



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

SMĚROVÁ ANTÉNA PRO KMITOČTOVÉ PÁSMO 60 GHZ

DIRECTIONAL ANTENNA FOR 60 GHZ FREQUENCY BAND

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Kratochvíl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslav Láčík, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor Elektronika a sdělovací technika
Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Jakub Kratochvíl

ID: 192491

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Směrová anténa pro kmitočtové pásmo 60 GHz

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem činnosti nízkoprofilových směrových antén pro pásmo milimetrových vln a technikami pro zlepšení jejich vyzařovacích vlastností. Po dohodě s vedoucím práce vyberte a navrhnete nízkoprofilovou směrovou anténu pro kmitočtové pásmo 60 GHz. Anténu modelujte ve vhodném programu s cílem dosažení požadovaných vlastností zadaných vedoucím práce.

Navrženou anténu realizujte a detailně proměřte. Diskutujte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z., Antény a šíření rádiových vln. Brno: FEKT VUT v Brně, 2005.
- [2] WANG, H., FANG, D. G., ZHANG, B., CHE, W. Q. Dielectric Loaded Substrate Integrated Waveguide (SIW) H-Plane Horn Antennas, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, vol. 58, no. 3, p. 640-647.
- [3] ESQUIUS-MOROTE, M., FUCHS, B., ZÜRCHER, J., MOSIG, J. R. Novel thin and compact H-plane SIW horn antenna, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, vol. 61, no. 6, p. 2911–2920.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 17.5.2018

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

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

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 částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je prostudovat možnosti a problematiku nízkoprofilových antén a následně navrhnout směrovou anténu s kulovým reflektorem pro milimetrové délky vlny. Teoretická část práce se zabývá základními informacemi o trychtýřových a reflektorových anténách, dále pak o technologii SIW. Dále práce pojednává o konkrétním návrhu a modelování antény pomocí programu CST Microwave Studio. Simulovaný návrh dosáhl dostatečné šířky pracovního pásma na pokrytí ISM (57 GHz až 64 GHz) při zisku 13,6 dBi na kmitočtu 60 GHz. Na vyrobené anténě jsou impedanční poměry antény horší a cílené šířky pracovního pásma nebylo dosaženo. Anténa dosáhla zisku 14,33 dBi pro frekvenci 60 GHz.

KLÍČOVÁ SLOVA

Anténa, SIW, reflektor, CST Microwave Studio, nízko profilová anténa, kmitočtové pásmo 60 GHz

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to study the possibilities and problems of low-profile antennas and subsequently to design a directional antenna with spherical reflector for millimeter wavelengths. The theoretical part deals with basic information about horn and reflector antennas, and about SIW technology. In addition, the thesis deals with the specific design and modeling of the antenna using CST Microwave Studio. The simulated design achieved a sufficient bandwidth to cover ISM (57 GHz to 64 GHz) with gain 13.6 dBi at 60 GHz frequency. On fabricated antenna, the antenna impedance ratios were worse and the target bandwidth was not reached. Antenna gain was 14.33 dBi at 60 GHz frequency.

KEYWORDS

Antenna, SIW, reflector, CST Microwave Studio, low profile antenna, frequency band 60 GHz

KRATOCHVÍL, J. *Směrová anténa pro kmitočtové pásmo 60 GHz*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 66 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Láčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Směrová anténa pro kmitočtové pásmo 60 GHz jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 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.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing Jaroslavu Láčíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

Obsah

Úvod	1
1 Teoretický rozbor	3
1.1 Reflektorové antény	3
1.1.1 Antény s parabolickým reflektorem	3
1.2 Trychtýřové antény	4
1.3 SIW technologie	5
2 Základní koncept antény	7
2.1 Koncept dvouvrstvé nízkoprofilové antény	7
2.2 Výběr substrátu	9
2.3 Návrh trychtýřového ozařovače	9
2.3.1 Návrh vlnovodu	9
2.3.2 Návrh trychtýře	11
3 Optimalizace antény	12
3.1 Základní rozměry antény a první simulace	12
3.1.1 Rozměry antény	12
3.1.2 Výsledky simulace	15
3.2 Optimalizace základních parametrů	16
3.2.1 Odstranění vychýlení vyzařovacího diagramu v rovině E	16
3.2.2 Šířka vlnovodu	18
3.2.3 Šířka trychtýřového ozařovače	19
3.2.4 Délka trychtýře	20
3.2.5 Šířka vazební štěrbiny	21
3.2.6 Vzdálenost štěrbiny od reflektoru	22
3.2.7 Délka vazební štěrbiny	23
3.2.8 Hledání ohniskové vzdálenosti	24
3.2.9 Vlastnosti antény po optimalizaci základních parametrů	25
3.3 Vylepšení anténního návrhu	25
3.3.1 Dielektrická zátěž	25
3.3.2 Paralelní metalické pásy	26
3.3.3 Dosažené parametry	30
3.4 Návrh napájecí vrstvy	31

3.4.1	Přepočet ekvivalentního metalického vlnovodu na vlnovod SIW	32
3.4.2	Optimalizace vazební šterbiny	33
3.5	Nahrazení ideálních stěn antény prokovy a spojení antény s napájecí vrstvou	34
3.6	Návrh přechodu WR-15 na SIW	35
3.7	Parametry a charakteristiky finálního návrhu antény	37
3.8	Geometrie a rozměry finálního návrhu antény	40
4	Realizace a měření	44
5	Závěr	48
	Literatura	50
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	51
	Seznam Příloh	53
A	fotodokumentace	54

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK 1	ANTÉNNÍ KONCEPT	1
OBRÁZEK 2	A) PŘEDNĚ BUZENÁ ANTÉNA B) CASSINGRAINOVA ANTÉNA [2]	3
OBRÁZEK 3	A) GREGORIÁNSKÁ ANTÉNA B) OFF-SETOVÁ ANTÉNA [2]	4
OBRÁZEK 4	DRUHY TRYCHTÝŘOVÝCH ANTÉN [2]	4
OBRÁZEK 5	STRUKTURA SIW [1]	5
OBRÁZEK 6	ŠÍŘENÍ VLNY TE ₁₀ VE VLNOVODU NA $f = 60$ GHz PRO RŮZNÉ VZDÁLENOSTI PROKOVŮ [12]	6
OBRÁZEK 7	ANTÉNNÍ KONCEPT, Z BOKU	7
OBRÁZEK 8	ANTÉNNÍ KONCEPT, HORNÍ VRSTVA	7
OBRÁZEK 9	ANTÉNNÍ KONCEPT, PŘECHOD MEZI VRSTVAMI A TRYCHTÝŘOVÍ OZAŘOVAČ	8
OBRÁZEK 10	POPIS TRYCHTÝŘOVÉHO OZAŘOVAČE [2]	11
OBRÁZEK 11	VYZAŘOVACÍ VRSTVA (ANTÉNA SHORA)	13
OBRÁZEK 12	VRSTVA S OZAŘOVAČEM (ANTÉNA ZDOLA)	13
OBRÁZEK 13	POKOVENÍ MEZI SUBSTRÁTY	14
OBRÁZEK 14	PROFIL ANTÉNY ZBOKU	14
OBRÁZEK 15	ČINITEL ODRAZU S_{11} V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI	15
OBRÁZEK 16	VYZAŘOVACÍ DIAGRAM PRO FREKVENCI 60 GHz, ROVINA H	15
OBRÁZEK 17	VYZAŘOVACÍ DIAGRAM PRO FREKVENCI 60 GHz, ROVINA E	16
OBRÁZEK 18	UMÍSTĚNÍ PLÁTU NA SPODNÍ VRSTVU NÁVRHU	17
OBRÁZEK 19	VYZAŘOVACÍ DIAGRAM PRO FREKVENCI 60 GHz V ROVINĚ E	17
OBRÁZEK 20	PARAMETR A_1 NA MODELU ANTÉNY	18
OBRÁZEK 21	ČINITEL ODRAZU PŘI ZMĚNĚ ŠÍŘKY VLNOVODU A_1 [mm]	18
OBRÁZEK 22	PARAMETR A_2 NA MODELU ANTÉNY	19
OBRÁZEK 23	ČINITEL ODRAZU PŘI ZMĚNĚ ŠÍŘKY APERTURY OZAŘOVACÍHO TRYCHTÝŘE A_2 [mm]	19
OBRÁZEK 24	PARAMETR VEL_HORN NA MODELU ANTÉNY	20
OBRÁZEK 25	ČINITEL ODRAZU PŘI ZMĚNĚ DÉLKY APERTURY OZAŘOVACÍHO TRYCHTÝŘE VEL_HORN [mm]	20

OBRÁZEK 26 PARAMETR SIR_STER NA MODELU ANTÉNY	21
OBRÁZEK 27 ČINITEL ODRAZU PŘI ZMĚNĚ ŠÍŘKY VAZEBNÍ ŠTĚRBINY SIR_STER [MM]	21
OBRÁZEK 28 PARAMETR VZD_STER NA MODELU ANTÉNY	22
OBRÁZEK 29 ČINITEL ODRAZU PŘI ZMĚNĚ VZDÁLENOSTI VAZEBNÍ ŠTĚRBINY VZD_STER [MM]	22
OBRÁZEK 30 PARAMETR ANG NA MODELU ANTÉNY	23
OBRÁZEK 31 ČINITEL ODRAZU PŘI ZMĚNĚ VELIKOSTI VAZEBNÍ ŠTĚRBINY ANG [°]	23
OBRÁZEK 32 PARAMETR OHN_VZD NA MODELU ANTÉNY	24
OBRÁZEK 33 ČINITEL ODRAZU PŘI ZMĚNĚ VZDÁLENOSTI APERTURY OD KRAJE ANTÉNY OHN_VZD [MM]	24
OBRÁZEK 34 DIELEKTRICKÁ ZÁTĚŽ	26
OBRÁZEK 35 ČINITEL ODRAZU V ZÁVISLOSTI NA DÉLCE DIELEKTRICKÉ ZÁTĚŽE $DELKA_ZATEZE$ [MM]	26
OBRÁZEK 36 PARALELNÍ METALICKÉ PÁSKY	27
OBRÁZEK 37 ČINITEL ODRAZU V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI PRO 2 PÁSKY	27
OBRÁZEK 38 ČINITEL ODRAZU V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI PRO 4 PÁSKY	28
OBRÁZEK 39 VYZAŘOVACÍ DIAGRAM V ROVINĚ E PRO FREKVENCI 60 GHz PRO 4 PÁSKY	28
OBRÁZEK 40 VYZAŘOVACÍ DIAGRAM V ROVINĚ H PRO FREKVENCI 60 GHz PRO 4 PÁSKY	29
OBRÁZEK 41 ČINITEL ODRAZU V ZÁVISLOSTI NA ŠÍŘCE VAZEBNÍ ŠTĚRBINY SIR_STER [MM]	29
OBRÁZEK 42 ČINITEL ODRAZU V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI	30
OBRÁZEK 43 ČINITEL ODRAZU V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI PO ZVĚTŠENÍ NÁVRHU	31
OBRÁZEK 44 ZMĚNA EKVIVALENTNÍHO VLNOVODU NA SIW [12]	32
OBRÁZEK 45 NAPÁJECÍ PŘECHOD MEZI VLNOVODY	33
OBRÁZEK 46 S_{11} A S_{21} NAVRŽENÉHO NAPÁJECÍHO PŘECHODU	33
OBRÁZEK 47 ČINITEL ODRAZU V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI FINÁLNÍHO NÁVRHU	34
OBRÁZEK 48 MODEL PRO OPTIMALIZACI PŘECHODU WR-15 NA SIW, POHLED Z BOKU	35
OBRÁZEK 49 MODEL PRO OPTIMALIZACI PŘECHODU WR-15 NA SIW, POHLED SHORA	35
OBRÁZEK 50 ČINITEL ODRAZU PŘECHODU WR-15 NA SIW	36
OBRÁZEK 51 ČINITEL ODRAZU PO PŘIDÁNÍ PŘECHODKY NA VLNOVOD WR-15	36
OBRÁZEK 52 ČINITEL ODRAZU V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI	37
OBRÁZEK 53 ZISK V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI	38
OBRÁZEK 54 POTLAČENÍ POSTRANNÍCH LALOKŮ V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI, ROVINA H	38
OBRÁZEK 55 POTLAČENÍ POSTRANNÍCH LALOKŮ V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI, ROVINA E	38
OBRÁZEK 56 VYZAŘOVACÍ DIAGRAM V ROVINĚ E PRO FREKVENCI 60 GHz	39
OBRÁZEK 57 VYZAŘOVACÍ DIAGRAM V ROVINĚ H PRO FREKVENCI 60 GHz	39
OBRÁZEK 58 FINÁLNÍ NÁVRH ANTÉNY, POHLED Z BOKU	40
OBRÁZEK 59 FINÁLNÍ NÁVRH ANTÉNY, HORNÍ VRSTVA	40
OBRÁZEK 60 FINÁLNÍ NÁVRH ANTÉNY, HORNÍ VRSTVA	41
OBRÁZEK 61 FINÁLNÍ NÁVRH ANTÉNY, PROSTŘEDNÍ VRSTVA	41
OBRÁZEK 62 FINÁLNÍ NÁVRH ANTÉNY, PROSTŘEDNÍ VRSTVA, DETAIL NA VAZEBNÍ ŠTĚRBINU	42
OBRÁZEK 63 FINÁLNÍ NÁVRH ANTÉNY, DOLNÍ VRSTVA	42
OBRÁZEK 64 FINÁLNÍ NÁVRH ANTÉNY, DOLNÍ VRSTVA	43
OBRÁZEK 65 FINÁLNÍ NÁVRH ANTÉNY	43
OBRÁZEK 66 ČINITEL ODRAZU V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI	44
OBRÁZEK 67 ZISK V ZÁVISLOSTI NA FREKVENCI	45
OBRÁZEK 68 VYZAŘOVACÍ DIAGRAM, ROVINA E PRO FREKVENCI 60 GHz	45
OBRÁZEK 69 VYZAŘOVACÍ DIAGRAM V ROVINĚ E, KŘÍŽOVÁ SLOŽKA PRO FREKVENCI 60 GHz – MĚŘENÍ	46
OBRÁZEK 70 VYZAŘOVACÍ DIAGRAM. H ROVINA PRO FREKVENCI 60 GHz	46
OBRÁZEK 71 VYZAŘOVACÍ DIAGRAM V ROVINĚ H, KŘÍŽOVÁ SLOŽKA PRO FREKVENCI 60 GHz – MĚŘENÍ	47

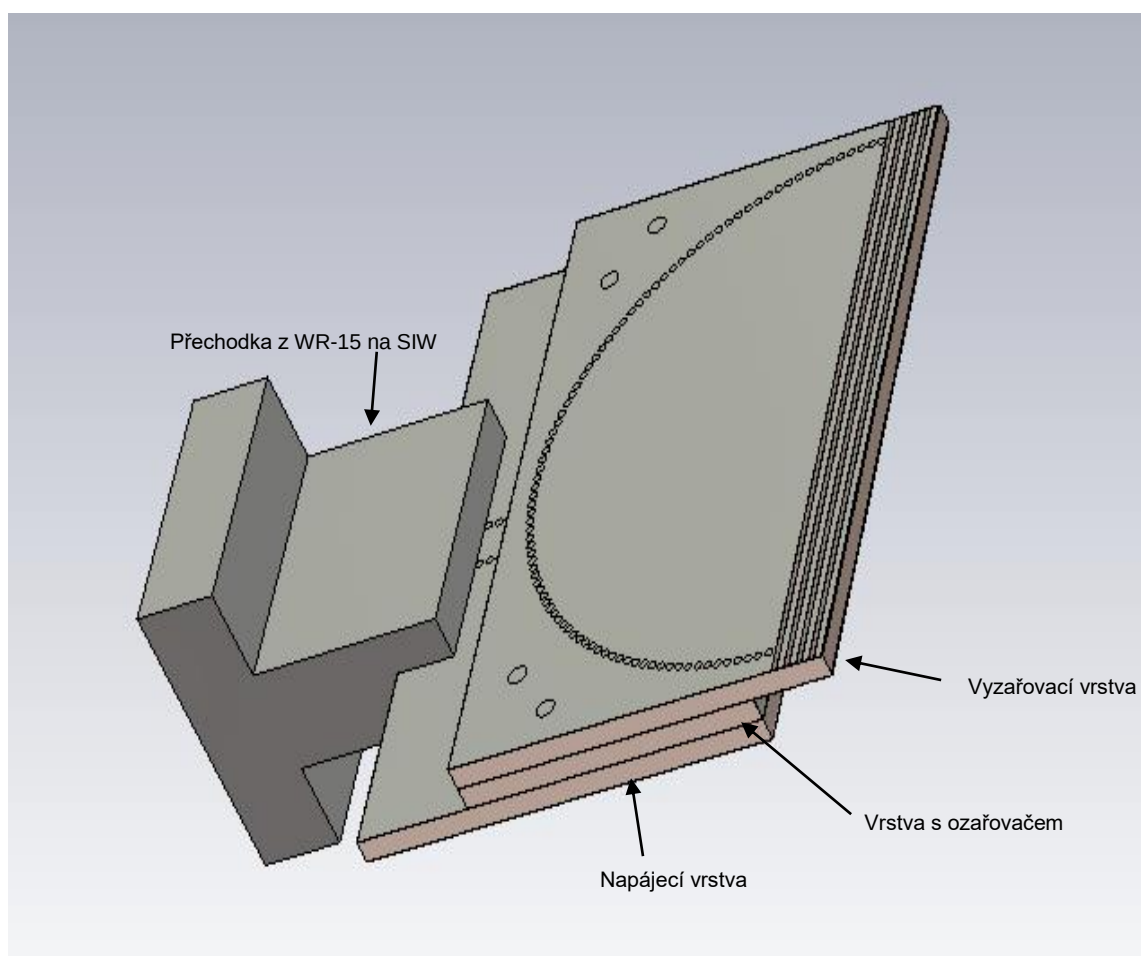
SEZNAM TABULEK

TABULKA 1 ZÁVISLOST ROZESTUPU PROKOVŮ NA ČINITELY ODRAZU A PŘENOSU SIW VLNOVODU [12].....	6
TABULKA 2 PARAMETRY SUBSTRÁTU CUCLAD 217 PRO KMITOČET 60 GHz [3]	9
TABULKA 3 ZÁKLADNÍ ROZMĚRY ANTÉNY	12
TABULKA 4 VLASTNOSTI ANTÉNY PO OPTIMALIZACI ZÁKLADNÍCH ROZMĚROVÝCH PARAMETRŮ	25
TABULKA 5 DOSAŽENÉ PARAMETRY	30
TABULKA 6 VÝSLEDNÉ ROZMĚRY NAPÁJECÍCH VAZEBNÍCH ŠTĚRBIN	34
TABULKA 7 PARAMETRY FINÁLNÍHO NÁVRHU ANTÉNY	37
TABULKA 8 PARAMETRY VYROBENÉ ANTÉNY	47

ÚVOD

Cílem této práce je nastudovat problematiku nízkoprofilových směrových antén pro frekvenční pásmo 60 GHz a následně anténu navrhnout, a simulovat její vlastnosti ve vhodném programovém prostředí. Navržená anténa využívá SIW technologie s kulovým reflektorem a trychtýřovým ozařovačem. První část práce tedy pojednává o teorii ohledně použité SIW technologie a použitých typech antén, tedy reflektorové a trychtýřové antény.

Po prostudování zdrojů [4] až [9] jsem se rozhodl, že z důvodů omezení potenciálních postranních laloků se bude jednat o třívrstvý návrh pomocí SIW technologie tak, aby navržený ozařovač reflektoru nezasahoval do vyzařovací části antény. Prostřední vrstva substrátu s ozařovačem je spojena s horní vyzařovací vrstvou pomocí vazební štěrbiny. Z horní vrstvy je poté vlna vyzářena do prostoru. Dolní vrstva slouží jako napájecí, ke které je připojen napájecí přechod z vlnovodu WR-15 na SIW.



Obrázek 1 Anténní koncept

Hlavní částí práce je tedy navrhování těchto jednotlivých komponent antény a jejich následná optimalizace s cílem dosažení co nejlepších vlastností. První část samotného návrhu spočívá v podrobném popisu konceptu antény a ve vhodné volbě substrátu. Dále je uveden návrh ozařovací antény. Následující krok je optimalizace antény, kde lze pozorovat vliv změn jednotlivých rozměrových parametrů antény na činitel odrazu a její vyzařovací charakteristiky. Po optimalizaci samotné antény následuje návrh napájecí vrstvy a přechodu z vlnovodu WR15 na SIW. Simulace byly provedeny v programovém prostředí CST Microwave Studio.

Následuje kapitola o realizaci antény a měření jejích vlastností v laboratoři. V závěru jsou potom zhodnoceny dosažené výsledky.

1 TEORETICKÝ ROZBOR

V následující kapitole se blíže podíváme na technologie využitě při návrhu. Vzhledem k tomu, že se jedná o nízko profilovou anténu, je třeba se zaměřit na technologie SIW a ve zkratce se zmínit o reflektorových a trychtýřových anténách.

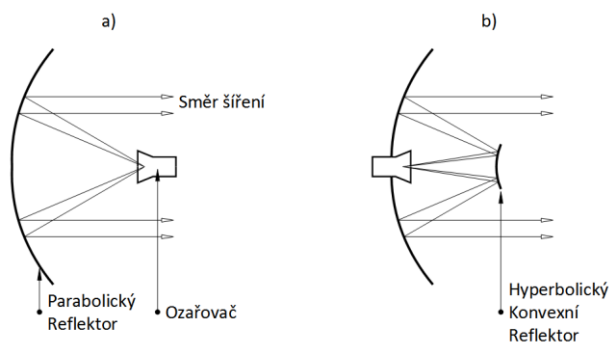
1.1 Reflektorové antény

Jedná se o nejrozšířenější druh směrové antény. Vyzařovací charakteristiky reflektorových antén je tvořena odrazem elektromagnetické vlny od reflektoru. V závislosti na požadovaných vlastnostech antény mohou mít reflektory různé tvary a struktury. V rámci této diplomové práce se zaměřím pouze na parabolické reflektory.

1.1.1 Antény s parabolickým reflektorem

V této práci je navrhována anténa s kulovým reflektorem. Vzhledem k tomu, že kružnice je speciální případ paraboly, jsou parabolické reflektory nejbližší použitému reflektoru.

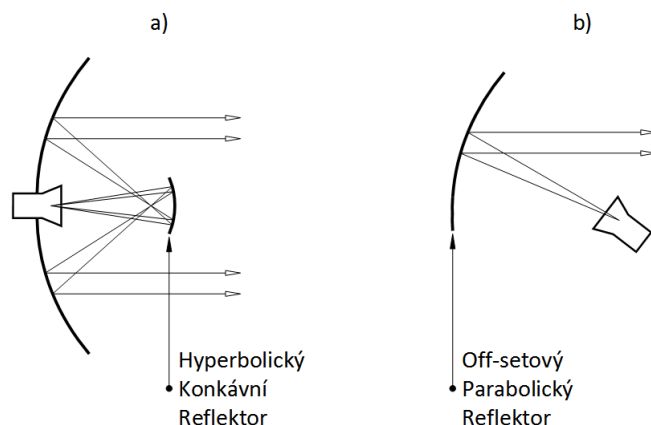
Anténa se skládá z ozařovače a parabolického reflektoru vlny. K ozáření reflektoru se používají různé druhy ozařovačích antén v závislosti na požadované polarizaci vlny, nejvíce rozšířené jsou trychtýřové ozařovače. Dle zvolené polarizace je použit jako ozařovač obdélníkový či kuželový vlnovod. Pokud je ozařovač umístěn v ohnisku paraboly, dojde k transformaci na rovinnou vlnu. Na obrázku 2. a 3. lze vidět 4 využívané druhy reflektorových antén. [2]



Obrázek 2 a) Předně buzená anténa b) Cassingrainova anténa [2]

Předně buzená anténa má nevýhodu v ozařovači umístěném přímo naproti reflektoru. To může vést k velkým postranním lalokům. U Cassingrainovy antény dochází k výraznému potlačení postranních laloků díky sekundárnímu reflektoru. Nevýhodou takového návrhu

je větší složitost a rozměry reflektoru. [2]

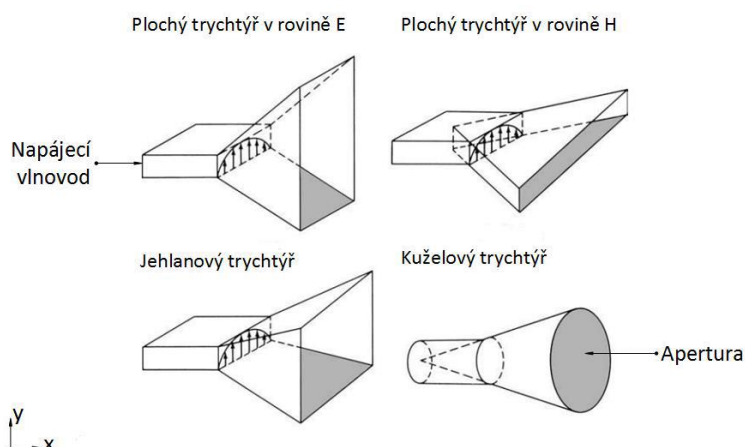


Obrázek 3 a) Gregoriánská anténa b) Off-setová anténa [2]

Problémy se stíněním vlny odražené od reflektoru eliminuje off-setová anténa. Tento typ je vyžíván u menších struktur, kde by byl vliv zastínění na zisk antény nezanedbatelný.

1.2 Trychtýřové antény

Jako ozařovač je v této práci použita směrová trychtýřová anténa. Jedná se o vlnovod, který je na svém konci rozšířen (viz. Obrázek 4). Dochází tak k přenesení vlny z vlnovodu do volného prostoru. Na pozvolně se rozšiřujícím ústí apertury dochází k postupné transformaci impedance, což vede ke snížení činiteli odrazu. Na obrázku 4 lze vidět druhy trychtýřových antén [2].



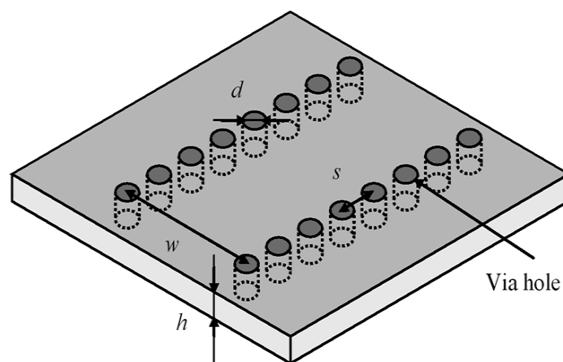
Obrázek 4 Druhy trychtýřových antén [2]

Tvarem a velikostí trychtýřové antény lze dosáhnout požadovaných parametrů pro vybranou aplikaci, jako jsou zisk, směrovost či polarizace [2].

1.3 SIW technologie

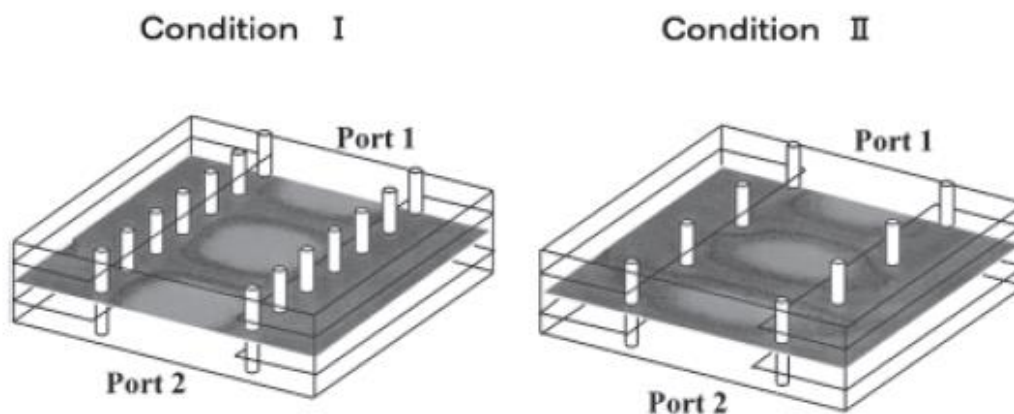
Technologie SIW (z anglického Substrate Integrated Waveguide) je založena na vlnovodu integrovaného přímo do substrátu. V posledních letech lze pozorovat velký nárůst oblíbenosti této technologie hned v několika oblastech elektroniky, a to hned z několika důvodů. SIW antény lze realizovat pomocí PCB technologie stejně jako například mikropáskové antény (či jiná mikropásková vedení), dokáží ovšem pracovat na kmitočtech, kde jsou klasické mikropáskové struktury neefektivní. Vysoká míra integrace takto vytvořených vlnovodů je další nepopíratelnou výhodou oproti běžným vlnovodům.

Vlnovod realizovaný pomocí SIW technologie je ukázán na obrázku 5. Základem je substrát s definovanou výškou h , relativní permitivitou ϵ_r a ztrátovým činitelem $\tan \delta$. Substrát je pokoven z obou stran a tyto kovové vrstvy jsou spojeny prokovy s definovaným průměrem d a rozestupem prokovů s . Právě uspořádání prokovů a vzdálenost w nám určuje vlastnosti navrhovaného vlnovodu.



Obrázek 5 Struktura SIW [1]

Jednou z možných nevýhod SIW vlnovodů oproti klasickým je závislost jejich efektivity na rozestupu prokovů. Mezi prokovy vždy dochází ke ztrátám energie a se zvětšující se vzdáleností jednotlivých prokovů jsou tyto ztráty větší. To je způsobeno „vytékáním“ energie do prostoru mezi prokovy. Tento jev je názorně ukázán na obrázku 6. Tabulka 1 potom ukazuje závislost činitele odrazu a přenosu na rozestupu prokovů.



Obrázek 6 Šíření vlny TE₁₀ ve vlnovodu na $f = 60$ GHz pro různé vzdálenosti prokův [12]

Rozestup prokův [mm]	0,26	0,52	0,78	1,04
S_{21} [dB]	-1,1	-1,8	-3,4	-8,6
S_{11} [dB]	-23,3	-17,5	-14,5	-13,7

Tabulka 1 Závislost rozestupu prokův na činiteli odrazu a přenosu SIW vlnovodu [12]

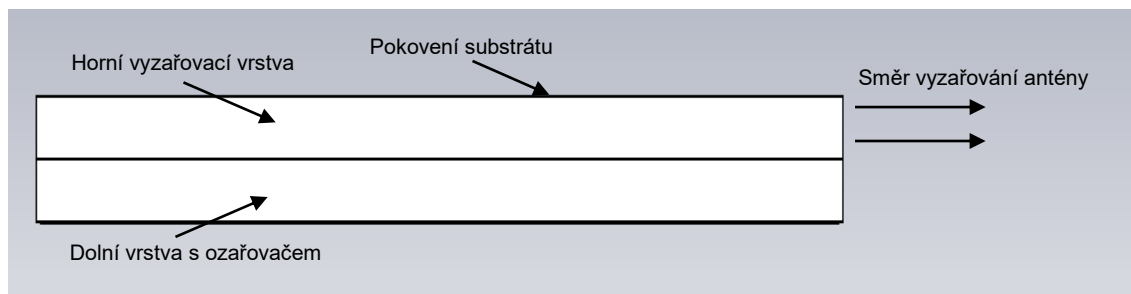
Při návrhu je nutné pamatovat na to, že nelze vyrobit díly s příliš malou vzdáleností prokův. Tyto problémy se u klasických vlnovodů nevyskytují, jejich výroba je ale výrazně dražší bez možnosti vysoké integrace, kterou disponují SIW vlnovody.

2 ZÁKLADNÍ KONCEPT ANTÉNY

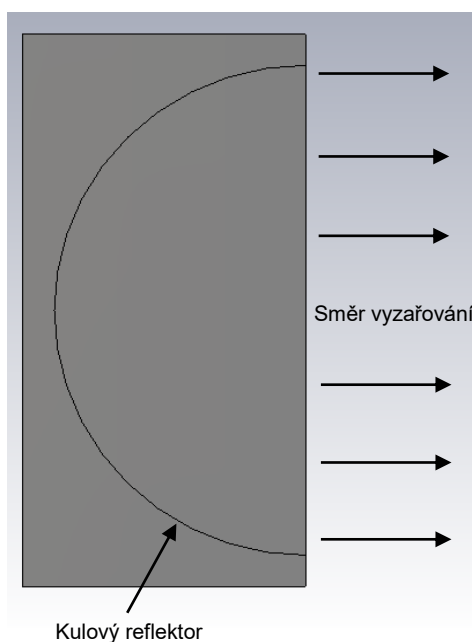
Na následujících několika stránkách je popsán koncept antény a cíle, kterých má tento návrh dosáhnout. Dále kapitola zahrnuje postup při výběru substrátu a návrh vhodného ozařovače.

2.1 Koncept dvouvrstvé nízkoprofilové antény

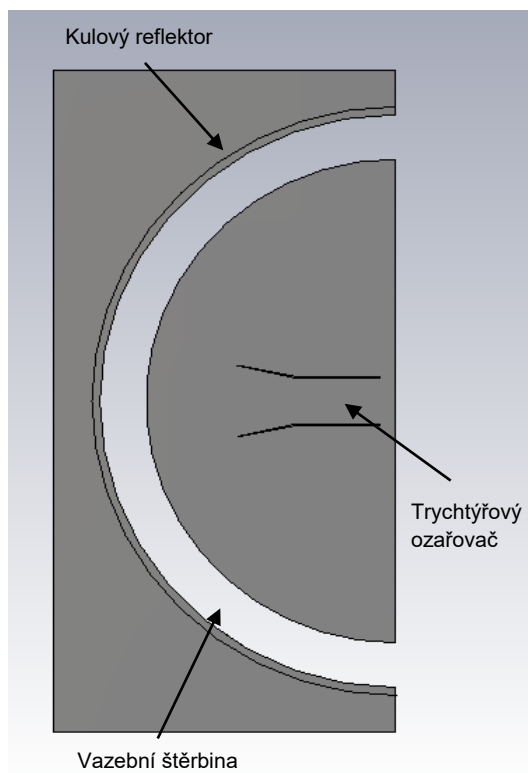
Diplomová práce se zabývá návrhem dvouvrstvé reflektorové antény integrované do substrátu. Na rozdíl od běžně používaných parabolických reflektorových antén, je v této práci zkoumán kulový reflektor a jeho vliv na vlastnosti antény. Návrh samotný je rozdělen na dvě vrstvy. V dolní vrstvě se nachází ozařovač reflektoru a samotný reflektor, který pokračuje do horní vrstvy. V horní vrstvě je vlna odražená od reflektoru vyzářena. Za přechod vlny mezi vrstvami odpovídá vazební šterbina.



Obrázek 7 Anténní koncept, z boku



Obrázek 8 Anténní koncept, horní vrstva



Obrázek 9 Anténní koncept, přechod mezi vrstvami a trychtýřový ozařovač

Na obrázcích 7 až 9 byly pro jednoduchost prokovy nahrazeny stěnami z dokonale vodivého materiálu (PEC).

Kulové reflektory nejsou běžně zkoumány a používány, tato diplomová práce proto zkoumá jeho vliv.

Dvouvrství návrh eliminuje problém jednovrstvých reflektorových antén integrovaných do substrátu s velikostí postranních laloků. Pokud se ozařovač nachází ve stejné rovině jako reflektor, negativně ovlivňuje jeho vyzařovací vlastnosti a zvětšuje postranní laloky antény. Umístění ozařovače do spodní roviny tento problém eliminuje a umožňuje tak konceptu dosáhnout lepších směrových vlastností.

Výsledná anténa by tak využila výhod, které poskytuje technologie vlnovodu integrovaného do substrátu, jako jsou rozměry, náklady na výrobu, rozměry či možnost integrovat anténu do složitějších mikrovlnných struktur.

2.2 Výběr substrátu

Nejprve bylo nutné vybrat vhodný substrát. U nízkoprofilových konstrukcí se substrát vybírá podle ztrátového činitele a relativní permitivity. Tyto vlastnosti je nutné minimalizovat z důvodu nízkých dielektrických ztrát a co nejmenšího rozdílu mezi permitivitou substrátu a volného prostoru. Dalším parametrem substrátu je jeho výška. Ta sama o sobě ovlivňuje dielektrické ztráty a pracovní pásmo navržené konstrukce.

Pro návrh jsme vybrali substrát CuClad 217, a to z důvodu jeho frekvenční stability a dostatečně nízkých hodnot parametrů zmíněných výše. V tabulce 2 lze nalézt jeho konkrétní parametry.

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Relativní permitivita	ϵ_r	2,17	-
Ztrátový činitel	$\tan \delta$	0,0025	-
Výška substrátu	h	1,524	mm

Tabulka 2 Parametry substrátu CuClad 217 pro kmitočet 60 GHz [3]

2.3 Návrh trychtýřového ozařovače

Jak již bylo řečeno v kapitole 1.2, nejčastěji se jako ozařovač reflektorových antén využívá trychtýřová anténa. Při použití SIW technologie lze realizovat pouze obdélníkový vlnovod. Nejprve byl tedy navržen vlnovod a později k němu trychtýřové rozšíření apertury.

2.3.1 Návrh vlnovodu

Jedním z hlavních parametrů vlnovodu je jeho kritická frekvence f_k . Vidy, které se nachází na frekvenci nižší, než je kritická frekvence, se vlnovodem šířit nebudou. Tuto frekvenci volíme tak, aby došlo pouze k šířením dominantního vid TE_{10} . Poměr pracovní a kritické frekvence se volí následovně. [2]

$$1,25 < \frac{f_p}{f_k} < 1,9 \quad (2.1)$$

Kde f_p je pracovní frekvence

f_k je kritická frekvence

Tento poměr se běžně volí jako 1,4. Pracovní frekvence byla zvolena 60 GHz. Z rovnice 2.1 lze spočítat kritickou frekvenci.

$$f_k = \frac{f_p}{1,4} \quad (2.2)$$

$$f_k = \frac{60 * 10^9}{1,4} = 42,857 \text{ GHz} \quad (2.3)$$

Nyní lze vypočítat šířku vlnovodu vyplněného dielektrikem.[2]

$$a_{vln} = \frac{c}{2 * f_k * \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.4)$$

$$a_{vln} = \frac{3 * 10^8}{2 * 42,857 * 10^9 * \sqrt{2,17}} = 2,375 \text{ mm} \quad (2.5)$$

Kde c je rychlost světla ve vakuu $3 * 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$

ϵ_r je relativní permitivita 2,17

Výška substrátu a délka vlnovodu nemají přímý vliv na návrh. Jedná se o vypočítané hodnoty, které je třeba otestovat v simulaci a optimalizovat.

Dále jsou uvedeny vztahy pro délku vlny v substrátu λ_s a ve vlnovodu λ_g . [2]

$$\lambda_s = \frac{c}{f_p * \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.6)$$

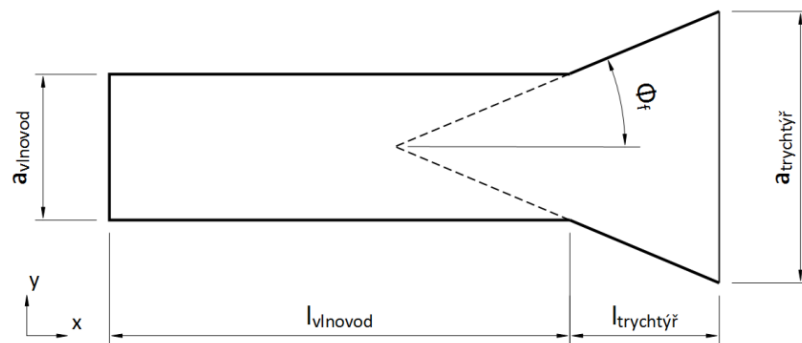
$$\lambda_s = \frac{3 * 10^8}{60 * 10^9 * \sqrt{2,17}} = 3,394 \text{ mm} \quad (2.7)$$

$$\lambda_g = \frac{\frac{c}{f_p * \sqrt{\epsilon_r}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_k}{f_p} \right)^2}} \quad (2.8)$$

$$\lambda_g = \frac{\frac{3 * 10^8}{60 * 10^9 * \sqrt{2,17}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{42,857 * 10^9}{60 * 10^9}\right)^2}} = 4,85 \text{ mm} \quad (2.9)$$

2.3.2 Návrh trychtýře

Při návrhu trychtýřové antény ve volném prostoru má návrh přesně definovaná pravidla a parametry. Pro trychtýř umístěný v substrátu ovšem tato pravidla nelze aplikovat, a proto se určení parametrů trychtýře dělá empiricky pomocí simulací. Kompletní popis trychtýřového ozařovače je na obrázku 10.



Obrázek 10 Popis trychtýřového ozařovače [2]

Parametry, které bylo nutné zjistit simulací, byly $l_{trychtýř}$ a $a_{trychtýř}$. Na základě vlivu těchto parametrů na činitel odrazu, byly hodnoty stanoveny na $l_{trychtýř} = 3,36 \text{ mm}$ a $a_{trychtýř} = 4,2 \text{ mm}$ (viz. Kapitola 3.2.3 a 3.2.4).

3 OPTIMALIZACE ANTÉNY

Tato kapitola popisuje jednotlivé optimalizační kroky při návrhu antény. Nejprve jsou zde zobrazeny základní rozměry antény, ze kterých jsem vycházel pro první simulaci. Dále jsou zobrazeny výsledky jednotlivých optimalizačních kroků a přidávání dalších komponent pro vylepšení vlastností antény. Následuje kapitola o optimalizaci napájecí vrstvy a návrh přechodu z vlnovodu WR-15 na SIW.

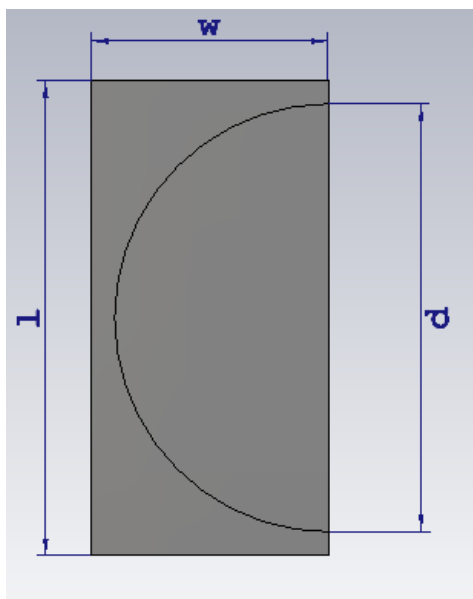
3.1 Základní rozměry antény a první simulace

V tabulce 3 jsou k nalezení rozměry antény. Takto navržená anténa byla použita pro první simulaci a dále upravována. Při prvním návrhu je ozařovač prozatím pouze vlnovod, bez rozšíření na trychtýř. To z toho důvodu, že parametry rozšíření byly nalezeny až později pomocí simulací.

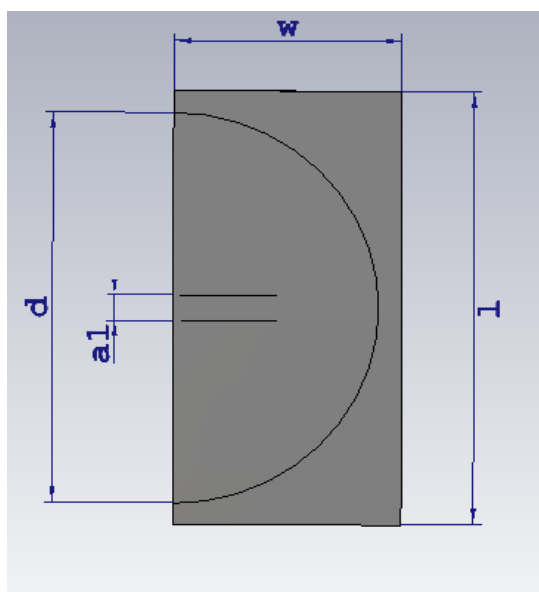
3.1.1 Rozměry antény

Parametr	Označení parametru	Velikost [mm]
Šířka antény	w	20
Výška antény	l	40
Tloušťka substrátu	h	1,524
Tloušťka pokovení	t _s	0,036
Délka vlnovodu	l _{vl}	8,394
Šířka vlnovodu	a ₁	2,375
Poloměr reflektoru	r	18
Průměr reflektoru	d	36
Vzdálenost vazební štěrby od vlnovodu	vzd_ster	0,2
Šířka vazební štěrby	sir_ster	1,7

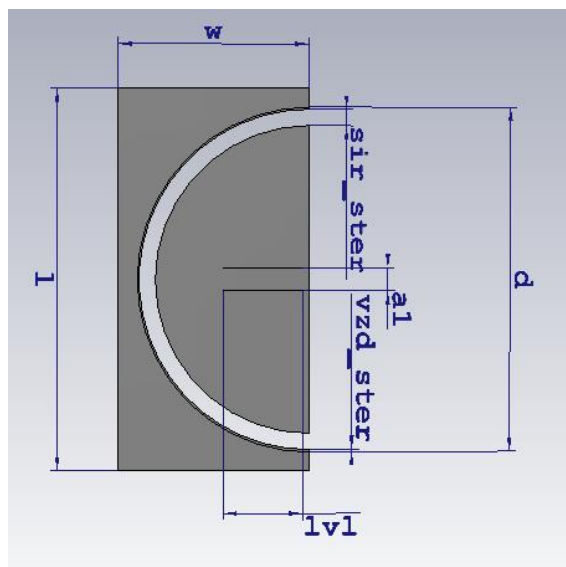
Tabulka 3 Základní rozměry antény



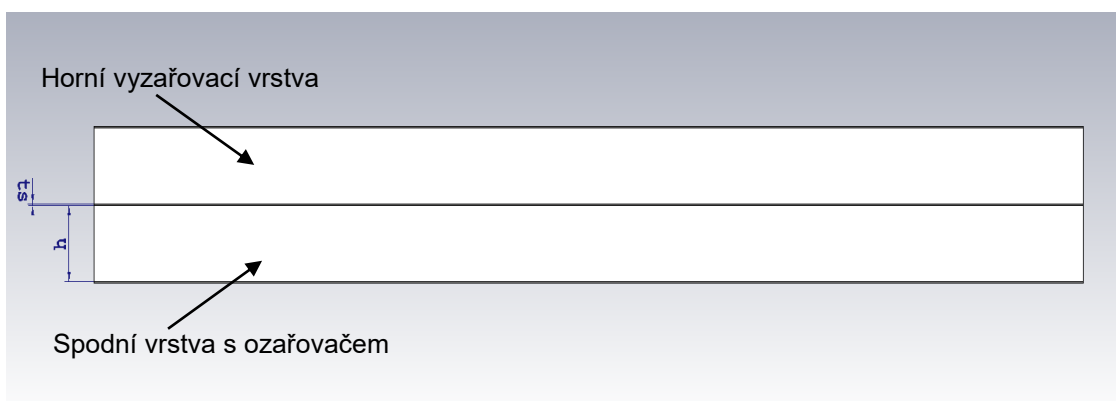
Obrázek 11 Vyzařovací vrstva (anténa shora)



Obrázek 12 Vrstva s ozařovačem (anténa zdola)



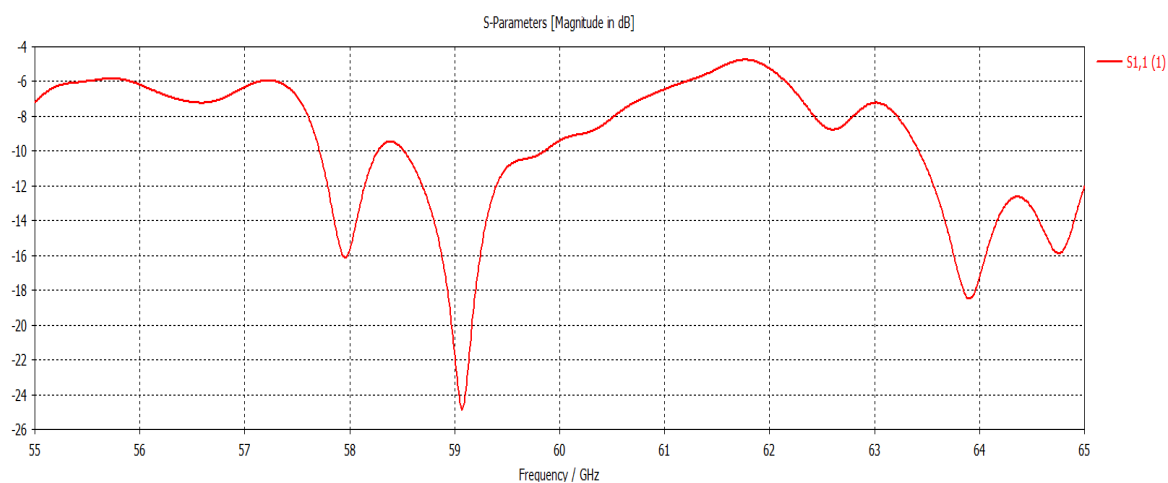
Obrázek 13 pokovení mezi substráty



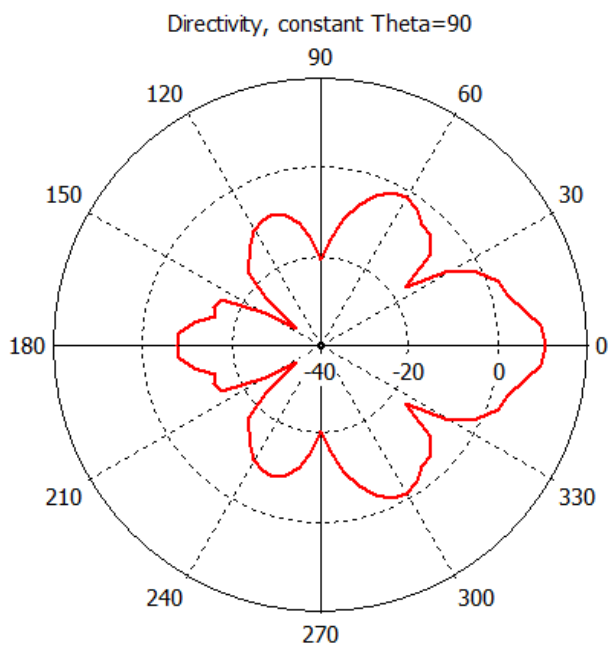
Obrázek 14 Profil antény zboku

3.1.2 Výsledky simulace

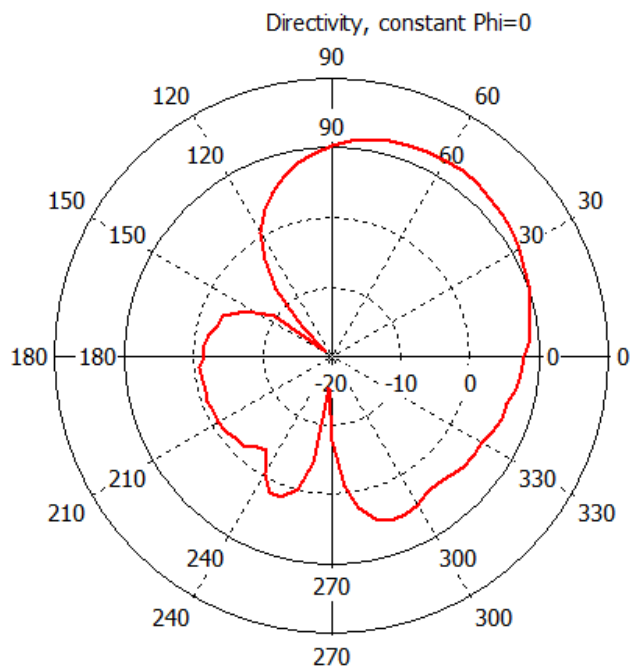
Výsledky simulace antény s rozměry uvedenými v tabulce 3.



Obrázek 15 Činitel odrazu S_{11} v závislosti na frekvenci



Obrázek 16 Vyzařovací diagram pro frekvenci 60 GHz, rovina H



Obrázek 17 Vyzařovací diagram pro frekvenci 60 GHz, rovina E

Z výsledků pro činitele odrazu lze vyčíst, že pracovní pásmo antény je mimo požadovanou hodnotu 60 GHz. Na vyzařovacím diagramu v rovině E pozorujeme vyzařování antény o zhruba o 45° vzhůru.

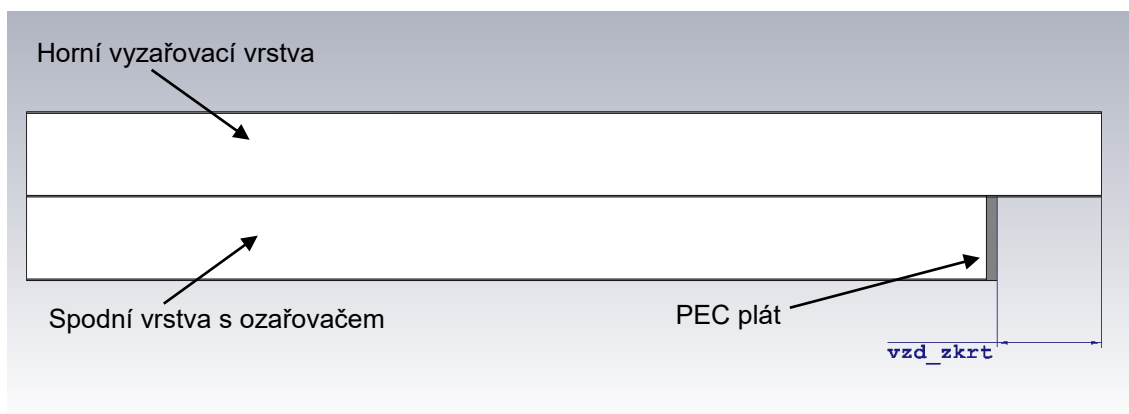
3.2 Optimalizace základních parametrů

V této části lze detailně pozorovat vliv jednotlivých parametrů na výsledné vlastnosti antény a hledání jejich optimálních rozměrů.

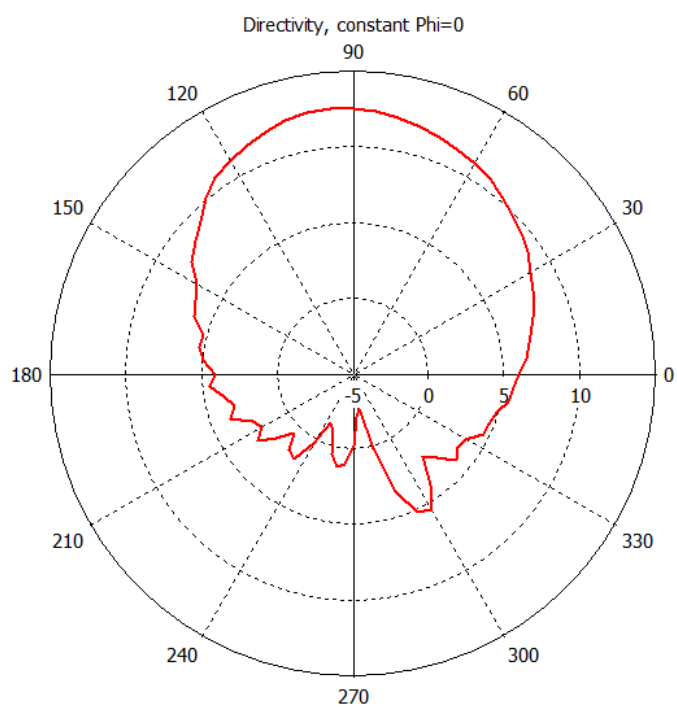
3.2.1 Odstranění vychýlení vyzařovacího diagramu v rovině E

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1.2. jeden z největších nedostatků dosavadního návrhu je odklonění vyzařovacího diagramu v rovině E. Tento problém byl řešen přidáním plátu z materiálu PEC za spodní vrstvu návrhu. Úpravu lze vidět na obrázku 18. Pro lepší představu byl plát zvětšen, pro simulace byla jeho šířka 0,036 mm.

Takto upravený návrh vedl opět k vychýlení vyzařovacího diagramu v rovině E, tentokrát ovšem na opačnou stranu. Bylo proto nutné oddálit tento plát od apertury antény o správnou vzdálenost (vzd_zkrt) tak, aby ve vyzařovacím diagramu nebyl pozorován odklon hlavního svazku. Při optimalizaci byla tato vzdálenost stanovena na $vzd_zkrt = 2,13$ mm.



Obrázek 18 umístění plátu na spodní vrstvu návrhu



Obrázek 19 Vyzařovací diagram pro frekvenci 60 GHz v rovině E

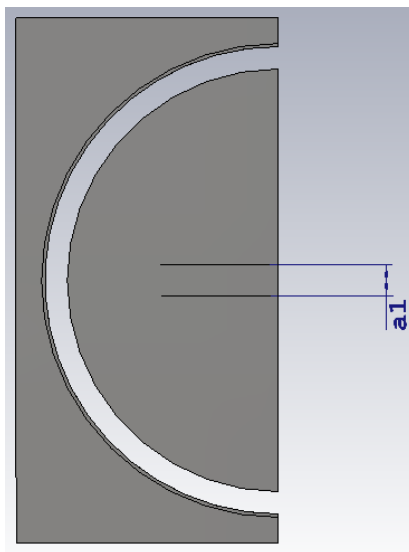
Z obrázku 19 lze vidět, že došlo k výraznému zlepšení v rovině E.

3.2.2 Šířka vlnovodu

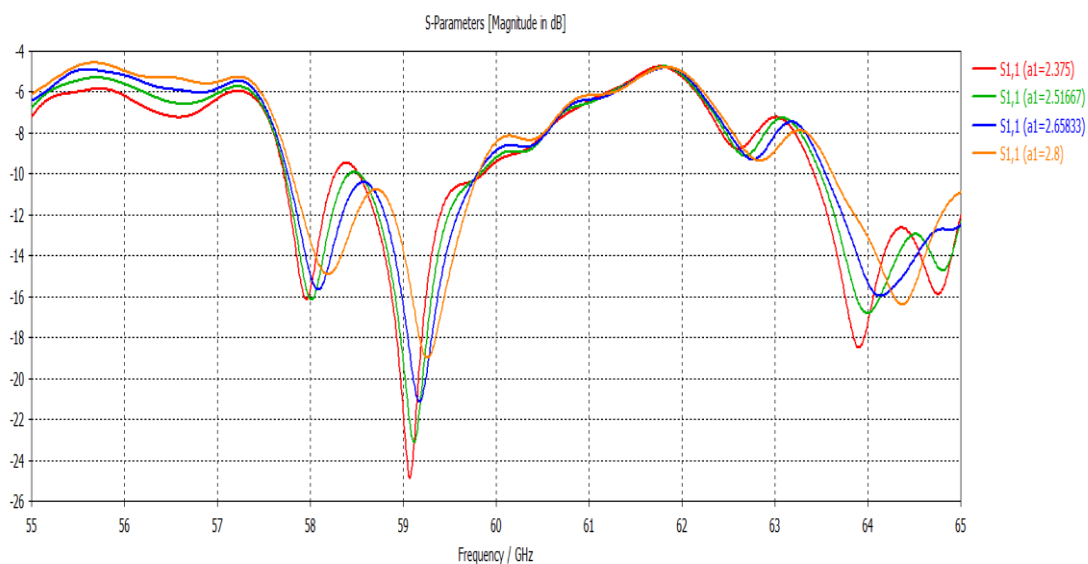
Po eliminaci problému s vychýlením vyzařovacího diagramu jsem hledal optimální rozměry jednotlivých parametrů.

Nejprve se jedná o šířku vlnovodu. Na rozdíl od ostatních parametrů, zde vycházíme z výpočtu uvedeného v kapitole 2.3.1.

Pro následující parametry je uváděn pouze činitel odrazu, na vyzařovací diagram neměly jednotlivé změny významný vliv.



Obrázek 20 Parametr a_1 na modelu antény



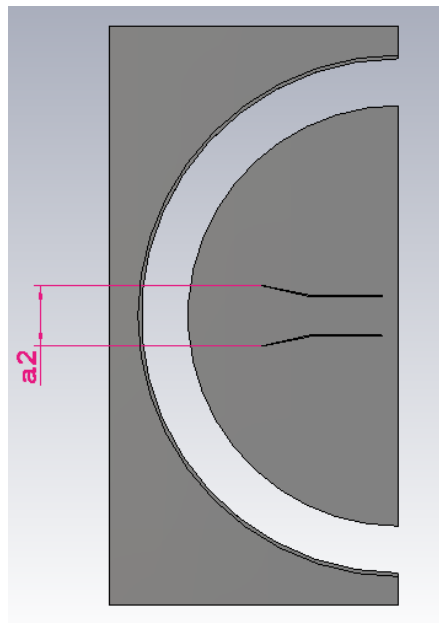
Obrázek 21 Činitel odrazu při změně šířky vlnovodu a_1 [mm]

Z grafu pro činitel odrazu lze pozorovat, že vyšší rozměry posunují pracovní oblast

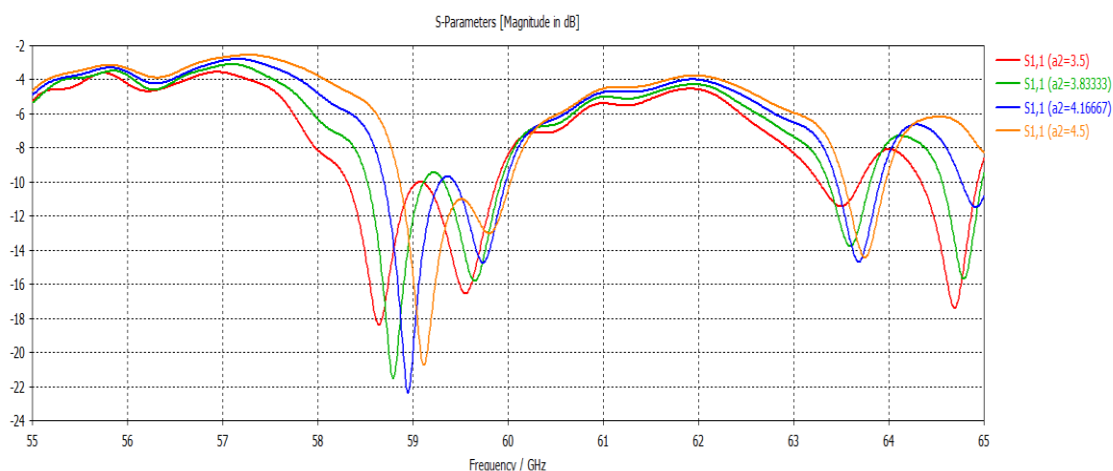
směrem k požadované frekvenci 60 GHz, ovšem za cenu zhoršení činitele odrazu. Byl tedy zvolen rozměr $a_1 = 2,66$ mm.

3.2.3 Šířka trychtýřového ozařovače

Jako další parametr byla měněna šířka apertury ozařovače a_2 . Délka trychtýře byla prozatím stejná, jako je naznačeno v kapitole 3.1.1, a to 3,4 mm. Výsledky simulací ukazuje obrázek 23.



Obrázek 22 Parametr a_2 na modelu antény

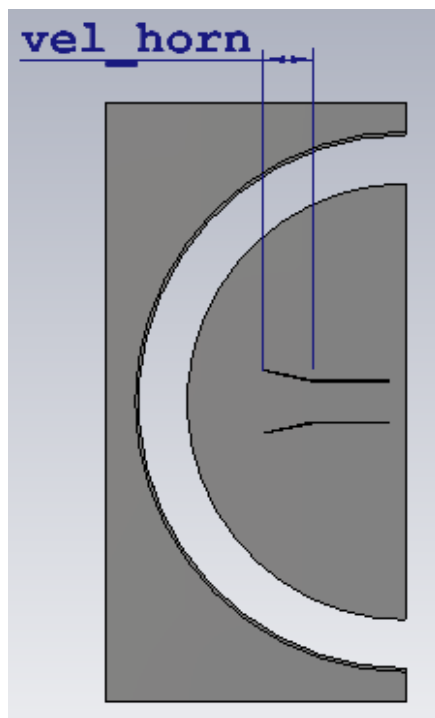


Obrázek 23 Činitel odrazu při změně šířky apertury ozařovacího trychtýře a_2 [mm]

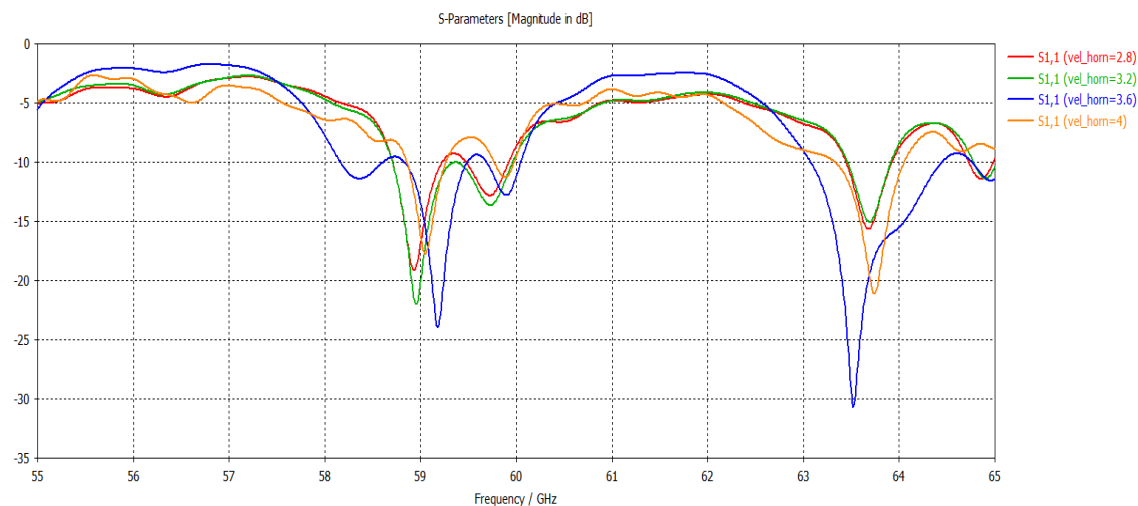
Z grafu pro činitel odrazu lze vidět zlepšení oproti simulacím s pouhým vlnovodem. Také pracovní pásmo se posouvá k hodnotě 60 GHz, ovšem při rozměru větším než $a_2 = 4,2$ mm dochází ke zhoršení činitele odrazu.

3.2.4 Délka trychtýře

Po optimalizaci apertury trychtýře se bylo třeba zaměřit na jeho délku. Při simulacích byly zkoumány hodnoty v okolí počátečního rozměru $vel_horn = 3,4$ mm. Výsledky lze vidět na obrázku 25.



Obrázek 24 Parametr vel_horn na modelu antény

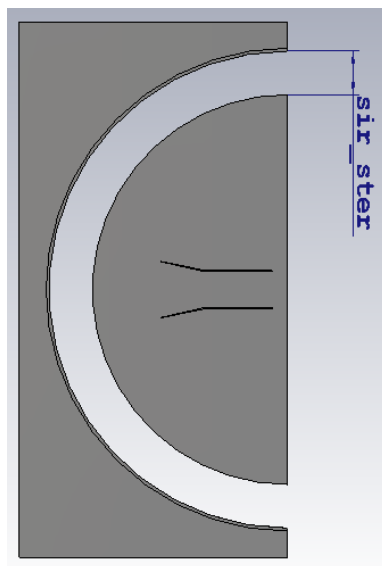


Obrázek 25 Činitel odrazu při změně délky apertury ozařovacího trychtýře vel_horn [mm]

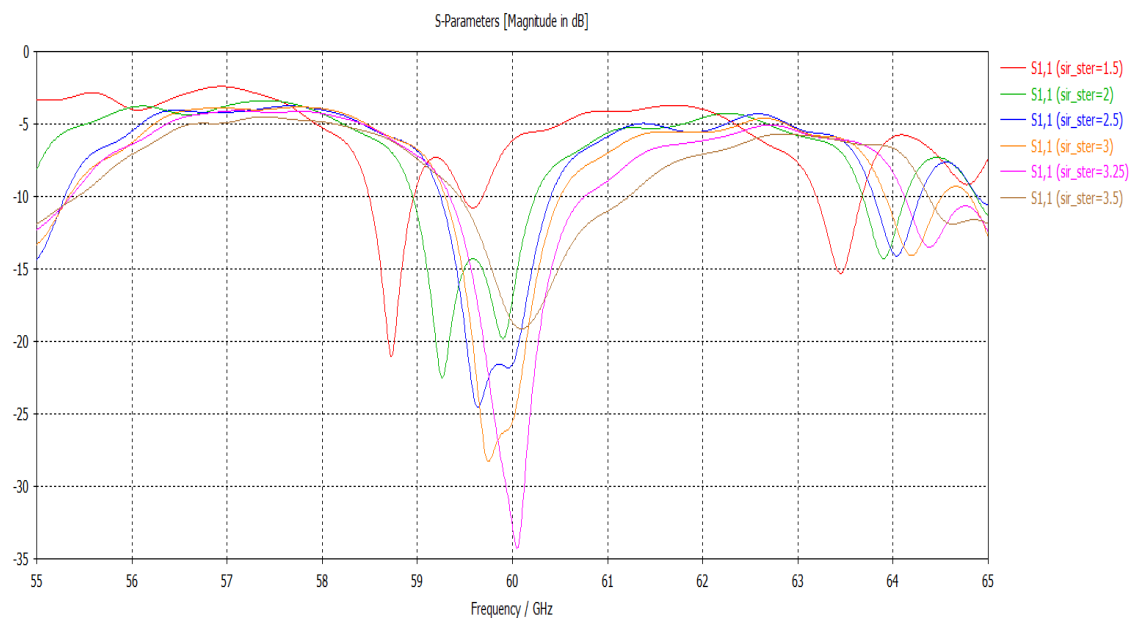
Při srovnání činitele odrazu s předchozím krokem, můžeme okamžitě vidět, že jak hodnoty menší než $vel_horn = 3,4$ mm, tak větší, zhoršují vlastnosti antény.

3.2.5 Šířka vazební štěrby

Po dokončení optimalizace ozařovače byly zkoumány ostatní rozměry antény. Je zjevné, že šířka vazební štěrby bude mít na tento návrh kritický vliv a bylo nutné simulovat více hodnot toho parametru, než obvykle. Následující obrázky ukazují výsledky tohoto optimalizačního kroku.



Obrázek 26 Parametr *sir_ster* na modelu antény

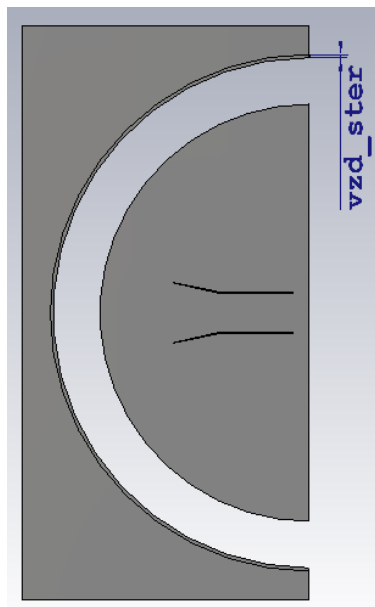


Obrázek 27 Činitel odrazu při změně šířky vazební štěrby *sir_ster* [mm]

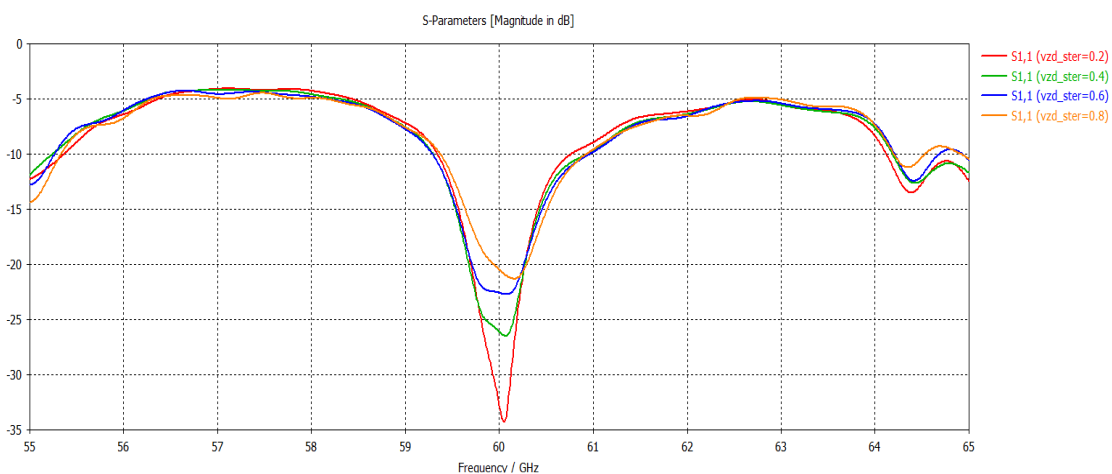
Z výsledků pro činitel odrazu lze pozorovat dramatické zlepšení a posun pracovního pásma na požadovanou hodnotu 60 GHz. Ke zlepšení docházelo při zvětšování štěrby až do hodnoty *sir_ster* = 3,25 mm. Při dalším rozšíření se činitel odrazu zhoršil.

3.2.6 Vzdálenost štěrby od reflektoru

Po optimalizaci šířky vazební štěrby bylo dalším logickým krokem zjistit vhodnou vzdálenost štěrby od reflektoru. Výsledky simulací lze vidět na obrázku 29.



Obrázek 28 Parametr vzd_ster na modelu antény

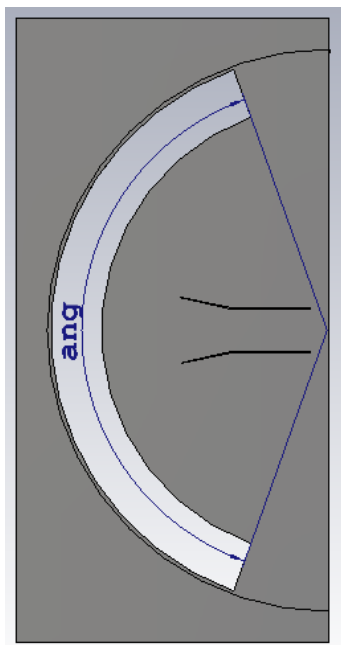


Obrázek 29 Činitel odrazu při změně vzdálenosti vazební štěrby vzd_ster [mm]

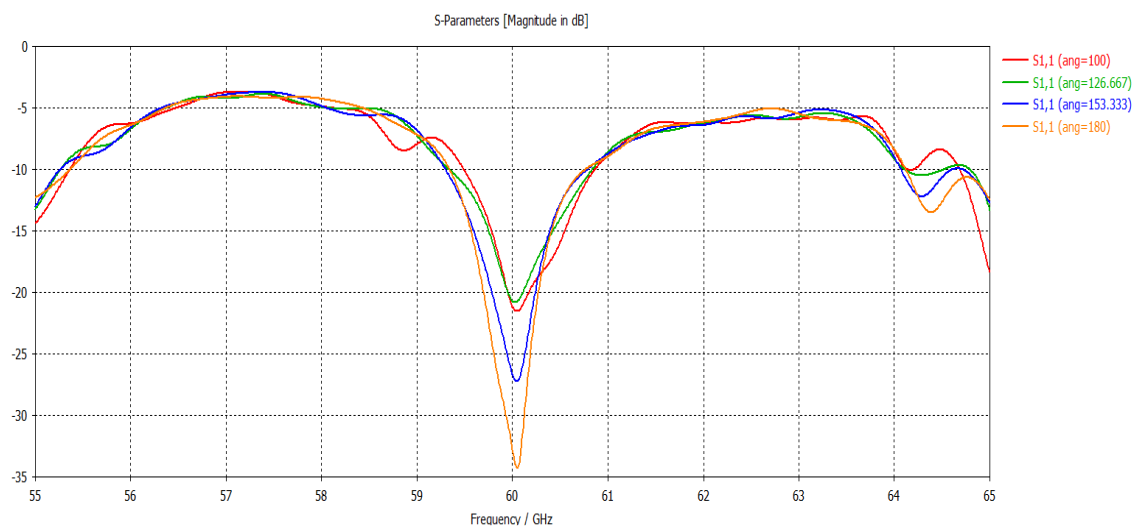
Výsledky ukazují, že zvětšování vzdálenosti vazební štěrby od reflektoru vede k výraznému zhoršení činitele odrazu. Proto jsem zvolenou hodnotu ponechal jako $vzd_ster = 0,2$ mm.

3.2.7 Délka vazební štěrbiny

Posledním parametrem u vazební štěrbiny, je její délka. Ta je v tomto případě definována jako úhel ang (viz obrázek 30). Při celém půlkruhu je tento úhel 180° , pro zmenšení délky štěrbiny se potom úhel snižuje.



Obrázek 30 Parametr ang na modelu antény

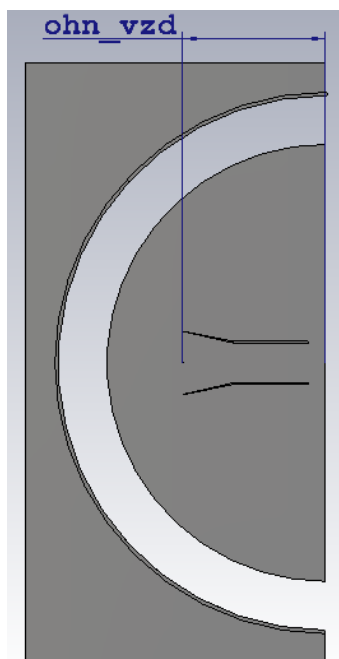


Obrázek 31 Činitel odrazu při změně velikosti vazební štěrbiny ang [°]

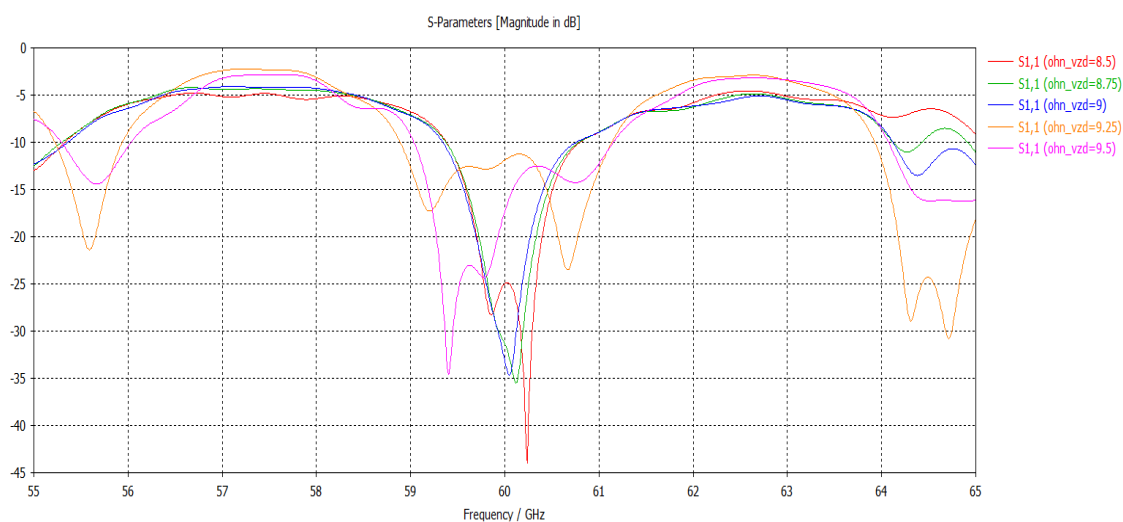
Při zmenšení velikosti vazební štěrbiny docházelo k výraznému zhoršení činitele odrazu. Hodnota byla od původní $ang = 180^\circ$ nezměněna.

3.2.8 Hledání ohniskové vzdálenosti

Po dokončení optimalizace vazební štěrby bylo nutné ověřit, jestli je apertura ozařovače umístěna v ohniskové vzdálenosti reflektoru. Vzhledem k tomu, že se jedná o kulový reflektor, měla by se ohnisková vzdálenost nacházet na polovině poloměru reflektoru. Poloha ohniska se musí krýt s polohou fázového středu trychtýřového ozařovače. Pro simulace byl nadefinován parametr *ohn_vzd*.



Obrázek 32 Parametr *ohn_vzd* na modelu antény



Obrázek 33 Činitel odrazu při změně vzdálenosti apertury od kraje antény *ohn_vzd* [mm]

Výsledky simulací ukazují, že tento parametr má dramatický vliv na činitele odrazu. Ze simulovaných hodnot jsem se rozhodl pro vzdálenost *ohn_vzd* = 9,5 mm. Na této hodnotě

lze sice pozorovat pokles minima činitele odrazu, anténa je ovšem širokopásmovější.

3.2.9 Vlastnosti antény po optimalizaci základních parametrů

Po dokončení základních optimalizačních kroků má anténa následující parametry.

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Absolutní šířka pásma ($S_{11} < -10$ dB)	B	2,15	GHz
Relativní šířka pásma ($S_{11} < -10$ dB)	B_r	3,5	%
Zisk (real.)	G	10,2	dBi
Činitel směrovosti	D	11,5	dBi
Předozadní poměr	F/D	17	dB

Tabulka 4 Vlastnosti antény po optimalizaci základních rozměrových parametrů

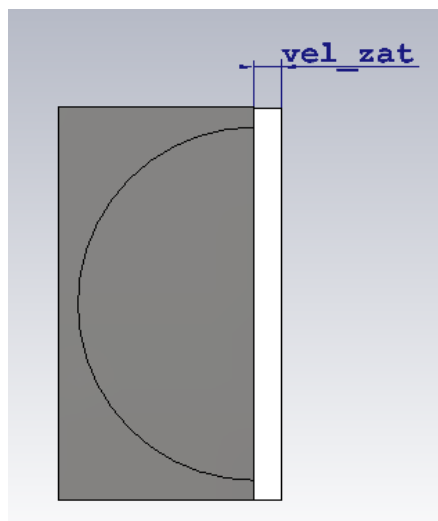
3.3 Vylepšení anténního návrhu

Anténa vykazuje v této fázi několik nedostatků. Jedná se zejména šířku pracovního pásma, která je vzhledem k vysoké pracovní frekvenci velice nízká. Dále je třeba zvýšit zisk a směrovost návrhu. V nadcházejících kapitolách jsou popsány dodatečné kroky pro zlepšení těchto vlastností.

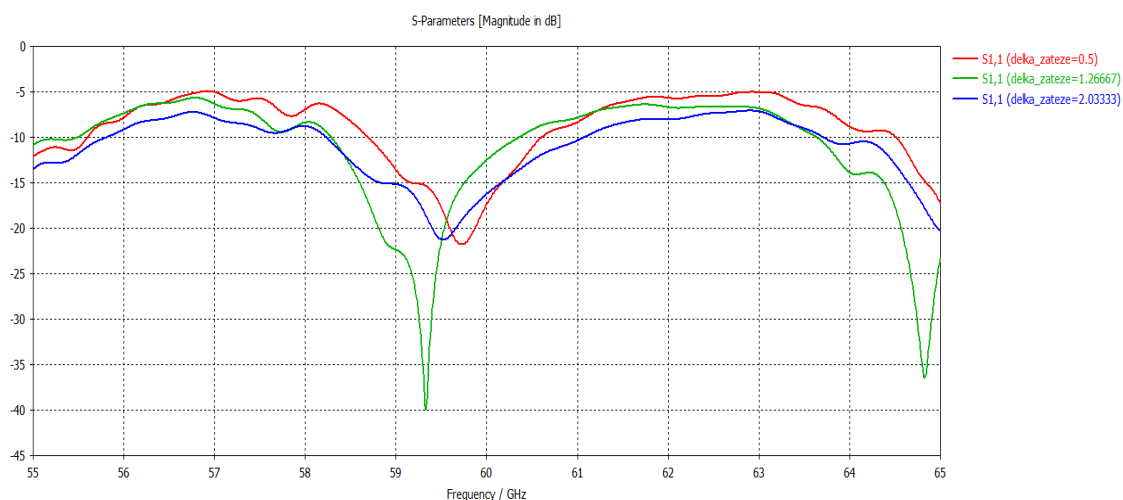
3.3.1 Dielektrická zátěž

Prvním způsobem, jak výše zmíněné parametry zlepšit, je přidání tzv. dielektrické zátěže. Jedná se o prodloužení dielektrika za aperturou, s odleptaným pokovením z vrchní i spodní části substrátu. Díky tomuto prodloužení je přechod z impedance vyzařovací části antény na impedanci okolí plynulejší a dochází menšímu odrazu. [4].

Jak je zobrazeno na obrázku 34, jedná se o obdélníkovou zátěž. Výsledky simulací pro změnu parametru *vel_zat* jsou uvedeny níže.



Obrázek 34 Dielektrická zátěž



Obrázek 35 Činitel odrazu v závislosti na délce dielektrické zátěže *delka_zateze* [mm]

Při prodloužení dielektrické zátěže hodnotu *delka_zateze* = 2 mm došlo k rozšíření pracovního pásma. Dále se zlepšil i zisk návrhu, který se zvýšil na hodnotu 12,4 dBi. Další prodlužování zátěže již vedlo ke zhoršení vlastností antény.

3.3.2 Paralelní metalické pásy

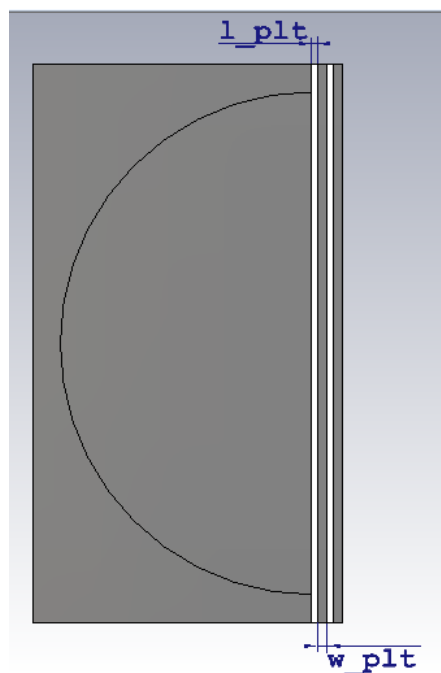
V dalším kroku byly přidány paralelní metalické pásy za aperturu antény z obou stran substrátu. Pásy se nacházejí na dielektrické zátěži a slouží převážně k usměrnění svazku. Díky tomu dochází po jejich aplikaci ke zlepšení směrových vlastností antény, zisku, ale i k lepším výsledkům pro činitele odrazu.

Přidané pásy vytvoří další apertury, které následně přispívají k vyzařování. Dojde tedy k vytvoření anténního pole. Šířka těchto pásů ovlivňuje fázové poměry těchto prvků a

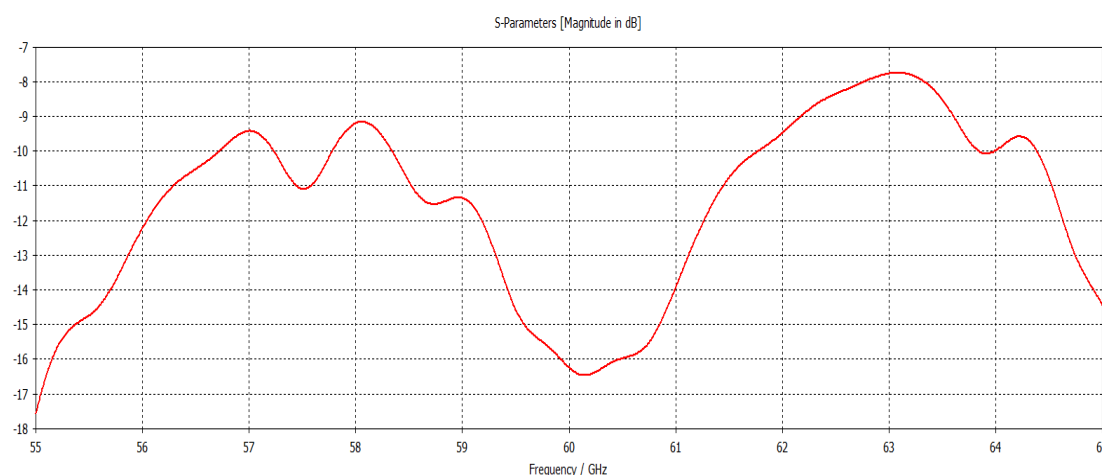
jejich vzdálenost od sebe ovlivňuje amplitudové poměry [11].

Vzhledem k velikosti dielektrické zátěže byly umístěny pouze 2 pásy. Následně bylo třeba optimalizovat jejich šířku (w_{plt}) a vzájemné rozestupy (l_{plt}). Pro lepší představu umístění pásků slouží obrázek 36.

Výsledky optimalizace těchto parametrů vedly k hodnotám pro šířku paralelních pásků 0,55 mm a rozestup 0,4 mm.



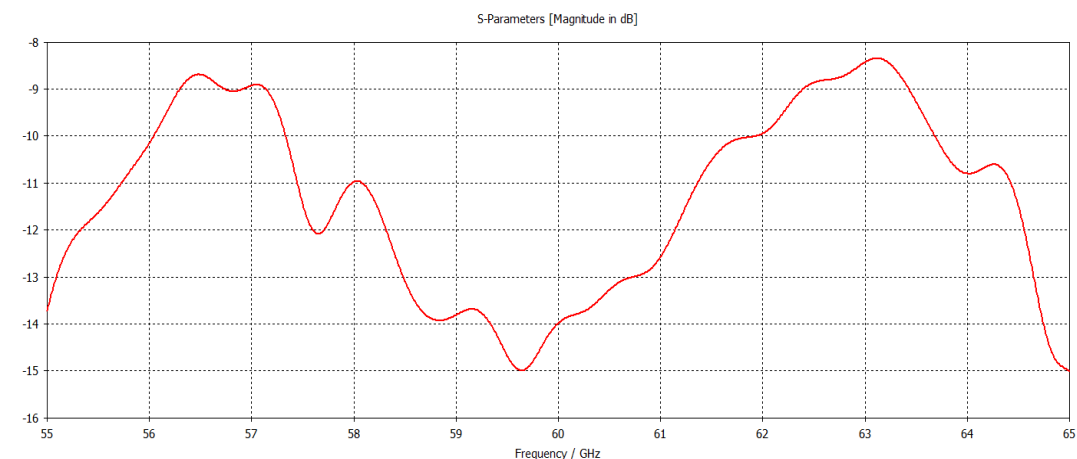
Obrázek 36 Paralelní metalické pásy



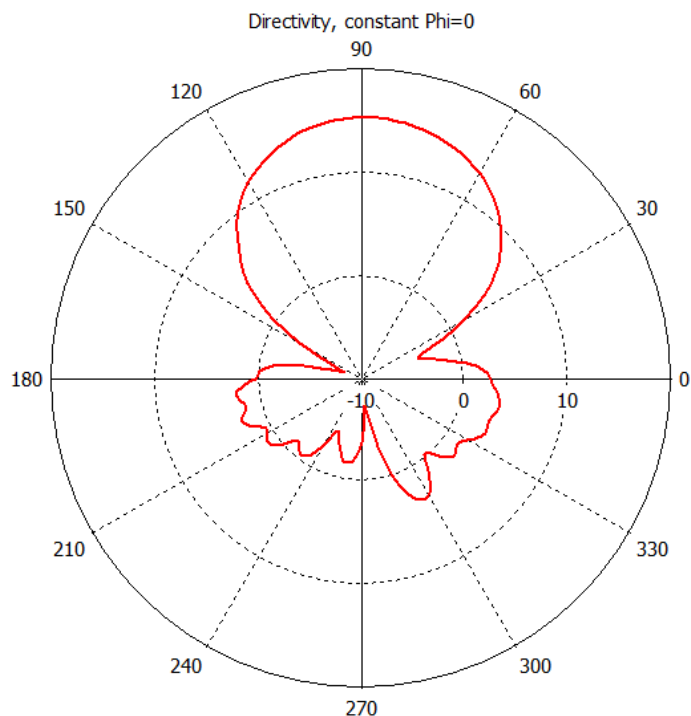
Obrázek 37 Činitel odrazu v závislosti na frekvenci pro 2 pásy

Na obrázku 37 můžeme vidět výsledky simulací pro optimální hodnoty. U činitele odrazu došlo ke značnému zvětšení šířky pásma. Zisk zůstal téměř nezměněn.

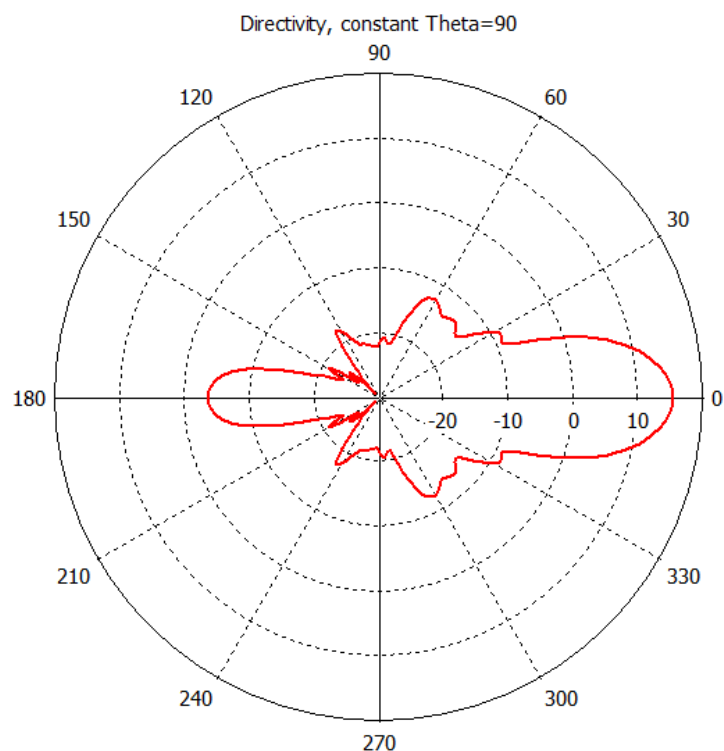
Po optimalizaci rozměrů pásků bylo třeba určit jejich správný počet. Přidání 4 paralelních pásků vedlo k výraznému zlepšení téměř všech vlastností antény. Následující obrázky ukazují výsledky simulací pro 4 paralelní metalické pásky. Po přidání 3 pásků nebylo zlepšení vlastností markantní, výsledky simulací zde proto nejsou uvedeny.



Obrázek 38 Činitel odrazu v závislosti na frekvenci pro 4 pásky



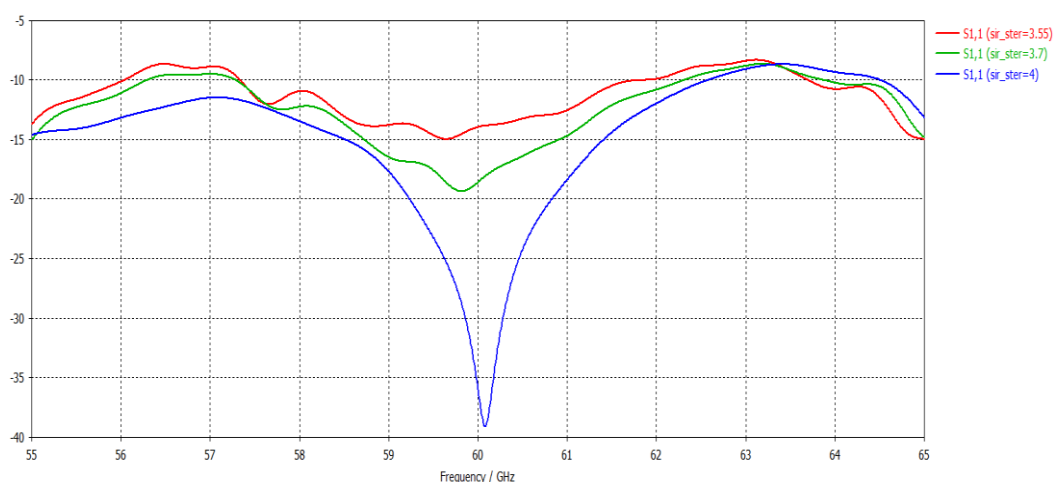
Obrázek 39 Vyzářovací diagram v rovině E pro frekvenci 60 GHz pro 4 pásky



Obrázek 40 Vyzařovací diagram v rovině H pro frekvenci 60 GHz pro 4 pásy

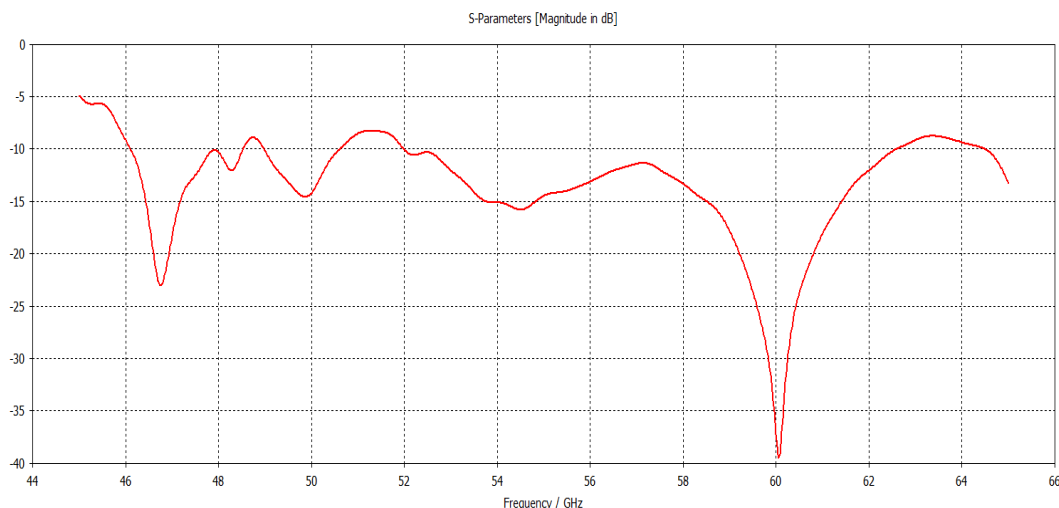
Výsledky nám ukazují nejen další rozšíření pracovního pásma ale i výrazné zúžení vyzařovacího diagramu v rovině E i H. Zisk antény stoupl na 14,5 dBi. Simulace byly provedeny i pro další prodlužování dielektrické zátěže, to již ke zlepšení vlastností nevedlo.

Opětovná optimalizace šířky vazební šterbiny způsobila další rozšíření pracovní šířky pásma. Obrázek 41 ukazuje postup této optimalizace.



Obrázek 41 Činitel odrazu v závislosti na šířce vazební šterbiny sir_ster [mm]

Při šířce štěrbin $sl_{ster} = 4$ mm došlo k rozšíření pracovního pásma až mimo simulované frekvenční rozmezí. Pro úplnost je na obrázku 42 vidět výsledek simulace na širším frekvenčním pásmu. Při dalším rozšiřování vazební štěrbin již docházelo ke zhoršení činitele odrazu.



Obrázek 42 Činitel odrazu v závislosti na frekvenci

3.3.3 Dosažené parametry

Následující tabulka ukazuje parametry antény po optimalizaci dielektrické zátěže a paralelních pásků. Zátěž při použití čtyř pásků již nebyla použita, protože její přidání nevedlo ke zlepšení anténních vlastností.

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotka
Absolutní šířka pásma ($S_{11} < -10$ dB)	B	10,3	GHz
Relativní šířka pásma ($S_{11} < -10$ dB)	B_r	17,1	%
Zisk (real.)	G	14,5	dBi
Činitel směrovosti	D	15,3	dBi
Předozadní poměr	F/D	17,6	dB

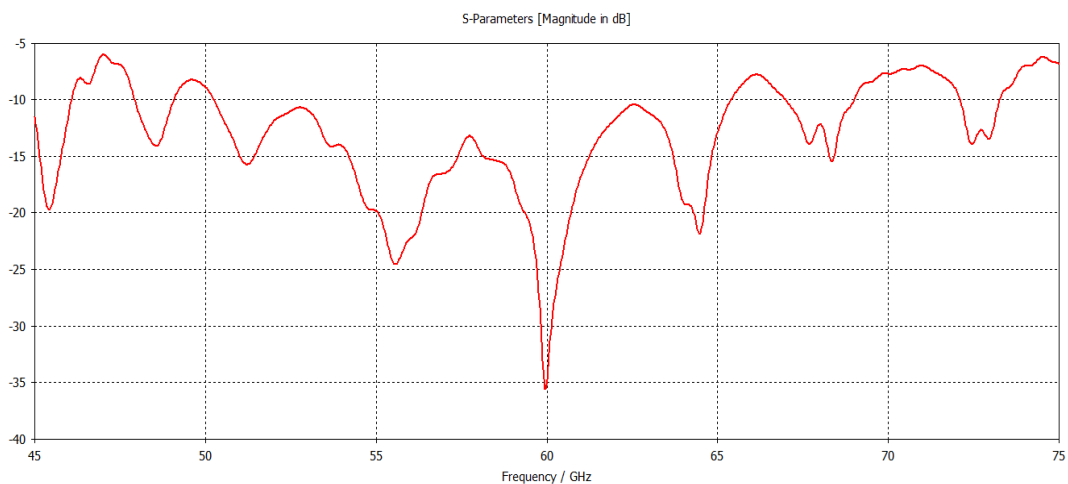
Tabulka 5 Dosažené parametry

Z výsledků je jasné vidět, že téměř všechny vlastnosti antény se výrazně zlepšily. Šířka pásma je nyní výrazně vyšší, pokud ovšem chceme pokrýt ISM, které se nachází na frekvencích 57 GHz až 64 GHz, je třeba zvýšit horní hranici pracovního pásma.

3.4 Návrh napájecí vrstvy

Tato část popisuje postup při návrhu napájecího přechodu pro trychtýřový ozařovač antény. Tento přechod je nutný navrhnut tak, aby byl napáječ umístěn za anténou a nezasahoval do vyzařovací části antény. Existují dvě možnosti, jak napájení realizovat; koaxiálním kabelem, či napájecí vazební šterbinou. Vzhledem k šířce použitého substrátu a šířce koaxiálního konektoru je napájení koaxiálním kabelem nevhodné, proto jsem zvolil možnost napájecí šterbiny.

Aby bylo možné navrhnut tento přechod, bylo nutné prodloužit vlnovod trychtýřového ozařovače. Celá anténa tak byla zvětšena o 5 cm. Vlastnosti byly pro kontrolu opět simulovány.



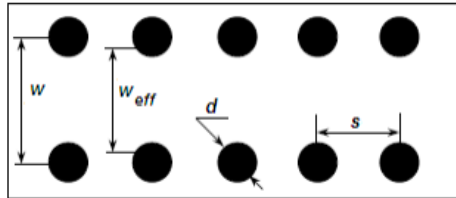
Obrázek 43 Činitel odrazu v závislosti na frekvenci po zvětšení návrhu

Zvětšení vedlo ke zlepšení činitele odrazu a rozšíření pracovního pásma až za hodnotu 65 GHz. Byl tím tedy vyřešen problém popsáný v kapitole 3.3.3.

K dosavadnímu návrhu antény byla přidána další vrstva se SIW vlnovodem, který je na jednom konci zakončen zkratem. Vazební šterbiny se nachází mezi napájecí vrstvou a vrstvou s trychtýřovým ozařovačem. Právě optimalizace vazebních šterbin je klíčovým prvkem při návrhu napájecího přechodu.

3.4.1 Přepočet ekvivalentního metalického vlnovodu na vlnovod SIW

Ve finálním návrhu antény je nutné nahradit všechny metalické stěny SIW vlnovodem. Optimalizaci vazebních štěrbin jsem se rozhodl provést již pro SIW strukturu. Je tedy třeba nejdříve udělat přepočet ekvivalentního vlnovodu na SIW vlnovod. Obrázek 44 nám tento přepočet naznačuje.



Obrázek 44 Změna ekvivalentního vlnovodu na SIW [12]

SIW vlnovod je vždy širší, než jeho ekvivalentní předloha. Šířka W je odvozena z původní šířky ekvivalentního vlnovodu W_{eff} , rozestupu proků s a jejich průměrem d . Parametry s a d se odvíjejí od délky vlny v dielektriku a omezenými možnostmi ve výrobním procesu. Následující vzorce ukazují postup výpočtu těchto parametrů. [2]

$$d < \frac{\lambda_g}{5} \quad (3.1)$$

$$d < \frac{4,806}{5} \rightarrow d < 0,961 \text{ mm} \quad (3.2)$$

Podmínka uvedená ve vzorci 3.1 je nutná k minimalizaci ztrát vlnovodu. Vzhledem k možnostem výroby byl zvolen průměr proků $d = 0,6 \text{ mm}$.

$$s \leq 2 * d \quad (3.3)$$

$$s \leq 2 * 0,6 \rightarrow s \leq 1,2 \text{ mm} \quad (3.4)$$

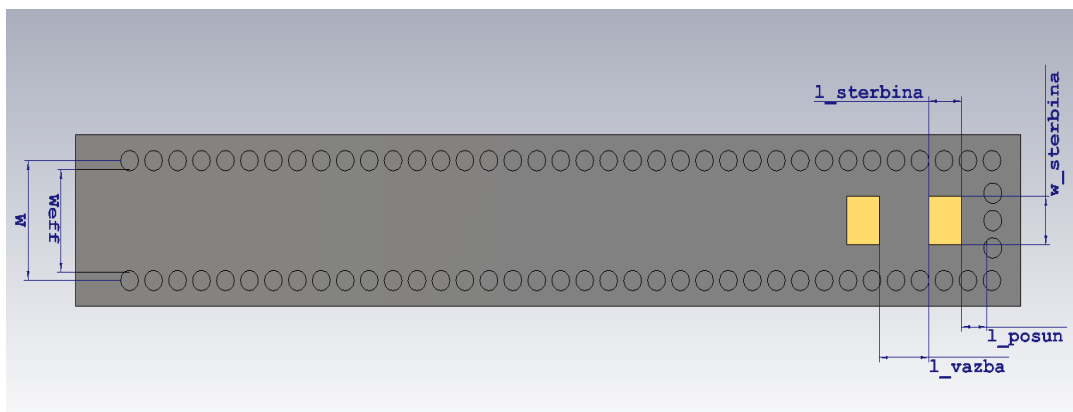
Pro rozestup proků byla zvolena hodnota $s = 0,8 \text{ mm}$.

$$W = W_{eff} + \frac{d^2}{0,95 * p} \quad (3.5)$$

$$W = 2,66 + \frac{0,6^2}{0,95 * 0,8} = 3,13 \text{ mm} \quad (3.6)$$

3.4.2 Optimalizace vazební šterbiny

Popis jednotlivých parametrů rozmítaných při optimalizaci ukazuje obrázek 45. Cílem je najít ideální rozměry parametrů $l_{sterbina}$, $w_{sterbina}$, l_{posun} a l_{vazba} tak, aby došlo k co nejlepšímu přenosu energie z napájecího vlnovodu do trychtýřového ozařovače.

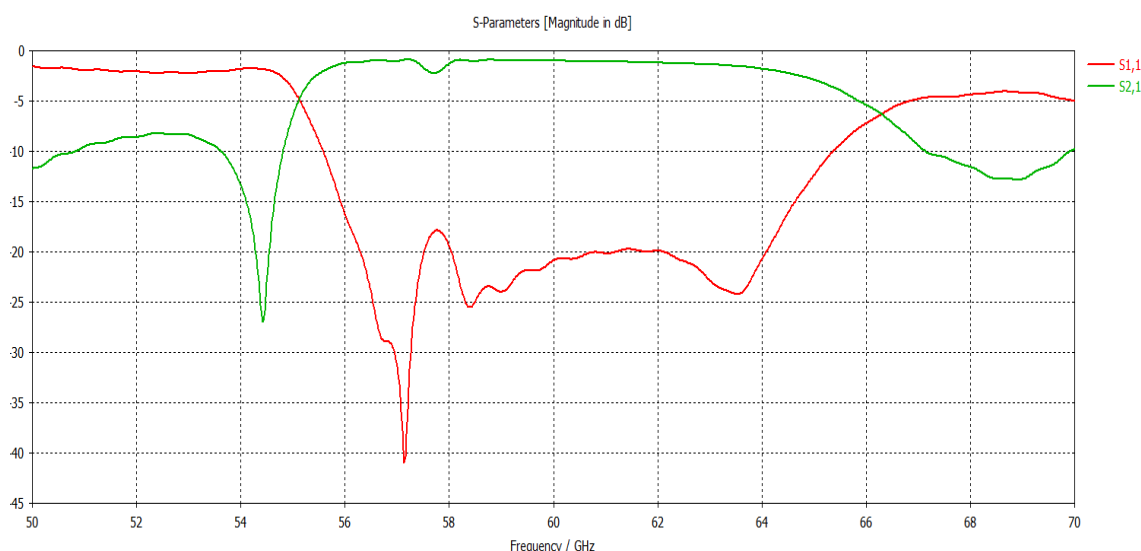


Obrázek 45 napájecí přechod mezi vlnovody

Použití jedné vazební šterbiny (stejně jako tři) vedlo k viditelnému omezení propustného pásma vazební šterbiny. Proto byla optimalizace provedena pro dvě šterbiny.

Během optimalizace bylo nutné najít ideální délku vlnovodu spolu s ověřením vypočítaného parametru W . Po několika optimalizačních krocích byla nalezena hodnota pro rozteč SIW vlnovodu $W = 3,5$ mm (ekvivalentní rozteč vlnovodu $W_{eff} = 3$ mm) a celková délka vlnovodu 30,43 mm.

Následující graf ukazuje výsledky optimalizace napájecích vazebních šterbin.



Obrázek 46 S_{11} a S_{21} navrženého napájecího přechodu

Rozměry se kterými bylo těchto výsledků dosaženo, jsou uvedeny v tabulce 6.

Parametr	Hodnota [mm]
w_posun	0,84
l_sterbina	1,1
l_vazba	1,42
w_sterbina	1,64

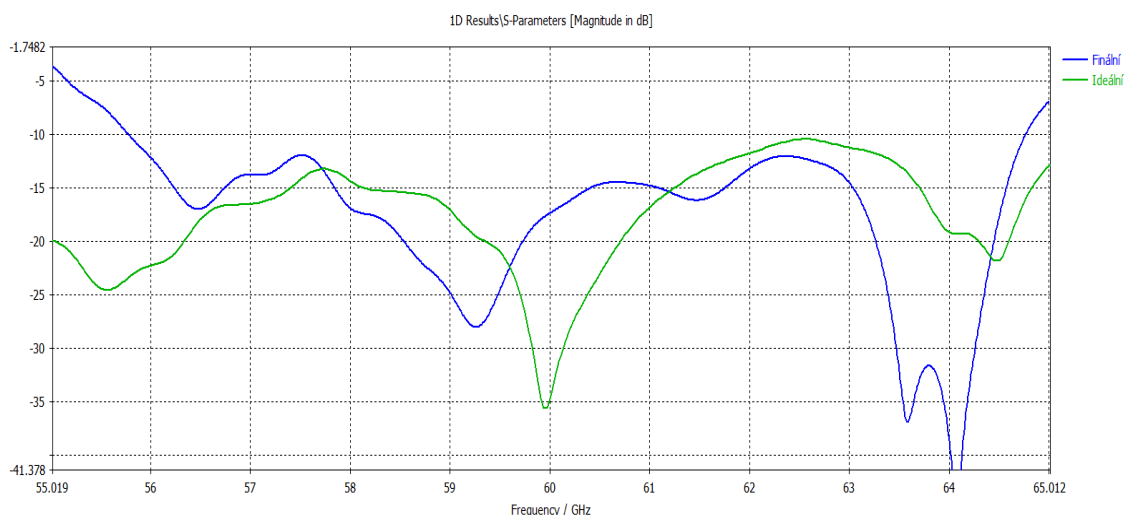
Tabulka 6 Výsledné rozměry napájecích vazebních šterbin

Z obrázku 46 lze vidět, že téměř v celém pásmu od 56,5 GHz do 64 GHz se nacházíme pod hodnotou -20 dB. Výsledky jsou tedy uspokojivé.

3.5 Nahrazení ideálních stěn antény prokovy a spojení antény s napájecí vrstvou

Finálním krokem v návrhu je nahrazení ideálních stěn prokovy. Při nahrazování jsem použil stejné rozměry, jaké jsou uvedeny v kapitole 3.4.1. Rozestup prokovů je tedy $s = 0,8$ mm a jejich průměr $d = 0,6$ mm.

Dále byly do finálního návrhu přidány otvory pro kolíky s průměrem 1,4 mm. Ty slouží k pevnému zachycení jednotlivých vrstev při realizaci antény. Do napájecí vrstvy byly ještě přidány otvory pro zachycení přechodu WR-15.



Obrázek 47 Činitel odrazu v závislosti na frekvenci finálního návrhu

Na obrázku 47 lze vidět, že nahrazení ideálních stěn prokovy a přidání napájecí vrstvy vedlo k uspokojivým výsledkům. Došlo sice k zúžení pracovního pásma, ale i nadále se

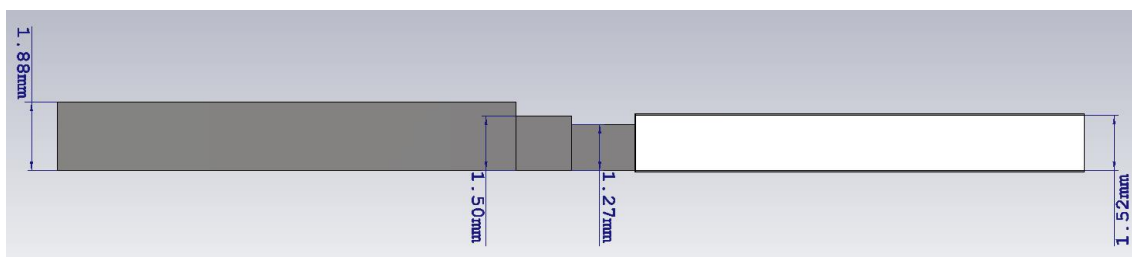
nachází v požadovaných hodnotách pásma ISM. V některých částech lze dokonce pozorovat zlepšení impedančních poměrů.

Vlivem ztrát energie mezi jednotlivými prokovy došlo ke snížení zisku antény na 13,6 dBi.

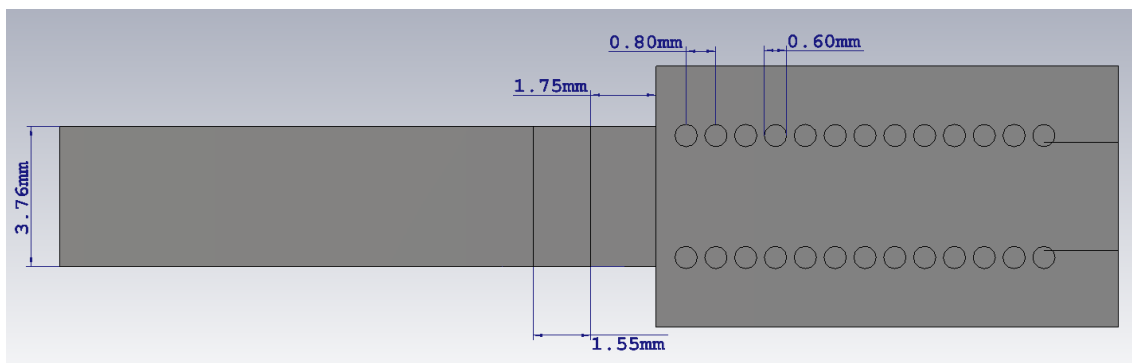
3.6 Návrh přechodu WR-15 na SIW

Aby bylo možné anténu laboratorně testovat a měřit, je nutné navrhnut přechod ze standartního vlnovodu na SIW vlnovod. Pro pásmo 50 GHz až 75 GHz (V pásmo) se používá normalizovaný vlnovod WR-15 s rozměry 3,76 mm x 1,88 mm. Při návrhu přechodky je tedy nutné najít takové rozměry, při kterých bude přechod impedančně přizpůsobený a nebude docházet ke ztrátám energie a odrazům.

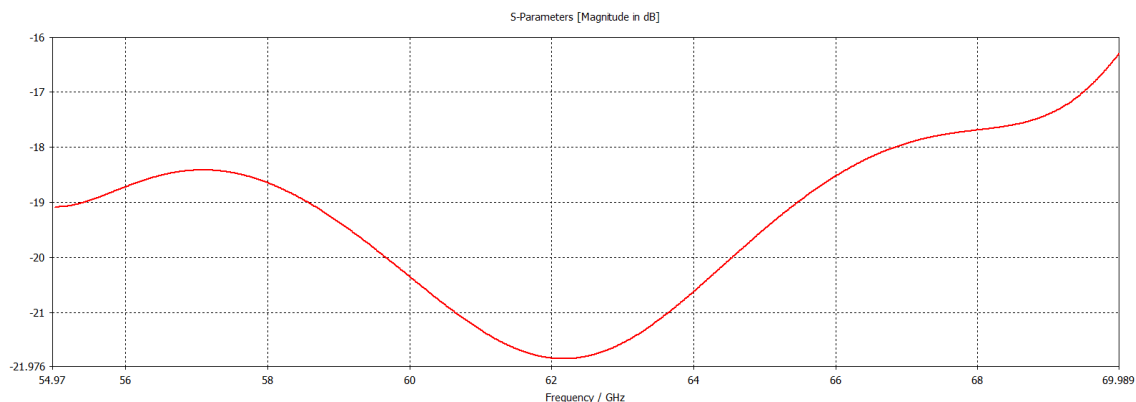
Při simulaci byl použit model zobrazený na obrázcích 48 a 49. Při pohledu shora (obrázek 49) lze na konci SIW vlnovodu vidět PEC pláty, které slouží ke správnému přivedení signálu na port.



Obrázek 48 Model pro optimalizaci přechodu WR-15 na SIW, pohled z boku

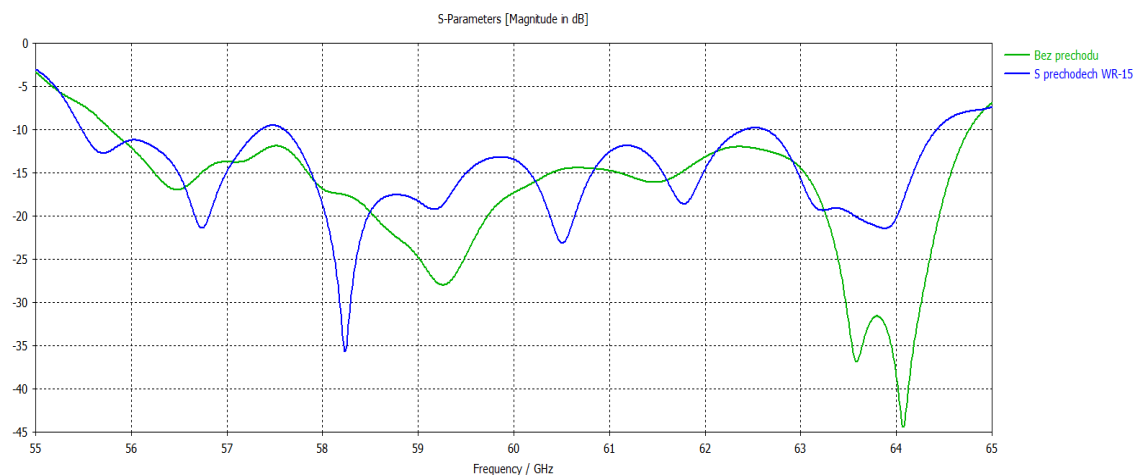


Obrázek 49 Model pro optimalizaci přechodu WR-15 na SIW, pohled shora



Obrázek 50 Činitel odrazu přechodu WR-15 na SIW

Z grafu lze vyčíst, že v požadovaném pásmu se nachází hodnoty činitele odrazu poblíž -20 dB.



Obrázek 51 Činitel odrazu po přidání přechodky na vlnovod WR-15

Obrázek 51 ukazuje, že po přidání přechodky došlo k mírnému zhoršení činitele odrazu, zejména pro frekvence 57,5 GHz a 62,5 GHz, kde se hodnota S_{11} nepatrně zvedla nad -10 dB.

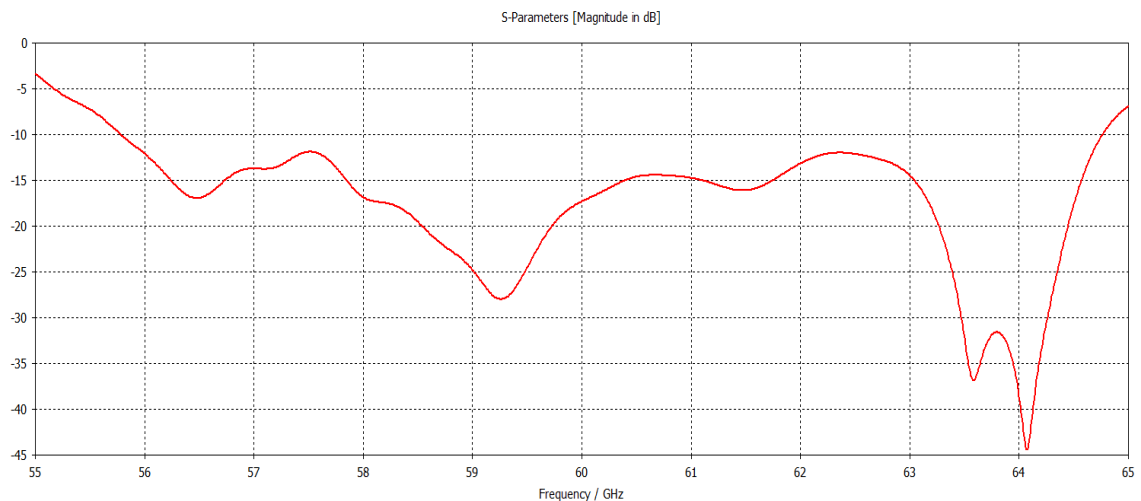
3.7 Parametry a charakteristiky finálního návrhu antény

V následující tabulce najedeme parametry finálního návrhu antény bez přechodu z vlnovodu WR-15 na SIW. Uvedené hodnoty platí pro frekvenci 60 GHz.

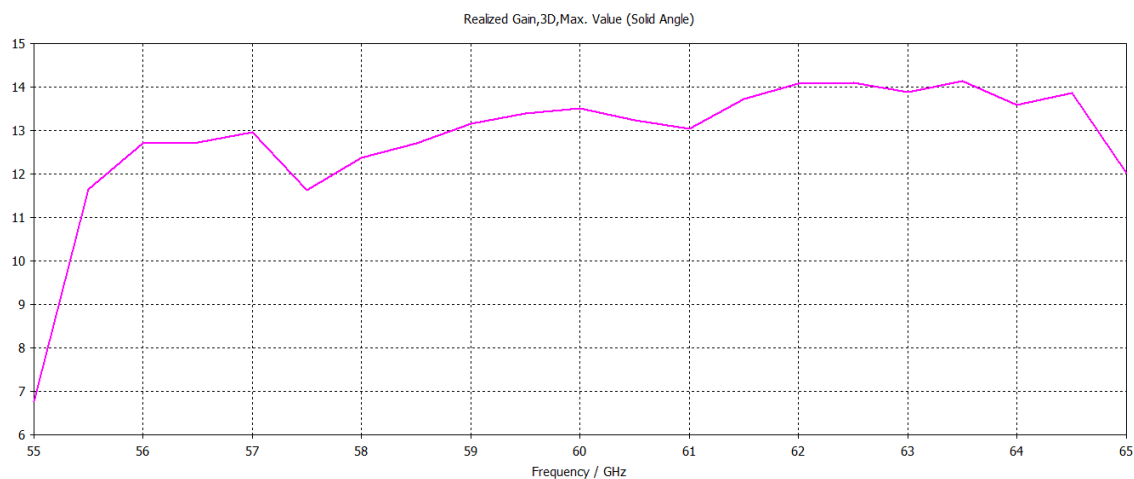
Parametr	Označení	Hodnota	Jednotky
Absolutní šířka pásma	B	9,06	GHz
Relativní šířka pásma	B_r	15,1	%
Činitel směrovosti	D	15,5	dBi
Zisk (real.)	G	13,6	dBi
Potlačení postranních laloků, H rovina	$D_{\text{postranníH}}$	23,1	dB
Potlačení postranních laloků, E rovina	$D_{\text{postranníE}}$	10,7	dB
Šířka svazku H	$HPBW_H$	12,1	°
Šířka svazku E	$HPBW_E$	47,44	°
Předozadní poměr	F/D	22,4	dB

Tabulka 7 Parametry finálního návrhu antény

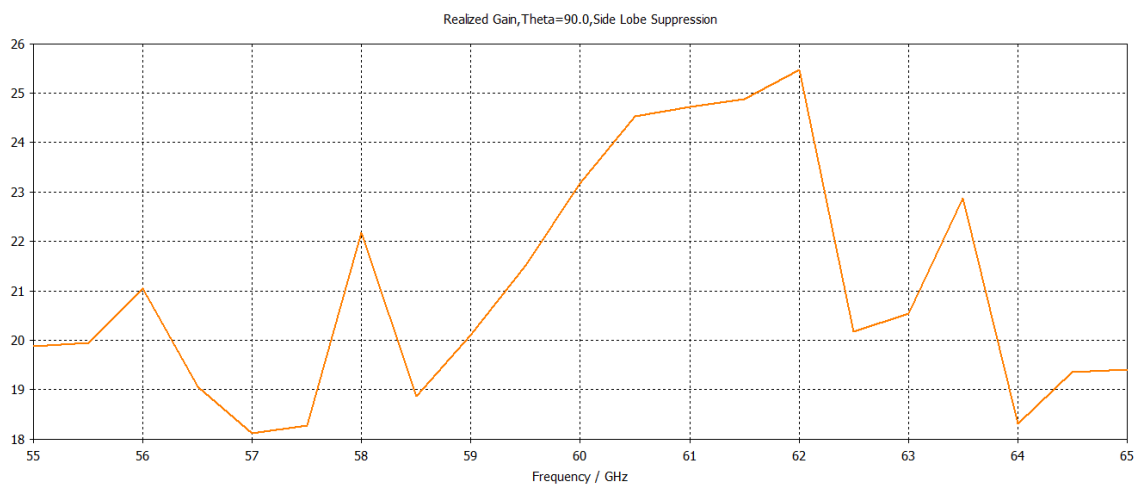
Následující obrázky ukazují charakteristiky finálního návrhu.



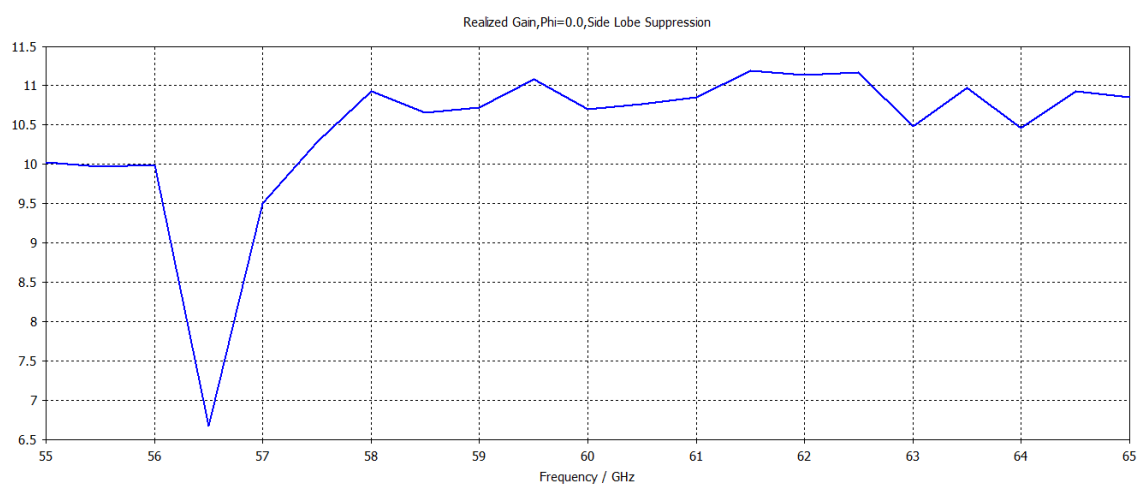
Obrázek 52 Činitel odrazu v závislosti na frekvenci



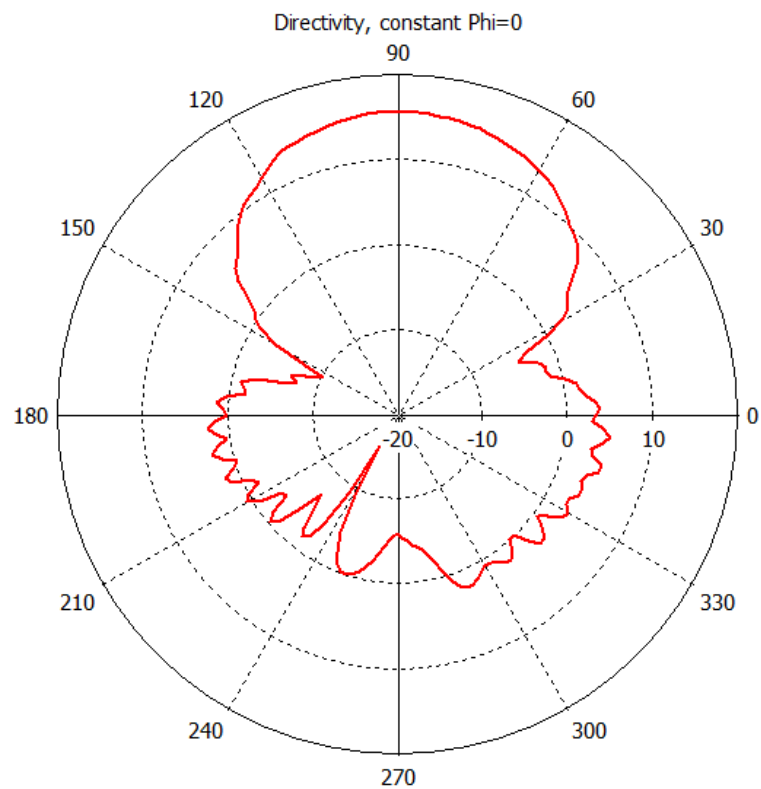
Obrázek 53 Zisk v závislosti na frekvenci



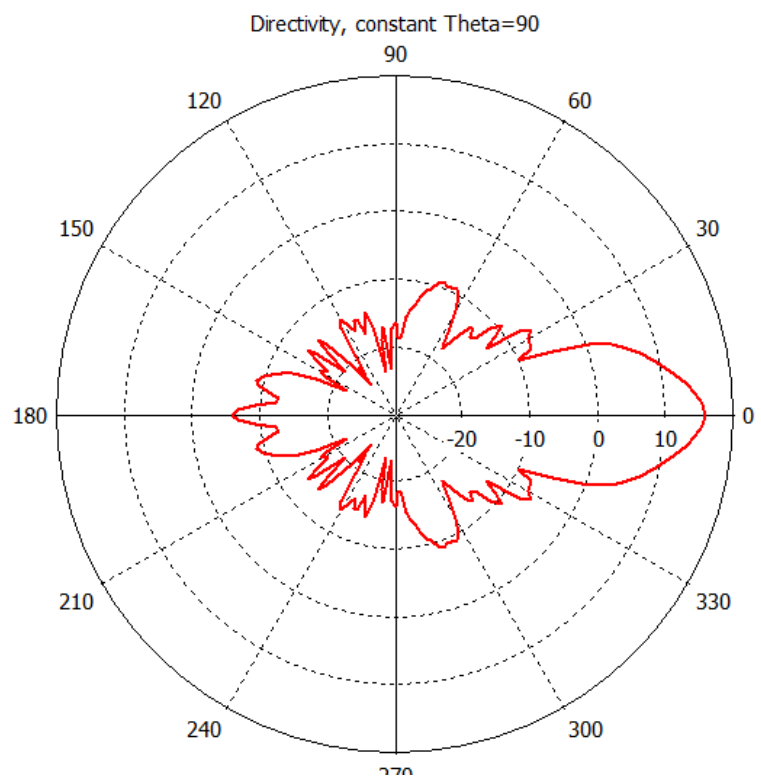
Obrázek 54 Potlačení postranních laloků v závislosti na frekvenci, rovina H



Obrázek 55 Potlačení postranních laloků v závislosti na frekvenci, rovina E



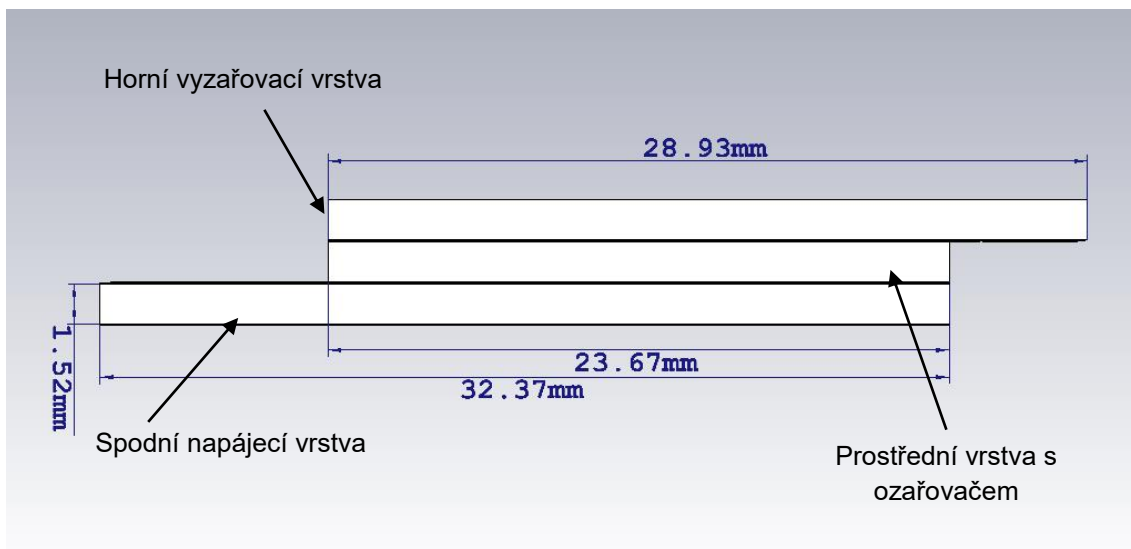
Obrázek 56 Vyzářovací diagram v rovině E pro frekvenci 60 GHz



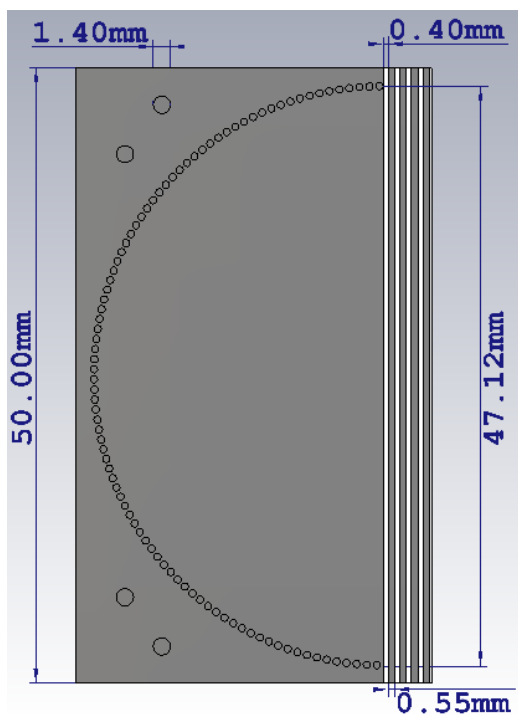
Obrázek 57 Vyzářovací diagram v rovině H pro frekvenci 60 GHz

3.8 Geometrie a rozměry finálního návrhu antény

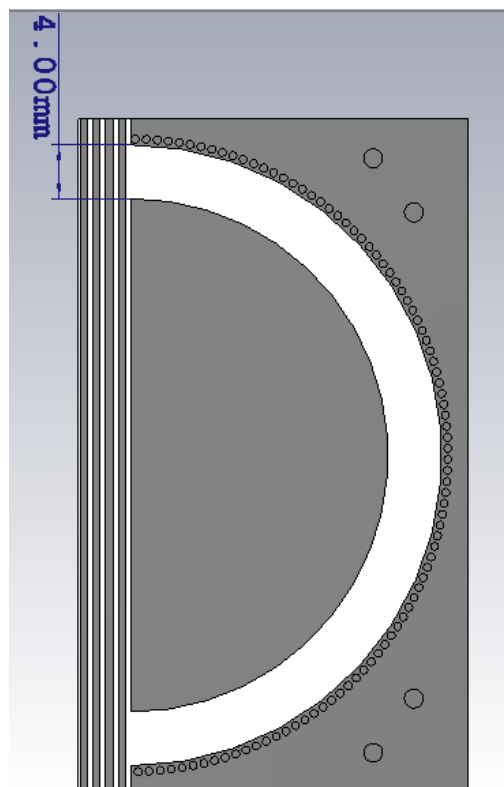
Pro lepší pochopení geometrie antény je na obrázku 57 ukázána anténa z boku. Na obrázku lze tedy vidět, jak jsou na sobě jednotlivé vrstvy umístěny. Další obrázky ukazují každou jednotlivou vrstvu shora a zespoda.



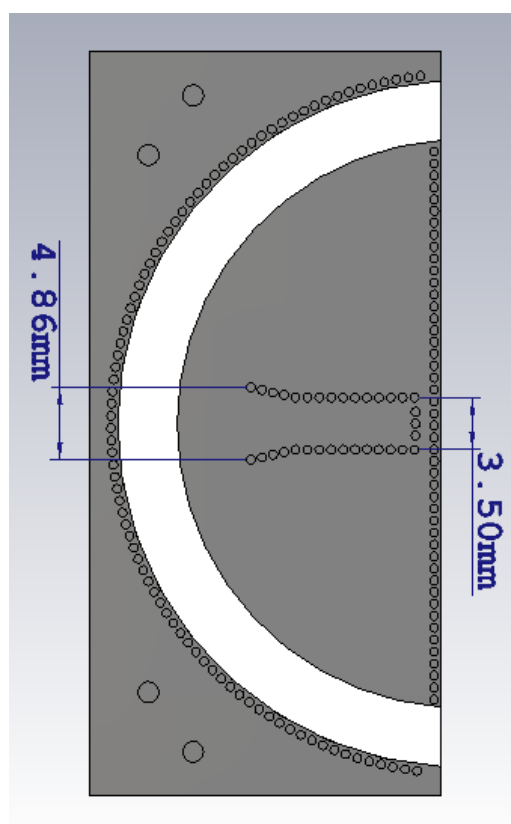
Obrázek 58 Finální návrh antény, pohled z boku



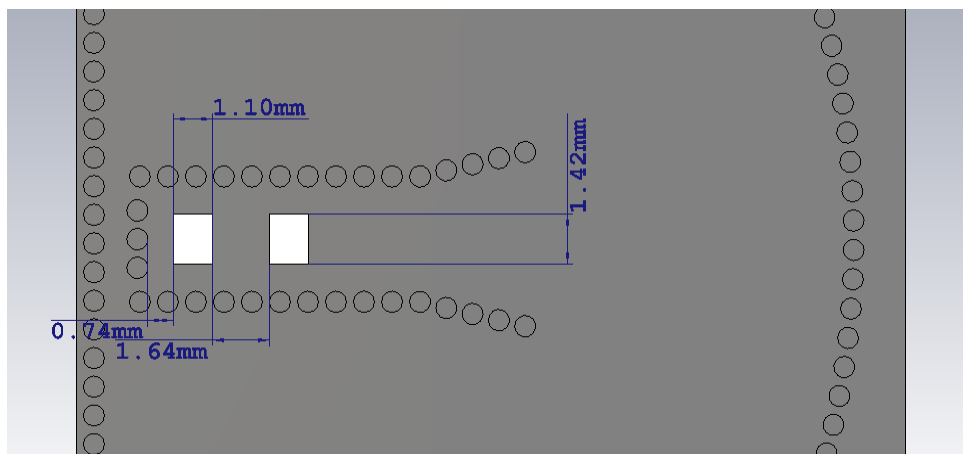
Obrázek 59 Finální návrh antény, horní vrstva



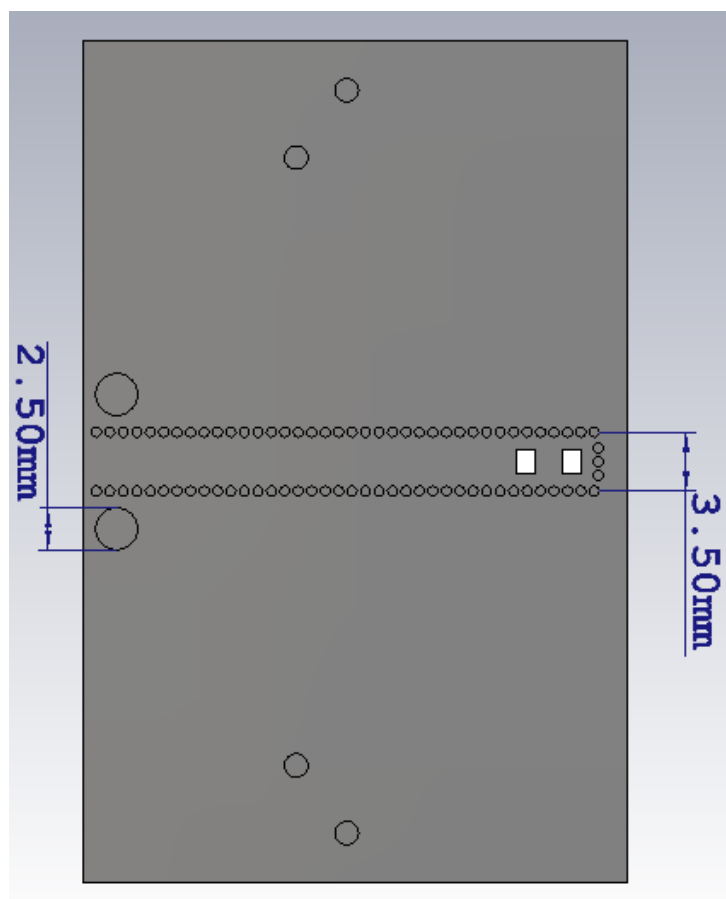
Obrázek 60 Finální návrh antény, horní vrstva



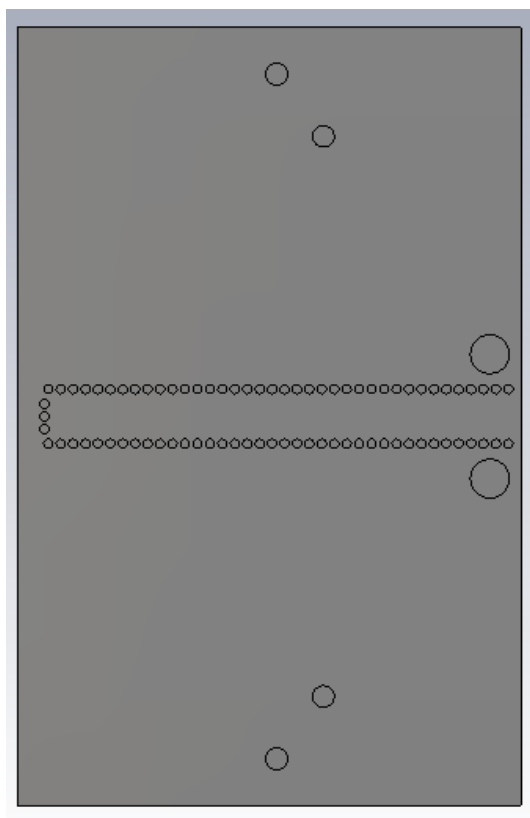
Obrázek 61 Finální návrh antény, prostřední vrstva



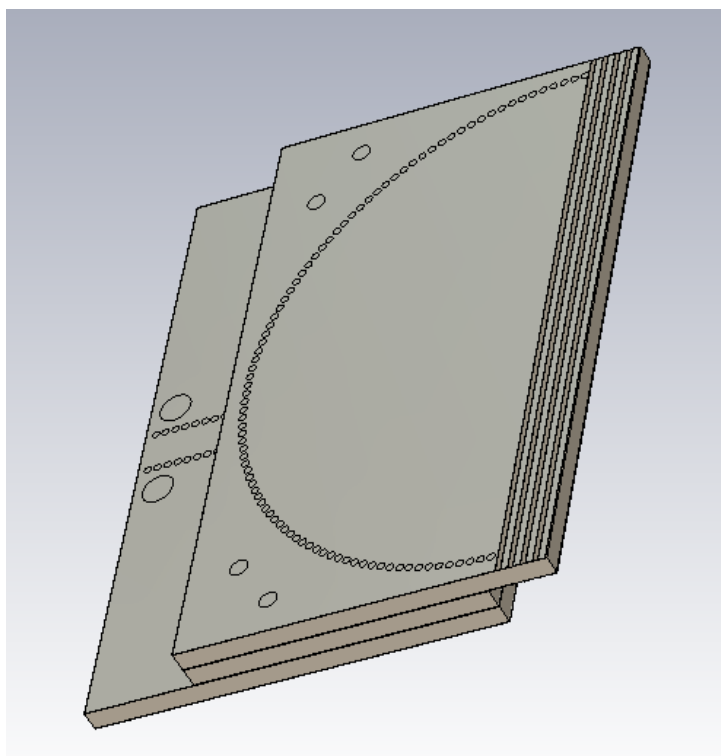
Obrázek 62 Finální návrh antény, prostřední vrstva, detail na vazební štěrbinu



Obrázek 63 Finální návrh antény, dolní vrstva



Obrázek 64 Finální návrh antény, dolní vrstva



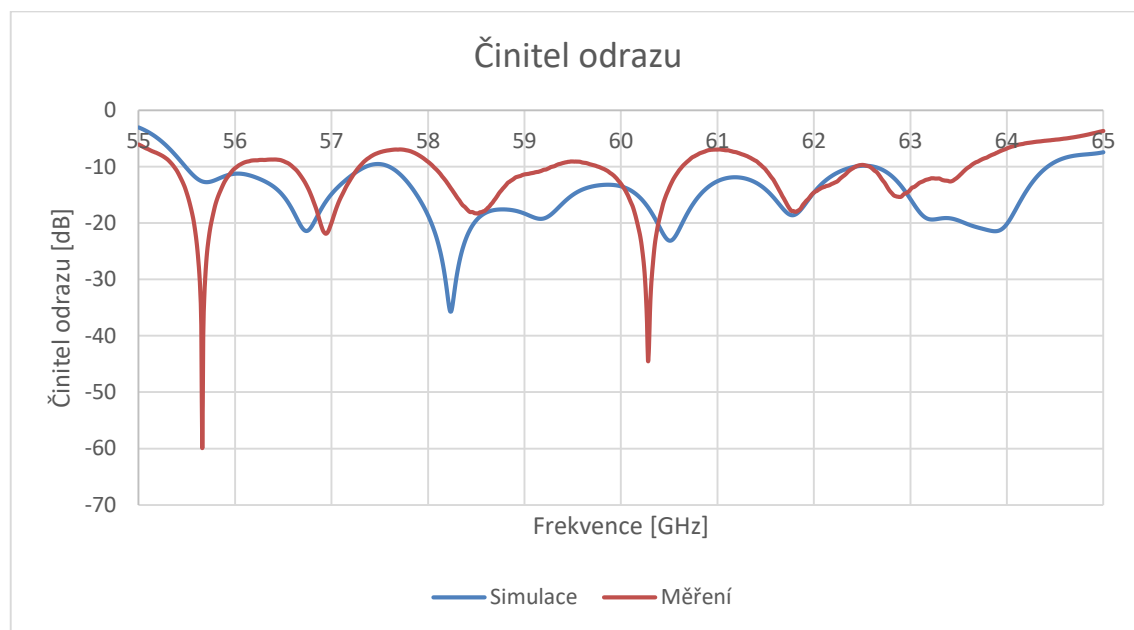
Obrázek 65 finální návrh antény

4 REALIZACE A MĚŘENÍ

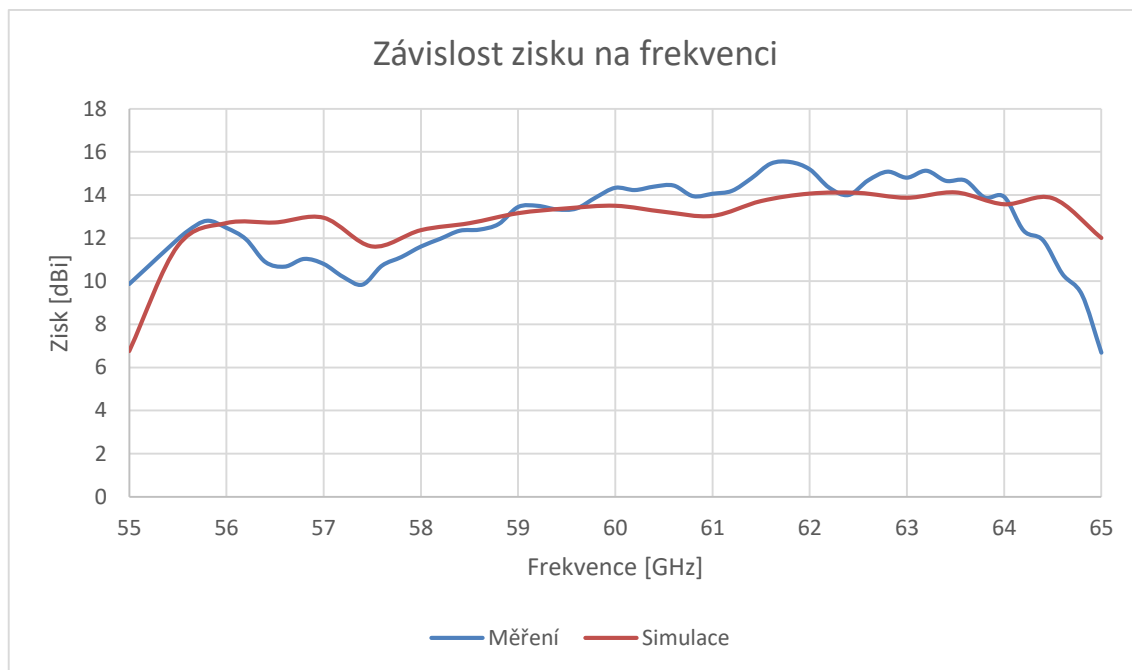
Z důvodu omezení chyb způsobených při výrobě jednotlivých vrstev, či při jejich kompletaci byly vyrobeny 4 kusy antény. Na základě měření činitele odrazu se následně vybral nejlepší z nich.

Z obrázku 66 lze vyčíst, že impedanční poměry v anténě se oproti simulaci zhoršily. Na několika místech dochází k překročení hranice -10 dB, nejvíce potom v oblastech 57,2 GHz až 58,1 GHz a 60,6 GHz až 61,5 GHz. Směrové charakteristiky ukazují, že anténa dosáhla vyššího zisku, než bylo určeno v simulacích. Šířka svazku je v obou rovinách větší, než při simulaci.

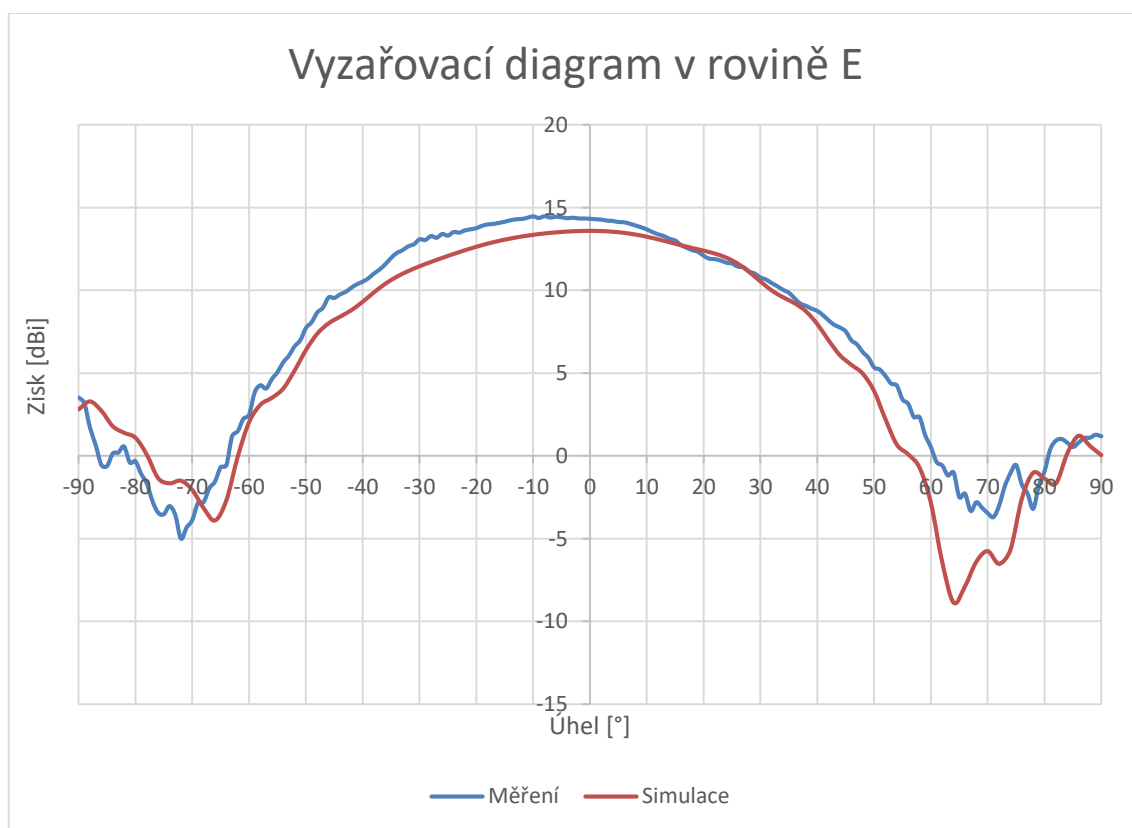
Tabulka 8 uvádí parametry vyrobené antény. Měření bylo provedeno pro frekvenci 60 GHz



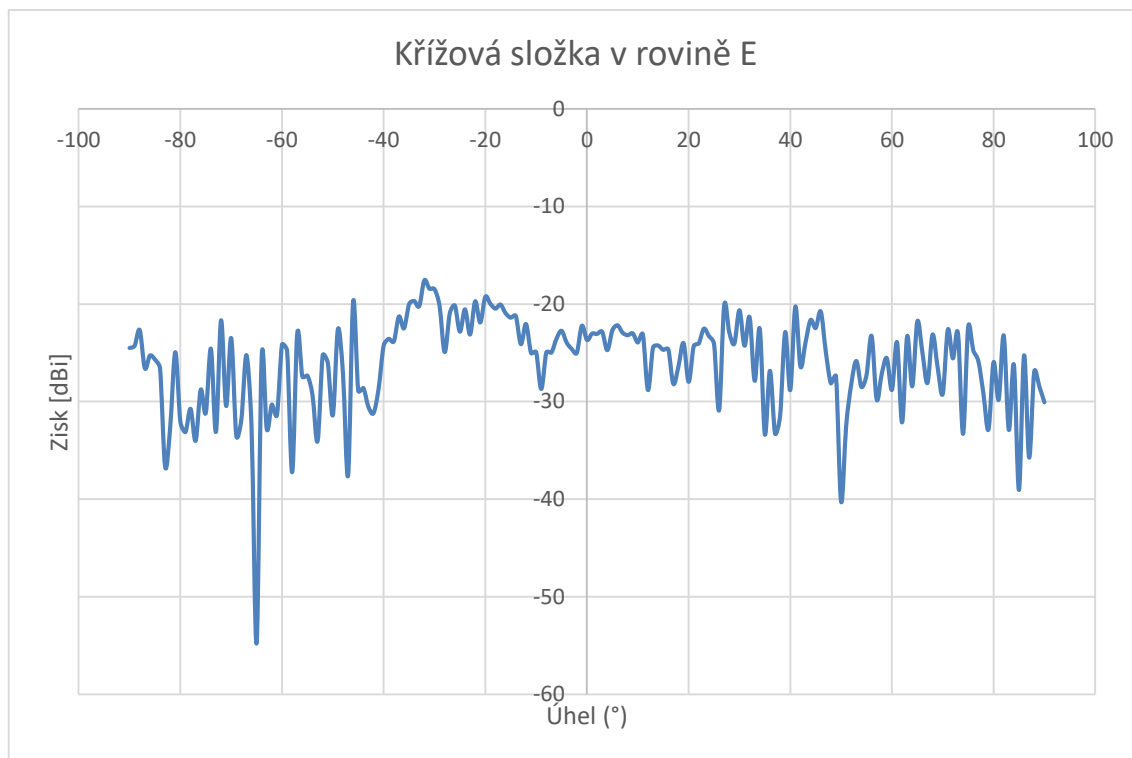
Obrázek 66 Činitel odrazu v závislosti na frekvenci



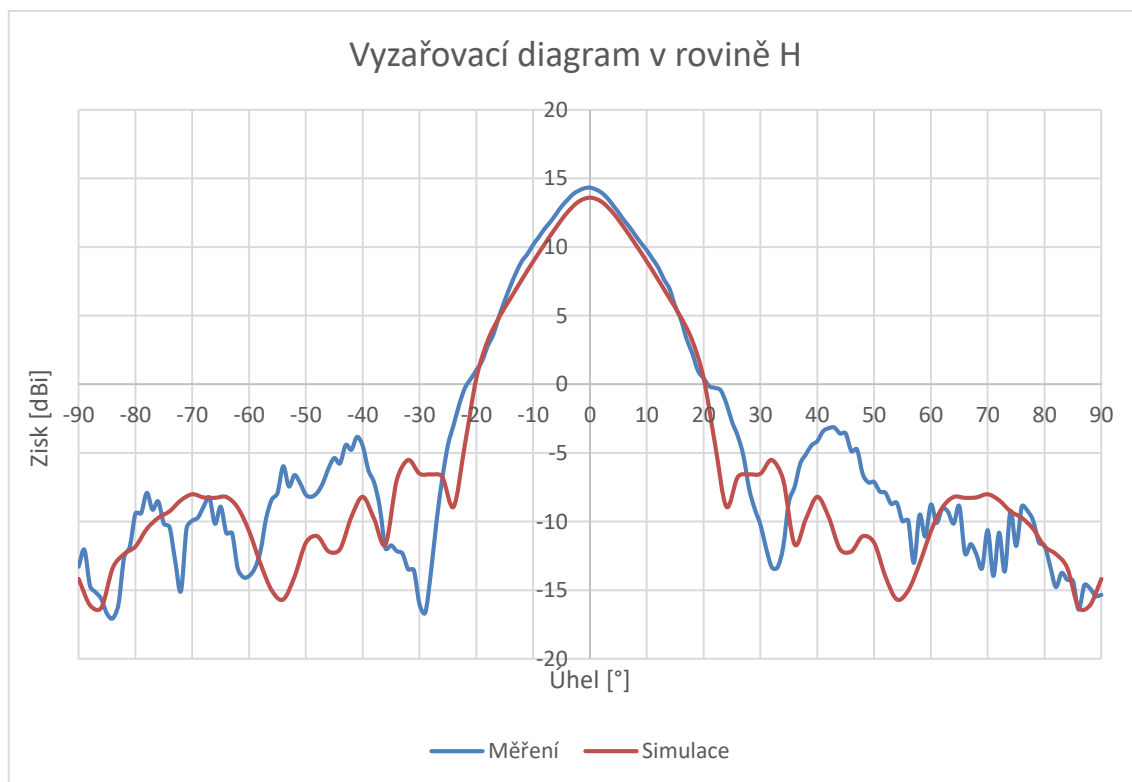
Obrázek 67 Zisk v závislosti na frekvenci



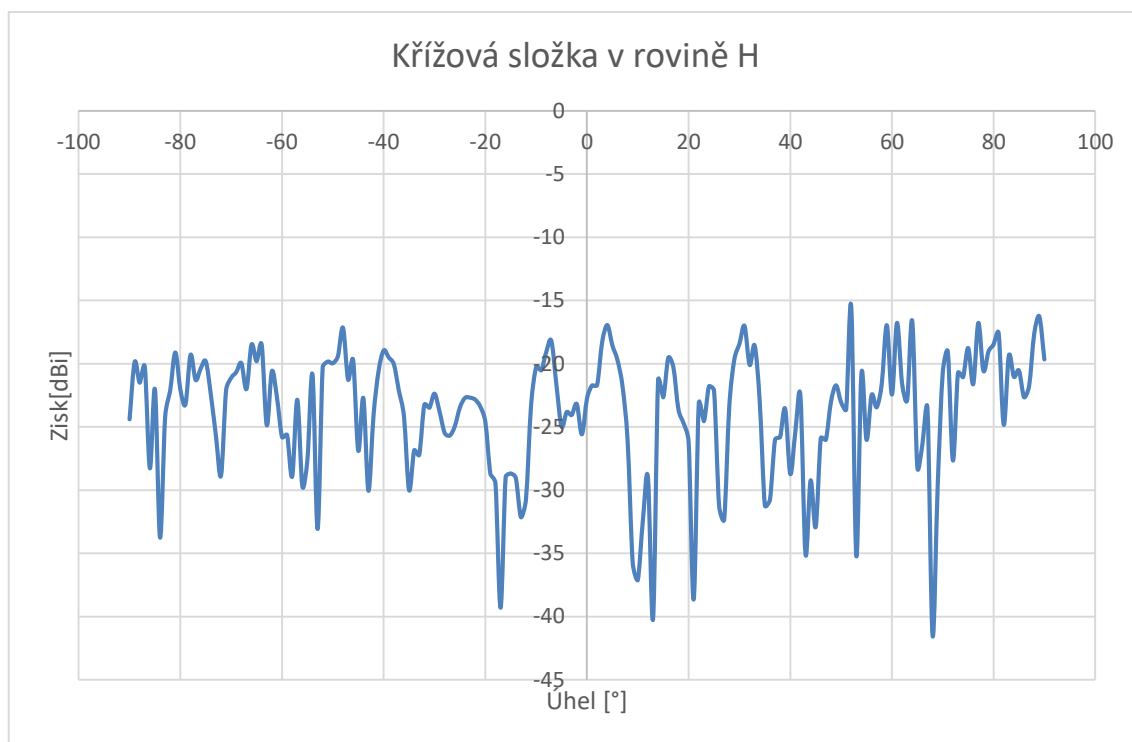
Obrázek 68 Vyzařovací diagram, rovina E pro frekvenci 60 GHz



Obrázek 69 Vyzařovací diagram v rovině E, křížová složka pro frekvenci 60 GHz – měření



Obrázek 70 Vyzařovací diagram. H rovina pro frekvenci 60 GHz



Obrázek 71 Vyzařovací diagram v rovině H, křížová složka pro frekvenci 60 GHz – měření

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotky
Absolutní šířka pásma	B	0,79	GHz
Relativní šířka pásma	B_r	1,3	%
Zisk	G	14,33	dBi
Potlačení postranních laloků, H rovina	$D_{\text{postranníH}}$	28,1	dB
Potlačení postranních laloků, E rovina	$D_{\text{postranníE}}$	11,32	dB
Šířka svazku H	$HPBW_H$	15,17	°
Šířka svazku E	$HPBW_E$	62,1	°

Tabulka 8 Výsledky měření vyrobené antény pro frekvenci 60 GHz

5 ZÁVĚR

Předmětem této práce byl návrh nízkoprofilové antény pro frekvenční pásmo 60 GHz na bázi SIW technologie. V teoretickém úvodu jsou základní informace o anténách a použitých technologiích.

Další kapitola je zaměřena na popis základního konceptu antény, výběru substrátu a výpočty ozařovače.

Při návrhu základního designu bylo hlavním cílem vytvořit anténu s originálními a dosud neprozkoumanými prvky. Prvním z těchto prvků je kulový reflektor antény, použitý pro transformaci vlny, oproti běžně používanému parabolickému. Dále se jedná o celistvou vazební šterbinu mezi vrstvou s ozařovačem a vyzařovací vrstvou. V kapitole 3 je podrobně popsán postup hledání ideálních parametrů jednotlivých částí antény až po její finální podobu.

Při návrhu byly především pozorovány impedanční podmínky antény a vyzařovací vlastnosti. Cílem práce bylo navrhnout anténu, jejíž pracovní pásmo odpovídá pásmu ISM, tedy 57 GHz až 64 GHz. Nejprve byly při návrhu použity stěny s nulovou tloušťkou z perfektně vodivého materiálu (PEC), které byly v poslední fázi nahrazeny prokvy. Aby bylo možné vlastnosti antény laboratorně změřit, byl navrhnout i napájecí vlnovod s vazební šterbinou a přechodka z vlnovodu WR-15.

Po přidání přechodky simulace vykazovali zhoršení impedančních poměrů antény. To je způsobeno nedostatečným impedančním přizpůsobením mezi vlnovodem WR-15 a SIW vlnovodem. Šířka pracovního pásma ovšem i nadále vyhovuje požadavkům na pracovní pásmo, s výjimkou velice úzkých oblastí na hodnotách 57,5 GHz a 62,5 GHz. Simulované vyzařovací charakteristiky pro frekvenci 60 GHz splnily očekávání. Bylo dosaženo zisku 13,6 dBi s potlačením postranních laloků 23,1 dB v rovině H a 10,7 dB v rovině E.

U vyrobené antény došlo dle očekávání ke zhoršení impedančních poměrů oproti simulaci. Anténa skládá z 3 částí, které byly kompletovány ručně. Při tomto procesu mohlo dojít k mírnému vychýlení poloh vazebních šterbin, které na sebe následně nenavazují tak dokonale, jako v simulacích. Pracovní pásmo v oblasti 60 GHz se tak zmenšilo na pouhých 0,79 GHz. Při pohledu na graf pro činitele odrazu je ovšem vidět, že oblastí ve kterých se činitel odrazu nachází pod hodnotou -10 dB je vícero a hodnota v požadovaném ISM pásmu nepřekročí -7 dB. Grafu pro zisk antény v závislosti na frekvenci ukázal, že tyto výkyvy v charakteristikách činitele odrazu neovlivňují zisk žádným dramatickým způsobem. Od frekvence 58 GHz je úroveň zisku nad 12 dBi, na 60 GHz pak zisk dosahuje hodnoty 14,33 dBi.

Změřené vyzařovací charakteristiky antény byly velmi podobné simulovaným. Došlo sice k rozšíření vyzařovacího svazku, zejména v rovině E, zisk vyrobené antény je ovšem vyšší, než jak předpovídali simulace.

Na 60 GHz dosahuje vyrobená anténa zisku 14,33 dBi s potlačením postranních laloků 28,1 dB v rovině H a 11,32 dB v rovině E. Šířka svazku v rovině H dosáhla hodnoty 15,17°, v rovině H potom 62,1°.

LITERATURA

- [1] Xu, Feng & Wu, Ke. Guide-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide. *Microwave Theory and Techniques*, 2005, IEEE Transactions on. 53. 66 - 73. 10.1109/TMTT.2004.839303.
- [2] ŽŮREK, D. *Nízkoprofilová směrová anténa*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2015.
- [3] NOVÁČEK, Zdeněk. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení: přednášky*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2006, 133 s. ISBN 80-214-3301-9.
- [4] WANG, H., FANG, D. G., ZHANG. B., CHE, W. Q. Dielectric Loaded Substrate Integrated Waveguide (SIW) H-Plane Horn Antennas, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, vol. 58, no. 3, p. 640-647.
- [5] ESQUIUS-MOROTE, M., FUCHS, B., ZÜRCHER, J. , MOSIG, J. R. Novel thin and compact H-plane SIW horn antenna, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, vol. 61, no. 6, p. 2911–2920
- [6] Y.J. Cheng, W.H. Hong, and K. Wu, Millimeter-wave substrate integrated waveguide multibeam antenna based on the parabolic reflector principle, *IEEE Trans Antenna Propag* 56 (2008), 3055–3058.
- [7] E. Gandini, M. Ettorre, M. Casaletti, K. Tekkouk, L. Le Coq, and R. Sauleau, SIW slotted waveguide array with pillbox transition for mechanical beam scanning, *IEEE Antenna Wireless Propag Lett* 11 (2012), 1572–1576.
- [8] K. Tekkouk, M. Ettorre, E. Gandini, and R. Sauleau, Multibeam pill-box antenna with low sidelobe level and high-beam crossover in SIW technology using the split aperture decoupling method, *IEEE Trans Antenna Propag* 63 (2015), 5209–5215.
- [9] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z., *Antény a šíření rádiových vln*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2005.
- [10] ŠKODA, A. *Antény pro přenos energie podél střechy automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 52 s., 2 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. JAN VÉLIM.
- [11] ESQUIUS-MOROTE Marc, FUCHS Benjamin, ZURCHER Jean-Francois, MOSIG Juan R. Novel Thin and Compact H-Plane SIW Horn Antenna, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* , vol.61, no.6, s.2911-2920, 2013 [cit. 2015-12-05]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6484899&isnumber=6521402>
- [12] VYSKOČIL J. *Filtr na bázi vlnovodu integrovaného do substrátu: diplomová práce*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2011. 49s., 1 příloha

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

SIW	Substrate Integrated Waveguide
PCB	Printed circuit board
f_k	Kritická frekvence vlnovodu
f_p	Pracovní frekvence
ϵ_r	Relativní permitivita
$\tan\delta$	Ztrátový činitel
h	Tloušťka substrátu
a_{vln}, a_1	Šířka vlnovodu
λ_s	Délka vlny v substrátu
λ_g	Délka vlny ve vlnovodu
c	Rychlost světla ve vakuu
$l_{trychtýř}, vel_horn$	Délka trychtýře
$a_{trychtýř}, a_2$	Velikost apertury trychtýře
w	Šířka antény
l	Výška antény
l_{vln}	Délka vlnovodu
rad	Poloměr reflektoru
vzd_ster	Vzdálenost vazební štěrby od vlnovodu
sir_ster	Šířka vazební štěrby
ang	Úhel pro určení délky štěrby
vel_zat	Velikost dielektrické zátěže
S_{11}	Činitel odrazu
B	Šířka pásma
B_r	Relativní šířka pásma
G	Zisk
D	Činitel směrovosti
F/D	Předozadní poměr
B_{lalo}	Odstup postranních laloků

l_{plt}	rozestup metalických paralelních plátů
d_{plt}	šířka metalických paralelních plátů
PEC	Perfect electric conductor
W	Rozteč SIW vlnovodu
W_{eff}	Ekvivalentní (efektivní) šířka vlnovodu
d	Průměr prokovu
s	Rozestup prokovů
l_{sterbina}	Délka vazební napájecí štěrbiny
w_{sterbina}	Šířka vazební napájecí štěrbiny
l_{posun}	Posun vazební napájecí štěrbiny od konce vlnovodu
l_{vazba}	Délka vazby mezi vazebními štěrbinami
$D_{\text{postranní}}$	Potlačení postranní laloků
HPBW_H	Šířka svazku H
HPBW_E	Šířka svazku E

SEZNAM PŘÍLOH

A Fotodokumentace

A. 1 ANTÉNA S PŘECHODKOU NA WR-15, POHLED SHORA	54
A. 2 ANTÉNA S PŘECHODKOU NA WR-15, POHLED ZESPODA	54
A. 3 ANTÉNA BEZ WR-15, POHLED ZESPODA	55
A. 4 PŘECHODKA Z VLNOVODU WR-15 NA SIW	55
A. 5 PŘECHODKA Z VLNOVODU WR-15 NA SIW	56
A. 6 PŘECHODKA Z VLNOVODU WR-15 NA SIW, ŘEZ	56

A FOTODOKUMENTACE



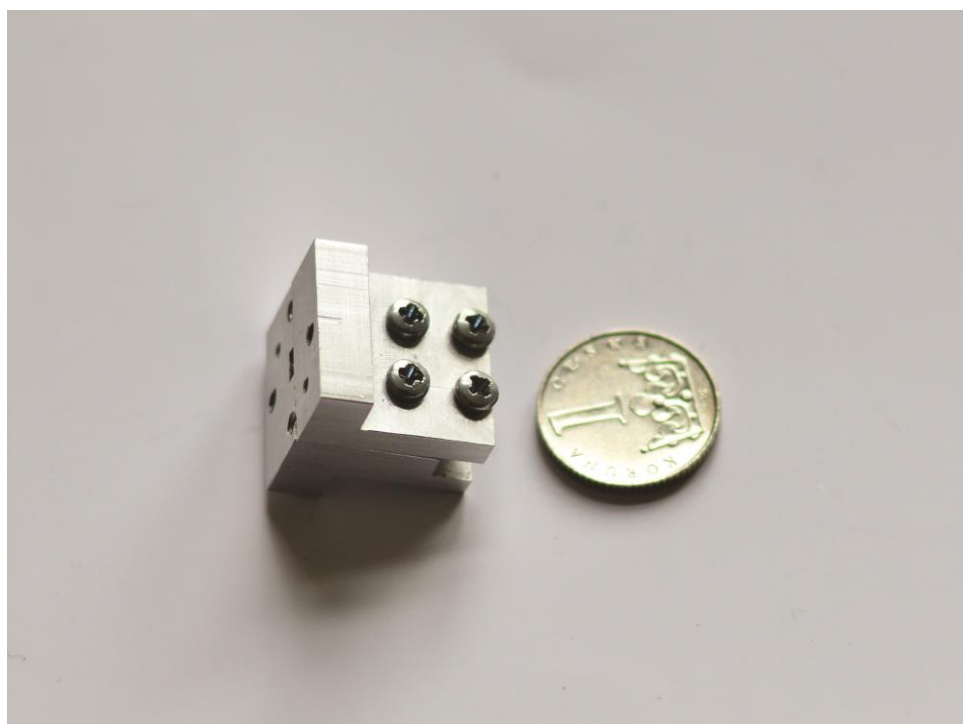
A. 1 Anténa s přechodkou na WR-15, pohled shora



A. 2 Anténa s přechodkou na WR-15, pohled zespoda



A. 3 Anténa bez WR-15, pohled zespoda



A. 4 Přechodka z vlnovodu WR-15 na SIW



A. 5 Přejchodka z vlnovodu WR-15 na SIW



A. 6 Přejchodka z vlnovodu WR-15 na SIW, řez