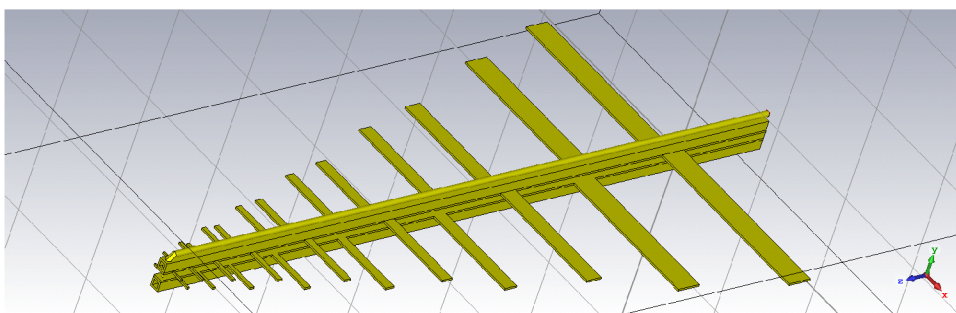
- řešič založený na metodě momentů - Integral Equation
- řešič založený na analýze v časové oblasti pomocí metody konečných integrací - Time Domain
- řešič založený na metodě konečných prvků - Frequency Domain

Porovnání a základní popis těchto metod je možné nalézt např. v [9], na základě porovnání byl zvolen řešič Time Domain, a to z následujících důvodů:

- metoda momentů je problematická v případech, kdy se ve struktuře objevují dielektrické prvky - protože je požadavkem též analýza dielektrického krytu, je toto jeden z důvodů jejího vyřazení
- metoda momentů je výpočetně vysoce náročná, kdy pro složitější neplanární struktury narůstá algoritmická složitost s velikostí struktury kd až $\mathcal{O}(kd^9)$
- síť pro metodu konečných prvků může u velkých komplexních struktur nabývat vysoké složitosti, mnohem větší než u metody konečných integrací
- výsledky metody konečných prvků jsou validní pouze v malém kmitočtovém pásmu

2.3 Analýza antény

Navržená anténa v CST MWS je zobrazena na obrázku 2.2. Anténa je vytvořena z hliníku, který byl vybrán z důvodu nižší hmotnosti než měď a z důvodu, že bude užít pro reálnou konstrukci. Anténa je vytvořena ze dvou motivů napájena pomocí koaxiálního kabelu, pro jeho instalaci však bylo nutné prodloužit ráhna antény o 5 mm na 0,5857 m. Simulací byla získána závislost činitele odrazu S_{11} pro ověření,



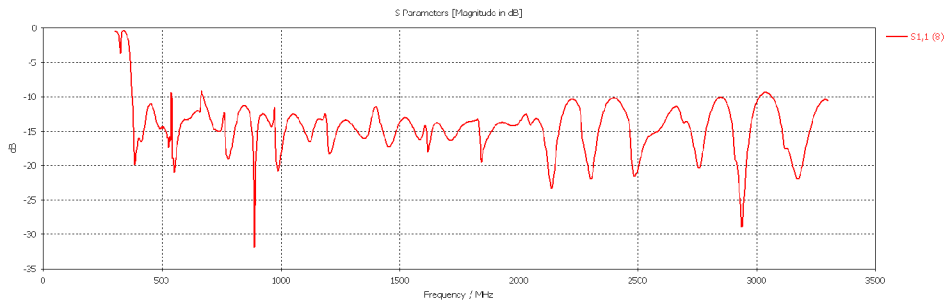
Obr. 2.2: Navržená anténa v CST MWS

zda anténa splňuje tento požadavek. Závislost činitele odrazu je zobrazena na obrázku 2.3. Jak je z uvedené charakteristiky patrné, není splněn požadavek na S_{11} . Z



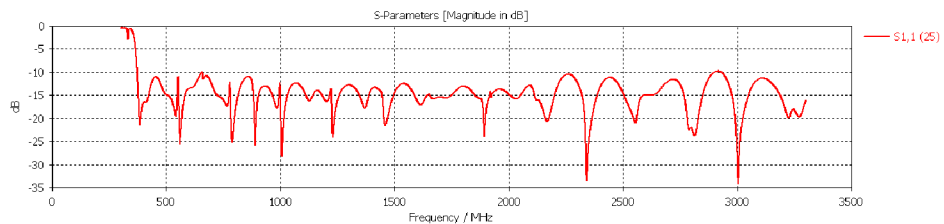
Obr. 2.3: Závislost S_{11} na kmitočtu - původní anténa

tohoto důvodu byla anténa optimalizována pomocí parametrické analýzy. Iničiální optimalizace byla dosažena modifikací parametru S , jehož zvýšení mělo za následek posun S_{11} do nižších hodnot. Výsledkem je graf zobrazený na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: Závislost S_{11} na kmitočtu - optimalizace rozteče mezi ráhny S

Sekundární optimalizací byla modifikace délky zkratu L_{shunt} , jehož zkrácení mělo za následek snížení a posun špiček do nižších kmitočtů. Výsledkem je graf zobrazený na obrázku 2.5. Jak je patrné, touto modifikací bylo v celém pásmu dosaženo snížení



Obr. 2.5: Závislost S_{11} na kmitočtu - optimalizace délky zkratu L_{shunt}

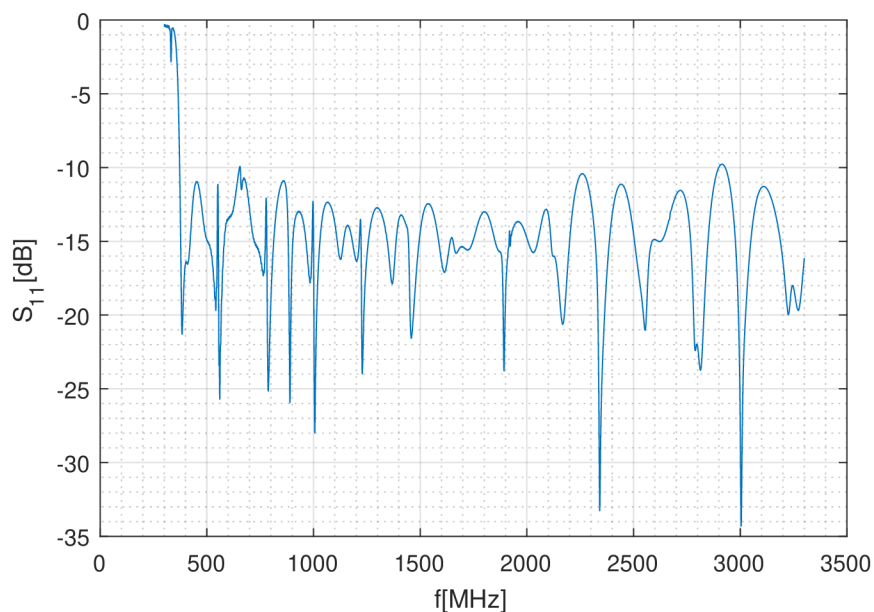
S_{11} na požadovanou hodnotu. Přehled optimalizovaných parametrů a jejich finálních hodnot je uveden v tabulce 2.4.

Parametr	hodnota
S	19,79 mm
L_{shunt}	80 mm

Tab. 2.4: Optimalizované parametry antény

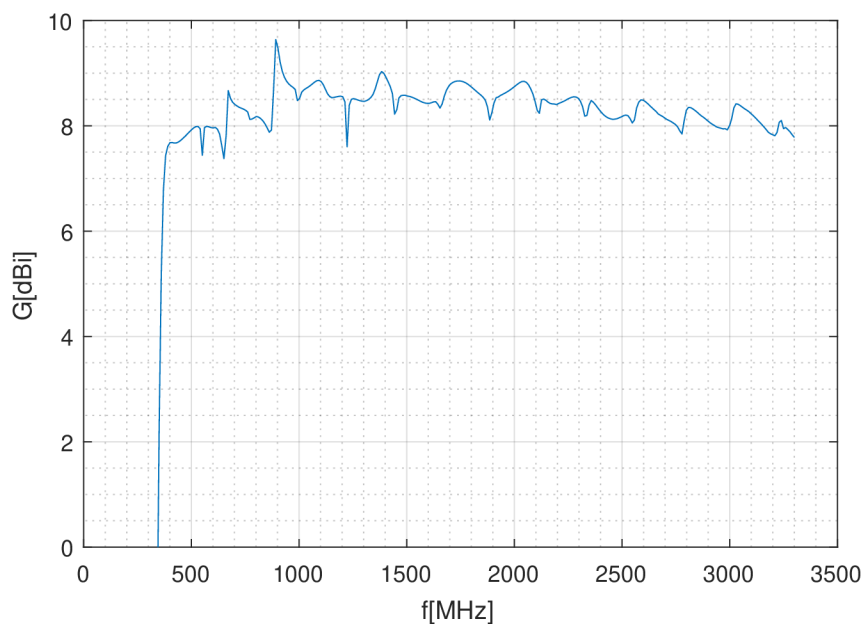
Pro optimalizovanou anténu byla vykreslena závislost činitele odrazu S_{11} (obrázek 2.6), zisku G (obrázek 2.7), anténního faktoru AF (obrázek 2.8) a polohy fázového středu v osách x , y a z na kmitočtu (obrázek 2.9). Dále byly pro kmitočty v požadovaném rozsahu zobrazeny směrové charakteristiky v E a H rovině bez rozdělení složky (v příloze A) a se zobrazením souhlasné a křížové složky charakteristiky (v příloze B).

**Závislost činitele odrazu S_{11} na kmitočtu
(optimalizovaná anténa)**



Obr. 2.6: Závislost S_{11} na kmitočtu - optimalizovaná anténa

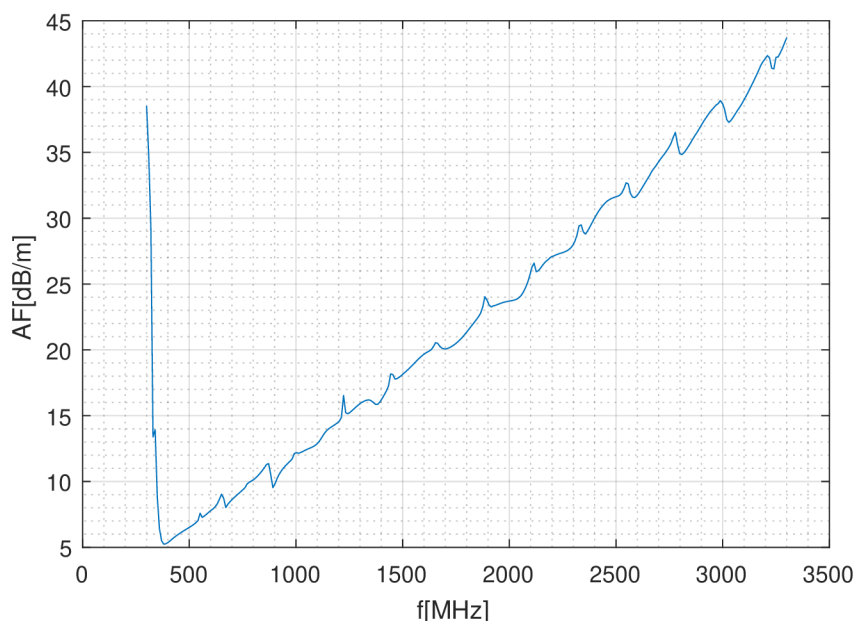
**Závislost zisku G na kmitočtu
(optimalizovaná anténa)**



Obr. 2.7: Závislost zisku na kmitočtu - optimalizovaná anténa

Jak je z charakteristik patrné, požadavek na zisk i na S_{11} byl splněn v celém rozsahu kmitočtů.

**Závislost anténního faktoru na kmitočtu
(optimalizovaná anténa)**



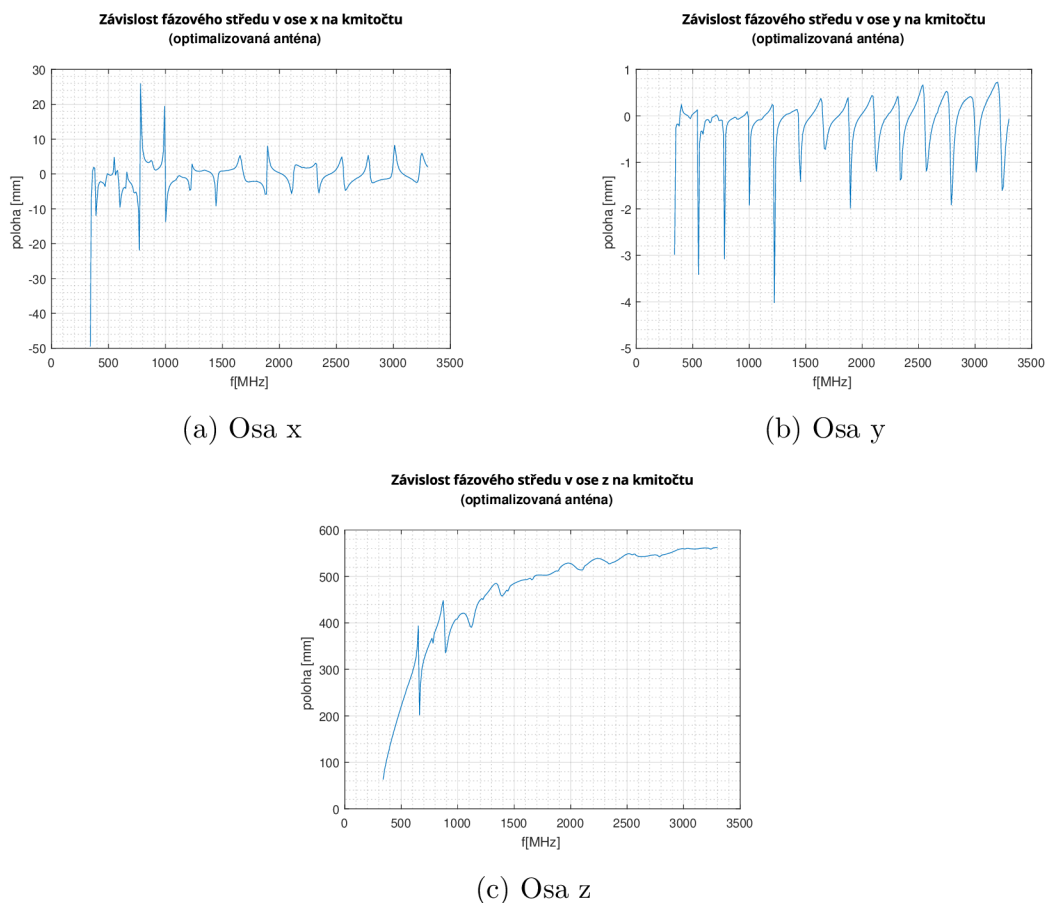
Obr. 2.8: Závislost anténního faktoru na kmitočtu - optimalizovaná anténa

2.4 Analýza krytu antény

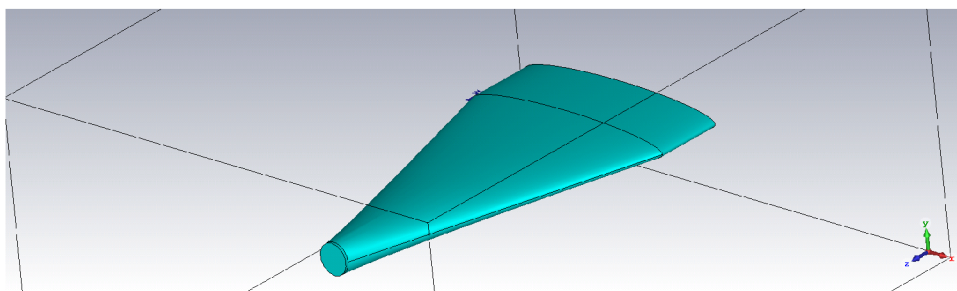
Anténa byla doplněna o kryt z dielektrického materiálu (zde PeT-G, který je užit pro výrobu krytu na 3D tiskárně), jeho elektrické parametry je možné nalézt v [11]. Zakrytovaná anténa je zobrazena na obrázku 2.10. Pro zakrytovanou anténu byla vykreslena závislost činitele odrazu S_{11} (obrázek 2.11), zisku G (obrázek 2.12), anténního faktoru AF (obrázek 2.13) a polohy fázového středu v osách x , y a z na kmitočtu (obrázek 2.14). Dále byly pro kmitočty v požadovaném rozsahu zobrazeny směrové charakteristiky v E a H rovině bez rozdělení složky (v příloze C) a se zobrazením souhlasné a křížové složky charakteristiky (v příloze D).

Finálně byla zakrytovaná anténa doplněna o ocelový blok o rozměrech $47,5 \times 47,5 \times 2$ mm, sloužící jako úchyt. Detail úchyty v CST MWS je možné vidět na obrázku 2.15. Pro zakrytovanou anténu s úchytem byla vykreslena závislost činitele odrazu S_{11} (obrázek 2.16), zisku G (obrázek 2.17), anténního faktoru AF (obrázek 2.18) a polohy fázového středu v osách x , y a z na kmitočtu (obrázek 2.19). Dále byly pro kmitočty v požadovaném rozsahu zobrazeny směrové charakteristiky v E a H rovině bez rozdělení složky (v příloze E) a se zobrazením souhlasné a křížové složky charakteristiky (v příloze F).

Následně byly mezi nezakrytovanou a zakrytovanou anténou porovnány charakteristiky S_{11} (obrázek 2.20), G (obrázek 2.21), AF (obrázek 2.22) a polohy fázového



Obr. 2.9: Závislost polohy fázového středu na kmitočtu - optimalizovaná anténa

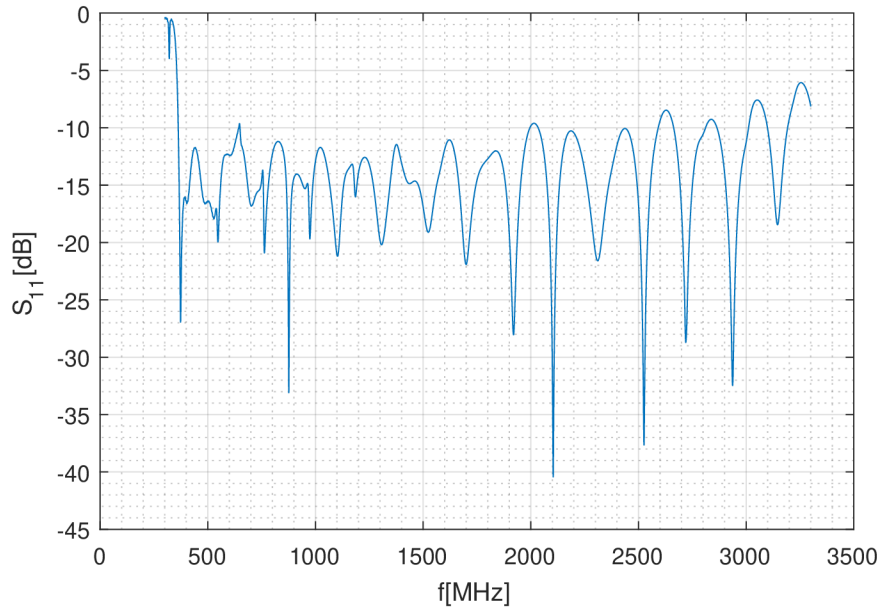


Obr. 2.10: Navržená anténa v CST s krytem

středu v osách x , y a z na kmitočtu (obrázek 2.14).

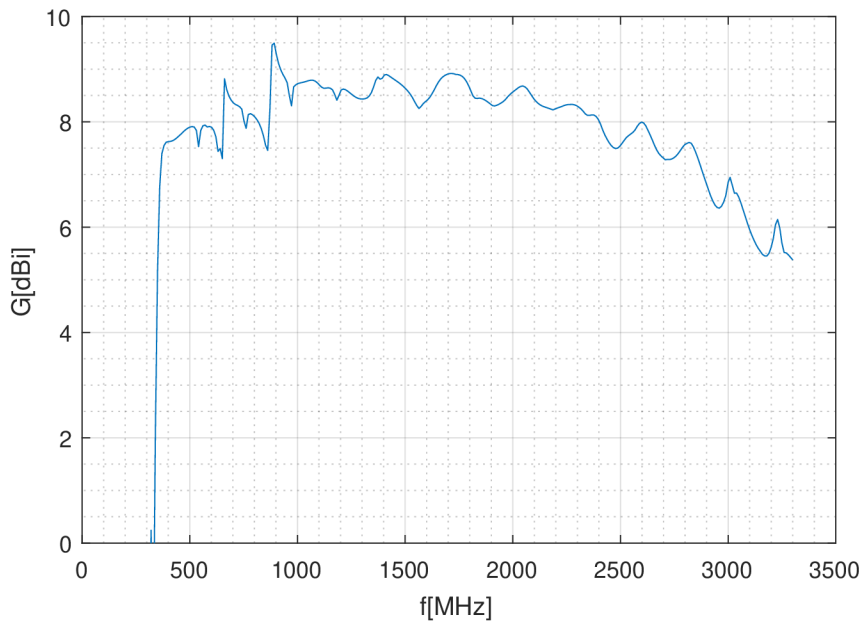
Jak je z charakteristiky 2.20 patrné, kryt způsobuje zvýšení S_{11} v celém pásmu kmitočtů, který se více projevuje na kmitočtech v oblasti mezi 2 a 3 GHz, což je možné vysvětlit tím, že více vyzářené energie je v této kmitočtové oblasti pohlceno krytem. Též je pozorováno, že v celém pásmu dochází k posunu špiček charakteristiky do nižších kmitočtů. Z charakteristiky 2.21 je patrné, že na kmitočtech větších než 2000 MHz dochází ke snížení zisku s hlubokým propadem v oblasti nad 2500 MHz a

**Závislost činitele odrazu S_{11} na kmitočtu
(anténa s krytem)**



Obr. 2.11: Závislost S_{11} na kmitočtu - anténa s krytem

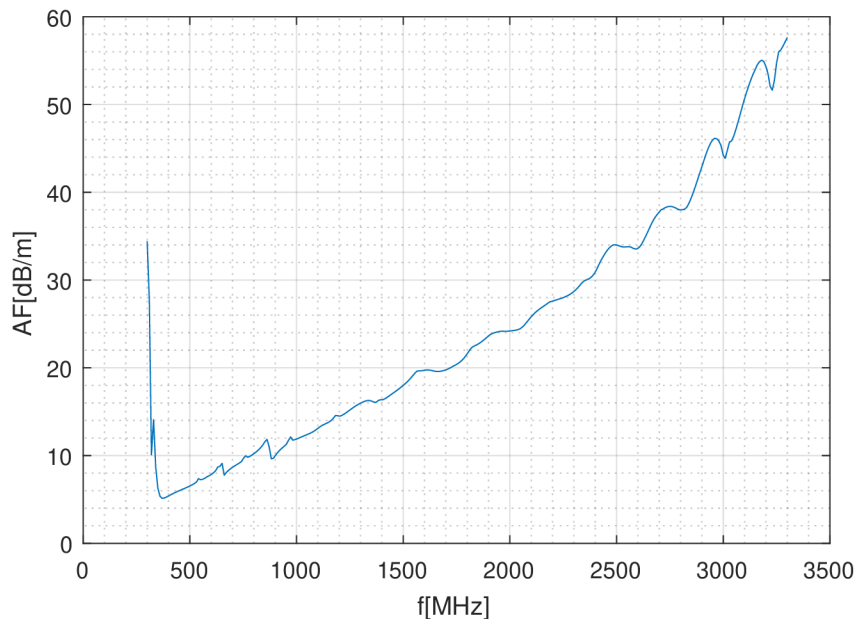
**Závislost zisku G na kmitočtu
(anténa s krytem)**



Obr. 2.12: Závislost zisku na kmitočtu - anténa s krytem

to až o cca 1,5 dB. Z toho je patrné, že na vysokých kmitočtech dochází ke zvýšení vložného útlumu kladeného krytem. Uvedené se dá předpokládat i z charakteristiky

Závislost anténního faktoru na kmitočtu (anténa s krytem)



Obr. 2.13: Závislost anténního faktoru na kmitočtu - anténa s krytem

2.22, kde anténní faktor v uvedené oblasti naopak roste.

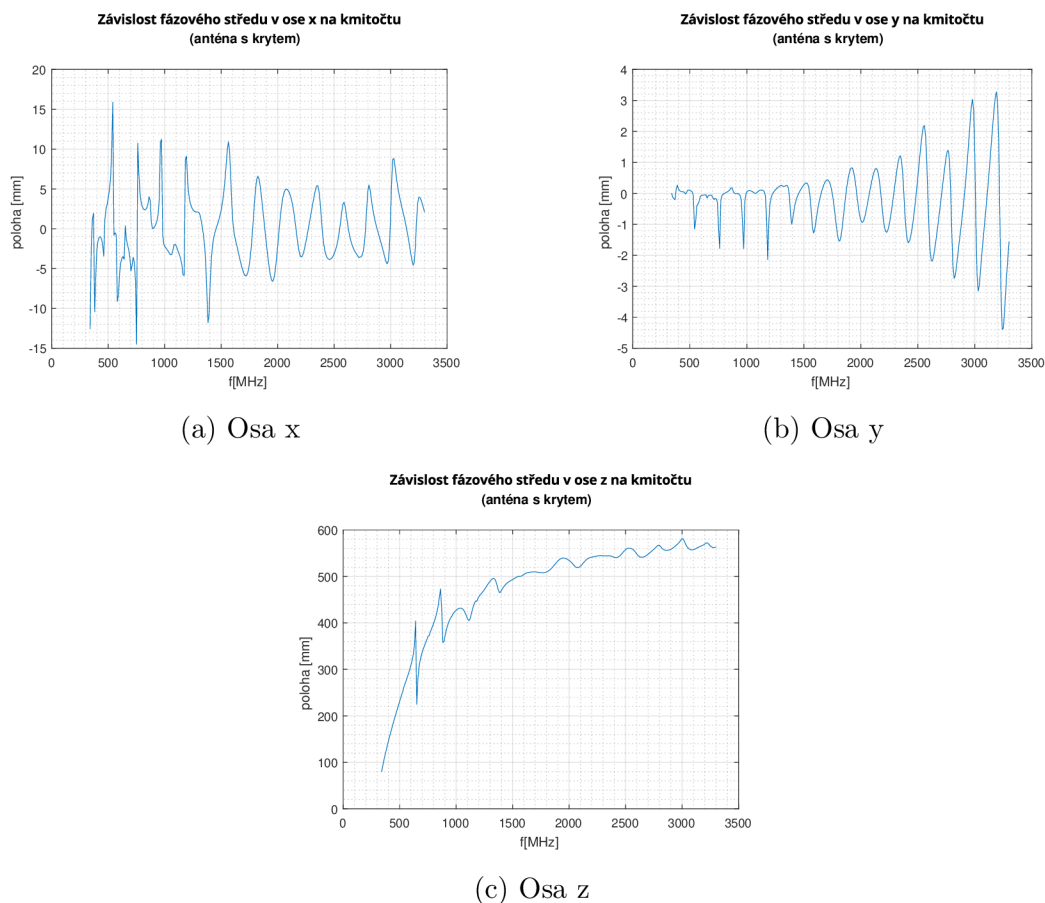
Pro fázový střed antény je možné z obrázku 2.23 pozorovat, že kryt má v ose x na fázový střed největší vliv na kmitočtu 800 – 1000 MHz, a to jeho zmenšením až o 10 mm. V ose y je naopak pozorováno na kmitočtech od 2000 MHz nárůst pro kryt i pro úchyt, což se dá vysvětlit rozptylováním elektromagnetické vlny vlivem dielektrického krytu. Pro osu z není změna fázového středu antény natolik patrná jako u nižších délek.

Pro kryt s úchytem je možné pozorovat, že úchyt nemá téměř žádný vliv na vyzařování. Jako důvod je možné považovat, že logaritnicko-periodická anténa má vysokou směrovost, která je relativně konstantní v celém pásmu kmitočtů, pro které je navržena. Tím je zajištěno, že zpětný lalok antény je minimalizován a dochází tím k minimalizaci interakce mezi anténou a úchytem.

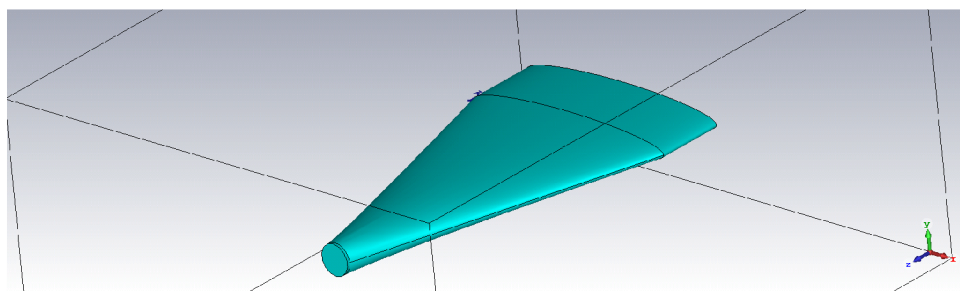
2.5 Výroba a měření antény

Navržená anténa je koncipována pro výrobu z hliníku. Bohužel z důvodu problémů při řešení práce bude realizace a měření antény provedeno až v době mezi odevzdáním diplomové práce a její obhajobou. Popis navržené antény je uveden dále.

Ráhna antény jsou tvořena dvěma čtvercovými profily o tloušťce stěny 1mm a délce strany 10mm, ke které jsou následně připájeny jednotlivé hliníkové elementy.



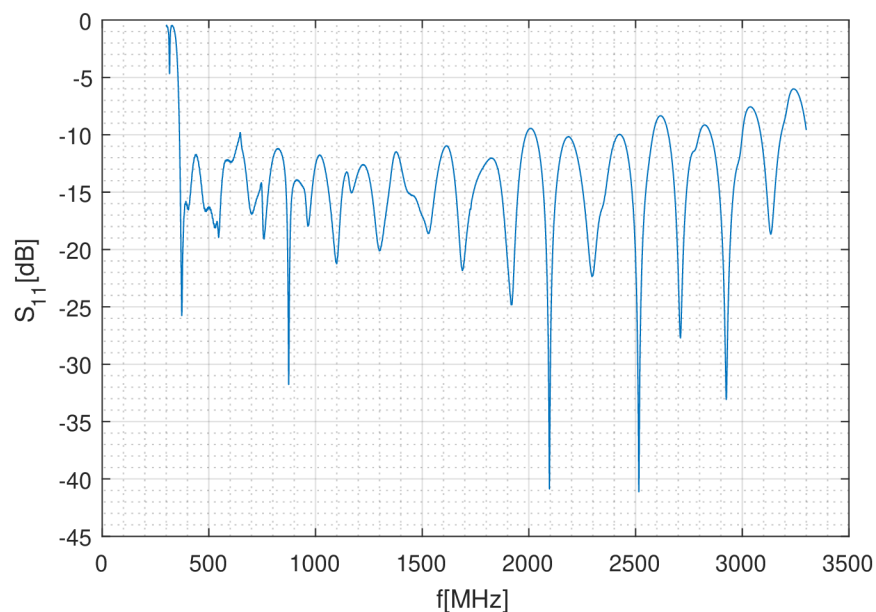
Obr. 2.14: Závislost polohy fázového středu na kmitočtu - anténa s krytem



Obr. 2.15: Navržená anténa v CST s krytem a úchytem

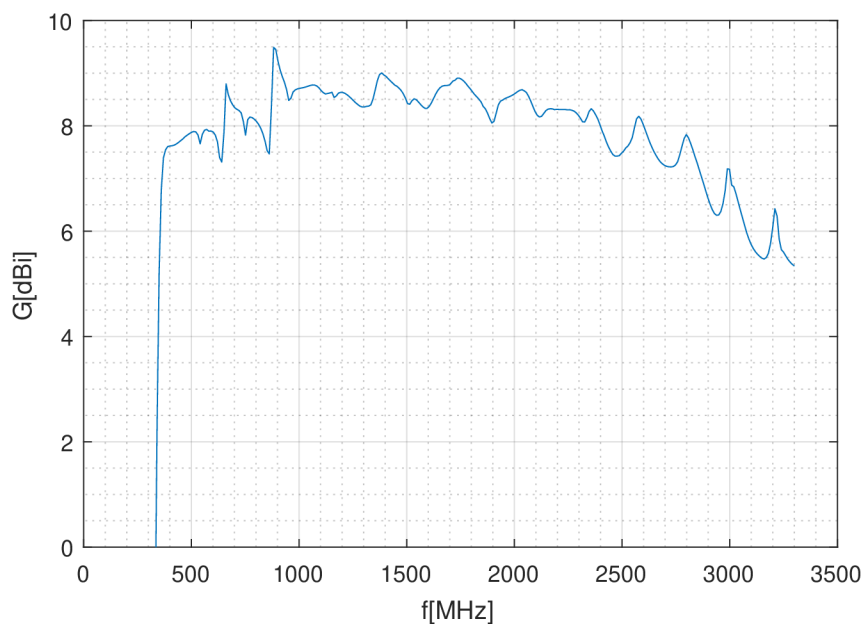
Elementy jsou vystříženy z hliníkového plechu tloušťky 2mm. Horním ráhnem antény je provrtána průchozí díra pro protažení koaxiálního kabelu, jehož vnější vodič je připájen k hornímu ráhnu a vnitřní vodič k dolnímu. Pro zajištění, že ráhna antény budou umístěna v konstantní vzdálenosti, jsou mezi ně umístěny PeT-G bloky o rozměrech $10 \times 10 \times 9,79$ mm. Konec antény je následně zkratován pomocí dvojice plechů, které spojují mezi sebou ráhna. Na konec antény je následně pomocí dvojice závitových tyčí M6 upevněn ocelový blok o rozměrech $47,5 \times 47,5 \times 2$ mm pro uchycení

**Závislost činitele odrazu S_{11} na kmitočtu
(s krytem a úchytem)**



Obr. 2.16: Závislost S_{11} na kmitočtu - anténa s krytem a úchytem

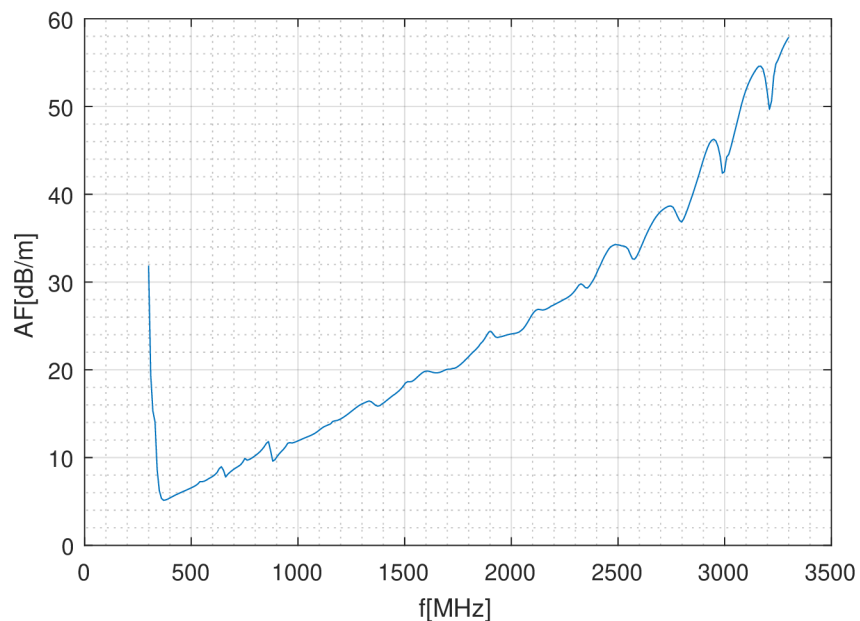
**Závislost zisku G na kmitočtu
(s krytem a úchytem)**



Obr. 2.17: Závislost zisku na kmitočtu - anténa s krytem a úchytem

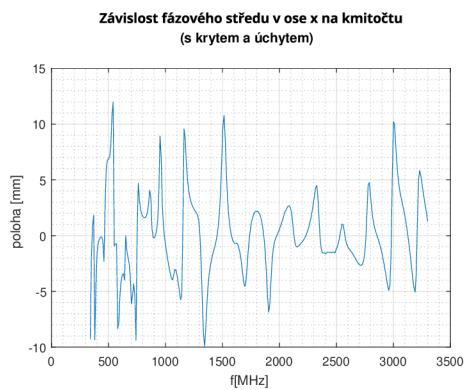
antény. Do uvedeného bloku budou následně vyvrtány díry pro zajištění antény. Výkres antény je možné nalézt v příloze G

**Závislost anténního faktoru na kmitočtu
(s krytem a úchytem)**



Obr. 2.18: Závislost anténního faktoru na kmitočtu - anténa s krytem a úchytem

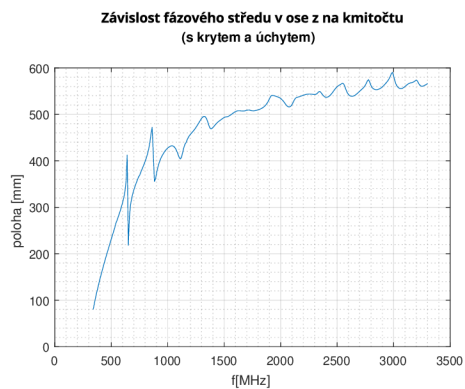
Kolem antény je vytvořen kryt z PeT-G o tloušťce stěny 5mm, který je vytištěn na 3D tiskárně Prusa a spojen pomocí plastových kolíků. Výkres krytu je možné nalézt v příloze H



(a) Osa x



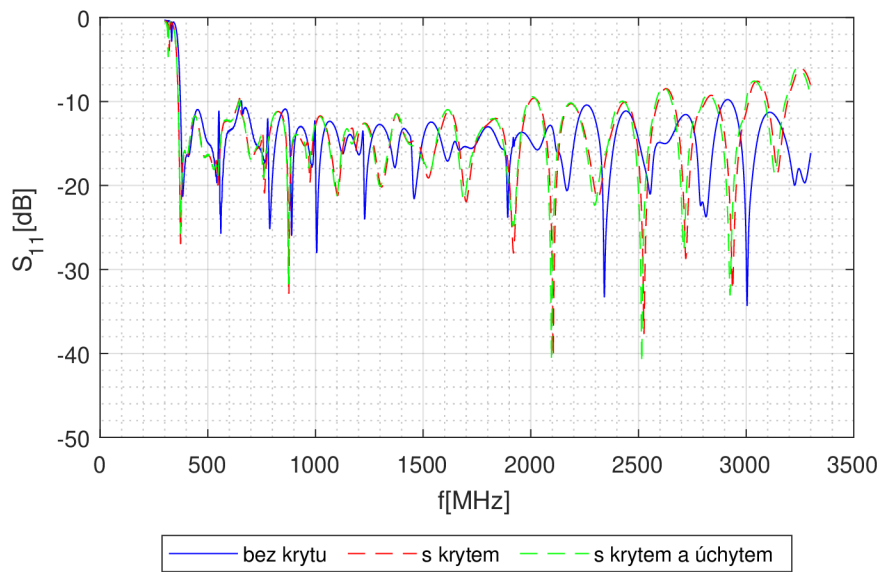
(b) Osa y



(c) Osa z

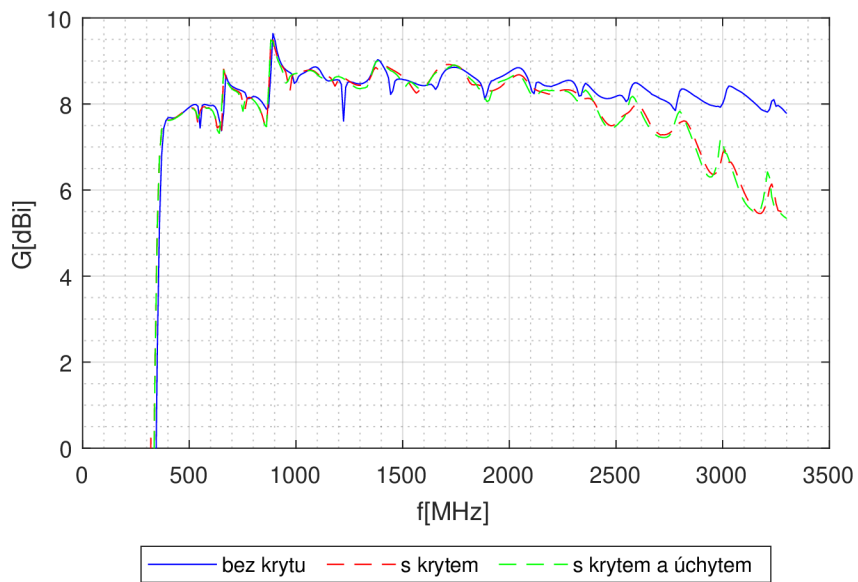
Obr. 2.19: Závislost polohy fázového středu na kmitočtu - anténa s krytem a úchytem

Porovnání závislosti činitele odrazu S_{11} na kmitočtu



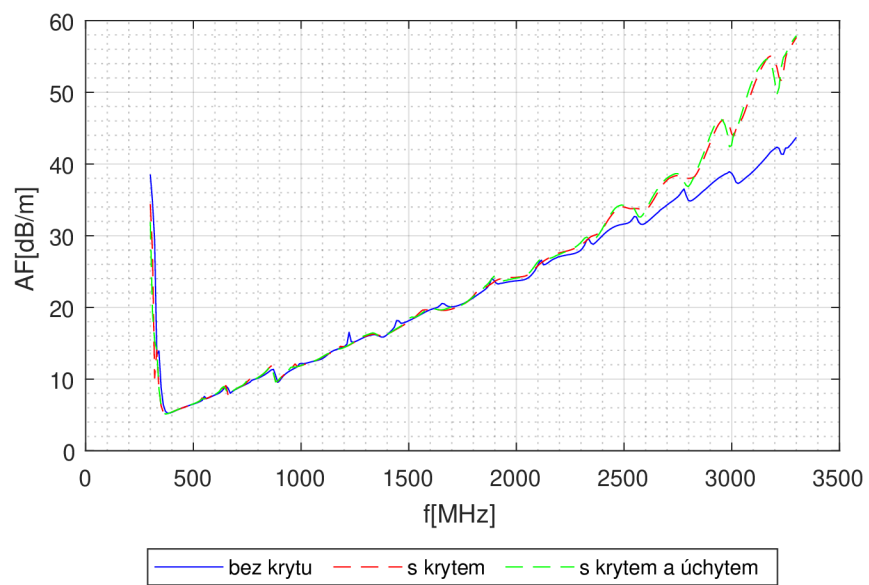
Obr. 2.20: Porovnání závislosti S_{11} na kmitočtu

Porovnání závislosti zisku G na kmitočtu

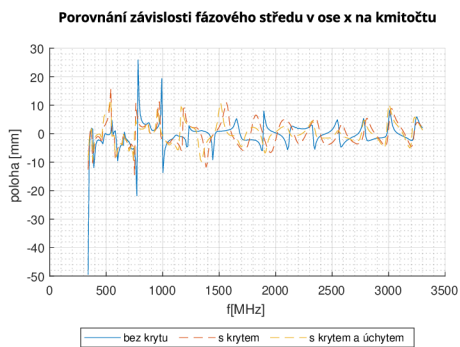


Obr. 2.21: Porovnání závislosti zisku na kmitočtu

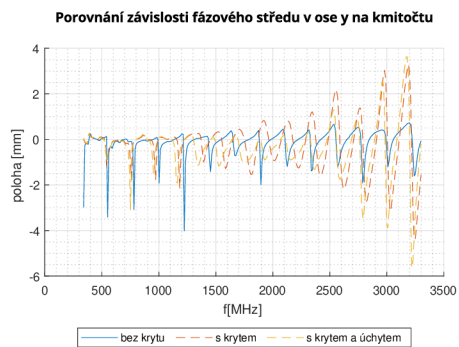
Porovnání závislosti anténního faktoru na kmitočtu



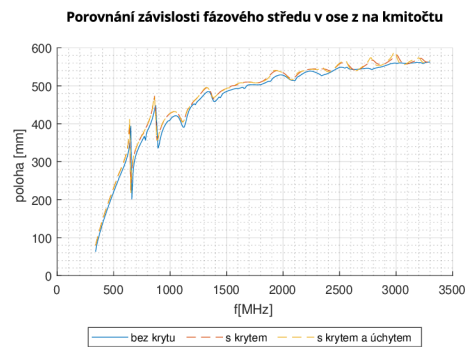
Obr. 2.22: Porovnání závislosti anténního faktoru na kmitočtu



(a) Osa x



(b) Osa y



(c) Osa z

Obr. 2.23: Porovnání závislosti polohy fázového středu na kmitočtu

Závěr

V práci byla navržena a optimalizována logaritmicko-periodická anténa pro použití v kmitočtovém pásmu od 400 MHz do 3 GHz. V úvodní kapitole byl popsán teoretický popis požadované antény spolu s návrhovými vztahy. Návrh antény byl proveden v závislosti na předpokládané směrovosti $D_0 = 7,5$ dB pro zajištění požadovaného požadavku na zisk.

Navržená anténa byla optimalizována pro splnění zadaných požadavků na $S_{11} = -10$ dB a $G \geq 7$ dBi. Požadavek na zisk i S_{11} byl splněn v celém rozsahu. Pro anténu byl též zobrazen anténní faktor, jeho průběh respektuje teoretický předpoklad lineárního růstu pro logaritmicko-periodickou anténu. Dále byla pro anténu zobrazena závislost fázového středu na kmitočtu a vykresleny směrové charakteristiky, a to nerozdělené a rozdělené na souhlasnou a křížovou složku.

Anténa byla poté doplněna o kryt z PeT-G a anténa byla simulována s krytem pro zjištění jeho vlivu. Vlivem krytu došlo ke zvýšení S_{11} v celém pásmu s rapidním růstem na kmitočtech mezi 2 MHz a 3 GHz, snížení G v kmitočtech od 2000 MHz do 3 GHz s poklesem až 1,5 dB na kmitočtech nad 2500 MHz. Též došlo k nárůstu anténního faktoru ve stejné oblasti. Tato anténa byla též poté doplněna o úchyt z železného bloku pro zjištění jeho vlivu. Pro úchyt je pozorováno, že nemá téměř žádný vliv na parametry antény s krytem. Anténa byla následně vykreslena spolu s krytem, výkres pro obě součásti v měřítku 1 : 5 je součástí přílohy.

Bohužel z důvodu problémů při realizaci a řešení práce nebyla anténa aktuálně zkonstruována, její konstrukce a měření proběhne v době před obhajobou diplomové práce a v rámci obhajoby budou výsledky měření prezentovány. Z tohoto důvodu též nebyla prováděna plánovaná optimalizace délky 1. a 2. elementu pro minimalizaci antény a tím zlepšení manipulace s ní.

Literatura

- [1] ISBELL, D. Log periodic dipole arrays. *IRE Transactions on Antennas and Propagation* [online]. 1960, **8**(3), 260-267 [cit. 2021-9-28]. ISSN 0096-1973. Dostupné z: doi:10.1109/TAP.1960.1144848
- [2] CARREL, R. The design of log-periodic dipole antennas. In: *IRE International Convention Record* [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1961, s. 61-75 [cit. 2021-9-28]. Dostupné z: doi:10.1109/IRECON.1961.1151016
- [3] BUTSON, P. a G. THOMPSON. A note on the calculation of the gain of log-periodic dipole antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [online]. 1976, **24**(1), 105-106 [cit. 2021-9-28]. ISSN 0096-1973. Dostupné z: doi:10.1109/TAP.1976.1141278
- [4] Dipole Array. BALANIS, Constantine A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4th Edition. Hoboken (New Jersey): Wiley, 2016, s. 603-614. ISBN 9781118642061.
- [5] Log Periodic Arrays. CEBIK, L. B. a R. Dean. STRAW. *The ARRL Antenna Book: The Ultimate Reference for Amateur Radio Antennas, Transmission Lines And Propagation*. 21st Edition. Newington (Connecticut): Amer Radio Relay League, 2007, s. 318-328. ISBN 9780872599871.
- [6] HUANG, Yi a Kevin BOYLE. Log-Periodic Antennas and Frequency-Independent Antennas. *Antennas: from theory to practice*. Chichester: Wiley, 2008, s. 157-163. ISBN 9780470510285.
- [7] *CST Studio Suite: 3D EM simulation and analysis software* [online]. Vélizy-Villacoublay: Dassault Systèmes, c2002 - 2022 [cit. 2022-08-08]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [8] *Electromagnetic Simulation Solvers / CST Studio Suite* [online]. Vélizy-Villacoublay: Dassault Systèmes, c2002 - 2022 [cit. 2022-08-08]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/solvers/>
- [9] An overview of computational electromagnetics for RF and microwave applications. In: DAVIDSON, David B. *Computational electromagnetics for RF and microwave engineering*. 2nd ed. Cambridge,: Cambridge University Press, 2011, s. 1-28. ISBN 978-0-521-51891-8.

- [10] HUTIRA, František, Ján BEZEK a Vladimír BÍLÍK. Design and Investigation of a Log-Periodic Antenna for DCS, PCS and UMTS Mobile Communications Bands. *Radioelektronika 2004: 14th international Czech-Slovak scientific conference* [online]. Bratislava, 2004, , 453-456 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://hamwaves.com/lpda/doc/hutira.pdf>
- [11] ZECHMEISER, Jaroslav, Jaroslav LÁČÍK. Complex Relative Permittivity Measurement of Selected 3D-Printed Materials up to 10 GHz. *2019 Conference on Microwave Techniques (COMITE)* [online]. Pardubice, 2019, , 1-4 [cit. 2022-08-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/COMITE.2019.8733590>

Seznam symbolů a zkratek

EMC elektromagnetická kompatibilita – Electro Magnetic Compatibility

LPDA logaritmicko-periodická anténa – log-periodic dipole antenna

UHF ultra krátké vlny – ultra high frequency

CST MWS CST Microwave Studio

a délka strany napájecího vodiče

AF anténní faktor

α vrcholový úhel antény

B šířka pásma

B_{ar} šířka pásma aktivního regionu antény

B_s šířka návrhového pásma

c rychlost šíření elektromagnetické vlny ve vakuu

d_n průměr n-tého elementu

f_{max} horní mezní kmitočet

f_{min} dolní mezní kmitočet

τ rezonanční kmitočet n-tého elementu

d_n šířka mezi svorkami napájení n-tého elementu

L celková délka antény

l délka elementu (není určeno, jakého)

l_1 délka nejdelšího elementu antény

λ vlnová délka

λ_{max} vlnová délka dolního mezního kmitočtu

λ_{min} vlnová délka horního mezního kmitočtu

λ_n vlnová délka kmitočtu pro rezonanci n-tého elementu

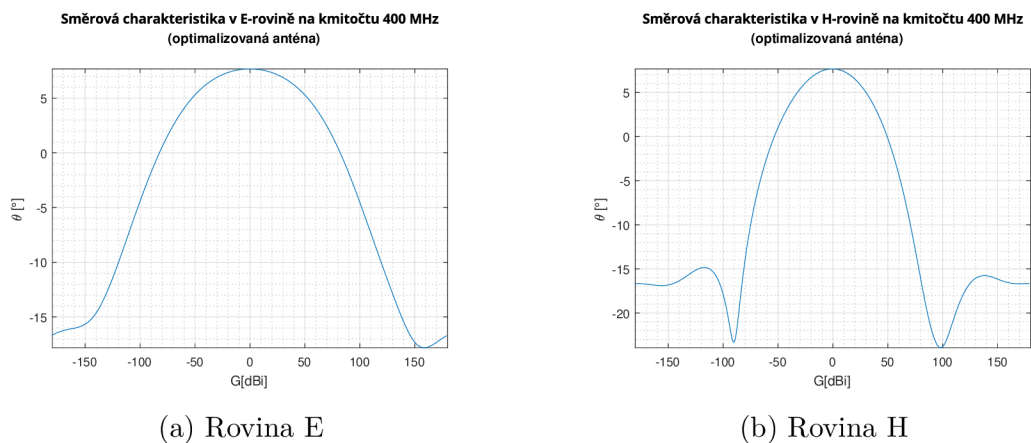
l_n délka n-tého elementu

L_{shunt}	délka zkratového bloku antény
n	index elementu
N	počet elementů antény
PSV	činitel stojatého vlnění
ρ	činitel odrazu
R_{in}	vstupní impedance antény
R_n	vzdálenost n-tého elementu od prvního
S	vzdálenost mezi středy vodičů napájecího vedení
S_{11}	vstupní činitel odrazu
σ	činitel vzdálenosti
σ'	střední vzdálenost mezi elementy
s_n	vzdálenost mezi elementy
τ	činitel škálování
t	tloušťka elementů
v	rychlost šíření elektromagnetické vlny v materiálu
w_n	šířka n-tého elementu
Z_0	charakteristická impedance napáječe
Z_a	průměrná charakteristická impedance elementů

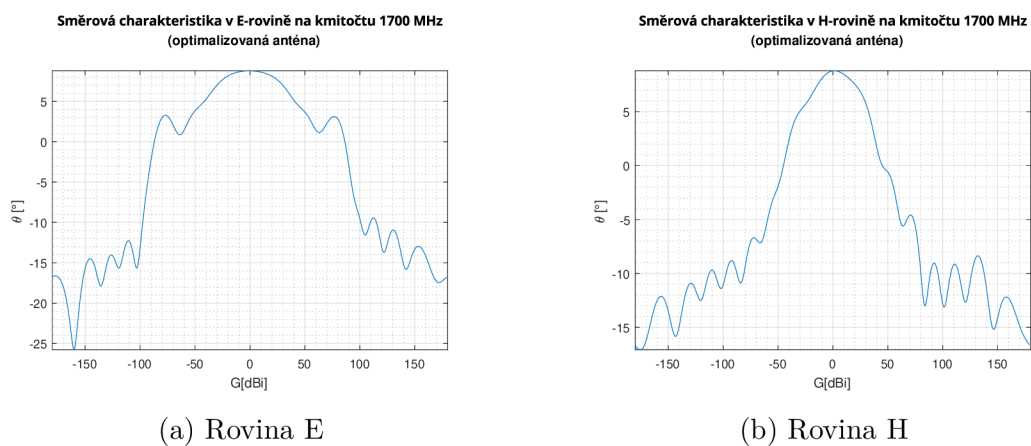
Seznam příloh

A	Směrové charakteristiky pro anténu bez krytu	55
B	Směrové charakteristiky pro anténu bez krytu - rozdělené složky	57
C	Směrové charakteristiky pro anténu s krytem	59
D	Směrové charakteristiky pro anténu s krytem - rozdělené složky	61
E	Směrové charakteristiky pro anténu s krytem a úchytem	63
F	Směrové charakteristiky pro anténu s krytem a úchytem - rozdělené složky	65
G	Výkres antény	67
H	Výkres krytu	69

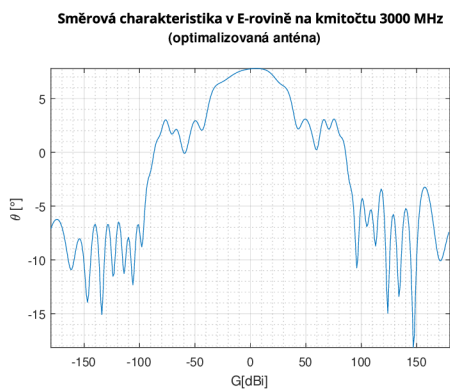
A Směrové charakteristiky pro anténu bez krytu



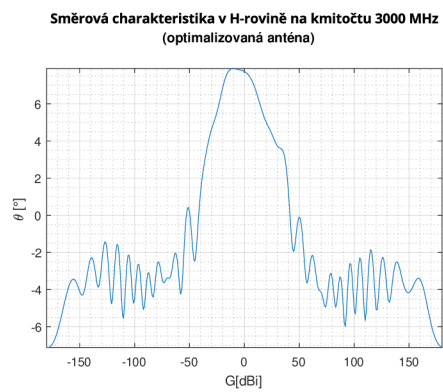
Obr. A.1: Směrová charakteristika pro anténu bez krytu - kmitočet 400 MHz



Obr. A.2: Směrová charakteristika pro anténu bez krytu - kmitočet 1700 MHz



(a) Rovina E

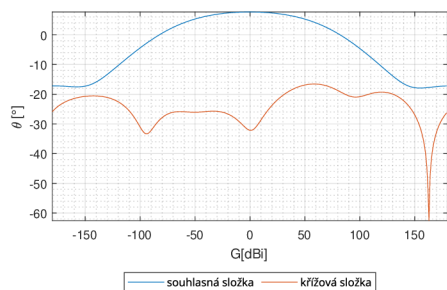


(b) Rovina H

Obr. A.3: Směrová charakteristika pro anténu bez krytu - kmitočet 3000 MHz

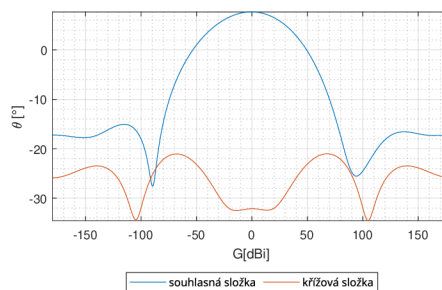
B Směrové charakteristiky pro anténu bez krytu - rozdělené složky

Směrová charakteristika v E-rovině na kmitočtu 400 MHz (rozdělené složky (optimalizovaná anténa))



(a) Rovina E

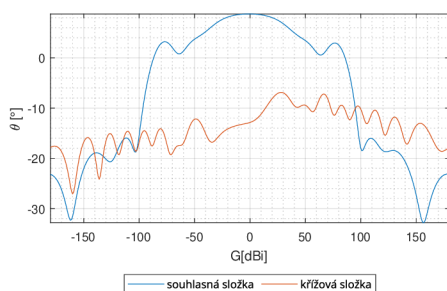
Směrová charakteristika v H-rovině na kmitočtu 400 MHz (rozdělené složky (optimalizovaná anténa))



(b) Rovina H

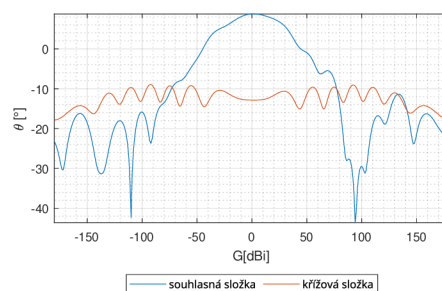
Obr. B.1: Směrová charakteristika pro anténu bez krytu - kmitočet 400 MHz

Směrová charakteristika v E-rovině na kmitočtu 1700 MHz (rozdělené složky (optimalizovaná anténa))



(a) Rovina E

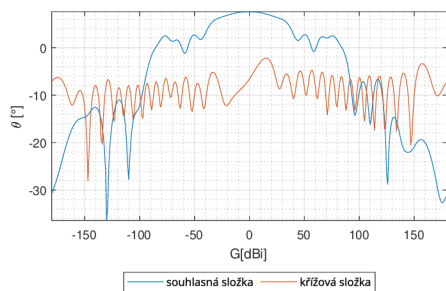
Směrová charakteristika v H-rovině na kmitočtu 1700 MHz (rozdělené složky (optimalizovaná anténa))



(b) Rovina H

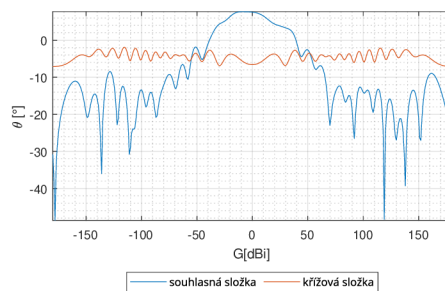
Obr. B.2: Směrová charakteristika pro anténu bez krytu - kmitočet 1700 MHz

Směrová charakteristika v E-rovině na kmitočtu 3000 MHz (rozdělené složky)
(optimalizovaná anténa)



(a) Rovina E

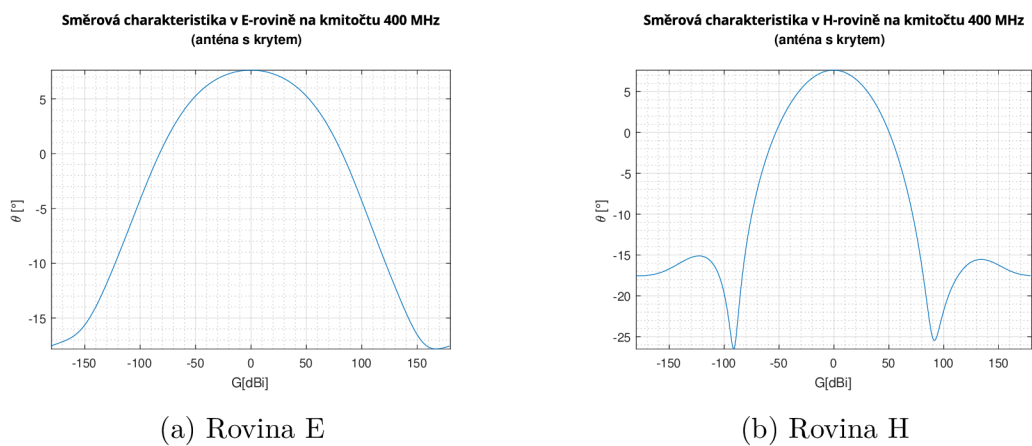
Směrová charakteristika v H-rovině na kmitočtu 3000 MHz (rozdělené složky)
(optimalizovaná anténa)



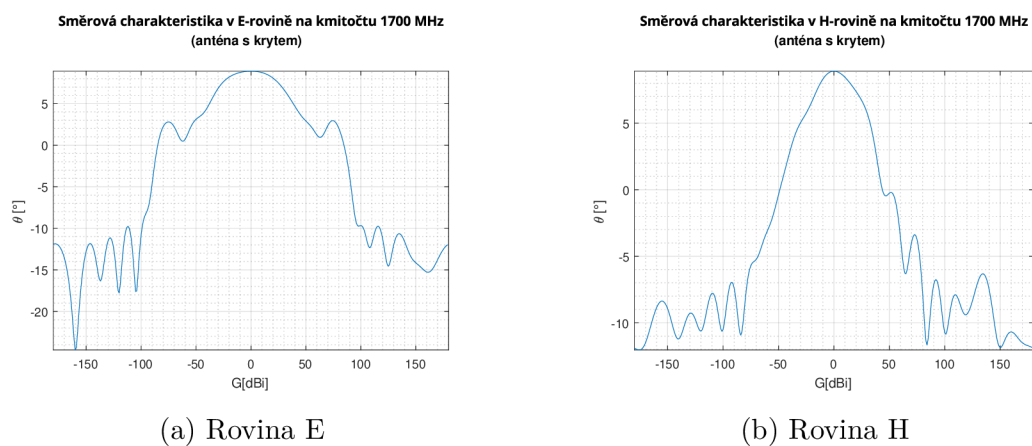
(b) Rovina H

Obr. B.3: Směrová charakteristika pro anténu bez krytu - kmitočet 3000 MHz

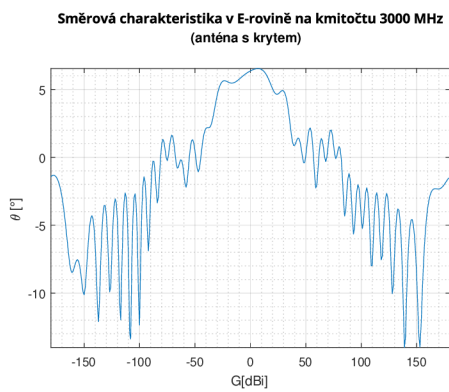
C Směrové charakteristiky pro anténu s krytem



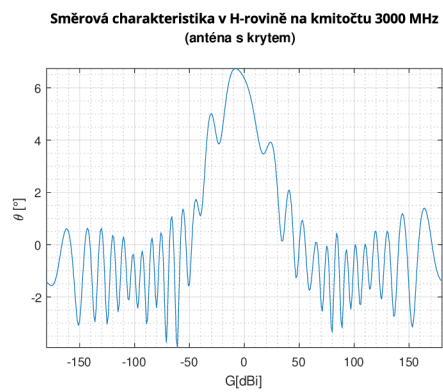
Obr. C.1: Směrová charakteristika pro anténu s krytem - kmitočet 400 MHz



Obr. C.2: Směrová charakteristika pro anténu s krytem - kmitočet 1700 MHz



(a) Rovina E

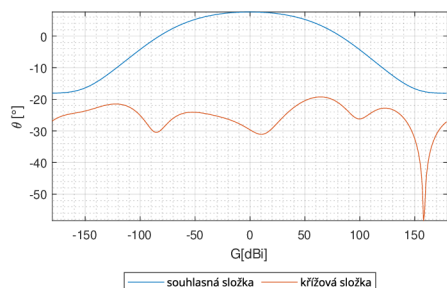


(b) Rovina H

Obr. C.3: Směrová charakteristika pro anténu s krytem - kmitočet 3000 MHz

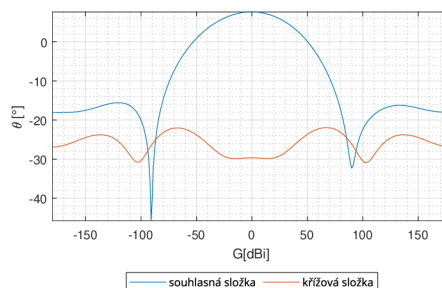
D Směrové charakteristiky pro anténu s krytem - rozdělené složky

Směrová charakteristika v E-rovině na kmitočtu 400 MHz (rozdělené složky (anténa s krytem)



(a) Rovina E

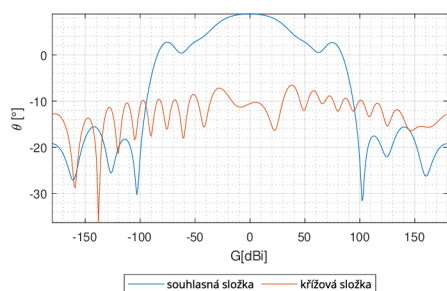
Směrová charakteristika v H-rovině na kmitočtu 400 MHz (rozdělené složky (anténa s krytem)



(b) Rovina H

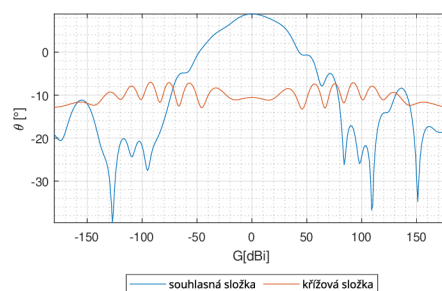
Obr. D.1: Směrová charakteristika pro anténu s krytem - kmitočet 400 MHz

Směrová charakteristika v E-rovině na kmitočtu 1700 MHz (rozdělené složky (anténa s krytem)



(a) Rovina E

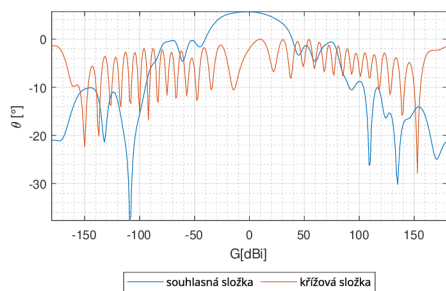
Směrová charakteristika v H-rovině na kmitočtu 1700 MHz (rozdělené složky (anténa s krytem)



(b) Rovina H

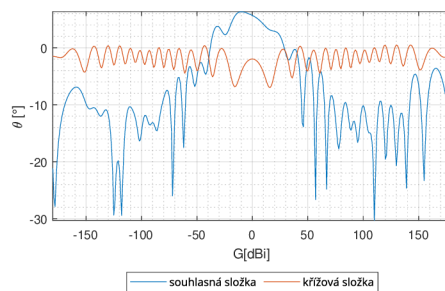
Obr. D.2: Směrová charakteristika pro anténu s krytem - kmitočet 1700 MHz

Směrová charakteristika v E-rovině na kmitočtu 3000 MHz (rozdělené složky)
(anténa s krytem)



(a) Rovina E

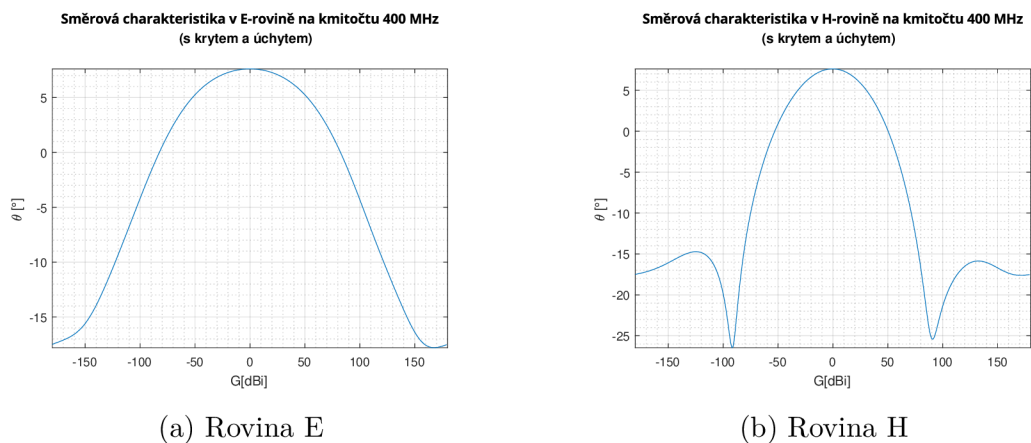
Směrová charakteristika v H-rovině na kmitočtu 3000 MHz (rozdělené složky)
(anténa s krytem)



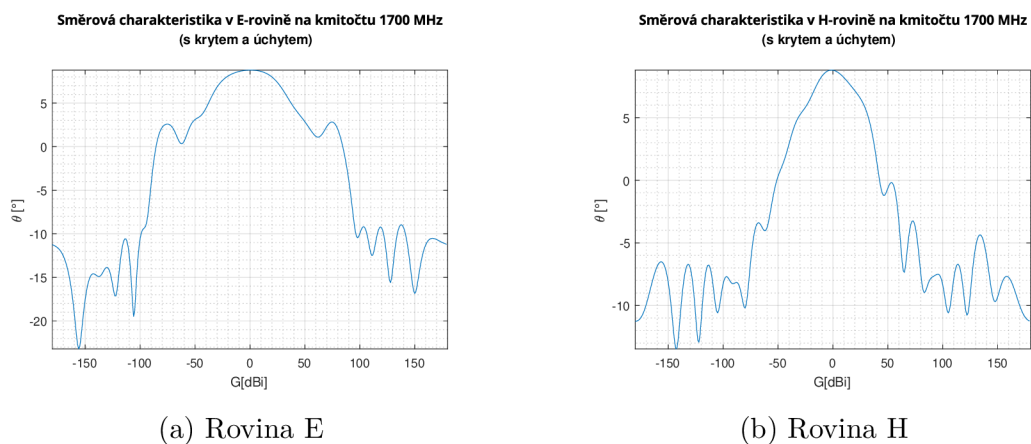
(b) Rovina H

Obr. D.3: Směrová charakteristika pro anténu s krytem - kmitočet 3000 MHz

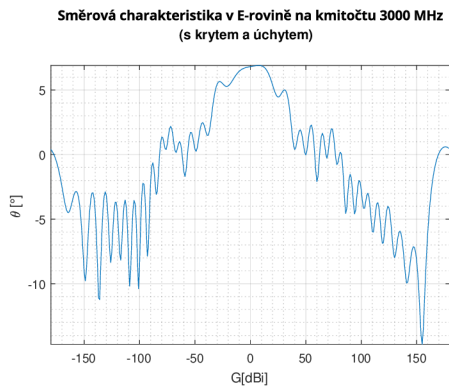
E Směrové charakteristiky pro anténu s krytem a úchytem



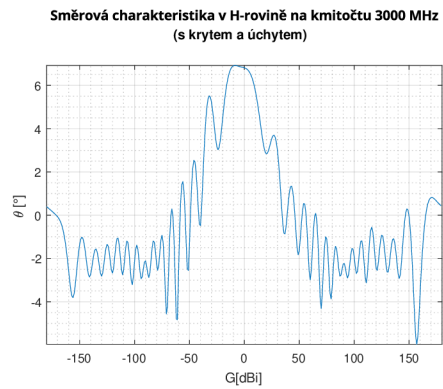
Obr. E.1: Směrová charakteristika pro anténu s krytem a úchytem - kmitočet 400 MHz



Obr. E.2: Směrová charakteristika pro anténu s krytem a úchytem - kmitočet 1700 MHz



(a) Rovina E

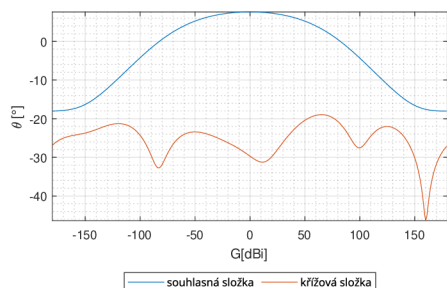


(b) Rovina H

Obr. E.3: Směrová charakteristika pro anténu s krytem a úchytem - kmitočet 3000 MHz

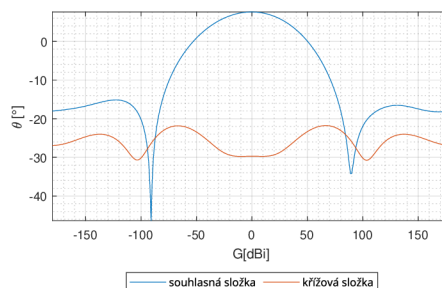
F Směrové charakteristiky pro anténu s krytem a úchytem - rozdělené složky

Směrová charakteristika v E-rovině na kmitočtu 400 MHz (rozdělené složky (s krytem a úchytem)



(a) Rovina E

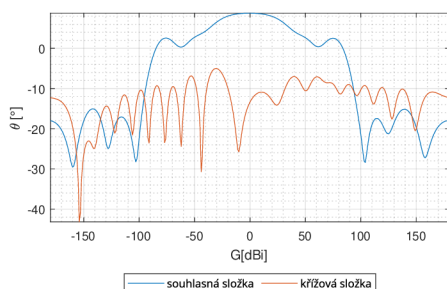
Směrová charakteristika v H-rovině na kmitočtu 400 MHz (rozdělené složky (s krytem a úchytem)



(b) Rovina H

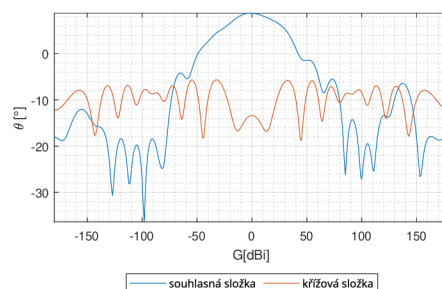
Obr. F.1: Směrová charakteristika pro anténu s krytem a úchytem - kmitočet 400 MHz

Směrová charakteristika v E-rovině na kmitočtu 1700 MHz (rozdělené složky (s krytem a úchytem)



(a) Rovina E

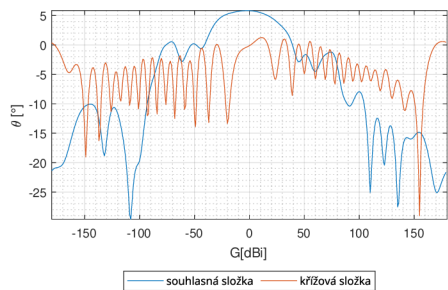
Směrová charakteristika v H-rovině na kmitočtu 1700 MHz (rozdělené složky (s krytem a úchytem)



(b) Rovina H

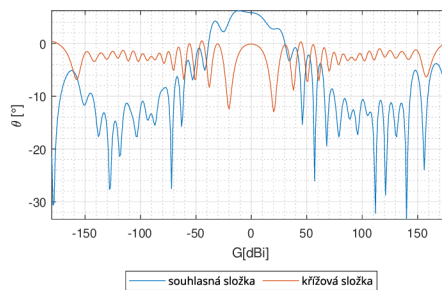
Obr. F.2: Směrová charakteristika pro anténu s krytem a úchytem - kmitočet 1700 MHz

Směrová charakteristika v E-rovině na kmitočtu 3000 MHz (rozdělené složky
(s krytem a úchytem)



(a) Rovina E

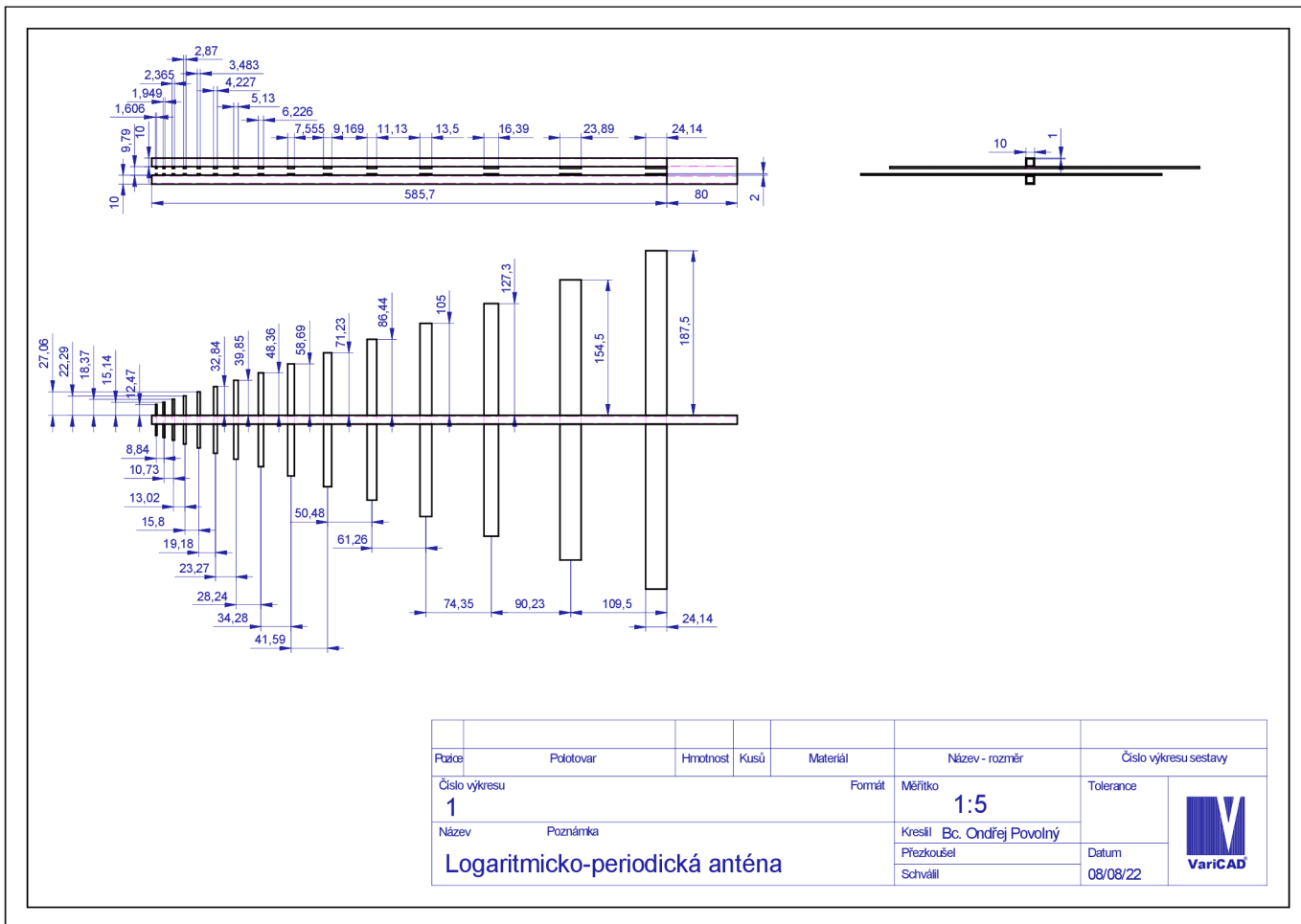
Směrová charakteristika v H-rovině na kmitočtu 3000 MHz (rozdělené složky
(s krytem a úchytem)



(b) Rovina H

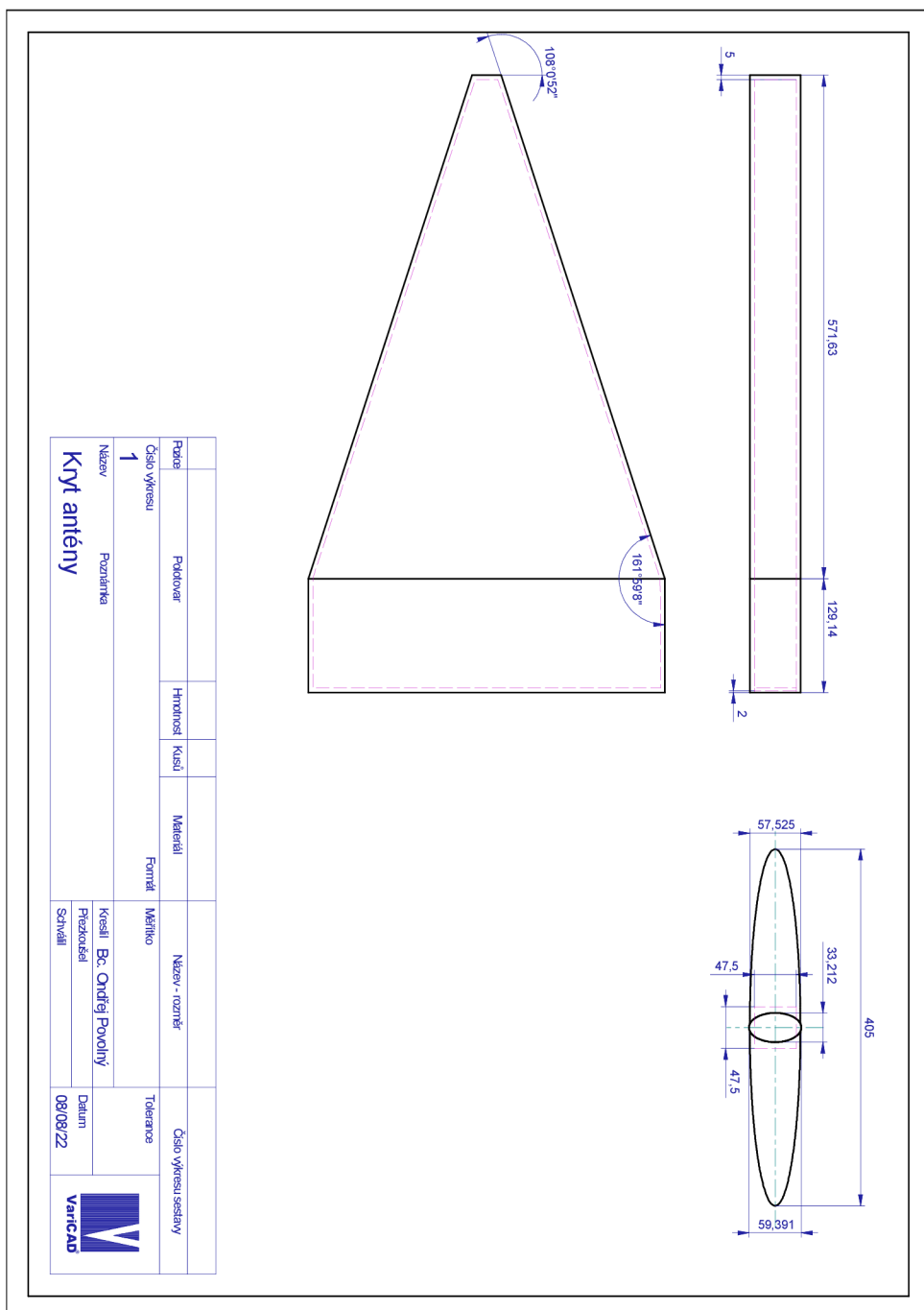
Obr. F.3: Směrová charakteristika pro anténu s krytem a úchytem - kmitočet 3000 MHz

G Výkres antény



Obr. G.1: Výkres antény

H Výkres krytu



Obr. H.1: Výkres krytu