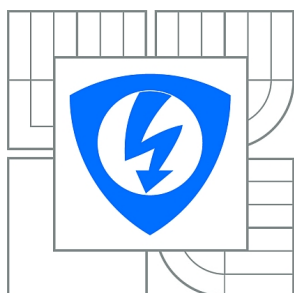


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

HOLOGRAFICKÁ ANTÉNA

HOLOGRAPHIC ANTENNA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. TOMÁŠ KLEČKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL POKORNÝ

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Tomáš Klečka

ID: 70171

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Holografická anténa

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem holografických antén a prostudujte možnosti realizace jejich buzení povrchovou vlnou.

Navrhněte a ve vhodném simulačním programu namodelujte vybrané budiče povrchových vln. Vypočtené parametry modelovaných budičů ověřte v dostupné literatuře. Budiče aplikujte na difrakční obrazce (hologramy) směrových antén.

Vybranou optimalizační rutinou navrhněte sadu difrakčních obrazců, které budou představovat vysoce směrové antény s různým směrem hlavního laloku vyzařovací charakteristiky. Realizujte holografické antény s vybranými difrakčními obrazci z této sady a experimentálně ověřte jejich vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SHERBINY, M. EL., FATHY, A. E., ROSEN, A. E., AYERS, G., PERLOW, S. M. Holographic antenna concept, analysis, and parameters. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2004, vol. 52, no. 3, p. 830-839.

[2] COLIN, R.E. Field Theory of Guided Waves. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 1990.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 20.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Michal Pokorný

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá principem mikrovlnné holografie, způsoby záznamu mikrovlnného hologramu a rozebírá některé typy holografických antén z konstrukčního a funkčního hlediska. Dále zahrnuje simulace vybraných modelů, simulace upravených modelů, optimalizaci pro 3 typy antén a výsledky měření zkonstruovaných antén.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mikrovlnná holografie, hologram, difrakční obrazec, holografická anténa, interference, optimalizace, genetický algoritmus.

ABSTRACT

This master's thesis deals with principle of microwave holography, methods of microwave hologram recording and analyzes some types of holographic antennas from structural and functional point of view. It also includes simulations of selected holographic antennas and their modifications, applies optimization on three types of antennas. Finally it reviews measured results of three constructed antennas.

KEYWORDS

Microwave holography, hologram, diffractive pattern, holographic antenna, interference, optimization, genetic algorithm.

KLEČKA, Tomáš *Holografická anténa*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2011. 57 s. Vedoucí práce byl Ing. Michal Pokorný

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Holografická anténa“ 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Michalovi Pokornému za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	7
1 Mikrovlnný hologram	8
1.1 Záznam hologramu	8
1.2 Konstrukce hologramu	10
1.3 Počítačově generovaný hologram	12
1.4 Holografický motiv	13
2 Provedení holografických antén	16
2.1 Anténa s objemovým hologramem	16
2.1.1 Princip	16
2.1.2 Konstrukce	17
2.2 Dipólová holografická anténa pro pásmo Ka	18
2.2.1 Geometrie antény	18
2.2.2 Konstrukce a výsledné parametry	18
2.3 Holografická anténa buzená povrchovou vlnou	19
3 Simulace holografických antén	21
3.1 Anténa s jedním difrakčním obrazcem	21
3.2 Anténa se dvěma difrakčními obrazci	24
3.3 Anténa s difrakčním obrazcem na dvou deskách	27
3.4 Anténa buzená trychtýřovou anténou	30
4 Optimalizace motivu	32
4.1 Spojitá varianta	33
4.1.1 Oboustranný motiv	33
4.1.2 Jednostranný motiv - 13 pásků	35
4.1.3 Jednostranný motiv - 17 pásků	35
4.2 Binární varianta	37
5 Deformace a změny hologramu	38
5.1 Parametrická analýza	38
5.2 Ořezání hologramu	40
5.3 Otočení hologramu	42
6 Konstrukce	45

7	Výsledky měření	48
7.1	Anténa s kolmým vyzařováním	48
7.2	Anténa s vyzařováním pod úhlem 11°	49
7.3	Anténa s vyzařováním pod úhlem 20°	51
8	Závěr	53
	Literatura	54
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	55
	Seznam příloh	56
A	Příloha	57

ÚVOD

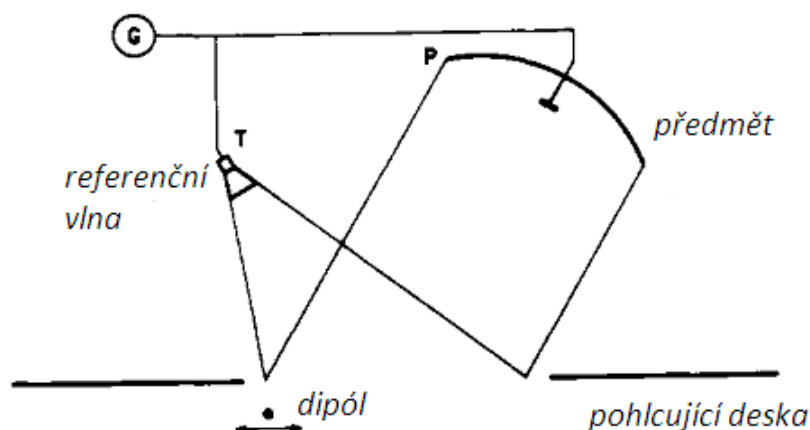
Aplikací holografického principu v oblasti mikrovln vznikl na konci 60. let minulého století obor tzv. mikrovlnné holografie. Své uplatnění nachází např. v koherentní detekci radarových ozvěn, při zobrazování vyzařovací charakteristiky mikrovlnného zářiče, při nedestruktivním testování vnitřní struktury opticky neprůhledných dielektrik, a také při výrobě holografických mikrovlnných antén, kdy vyzařovací aperturu tvoří holografické obrazce. Tyto antény lze použít např. v zařízeních CATR (Compact Antenna Test Range), kdy se měřená mikrovlnná anténa ozařuje uniformní rovinnou vlnu, jejímž zdrojem může být právě holografická anténa. Dále se nabízí použití v pásmu Ka (26-40 GHz), kdy jsou signály zhoršovány např. deštěm nebo stromy a antény tak musí mít vysoký zisk.

1 MIKROVLNNÝ HOLOGRAM

Princip mikrovlnného hologramu je obdobný, jako v klasické optické holografii, až na jisté rozdíly. Například záznam hologramu se prováděl bod po bodu, jelikož v oblasti mikrovln nelze použít fotografickou desku, jako v optické holografii. Jiným problémem je samotná konstrukce hologramu, protože dosáhnout plynule proměnné transmitance je poměrně složité, právě z důvodu bodového záznamu. Nicméně s rozvojem počítačové techniky a růstem její výpočetní výkonnosti se dnes hologramy vytvářejí také na základě elektromagnetické simulace.

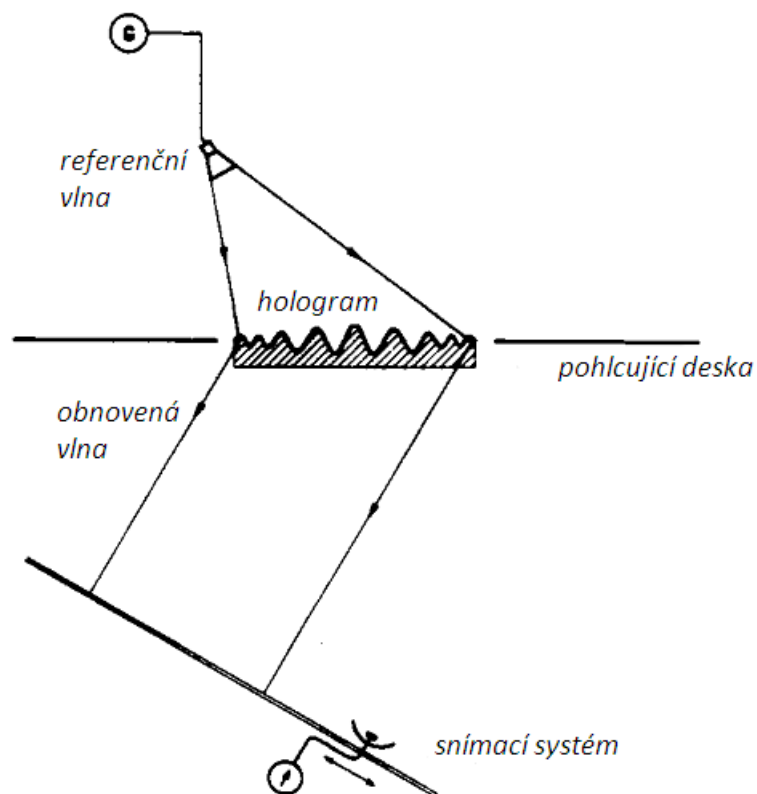
1.1 Záznam hologramu

Postup experimentálního záznamu hologramu je uveden např. v [1] a [2]. Parabola (viz. obr. 1.1) vyzařuje svazek paprsků, který je zároveň požadovanou vyzařovací charakteristikou zamýšlené holografické antény. Tento svazek interferuje s referenční vlnou vyzařovanou z trychtýřové antény, která představuje napáječ; pohlcující deska určuje rozměry apertury. Intenzita interferenčního obrazce se snímá vertikálním dipólem podél apertury po paralelně souběžných směrech. Výstup, společně se signálem, který je úměrný posunu dipólu, se odesílá do xy vykreslovače. Sada těchto paralelních záznamů pak popisuje intenzitu v interferenční oblasti, a to po celé apertuře.



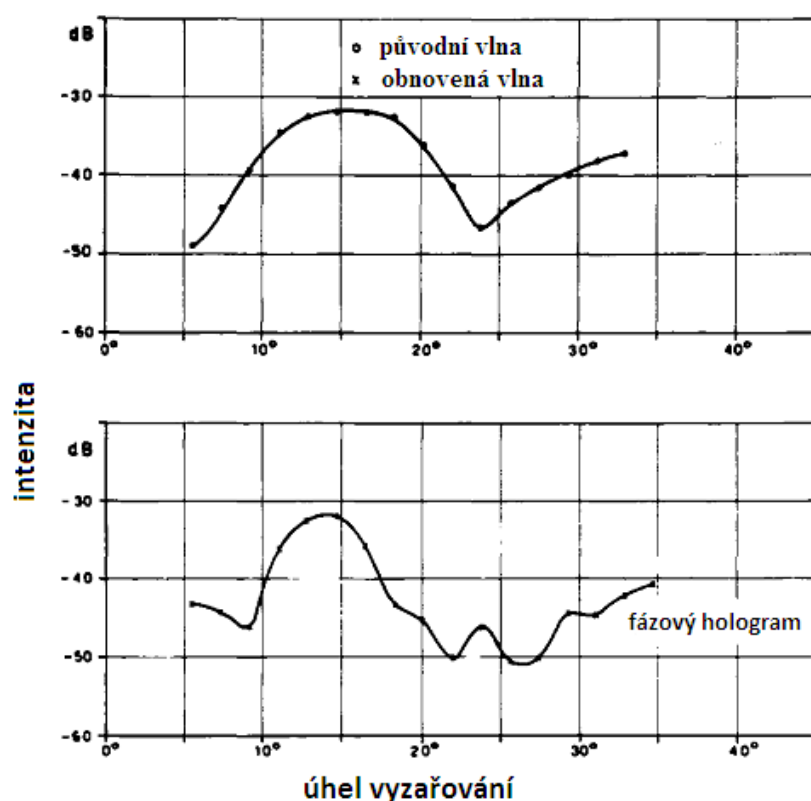
Obr. 1.1: Záznam hologramu; P - parabolická anténa, T - trychtýřová anténa, G - generátor [1].

Ve druhém kroku je poté hologram umístěn v apertuře a ozářen referenční vlnou (z trychtýřové antény), což vede k vyzařování z hologramu (obráz. 1.2).



Obr. 1.2: Rekonstrukce vlny ozářením hologramu [1].

Rekonstruovaná vlna reprodukuje jak amplitudu, tak fázi vlny původní. Intenzita zrekonstruované vlny, získané fázovým hologramem, je na obr. 1.3. Na něm lze vidět zřetelný zákmit na pravé straně způsobený vlnou nultého řádu (referenční vlnou). Je-li úhel mezi směry dopadu referenční vlny a předmětové vlny (z paraboly) roven 54° , jsou všechny řády vyjma 0. a -1 . (rekonstruovaná vlna) tlumeny [2].



Obr. 1.3: Průběh intenzity původní a obnovené vlny za použití fázového hologramu [1].

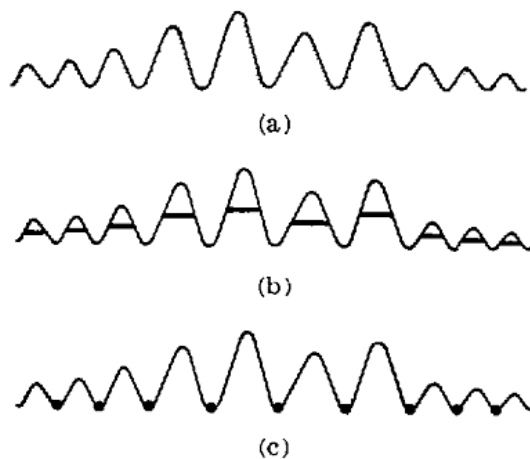
1.2 Konstrukce hologramu

Jak bylo řečeno, konstrukce spojitého hologramu je problém, a proto se hologram aproximuje. V zásadě jsou možné 3 druhy aproximací, čímž vzniknou odpovídající typy hologramů:

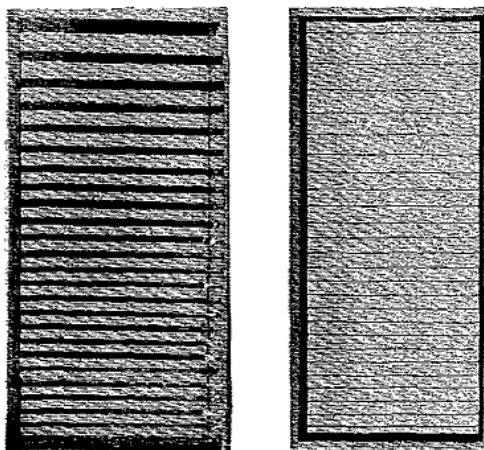
1. hologram s proměnnou propustností, nebo fázový hologram
2. hologramy se zaznamenanou periodicitou a šířkou okraje
3. hologramy se zaznamenanou periodicitou

Aproximace pro každý z nich je znázorněna na obr. 1.4. První typ je vytvořen pomocí desky s měnitelnou propustností (útlumem) nebo fází, přičemž její profil je totožný s profilem zaznamenaného interferenčního obrazce. Fázový hologram je tak vytvořen např. odlitím parafínu do sádrové formy. Druhý typ aproximace je umístění kovového nebo dielektrického pásku na okrajové části obrazce; plocha pásku je úměrná ploše okraje, kterou vymezuje. Lze aproximovat například proužkem, který je co do délky roven šířce okraje pro pokles o 3 dB. Třetí typ aproximace využívá ko-

vových nebo dielektrických tyčinek umístěných v minimech interferenčního obrazce. Příklad hologramů vytvořených kovovými proužky a tyčinkami je na obr. 1.5.



Obr. 1.4: Tři různé způsoby aproximace interferenčního obrazce; a - hologram se spojitou transmitancí, b - záznam periodicity a šířky kraje, c - záznam pouze periodicity [2].

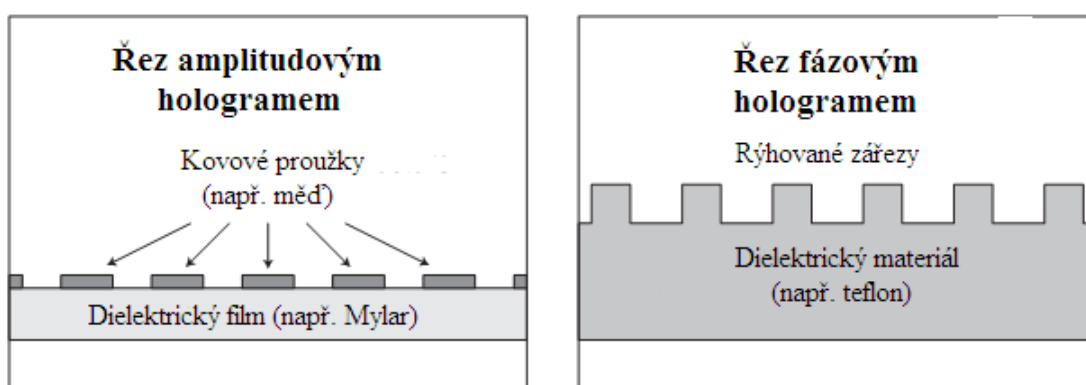


Obr. 1.5: Holografické antény získané aproximací druhého typu (vlevo) a třetího typu [2].

1.3 Počítačově generovaný hologram

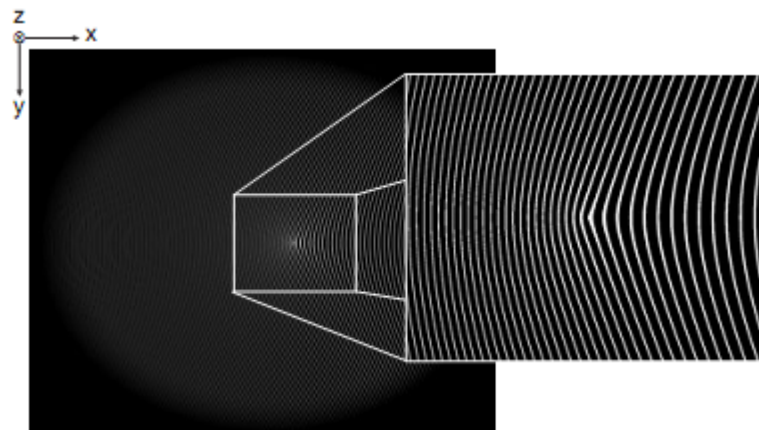
Počítačově generované hologramy (CGH - Computer-Generated Holograms) jsou lokálně periodické difrakční mřížky, které mění dopadající a vysílané elektromagnetické pole. Rádiové hologramy jsou pak CGH pracující s monochromatickými rádiovými vlnami. Obvykle jsou navrženy tak, aby prováděly jednoduchou holografickou funkci, jakou je například vytvoření postupující rovinné vlny z dopadajícího Gaussova svazku. Vhodně navrženým rádiovým hologramem je také možné vytvořit i jiné druhy svazků, např. Besselův [3].

Hologram je navržen pomocí elektromagnetické simulace a poté je struktura analyzována např. metodou konečných diferencí v časové oblasti (FDTD - Finite-Difference Time-Domain). Výsledkem je amplitudový hologram (kovové proužky na dielektrické vrstvě) anebo fázový hologram, tvořený rýhovanými zářezy na dielektrickém substrátu (obr. 1.6) [3].



Obr. 1.6: Mřížkové struktury amplitudového a fázového hologramu [3].

Fyzikálně se proces vytváření holografické mřížky popisuje přenosovou funkcí, např. transmitancí $T(x, y)$, která souvisí s přenášeným elektromagnetickým polem ($E_{tr}(x, y)$) a dopadajícím polem ($E_{in}(x, y)$) podle vztahu $E_{tr}(x, y) = T(x, y)E_{in}(x, y)$. Existuje několik postupů při návrhu mřížkované struktury, které přibližně zajistí požadovanou transmitanci. Ta vychází u amplitudových hologramů často v binarizované formě ($T_b(x, y)$) a je tvořena propustnými ($T_b = 1$) a nepropustnými ($T_b = 0$) oblastmi [3]. Příklad binárního amplitudového hologramu je na obr. 1.7.

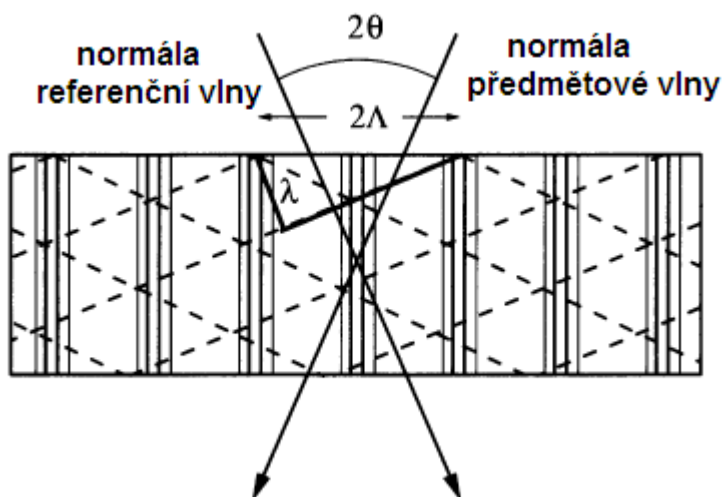


Obr. 1.7: Binární amplitudový hologram, který slouží k vytvoření Besselova svazku nultého řádu. Nepropustné proužky jsou znázorněny černě, propustné štěrbiny jsou znázorněny bílou barvou [3].

1.4 Holografický motiv

Uvažujme jednoduchý případ, kdy předmětová i referenční vlna jsou vlny rovinné. Můžeme říci, že tyto dvě vlny vytvářejí jednoduchou holografickou mřížku.

Na obr. 1.8 je znázorněn záznam motivu na husté emulzi během expozice. Máme dvě vlnové normály (znázorněny šipkami ukazujícími ve směru obou $\vec{k}$ vektorů), obě svírají s normálou povrchu úhel θ .



Obr. 1.8: Záznam jednoduchého hologramu na husté emulzi [4].

Vlnoplochy (nebo také místa s nulovou fází) obou vln jsou vyznačeny čárkovaně a jsou od sebe vzdáleny jednu vlnovou délku. V místech, kde se kříží, dochází ke sčítání amplitud ve fázi, a tedy k větší expozici (osvitu). V čase se pak vlnoplochy posouvají každá ve směru své normály a výsledkem jsou linie konstruktivní interference po celé emulzi. Tyto linie pŕlí ŕhel 2θ , kterŕy svírají normály vln, a periodicky se opakují po celé emulzi.

Matematicky se trojrozměrná interference popisuje komplexními amplitudami dvou vln, např.

$$U_r(\vec{r}) = \mathbf{A}e^{j\vec{k}_r \cdot \vec{r}}, \quad (1.1)$$

$$U_o(\vec{r}) = \mathbf{a}e^{j\vec{k}_o \cdot \vec{r}}, \quad (1.2)$$

kde $\vec{k}_r$ a $\vec{k}_o$ jsou vlnové vektory referenční a předmětové vlny a $\vec{r}$ je polohový vektor se složkami (x, y, z) . Výsledné rozložení intenzity po interferenci těchto vln je

$$I(\vec{r}) = |\mathbf{A}|^2 + |\mathbf{a}|^2 + 2|\mathbf{A}||\mathbf{a}|\cos[(\vec{k}_r - \vec{k}_o) \cdot \vec{r} + \phi], \quad (1.3)$$

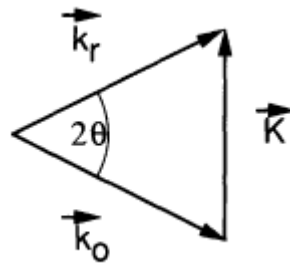
kde ϕ je fázový rozdíl mezi fázory $\mathbf{A}$ a $\mathbf{a}$.

Dále je vhodné [4] definovat mřížkový vektor $\vec{K}$ jako rozdíl dvou vlnových vektorů

$$\vec{K} = \vec{k}_r - \vec{k}_o. \quad (1.4)$$

Vektor $\vec{K}$ má velikost $\frac{2\pi}{\Lambda}$, kde Λ je perioda mřížky a směr je dán vektorovým rozdílem $\vec{k}_r - \vec{k}_o$ (podle diagramu na obr. 1.9). Perioda mřížky je pak dána

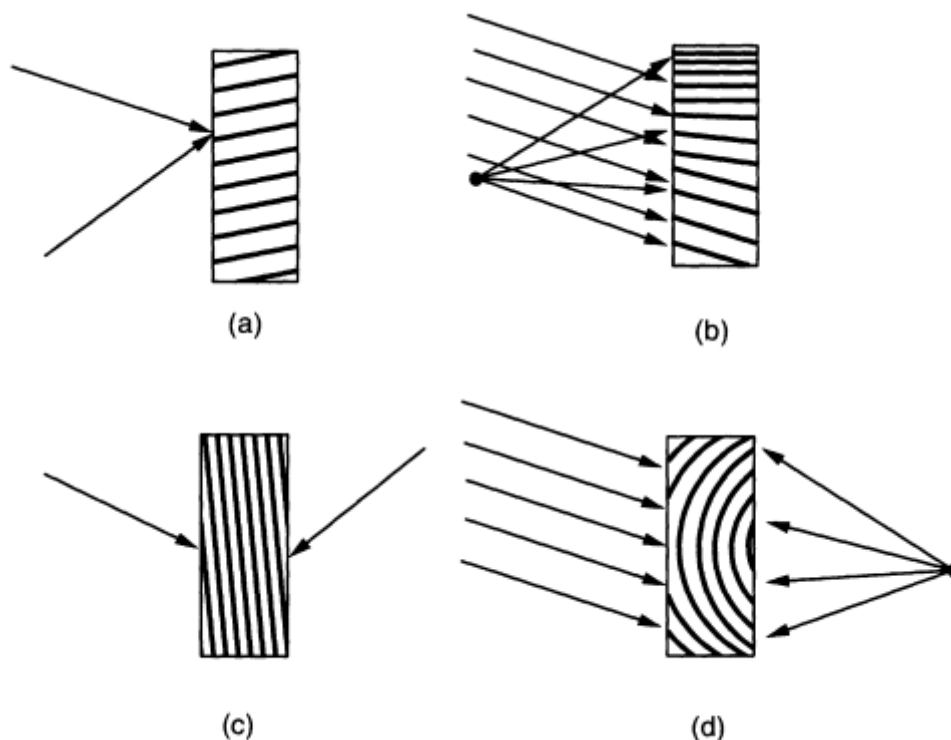
$$\Lambda = \frac{2\pi}{|\vec{K}|} = \frac{\lambda}{2\sin\theta}. \quad (1.5)$$



Obr. 1.9: Vektorový diagram ilustrující délku a směr mřížkového vektoru [4].

Výše zmíněný příklad se zabýval nejjednodušším hologramem vytvořeného interferencí dvou rovinných vln, které mají stejné, ale opačné úhly vzhledem k normále

záznamového povrchu. Obecně lze říci, že mřížka je v záznamovém médiu vždy orientována tak, aby půlila úhel dvou interferujících vln v médiu. Tak lze přesně odhadnout, jaký bude tvar mřížky pro různé případy vln. Obr. 1.10 ukazuje např. vznik šikmé mřížky z interference dvou rovinných vln, interferenci rovinné a kulové vlny, a také vlny interferující z opačných stran záznamového média, což je případ odrazného hologramu.



Obr. 1.10: Orientace interferenčních obrazců v záznamovém médiu. (a) Dvě rovinné vlny tvořící šikmou mřížku, (b) rovinná vlna a sférická vlna, (c) dvě rovinné vlny dopadající z opačných stran, (d) rovinná a sférická vlna dopadající z opačných stran záznamového média [4].

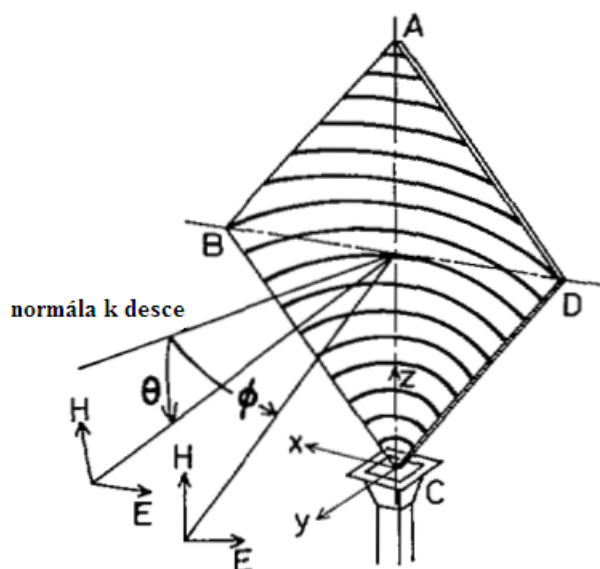
2 PROVEDENÍ HOLOGRAFICKÝCH ANTÉN

2.1 Anténa s objemovým hologramem

Podle [5] je anténa tohoto typu schopna vyzařovat jedním směrem a má vysoký předozadní poměr. Toho se dosáhne nastavením žádané směrovosti rozptylujícího motivu (hologramu). Napájení je dáno do roviny holografické desky, což může mít konstrukční výhody.

2.1.1 Princip

Když je hologram, vytvořený podle interferenčního obrazce dvou vlnoploch, ozářen jednou z těchto vln, lze druhou vlnu snadno zrekonstruovat na povrchu hologramu. Na obr. 2.1 je vidět holografická deska, kterou tvoří naleptaný motiv interferenčního obrazce sférické vlny z trychtýřové antény C a rovinné vlny dopadající kolmo na desku ABCD. Vzor je sestaven ze soustředných kovových proužků, jejichž poloměr se zvyšuje vždy o jednu vlnovou délku. Pokud se ozáří tato deska sférickou vlnou z trychtýřové antény C, rozptýlené vlny z každého kovového proužku v rovině hologramu jsou všechny ve fázi a tedy dva paralelní svazky vyzařují ve dvou navzájem opačných směrech kolmých k povrchu hologramu.

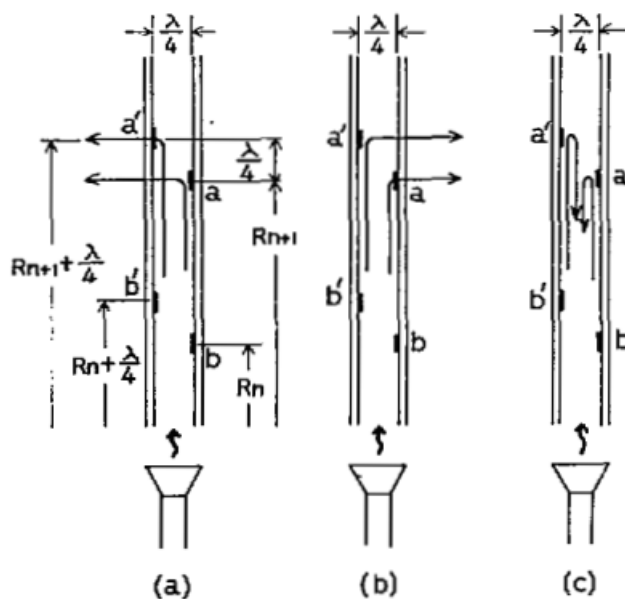


Obr. 2.1: Struktura a geometrie holografické desky [5]

Vznik rekonstruovaného a sdruženého obrazu, jak by se dal tento jev popsat, je ovšem nevýhodný, protože rozděluje vyzařovanou energii na dvě části. Možným

řešením je použití dvou a více holografických desek. Na obr. 2.2 je vidět boční profil takto vzniklé antény. Desky jsou od sebe vzdáleny $\frac{\lambda}{4}$, kde λ je vlnová délka ve volném prostoru, a poloměr kovových proužků R_n nalevo je větší o čtvrtinu vlnové délky, než napravo. Na obr. 2.2(a) je dále vidět, že po ozáření trychtýřovou anténou jsou vlny z proužků a a a' ve fázi, sčítají se a tvoří hlavní směr vyzařování. V případě (b) a (c) jsou v protifázi a navzájem se ruší jak ve směru opačném od (a), tak ve směru k napájení, což vede k dobré impedanční charakteristice napáječe.

Vyzařování trychtýřové antény je třeba dobře přizpůsobit, aby její boční laloky ovlivňovaly hlavní směr záření holografické antény co nejméně.



Obr. 2.2: Řez objemovou holografickou anténou se třemi různými směry rozptýlené vlny; (a) - sčítání ve fázi, (b) a (c) - sčítání mimo fázi [5].

2.1.2 Konstrukce

Anténa se skládá ze dvou holografických desek o rozměrech $12\lambda \times 12\lambda$, kde $\lambda = 2,5 \text{ cm}$, což znamená pracovní kmitočet 12 GHz . Na každé desce je natištěno přibližně 16 kovových proužků z měděné vrstvy o tloušťce $0,035 \text{ mm}$ a skleněné tkaniny potažené fluorokarbonovou pryskyřicí o tloušťce $1,6 \text{ mm}$, která má dielektrickou konstantu $2,6$ a ztrátový činitel $0,002$.

Pyramidální trychtýřová anténa je umístěna blízko středu poloměru proužků a má rozměry $0,56\lambda \times 0,64\lambda$.

Takto navržená anténa měla jednosměrovou charakteristiku s předozadním poměrem 20 dB a hlavní lalok měl o 7 dB vyšší úroveň, než při použití pouze jedné holografické desky [5].

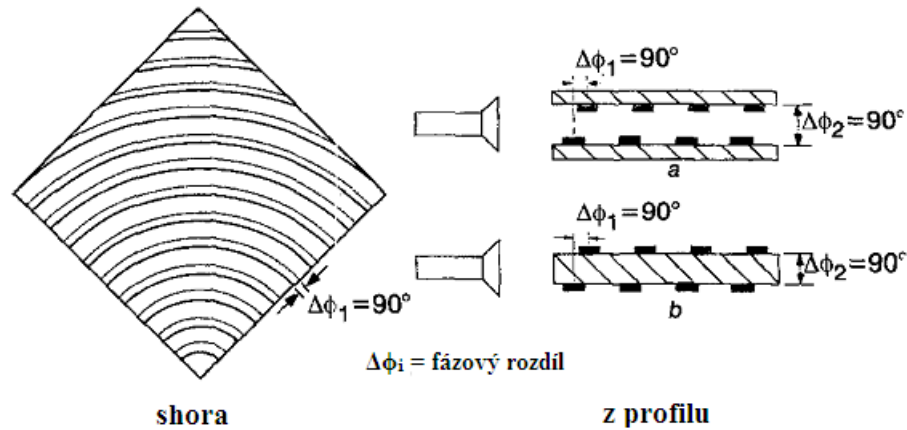
2.2 Dipólová holografická anténa pro pásmo Ka

Aplikace v pásmu Ka (26-40 GHz) se týkají například lokálních vícebodových komunikačních/distribučních systémů (LMCS/LMDS) a pokročilých satelitních komunikačních systémů (SATCOM). Tyto systémy musí být schopné přenášet širokopásmové multimediální signály (hlas, videokonference).

2.2.1 Geometrie antény

Anténa je stavbou podobná objemové holografické anténě z [5]. Skládá se z tenké dielektrické desky, na které jsou tenké vodivé proužky. Tvar a rozmístění vodivých prstenců vychází z teorie holografie a obecně závisejí na umístění napájecí antény a na požadované vyzařovací charakteristice. Vodivé proužky jsou v místech destruktivní interference, přičemž jejich šířka se volí co nejmenší, aby se přiblížilo ideální podmínce interferenčního obrazce z nekonečně tenkých proužků. Tloušťka proužků je také velmi malá, aby se zamezilo účinkům povrchových vln a profil antény zůstal nízký. Čím větší je pak apertura, tím účinněji zachytí energii z napáječe, kterým je v tomto případě otevřený vlnovod WR-28.

Výsledné provedení hologramu je na obr. 2.3 Varianta (a) ukazuje objemový hologram, varianta (b) dvoustranný hologram.



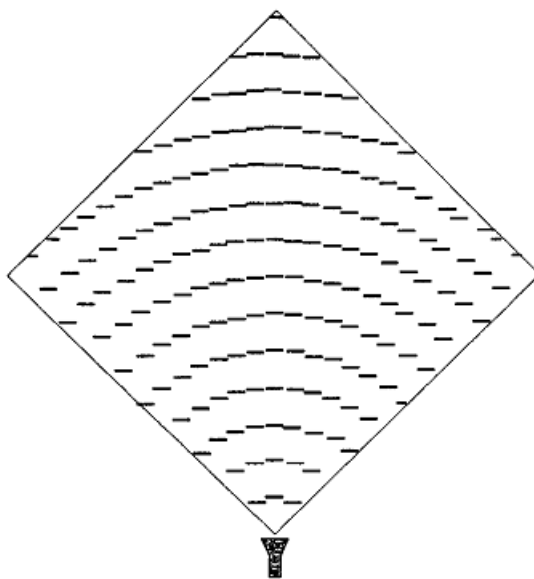
Obr. 2.3: Dvě provedení hologramu; a - objemový, b - dvoustranný [6].

2.2.2 Konstrukce a výsledné parametry

Anténa je navržena pro 30 GHz, hologram je naleptaný na nízkoztrátovém Duroidu s $\varepsilon_r = 3,38$, tloušťkou 0,0508 cm a délkou strany 10 cm. Vzdálenost jednotlivých proužků hologramu se volí λ_0 , neboť se aproximuje $\lambda_g \sim \lambda_0$, kde λ_0 je vlnová délka ve volném prostoru a λ_g vlnová délka v substrátu. Šířka pásku je 0,0254 cm [6].

Měření antény ukázalo, že s dvoustranným hologramem dosahuje zisku 25 dBi na 28 GHz, zatímco s objemovým 23,5 dBi na téže frekvenci. Na druhou stranu se objemový hologram ukázal jako účinnější v potlačení zadního laloku vyzařování a měl také lepší hodnoty činitele odrazu.

Dalším sledovaným parametrem byla křížová polarizace. Účinnou metodou, jak snížit úroveň křížové polarizace, se ukázalo nahrazení spojitých proužků skupinou planárních dipólů (obr. 2.4), neboť při setkání vlny s dipólem se uplatní pouze jedna polarizace. Vzdálenost sousedních dipólů je $\frac{\lambda_0}{2}$. Účinnost křížové polarizace se takto dostala až k 25 dB [6].



Obr. 2.4: Dipólová holografická anténa [6].

2.3 Holografická anténa buzená povrchovou vlnou

Předchozí typy antén se popisovaly holografickou terminologií, avšak danou problematiku je možno také popsat klasickými pojmy, jak je uvedeno v [7]. Anténou je difrakční apertura a fáze sekundárního vyzařování je určena rozmístěním kovových ploch, které stojí v cestě primárního záření (napájení). Takže proužky ve výše popsaných anténách byly umístěny podél linie konstantní fáze primárního buzení a tvoří ekvifázovou aperturu.

Nově se pak volí buzení takovéto antény povrchovou vlnou a nikoli prostorovou, jako u předchozích. Srovnání předešlých konceptů s tímto je v tab.2.1.

Tab. 2.1: Srovnání starších provedení s novým provedením [7].

Starší provedení	Novější provedení
- Proužkový motiv je relativně řídký s prvky vzdálenými přibližně jedné vlnové délky ve volném prostoru, což může vést ke vzniku pronikavých smyček (grating lobes).	- Proužkový motiv je buzen povrchovou vlnou s fázovou rychlostí menší než ve volném prostoru a tedy s kratší vlnovou délkou, což vede k hustšímu hologramu a zamezení pronikavých smyček.
- Účinnost spojení primárního napáječe a hologramu je nízká.	- Mnohem větší účinnost spojení, protože povrchová vlna je z velké části ohraničena dielektrikem.
- Dvoustranné vyzařování (neplatí při použití 2 a více hologramů).	- Zemnicí plocha je umístěna ve čtvrtvlnné vzdálenosti od substrátu (umožní jednostranné vyzařování).
- Přímé vyzařování z trychtýřové antény se přidává k hlavní vyzařovací charakteristice a způsobuje nežádoucí vyzařovací laloky.	- Přímé vyzařování z budiče povrchové vlny může být snadno potlačeno (použitím ztrátových vrstev).

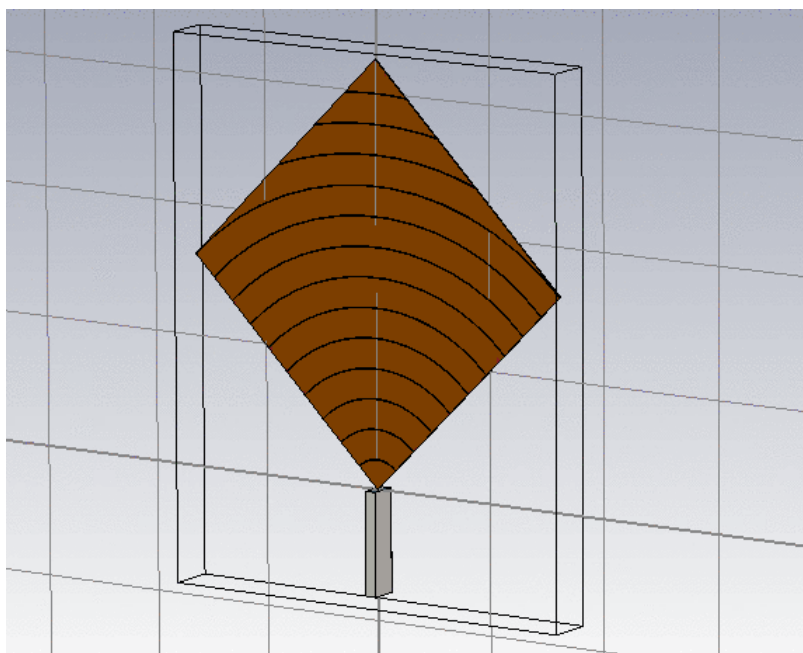
Budičem povrchové vlny je otevřeně zakončený vlnovod. Jeho přednostmi jsou nízkoztrátové napájení a možnost potlačit přímé vyzařování v oblasti přechodu. Teoretický návrh takového budiče je složitý, neboť se jedná o tří-rozměrný elektromagnetický problém. V případě této antény se zjistilo, že přenos dielektrickou vrstvou je možný, pokud je roh dielektrické desky čtvercového tvaru umístěn v určité hloubce vlnovodu. Obě proměnné, hloubka vsunutí a poloha v průřezu vlnovodu, byly určeny na základě numerické simulace. Vlnovod byl dále na konci zkosen, aby se potlačily módy vyšších řádů vznikajících v důsledku dielektrické zátěže. Tím se zároveň potlačí přímé vyzařování z otevřeného konce a šíření je umožněno pouze modu povrchové vlny [7].

3 SIMULACE HOLOGRAFICKÝCH ANTÉN

3.1 Anténa s jedním difrakčním obrazcem

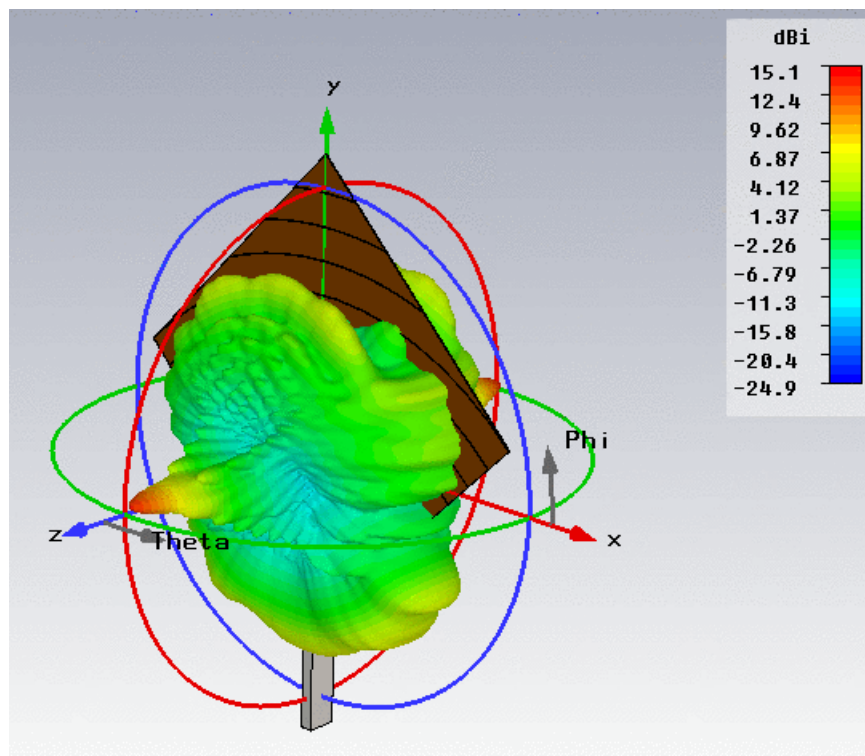
Cílem práce by měl být návrh vysoce směrové antény v pásmu 18-27 GHz, se ziskem kolem 26 dBi, buzené trychtýřovou anténou nebo vlnovodem. S ohledem na dostupné budící materiály jsem zvolil pracovní kmitočet 26 GHz a tomu odpovídající vlnovod WR42. Simuluje se v prostředí CST Microwave Studio 2010, použit je transient solver.

První model na obr. 3.1 je single layer holografická anténa (s jedním motivem). Čtvercová deska má délku strany rovnu 10λ , tedy $L = 11,5$ cm, substrátem je materiál 25N se šířkou $t = 1,5$ mm. Na povrchu jsou kovové pásy (části soustředných kružnic) šířky $w = 0,254$ mm a tloušťky $v = 0,1$ mm. Mají-li být tyto pásy místem destruktivní interference, musí být elektrické pole tečné k těmto páskám, tj. vektor intenzity elektrického pole $\vec{E}$ je rovnoběžný s páskami a tomu odpovídá natočení vlnovodu. Vzdálenost jednotlivých pásků je λ .

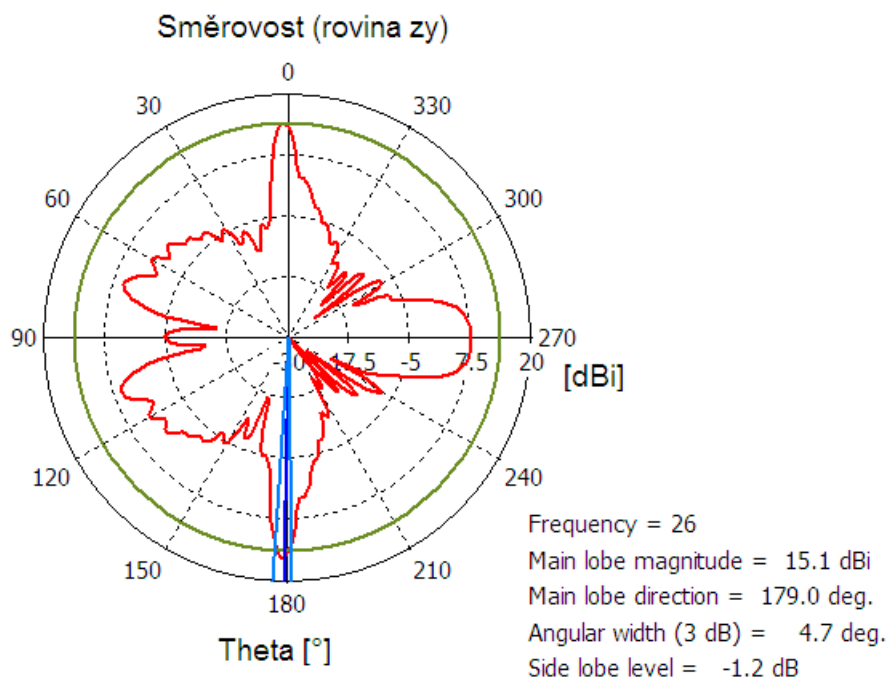


Obr. 3.1: Jednovrstvá anténa buzená vlnovodem.

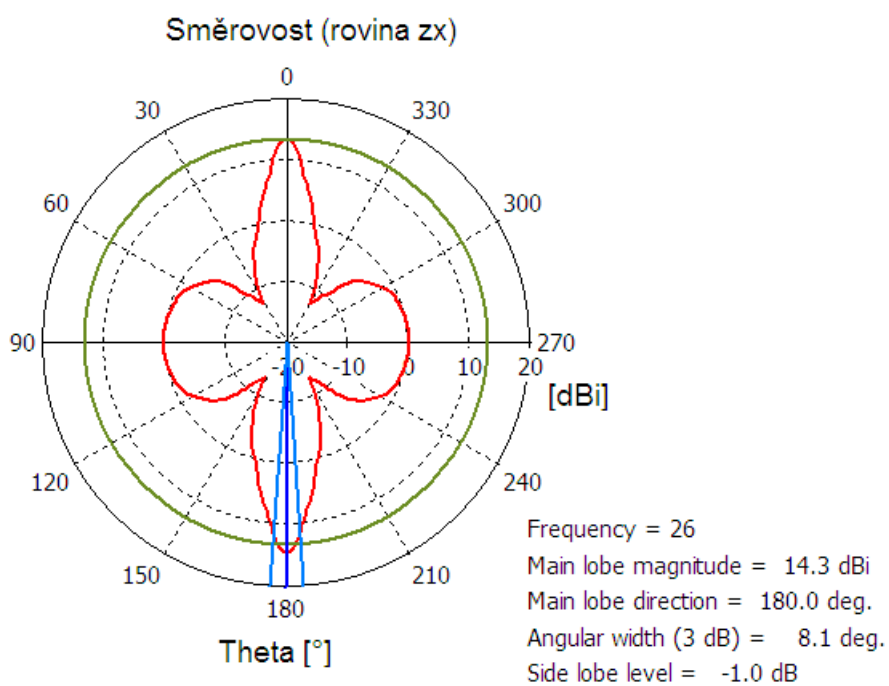
Na obr. 3.2 je farfield charakteristika jednovrstvé antény, kde je možné vidět dva hlavní, navzájem opačně vyzařující laloky. Obr. 3.3 a obr. 3.4 znázorní vyzařovací charakteristiky ve dvou rovinách, zy a zx. Průběh činitele odrazu v závislosti na kmitočtu je na obr. 3.5.



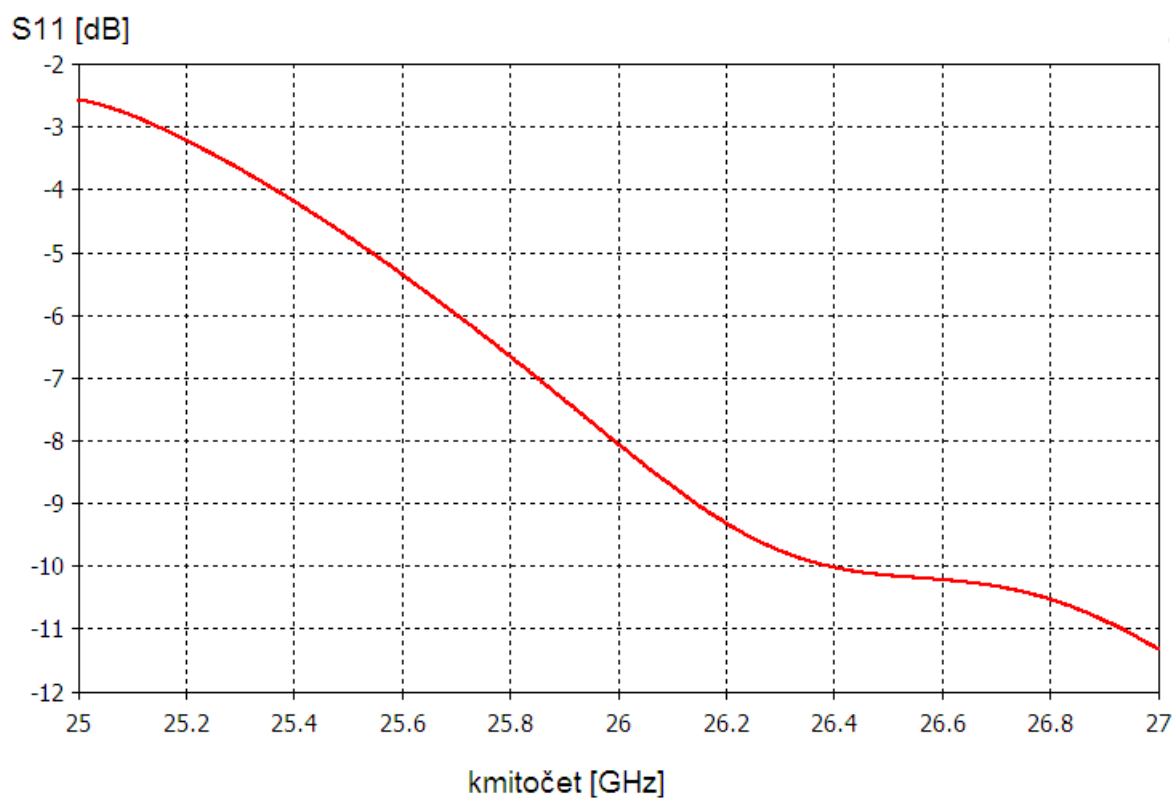
Obr. 3.2: Farfield charakteristika jednovrstvé antény.



Obr. 3.3: Směrová charakteristika jednovrstvé holografické antény, $\phi = 90^\circ$.



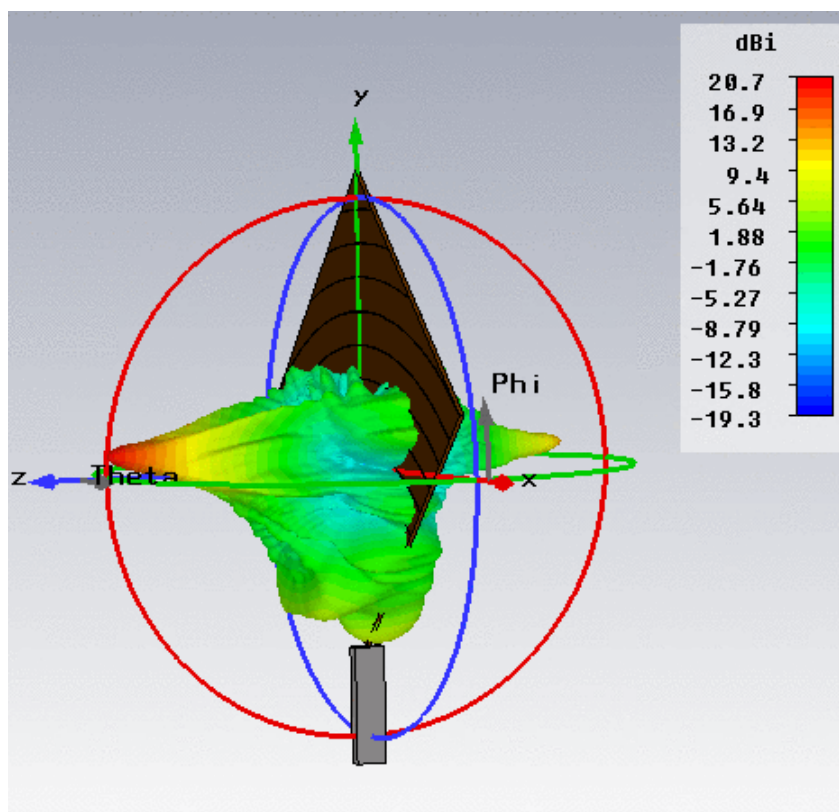
Obr. 3.4: Směrová charakteristika jednovrstvé holografické antény, $\phi = 0^\circ$.



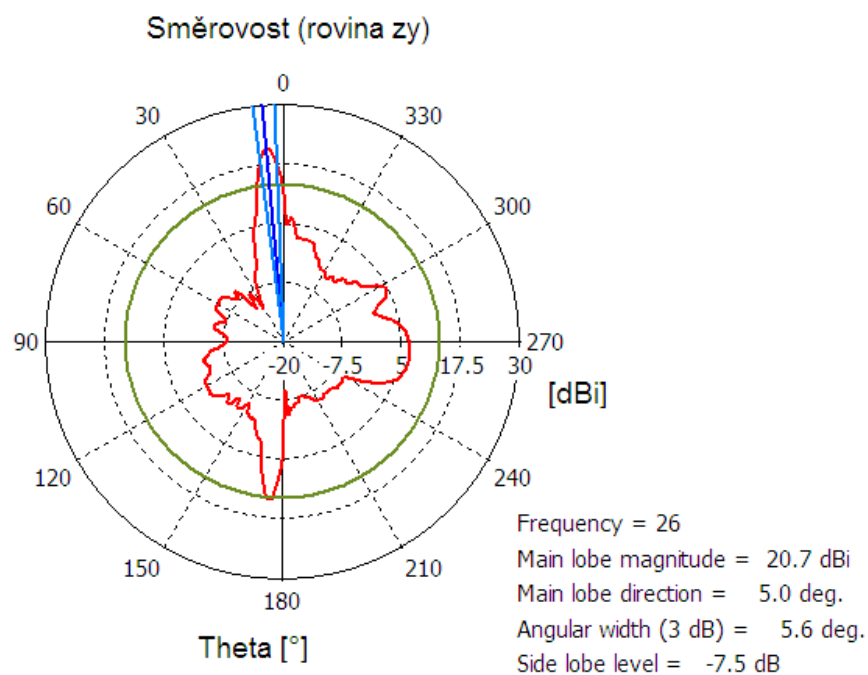
Obr. 3.5: Parametr S_{11} jednovrstvé holografické antény.

3.2 Anténa se dvěma difrakčními obrazci

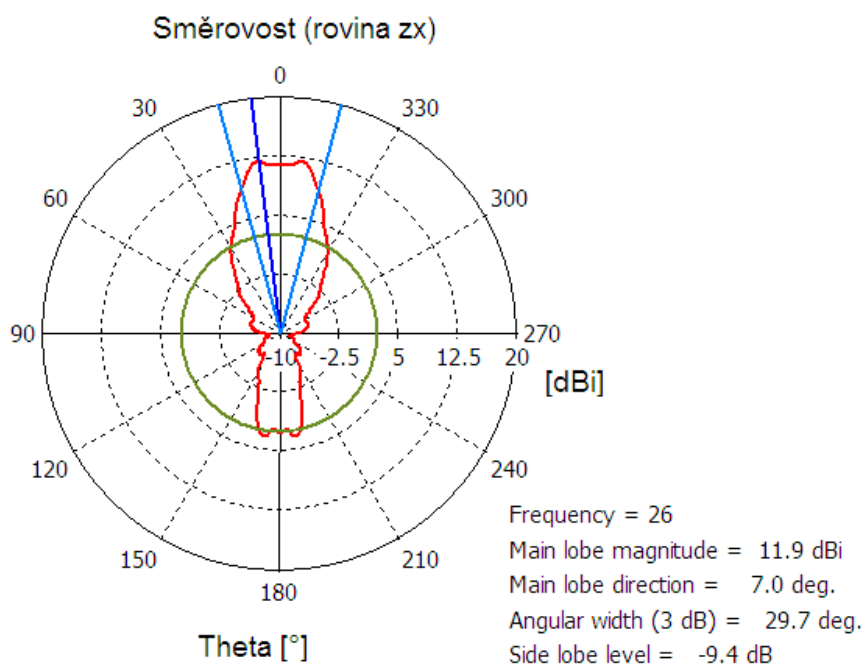
Geometrie takovéto antény se v podstatě neliší od předchozí. Rozdíl spočívá v přidání stejného difrakčního obrazce na druhou stranu desky, přičemž je tento obrazec posunutý o $\frac{\lambda}{4}$ ve směru $-y$ vůči hornímu. Tloušťka substrátu je $t = 1,5$ mm. Výsledky (obr. 3.6, obr. 3.7 a obr. 3.8) ukazují, že díky posunu došlo k posílení jednoho a k jistému zeslabení druhého laloku. Zde se dále nabízí možnost optimalizace, kdy změna parametrů (tloušťka substrátu, příp. šířka a počet proužků) povede na vhodně zesílený jeden lalok a zároveň dostatečně potlačený druhý, nežádoucí lalok. Stejně tak by mělo dojít ke zlepšení činitele odrazu (obr. 3.9)



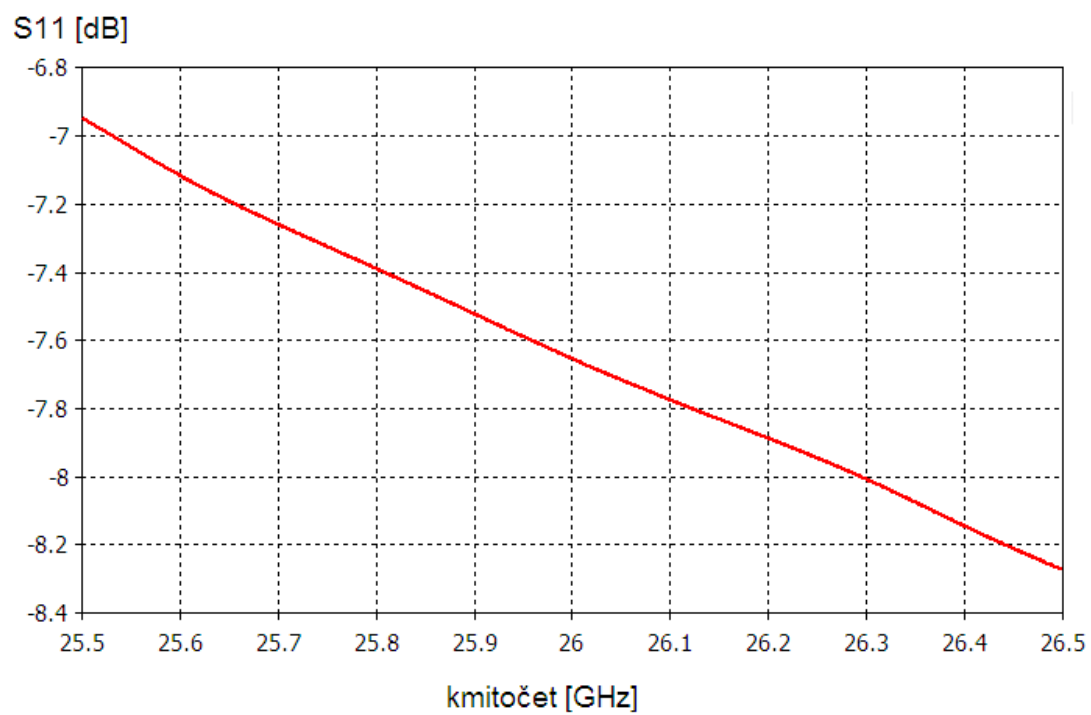
Obr. 3.6: Farfield charakteristika dvouvrstvé antény.



Obr. 3.7: Směrová charakteristika dvouvrstvé holografické antény, $\phi = 90^\circ$.



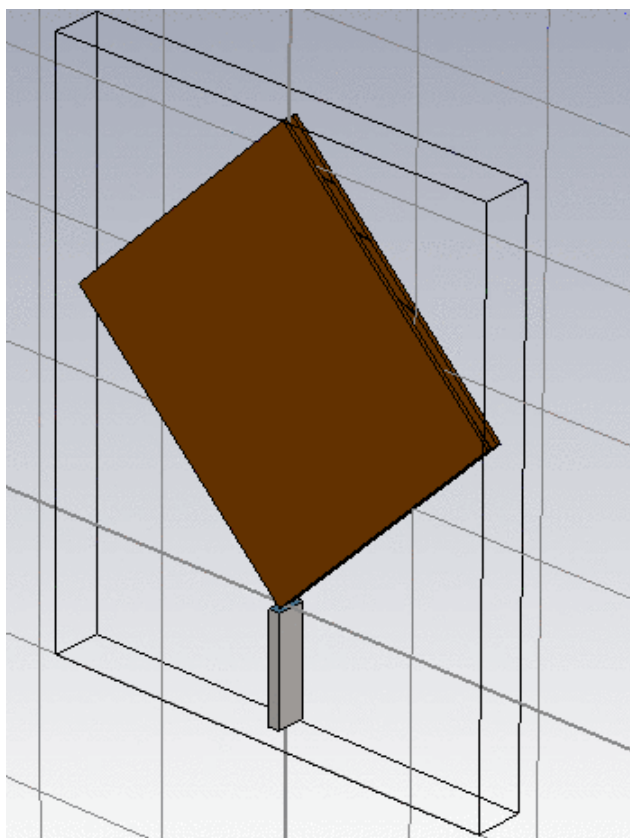
Obr. 3.8: Směrová charakteristika dvouvrstvé holografické antény, $\phi = 0^\circ$.



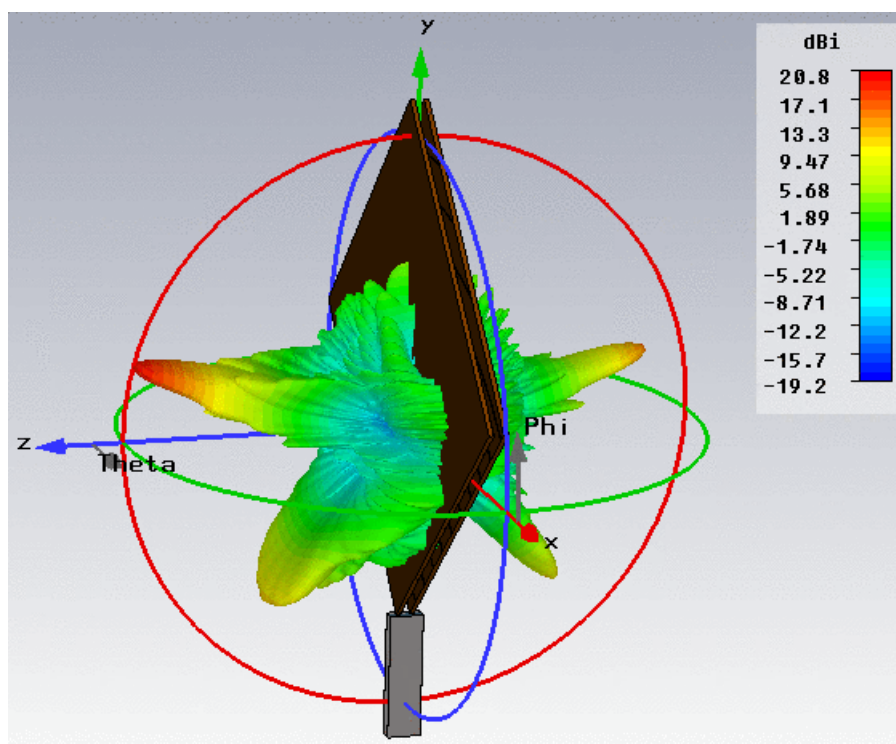
Obr. 3.9: Parametr S_{11} dvouvrstvé holografické antény.

3.3 Anténa s difrakčním obrazcem na dvou deskách

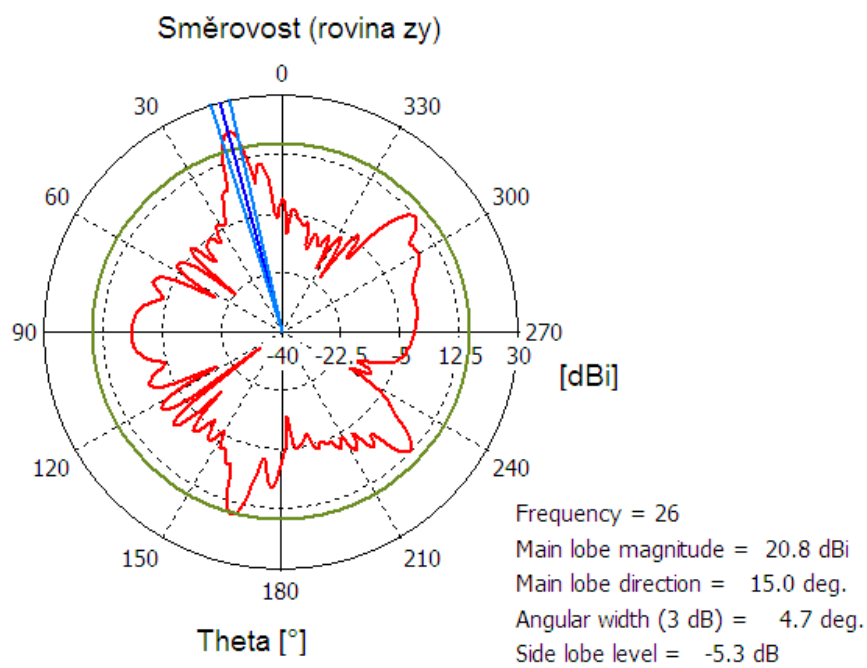
Na obr. 3.10 je další varianta modelu. Jsou použity 2 desky, každá s jedním difrakčním motivem, z nichž jeden je opět posunutý o $\frac{\lambda}{4}$. Strany desek s motivy jsou u sebe, ve vzdálenosti $\frac{\lambda}{4}$. Výsledky (obr. 3.11, obr. 3.12) ukazují, že dochází k záření ve 4 směrech. Největší vliv na vyzařování má pravděpodobně vzájemná závislost tloušťky desek a vzdálenosti desek, a bylo by třeba dále najít vhodnou kombinaci těchto parametrů. Činitel odrazu je pak na obr. 3.13.



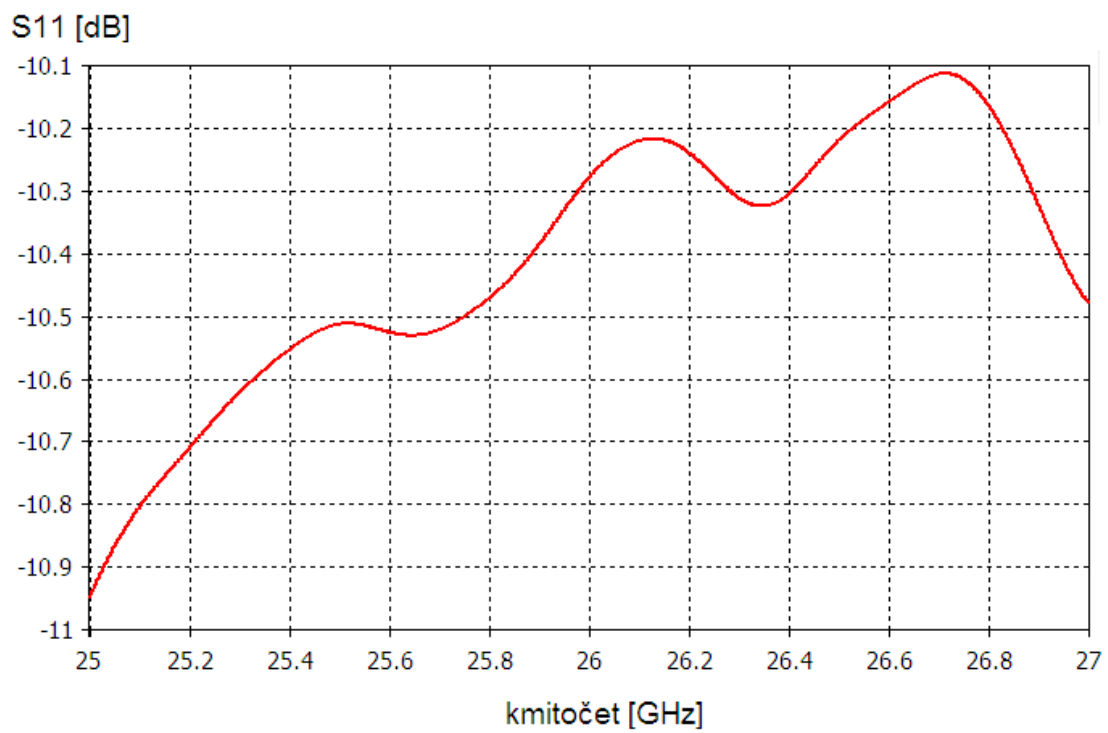
Obr. 3.10: Anténa ze dvou desek, každá s jedním motivem.



Obr. 3.11: Farfield charakteristika dvoudeskové antény.



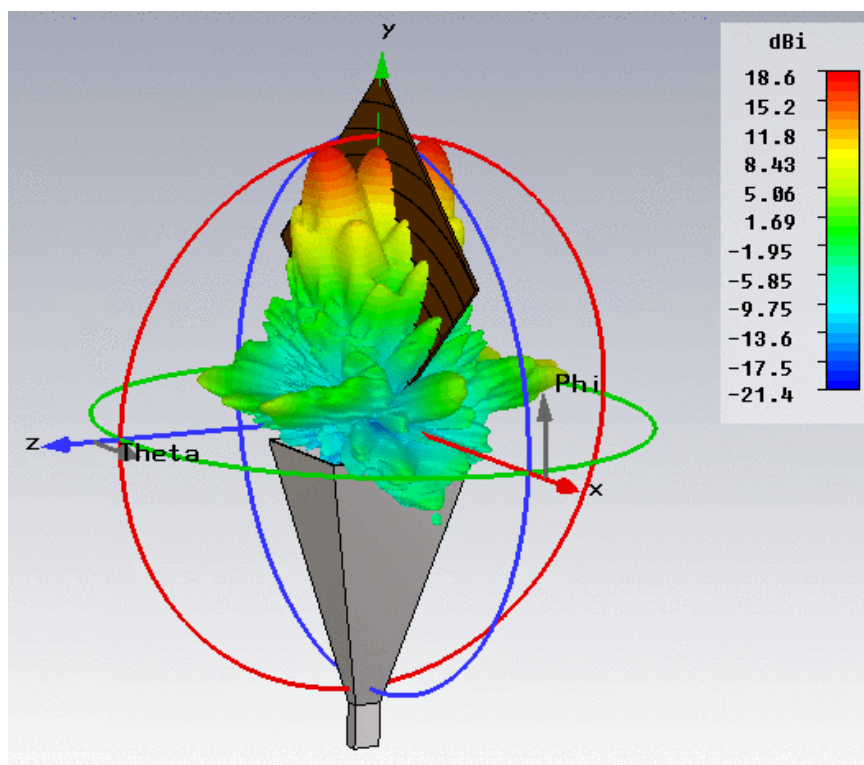
Obr. 3.12: Směrová charakteristika dvoudeskové antény, $\phi = 90^\circ$.



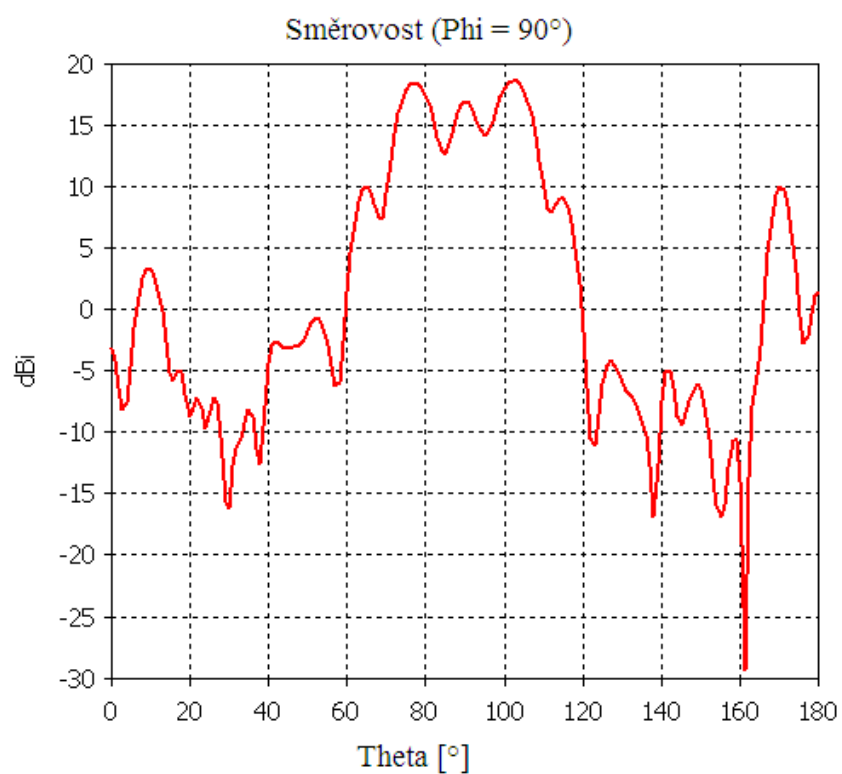
Obr. 3.13: Parametr S_{11} dvoudeskové holografické antény.

3.4 Anténa buzená trychtýřovou anténou

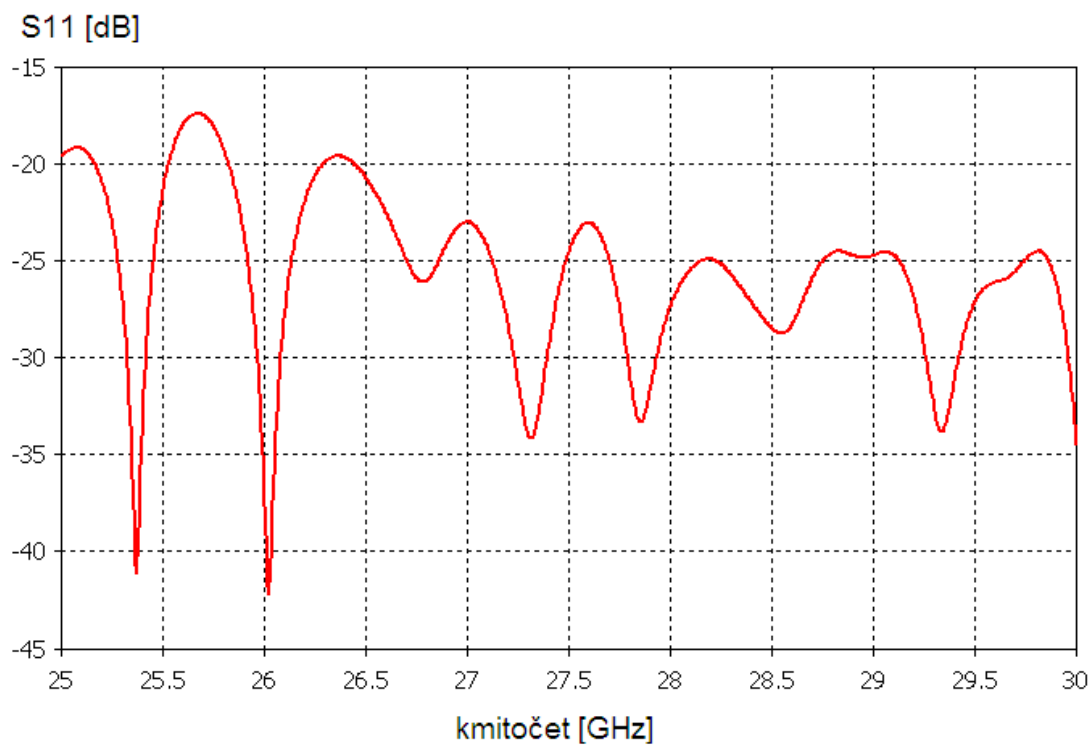
V tomto případě byla navržena trychtýřová anténa podle [8] na 26 GHz a použita jako budič jednovrstvé antény. Anténa byla umístěna rohem do středu roviny aper-tury a očekávala se větší účinnost vyzáření oproti vlnovodu. Výsledky (obr. 3.14, obr. 3.15) ovšem ukazují, že nastává poněkud roztráštěná difrakce, hodně energie prochází skrz motiv a část je také vyzářena mimo. Jelikož se modeluje struktura o velikosti několika vlnových délek, a pásek je poměrně tenký, může být výsledek způsoben řídkou diskretizační sítí právě na hranách pásků. Činitel odrazu je na obr. 3.16.



Obr. 3.14: Farfield charakteristika antény buzené trychtýřovou anténou.



Obr. 3.15: Směrová charakteristika antény buzené trychtýřovou anténou.

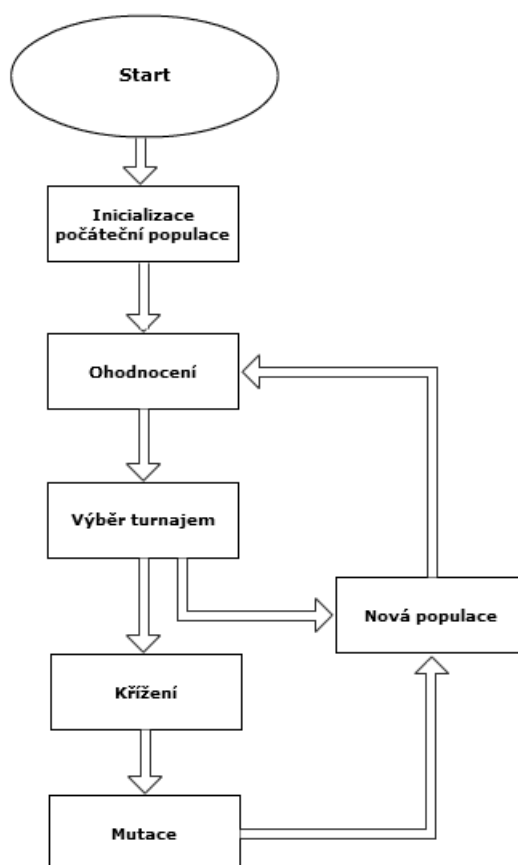


Obr. 3.16: Parametr S_{11} jednovrstvé antény buzené horn anténou.

4 OPTIMALIZACE MOTIVU

V souladu se zadáním diplomové práce jsem se pokusil pomocí optimalizačního algoritmu (genetický algoritmus - GA) navrhnout uspořádání motivu tak, aby byly splněny vstupní požadavky. Těmi byly kolmý směr vyzařování při maximálním zisku a jeho následné odklonění o 20° při zachování vyzařovací charakteristiky. GA byl psán v MATLABu, který poté ovládal CST Microwave Studio. Zaměřil jsem se na spojitou variantu algoritmu, kdy se pracuje přímo s hodnotami proměnných a okrajově také na jeho binární provedení.

Schéma algoritmu je na obr.4.1. Počáteční populace se skládá celkem z deseti jedinců. Pět jich je vygenerováno náhodně v rámci mezí a podmínek, aby se jednotlivé pásy nepřekrývaly, šestý jedinec je výchozí návrh a jeho mutace tvoří zbylé 4 jedince.



Obr. 4.1: Vývojový diagram genetického algoritmu.

4.1 Spojitá varianta

Při hledání požadovaného motivu jsem se zaměřil jednak na oboustranný motiv (13 pásků na obou stranách) a jednak na 2 verze jednostranného motivu (13 a 17 pásků). Algoritmus je tvořen dvěma hlavními skripty a několika pomocných funkcí, zakončen je pouze pevně stanoveným počtem generací (50 a 100) a to z důvodu časových náročností simulací a tedy ponechání „volného průběhu“ samotné optimalizaci.

4.1.1 Oboustranný motiv

V tomto případě uvažuji celkem 52 proměnných. V jedinci jsou tyto proměnné uloženy tak, že prvních 20 hodnot reprezentuje pozici deseti horních a deseti spodních pásků s hodnotami v intervalu $\langle 1,7;115 \rangle$ mm. Následujících 6 hodnot jsou 3 nejvzdálenější pásy na horní a spodní straně a mající rozmezí $\langle 1,7;45 \rangle$ mm. Zbýlých 26 proměnných jsou šířky jednotlivých pásků z intervalu $\langle 0,25;1,6 \rangle$ mm.

Při generování náhodných jedinců se uplatňují podmínky, které zajistí že pásek $n+1$ se nepřekryje s předchozím páskem n . Tím se vyloučí zbytečné geometrie tvořené několika pásy v sobě. Dále je začleněn původní návrh a poté aplikována mutace s různou pravděpodobností. Tak je vytvořena počáteční populace ve skriptu *GA* a lze přejít k hodnocení jedinců pomocí skriptu *solve*.

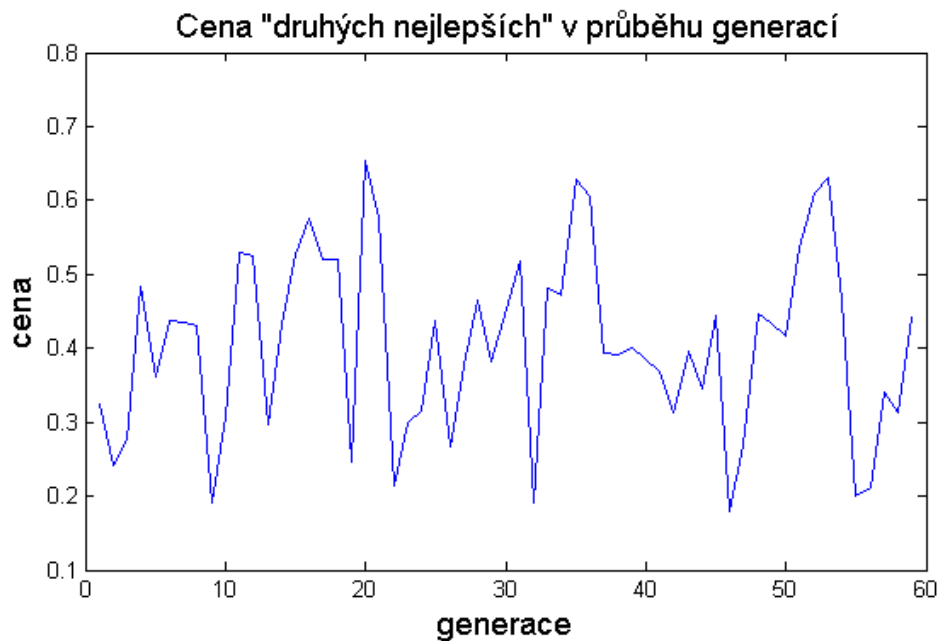
Solve inicializuje vytvoření Active X serveru, čímž vznikne spojení mezi MATLABem a CST MWS a lze tak odesílat příkazy na vytvoření modelu v CST. Poté je spuštěna simulace a sleduje se přizpůsobení (činitel odrazu S_{11}) v absolutní míře, maximální hodnota směrovosti a úhel hlavního laloku v rovině $\phi = 90^\circ$, vše na kmitočtu 23 GHz. Jedinec je poté ohodnocen podle vztahu

$$cost = \sqrt{Z^2 + A^2 + D^2}, \quad (4.1)$$

kde Z je činitel odrazu (v rozsahu 0-1), A je úhel hlavního laloku stanovený s ohledem na požadovaný odklon 20° (v rozsahu 0-1) a D je směrovost (také v rozsahu 0-1).

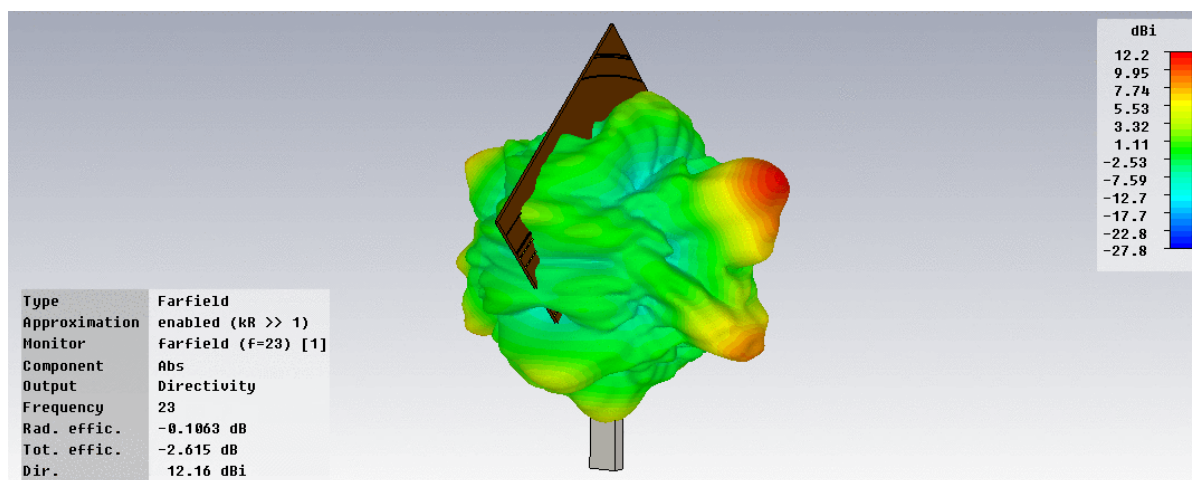
Jedinci (chromozomy) jsou poté seřazeni podle své ceny, následuje náhodný výběr dvou jedinců a lepší z nich (s menší cenou) je rodičem. Vybírají se 3 páry rodičů a křížením vzniká 6 potomků. Dohromady, spolu s nejlepším jedincem z předchozí generace, je každá nová populace tvořena třinácti chromozomy. Nakonec následuje mutace s pravděpodobností 0,36.

Optimalizace byla nastavena na 100 generací, avšak z důvodu výpadku programu CST byla ukončena po 59. generaci, což znamená simulaci 764 jedinců. Za celou dobu nebyl překonán výchozí, nejlépe hodnocený návrh, vývoj „druhých nejlepších“ je na obr. 4.2.



Obr. 4.2: Průběh druhých jedinců během generací.

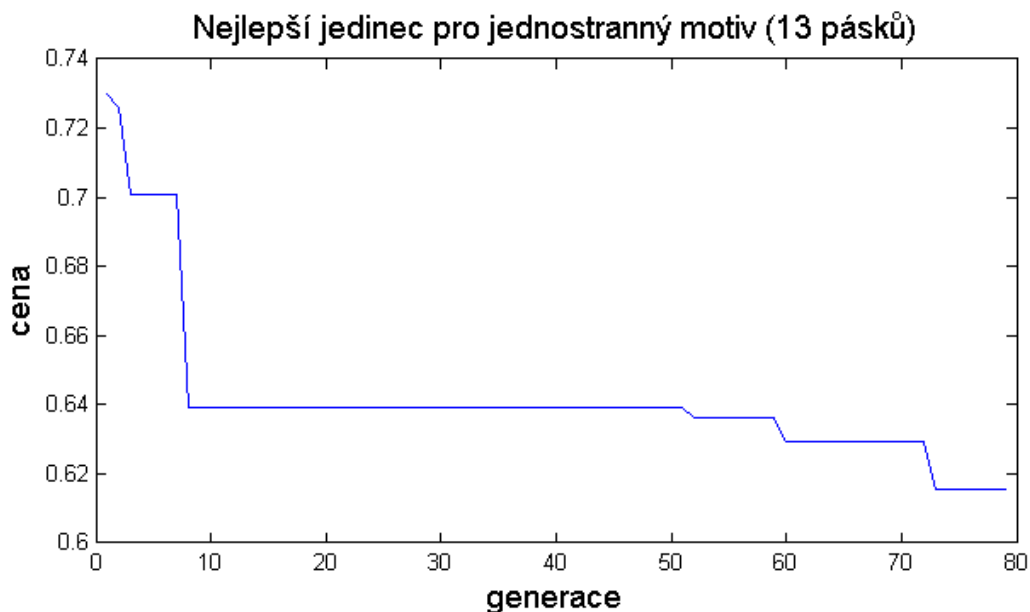
Je zřejmé, že proces osciluje a není schopen postupně snižovat cenu nejlepších. Důvod je zřejmý z obr. 4.3. Jedná se o jedince z 57. generace, který má sice úhel hlavního laloku 21° , ale jeho přizpůsobení a směrovost jsou natolik špatné, že je v pořadí až šestý. Nadto je vidět, že dochází k tříštění na více laloků pod různými směry, což algoritmus nedokáže zohlednit.



Obr. 4.3: Farfield charakteristika 6. jedince 57. generace.

4.1.2 Jednostranný motiv - 13 pásků

Stejný postup optimalizace byl aplikován také na jednostrannou anténu o třinácti páskách s tím rozdílem, že šířky pásků byly v rozsahu $<0,25;0,9>$ mm. Dále pak nebyl začleněn původní model. Ze sta nastavených generací jich proběhlo 79 (tj. 1024 jedinců), protože program CST opět nečekaně skončil. Průběh ceny nejlepšího jedince je na obr. 4.4.

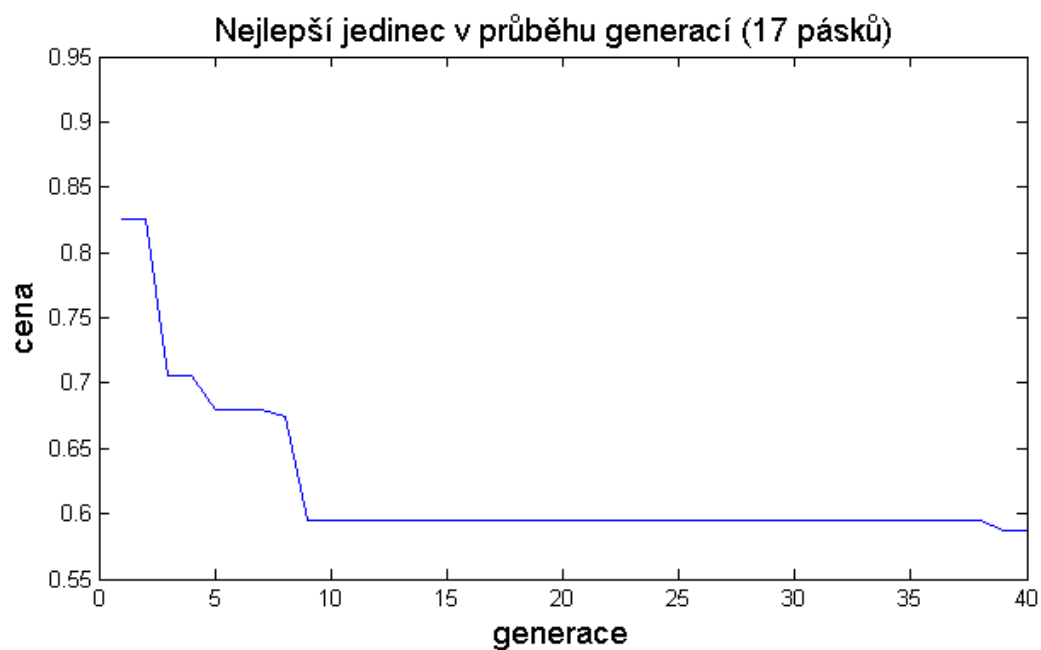


Obr. 4.4: Jedinec s nejnižší cenou v průběhu generací.

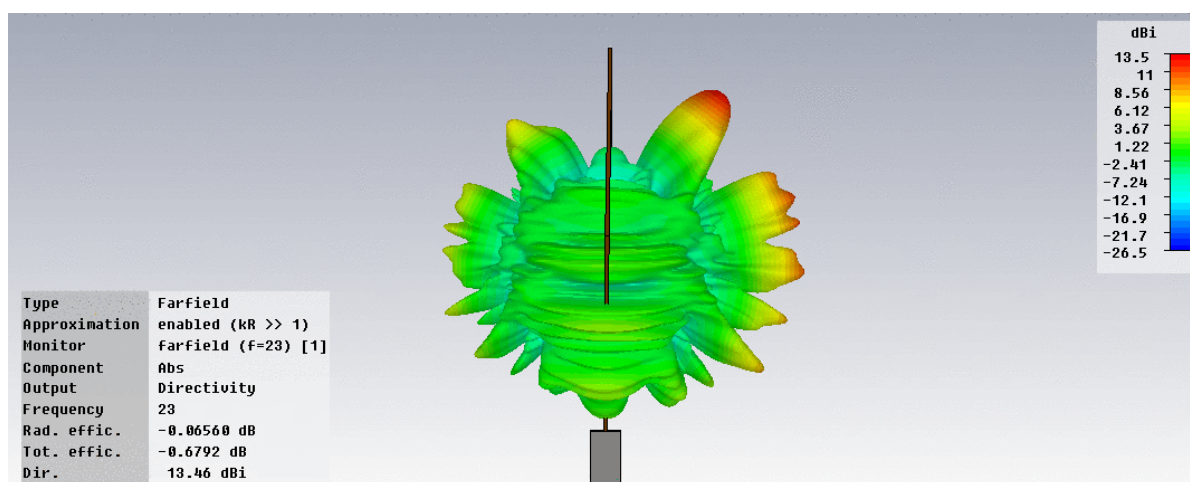
Směrová charakteristika byla opět roztržštěná, výsledný hlavní lalok má úhel 120° a jeho zisk činí 13,46 dB.

4.1.3 Jednostranný motiv - 17 pásků

V případě použití 17ti pásků proběhlo 40 generací (517 jedinců) optimalizačního procesu a průběžná cena nejlepšího jedince spolu s jeho směrovou charakteristikou jsou na obr. 4.5 a obr. 4.6.



Obr. 4.5: Jedinec s nejnižší cenou v průběhu generací pro 17 pásků.



Obr. 4.6: Farfield charakteristika 1. jedince 40. generace.

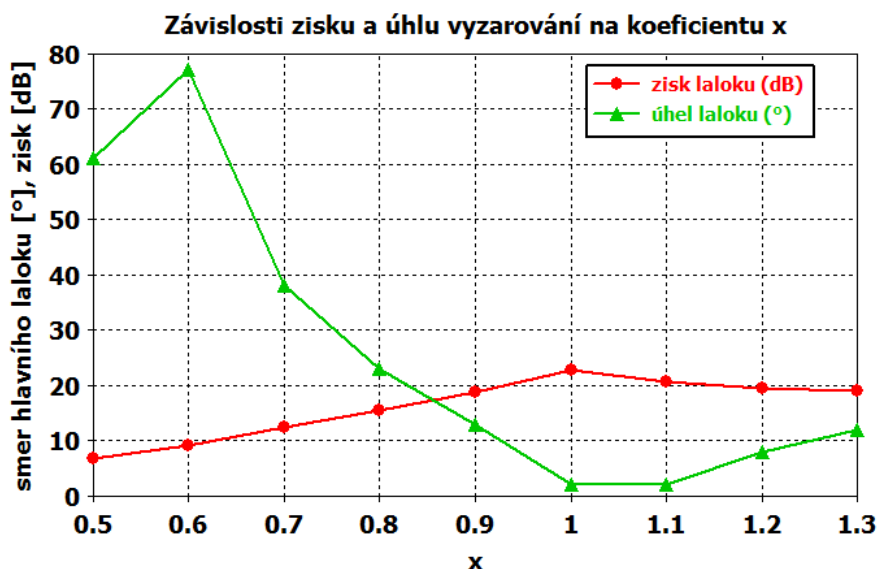
4.2 Binární varianta

Dále bylo zamýšleno vyzkoušet genetický algoritmus s kódováním do binární formy. Především z časových důvodů (běhy spojitě varianty algoritmu) však nebyla tato verze testována hlouběji. Prvním deseti páskům horní a apodní strany je přiřazeno 11 bitů, posledním třem 9 bitů a šířkám pásků se přiřazuje 5 bitů, celkem má jedinec tedy $20 \times 11 + 6 \times 9 + 26 \times 5 = 404$ bitů. Součástí prvotní populace je původní návrh avšak není implementováno ošetření, které by zabránilo překrývání pásků při generování náhodných jedinců. Binární forma se převádí do Grayova kódu, ve kterém se pak provádí křížení a mutace.

5 DEFORMACE A ZMĚNY HOLOGRAMU

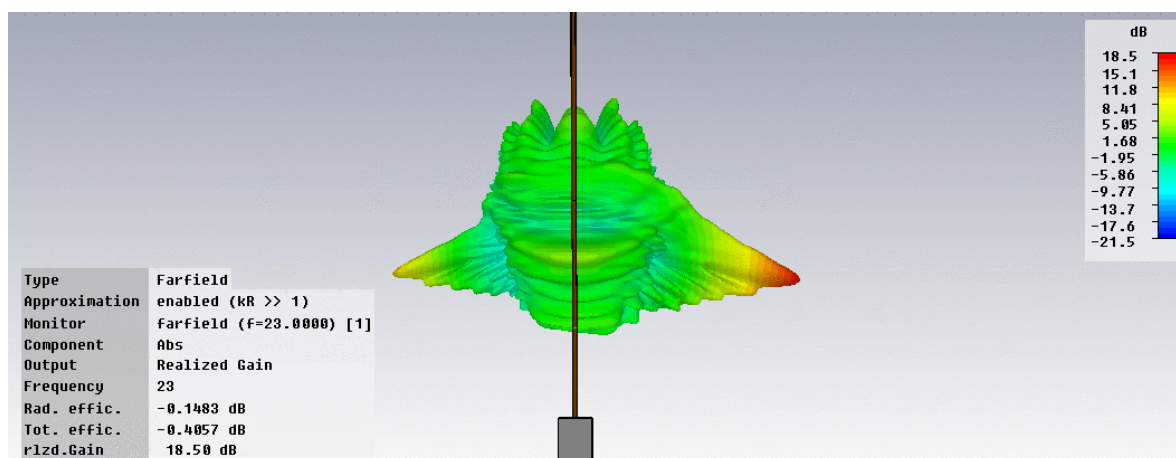
5.1 Parametrická analýza

Jelikož optimalizační algoritmus nevedl k žádané změně vyzařovací charakteristiky, byla použita parametrická analýza. Koeficientem x byla násobena vzájemná vzdálenost jednotlivých pásků, kdy x nabývalo hodnot 0,5 až 1,3 při kroku 0,1. Úhly hlavního laloku a jejich zisk v závislosti na parametru x pro kmitočet 23 GHz jsou v grafu na obr. 5.1.

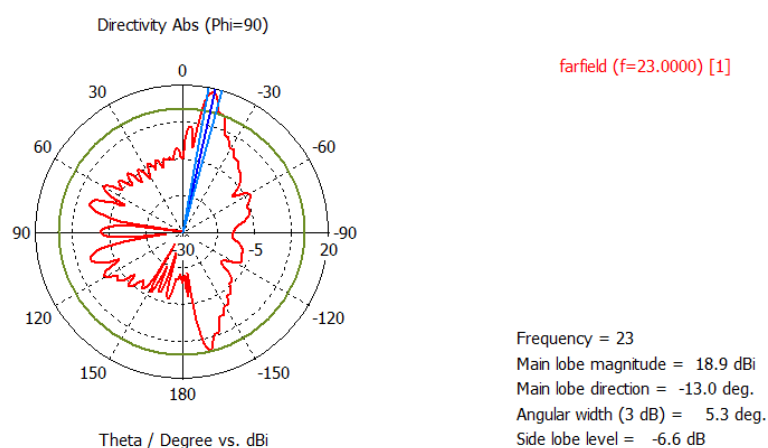


Obr. 5.1: Směr vyzařování a úroveň hlavního laloku v závislosti na koeficientu x .

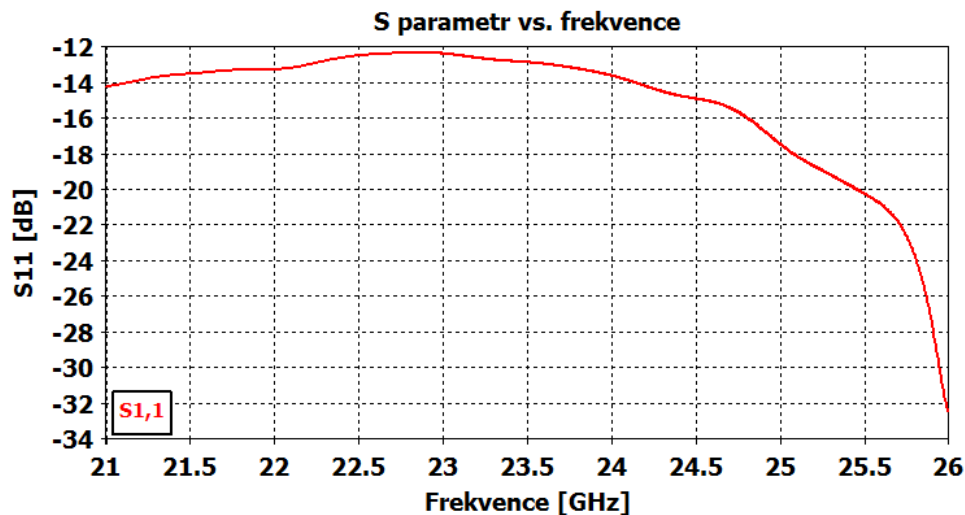
Nejlépe vychází hologram násobený koeficientem 0,9. Dostane se tak na kmitočtu 23 GHz vyzařování pod úhlem 11° i když s ne příliš úzkým lalokem. Jeho 3D charakteristika, polární graf a přizpůsobení jsou na obr. 5.2, obr. 5.3 a obr. ??.



Obr. 5.2: Pohled ze strany na 3D farfield charakteristiku antény s motivem vynásobeným koef. 0,9.



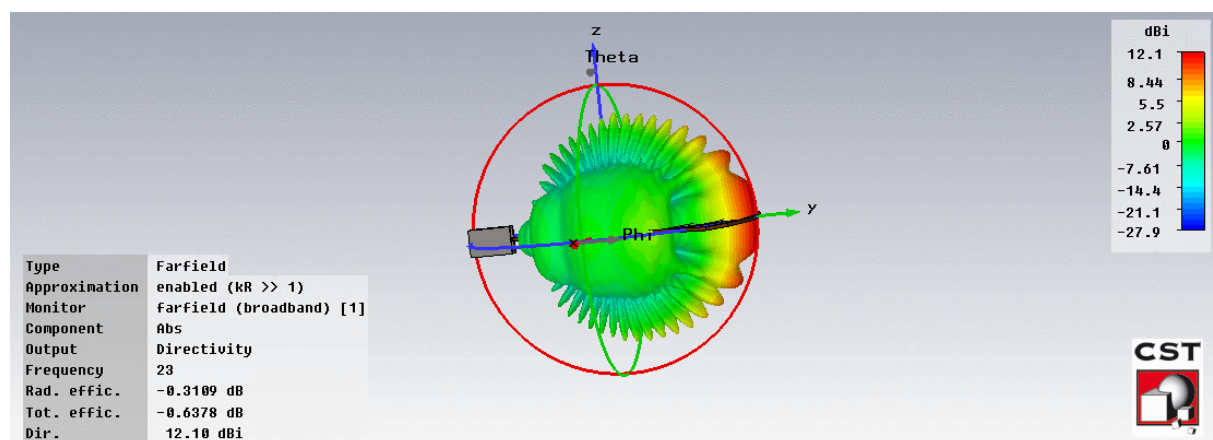
Obr. 5.3: Řez rovinou $\phi = 90^\circ$ antény s motivem vynásobeným koef. 0,9.



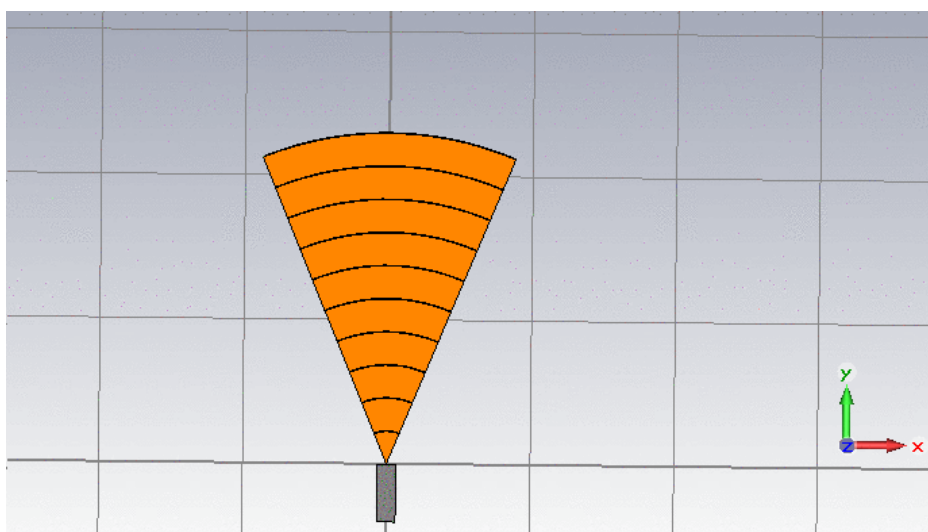
Obr. 5.4: Činitel odrazu S_{11} antény s motivem vynásobeným koef. 0,9.

5.2 Ořezání hologramu

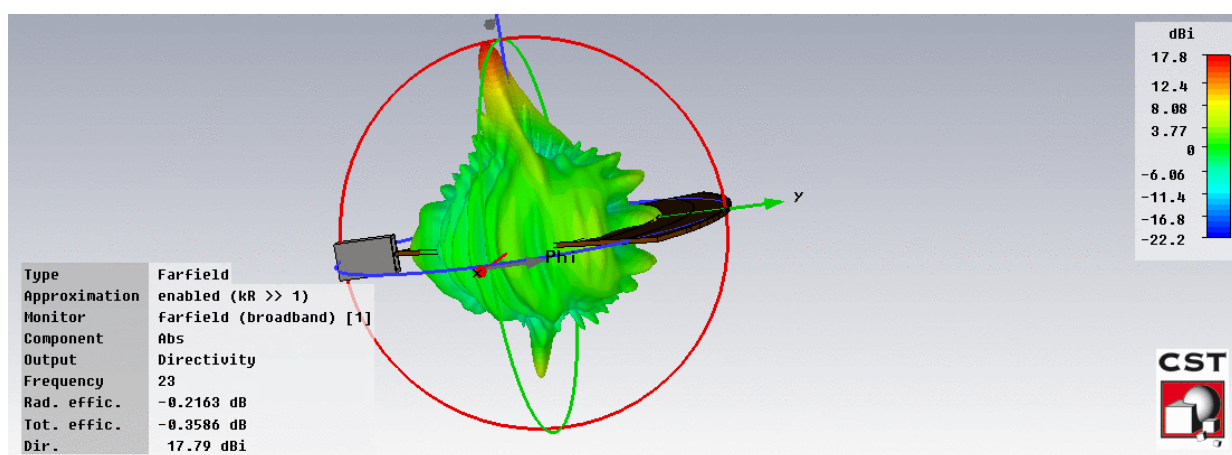
Při hledání, jak urychlit simulaci genetického algoritmu ubráním buněk sítě, byla testována možnost ořezání motivu. To sice vedlo k menšímu počtu buněk a rychlejší simulaci, zároveň však došlo k deformaci proužků a staly se z nich lomené čáry, takže přestaly mít podobu kruhových částí. To mělo za následek směrovou charakteristiku na obr. 5.5. Navýšením počtu segmentů na proužek (obr. 5.6) se na jednu stranu podařilo zajistit správný tvar vyzařovací charakteristiky (obr. 5.7), ale na druhou stranu se opět zvýšil počet buněk. Podobně jako u optického hologramu, dochází ořezáním ke zmenšení rozlišovací schopnosti, charakteristika je méně přesná a anténa má menší zisk.



Obr. 5.5: Deformace vyzařování vlivem lomených čar pásků.



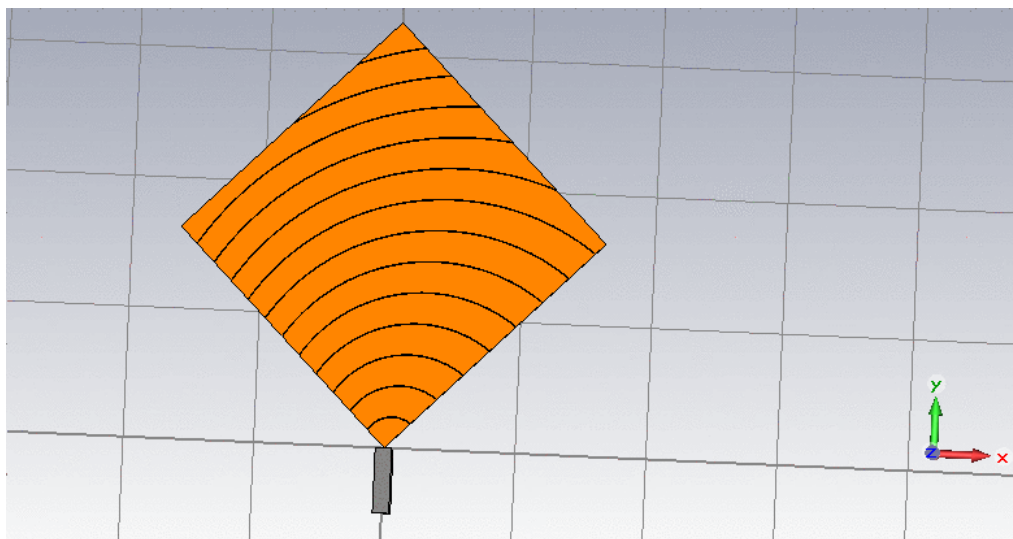
Obr. 5.6: Model oboustranné antény s větším počtem buněk na pásek.



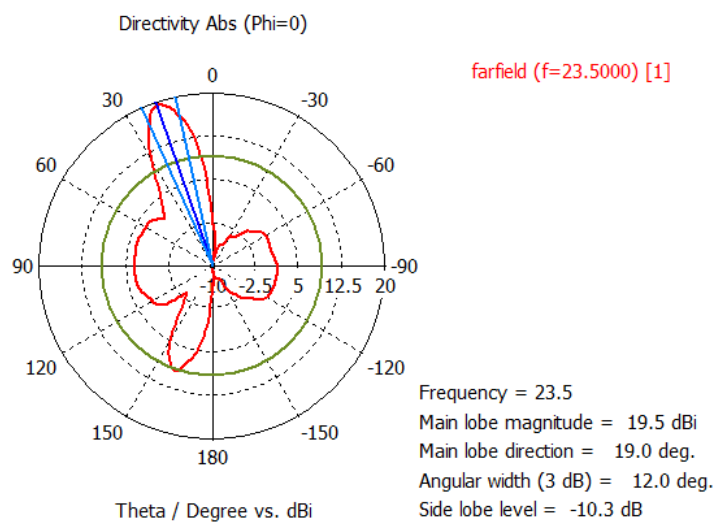
Obr. 5.7: „Návrat“ k původní charakteristice přidáním 30ti segmentů na pásek.

5.3 Otočení hologramu

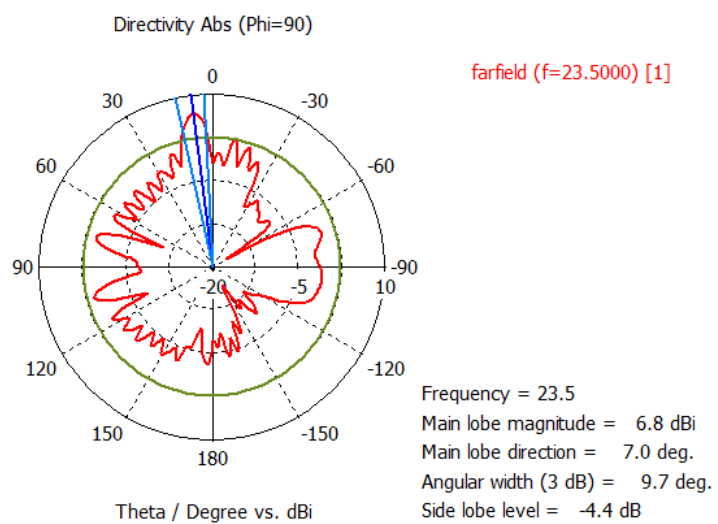
Zajímavého výsledku bylo dosaženo změnou úhlu mřížkového vektoru. Jestliže úhel svíraný vlnovým vektorem přicházejícím z vlnovodu a mřížkovým vektorem motivu je nulový, je i nulový odklon záření hlavního laloku. Lze se tedy domnívat, že se změnou svíraného úhlu dojde i ke změně ve vyzařování. A skutečně - otočením každého pásku o 20° kolem vlastní středové osy (ne kolem počátku soustavy souřadnic - roh substrátu) došlo k odklonu záření v rovině $\phi = 0^\circ$ o 20° . Ukázka takového motivu, jeho směrové charakteristiky a činitel odrazu jsou na obr. 5.8, obr. 5.9, obr. 5.10, obr. 5.11 a obr. 5.12.



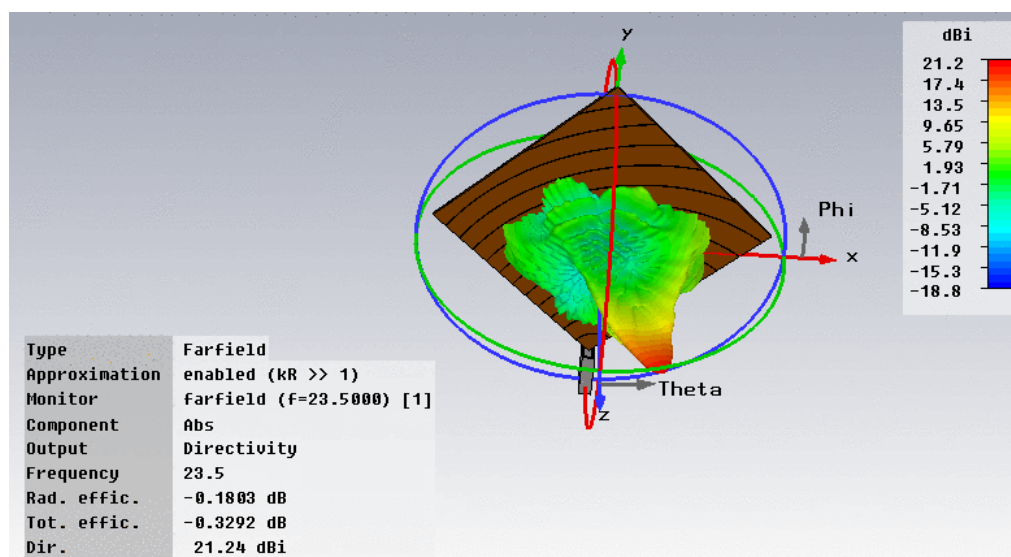
Obr. 5.8: Model oboustranné antény po natočení každého pásku o 20° .



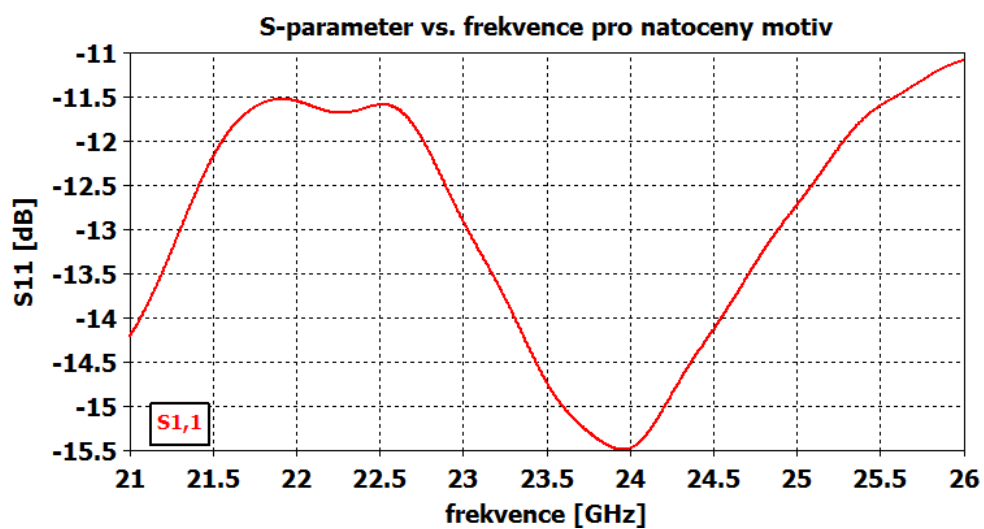
Obr. 5.9: Řez rovinou $\phi = 0^\circ$.



Obr. 5.10: Řez rovinou $\phi = 90^\circ$.



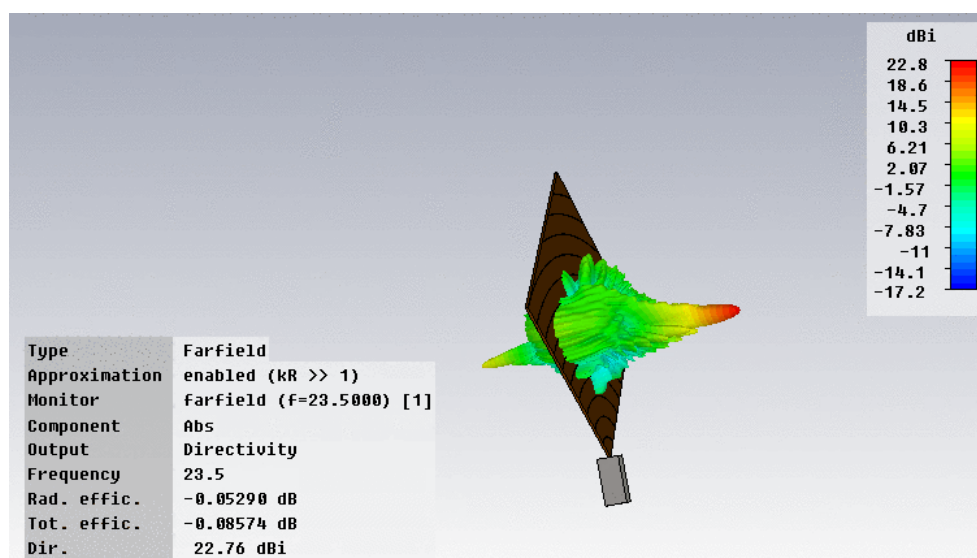
Obr. 5.11: 3D charakteristika modelu s natočeným motivem.



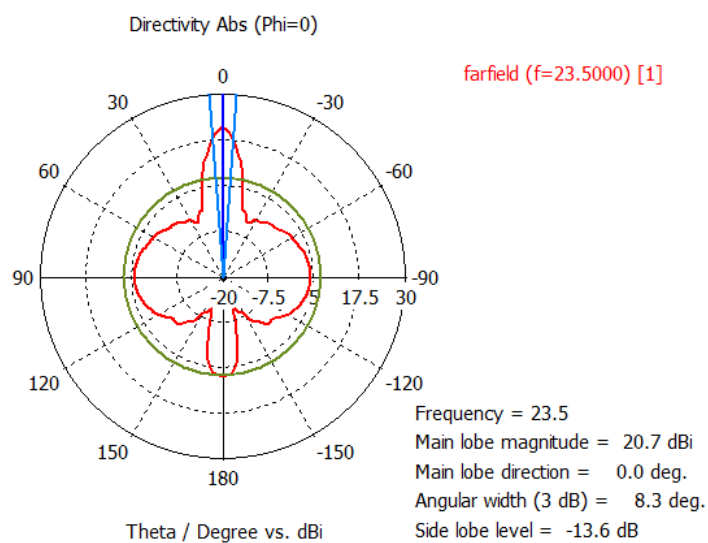
Obr. 5.12: Činitel odrazu pro anténu s natočeným motivem.

6 KONSTRUKCE

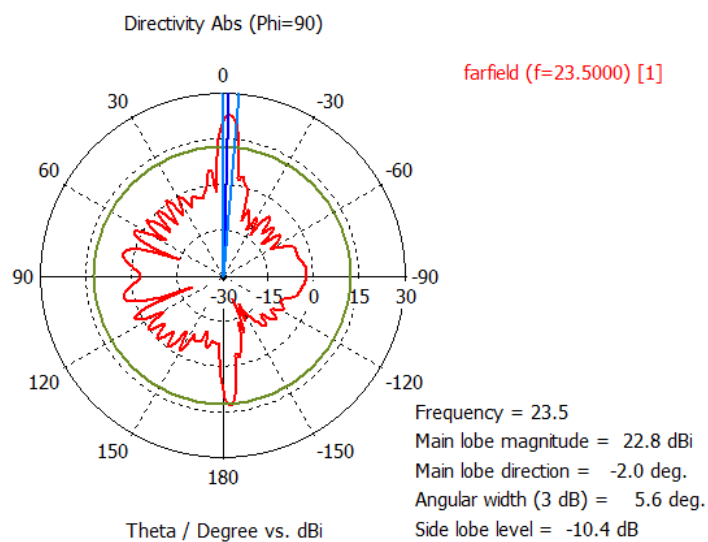
Pro konstrukční řešení byly vybrány 3 typy antén. První je upravený původní návrh pro 26 GHz. Ačkoliv byly pásy navrženy právě pro kmitočet 26 GHz, ze simulací je vidět, že dochází ke zkrácení vlnové délky (pravděpodobně vlivem vniku do substrátu). Proto se jako ideálnější kmitočet jeví 23,5 GHz a tomu odpovídá i posun spodní strany motivu, z původních $\lambda/4$ (2,875 mm) na nových $\lambda_k/4$ (3,2 mm). To vede k lepší směrovým charakteristikám (obr. 6.1, obr. 6.2, obr. 6.3) a posunu přizpůsobení (obr. 6.4). Druhou zvolenou anténou k výrobě je varianta z parametrické analýzy s koeficientem násobení $\times 0,9$ a třetí je anténa s natočeným motivem o 20° .



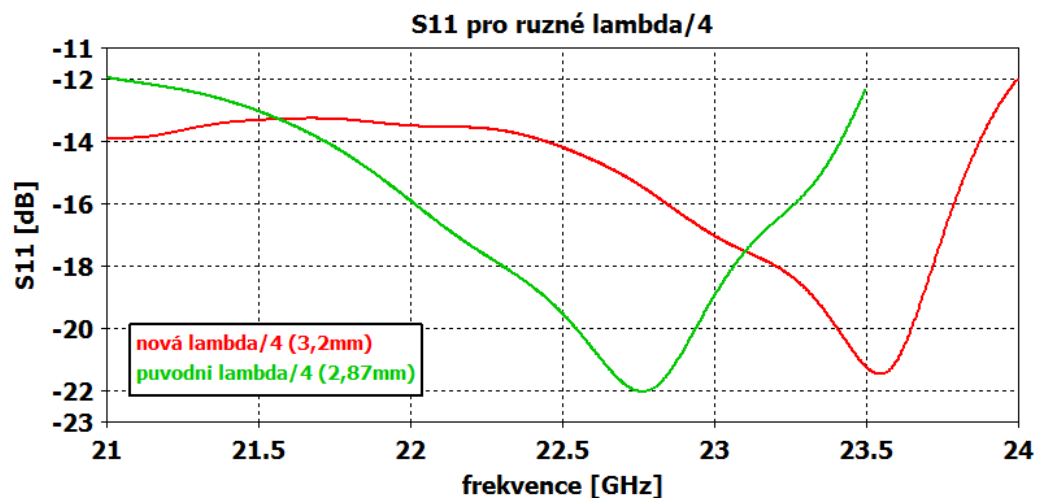
Obr. 6.1: Činitel odrazu pro anténu s natočeným motivem.



Obr. 6.2: Činitel odrazu pro anténu s natočeným motivem.



Obr. 6.3: Činitel odrazu pro anténu s natočeným motivem.



Obr. 6.4: Srovnání činitele odrazu pro původní a novou $\lambda/4$.

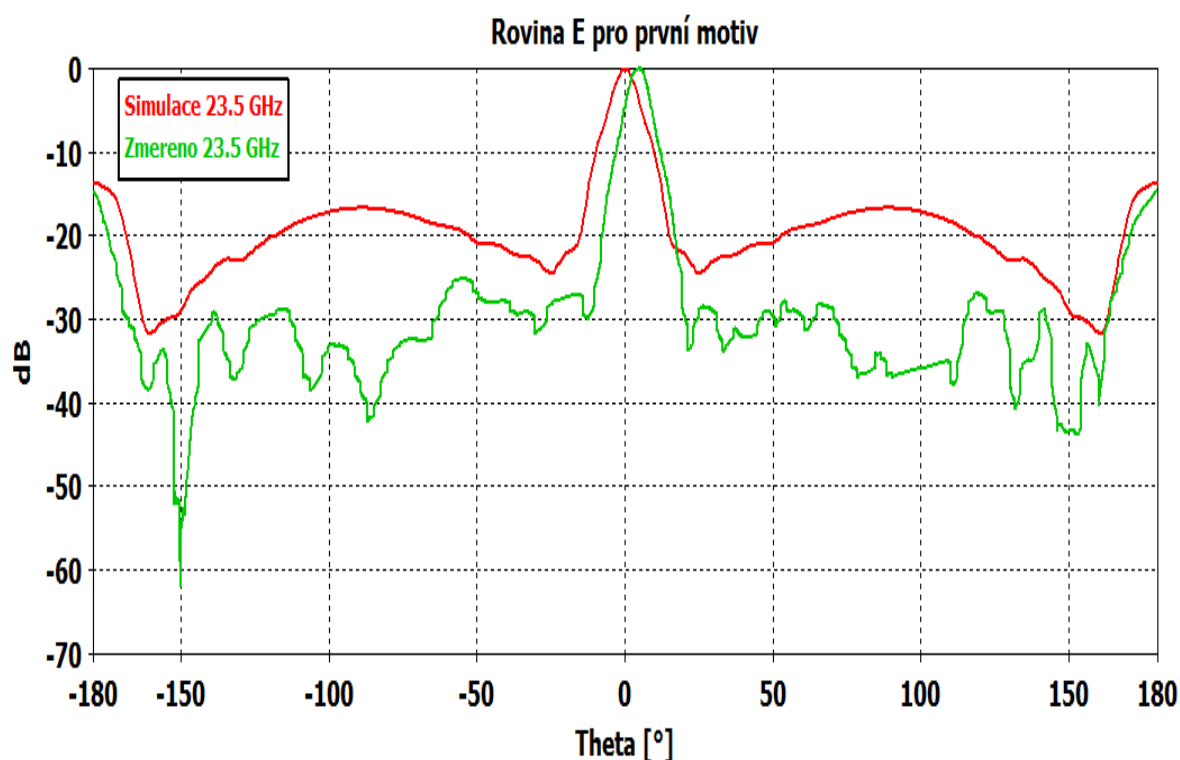
7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Měření bylo provedeno v bezodrazové komoře v kasárnách Univerzity obrany v Brně na kmitočtu 23,5 GHz a při vstupním výkonu 18 dBm. Je třeba zmínit, že absorbery jsou v komoře položeny na zemi a vystaveny chůzi obsluhy, takže mají pravděpodobně nižší obsah uhlíku a horší pohlcovací vlastnosti. Dále pak vzhledem k volným kusům absorberů nebylo pokrytí kovové „točny“ nesoucí anténu s generátorem úplné.

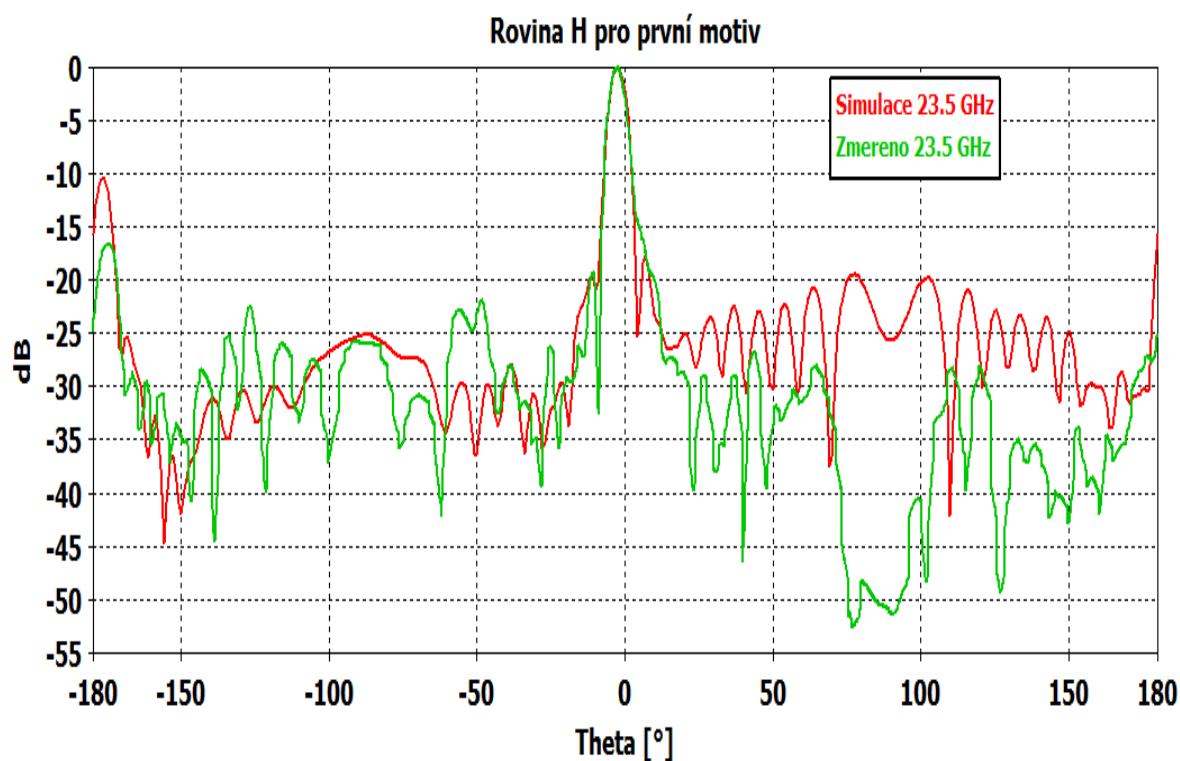
Rovinou E se rozumí $\phi = 0^\circ$, rovina H je $\phi = 90^\circ$.

7.1 Anténa s kolmým vyzařováním

Výsledek měření pro anténu s prvním motivem (kolmé záření) je na obr. 7.1 a obr. 7.2. V grafu (a v dalších taktéž) je pro porovnání uvedena i simulace z CST Microwave Studio na kmitočtu 23.5 GHz.



Obr. 7.1: Závislost normovaného zisku na úhlu theta pro rovinu intenzity el. pole.

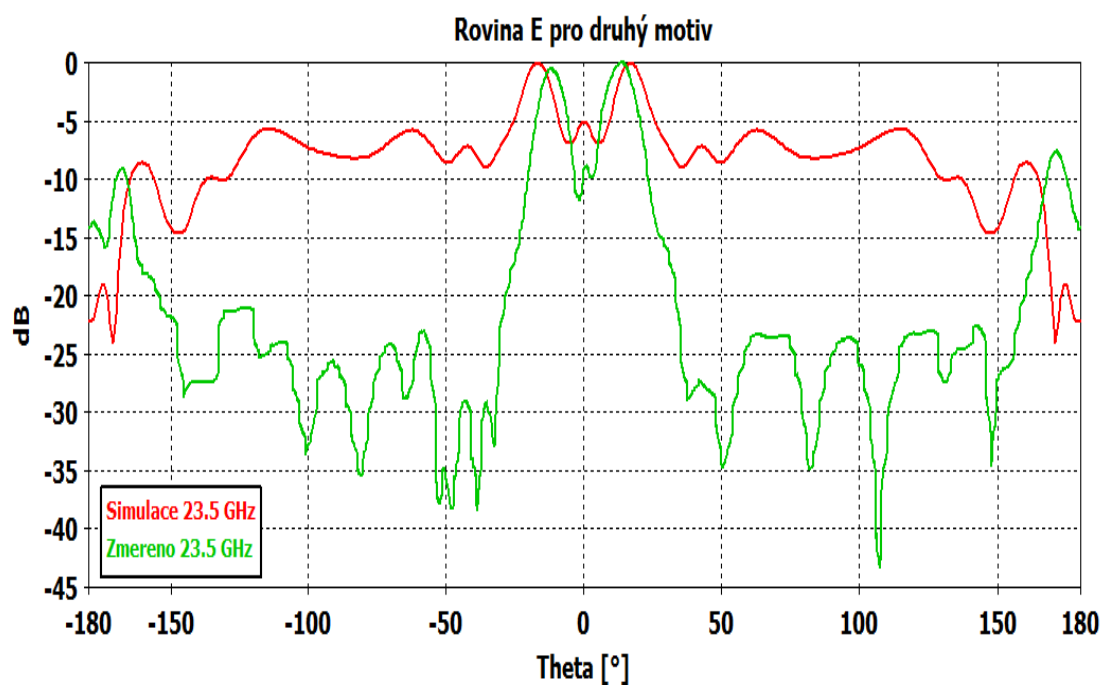


Obr. 7.2: Závislost normovaného zisku na úhlu theta pro rovinu intenzity mag. pole.

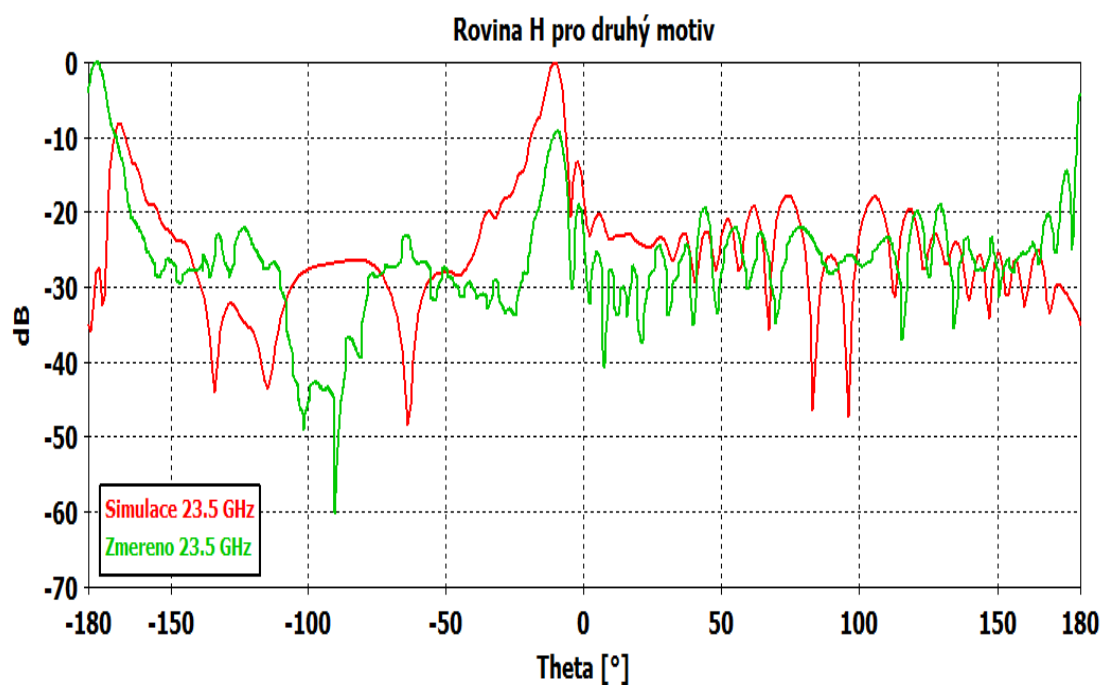
Výsledek ukazuje, že vyrobená anténa v rovině E nezáří kolmo (pod 0°), ale pod úhlem cca 5° , zatímco v rovině H se hlavní laloky v podstatě překrývají. Tuto odchylku mohla způsobit nepřesná poloha vlnovodu vůči anténě.

7.2 Anténa s vyzařováním pod úhlem 11°

Anténa s druhým motivem měla podle simulace vyzařovat pod úhlem 11° v rovině $\phi = 90^\circ$. Tvar směrových charakteristik měřeného modelu je velmi obdobný tvarům ze simulace (obr. 7.3 a obr. 7.4). Řez rovinou H naznačuje, že anténa sice vyzařuje jedním lalokem pod úhlem deseti stupňů, nicméně hlavní lalok je v tomto případě na druhé straně a září přibližně 3 stupně od kolmého směru. Prohození laloků způsobilo patrně opět nepřesné ozáření antény vlnovodem.



Obr. 7.3: Závislost normovaného zisku na úhlu theta pro rovinu intenzity el. pole.

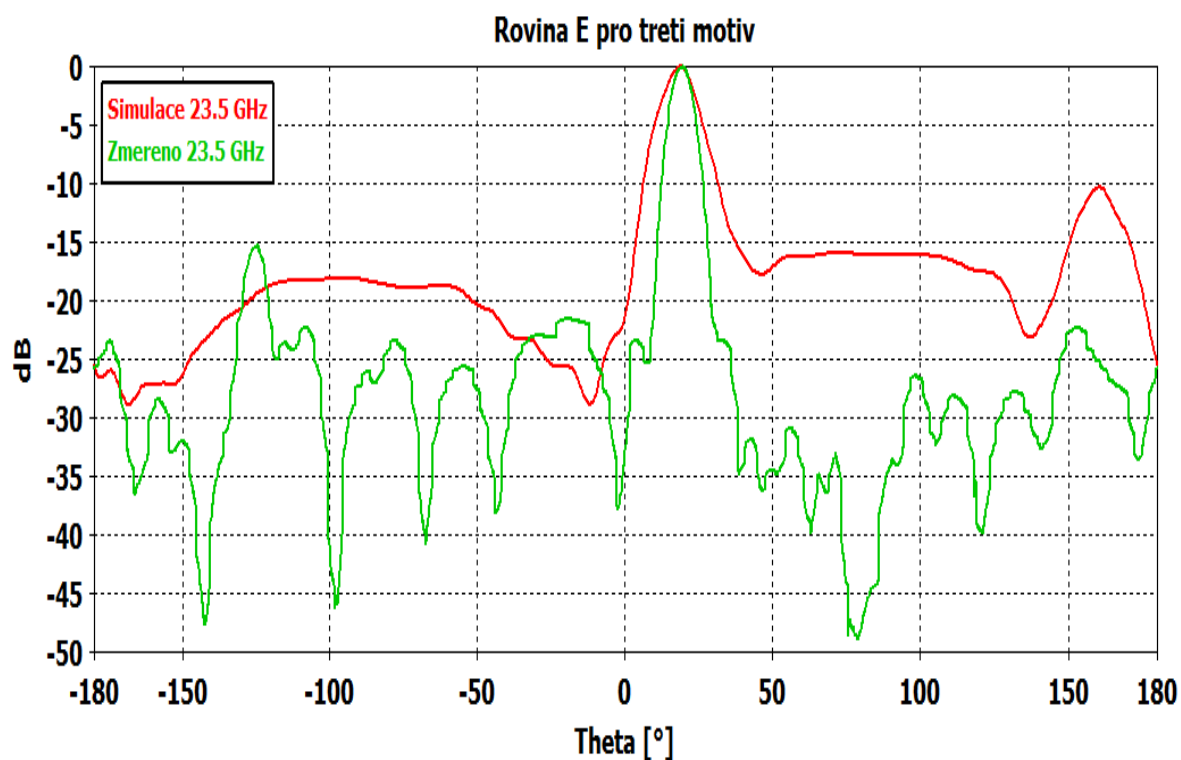


Obr. 7.4: Závislost normovaného zisku na úhlu theta pro rovinu intenzity mag. pole.

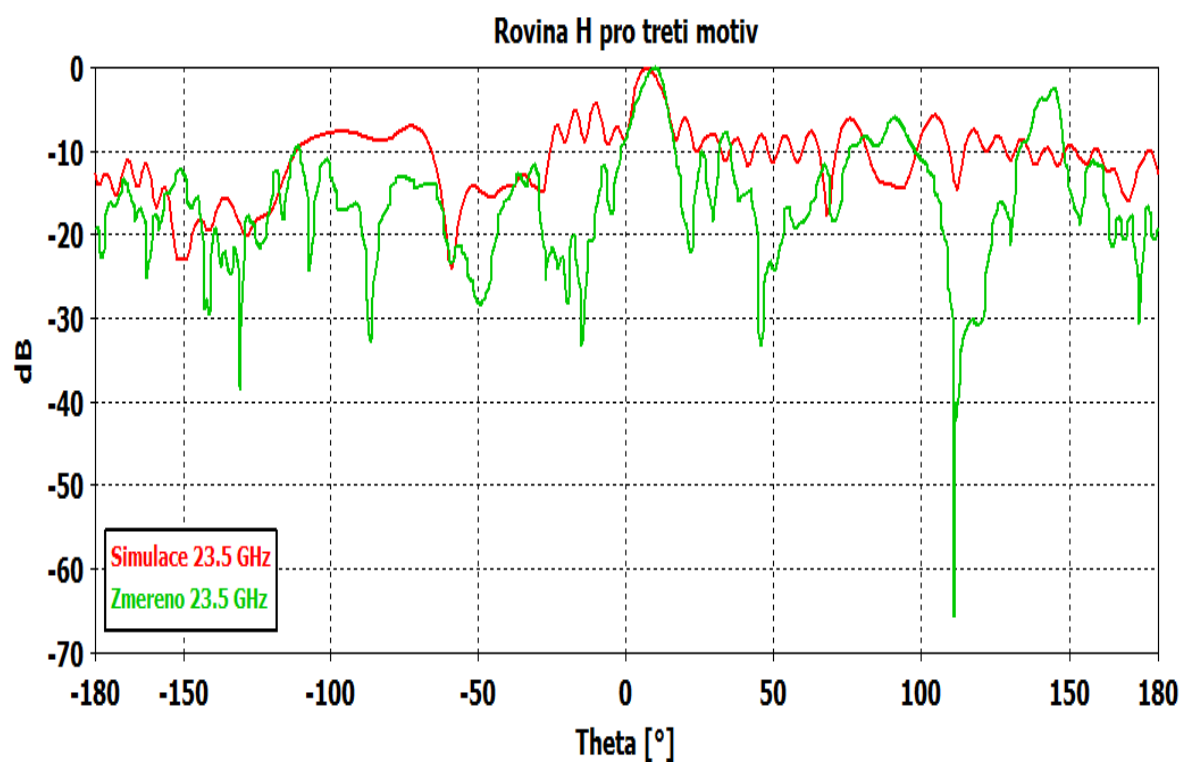
7.3 Anténa s vyzařováním pod úhlem 20°

Třetí motiv byl navržen tak, aby anténa v rovině $\phi = 0^\circ$ zářila 20° od kolmého směru. Výsledky ukazují (obr. 7.5 a obr. 7.6), že hlavní lalok skutečně září v daném směru (přesněji pod úhlem 19°) a navíc je šířka hlavního laloku menší, takže anténa je více směrová, než předpokládala simulace.

U prvního a druhého motivu měření také ukázalo, že v rovině E mají zhotovené modely větší odstup úrovně hlavního laloku vůči postranním.



Obr. 7.5: Závislost normovaného zisku na úhlu theta pro rovinu E.



Obr. 7.6: Závislost normovaného zisku na úhlu theta pro rovinu H.

8 ZÁVĚR

V práci jsem se věnoval problematice mikrovlnné holografie, rozebral jsem experimentální záznam hologramu a nastínil způsob vytvoření počítačově generovaného hologramu. Dále jsem uvedl a podrobněji popsal některé typy holografických antén, které jsem namodeloval a odsimuloval. Poté jsem přistoupil k provedení různých změn motivu (deformace, ořezání, otočení) a sledoval vliv na směrové charakteristiky. Vyzkoušena byla také optimalizace genetickým algoritmem, avšak výsledky během optimalizace vykazovaly poměrně komplikovanější tvary směrových charakteristik než se předpokládalo (roztříštěnost, náběh k paprskovitému vyzařování ve velkém počtu směrů) a algoritmus by musel pravděpodobně zohlednit více údajů z charakteristiky, než jen pouze hodnotu maxima a jeho úhel. Je třeba mít na zřeteli také časovou náročnost optimalizačního procesu, jelikož se jedná o simulaci na vysokém kmitočtu a pro přesnější výsledky je zapotřebí většího počtu buněk sítě.

I přes tento neúspěch byly vybrány 3 modely pro praktické řešení. První vznikl úpravou posunu spodní strany motivu s ohledem na kmitočet 23,5 GHz, druhý vzešel z analýzy pro různou hustotu proužků a třetí z úvahy o vzájemné pozici vlnového vektoru vlnoplochy a mřížkového vektoru motivu. Výsledky měření z bezodrazové komory Univerzity obrany ukazují, že tvar charakteristik se příliš neliší od simulovaných s výjimkou druhého modelu, kde došlo k prohození stran hlavního a zadního laloku. Možnosti přesného nastavení byly omezené a např. pnutí přírodního koaxiálního kabelu působilo proti vlnovodu a ten nebyl přesně v kolmém směru vzhledem k anténě. Na druhou stranu výsledky ukazují lepší odstup hlavního laloku od postranních a v případě třetí antény se dosáhlo užšího vyzařování než se předpokládalo ze simulace.

LITERATURA

- [1] CHECCACCI, P.F., RUSSO, V., SCHEGGI, A.M. Holographic antennas. *Proceedings of the IEEE*, 1968, vol. 56, no. 12, p. 2165-2167.
- [2] CHECCACCI, P.F., RUSSO, V., SCHEGGI, A.M. Holographic antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1970, vol. 18, no. 6, p. 811-813.
- [3] JANNE, S. et al. Holograms for shaping radio-wave fields. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, vol. 4, no. 5, p. 161-167.
- [4] GOODMAN, J.W. *Introduction to Fourier Optics*. 2nd ed. New York : The McGraw-Hill Companies Inc., 1996. 441 s. ISBN 0-07-024254-2.
- [5] IIZUKA, K., MIZUSAWA, M., URASAKI, S., USHIGOME, H. Volume-type holographic antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1975, vol. 23, no. 6, p. 807-810.
- [6] LEVIS, K., ITTIPIBOON, A., PETOSA, A., ROY, L., BERINI, P. Ka-band dipole holographic antennas. *IEEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, 2001, vol. 148, no. 2, p. 129-132.
- [7] ELSHERBINY, M., FATHY, A.E., ROSEN, A., AYERS, G., PERLOW, S.M. Holographic antenna concept, analysis, and parameters. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, vol. 52, no. 3, p. 830-839.
- [8] BALANIS, Constantine A. *Modern antenna handbook*. Hoboken : John Wiley & Sons Inc., 2008. 1680 s. ISBN 978-0-470-03634-1.
- [9] HAUPT, Randy L., HAUPT, Sue E. *Practical genetic algorithms*. Hoboken : John Wiley & Sons Inc., 1998. 177 s. ISBN 978-0-471-18873-5.
- [10] HAUPT, Randy L., WERNER, Douglas H. *Genetic algorithms in electromagnetics*. Hoboken : John Wiley & Sons Inc., 2007. 318 s. ISBN 978-0-471-48889-7.
- [11] MORAVEC, Petr *Toolbox pro spolupráci MATLABu s externími simulačními programy*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008. 76 s.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

λ vlnová délka

$\vec{k}$ vlnový vektor

$\vec{E}$ intenzita elektrického pole

f kmitočet

S_{11} činitel odrazu

SEZNAM PŘÍLOH

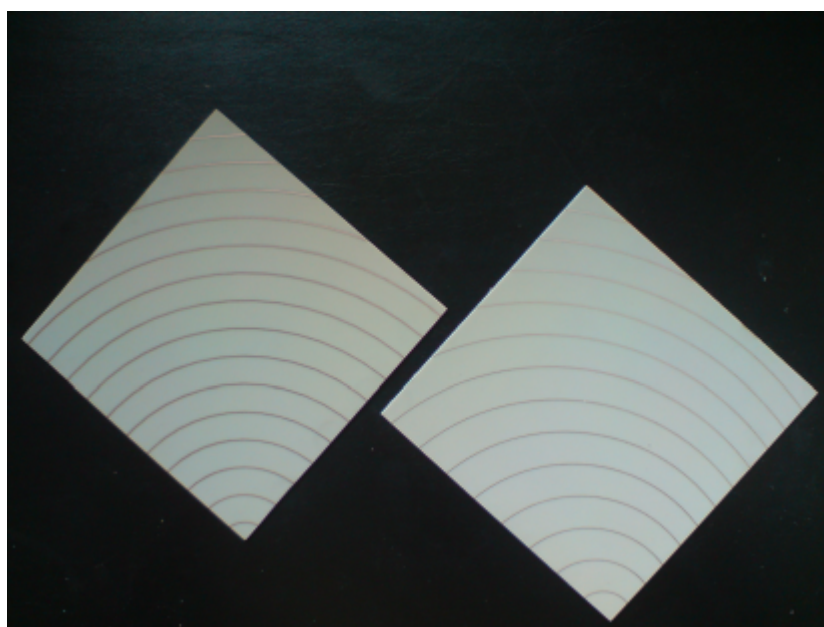
A Příloha

57

A PŘÍLOHA



Obr. A.1: První anténa zasazená do rámu pro měření.



Obr. A.2: Další dvě antény, napravo s otočeným motivem o 20° , vlevo motiv po vynásobení koeficientem 0,9.