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

ŠIROKOPÁSMOVÉ PLANÁRNÍ ANTÉNY

WIDEBAND PLANAR ANTENNAS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER´S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. VOJTĚCH ŠPATENKA

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. DAVID WOLANSKÝ

SUPERVISOR

BRNO 2012

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student:	Bc. Vojtěch Špatenka	***ID:***	106814
Ročník:	2	***Akademický rok:***	2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Širokopásmové planární antény

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Rozeberte problematiku širokopásmových planárních antén. Definujte možné konstrukční prvky pro rozšíření pásma antény. Ve zvoleném programu nasimulujte vybraný typ širokopásmové planární antény.

Pro zvětšení zisku antény implementujte anténu do anténní řady 2x2. Pro tento účel navrhněte vhodnou napájecí sít.

Kompletní anténu optimalizujte podle kritérií zadaných vedoucím práce. Optimalizovanou anténu vyrobte a experimentálně ověřte její vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BHARTIA, P., BAHL, I., GARG, R., ITTIPIBOON, A. Microstrip Antenna Design Handbook. Norwood: Artech House, 2001.

[2] POZAR, D. M., SCHAUBERT D. H. Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays. Wiley-IEEE Press, 1995.

Termín zadání:	6.2.2012	***Termín odevzdání:***	18.5.2012

Vedoucí práce: Ing. David Wolanský
Konzultanti diplomové práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

ABSTRAKT

V této diplomové práci byla rozebrána problematika širokopásmových planárních antén. V první řadě jsou zde popsány základní prvky, které mají vliv na šířku pásma, jako je třeba vliv dielektrického substrátu, vhodný tvar zářiče nebo napájecí síť. Dále jsou zde popsány techniky, kterými lze rozšířit pásmo planárních antén. Tyto techniky byly aplikovány na vybraný typ planární antény. Tato anténa byla namodelována pro vybraný dielektrický substrát v programu CST STUDIO SUITE 2010. Pro anténní řadu byla navržena napájecí síť s použitím děličů výkonu, pro zvětšení zisku byla anténa implementována do řady 2x2. V závěru této práce jsou zhodnoceny výsledky simulace.

KLÍČOVÁ SLOVA

Širokopásmové planární antény, techniky rozšiřující pásmo, Wilkinsonův dělič výkonu, napájecí síť, anténní řada 2x2 v pásmu 4,4 – 5 GHz.

ABSTRACT

In this master´s thesis an issue of broadband planar antennas was analyzed. Firstly, the basic elements that affect bandwidth, such as the influence of the dieletric substrate, suitable shape or feeding network, were described. Furthermore technics that can be used to widen the band of the planar antennas were described. These technics were applied to a chosen type of a planar antenna. This antenna was modeled and simulated for desired dielectric substrate in CST STUDIO SUITE 2010 software. Feeding network with power dividers was designed for the antenna array. In order to obtain a higher gain, the antenna was implemented into the 2x2 element array. The results of the simulation are evaluated in the conclusion.

KEYWORDS

Broadband planar antennas, broadband techniques, Wilkinsons power divider, feeding network, 2x2 element array for frequency range 4.4 - 5 GHz.

Bc. ŠPATENKA, VOJTĚCH. Širokopásmové planární antény. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 49 s., 2 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: ing. David Wolanský .

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma širokopásmové planární antény jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci této 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 Ing. Davidu Wolanskému za velmi účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne ....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků **x**

Seznam tabulek **xiii**

1 Úvod **1**

1.1 Výhody a nevýhody planárních antén ... 2

2 Planární antény **3**

2.1 Tvar zářiče antény ... 3

2.2 Napájení ... 4

2.2.1 Napájení pomocí koaxiální sondy ... 4

2.2.2 Napájení L sondou ... 4

2.2.3 Napájení pomocí mikropáskového vedení ... 4

2.3 Širokopásmové planární antény ... 6

2.3.1 Vliv substrátu na šířku pásma ... 6

3 Techniky rozšiřující frekvenční pásmo antény **8**

3.1 Snížení *Q* ... 8

3.2 Impedanční přizpůsobení ... 9

3.3 Několikanásobná rezonance ... 10

3.3.1 Koplanární parazitní prvky ... 11

3.3.2 Vrstvené uspořádání ... 11

3.3.3 Zavedení štěrbin ... 12

4 Služby pracující ve frekvenčním pásmu od 3,5 GHz – 6 GHz **13**

4.1 Mobile WIMAX ... 13

4.2 WIFI 5 GHz ... 13

4.3 WHDI ... 13

5 Modelování planárních antén **14**

5.1 CST Studio Suite 2010 ... 14

5.2 Flíčková anténa napájená L-sondou ... 14

5.3 Štěrbinová II anténa ... 15

6 Děliče výkonu **23**

6.1 Wilkinsonův dělič ... 23

6.2 T dělič 25

7 Anténní řada 2x2 27

7.1 Napájecí síť 28

8 Optimalizace 31

8.1 Anténní řada 2x2 31

8.2 Anténní řada 2x2 pro pásmo 4,4 GHz až 5 GHz 35

8.3 Anténní řada 4x4 pro pásmo 4,4 GHz až 5 GHz 38

8.3.1 Rovnoměrné amplitudové rozdělení 38

8.3.2 Nerovnoměrné amplitudové rozdělení 40

8.4 Anténní řada 8x8 44

9 Výroba a měření 46

10 Závěr 47

Literatura 48

Seznam symbolů, veličin a zkratek 49

Příloha A - Přípravek na výrobu L sondy 50

Příloha B - Foto realizované antény 51

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1. 1 Mikropásková anténa s obdélníkovým motivem. 2

Obr.2. 1 Základní tvary používané u planárních antén (převzato z [1]). 3

Obr.2. 2 Napájení koaxiální sondou. 4

Obr.2. 3 Napájení L sondou. 5

Obr.2. 4 Model napájecí L sondy v programu CST. 5

Obr.2. 5 Napájením mikropáskovým vedením. 5

Obr.2. 6 Závislost výšky substrátu a ε_r na šířce pásma a účinnosti, pro PSV < 2 (převzato z [1]). 6

Obr.2. 7 Závislost Q na dielektrické konstantě ε_r, h = 1,59mm, f=3GHz (převzato z [1]). 7

Obr.2. 8 Závislost Q na výšce dielektrického substrátu: ε_r = 2.2, W = 0.9L, f=3GHz (převzato z [1]). 7

Obr.3. 1 Závislost šířky pásma na poměru h/λ_o 9

Obr.3. 2 Typická impedanční síť pro planární antény, A – použití impedančního transformátoru, B – použití ladícího pahýlu. 10

Obr.3. 3 Zapuštění napájecího pásku do flíčku. 10

Obr.3. 4 Širokopásmová planární anténa s přímo spojeným parazitním zářičem a dvěma, mezerou připojenými, parazitními elementy (převzato z [5]). 11

Obr.3. 5 Anténa s vrstveným uspořádáním parazitních prvků (převzato z [4]). 12

Obr.3. 6 Štěrbinová anténa a) ve tvaru U, b) ve tvaru E. 12

Obr.5. 1 Modul činitele odrazu flíčkové antény napájené L sondou. 14

Obr.5. 2 Flíčková anténa napájená L sondou. 15

Obr.5. 3 Flíčková anténa napájená L sondou – pohled z boku. 15

Obr.5. 4 Štěrbinová II anténa. 16

Obr.5. 5 Štěrbinová II anténa – pohled z boku. 16

Obr.5. 6 Modul činitele odrazu v závislosti na parametru *Lnap*. 17

Obr.5. 7 Modul činitele odrazu v závislosti na parametru *C1*. 17

Obr.5. 8 Modul činitele odrazu v závislosti na parametru *d*. 18

Obr.5. 9 Modul činitele odrazu v závislosti na parametru *h3*. 18

Obr.5. 10 Modul činitele odrazu štěrbinové II antény. 19

Obr.5. 11 Směrové charakteristiky štěrbinové II antény ve 3D zobrazení pro kmitočty 3,5 GHz a 4 GHz. 20

Obr.5. 12 Směrové charakteristiky štěrbinové II antény ve 3D zobrazení pro kmitočty 4,5 GHz a 5 GHz. 20

Obr.5. 13 Směrové charakteristiky štěrbinové II antény ve 3D zobrazení pro kmitočty 5,5 GHz a 6 GHz. 21

Obr.5. 14 Směrové charakteristiky štěrbinové II antény a) vertikální polarizace b) horizontální polarizace pro kmitočet 3,5 GHz. 21

Obr.5. 15 Směrové charakteristiky štěrbinové II antény a) vertikální polarizace b) horizontální polarizace pro kmitočet 4,5 GHz. 22

Obr.5. 16 Směrové charakteristiky štěrbinové II antény a) vertikální polarizace b) horizontální polarizace pro kmitočet 5,5 GHz. 22

Obr.6. 1 Kompenzovaný Wilkinsonův dělič. 24

Obr.6. 2 Výsledky simulace Wilkinsonova děliče. 25

Obr.6. 3 T dělič. 26

Obr.6. 4 Porovnání modulů činitele odrazu pro Wilkinsonův a T dělič. 26

Obr.7. 1 Náčrt anténní řady 2x2 a rozložení proudů v napájecí síti. [10]. 27

Obr.7. 2 Model anténní řada 2x2 – pohled z boku. 27

Obr.7. 3 Model anténní řady 2x2 – pohled ze shora. 28

Obr.7. 4 Napájecí síť anténní řady 2x2 realizovaná Wilkinsonovými děliči. 29

Obr.7. 5 Napájecí síť anténní řady 2x2 realizovaná T děliči. 29

Obr.7. 6 Modul činitele odrazu nenaladěné anténní řady 2x2. 30

Obr.8. 1 Nákres II antény – pohled z boku. 31

Obr.8. 2 Nákres II antény – pohled s hora. 32

Obr.8. 3 Kmitočtová závislost činitele odrazu naladěné anténní řady 2x2. 33

Obr.8. 4 Směrové charakteristiky anténní řady pro 4,5 GHz: (a) Horizontálním směru, (b) vertikálním směru. 34

Obr.8. 5 Směrové charakteristiky anténní řady pro 5,25 GHz: (a) Horizontálním směru, (b) vertikálním směru. 34

Obr.8. 6 Směrové charakteristiky anténní řady pro 6 GHz: (a) Horizontálním směru, (b) vertikálním směru. 34

Obr.8. 7 Kmitočtová závislost činitele odrazu anténní řady 2x2 pro příjem TV signálu. 35

Obr.8. 9 Směrové charakteristiky anténní řady pro 4,4 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru. 37

Obr.8. 10 Směrové charakteristiky anténní řady pro 4,7 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru. 37

Obr.8. 11 Směrové charakteristiky anténní řady pro 5 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru. 37

Obr.8. 12 Kmitočtová závislost činitele odrazu anténní řady 4x4 s rovnoměrným amplitudovým rozložením. 38

Obr.8. 13 Směrové charakteristiky anténní řady pro 4,4 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru. 39

Obr.8. 14 Směrové charakteristiky anténní řady pro 4,7 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru. 39

Obr.8. 15 Směrové charakteristiky anténní řady pro 5 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru. 39

Obr.8. 16 Nákres rozložení amplitudy v anténní řadě. 40

Obr.8. 17 Rozložení anténní řada 4x4 s nerovnoměrným amplitudovým dělením. 41

Obr.8. 18 Kmitočtová závislost činitele odrazu anténní řady 4x4 s nerovnoměrným amplitudovým rozložením. 42

Obr.8. 19 Směrové charakteristiky anténní řady pro 4,4 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru. 43

Obr.8. 20 Směrové charakteristiky anténní řady pro 4,75 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru. 43

Obr.8. 21 Směrové charakteristiky anténní řady pro 5 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru. 43

Obr.8. 22 Směrové charakteristiky anténní řady 8x8 pro 4,75 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru. 44

Obr.8. 23 Rozložení anténní řady 8x8. 45

Obr.8. 24 Kmitočtová závislost činitele odrazu anténní řady 8x8. 45

Obr.9. 1 Uspořádání bezodrazové komory. 46

Obr.9. 2 přípravek na výrobu L sondy. 50

Obr.9. 3: Vyrobená anténní řada – pohled na zářiče. 51

Obr.9. 4: Vyrobená anténní řada – pohled na napájecí síť. 51

SEZNAM TABULEK

Tab.2. 1 Přehled tvarů zářiče a jejich šířku pásma pro: ε_r = 2,32, h = 1,59cm, f = 2GHz (převzato z [1]). 3

Tab.2. 2 Přehled bezdrátových komunikačních systémů a šířky pásma (převzato z [1]). 6

Tab.3. 1 Metody zvyšující šířku pásma planárních antén. 8

Tab.4. 1 Přehled pracovních kmitočtů Mobile WIMAX. 13

Tab.4. 2 Přehled pracovních kmitočtů využívané WIFI 5GHz. 13

Tab.5. 1 Přehled parametrů ovlivňující frekvenční šířku pásma. 16

Tab.6. 1 Přehled hodnot jednotlivých impedancí Wilkinsonova děliče. 25

Tab.6. 2 Přehled hodnot jednotlivých impedancí T děliče. 25

Tab.8. 1 Přehled parametrů antény. 31

Tab.8. 2 Přehled parametrů děliče. 32

Tab.8. 3 Zisk anténní řady. 33

Tab.8. 4 Zisk anténní řady v pásmu 4,4 až 5 GHz. 35

Tab.8. 5 Přehled zoptimalizovaných parametrů. 36

Tab.8. 6 Potlačení bočních laloků anténní řady 2x2. 36

Tab.8. 7 Přehled hodnot jednotlivých impedancí Wilkinsonova děliče s dělícím poměrem 1:1,5. 41

Tab.8. 8 Přehled hodnot jednotlivých impedancí Wilkinsonova děliče s dělícím poměrem 1:2. 41

Tab.8. 9 Zisk anténní řady 4x4 s rovnoměrným amplitudovým rozdělením a nerovnoměrným amplitudovým rozdělením. 42

Tab.8. 10 Porovnání potlačení postranních laloků. 44

1 ÚVOD

V této práci se budeme zabývat problematikou širokopásmových planárních antén a jejich návrhem pro frekvenční pásmo 4,4 – 5 GHz. Jelikož planární antény mají malou šířku pásma, a to od 1 % do 5 %, jsou zde zmíněny techniky, kterými lze tuto šířku pásmo rozšířit. Tyto techniky lze rozdělit na techniky zasahující do tvaru zářiče a na techniky na úpravu napájení. Mezi techniky zasahující do tvaru zářiče patří snížení *Q*, použití impedančního přizpůsobení a uvedení antény do několikanásobné rezonance.

Samostatná planární anténa má i malý zisk, a to přibližně 6 dBi. Abychom zisk antény zvětšili, implementujeme anténu do anténní řady. Pro napájení jednotlivých zářičů byla nejprve navrhnuta napájecí síť, která se skládá z děličů výkonů, které rovnoměrně rozvádí energii do každého zářiče.

Planární antény jsou v dnešní době velice populární a často se jich využívá v oblasti bezdrátových komunikačních systémů, jako jsou antény mobilních telefonů, GPS, GSM, antény pro WIFI, ploutvovité antény na automobilech nebo letadlech, antény pro přenos digitálního TV signálu atd. Jejich výhodou je především nízký profil, malé rozměry a nízká cena.

První návrhy planárních antén se poprvé objevily v roce 1953. Antény byly vyvíjeny především pro vojenské účely, bylo nutné vyrobit antény, které by dobře kopírovaly trupy letadel. Sériově se začaly vyrábět až o několik let později. Vývoj planárních antén během 70. let minulého století nastartovala dostupnost vhodného dielektrického substrátu s nízkými ztrátovými, tepelnými a mechanickými vlastnostmi. Došlo i ke zlepšení výrobního procesu. Antény se vyrábějí stejným postupem jako DPS, a to pomocí fotocesty. [1]

V současné době bychom se bez planárních antén těžko obešli. Používají se převážně v oblasti bezdrátových komunikačních systémů, jako antény mobilních telefonů, GPS, GSM, ploutvovité antény na automobilech nebo letadlech a jiné.

Všechny antény, které mají rovnou nebo zakřivenou plochu zářiče nebo jejich modifikace, a které mají nejméně jeden napájecí prvek, se nazývají planární antény. Patří sem plošná mikropásková anténa, štěrbinová anténa, planární invertovaná-L a invertovaná-F anténa (PILA a PIFA), ploché monopóly, dipóly a jn.

Planární antény jsou antény s nízkým profilem tvořené tenkým kovovým motivem o výšce *tp*. Nejčastěji používaným tvarem je čtverec nebo obdélník o rozměrech *W* a *L*, jak je znázorněno na Obr.1. 1. Motiv je nanesen na jednu stranu dielektrického substrátu o tloušťce *h* a relativní permitivitě ε_r. Po celé ploše druhé strany dielektrického substrátu je kovová vrstva, která slouží jako reflektor.

1.1 Výhody a nevýhody planárních antén

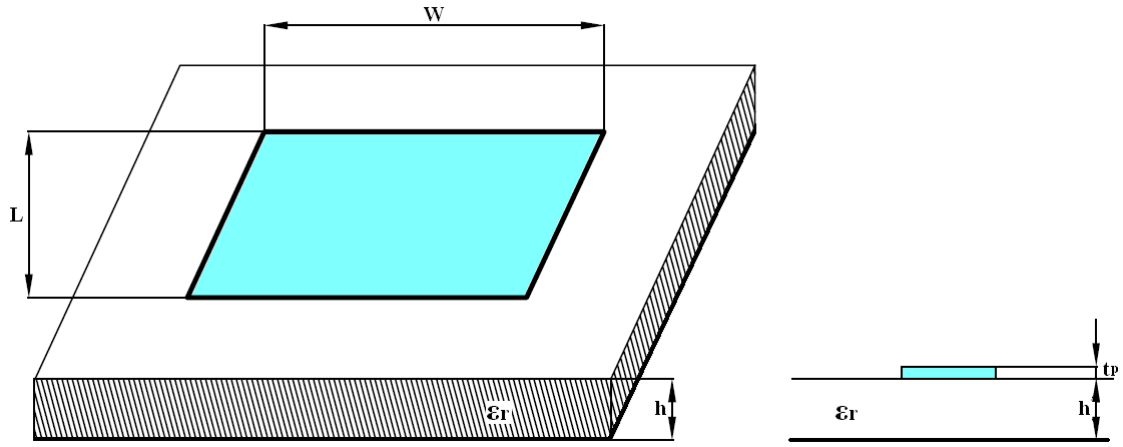
Planární antény mají celou řadu výhod oproti běžným mikrovlnným anténám. Použití těchto antén se uplatňuje v širokém frekvenčním rozsahu od 100MHz do 100GHz. Výhody a nevýhody planárních antén ve srovnání s běžnými mikrovlnnými anténami jsou uvedeny níže.

Výhody:

- Nízký profil antény.
- Různé motivy pro různé aplikace.
- Nízké výrobní náklady, antény se vyrábějí fotocestou, jako DPS.
- Lineární a kruhová polarizace je možná s jedním napájecím bodem.
- Antény mají malé rozměry a také nízkou hmotnost.

Nevýhody:

- Nízká efektivita vyzařování.
- Nízký zisk ± 6dB.
- Nízká výkonová zatížitelnost.
- Slabá polarizační čistota.
- Vysoké Q.
- Nízká šířka pásma do 5%.



Obr.1. 1 Mikropásková anténa s obdélníkovým motivem.

2 PLANÁRNÍ ANTÉNY

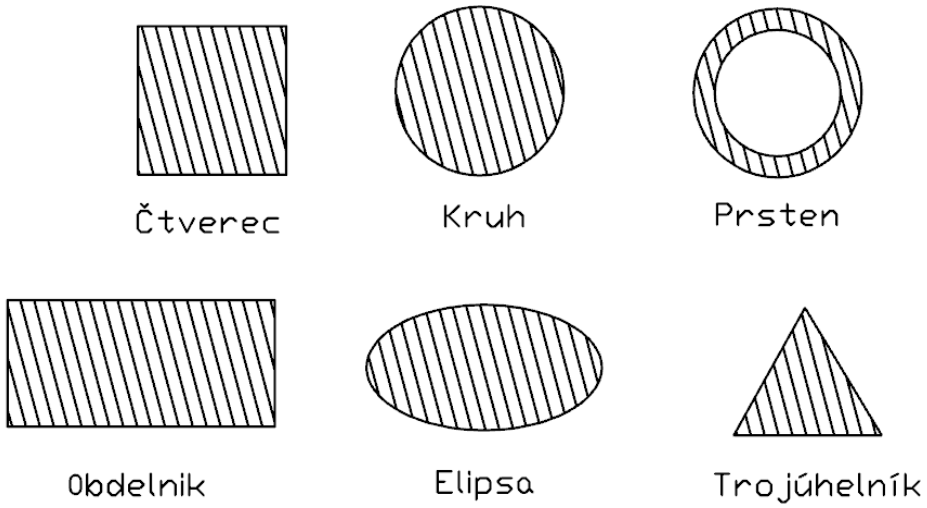
2.1 Tvar zářiče antény

Bylo zjištěno, že některé tvary zářičů mají velmi malé Q ve srovnání s ostatními tvary, a že jejich šířka pásma je značně větší. Do této skupiny patří zářiče ve tvaru prstenu, kruhu, čtvrtvlnný flíček a další geometrické tvary. Podobně může být použit i čtvercový nebo obdélníkový prstencový zářič. Šířka pásma prstencových a pravoúhlých tvarů je znázorněna v Tab.2.1. Z tabulky je zřejmé, že u pravoúhlých tvarů se šířka pásma zvětšuje s jejich šířkou (W). [1]

Tvar zářiče	Velikost stran	Šířka pásma [%]
Úzký obdélník	L = 4,924cm, W = 2cm	0.7
Široký obdélník	L = 4,79cm, W = 7,2cm	1,6
Čtverec	L = W = 4,82 cm	1,3
Kruh	a = 2,78cm	1,3
Prsten	a = 4,45 cm, b = 8,9cm	3,8

Tab.2. 1 Přehled tvarů zářiče a jejich šířku pásma pro: ε_r = 2,32, h = 1,59cm, f = 2GHz (převzato z [1]).

Na Obr.2.1 jsou znázorněny základní tvary, které se používají jako zářiče (tzv. „flíčky“). Tvar zářiče ovlivňuje rozložení proudů na anténě a tím i vyzařovací charakteristiku. Další parametr, který ovlivňuje šířku pásma, je volba materiálu pro zářič, který by měl být z dobře vodivého materiálu. Nejčastěji se používá měď nebo zlato.



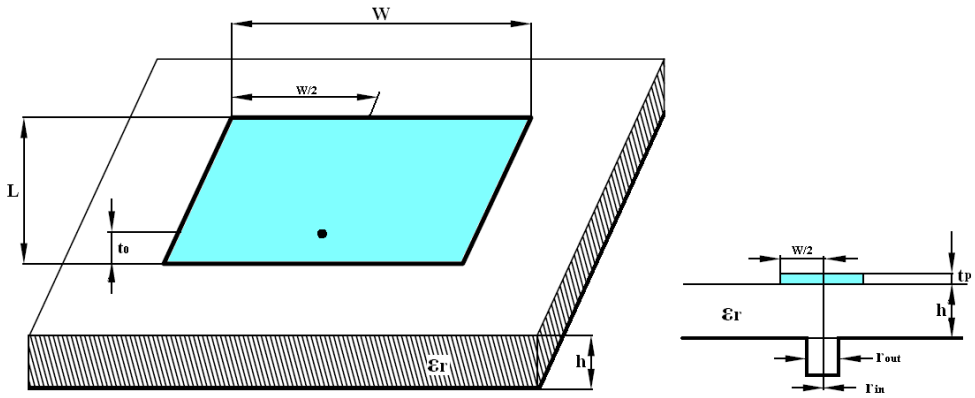
Obr.2. 1 Základní tvary používané u planárních antén (převzato z [1]).

2.2 Napájení

Pro napájení antény je k dispozici několik variant. Nejčastěji se používá napájení koaxiální sondou nebo napájení mikropáskovým vedením. V obou případech se jedná o napájení, které je připojeno přímo k zářiči. Také je možné anténu napájet vazební štěrbinou, otevřeným koncem vedení, nebo uvedené způsoby kombinovat. [2]

2.2.1 Napájení pomocí koaxiální sondy

Nejjednodušším a nejpoužívanějším napájením antény je pomocí koaxiální sondy. Vnitřní vodič prochází skrze dielektrikum a je připájen k ploše anténního zářiče. Vnější vodič je připájen na zemnící plochu, která slouží jako reflektor. Největší výhodou tohoto napájení je, že můžeme sondu umístit do bodu, kde má anténa nejlepší impedanční přizpůsobení. Při použití koaxiální sondy dochází k výraznému potlačení parazitního vyzařování napájecího vedení.



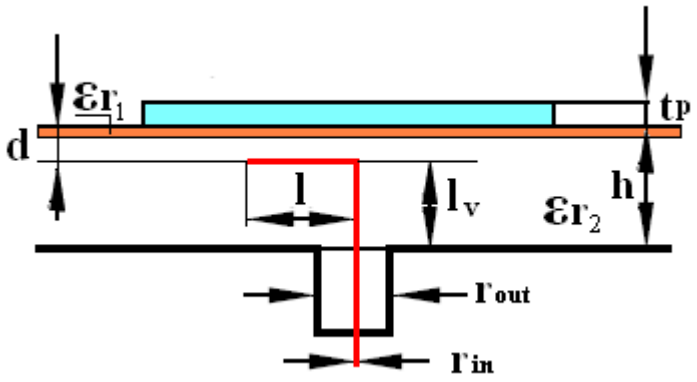
Obr.2. 2 Napájení koaxiální sondou.

2.2.2 Napájení L sondou

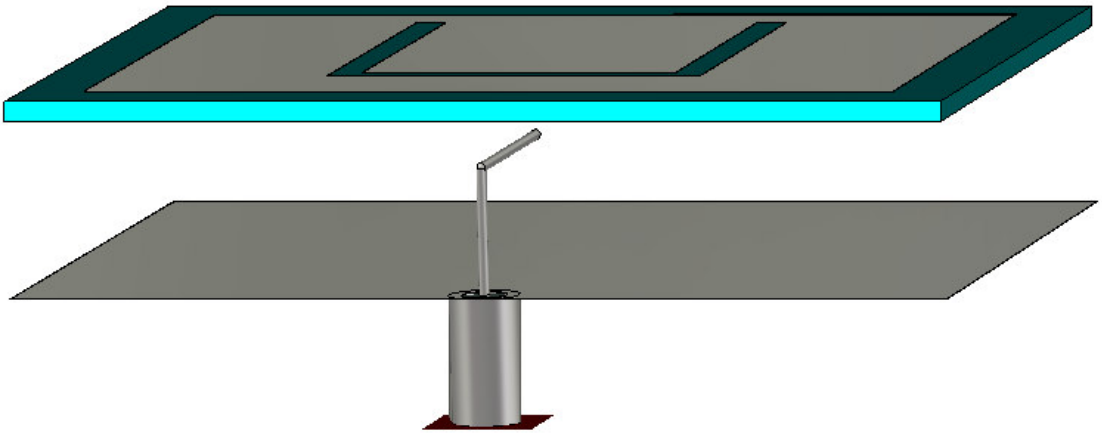
Jedná se o modifikaci napájení antény koaxiální sondou. Vodič zde není přiveden přes substrát k zářiči, ale je zahnut do písmene L pod substrátem, jak můžeme pozorovat na Obr.2.3 a Obr.2.4. Takto zahnutá koaxiální sonda způsobí vznik kapacitní vazby k zářiči, prodlužováním této sondy vzrůstá její kapacita, odpor a indukčnost. Nespornou výhodou tohoto napájení je, že zvětší šířku pásma antény, aniž by se muselo zasahovat do tvaru zářiče. Šířku pásma, lze ladit změnou délky *l* a změnou výšky sondy od zářiče L_v. Délka celé L sondy musí odpovídat λ/4. Nevýhodou této metody je velký nárůst výšky antény mezi zářičem a reflektorem. Další problém nastává při výrobě L sondy, kdy je potřeba jí ohnout do pravého úhlu a dodržet její rozměry. [3]

2.2.3 Napájení pomocí mikropáskového vedení

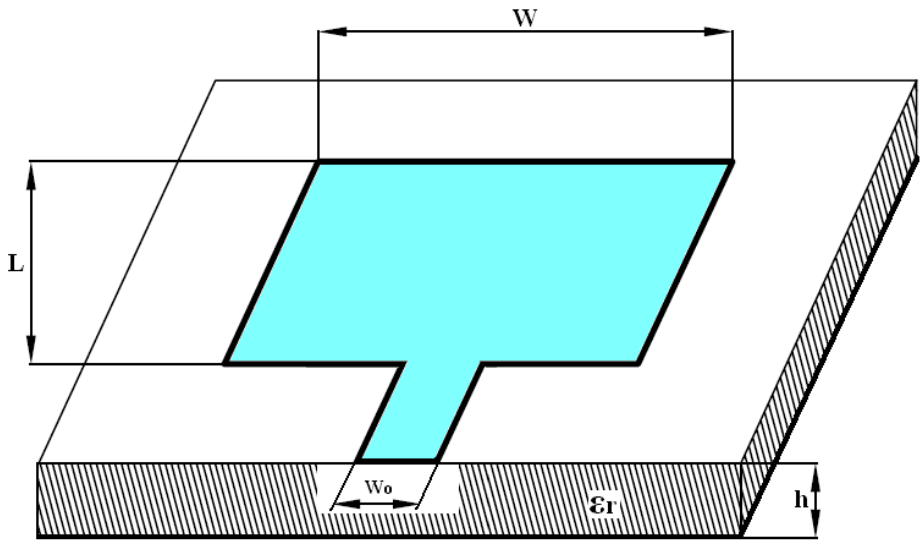
Jak je patrné z Obr.2.5, napájení je přivedeno k zářiči pomocí mikropáskového vedení, který je na stejné straně substrátu a ze stejného materiálu jako zářič. Důležité je vhodné zvolení šířky w_0 napájecího mikropásku. Tato šířka ovlivňuje impedanční přizpůsobení antény a je závislá na použitém substrátu. Výhodou napájení pomocí mikropáskového vedení je, že lze navrhnout vhodnou napájecí síť a antény implementovat do anténních řad.



Obr.2. 3 Napájení L sondou.



Obr.2. 4 Model napájecí L sondy v programu CST.



Obr.2. 5 Napájením mikropáskovým vedením.

2.3 Širokopásmové planární antény

Mikropáskové antény disponují celou řadou užitečných vlastností, ale na úkor těchto vlastností mají jednu značnou nevýhodu, a tou je jejich úzká šířka pásma. Typická mikropásková flíčková anténa má šířku pásma od 1 % do cca 5 %. Této šířce pásma odpovídá tenký substrát s těmito znaky: pro $\varepsilon_r = 10$, $h/\lambda_o < 0{,}023$ - $\varepsilon_r = 2.3$, $h/\lambda_o < 0{,}07$. Když porovnáme šířku pásma s klasickými drátovými anténami a vlnovody, které dosahují šířky pásma v rozsahu 15 – 50 %, dosažená šířka pásma s mikropáskovými anténami je velice malá.[1]

V Tab.2.2 jsou znázorněny požadované šířky pásem dnešních bezdrátových komunikačních systémů.

	Kmitočet [MHz]	Šířka pásma [%]
GSM	890 - 960	7,6
DCS	1710 – 1880	9,5
PCS	1850 – 1990	7,5
UMTS	1920 – 2170	12,2

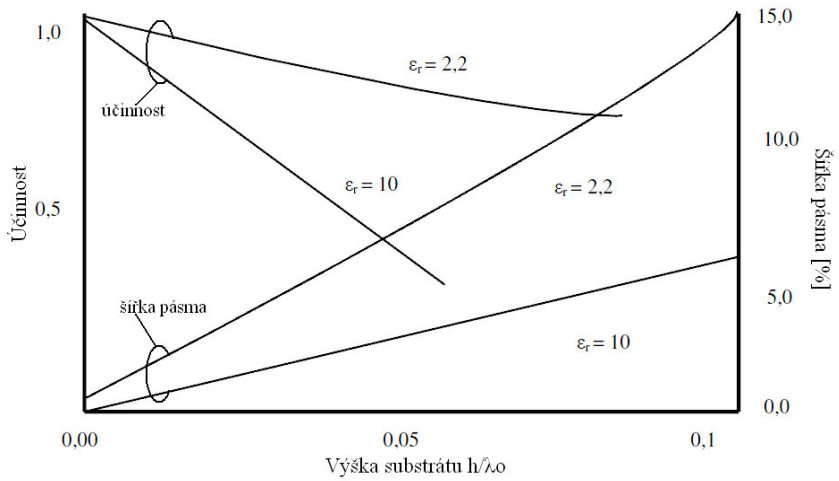
Tab.2. 2 Přehled bezdrátových komunikačních systémů a šířky pásma (převzato z [1]).

2.3.1 Vliv substrátu na šířku pásma

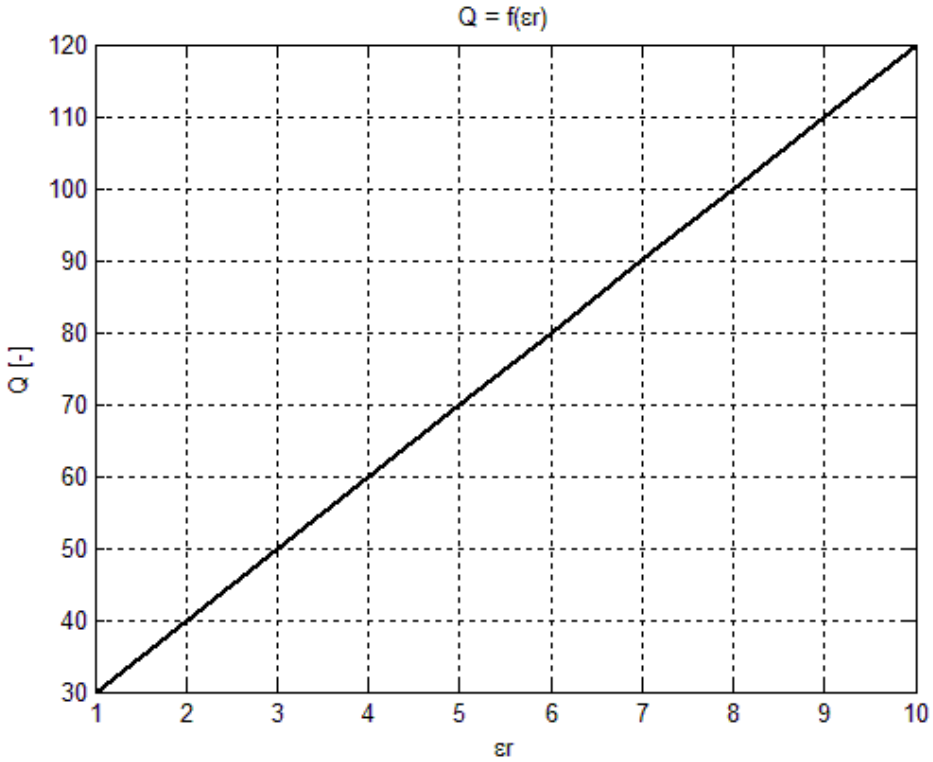
Na Obr.2.6 je znázorněna závislost účinnosti a šířky pásma na permitivitě pro dvě různé hodnoty v závislosti na výšce substrátu. Ze závislosti je patrné, že s rostoucí výškou substrátu se zvyšuje šířka pásma, při zvyšování permitivity šířka pásma klesá. Parametr, který popisuje tuto skutečnost, se nazývá činitel kvality antény a značí se *Q*.

Závislost Q obdélníkového flíčku na permitivitě ε_r je znázorněna na Obr.2.7 Ze závislosti je patrné, že s rostoucím Q roste ε_r lineárně. Z dalšího Obr.2.8 je patrné, že s rostoucím *h* exponenciálně klesá Q.

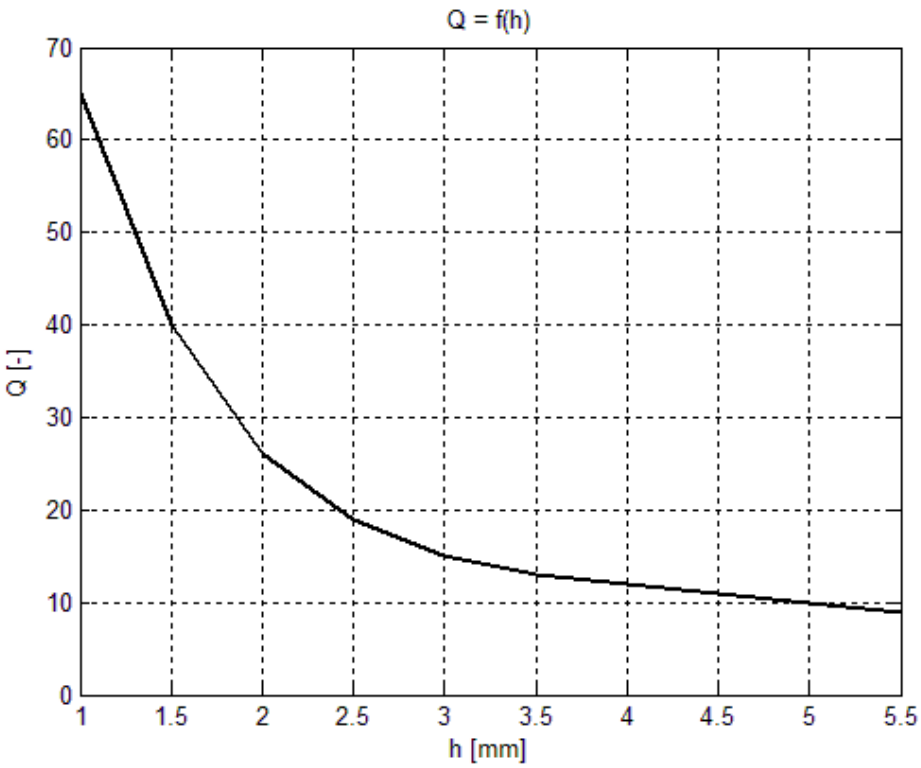
V závěru tedy můžeme říct, že s rostoucím *h* a klesajícím ε_r můžeme zvýšit šířku pásma za předpokladu, že $h < 0{,}02\ \lambda$.



Obr.2. 6 Závislost výšky substrátu a ε_r na šířce pásma a účinnosti, pro PSV < 2 (převzato z [1]).



Obr.2. 7 Závislost Q na dielektrické konstantě ε_r, *h* = 1,59mm, f=3GHz (převzato z [1]).



Obr.2. 8 Závislost Q na výšce dielektrického substrátu: ε_r = 2.2, W = 0.9L, f=3GHz (převzato z [1]).

3 TECHNIKY ROZŠIŘUJICÍ FREKVENČNÍ PÁSMO ANTÉNY

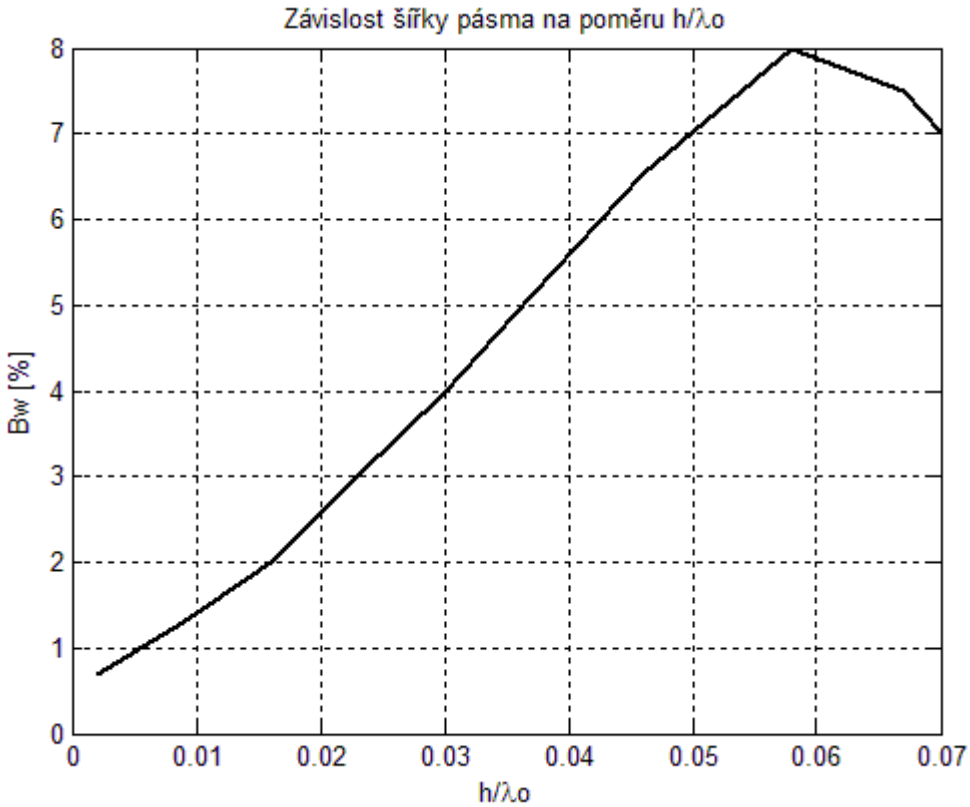
Existuje více způsobů, kterými lze zvětšit šířku pásma planární antény. Přehled používaných metod je uveden v Tab.3.1. Z předchozí kapitoly jsme získali informaci, že faktory ovlivňující šířku pásma jsou především: tvar zářiče, napájecí systém, substrát a uspořádání parazitních elementů v okolí zářiče. Anténu lze považovat za obvod s vysokým *Q*. Pro zvýšení šířky pásma v rezonanci lze snížit *Q*, které redukuje energii okolo zářiče. Alternativou je vložení širokopásmové impedanční sítě mezi anténu a napájení. Poslední možností je vyvolání několikanásobné rezonance u antény, kde se současně vybudí dvě nebo více sousedních rezonancí. Touto metodou může být dosaženo několikrát větší šířky pásma než při použití jedné rezonance. [4]

	Technika
Snížení *Q*	Výběr tvaru zářiče
	Výška substrátu
	Snížení dielektrické konstanty
	Zvýšení ztrát
Použití impedančního přizpůsobení	Vložení přizpůsobovací sítě
	Přidání ladících elementů
	Použití zapuštěného mikropásku
Uvedení do několikanásobné rezonance	Použití parazitních elementů
	Zavedení štěrbin

Tab.3. 1 Metody zvyšující šířku pásma planárních antén.

3.1 Snížení *Q*

Velice efektivní způsob zvětšení šířky pásma je snížení činitele jakosti Q. Bylo zjištěno, že tvar zářiče značně ovlivňuje šířku pásma antény. Tvar zářiče ovlivňuje pracovní mody a má zásadní vliv na vyzařovací vlastnosti celé antény. Další důležitou metodou je zvýšení tloušťky substrátu. S rostoucí šířkou substrátu se zvětšuje šířka pásma, ale rapidně se zhoršuje vyzařovací schopnost. Obr.3.1 znázorňuje možnou dosažitelnou šířku pásma, která klesá po překročení maximální hodnoty. Maximální šířku pásma lze dosáhnout poměrem $h/\lambda_o = 0{,}058$.

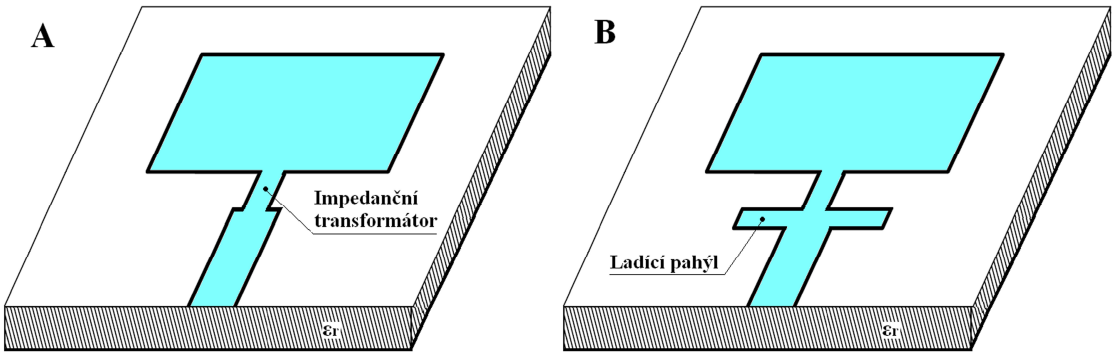


Obr.3. 1 Závislost šířky pásma na poměru h/λ_o .

V tomto případě se pro napájení používá koaxiální sonda, která má velký jalový odpor díky dlouhému přívodu přes silný substrát do mikropásku. Problém však spočívá v dosažení dobrého impedančního přizpůsobení. [4], [5]

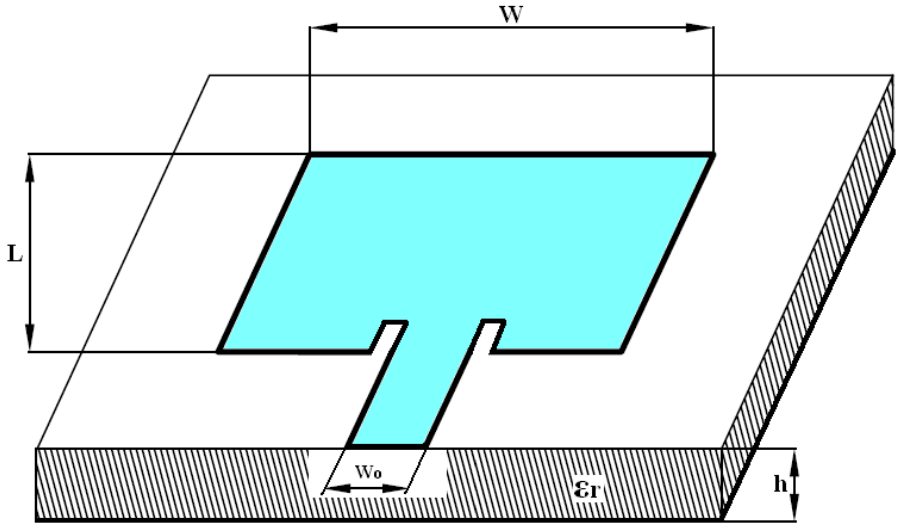
3.2 Impedanční přizpůsobení

Impedanční přizpůsobovací síť se umísťuje mezi zářič, který má frekvenčně závislou impedanci, a napájecí síť, která má konstantní charakteristickou impedanci. Nabízejí se dvě metody používané u mikropáskových antén. Jednou metodou je vložení oddělené přizpůsobovací sítě mezi zářič a napájecí síť, aniž by došlo k zásahu do tvaru zářiče. Tato síť může být použita v různých variantách, jak je zobrazeno na Obr.3.2. Planární napájecí struktura a impedanční přizpůsobovací síť se většinou nachází na stejné straně substrátu jako zářič. Jako přizpůsobovací obvod se používá λ/4 transformátor, ladící pahýly a některé další varianty. [4], [5]



Obr.3. 2 Typická impedanční síť pro planární antény, A – použití impedančního transformátoru, B – použití ladícího pahýlu.

Druhá metoda je zobrazena na Obr. 3.3, zasahuje do tvaru zářiče a to tak, že přizpůsobovací síť je buď zapuštěna do zářiče a přímo k němu připojena, nebo je od zářiče oddělena tenkou mezerou. Vzhledem k úspoře místa se tyto metody nejvíce využívají. Tento způsob nepotřebuje žádné další přídavné místo na rozdíl od přizpůsobení pomocí čtvrtvlnného transformátoru.



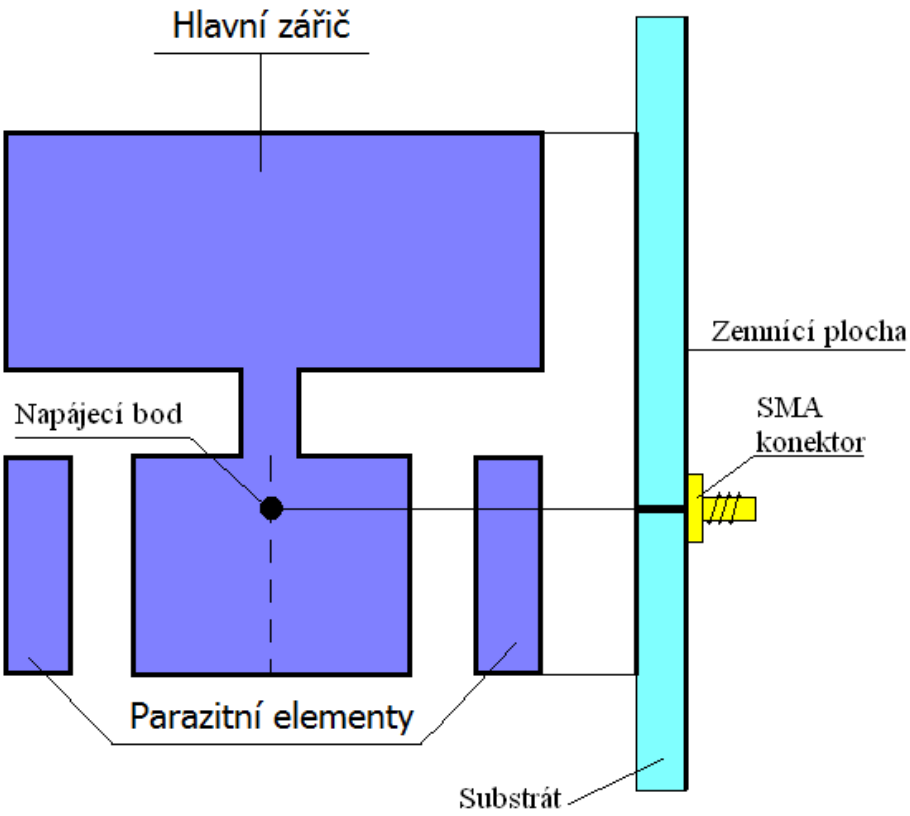
Obr.3. 3 Zapuštění napájecího pásku do flíčku.

3.3 Několikanásobná rezonance

Vybuzení dvou nebo více sousedních rezonancí během pracovního frekvenčního rozsahu se osvědčilo jako velmi dobrá cesta vedoucí k rozšíření frekvenční šířky pásma. Tato metoda byla obvykle používána v RF obvodech pro laděné filtry a v dalších aplikacích. Pro vybuzení sousedních rezonancí se používají parazitní elementy, které se umísťují na stejnou strukturu jako je zářič, nebo mohou být umístěny nad hlavní zářič a prostor mezi nimi je zaplněn dielektrikem.

3.3.1 Koplanární parazitní prvky

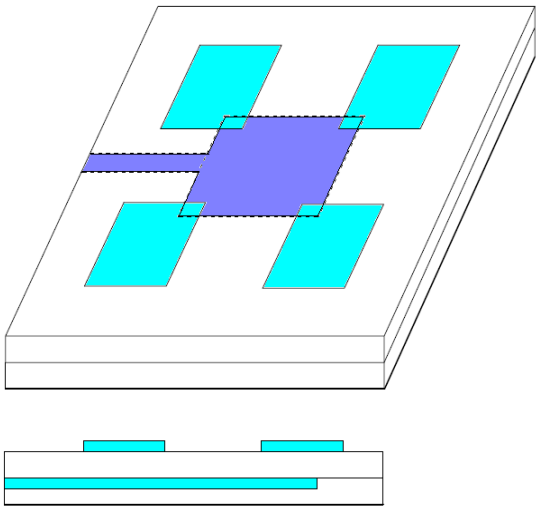
Jedna z metod pro zvětšení šířky pásma využívá koplanárního uspořádání, kde je jeden nebo více parazitních elementů rozmístěno okolo hlavního zářiče. Parazitní elementy jsou s hlavním zářičem spojeny štěrbinou podél hlavní vyzařující hrany. Typické rozložení je znázorněno na obrázku Obr.3.4, kde je k hlavnímu zářiči pomocí mikropáskového vedení připojen hlavní parazitní zářič přímo a další dva parazitní elementy nepřímo. Tímto způsobem se může šířka pásma antény zvětšit až pětinásobně. Experimentální výsledky ukázaly, že s použitím substrátu FR4 má anténa šířku pásma 12,7 % . [4], [5]



Obr.3. 4 Širokopásmová planární anténa s přímo spojeným parazitním zářičem a dvěma, mezerou připojenými, parazitními elementy (převzato z [5]).

3.3.2 Vrstvené uspořádání

Na Obr.3.5 je znázorněno uspořádání, kde jsou parazitní elementy umístěny nad hlavním zářičem. Nad zářič se umisťuje jeden nebo více parazitních elementů. U této metody nejsou parazitní elementy spojeny s hlavním zářičem. Tyto nespojené elementy způsobí značné rozšíření šířky pásma. Obvykle bývá šířka pásma v rozsahu 10 – 20 %. Jako medium mezi hlavním zářičem a parazitními elementy se používá vzduch, pěna nebo jiný materiál s nízkou permitivitou. [4], [5]



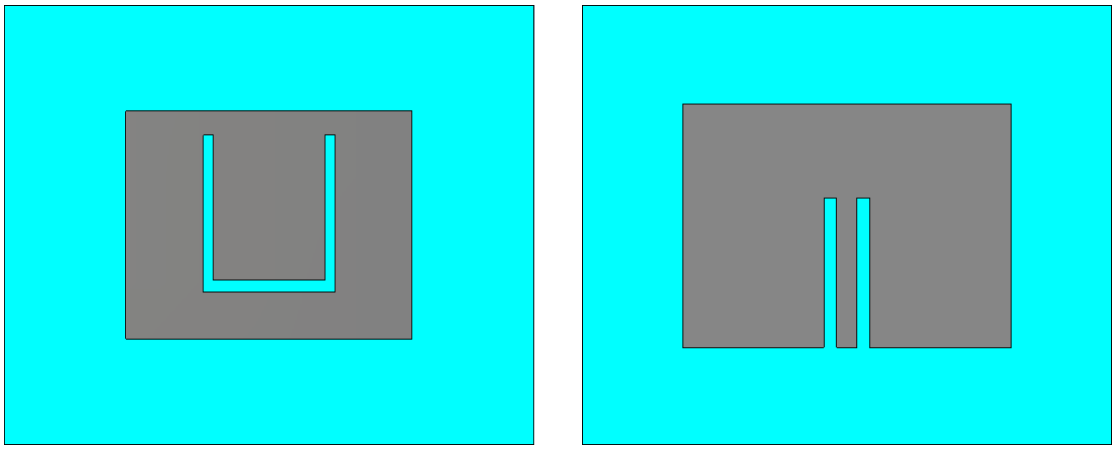
Obr.3. 5 Anténa s vrstveným uspořádáním parazitních prvků (převzato z [4]).

3.3.3 Zavedení štěrbin

Na Obr.3.6 je vyobrazena obdélníková anténa, kde jsou dvě symetrické štěrbiny umístěny podle středu ve tvaru písmene U. Tyto štěrbiny efektivně vyrovnávají velký indukční odpor, který je zapříčiněný dlouhou napájecí sondou.

Touto metodou lze dosáhnout šířky pásma mezi 10 % a 40 %. Výhodou této metody je, že štěrbiny jsou v hlavním zářiči a není nutné použití parazitních elementů, které by zvětšily šířku nebo výšku antény. Hlavní parametry, které ovlivňují šířku pásma je poměr W/L a výška h > λ 0,06. Šířku pásma lze ladit prodlužováním ramen tvaru U a zmenšování vzdálenosti svislých štěrbin od středu. Prodloužením ramen se vybudí další rezonance, která se připojí k původní rezonanci a vzniká tak větší šířka pásma. [4], [5]

Dalšími tvary, s nimiž lze dosáhnout stejné šířky frekvenčního pásma, jsou štěrbiny ve tvaru E, jak je znázorněno na Obr.3.6 b), zrcadlená písmena L nebo dvě svislé štěrbiny II.



a) b)

Obr.3. 6 Štěrbinová anténa a) ve tvaru U, b) ve tvaru E.

4 SLUŽBY PRACUJÍCÍ VE FREKVENČNÍM PÁSMU OD 3,5 GHZ – 6 GHZ

4.1 Mobile WIMAX

WiMAX byl navržen jako doplněk k WIFI pro kmitočtová pásma od 2 GHz do 6 GHz. Je definován v řadě norem IEEE 802,16. V České republice se jedná o pásmo 3,5 GHz, ve kterém je pro komerční využití k dispozici 20 kanálů. Šest z nich je již přiděleno v rámci celoplošných licencí.

Využívané frekvence	**licence**
3,5 GHz	licencované
5,4 GHz	nelicencované
5,8 GHz	nelicencované

Tab.4. 1 Přehled pracovních kmitočtů Mobile WIMAX.

4.2 WIFI 5 GHz

WIFI pro pásmo 5 GHz je popsáno normou 802.11a specifikuje celkem 237 kanálů od 5,1 GHz do 5,85 GHz. Tak, jako je pásmo 2,4 GHz omezeno pouze na některé kanály, které nejsou licencované, je i pásmo 5 GHz rozděleno na určité rozsahy. Viz tabulka níže.

Využívané pásmo	
5,47 GHz -5,725 GHz	Evropa
5,18 GHz -5,35 GHz, 5,725 GHz -5,825 GHz	USA
5,725 GHz -5,85 GHz	Čína
5,15 GHz -5,25 GHz	Japonsko

Tab.4. 2 Přehled pracovních kmitočtů využívané WIFI 5GHz.

4.3 WHDI

V dnešní době se rozmáhá přenos bezdrátové digitální TV. Velkou výhodou WHDI je, že není zapotřebí kabelových rozvodů a signál můžeme přijímat po celé budově. WHDI pracuje na frekvenci 5 GHz.

5 MODELOVÁNÍ PLANÁRNÍCH ANTÉN

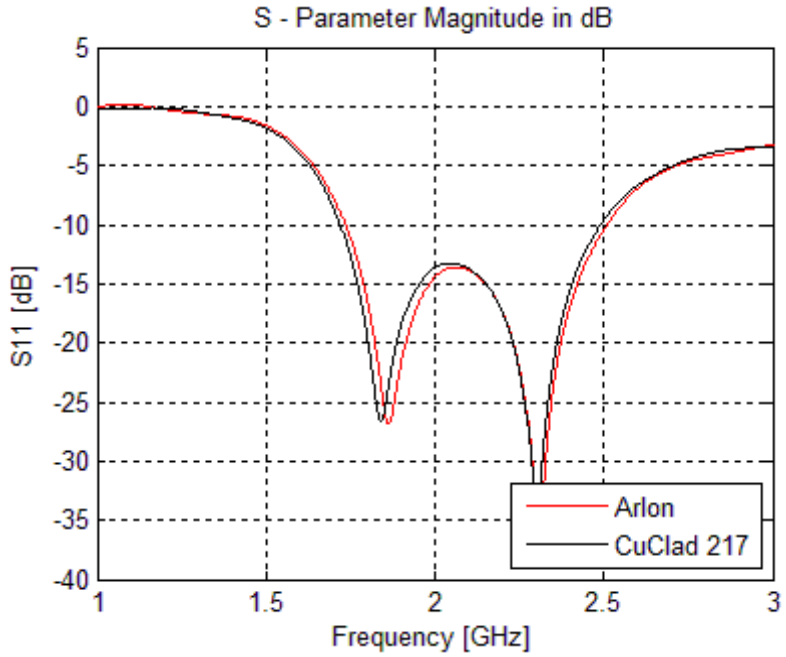
5.1 CST Studio Suite 2010

Analýza zvolených antén byla prováděna v programu CST MWS 2010. CST je 3D simulátor pro analýzu a návrh drátových i planárních antén. Provádí analýzu struktur na základě metody konečných diferencí v časové oblasti. Klasická formulace FDTD používá schodovitou diskretizaci, která je značně nedokonalá. K dosažení přesnějších výpočtů je možné diskretizační síť zjemnit, avšak za cenu zvýšení výpočetních nároků. CST využívá ke zvýšení přesnosti výsledků vylepšenou okrajovou aproximaci PBA, která dokáže při stejně hrubé diskretizační síti lépe postihnout tvar struktury.

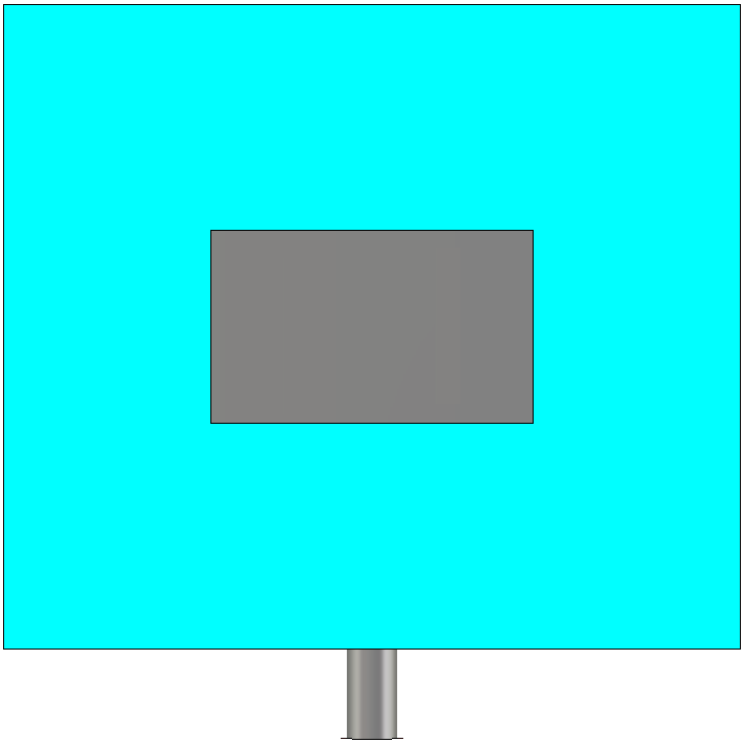
Vybrané typy širokopásmových antén byly namodelovány pro různé substráty. Jako dielektrický substrát byly použity Arlon a CuClad 217.[6]

5.2 Flíčková anténa napájená L-sondou

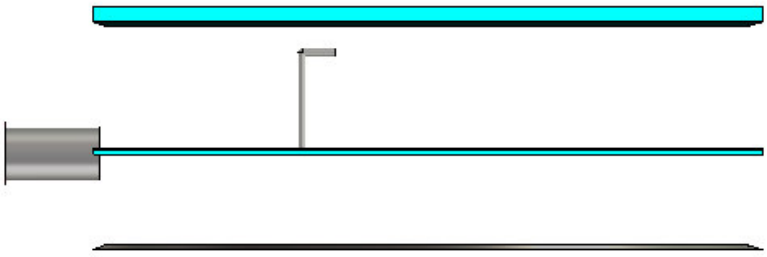
Anténa byla navržena s obdélníkovým zářičem a se vzduchovou mezerou mezi reflektorem a zářičem, jak je znázorněno na Obr.5.2 a Obr.5.3. Substrát pro zářič byl použit CuClad 217 s permitivitou ε_r = 2,17 a Arlon s permitivitou ε_r = 3,28. Pro reflektor byl použit plech tloušťky 0,4 mm. Napájení je zde provedeno L-sondou. Na Obr.5.1 je znázorněna závislost modulu činitele odrazu, kde byla vypočtena šířka frekvenčního pásma pro pokles činitele odrazu S_{11} = -10 dB rovna 800 MHz. To odpovídá 32 %. Parametrickou analýzou bylo zjištěno, že šířku pásma lze ladit délkou a výškou sondy od zářiče a také výškou vzduchové mezery mezi zářičem a reflektorem.



Obr.5. 1 Modul činitele odrazu flíčkové antény napájené L sondou.



Obr.5. 2 Flíčková anténa napájená L sondou.



Obr.5. 3 Flíčková anténa napájená L sondou – pohled z boku.

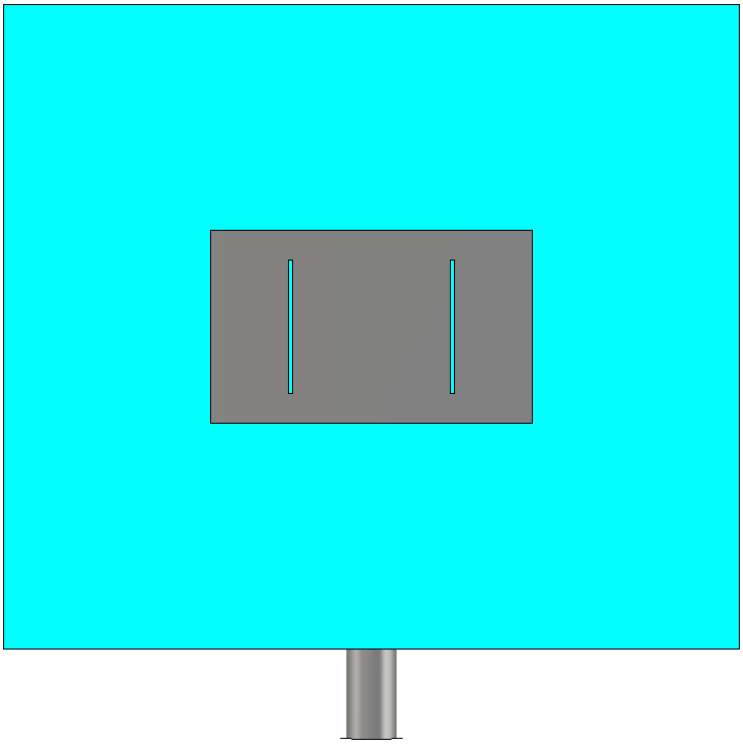
5.3 Štěrbinová II anténa

Jak je zobrazeno na Obr.5.4, tvar zářiče je obdélník, ve kterém jsou vytvořeny dvě rovnoběžné štěrbiny, na Obr.5.5 je znázorněn řez anténou. Tyto štěrbiny vyvolají vícenásobnou rezonanci, kterou se zvětší šířka frekvenčního pásma. Vzdáleností štěrbin od středu antény a jejich výškou lze anténu ladit. Zářič je umístěn na dielektrické desce, která je tvořena substrátem CuClad 217. Mezi anténou a reflektorem, který tvoří tenký plech, je vzduchová mezera. V této vzduchové mezeře je umístěn napáječ L – sonda. Délkou této sondy se mění přizpůsobení antény. Parametrickou analýzou bylo zjištěno, že anténa je nejlépe přizpůsobena pro délku napájecí sondy Lnap = 0,83 mm. Dalšími analýzami bylo také zjištěno, které parametry nejvíce ovlivňují šířku frekvenčního pásma. Tyto parametry jsou uvedeny v Tab.5.1.

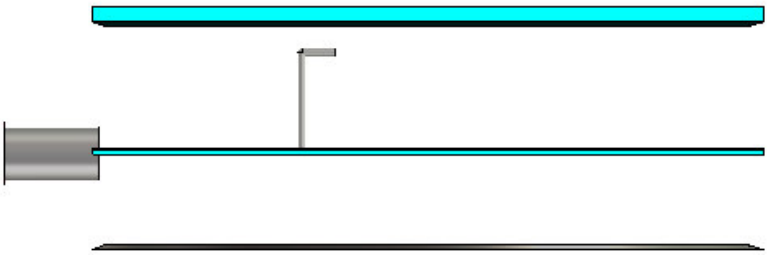
Parametr	
c1	Výška štěrbiny
d	Vzdálenost sondy od substrátu
h3	Výška napájecí sondy
Lnap	Délka napájecí sondy pod zářičem

Tab.5. 1 Přehled parametrů ovlivňující frekvenční šířku pásma.

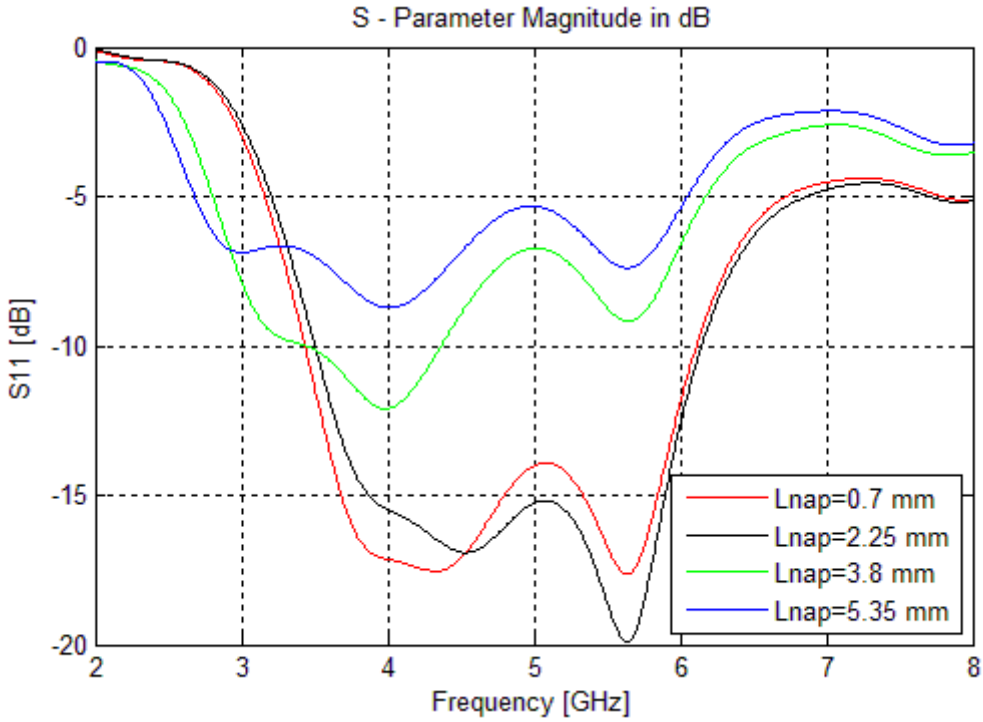
Ze závislostí modulu činitele odrazu je patrné, že největší vliv na šířku frekvenčního pásma kromě L sondy, má také výška napájecí sondy a vzdálenost sondy od substrátu, na kterém je umístěn zářič.



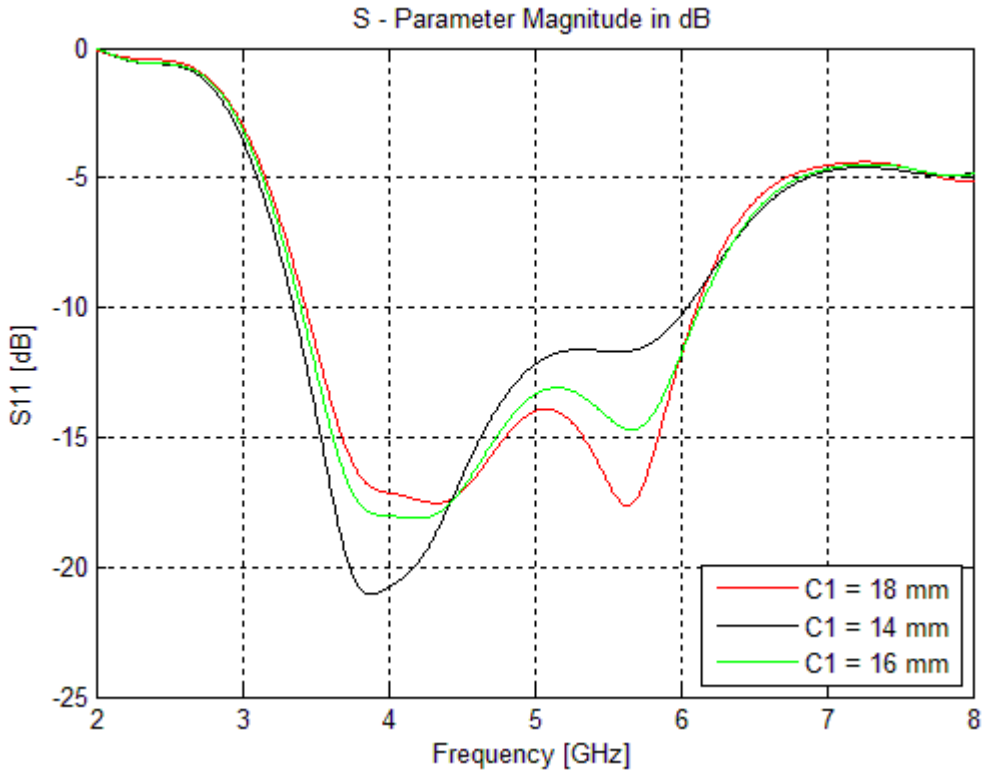
Obr.5. 4 Štěrbinová II anténa.



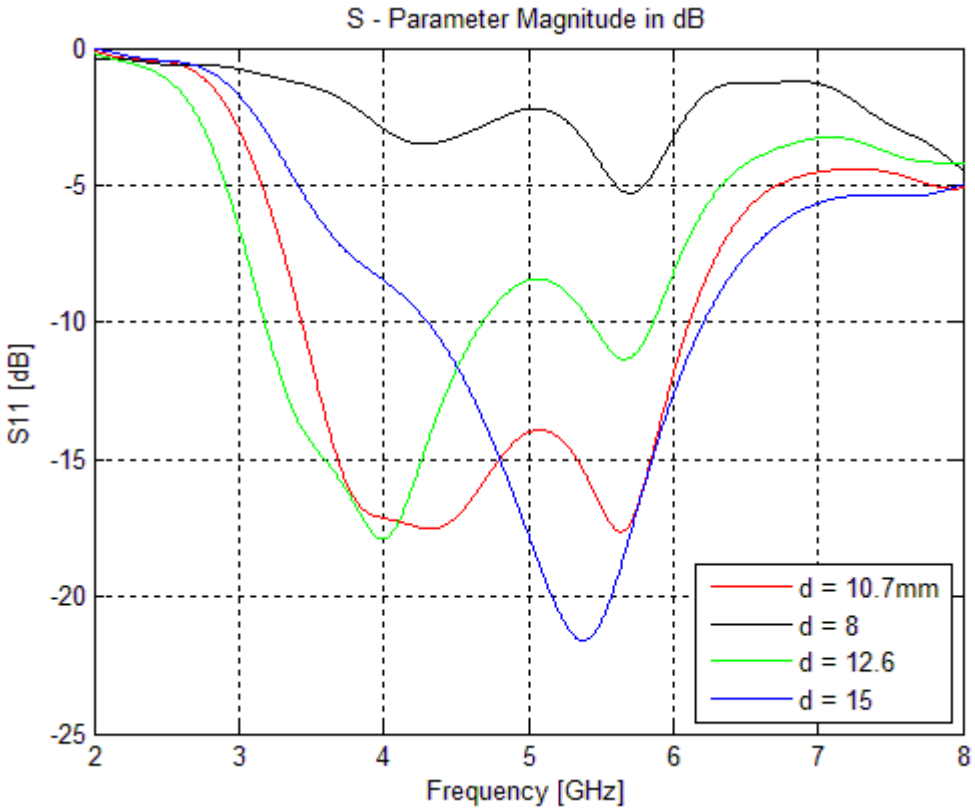
Obr.5. 5 Štěrbinová II anténa – pohled z boku.



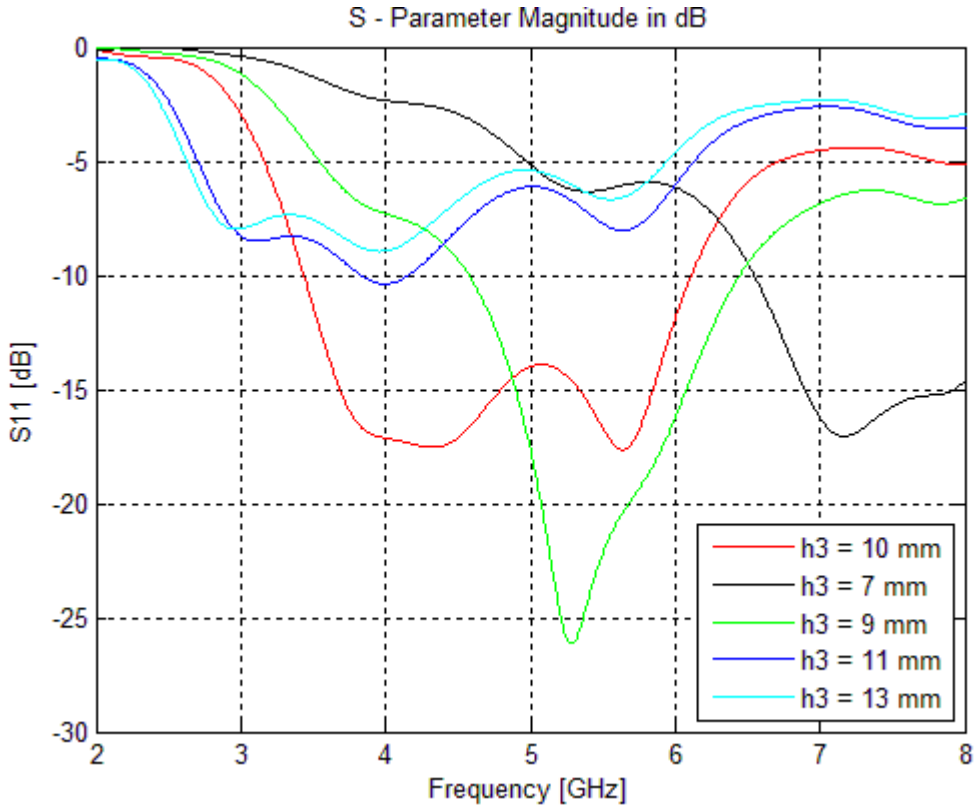
Obr.5. 6 Modul činitele odrazu v závislosti na parametru *Lnap*.



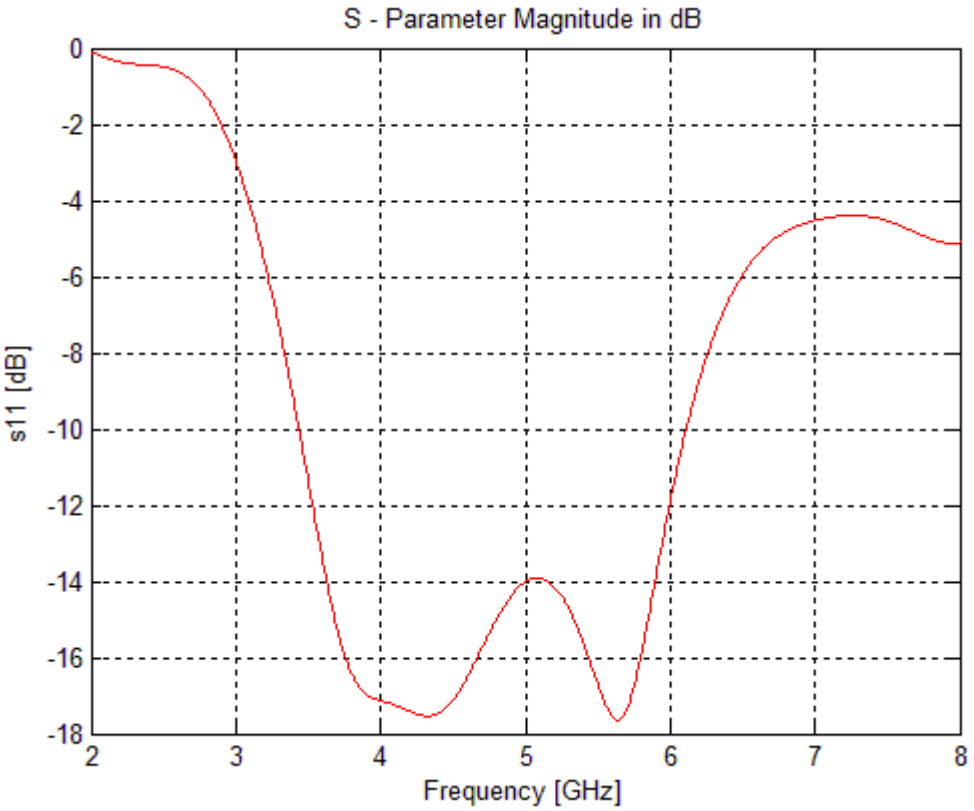
Obr.5. 7 Modul činitele odrazu v závislosti na parametru *C1*.



Obr.5. 8 Modul činitele odrazu v závislosti na parametru *d*.



Obr.5. 9 Modul činitele odrazu v závislosti na parametru *h3*.

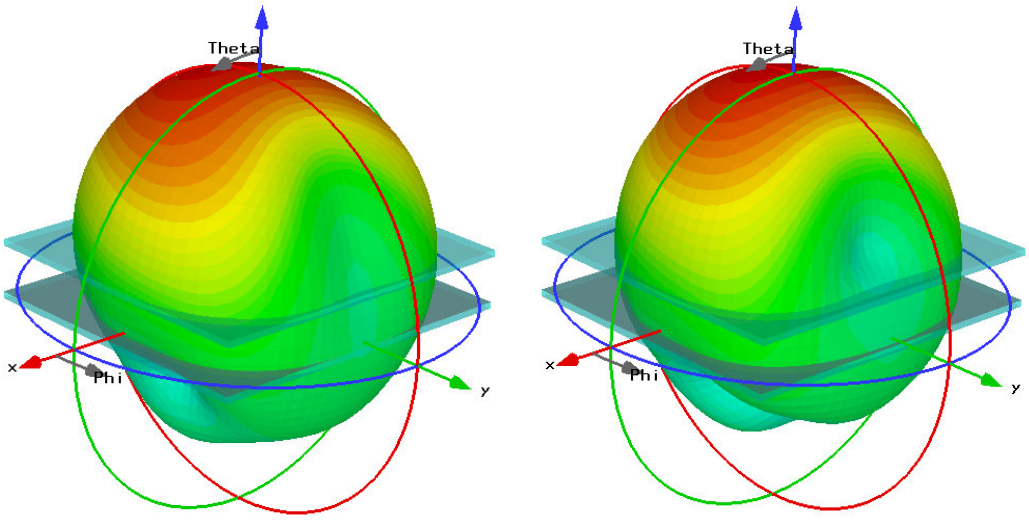


Obr.5. 10 Modul činitele odrazu štěrbinové II antény.

Tato anténa byla vybrána na základě dosažení největší šířky frekvenčního pásma. Simulací bylo dosaženo frekvenční šířky pásma 2,67 GHz v rozmezí 3,43 GHz – 6,1 GHz pro S_{11} = -10 dB, viz Obr. 5.10. To odpovídá frekvenční šířce pásma 56 %. V kapitole 3 byly uvedeny některé služby pracující ve frekvenčním pásmu 3,5 – 6 GHz. Tato anténa pokrývá všechny uvedené služby. V další kapitole se zaměříme na vybranou službu, pro kterou bude anténa rozšířena do anténní řady 2x2.

Na níže uvedených obrázcích jsou zobrazeny směrové charakteristiky štěrbinové II antény pro lepší představivost ve 3D zobrazení a dále v horizontální a vertikální polarizaci pro kmitočty od 3,5 GHz do 6 GHz. Z charakteristik je patrné, že od vyšších kmitočtů, v tomto případě od 5 GHz, se směrová charakteristika dělí na dva hlavní laloky, které jsou lehce vychýleny od osy Z. Rozštěpení hlavního laloku na vyšších frekvencích je pravděpodobně způsobeno vyzařováním štěrbin zavedených v zářiči. Z tohoto důvodu se tento typ štěrbinové antény příliš nehodí pro širokopásmovou anténní řadu. Tuto anténu lze použít pro užší pásmo než byla původně navržena.

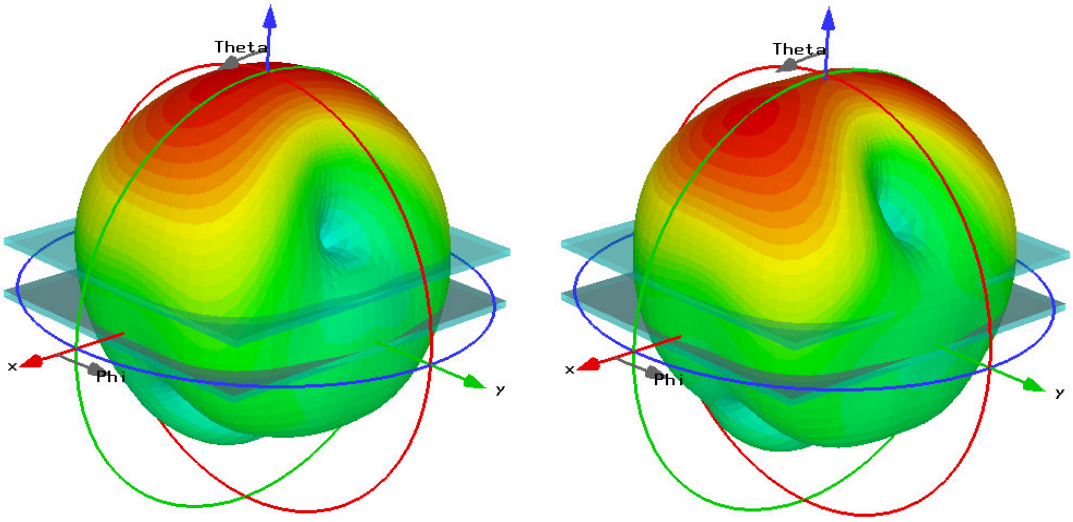
Zisk antény se pohybuje okolo 7 dB.



Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)
Monitor	farfield (f=3.5) [1]
Component	Abs
Output	Directivity
Frequency	3.5
Rad. effic.	-0.1747 dB
Tot. effic.	-0.3031 dB
Dir.	7.081 dBi

Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)
Monitor	farfield (f=4) [1]
Component	Abs
Output	Directivity
Frequency	4
Rad. effic.	0.007449 dB
Tot. effic.	-0.08627 dB
Dir.	7.808 dBi

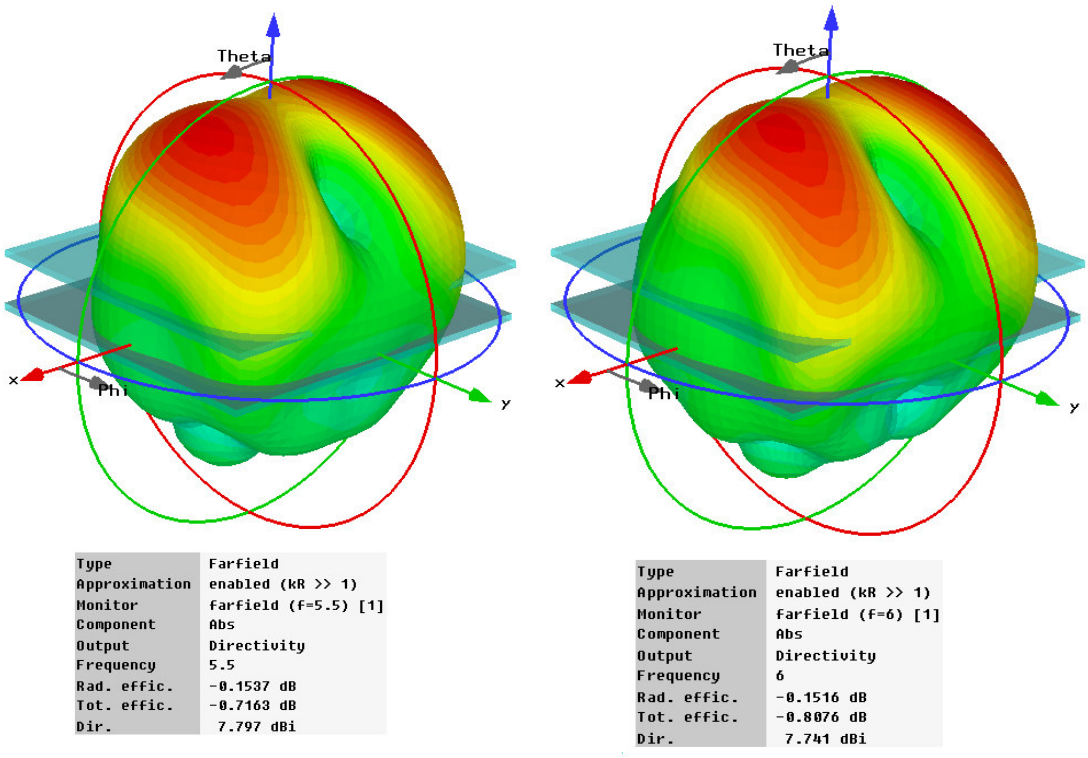
Obr.5. 11 Směrové charakteristiky štěrbinové II antény ve 3D zobrazení pro kmitočty 3,5 GHz a 4 GHz.



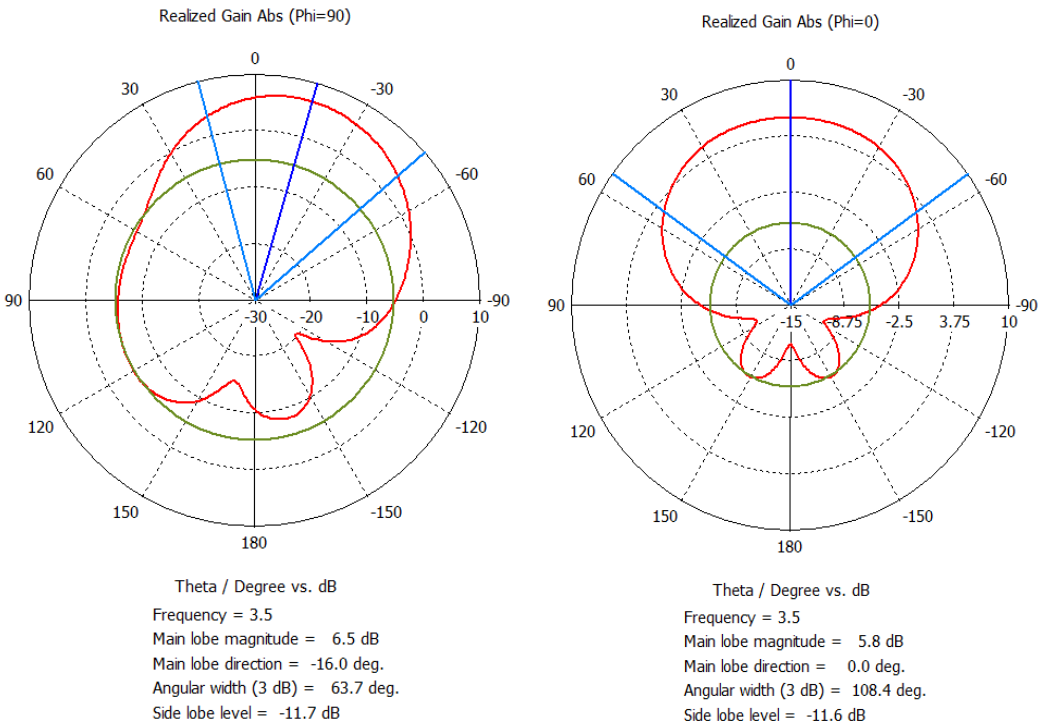
Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)
Monitor	farfield (f=4.5) [1]
Component	Abs
Output	Directivity
Frequency	4.5
Rad. effic.	-0.1424 dB
Tot. effic.	-0.1637 dB
Dir.	7.279 dBi

Type	Farfield
Approximation	enabled (kR >> 1)
Monitor	farfield (f=5) [1]
Component	Abs
Output	Directivity
Frequency	5
Rad. effic.	-0.06746 dB
Tot. effic.	-0.4190 dB
Dir.	7.075 dBi

Obr.5. 12 Směrové charakteristiky štěrbinové II antény ve 3D zobrazení pro kmitočty 4,5 GHz a 5 GHz.

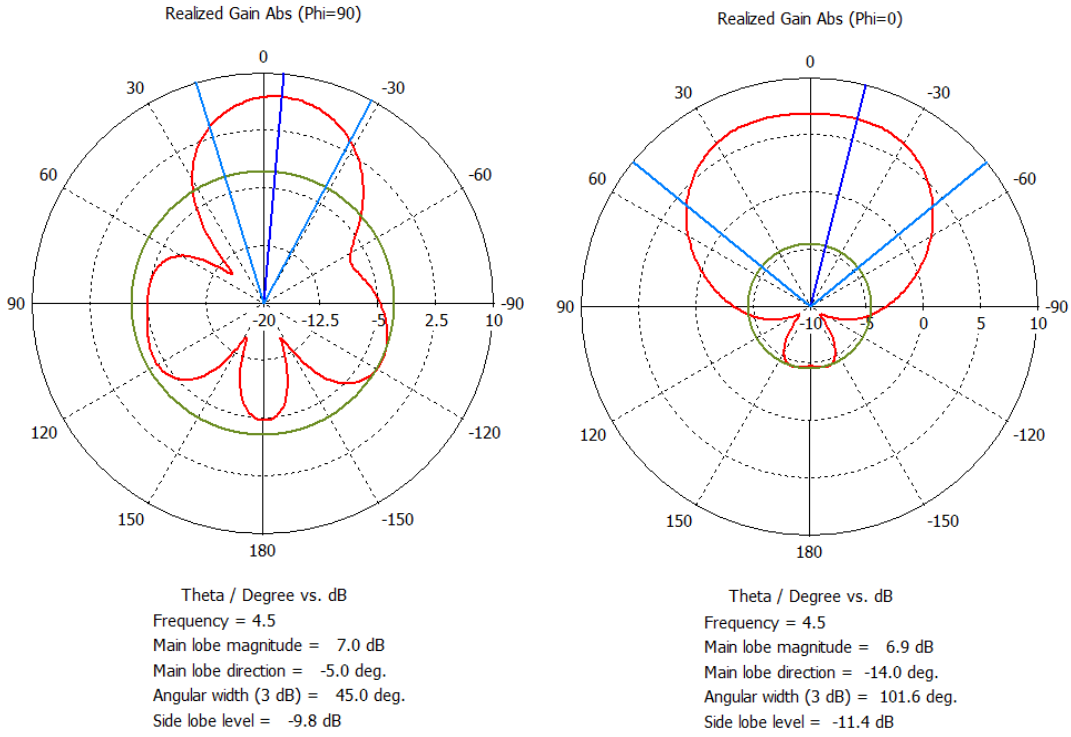


Obr.5. 13 Směrové charakteristiky štěrbinové II antény ve 3D zobrazení pro kmitočty 5,5 GHz a 6 GHz.



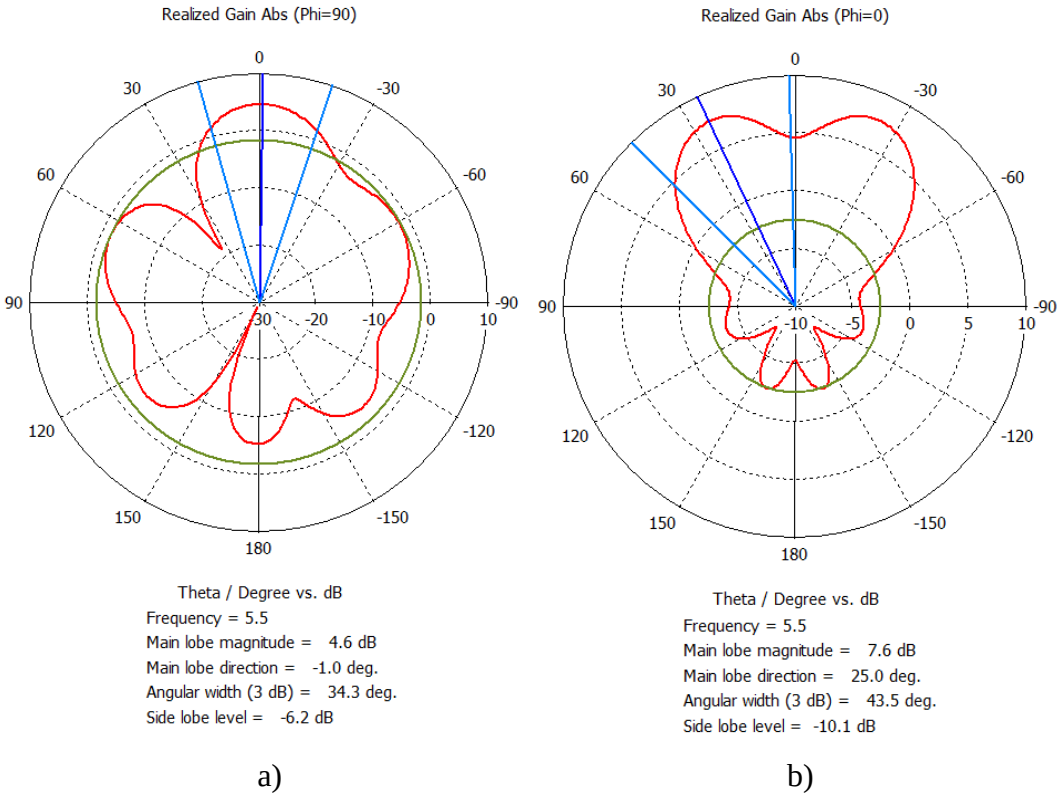
a) b)

Obr.5. 14 Směrové charakteristiky štěrbinové II antény a) vertikální polarizace b) horizontální polarizace pro kmitočet 3,5 GHz.



a) b)

Obr.5. 15 Směrové charakteristiky štěrbinové II antény a) vertikální polarizace b) horizontální polarizace pro kmitočet 4,5 GHz.



a) b)

Obr.5. 16 Směrové charakteristiky štěrbinové II antény a) vertikální polarizace b) horizontální polarizace pro kmitočet 5,5 GHz.

6 DĚLIČE VÝKONU

Jedná se o pasivní prvek, který umožňuje rozdělit výkon z jednoho vstupního vedení na různý počet výstupních vedení. Výkon může být rozdělen rovnoměrně (v poměru 1:1) nebo nerovnoměrně, tzn. každým výstupním vedením prochází rozdílný výkon. Toho lze dosáhnout rozdílnými impedancemi ramen vedení děliče. Nerovnoměrného rozdělení výkonu lze využít u anténních řad 4x4, kde jsou střední zářiče napájeny větší energií než postranní zářiče. Jedná se o jednu z metod, kterou se dají potlačit nežádoucí boční laloky.

Děliče lze rozdělit na úzkopásmové a širokopásmové. Typickým příkladem úzkopásmového děliče výkonu je obyčejný dělič ve tvaru T. Širokopásmovým zástupcem je kompenzovaný Wilkinsonův dělič, který pokrývá několikanásobně větší šířku pásma. Volba děliče je závislá na aplikaci, pro kterou bude použit.

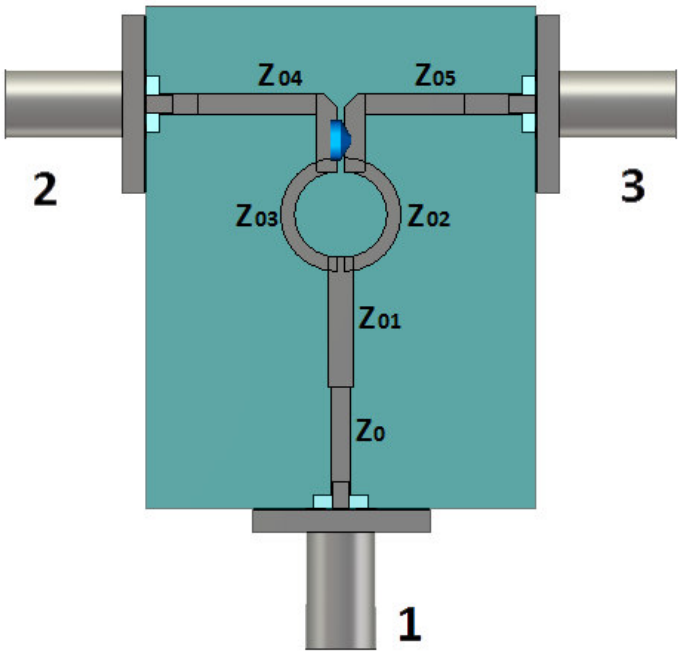
6.1 Wilkinsonův dělič

Obvyklé provedení Wilkinsonova děliče je znázorněno na Obr.6.1, který je tvořen dvěma čtvrtvlnnými vedeními o impedanci $1{,}18*Z_0$, kde Z_0 je impedance zdroje a zátěže, nejčastěji je impedance zdroje 50 Ω. Je-li přivedena energie na brány **1,** je těmito dvěma vedeními rovnoměrně rozdělena na bránu **2** a **3**. V případě, že je buzena brána **2** je v bráně **3** nulové napětí, tj. signál z brány **2** se nedostane do brány **3** a naopak. Mezi branami **2** a **3** je umístěn SMD rezistor, který brány izoluje. Uvažujeme-li, že anténa bude použita jako přijímací, energie přijde na bránu **2 (3),** kde je část odvedena přes rezistor a část se vrací s opačnou fází přes rameno čtvrtvlnného transformátoru do brány **3 (2)** a zde se energie vyruší. [7], [8], [9], [10]

Výrazného zlepšení šířky pásma se docílí zařazením impedančního transformátoru o impedanci $0{,}84*Z_0$ na vstup děliče. Toto vedení zmírní impedanční skok mezi rameny děliče.

Model kompenzovaného Wilkinsonova děliče byl namodelován s konektorem SMA na dielektrickém materiálu Taconic TLX-8 s parametry: h=0,5 mm, ε_r = 2,55 a poté byl naladěn na potřebnou šířku pásma. Frekvenční pásmo pro činitel odrazu menší než -15 dB je od 3,5 GHz do 5,8 GHz. Aby se snížilo vyzařování ostrých hran, byly hrany děliče zkoseny pod úhlem.

Na Obr.6.2 je znázorněn činitele odrazu S_{11} = 16,5 dB v pásmu 3,6 až 5,7 GHz, izolace mezi rameny S_{32} = -20dB a činitel přenosu pro obě ramena S_{21} a S_{31}. Dle teorie je S_{21} = S_{31} = 3dB, jelikož se jedná o ztrátový dělič s rovnoměrným dělením, činitele přenosu se pro obě ramena rovnají -3,2 dB.



Obr.6. 1 Kompenzovaný Wilkinsonův dělič.

<u>Výpočet impedancí:</u>

Pro poměr výkonu 1:1, m=1, Z_0=50 Ω

$$\frac{P_2}{P_1} = m^2 \qquad (6.1)$$

$$Z_{01} = Z_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{m}{1+m^2}} \qquad (6.2), \qquad Z_{01} = 50 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{1+1^2}} = \underline{\underline{42{,}04\Omega}}$$

$$Z_{02} = Z_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{1+m^2}{m^5}} \qquad (6.3), \qquad Z_{02} = 50 \cdot \sqrt[4]{\frac{1+1^2}{1^5}} = \underline{\underline{59{,}46\Omega}}$$

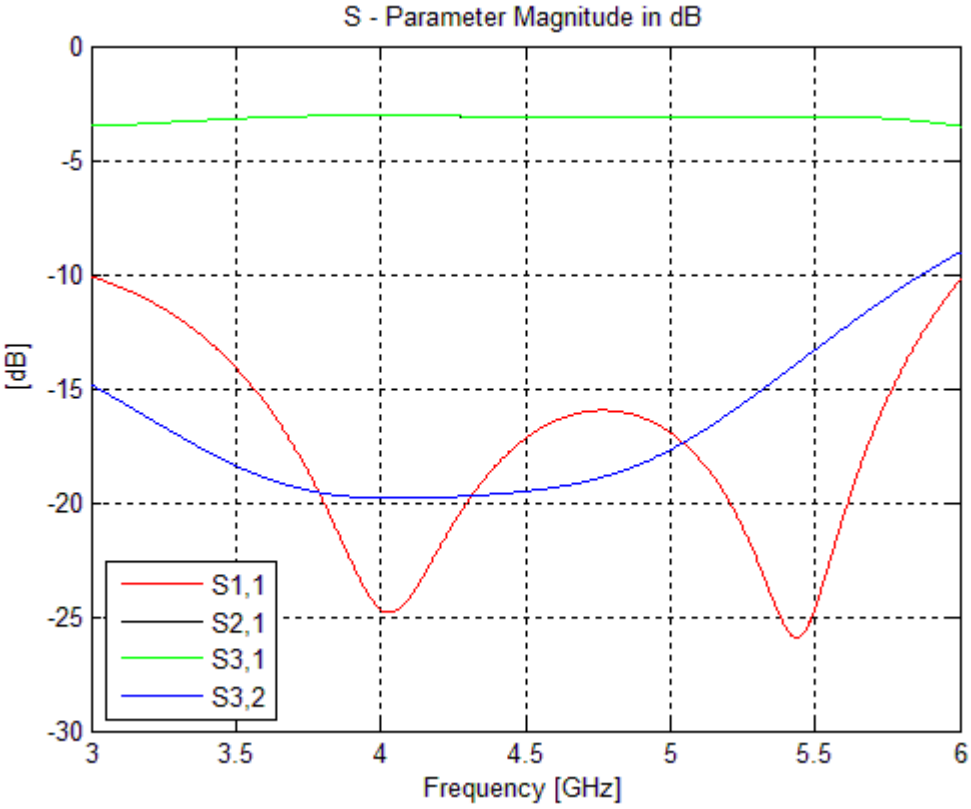
$$Z_{03} = Z_0 \cdot \sqrt[4]{m^3 \cdot (1+m^2)} \qquad (6.4), \qquad Z_{03} = 50 \cdot \sqrt[4]{1^3 \cdot (1+1^2)} = \underline{\underline{59{,}46\Omega}}$$

$$Z_{04} = \frac{Z_0}{\sqrt{m}} \qquad (6.5), \qquad Z_{04} = \frac{50}{\sqrt{1}} = \underline{\underline{50\Omega}}$$

$$Z_{05} = Z_0 \cdot \sqrt{m} \qquad (6.6), \qquad Z_{05} = 50 \cdot \sqrt{1} = \underline{\underline{50\Omega}}$$

Parametr:	Z_0	Z_{01}	Z_{02}	Z_{03}	Z_{04}	Z_{05}
Šířka mikropásku [mm]	1,4766	1,7762	1,0128	1,0128	1,4766	1,4766
Impedance [Ω]	50	42,04	59,46	59,46	50	50

Tab.6. 1 Přehled hodnot jednotlivých impedancí Wilkinsonova děliče.



Obr.6. 2 Výsledky simulace Wilkinsonova děliče.

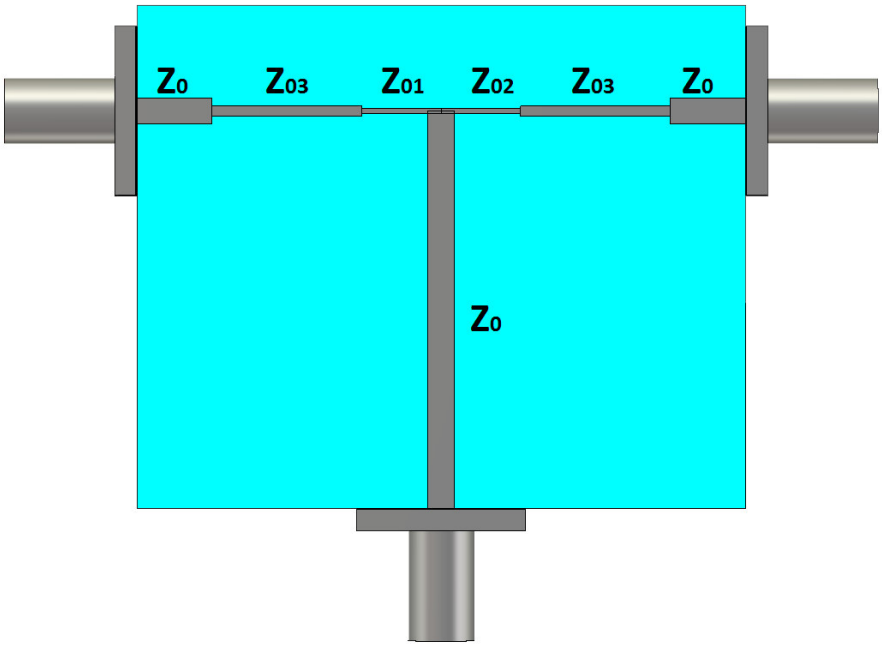
6.2 T dělič

Jedná se o dělič výkonu, kde je energie rovnoměrně rozvedena do všech ramen Z_{02}= Z_{03}=2* Z_0. Po impedancích Z_{02} a Z_{03} musí následovat úsek o délce $\lambda/4$ a impedanci 70 Ω, který transformuje impedanci zpět na 50 Ω.

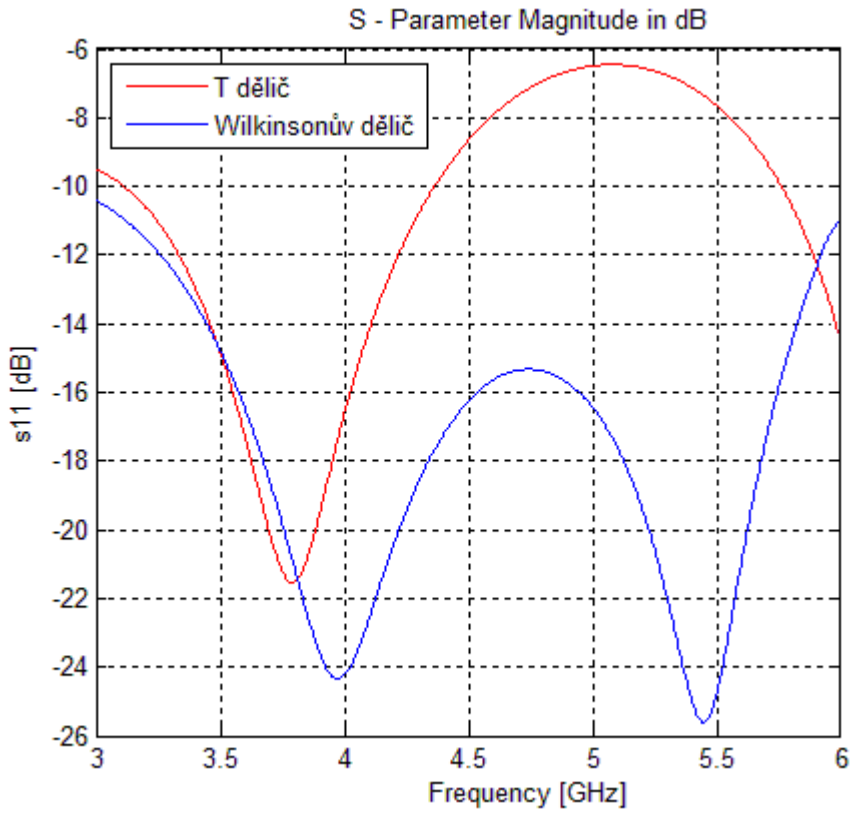
T dělič funguje stejně jako Wilkinsonův dělič, až na to, že nemá izolované výstupní porty 2 a 3, část energie z portu 2 se odrazí do portu 3, a to nepříznivě ovlivní vyzařování antény. [1], [7], [8], [9],[10]

Parametr:	Z_0	Z_{01}	Z_{02}	Z_{03}
Šířka mikropásku [mm]	1,4766	0,3377	0,3377	0,74
Impedance [Ω]	50	100	100	70

Tab.6. 2 Přehled hodnot jednotlivých impedancí T děliče.



Obr.6. 3 T dělič.

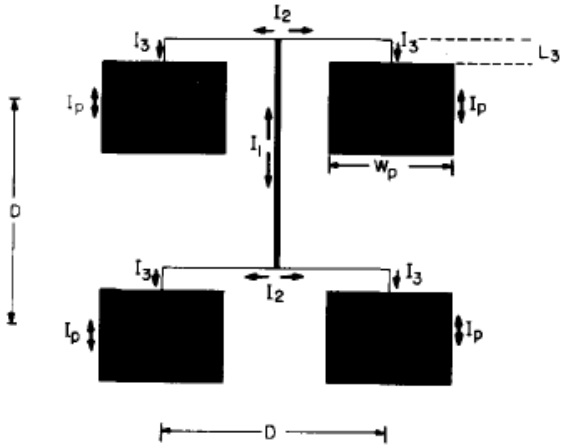


Obr.6. 4 Porovnání modulů činitele odrazu pro Wilkinsonův a T dělič.

7 ANTÉNNÍ ŘADA 2X2

Abychom zvýšili zisk antény, byla implementována do anténní řady 2x2. Pro anténní řadu byla zvolena štěrbinová II anténa, u které bylo v předchozích simulacích dosaženo šířky pásma 2,67 GHz pro činitel odrazu menší než -10 dB. Model anténní řady je znázorněn na Obr.7.3 a její řez na Obr.7.2.

Velmi důležitým parametrem u anténních řad je vzdálenost *D* mezi zářiči ve směru X a Y. Dle studií by tato vzdálenost měla být minimálně $D=\lambda/2$ a maximálně $D=\lambda$. Ideální je volit tuto vzdálenost $D=0{,}8\cdot\lambda$. Pokud se hodnota *D* zvolí příliš velká nebo malá, budou ve směrové charakteristice vznikat boční laloky kvůli vazbě mezi zářiči. Vzdálenost *D* je znázorněna na anténní řadě viz. Obr.7.1, dále jsou naznačeny směry proudů na napájecí síti.[11]



Obr.7. 1 Náčrt anténní řady 2x2 a rozložení proudů v napájecí síti. [10]

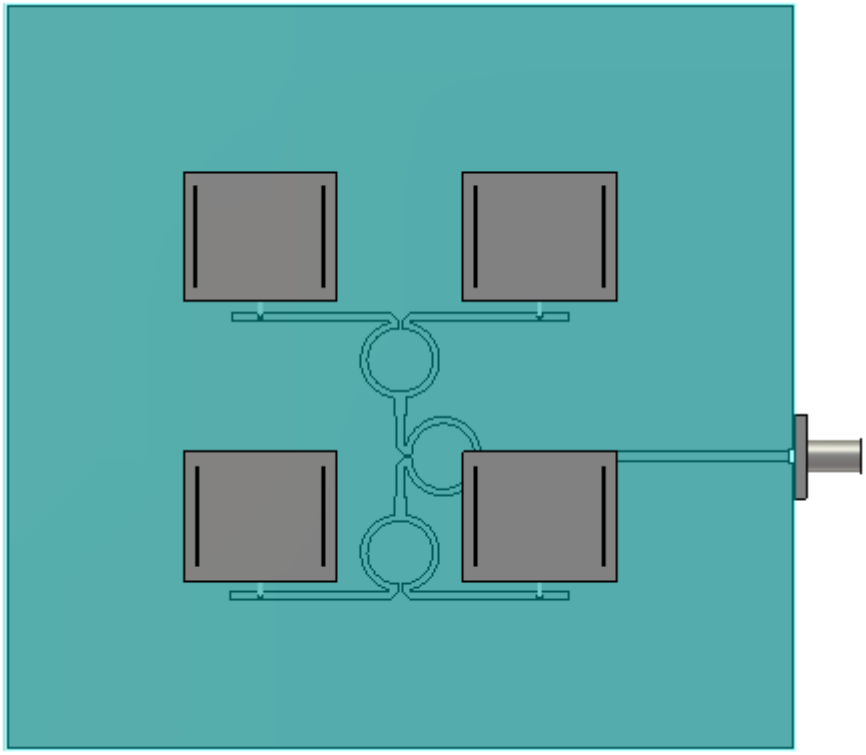
<u>*Výpočet vzdálenosti D:*</u>

Výpočet vychází z předchozí simulace II antény, jak je vidět na Obr.5.10, kde bylo dosažena šířky pásma 2,67 GHz v rozmezí 3,43 GHz – 6,1 GHz pro S_{11} = -10dB. Z tohoto pásma byla určena střední frekvence f_c= 4,75 GHz, pro tuto hodnotu byla také vypočtena optimální vzdálenost D.

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{3\cdot 10^8}{4{,}75\cdot 10^9} = 0{,}0566m = 56{,}6mm \tag{6.7}$$

$$D = 0{,}8\cdot\lambda_c = 0{,}8\cdot 56{,}6 = 45mm \tag{6.8}$$

Obr.7. 2 Model anténní řada 2x2 – pohled z boku.

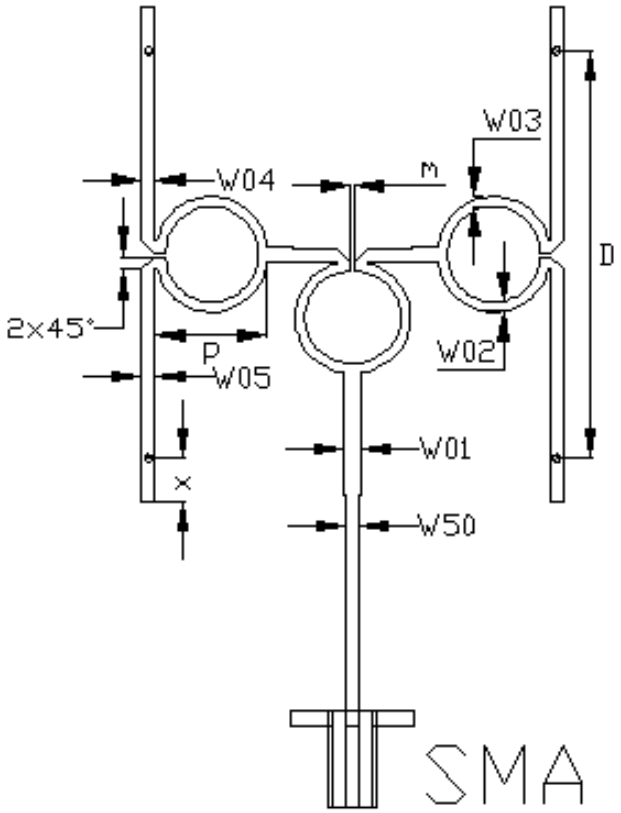


Obr.7. 3 Model anténní řady 2x2 – pohled ze shora.

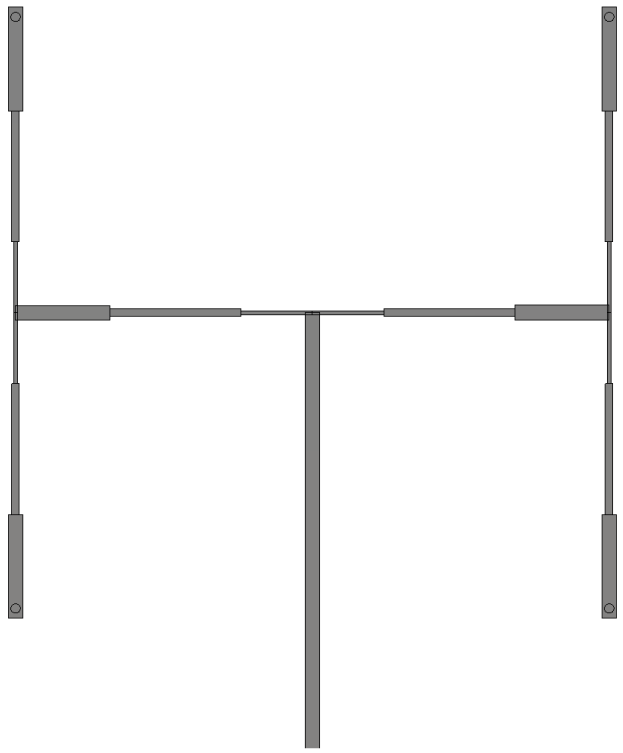
7.1 Napájecí síť

Napájecí síť anténní řady byla navržena a namodelována na substrát, který je dostupný na URELu. Jedná se o dielektrický materiál Taconic TLX-8 s parametry: h=0,5 mm, ε_r = 2,55. Tento substrát byl použit z důvodu jeho nízké výšky, na kterém má 50 Ω vedení šířku 1,4 mm. Kdyby byl použit substrát CuClad 217, 50 Ω vedení by dosahovalo šířky 4,57 mm. S takto širokým vedením by napájecí síť složenou ze tří kompenzovaných Wilkinsonových děličů nebylo možné realizovat – děliče by se pod anténní řadu neposkládaly.

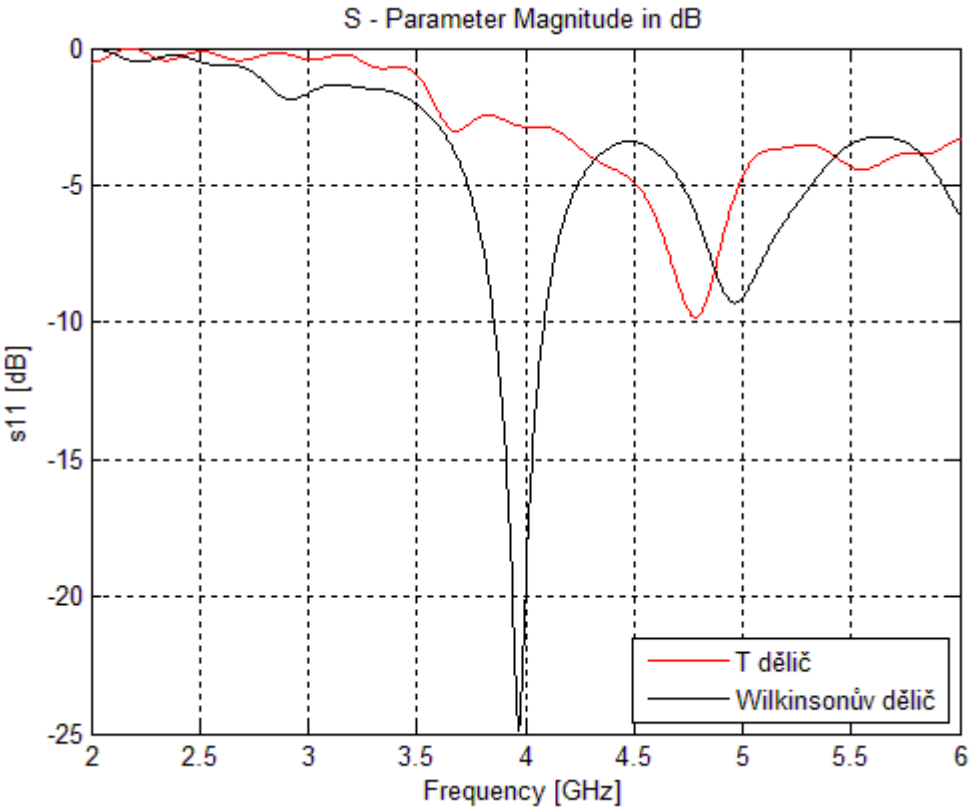
Aby mohly být antény napájeny rovnoměrným výkonem u anténní řady 2x2, je zapotřebí tří děličů. Pro pokrytí frekvenčního pásma od 4,4 – 5 GHz, byl vybrán kompenzovaný Wilkinsonův dělič, který je širokopásmový a má dostatečné přizpůsobení na požadovanou šířku pásma. Na Obr.7.4 a Obr.7.5 je pro porovnání znázorněna napájecí síť složená z T a Wilkinsonových děličů.



Obr.7. 4 Napájecí síť anténní řady 2x2 realizovaná Wilkinsonovými děliči.



Obr.7. 5 Napájecí síť anténní řady 2x2 realizovaná T děliči.



Obr.7. 6 Modul činitele odrazu nenaladěné anténní řady 2x2.

Implementací štěrbinové II antény za použití Wilkinsonova děliče výkonu do anténní řady dojde k celkovému rozladění. To je možno pozorovat na Obr.7.6, kde je zobrazen modul činitele odrazu pro napájecí síť tvořenou Wilkinsonovými děliči a pro porovnání i napájecí síť tvořenou T děliči. V závislosti můžeme pozorovat u napájecí sítě tvořenou Wilkinsonovými děliči průběh dvou rezonancí na kmitočtu 4 a 5 GHz, použitím vhodné optimalizační metody (spojením daných rezonancí), lze dosáhnout dobrého impedančního přizpůsobení pro zvolené pásmo.

8 OPTIMALIZACE

8.1 Anténní řada 2x2

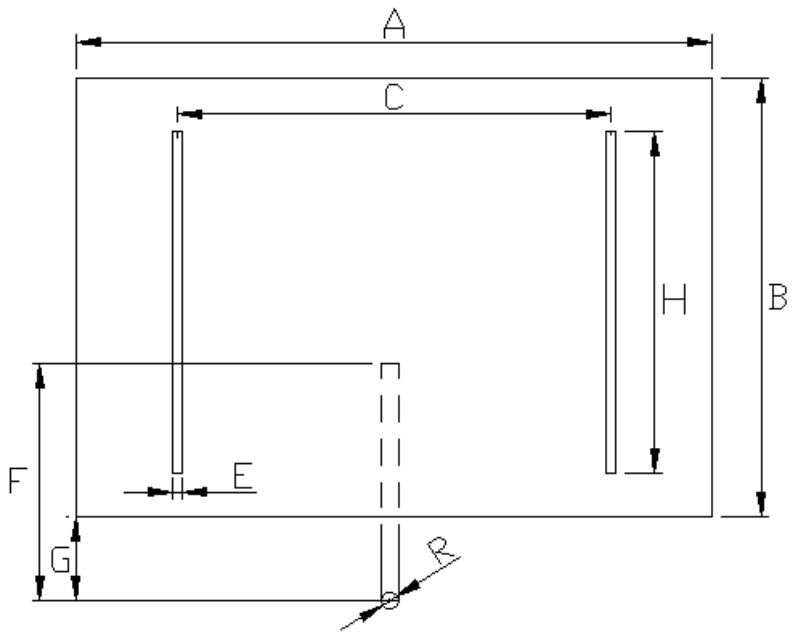
Anténa byla namodelována v programu CST MWS a pro její optimalizaci byly použity následující metody: Genetic Algorithm, jedná se o globální metodu, která byla použita k hrubému naladění antény do pásma. Pro jemné doladění byla použita lokální metoda Nelder Mead Simplex. U optimalizace volíme počáteční a konečnou frekvenci pro zadaný činitel odrazu, dále volíme parametry, které se budou optimalizovat, a jejich rozsah, v kterém se budou měnit. Parametry, které mají na naladění největší vliv jsou:

U antény:

Parametr	
A	Šířka zářiče
B	Výška zářiče
C	Vzdálenost štěrbin
E	Šířka štěrbiny
F	Délka L sondy
G	Přesah L sondy od zářiče
H	Výška štěrbin
H3	Vzdálenost mezi zářičem a zemnící plochou
H4	Vzdálenost L sondy od zářiče
R	Průměr L sondy

Tab.8. 1 Přehled parametrů antény.

Obr.8. 1 Nákres II antény – pohled z boku.



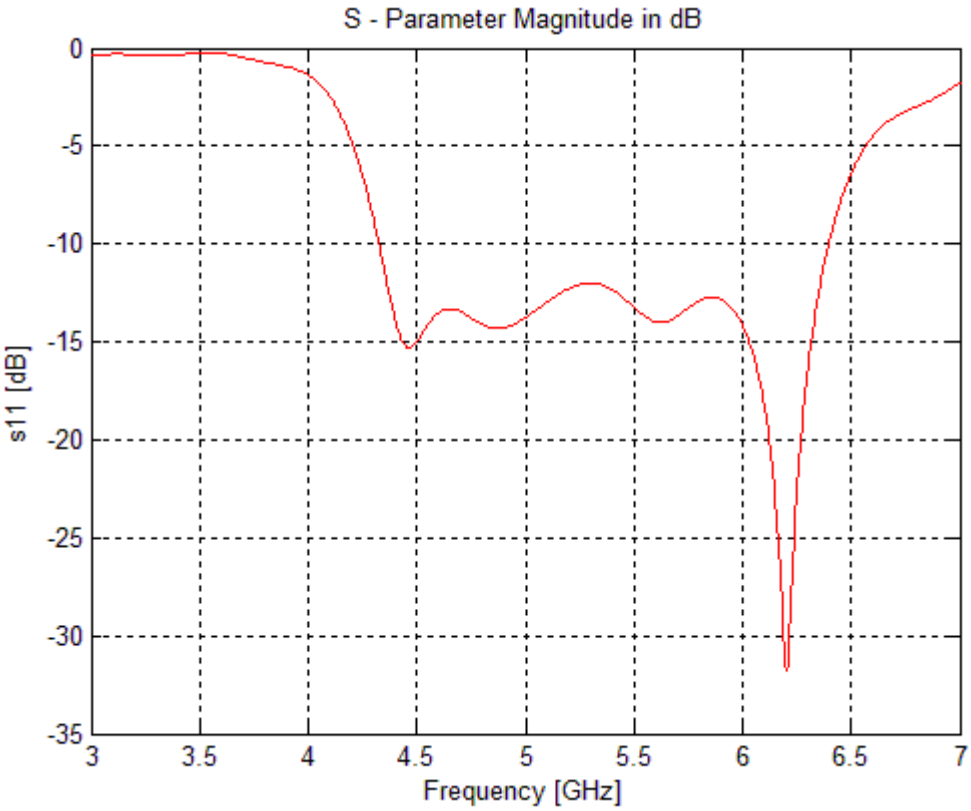
Obr.8. 2 Nákres II antény – pohled s hora.

U děliče:

Parametr	
D	Vzdálenost mezi zářiči
m	Mezera mezi rameny děliče
p	Výška ramen děliče
W01	Šířka mikropáskového vedení
W02 = W03	Šířka ramen mikropáskového vedení
W04 = W05	Šířka mikropáskového vedení k napaječi
W50	Šířka mikropáskového vedení
x	Přesah mikropásku od napáječe.

Tab.8. 2 Přehled parametrů děliče.

Na Obr.7. 4 je znázorněna napájecí síť pro anténní řadu 2x2, kde jsou okótovány parametry děliče, které byly optimalizovány. Dále jsou tyto parametry popsány v Tab.8.2.



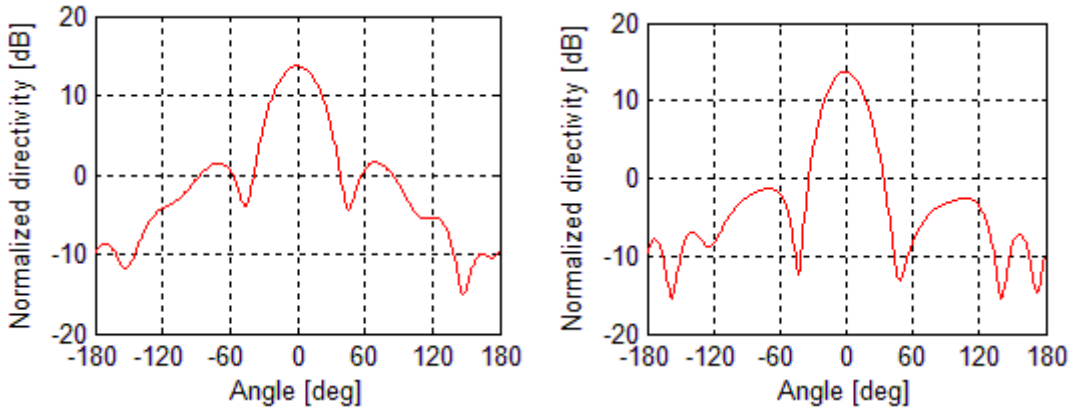
Obr.8. 3 Kmitočtová závislost činitele odrazu naladěné anténní řady 2x2.

Na Obr.8.3 je znázorněn modul činitele odrazu pro zoptimalizovanou anténní řadu 2x2. Optimalizací bylo dosaženo frekvenční šířky pásma 2,1 GHz v rozmezí 4,3 GHz – 6,4 GHz pro S_{11} = -10dB.

Ze směrových charakteristik je patrné, že od vyšších kmitočtů se směrová charakteristika dělí na více laloků, které jsou vychýleny od osy Z. Tyto laloky jsou způsobeny vazbou mezi zářiči a jsou ovlivněny především vzdáleností *D*. Zisk anténní řady se pohybuje okolo 14 dB. Podle teoretických poznatků z [11] se zisk anténní řady zvýší o 6 dBi oproti samostatné anténě.

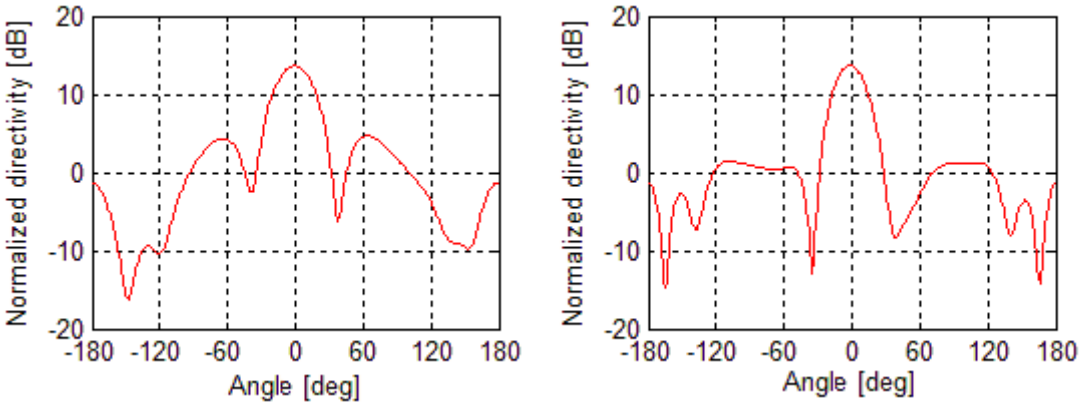
Frekvence [GHz]	Zisk anténní řady [dB]
4,5	13,7
5,25	13,6
6	13,4

Tab.8. 3 Zisk anténní řady.



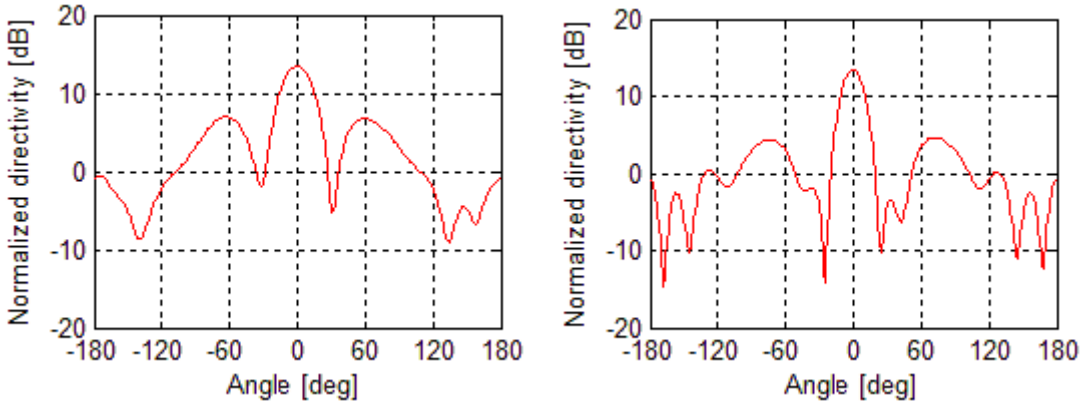
(a) (b)

Obr.8. 4 Směrové charakteristiky anténní řady pro 4,5 GHz: (a) Horizontálním směru, (b) vertikálním směru.



(a) (b)

Obr.8. 5 Směrové charakteristiky anténní řady pro 5,25 GHz: (a) Horizontálním směru, (b) vertikálním směru.

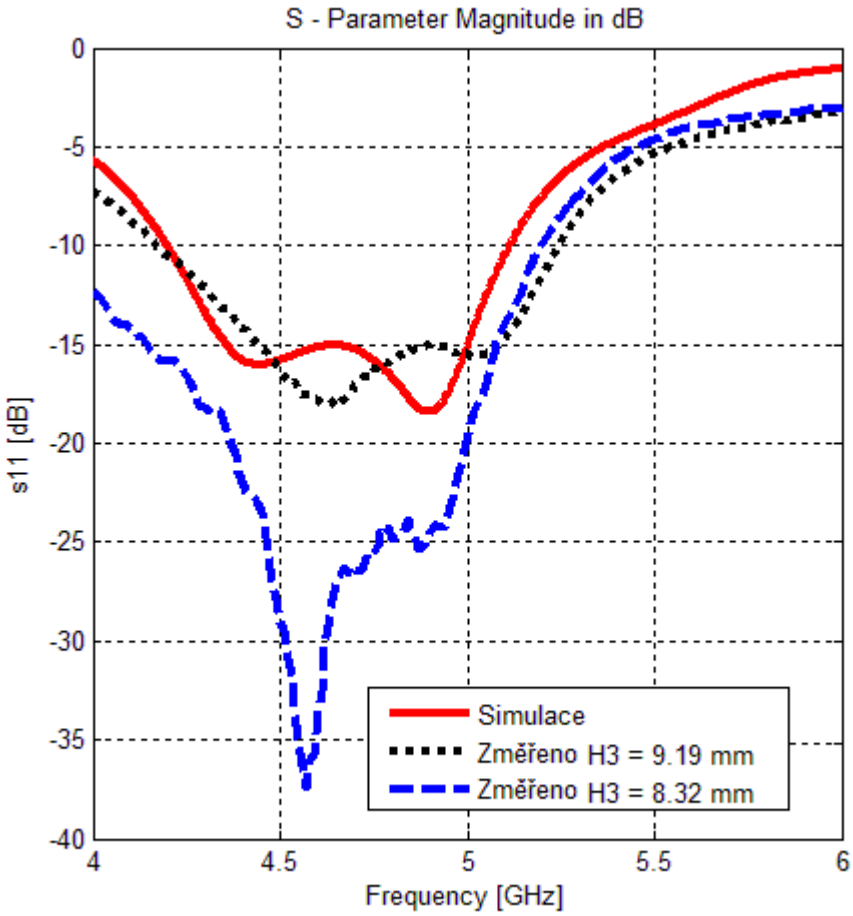


(a) (b)

Obr.8. 6 Směrové charakteristiky anténní řady pro 6 GHz: (a) Horizontálním směru, (b) vertikálním směru.

8.2 Anténní řada 2x2 pro pásmo 4,4 GHz až 5 GHz

V této kapitole, bude anténní řada naladěna na pásmo v rozmezí 4,4 až 5 GHz, tomu odpovídá šířka pásma 12,6 %. Toto pásmo je určeno pro příjem digitálního TV signálu nebo pro jeho distribuci, kterou využívá služba WHDI. U této anténní řady budeme vycházet z předchozího modelu II antény. Velkou nevýhodou širokopásmových antén jsou vznikající postraní laloky. Oproti předchozí kapitole, která je zaměřena na naladění anténní řady na co největší šířku pásma s dobrým přizpůsobením, se tato kapitola bude zabývat naladěním antény na konkrétní pásmo a potlačení vznikajících postraních laloků.



Obr.8. 7 Kmitočtová závislost činitele odrazu anténní řady 2x2 pro příjem TV signálu.

Frekvence [GHz]	Zisk anténní řady [dB]
4,4	13,4
4,7	13,4
5	13,5

Tab.8. 4 Zisk anténní řady v pásmu 4,4 až 5 GHz.

Na Obr.8.7 je porovnána simulace s naměřenými hodnotami vyrobené anténní řady. Na anténní řadě byla nejdříve nastavena výška H3 = 10, 73 mm dle simulace. S touto výškou mezi substráty bylo změřeno impedanční přizpůsobení S_{11} = -15 dB v požadovaném pásmu 4,4 až 5 GHz. Naměřené hodnoty se téměř shodují se simulací, šířka pásma se od simulace lehce posunula doprava. Experimentální změnou výšky H3, bylo při měření dosaženo mnohem lepšího přizpůsobení, a to S_{11} = -20 dB v pásmu 4,4 až 5 GHz.

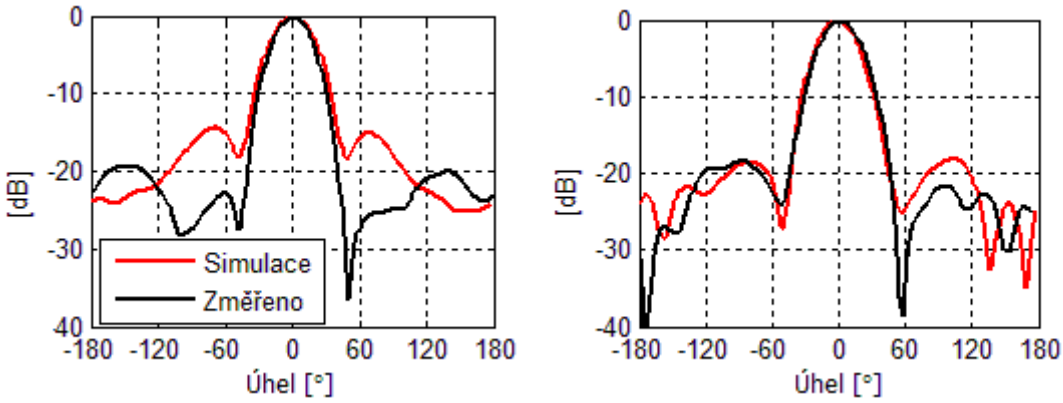
Tab.8.5 obsahuje výsledky hodnot parametrů použité v optimalizaci. Tabulka je rozdělena na parametry pro anténu a pro dělič. Význam jednotlivých parametrů je znázorněn na Obr.7.4, Obr.8.1 a Obr.8.2.

Parametr	**Hodnota [mm]**	**Parametr**	**Hodnota [mm]**
Antény		**Děliče**	
A	22.99	D	42
B	19.48	m	0.44
C	19.50	p	11.2
E	0.48	W01	1.75
F	4.51	W02 = W03	1.01
G	2.24	W04 = W05	1.35
H	14.75	W50	1.35
H3	10.73	x	4.63
H4	8.07		
R	0.8		

Tab.8. 5 Přehled zoptimalizovaných parametrů.

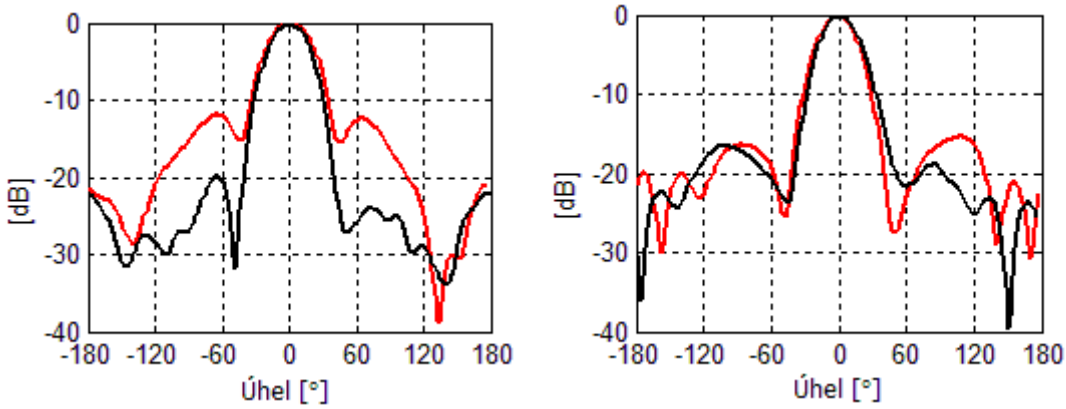
Frekvence [GHz]	**Potlačení [dB]**			
	simulace		**změřeno**	
	horizontálním směru	vertikálním směru	horizontálním směru	vertikálním směru
4,4	-14,3	-18,3	-18,3	-18,21
4,75	-11,6	-14,9	-19,15	-16,28
5	-10,6	-14,1	-17,73	-15,51

Tab.8. 6 Potlačení bočních laloků anténní řady 2x2.



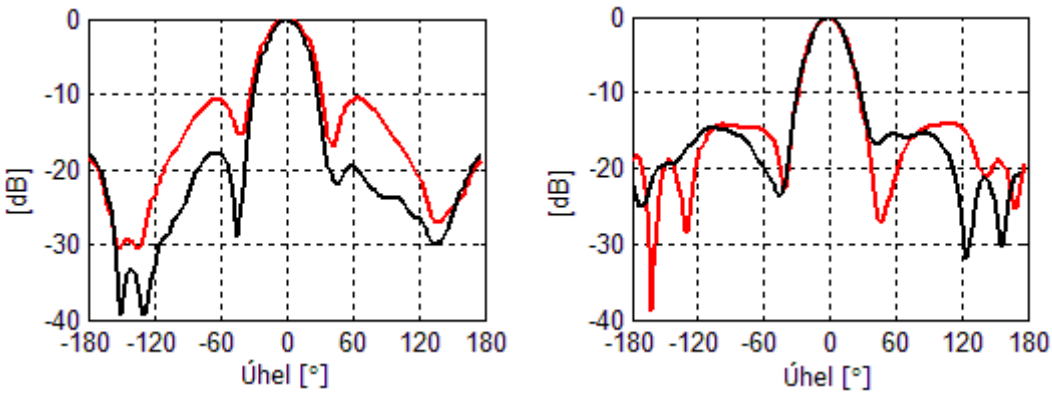
(a) (b)

Obr.8. 8 Směrové charakteristiky anténní řady pro 4,4 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru.



(a) (b)

Obr.8. 9 Směrové charakteristiky anténní řady pro 4,7 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru.



(a) (b)

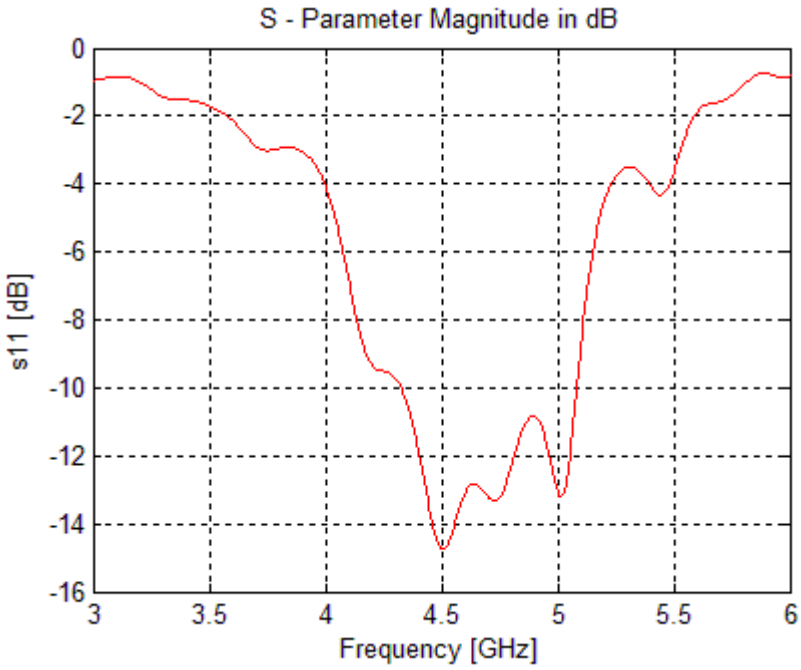
Obr.8. 10 Směrové charakteristiky anténní řady pro 5 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru.

V Tab.8.6 je porovnáno potlačení bočních laloků při simulaci a při měření. Dle naměřených hodnot, došlo k výraznému zlepšení potlačení bočních laloků v horizontálním směru, a to o 8 dB oproti simulaci. Tato odchylka muže být způsobena nedokonalým měřením. Ve vertikálním směru hodnoty odpovídají simulaci. Porovnání směrových charakteristik je na Obr.8.9 až Obr.8.11, jedná se o normované amplitudy. Anténní řada je velmi směrová.

8.3 Anténní řada 4x4 pro pásmo 4,4 GHz až 5 GHz

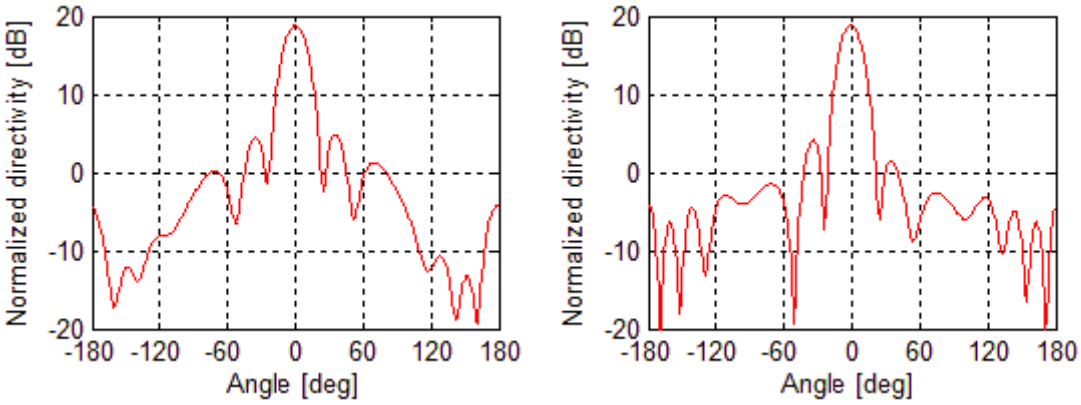
8.3.1 Rovnoměrné amplitudové rozdělení

Pro větší zisk antény, byla anténa implementována do anténní řady 4x4. Zisk řady 4x4 by se měl teoreticky pohybovat okolo 19 dB. Napájecí síť je složena s Wilkinsonových děličů s dělícím poměrem 1:1, stejným jako u řady 2x2, takže všechny zářiče jsou napájeny stejnou energií. Takto velká řada při simulaci v CST MWS obsahuje velký počet buněk (4,5 mil). Po namodelování anténní řady byly pro zkrácení doby výpočtů nastaveny parametry z zoptimalizované anténní řady 2x2. Tímto nastavením bylo v požadovaném pásmu docíleno horšího přizpůsobení. Dále bylo optimalizováno pouze přizpůsobení lokální metodou Nelder Mead Simplex.



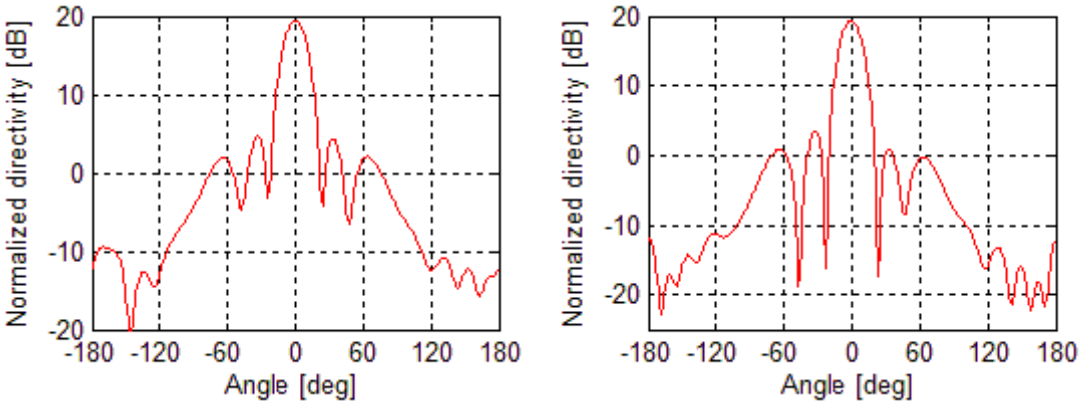
Obr.8. 11 Kmitočtová závislost činitele odrazu anténní řady 4x4 s rovnoměrným amplitudovým rozložením.

Na Obr.8.12. je znázorněno impedanční přizpůsobení anténní řady 4x4, kde bylo dosaženo S_{11} = -11 dB v požadovaném pásmu. Tato kapitola není soustředěna na optimalizování přizpůsobení, ale na potlačení vznikajících postraních laloků. Na Obr.8.13 až Obr.8.15 jsou znázorněny směrové charakteristiky pro kmitočty 4,4, 4,7 a 5 GHz.



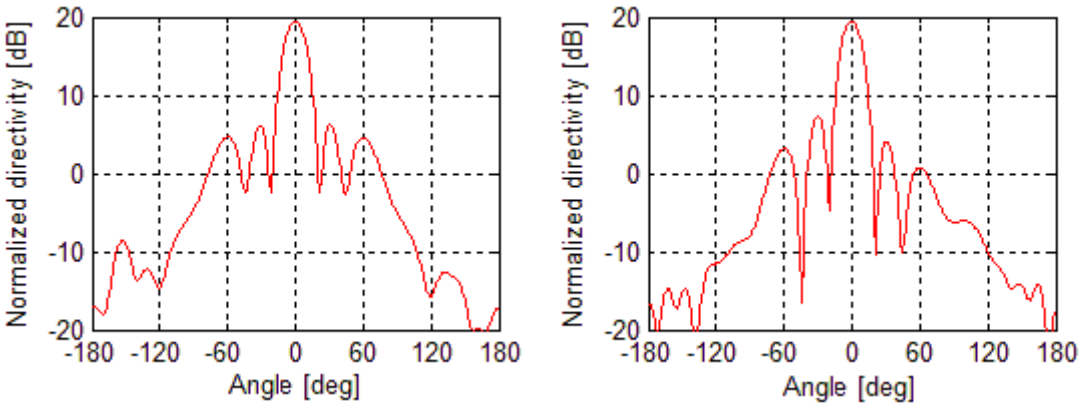
(a) (b)

Obr.8. 12 Směrové charakteristiky anténní řady pro 4,4 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru.



(a) (b)

Obr.8. 13 Směrové charakteristiky anténní řady pro 4,7 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru.

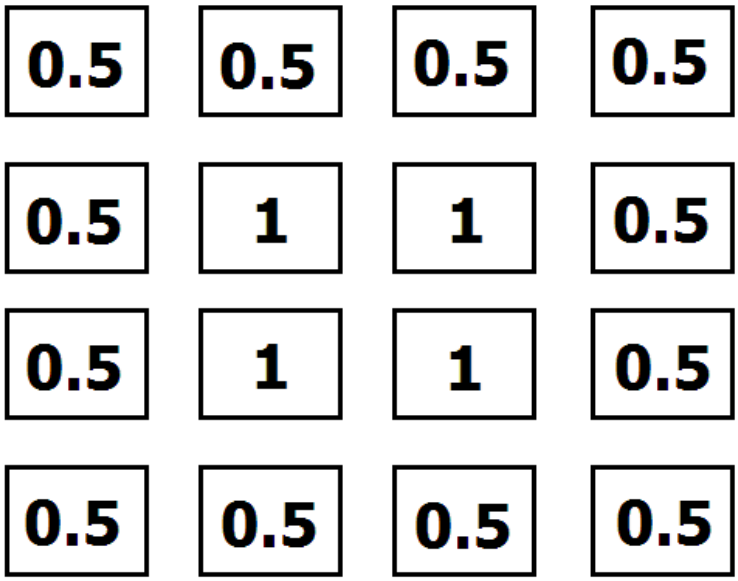


(a) (b)

Obr.8. 14 Směrové charakteristiky anténní řady pro 5 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru.

8.3.2 Nerovnoměrné amplitudové rozdělení

Na výpočet nerovnoměrného amplitudového rozdělení existují jisté složité postupy doložené matematickými výpočty. Zde k tomu byl použit jednoduchý nástroj Farfield Calculation of Antenna Arrays, který je obsažen v CST. Pro potlačení bočních laloků, zde bylo experimentálně vyzkoušeno napájení zářičů s nerovnoměrným amplitudovým rozdělením podle Obr.8.16, tzn. prostřední zářiče jsou napájeny větší energií než postranní zářiče. Teoreticky se takto sníží vyzařování postranních zářičů, a tím dojde k potlačení bočních laloků vůči hlavnímu svazku. K takovému rozložení je zapotřebí tří rozdílných Wilkinsonových děličů, a to v poměru 1:1, 1:1,5 a 1:2.



Obr.8. 15 Nákres rozložení amplitudy v anténní řadě.

<u>Výpočty impedancí děličů</u>:

Pro poměr ramen **1:1,5**, m=0,66, Z_0=50 Ω

$$\frac{P_2}{P_1} = m^2$$

$$Z_{01} = Z_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{m}{1+m^2}} \qquad Z_{01} = 50 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{1+0{,}66^2}} = \underline{\underline{41{,}21\Omega}}$$

$$Z_{02} = Z_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{1+m^2}{m^5}} \qquad Z_{02} = 50 \cdot \sqrt[4]{\frac{1+0{,}66^2}{0{,}66^5}} = \underline{\underline{91\Omega}}$$

$$Z_{03} = Z_0 \cdot \sqrt[4]{m^3 \cdot (1+m^2)} \qquad Z_{03} = 50 \cdot \sqrt[4]{0{,}66^3 \cdot (1+0{,}66^2)} = \underline{\underline{40{,}44\Omega}}$$

$$Z_{04} = \frac{Z_0}{\sqrt{m}} \qquad Z_{04} = \frac{50}{\sqrt{0{,}66}} = \underline{\underline{61{,}23\Omega}}$$

$$Z_{05} = Z_0 \cdot \sqrt{m} \qquad Z_{05} = 50 \cdot 0{,}66 = \underline{\underline{40{,}82\Omega}}$$

Parametr:	Z_{01}	Z_{02}	Z_{03}	Z_{04}	Z_{05}
Šířka mikropásku [mm]	41,21	91	40,44	61,23	40,82
Impedance [Ω]	1,97	0,51	2,03	1,084	2

Tab.8. 7 Přehled hodnot jednotlivých impedancí Wilkinsonova děliče s dělícím poměrem 1:1,5.

Pro poměr ramen **1:2**, m=0,5, Z_0=50 Ω

$$\frac{P_2}{P_1} = m^2$$

$$Z_{01} = Z_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{m}{1+m^2}} \qquad Z_{01} = 50 \cdot \sqrt[4]{\frac{0,5}{1+0,5^2}} = \underline{\underline{39,76\Omega}}$$

$$Z_{02} = Z_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{1+m^2}{m^5}} \qquad Z_{02} = 50 \cdot \sqrt[4]{\frac{1+0,5^2}{0,5^5}} = \underline{\underline{126\Omega}}$$

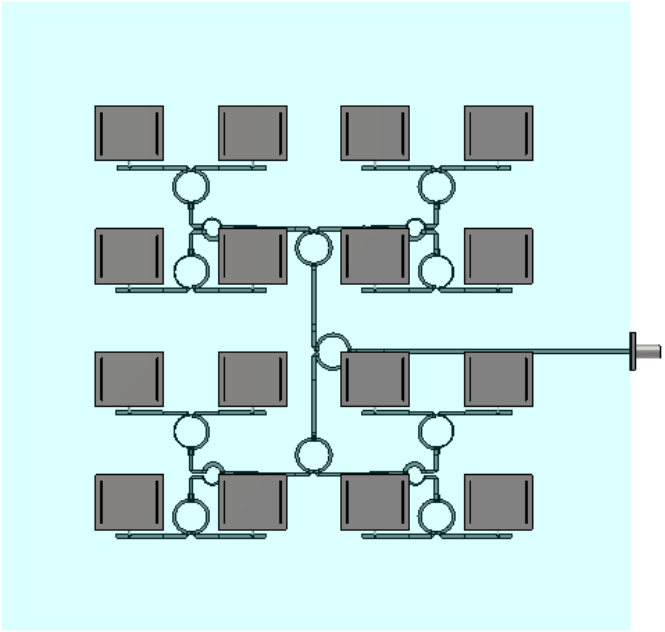
$$Z_{03} = Z_0 \cdot \sqrt[4]{m^3 \cdot (1+m^2)} \qquad Z_{03} = 50 \cdot \sqrt[4]{0,5^3 \cdot (1+0,5^2)} = \underline{\underline{31,43\Omega}}$$

$$Z_{04} = \frac{Z_0}{\sqrt{m}} \qquad Z_{04} = \frac{50}{\sqrt{0,5}} = \underline{\underline{70,71\Omega}}$$

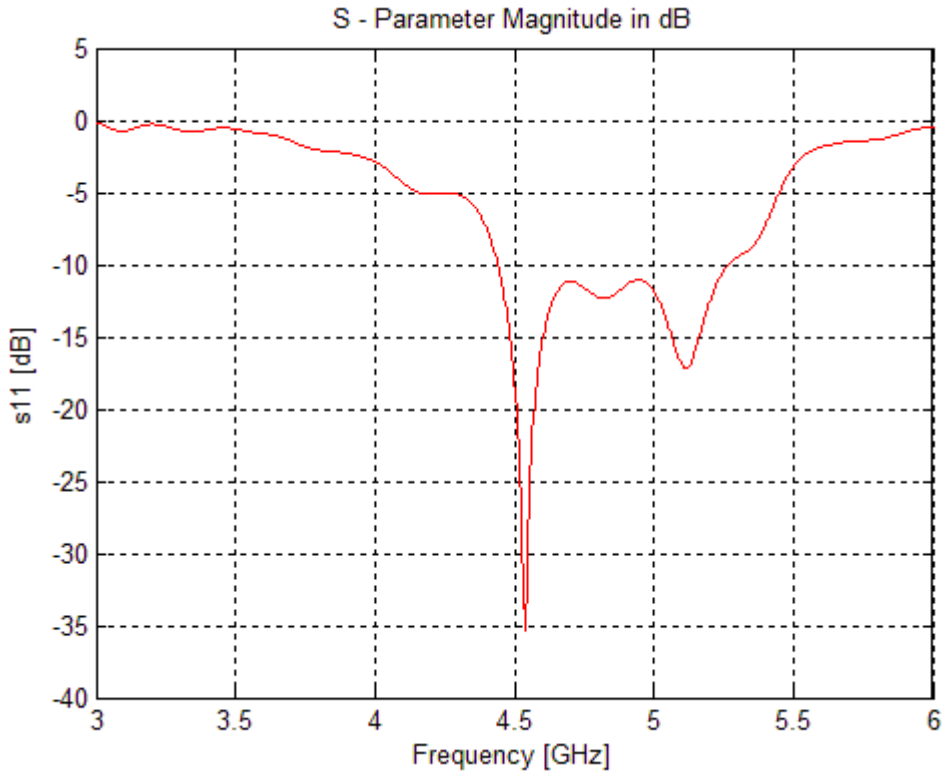
$$Z_{05} = Z_0 \cdot \sqrt{m} \qquad Z_{05} = 50 \cdot \sqrt{0,5} = \underline{\underline{35\Omega}}$$

Parametr:	Z_{01}	Z_{02}	Z_{03}	Z_{04}	Z_{05}
Šířka mikropásku [mm]	39,76	126	31,43	70,71	35
Impedance [Ω]	2,08	0,23	1,86	0,84	2,47

Tab.8. 8 Přehled hodnot jednotlivých impedancí Wilkinsonova děliče s dělícím poměrem 1:2.



Obr.8. 16 Rozložení anténní řady 4x4 s nerovnoměrným amplitudovým dělením.



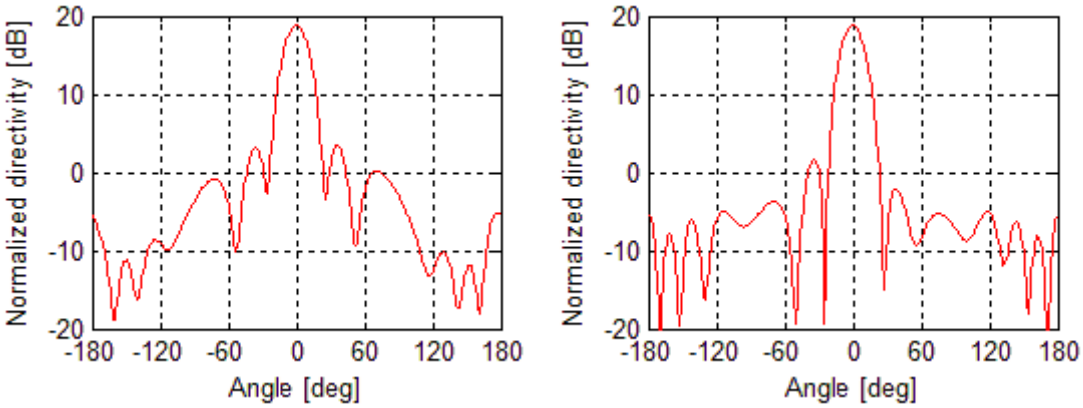
Obr.8. 17 Kmitočtová závislost činitele odrazu anténní řady 4x4 s nerovnoměrným amplitudovým rozložením.

U anténní řady s nerovnoměrným amplitudovým dělení bylo v požadovaném pásmu dosaženo S_{11} = -11 dB. Pokračováním v optimalizaci by bylo dosaženo mnohem lepšího přizpůsobení. Z důvodu časové náročnosti však nebyla anténní řada dále optimalizována.

Frekvence [GHz]	Rovnoměrné amplitudové rozložení	Nerovnoměrné amplitudové rozložení
	Zisk [dB]	
4.4	18.8	18.8
4.7	19.4	19.4
5	19.6	19.5

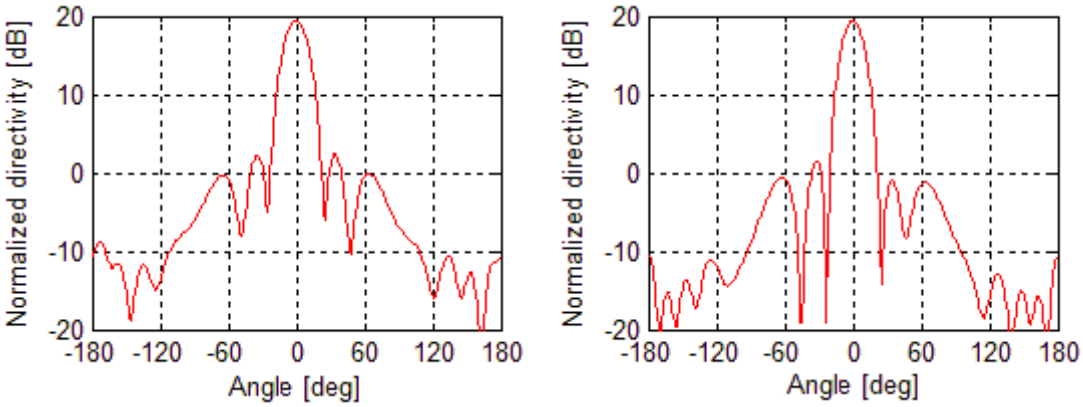
Tab.8. 9 Zisk anténní řady 4x4 s rovnoměrným amplitudovým rozdělením a nerovnoměrným amplitudovým rozdělením.

V Tab.8.9 je porovnání zisků pro anténní řadu 4x4 s rovnoměrným a nerovnoměrným amplitudovým rozložením. Zisk se pohybuje okolo 19 dB pro obě antény, takže jiným amplitudovým rozložením nedojde ke zhoršení zisku antény.



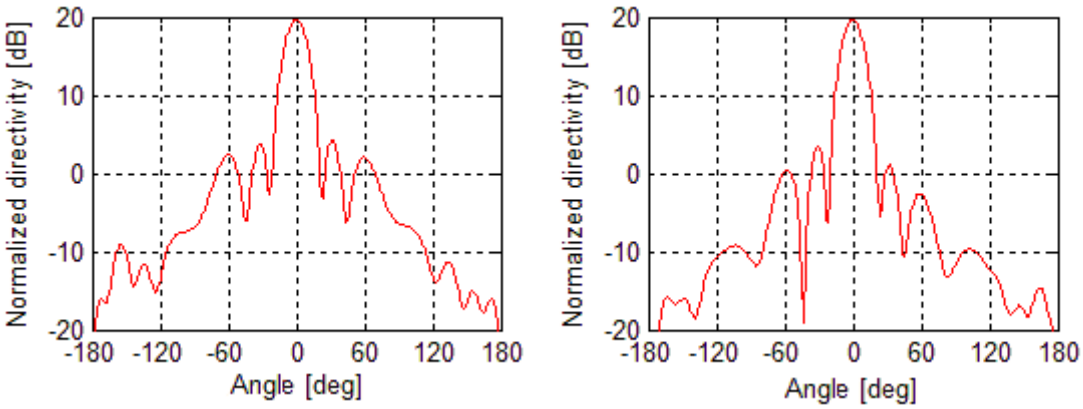
(a) (b)

Obr.8. 18 Směrové charakteristiky anténní řady pro 4,4 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru.



(a) (b)

Obr.8. 19 Směrové charakteristiky anténní řady pro 4,75 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru.



(a) (b)

Obr.8. 20 Směrové charakteristiky anténní řady pro 5 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru.

Frekvence [GHz]	Potlačení postranních laloků [dB]			
	Rovnoměrné amplitudové rozložení		Nerovnoměrné amplitudové rozložení	
	horizontálním směru	vertikálním směru	horizontálním směru	vertikálním směru
4,4	-13,9	-14,7	-14,2	-18,7
4,75	-14,7	- 15,9	-18,3	-20,1
5	-12,1	-13,6	-18,4	-18,7

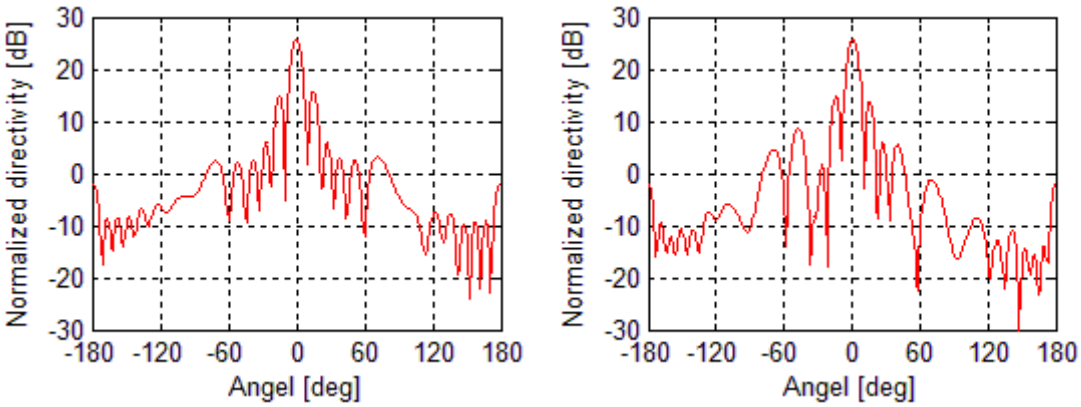
Tab.8. 10 Porovnání potlačení postranních laloků.

V Tab.8.10 je porovnáno potlačení bočních laloků pro anténní řady 4x4 s rovnoměrným amplitudovým a nerovnoměrným amplitudovým rozdělením. Z hodnot je patrné, že jiným amplitudovým rozložením mezi zářiči dojde k výraznému potlačení bočních laloků, a to o 4 až 5 dB. Závěrem lze tedy říci, že metoda s nerovnoměrným amplitudovým rozložením energie mezi zářiči je velmi účinná pro potlačení bočních laloků.

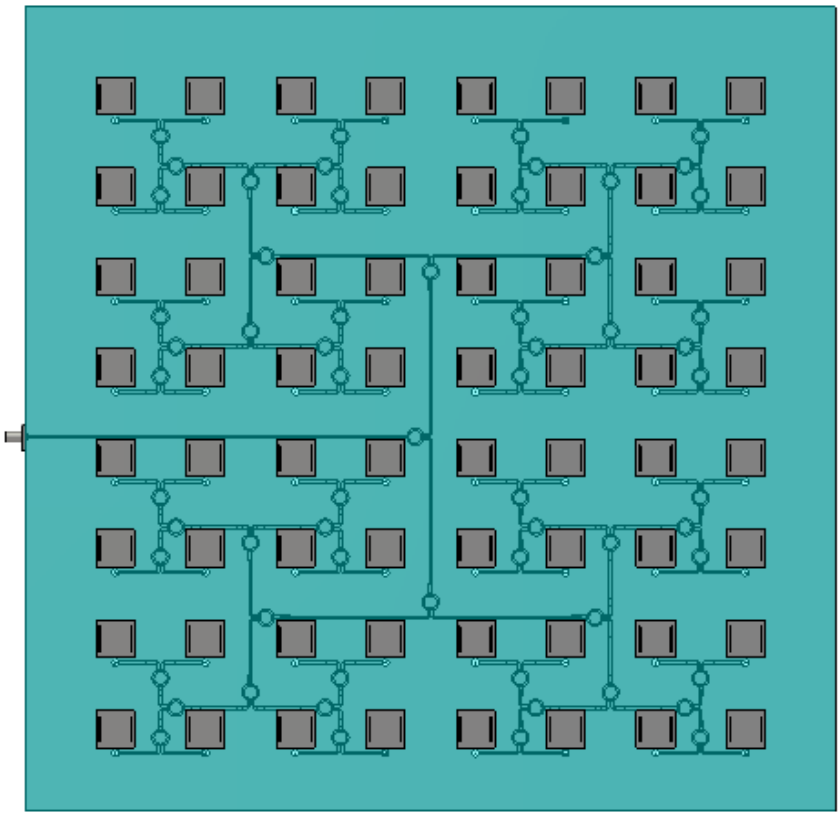
8.4 Anténní řada 8x8

Experimentálně pro zvětšení zisku antény byla anténa implementována do anténní řady 8x8. Napájecí síť je složena s Wilkinsových děličů s rovnoměrným dělením s dělícím poměrem 1.1. Pro velmi rozsáhlou strukturu modelu o 12 mil. buněk, byl proveden pouze výpočet přizpůsobení a směrové charakteristiky, dále s tímto modelem nebylo pracováno.

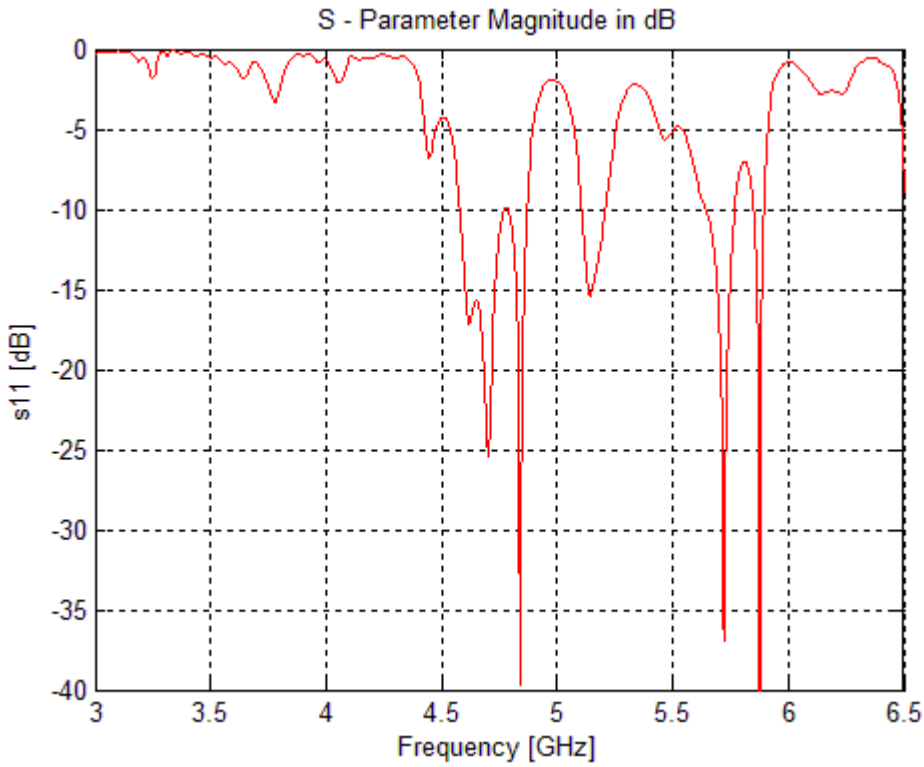
Anténní řada 8x8 má zisk 24,5 dB na f_c = 4.75 GHz.



Obr.8. 21 Směrové charakteristiky anténní řady 8x8 pro 4,75 GHz: (a) horizontálním směru, (b) vertikálním směru.



Obr.8. 22 Rozložení anténní řady 8x8.



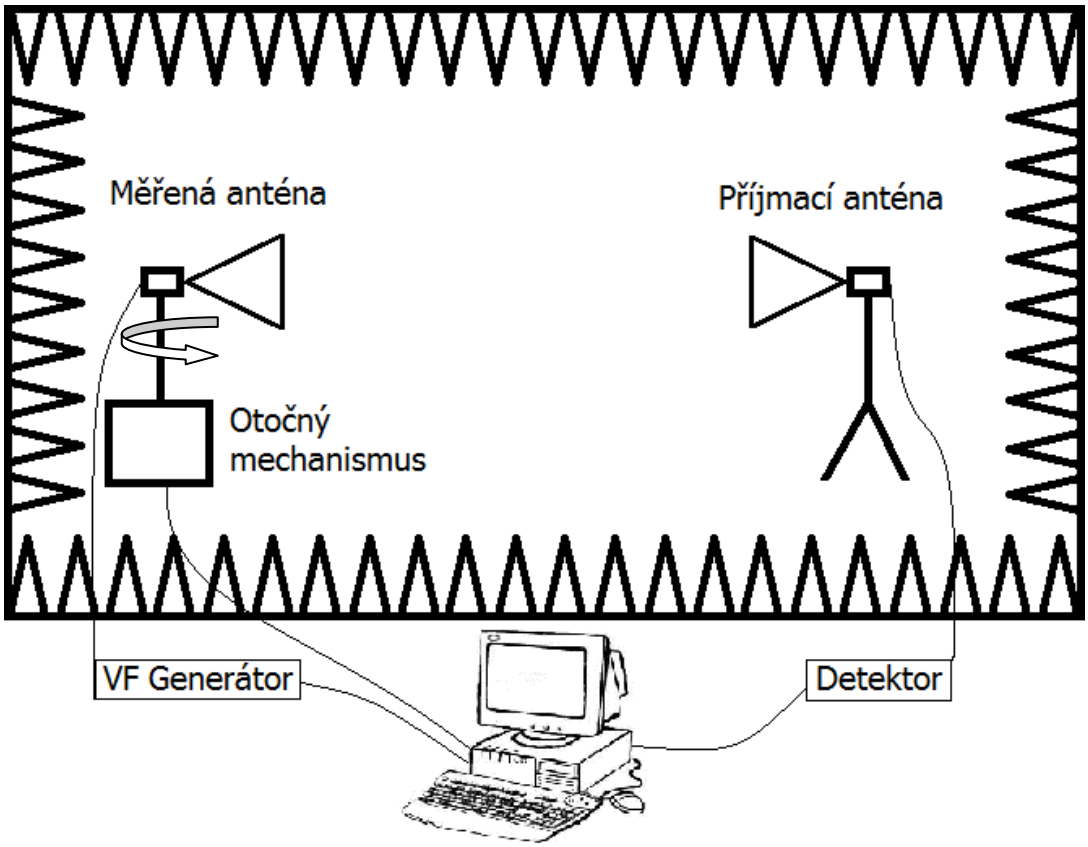
Obr.8. 23 Kmitočtová závislost činitele odrazu anténní řady 8x8.

9 VÝROBA A MĚŘENÍ

Nejdůležitější parametry, na které byl kladen důraz při výrobě, je délka L sondy, výška L sondy a výška od reflektoru k zářiči. Pro dodržení těchto výšek byly na soustruhu zhotoveny pomocné měrky z kulatiny a dobroušeny s přesností na dvě desetiny milimetru. Pro správnou délku a úhel L sondy byl zhotoven jednoduchý přípravek. Do PE materiálu byly CNC frézou vyfrézovány drážky ve tvaru L sondy s přesností na tři desetiny milimetru, drát se strčí do přípravku, ohne se a odštípne. Přípravek byl namodelován v programu Solide Edge, výkres pro výrobu je uveden v příloze A.

Měření impedančního přizpůsobení anténní řady proběhlo na fakultě VUT v Brně. Pro měření byl použit vektorový analyzátor: R&S®ZVL Vector Network Analyzers s frekvenčním rozsahem 9 kHz až 6 GHz.

Měření směrových charakteristik proběhlo na pracovišti VUT v Brně. Měření proběhlo v bezodrazové komoře, aby na měřenou anténu nedopadaly vlny z více směrů, jinak by docházelo ke zkreslení měřených výsledků. Náhled na pracoviště v bezodrazové komoře je znázorněn na Obr.9.1, kde je měřená anténa umístěna na točně a při měření se otáčí od 0° do 360°. Měřená anténa je ozařována pomocnou anténou, která je buzena generátorem a je umístěna na pevné pozici. Vysokofrekvenční napětí indukované na anténním výstupu je zaznamenáváno detektorem společně s úhlem natočení měřené antény. Celé měření je prováděno obsluhou z PC mimo bezodrazovou komoru.



Obr.9. 1 Uspořádání bezodrazové komory.

10 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo prostudovat problematiku širokopásmových planárních antén, navrhnout a naladit anténní řadu na požadované frekvenční pásmo, vyrobit ji a změřit. Na počátku této semestrální práce byly uvedeny zmínky o tom, co to jsou planární antény, čím jsou tvořeny a jakými způsoby mohou být napájeny. Dále zde byly zmíněny konstrukční prvky pro rozšíření pásma antény.

Experimentálně bylo zjištěno, že nejvíce zvětšuje šířku pásma zavedení štěrbin do zářiče ve tvaru E, U, zrcadlená písmena L nebo dvě svislé štěrbiny II.

Úpravou napájení lze také efektivně zvětšit šířku pásma, aniž by došlo k zásahu zářiče. Jedná se o modifikaci koaxiální sondy, která není vedena přes substrát k zářiči, ale sonda je pod substrátem zahnuta do tvaru L. Namodelováním antény s touto sondou bylo dosaženo šířky pásma 800 MHz pro pokles činitele odrazu S_{11} na -10 dB, to odpovídá 32 %.

Pro simulaci byla vybrána štěrbinová II anténa a napájení pomocí L sondy. Modelování a simulace antény byly provedeny v programu CST Studio Suite 2010. Při modelování antény bylo využíváno parametrické analýzy. Pomocí této analýzy byly zjištěny parametry, které mají největší vliv na šířku pásma. Mezi tyto parametry patří výška štěrbin, vzdálenost sondy od substrátu, výška sondy a délka napájecí sondy.

Pro zvětšení zisku byla anténa implementována do řady 2x2. Pro napájení zářičů anténní řady byl zvolen Wilkinsonův dělič výkonu.

V další části semestrálního projektu byla anténní řada zoptimalizována na pásmo 4,4 až 5 GHz s impedančním přizpůsobením S_{11}= -15 dB. Anténní řada byla vyrobena a experimentálně změřena. Při měření bylo dosaženo mnohem lepšího impedančního přizpůsobení, a to S_{11} = -20 dB pro požadované pásmo. Měření směrových charakteristik proběhlo na ústavu radioelektroniky v EMC komoře,

Nad rámec zadání byla anténa implementována do řady 4x4 s rovnoměrným amplitudovým rozložením a do řady 4x4 s nerovnoměrným amplitudovým rozložením. Tímto experimentem bylo zjištěno, že anténní řadou s nerovnoměrným amplitudovým rozložením, lze o něco lépe potlačit nežádoucí postranní laloky. Pro zvětšení zisku byla anténa implementována do anténní řady 8x8.

LITERATURA

[1] BHARTIA, P., BAHL, I., GARG, R., ITTIPIBOON, A. Microstrip Antenna Design Handbook. Norwood: Artech House, 2001.

[2] NOVÁČEK, Z. Elektromagnetické vlny, antény a vedení. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 2003, 145s.

[3] Guo, Y. X., Mak, C. L., Luk, K. M., Lee, K. F., *Analysis and Design of L-Probe Proximity Fed-Patch Antennas*, February 2001, vol. 49, no. 2 p. 145 – 149.

[4] CHEN, Z., CHIA, M. Broadband Planar Antennas: Design and Applications: WILEY, 2006, 239s. ISBN: 0-470-87174-1.

[5] WONG, KIN-LU. Compact and Broadband Microstrip Antennas. 2002, 301 pages ISBN: 0-471-41717-3.

[6] *3D EM Field Simulation - CST Computer Simulation Technology* [online]. 2011 [cit. 2011-11-03]. Http://www.cst.com/. Dostupné z WWW: <https://www.cst.com/support>.

[7] Power dividers and directional couplers#Waveguide types. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 11 June 2006, last modified on September 14, 2011 [cit. 2011-11-13]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Power_dividers_and_directional_couplers#Waveguide_types >.

[8] Power dividers and directional couplers#cite note-21. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 9 June 2006, last modified on 9 January 2007 [cit. 2011-11-20]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Power_dividers_and_directional_couplers#cite_note-21>.

[9] LUKEŠ, Zbyněk . Mikrovlnná integrovanná technika: MMIT. 5.5.2011 [vid. 2011-12-21].

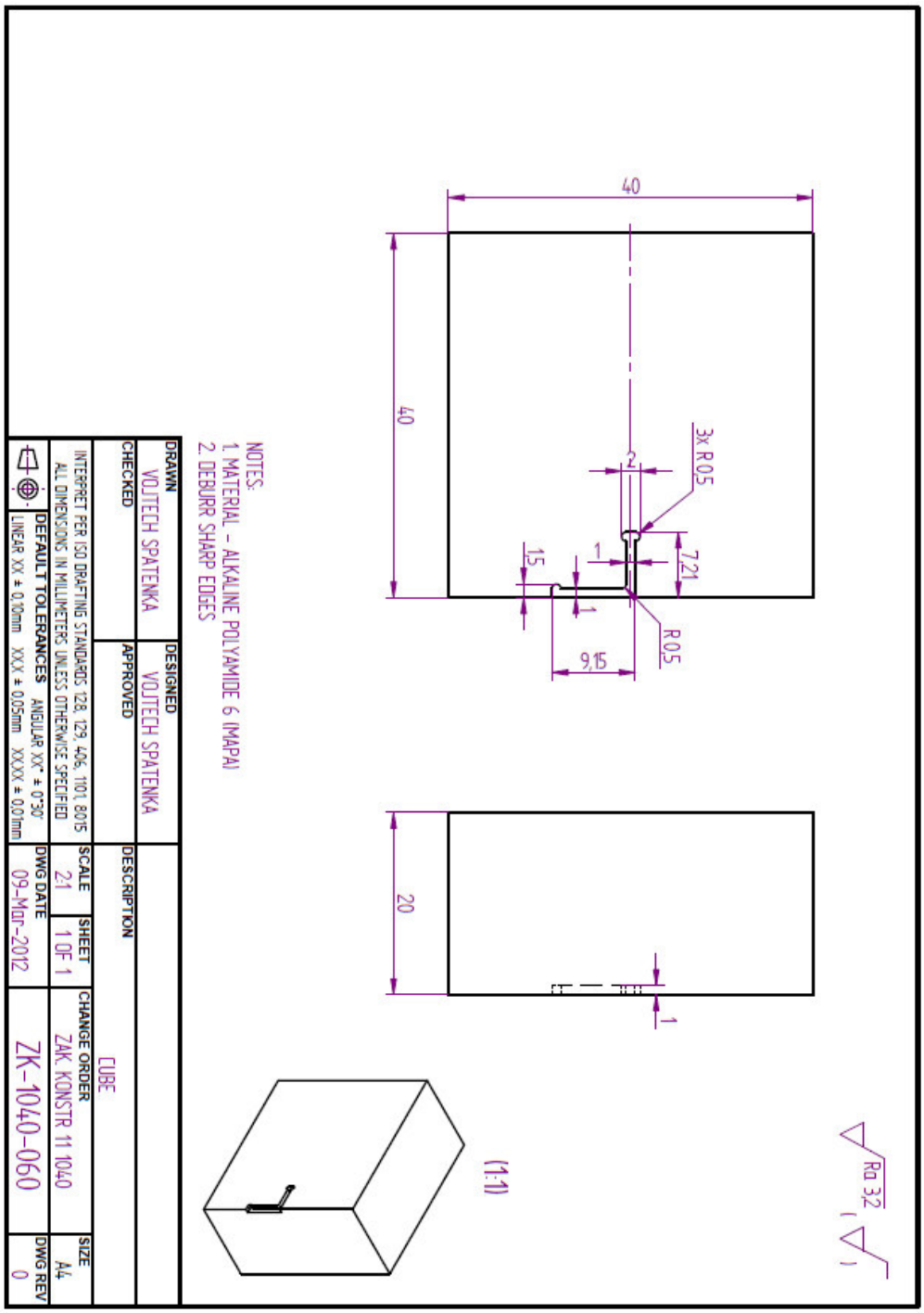
[10] RAIDA, Z., et al. Multimediální ucebnice: Elektromagnetické vlny, Mikrovlnná technika [online]. Brno: FEKT VUT v Brne, [cit. 2010-11-2]. Dostupné z WWW: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php>.

[11] IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION. *A Study of Microstrip Array Antennas with the Feed Network*. April 1989, 37, s. 426-434. ISSN OO18-926X/89/04OO-0426$01.OO.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

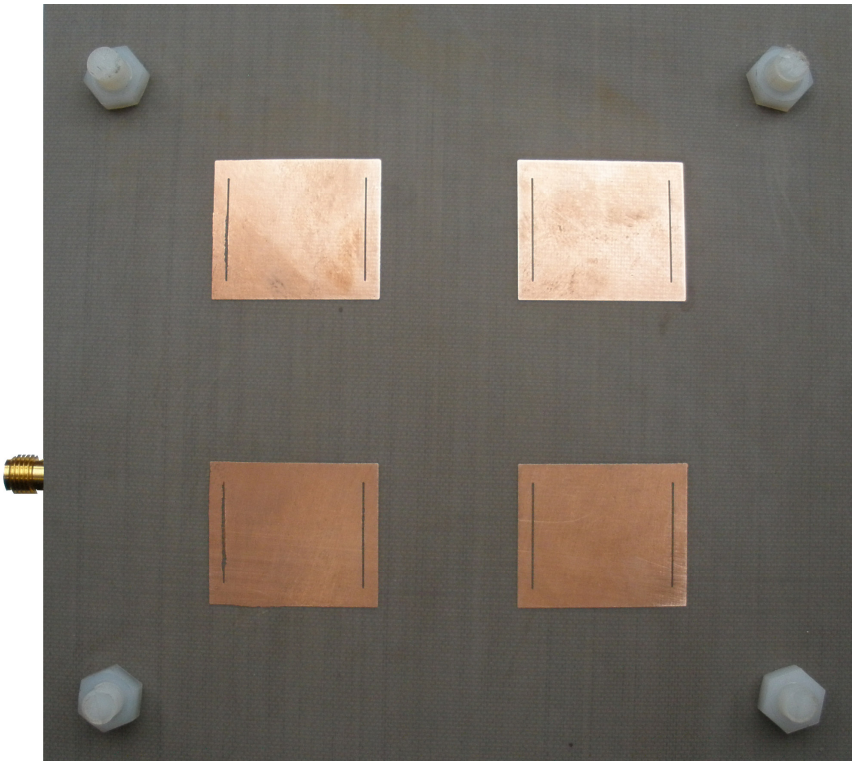
PBA	Perfekt Boundary Approximation
DPS	Deska plošného spoje
ε_r	Dielektrická konstanta - permitivita
Q	Činitel jakosti antény
PSV	Poměr stojatých vln
h	Výška substrátu
G	Zisk antény
GSM	Globální systém pro mobilní komunikaci
DCS	Digitální komunikační systém
PCS	Osobní sdělovací systém
UMTS	Univerzální mobilní přenosový systém
C	Vzdálenost štěrbin
C1	Výška štěrbiny
D	Vzdálenost mezi zářiči
d	Vzdálenost sondy od substrátu
H	Vzdálenost mezi zářičem a zemnící plochou
h3	Výška napájecí sondy
L	Výška zářiče
Lv	Výška sondy
Lnap	Délka napájecí sondy
M	Šířka štěrbiny
MWS	Microwave studio
m	Mezera mezi rameny
p	Posun ramen
pr	Průměr ramen
tp	Tloušťka pokovení
tgδ	Ztrátový činitel
x	Přesah za ukončení L sondy
W	Šířka zářiče
f_c	Střední kmitočet

PŘÍLOHA A - PŘÍPRAVEK NA VÝROBU L SONDY

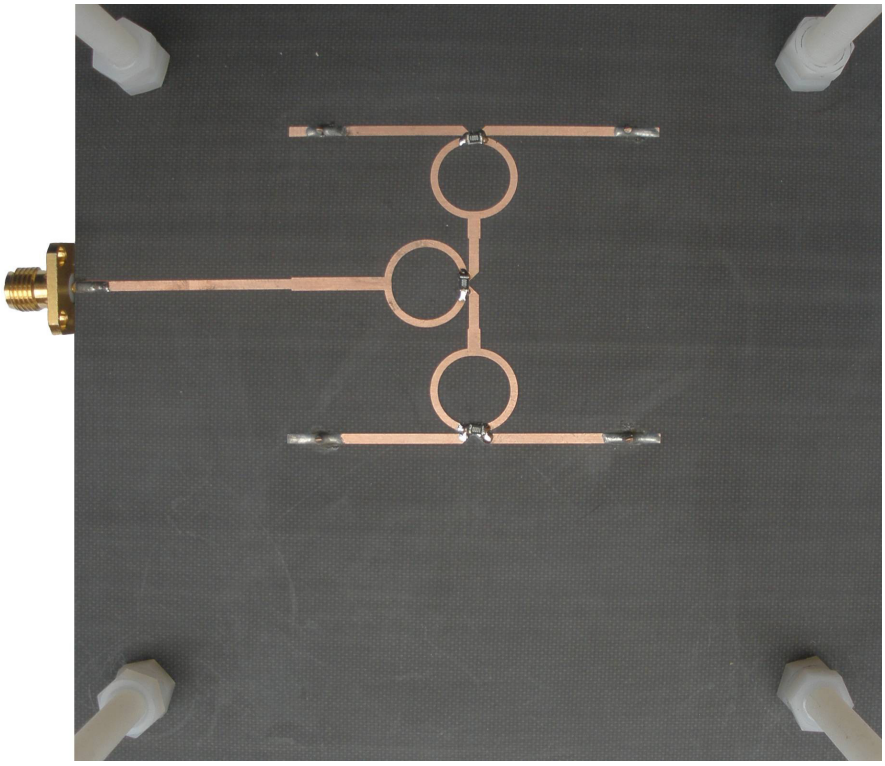


Obr.9. 2 přípravek na výrobu L sondy.

PŘÍLOHA B - FOTO REALIZOVANÉ ANTÉNY



Obr.9. 3: Vyrobená anténní řada – pohled na zářiče.



Obr.9. 4: Vyrobená anténní řada – pohled na napájecí síť.