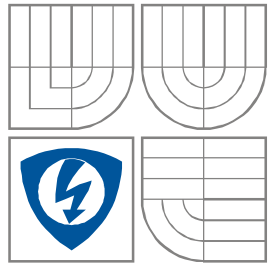


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ŠROUBOVICOVÁ DVOUPÁSMOVÁ ANTÉNA PRO WIFI PÁSMO

DUAL-BAND HELIX ANTENNA FOR WIFI BAND

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

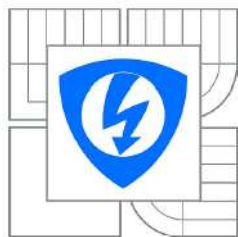
Bc. MICHAL ŠRAJBR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAMIL PÍTRA

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. Michal Šrajbr
Ročník: 2

ID: 70122
Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Šroubovicová dvoupásmová anténa pro WiFi pásmo

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy, na nichž jsou založeny šroubovicové antény a antény dvoupásmové. Tyto antény stručně popište.

Vyberte několik konstrukčních řešení šroubovicových antén a ve vhodně zvoleném programu vytvořte jejich numerické modely. Výsledky modelování porovnejte s výsledky publikovanými v literatuře.

Vyberte model antény, který vykazuje nejlepší parametry, optimalizujte jej a experimentálně ověřte jeho vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PROCHÁZKA, M. Antennas - Handbook. Prague: BEN Publishing, 2005.

[2] LAMENSDORF, D., SMOLINSKI, M.A. Dual-band quadrifilar helix antenna. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 18.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Kamil Pítra
Konzultanti diplomové práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Výzkum realizovaný v rámci této diplomové práce byl finančně podpořen projektem
CZ.1.07/2.3.00/20.0007 **Wireless Communication Teams**
operačního programu **Vzdělávání pro konkurenceschopnost**.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Finanční podpora byla poskytnuta Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na vlastnosti a typy šroubovicových antén. Jsou zde popsány jednotlivé módy, ve kterých šroubovicové antény pracují. Dále jsou zde rozebrány možnosti vytvoření dvoupásmové šroubovicové antény. Hlavním cílem této práce je výběr vhodného řešení a návrh dvoupásmové šroubovicové antény pro WiFi pásmo 2,4 GHz a 5 GHz. Modelování antény je prováděno v programu CST Microwave studio.

KLÍČOVÁ SLOVA

Šroubovicová anténa, dvoupásmová anténa, WiFi pásmo, CST MWS, planární anténa

ABSTRACT

This master's thesis is focused on the properties and types of helical antennas. The helical antenna work in the different modes. These modes are described in this thesis. There are also discussed possibility for design a dual-band helical antennas. The main aim of this work is the selection of a suitable solution and design dual-band helical antenna for the WiFi band working at resonance frequencies of 2,4 GHz and 5 GHz. The simulation of this antenna was performed in the program CST Microwave studio.

KEYWORDS

Helix antenna, dual-band antenna, WiFi band, CST MWS, planar antenna

ŠRAJBR, M. *Šroubovicová dvoupásmová anténa pro WiFi pásmo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 48 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Kamil Pítra.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Šroubovicová dvoupásmová anténa pro WiFi pásmo 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 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 2. ledna 2012

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Kamilu Pítrovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 18. května 2012

.....

(podpis autora)

OBSAH

OBSAH	vii
SEZNAM OBRÁZKŮ	viii
SEZNAM TABULEK.....	xi
1 ÚVOD	1
2 ŠROUBOVICOVÁ ANTÉNA.....	2
2.1 Pracovní módy šroubovicové antény	3
2.2 Impedanční přizpůsobení šroubovicové antény.....	7
3 ŠROUBOVICOVÁ ANTÉNA PRO WiFi PÁSMO 2,4 GHz	10
3.1 Konstrukce antény	10
3.2 Návrh antény a simulace.....	11
3.3 Přehled dosažených výsledků	16
4 DVOUPÁSMOVÉ ŠROUBOVICOVÉ ANTÉNY	17
4.1 Dvoupásmová anténa s parazitní šroubovicovou anténou	17
4.2 Šroubovicová anténa s paralelním LC obvodem	18
4.3 Dvoupásmová quadrifilární šroubovicová anténa	20
4.4 Šroubovicová anténa s rozdílnými úhly stoupání závitů	21
4.5 Planární šroubovicová anténa s rozdílnými úhly stoupání závitů.....	23
5 ŠROUBOVICOVÁ ANTÉNA PRO WIFI PÁSMO 2,4 GHz A 5 GHz	27
5.1 Drátová šroubovicová anténa.....	27
5.2 Planární šroubovicová anténa	36
6 MĚŘENÍ ANTÉNY	41
6.1 Porovnání měřených a simulovaných výsledků.....	44
ZÁVĚR	45
LITERATURA.....	46
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	47

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1:	Šroubovicová anténa [2]	2
Obr. 2.2:	Vyzařovací charakteristika šroubovicové antény v normálovém módu [2]	3
Obr. 2.3:	Zjednodušená struktura šroubovicové antény	4
Obr. 2.4:	Složky elektrického pole E_ϕ a E_θ	5
Obr. 2.5:	Vyzařovací charakteristika šroubovicové antény v osovém módu [2]	6
Obr. 2.6:	Vyzařovací charakteristika šroubovicové antény v kuželovém módu	7
Obr. 2.7:	Přizpůsobovací vedení mezi napájecím vedením a šroubovicovou anténou	7
Obr. 2.8:	Struktura impedančního přizpůsobovacího vedení	8
Obr. 2.9:	Závislost výstupní impedance přizpůsobovacího vedení na vzdálenosti h	9
Obr. 2.10:	Závislost výstupní impedance přizpůsobovacího vedení na šířce w	9
Obr. 3.1:	Konstrukce šroubovicové antény pro WiFi pásmo 2,4 GHz	10
Obr. 3.2:	Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} na vstupu šroubovicové antény	12
Obr. 3.3:	Závislost modulu vstupní impedance na frekvenci šroubovicové antény	13
Obr. 3.4:	Závislost fáze vstupní impedance na frekvenci šroubovicové antény	13
Obr. 3.5:	Závislost poměru stojatých vln $VSWR$ na kmitočtu šroubovicové antény	14
Obr. 3.6:	Směrová charakteristika na $f = 2,4$ GHz z programu Helix Calculator	14
Obr. 3.7:	Směrové charakteristiky šroubovicové antény bez nosné konstrukce	15
Obr. 3.8:	Směrové charakteristiky šroubovicové antény s nosnou konstrukcí	15
Obr. 4.1:	Dvoupásmová anténa s parazitní šroubovicovou anténou [4]	17
Obr. 4.2:	Model dvoupásmové šroubovicové antény v programu CST	18
Obr. 4.3:	Šroubovicová anténa s paralelním LC obvodem [8]	19
Obr. 4.4:	Charakteristika S_{11} parametrů pro všechna čtyři ramena antény [8]	19
Obr. 4.5:	Quadrifilární šroubovicová anténa [6]	20
Obr. 4.6:	Spojení dvou quadrifilárních šroubovicových antén [6]	20
Obr. 4.7:	Dvoupásmová quadrifilární šroubovicová anténa [6]	21
Obr. 4.8:	Konstrukce šroubovicové antény s rozdílnými úhly stoupání závitů [9]	21
Obr. 4.9:	Charakteristika S_{11} parametrů pro různé úhly stoupání závitů [9]	22
Obr. 4.10:	Šroubovicová anténa s dvěma odlišnými vinutími [5]	22
Obr. 4.11:	Charakteristika S_{11} parametru dvoupásmové šroubovicové antény [5]	23

Obr. 4.12: Planární dvoupásmová šroubovicová anténa s rozdílnými úhly stoupání závitů.....	23
Obr. 4.13: Charakteristiky S_{11} parametrů dvoupásmové planární šroubovicové antény[10]	24
Obr. 4.14: Planární šroubovicová anténa s rovnoměrně zmenšující se vzdáleností mezi závitů a) struktura antény, b) kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} [11]	25
Obr. 4.15: Struktura planární šroubovicové antény [12].....	26
Obr. 4.16: Závislost činitele odrazu S_{11} na změně parametru A a D [12]	26
Obr. 5.1: Drátová šroubovicová anténa pro WiFi pásmo 2,4 GHz a 5 GHz.....	27
Obr. 5.2: Závislost výstupní impedance přizpůsobovacího vedení na vzdálenosti h ..	28
Obr. 5.3: Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} na vstupu šroubovicové antény...29	
Obr. 5.4: Závislost modulu vstupní impedance na frekvenci drátové šroubovicové antény	30
Obr. 5.5: Závislost fáze vstupní impedance na frekvenci drátové šroubovicové antény	30
Obr. 5.6: Závislost poměru stojatých vln na kmitočtu drátové šroubovicové antény	31
Obr. 5.7: Proudové rozložení na anténě pro frekvenci a) 2,45 GHz, b) 5,5 GHz	31
Obr. 5.8: Směrová charakteristika drátové šroubovicové antény na frekvenci 2,45 GHz	32
Obr. 5.9: Směrová charakteristika drátové šroubovicové antény na frekvenci 5,5 GHz	32
Obr. 5.10: Směrové charakteristiky antény v rovině H pro frekvenci a) 2,45 GHz, b) 5,5 GHz.....	33
Obr. 5.11: Kmitočtová závislost osového poměru AR	33
Obr. 5.12: Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} při změně parametru S_1	35
Obr. 5.13: Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} při změně parametru S_2	35
Obr. 5.14: Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} při změně parametru D	36
Obr. 5.15: Struktura dvoupásmové planární šroubovicové antény	36
Obr. 5.16: Klopfensteinův impedanční transformátor	37
Obr. 5.17: Frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} a přenosu S_{21} Klopfensteinova impedančního transformátoru	38
Obr. 5.18: Planární šroubovicová anténa s impedančním transformátorem	38
Obr. 5.19: Přejít z impedančního transformátoru na šroubovici.....	38
Obr. 5.20: Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} pro anténu s přechodem a bez přechodu.....	39

Obr. 5.21: Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} dvoupásmové planární šroubovicové antény	40
Obr. 6.1: Konstrukce dvoupásmové šroubovicové antény a) model v CST MWS, b) měřená anténa	41
Obr. 6.2: Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} měřené a simulované antény.....	42
Obr. 6.3: Závislost modulu vstupní impedance na frekvenci měřené a simulované antény	42
Obr. 6.4: Závislost fáze vstupní impedance na frekvenci měřené a simulované antény	43
Obr. 6.5: Směrová charakteristika měřené antény pro frekvenci 2,35 GHz	43
Obr. 6.6: Směrová charakteristika měřené antény pro frekvenci 5,4 GHz	44

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1:	Rozměry šroubovicové antény pro WiFi pásmo 2,4 GHz	11
Tab. 3.2:	Porovnání vypočtených rozměrů antény.....	12
Tab. 3.3:	Přehled výsledků simulací na frekvenci 2,4 GHz.....	16
Tab. 4.1:	Rozměry planární šroubovicové antény.....	24
Tab. 5.1:	Rozměry drátové šroubovicové antény pro WiFi pásmo 2,4 GHz a 5 GHz	29
Tab. 5.2:	Přehled dosažených výsledků simulací v programu CST MWS	34
Tab. 5.3:	Rozměry planární šroubovicové antény.....	40
Tab. 6.1:	Porovnání naměřených a simulovaných hodnot dvoupásmové antény	44

1 ÚVOD

V dnešní době se stále více upouští od klasického kabelového spojení a přechází se na spoje bezdrátové, které nabízejí pohodlnější a především širší využití. K dobrému bezdrátovému spojení je zapotřebí použití kvalitní antény. Z tohoto důvodu se stále více klade důraz na návrh antén.

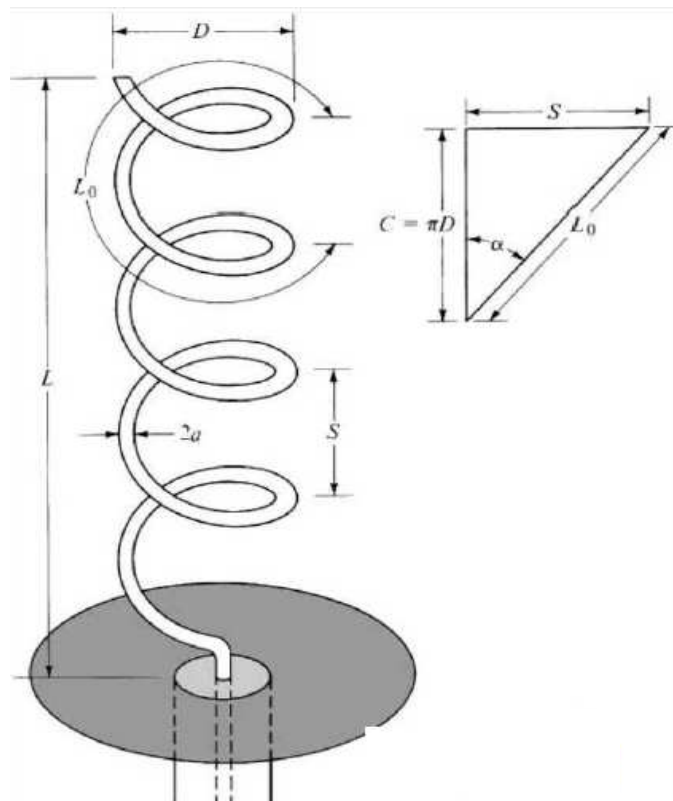
Anténa je takové zařízení, které je schopné střídavou vysokofrekvenční energii vyzářit do okolí a vytvořit tak v prostoru vysokofrekvenční elektromagnetické pole. Vzhledem k tomu, že antény jsou reciproké zařízení, lze při umístění antény do prostoru s vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem odebírat na jejich svorkách energii, která je úměrná intenzitě pole, ve kterém je umístěna.

Na většinu aplikací již ovšem nestačí klasické jednopásmové antény, ale je zapotřebí použití dvou nebo i více pásmových antén. Vzhledem k náročnosti, které s sebou jejich návrh přináší, máme k dispozici nepřeberné množství simulačních programů, které nám návrh velice usnadní. Mezi nejpoužívanější patří například CST Microwave Studio, Ansoft Designer nebo Zeland IE3D.

Dvoupásmovosti lze dosáhnout také u šroubovicové antény. Tato práce je proto zaměřena především na možnosti vytvoření dvoupásmové šroubovicové antény, přesněji na dvoupásmovou anténu pro WiFi pásmo, která pracuje na frekvencích 2,4 GHz a 5 GHz. Pro návrh je použit již zmiňovaný program CST Microwave Studio, který je vhodný i pro drátové modely antén.

2 ŠROUBOVICOVÁ ANTÉNA

Šroubovicová anténa je složena z jednoho nebo i více vodičů svinutých do šroubovice. K lepšímu dosažení předozadního poměru, je k anténě přidána ještě zemní plocha (reflektor).



Obr. 2.1: Šroubovicová anténa [2]

Na obr. 2.1 je uvedena konstrukce šroubovicové antény s návrhovými rozměry, kde:

- D – průměr šroubovice
- $C = \pi \cdot D$ – obvod šroubovice
- S – vzdálenost mezi závitů
- $\alpha = \arctan(S/\pi \cdot D)$ – úhel stoupání závitů
- N – počet závitů
- $L = N \cdot S$ – délka šroubovice
- a – poloměr vodiče
- $L_0 = \sqrt{C^2 + S^2}$ – délka jednoho závitů

Šroubovicové antény se používají především proto, že mají kruhovou polarizaci. Tato polarizace je výhodná zejména pokud není známa polarizace přijímací nebo vysílací antény. Šroubovicová anténa může pracovat v režimu levotočivé kruhové polarizace nebo pravotočivé kruhové polarizace. Zda se jedná o levotočivou nebo pravotočivou polarizaci je dáno tím, v jakém směru jsou navinuty závity šroubovicové antény. Pokud jsou závity antény vinuty doprava, jedná se o pravotočivou kruhovou polarizaci a naopak. Kruhově polarizovanou anténou (levotočivou nebo pravotočivou) lze přijímat lineárně polarizované vlny bez ohledu na to, zda se jedná o polarizaci horizontální či vertikální. Nelze ovšem levotočivou kruhově polarizovanou anténou přijímat vlny, které jsou pravotočivě kruhově polarizované a naopak.

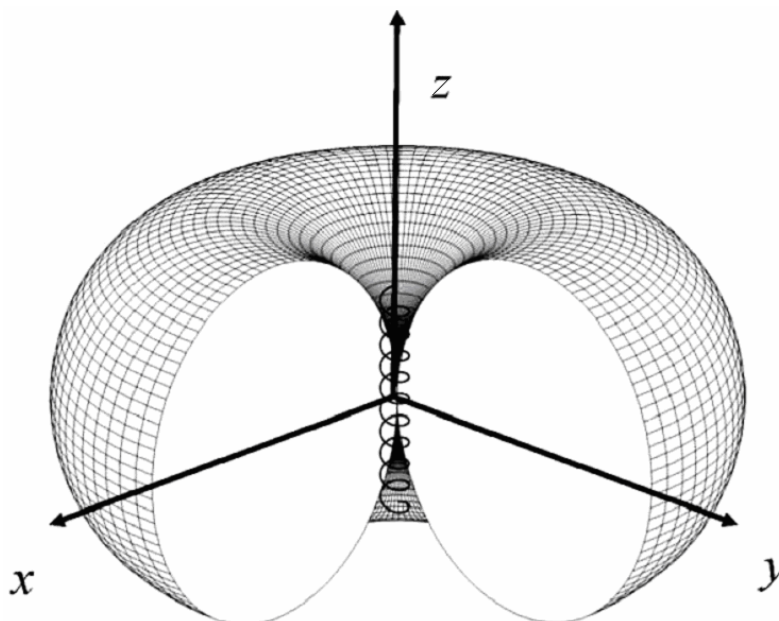
Se změnou průměru antény D se mění její pracovní frekvence. Čím více závitů N šroubovice má, tím má anténa větší zisk. Změnou velikosti rozměrů šroubovicové antény lze měnit pracovní módy antény.

2.1 Pracovní módy šroubovicové antény

Šroubovicové antény pracují ve třech základních módech. Mezi tyto módy patří osový, normálový a kuželový. Výše zmíněné módy jsou rozděleny podle tvaru a směru vyzařovací charakteristiky. Použití jednotlivých módů je závislé na rozměrech antény vzhledem k vlnové délce.

2.1.1 Normálový mód

Normálový mód šroubovicové antény má všesměrovou vyzařovací charakteristiku kolmou na osu šroubovice, jak je znázorněno obr. 2.2. Tento mód vznikne, pokud jsou rozměry antény v porovnání s vlnovou délkou velmi malé ($D = 0,1 \cdot \lambda$ a $S = 0,05 \cdot \lambda$). [1]



Obr. 2.2: Vyzařovací charakteristika šroubovicové antény v normálovém módu [2]

Pokud je obvod šroubovice C menší než vlnová délka, jedná se o normálový mód.

Vyzařovací charakteristika šroubovicové antény může být popsána složkami elektrického pole E_ϕ a E_θ . Výpočet lze usnadnit tím, že šroubovici rozložíme na několik smyček a krátkých dipólů, které jsou navzájem sériově spojeny. Rozměry náhradního zapojení odpovídají rozměrům šroubovicové antény. Tato zjednodušená struktura je zobrazena na obr. 2.3. Předpokládáme jednotnou velikost a fázi protékajícího proudu celou šroubovicovou anténou. Vzhledem k tomu, že zisk antény je závislý na počtu závitů šroubovicové antény, lze pro zjednodušení výpočtu uvažovat pouze jednu smyčku a jeden krátký dipól.

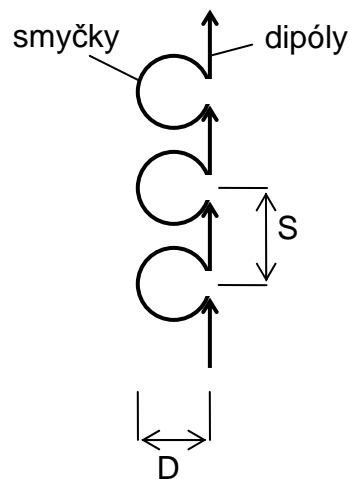
Vyzařovací charakteristika smyčky má pouze složku E_ϕ , kterou lze vypočítat [1]

$$E_\phi = \frac{120\pi^3 \cdot D^2 \cdot I}{4 \cdot \lambda^2 \cdot r} \cdot \sin \theta. \quad (2.1)$$

Naopak vyzařovací charakteristika krátkého dipólu má pouze složku E_θ , kterou lze vypočítat pomocí vztahu [1]

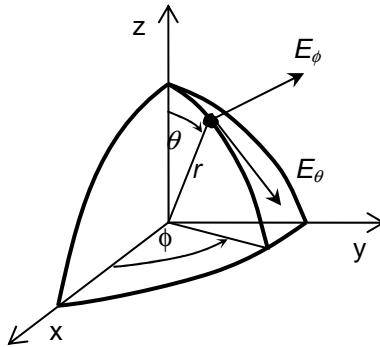
$$E_\theta = j \cdot \frac{60\pi \cdot S \cdot I}{\lambda \cdot r} \cdot \sin \theta, \quad (2.2)$$

kde S je vzdálenost mezi jednotlivými závity a odpovídá délce dipólu.



Obr. 2.3: Zjednodušená struktura šroubovicové antény

Při orientaci osy šroubovice shodně s osou z , jsou složky elektrického pole E_ϕ a E_θ



orientovány dle obr. 2.4.

Obr. 2.4: Složky elektrického pole E_ϕ a E_θ

Při porovnání poměru velikostí složek elektrického pole E_ϕ a E_θ ze vztahů (2.1) a (2.2) dostaneme tzv. osový poměr AR (Axial Ratio), který vypovídá o polarizaci vyzářovací charakteristiky. Osový poměr lze vypočítat ze vztahu [1]

$$AR = \frac{|E_\theta|}{|E_\phi|} = \frac{2S\lambda}{\pi^2 D^2}. \quad (2.3)$$

Obecně má vyzářovací charakteristika eliptickou polarizaci. Mohou však nastat tři zvláštní případy polarizace. V případě, že je $E_\phi = 0$, blíží se osový poměr AR k nekonečnu a dochází k lineární vertikální polarizaci. Šroubovicová anténa se v tomto případě chová jako vertikální dipól. Druhý případ nastane, když je $E_\theta = 0$. Potom je osový poměr $AR = 0$ a dochází k lineární horizontální polarizaci. Šroubovicová anténa v tomto případě odpovídá horizontální smyčce. Třetí případ nastane pokud $|E_\phi| = |E_\theta|$, potom se jedná o kruhovou polarizaci. Kruhová polarizace je pak ve všech směrech prostoru kromě směru osy šroubovice (osa z).

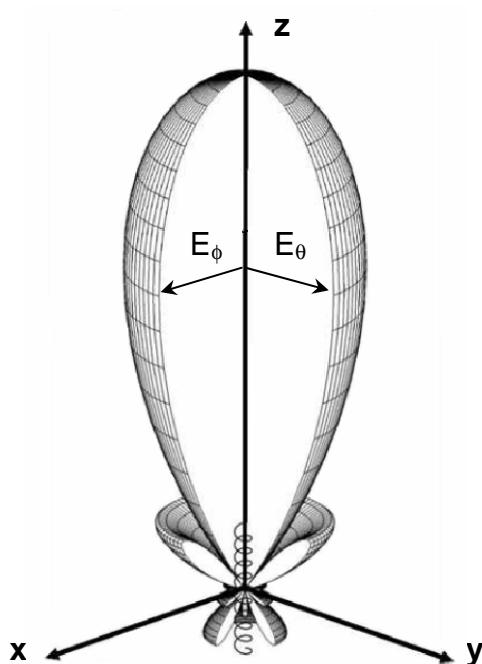
Šroubovicová anténa má v tomto módu malou šířku pásma na pracovním kmitočtu. Tyto antény se využívají pro přenosné radiotelefonní stanice v pásmu VKV a UKV.

2.1.2 Osový (Axial) mód

Jedná se o nejpoužívanější mód šroubovicové antény. Osového módu docílíme, je-li obvod šroubovicové antény C v okolí vlnové délky λ . Potom je maximální vyzářený výkon ve směru osy šroubovice (osa z).

Vzhledem k tomu, že anténa vyzářuje na obě strany osy šroubovice, a je žádoucí jen jeden směr, je na jednom konci antény použita odrazná plocha (reflektor). Tudíž dochází na jednom konci k odrazům vln a anténa září jen jedním směrem (obr. 2.5).

Reflektor může být kruhový nebo čtvercový. Jeho velikost by měla být minimálně $\frac{3}{4}\lambda$.



Obr. 2.5: Vyzařovací charakteristika šroubovicové antény v osové módu [2]

K dosažení osového módu musí být splněny následující podmínky:

$$1) \quad 12^\circ < \alpha < 14^\circ \quad (2.4)$$

$$2) \quad \frac{3}{4} \lambda < C < \frac{4}{3} \lambda \quad (2.5)$$

$$3) \quad N > 3 \quad (2.6)$$

Osový mód používá kruhovou nebo eliptickou polarizaci vln. Zda se jedná o polarizaci kruhovou či eliptickou, lze určit z osového poměru AR , který se vypočítá ze vztahu [3]

$$AR = \frac{2N + 1}{2N}, \quad (2.7)$$

kde N je počet závitů šroubovicové antény. Pokud je $AR = 1$, je polarizace kruhová. Ze vztahu (2.7) vyplývá, že čím více bude mít anténa závitů, tím více se bude osový poměr blížit jedné a polarizace bude kruhová.

Dále lze také vypočítat poloviční úhel vyzáření $HPBW$ (half-power beamwidth), $FNBW$ (beamwidth between first nulls) a směrovost D [2]

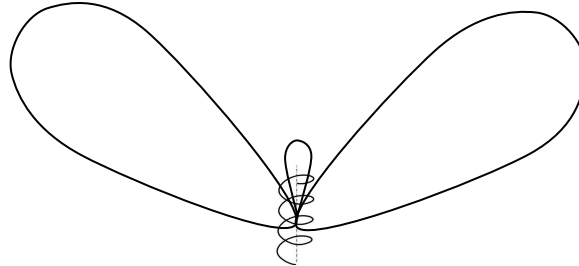
$$HPBW = \frac{52 \cdot \lambda^{3/2}}{C \cdot \sqrt{N \cdot S}}, \quad (2.8)$$

$$FNBW = \frac{115 \cdot \lambda^{3/2}}{C \cdot \sqrt{N \cdot S}}, \quad (2.9)$$

$$D = 15 \cdot N \cdot \frac{C^2 \cdot S}{\lambda^3}. \quad (2.10)$$

2.1.3 Kuželový mód

Kuželový mód šroubovicové antény je speciální, ne příliš často používaný mód, který je typický svou vyzařovací charakteristikou (obr. 2.6). Tento mód nastane, pokud je obvod šroubovicové antény C větší než vlnová délka λ .



Obr. 2.6: Vyzařovací charakteristika šroubovicové antény v kuželovém módu

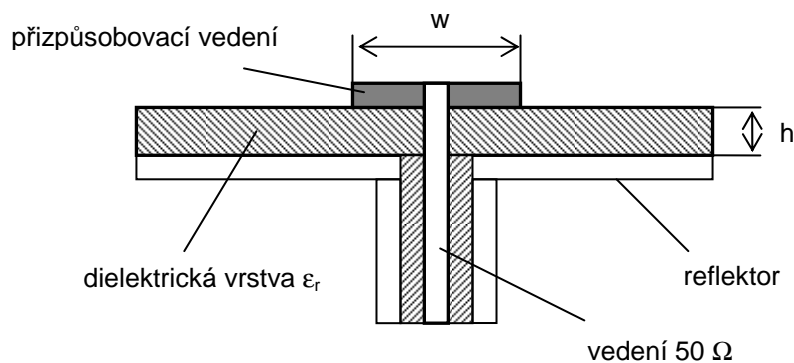
2.2 Impedanční přizpůsobení šroubovicové antény

Pokud má šroubovicová anténa stejný průměr D v celé své délce L , lze vypočítat její vstupní impedanci podle vzorce [3]

$$Z_{ant} = 140 \cdot \frac{C}{\lambda}, \quad (2.8)$$

kde C je obvod šroubovicové antény.

Vzhledem k tomu, že impedance šroubovicové antény se pohybuje okolo 150Ω a napájecí vedení má obvykle 50Ω , je nutné použít impedanční přizpůsobení. Jednou z možností je použití čtvrtvlnného vedení dle obr. 2.7. Toto vedení je tvořeno vodivým páskem o délce $\lambda/4$ a šířce w , který je umístěn nad zemnicí plochou ve vzdálenosti h .



Obr. 2.7: Přizpůsobovací vedení mezi napájecím vedením a šroubovicovou anténou

Výšku dielektrické vrstvy h s relativní permitivitou ϵ_r mezi přizpůsobovacím vedením a reflektorem lze vypočítat ze vztahu [1]

$$h = \frac{w}{\frac{377}{\sqrt{\epsilon_r \cdot Z_0}} - 2}, \quad (2.9)$$

kde w je šířka přizpůsobovacího vedení a Z_0 je impedance přizpůsobovacího vedení.

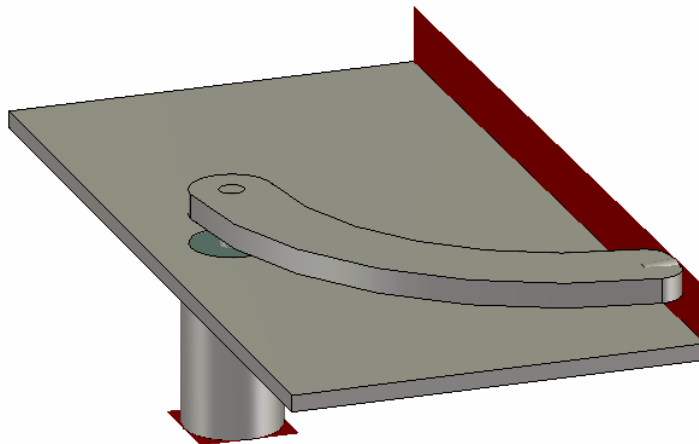
2.2.1 Návrh impedančního přizpůsobovacího vedení

Aby bylo možné správně impedančně přizpůsobit šroubovicovou anténu k impedanci vedení $Z_0 = 50 \Omega$, je zapotřebí vypočítat impedanci tohoto vedení. Tuto impedanci lze spočítat podle vztahu [1]

$$Z_{ved} = \sqrt{Z_0 \cdot Z_{ant}}, \quad (2.10)$$

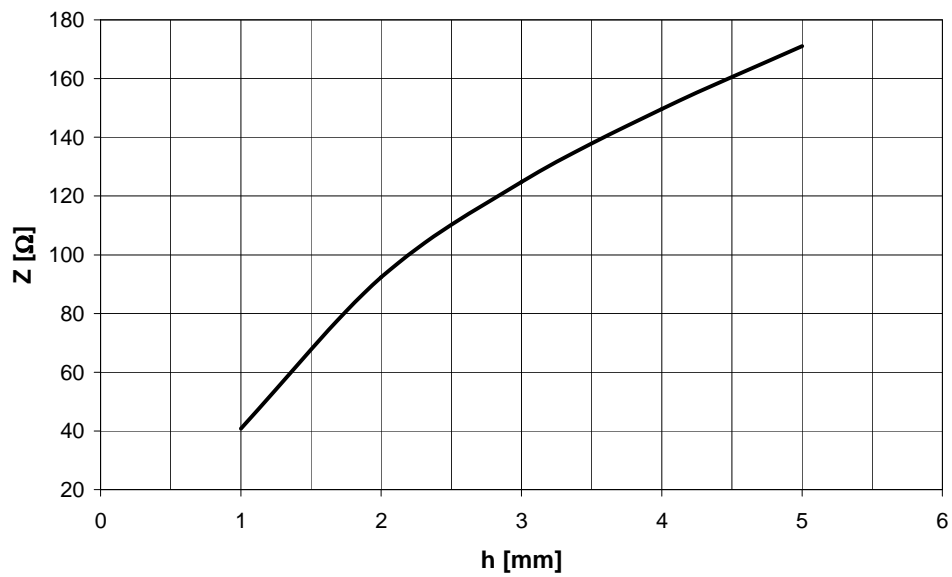
kde Z_{ved} je impedance přizpůsobovacího vedení a Z_{ant} je impedance šroubovicové antény.

Pro ověření správnosti výpočtů rozměrů impedančního přizpůsobovacího vedení je vhodné toto vedení nakreslit a simulovat v programu CST MWS. Struktura tohoto vedení je zobrazena na obr. 2.8. Na obrázku jsou vidět dva porty. Ke zjištění impedance celé struktury je umístěn jeden budící port na 50Ω vedení a druhý port je v místě řezu struktury, kde dále navazuje šroubovicová anténa.

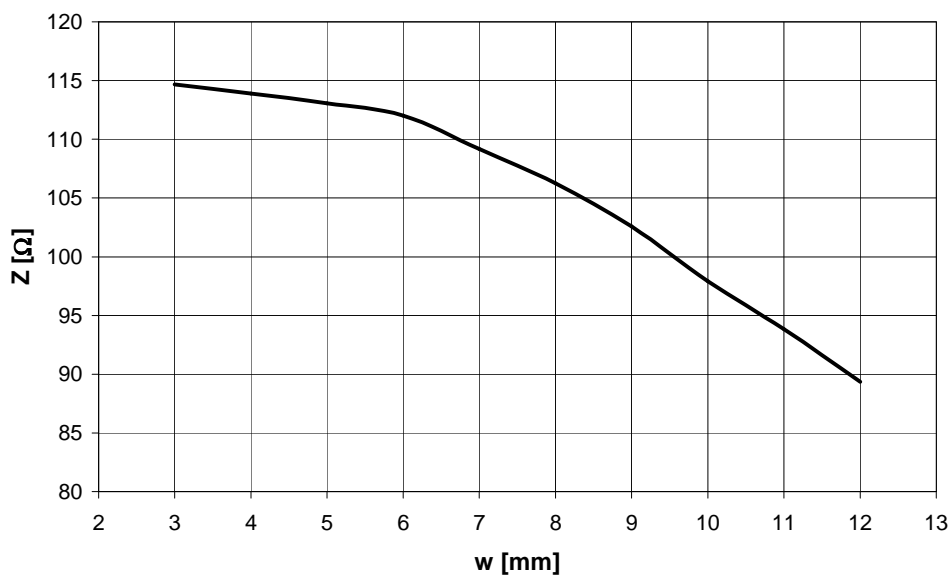


Obr. 2.8: Struktura impedančního přizpůsobovacího vedení

Dosažení požadované výsledné impedance této struktury je možné provádět buď změnou vzdálenosti přizpůsobovacího vedení od reflektoru, nebo změnou šířky přizpůsobovacího vedení. Grafy závislosti výstupní impedance přizpůsobovacího vedení na šířce přizpůsobovacího pásku w a na vzdálenosti pásku od reflektoru h jsou zobrazeny na obr. 2.9 a obr. 2.10.



Obr. 2.9: Závislost výstupní impedance přizpůsobovacího vedení na vzdálenosti h



Obr. 2.10: Závislost výstupní impedance přizpůsobovacího vedení na šířce w

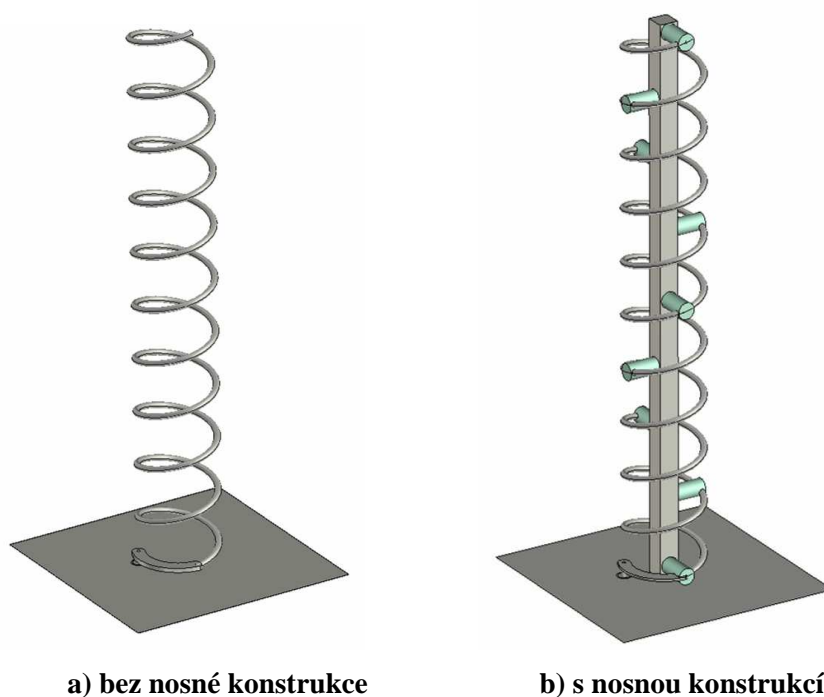
Křivka na obr. 2.9 se vztahuje k rozměrům šroubovicové antény s nosnou konstrukcí: $d = 31,2$ mm, $w = 5$ mm a $t = 1$ mm. Na obr. 2.10 je zobrazena křivka pro rozměry antény $d = 31,2$ mm, $h = 2,5$ mm a $t = 1$ mm.

3 ŠROUBOVICOVÁ ANTÉNA PRO WIFI PÁSMO 2,4 GHz

Tato kapitola je zaměřena na návrh jednopásmové šroubovicové antény pro WiFi pásmo s pracovní frekvencí 2,4 GHz. Anténa je navržena v programu CST MWS. Struktura navržené šroubovicové antény je zobrazena na obr. 3.1.

3.1 Konstrukce antény

Anténa se skládá ze čtyř základních částí: šroubovice, přizpůsobovací vedení, reflektor a nosná konstrukce. Šroubovice je navinuta vodivým drátem o průměru 2,5 mm. Přizpůsobovací člen je tvořen čtvrtvlnným vedením, které nám umožňuje napájet anténu z 50 Ω napaječe. Odraznou plochu (reflektor) tvoří kovová čtvercová deska.



Obr. 3.1: Konstrukce šroubovicové antény pro WiFi pásmo 2,4 GHz

Aby bylo zamezeno mechanickému poškození antény při manipulaci, čímž by došlo i k jejímu rozladění, musí být anténa vyztužena nosnou konstrukcí. Hlavním nosným prvkem je kovový hranol, který prochází středem šroubovicové antény. K němu jsou připevněny dielektrické vzpěry. Uvedené uspořádání má za následek zamezení jakékoliv změny polohy drátu. Vzpěry jsou rozmístěny rovnoměrně po celé délce antény po 450°. Rozměry prvků, ze kterých se skládá nosná konstrukce, byly zvoleny s ohledem na běžně dostupné materiály. Rozměry šroubovicové antény bez nosné konstrukce a s nosnou konstrukcí jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1: Rozměry šroubovicové antény pro WiFi pásmo 2,4 GHz

symbol	název veličiny	konstrukce a) [mm]	konstrukce b) [mm]
<i>D</i>	průměr šroubovice	31,2	31,2
<i>S</i>	vzdálenost mezi závitů šroubovice	22,5	22,5
<i>N</i>	počet závitů šroubovice	10 z	10 z
<i>L</i>	délka šroubovice	225	225
<i>a</i>	poloměr vodiče šroubovice	1,25	1,25
<i>w</i>	šířka přizpůsobovacího vedení	5	5
<i>h</i>	vzdálenost přizpůsobovacího vedení od reflektoru	2,90	4,57
<i>t</i>	tloušťka přizpůsobovacího vedení	1,8	1,0
<i>w_n</i>	šířka středového hranolu	-	8
<i>d_{vzp}</i>	průměr dielektrické vzpěry	-	7
<i>w_r</i>	velikost čtvercového reflektoru	95	95

3.2 Návrh antény a simulace

Před simulováním v programu CST MWS byly nejprve určeny přibližné rozměry šroubovicové antény pomocí programu Helix Antenna Calculator [7] a porovnány s vypočtenými v tab. 3.2. Tento kalkulátor umožňuje vypočítat rozměry šroubovicové antény a zobrazit její vyzařovací charakteristiku. Dále umožňuje simulovat vliv změny rozměrů antény na vyzařovací charakteristiku, kterou lze zobrazit buď v polárních nebo v pravouhlých souřadnicích. Poté byla v programu CST MWS navržena a impedančně přizpůsobena šroubovice bez nosné konstrukce a s nosnou konstrukcí.

Rozměry antény byly vypočteny podle návrhových vztahů (3.1) ÷ (3.7). Délka jednoho závitu C byla zvolena podle podmínky pro axiální mód (2.5) na hodnotu $C = 0,8 \cdot \lambda$. Podle podmínky (2.4) byl určen úhel stoupání závitů na hodnotu $\alpha = 13^\circ$.

$$\lambda = \frac{c}{f_{stř}} = \frac{c}{2,4 \cdot 10^9} = 125\text{mm} \Rightarrow \frac{\lambda}{4} = 31,25\text{mm} \quad (3.1)$$

$$C = 0,8 \cdot \lambda = 0,8 \cdot 125 \cdot 10^{-3} = 100\text{mm} \quad (3.2)$$

$$D = \frac{C}{\pi} = \frac{0,1}{\pi} = 31,8\text{mm} \quad (3.3)$$

$$S = C \cdot \tan(\alpha) = 0,1 \cdot \tan(13^\circ) = 23,1\text{mm} \quad (3.4)$$

$$L_0 = \sqrt{C^2 + S^2} = \sqrt{0,1^2 + (23,1 \cdot 10^{-3})^2} = 102,6\text{mm} \quad (3.5)$$

$$Z_{ant} = 140 \cdot \frac{\pi \cdot D}{\lambda} = 140 \cdot \frac{\pi \cdot 31,8 \cdot 10^{-3}}{125 \cdot 10^{-3}} = 111,9\Omega \quad (3.6)$$

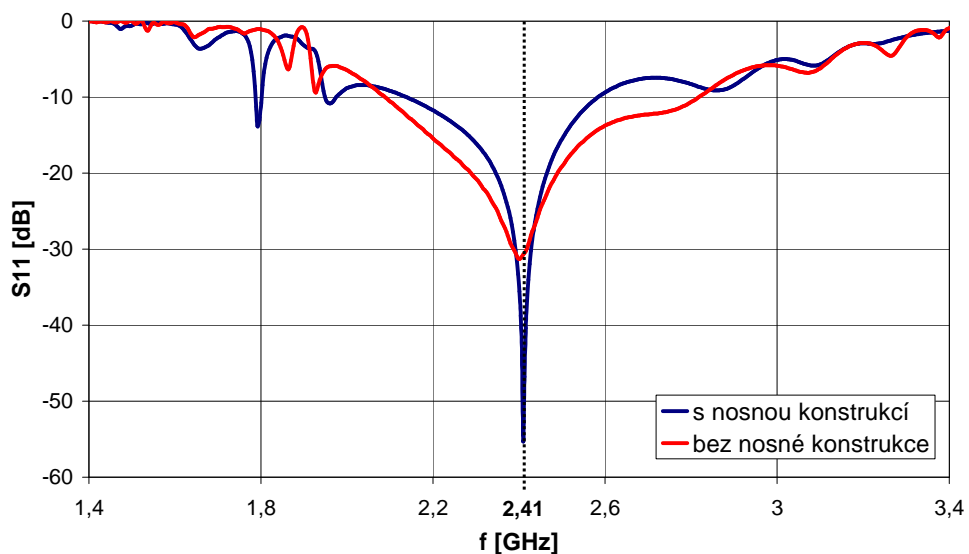
$$Z_{ved} = \sqrt{Z_0 \cdot Z_{ant}} = \sqrt{50 \cdot 111,9} = 74,8\Omega \quad (3.7)$$

Porovnání vypočtených rozměrů antény, hodnot z programu Helix Antenna Calculator a výsledné rozměry optimalizované antény z programu CST MWS jsou uvedeny v tab. 3.2. Jak je z této tabulky patrné, vypočtené hodnoty jsou shodné s hodnotami z programu Helix Antenna Calculator. Optimalizací antény se rozměry nepatrně změnily.

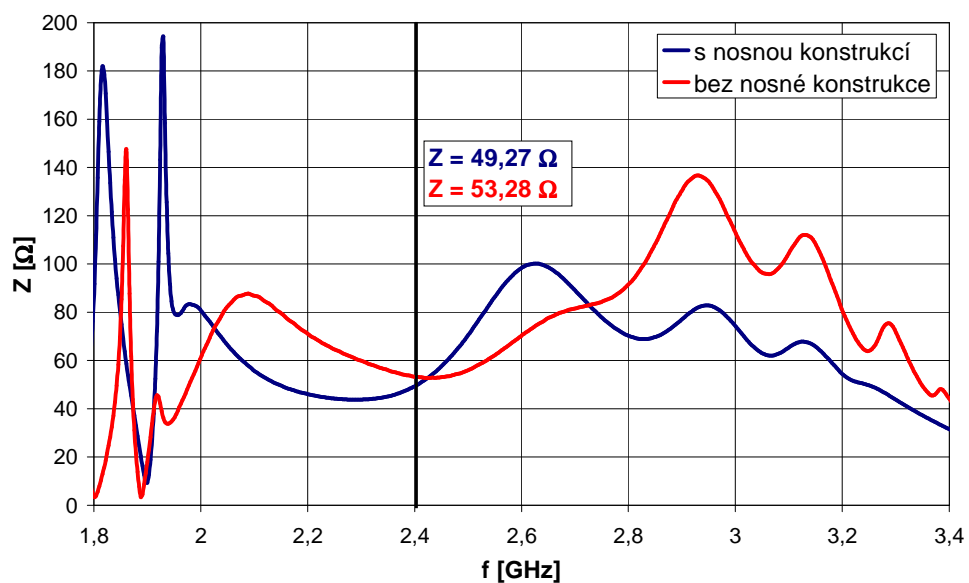
Tab. 3.2: Porovnání vypočtených rozměrů antény

symbol	název veličiny	vypočtené hodnoty [mm]	Helix Antena Calculator [mm]	CST MWS [mm]
C	obvod šroubovice	100	100	98
D	průměr šroubovice	31,8	31,8	31,2
S	vzdálenost mezi závitů šroubovice	23,1	23,1	22,5
N	počet závitů šroubovice	10 z	10 z	10 z
L₀	délka závitů	102,6	102,6	225
Z_{ant}	impedance antény	111,9	112	-

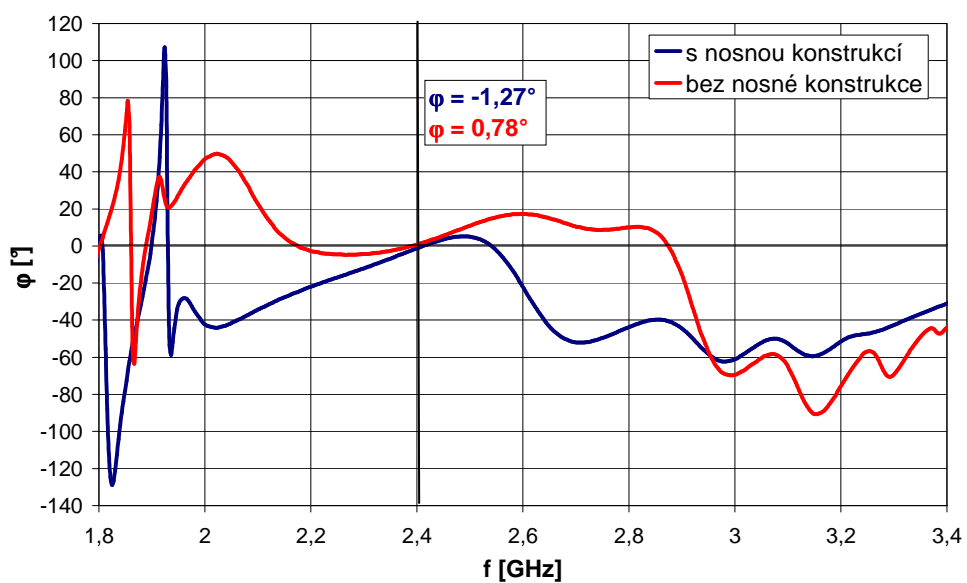
Na obr. 3.2. je zobrazena kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} šroubovicové antény s nosnou konstrukcí v porovnání s činitelem odrazu šroubovicové antény bez nosné konstrukce. Minimální hodnota činitele odrazu $S_{11} = -55,2$ dB pro anténu s nosnou konstrukcí je na frekvenci $f = 2,41$ GHz. Šroubovicová anténa bez nosné konstrukce má toto minimum na frekvenci $f = 2,4$ GHz, kde je činitel odrazu $S_{11} = -31,3$ dB. Šířka pásma šroubovicové antény s nosnou konstrukcí je 370 MHz ($B_{\%} = 15,4$ %) a bez nosné konstrukce je šířka pásma 730 MHz ($B_{\%} = 30,4$ %). Rozdíl mezi těmito průběhy je způsoben rozdílnou výslednou impedancí antény a tudíž i jinými rozměry přízpusobovacího vedení.



Obr. 3.2: Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} na vstupu šroubovicové antény

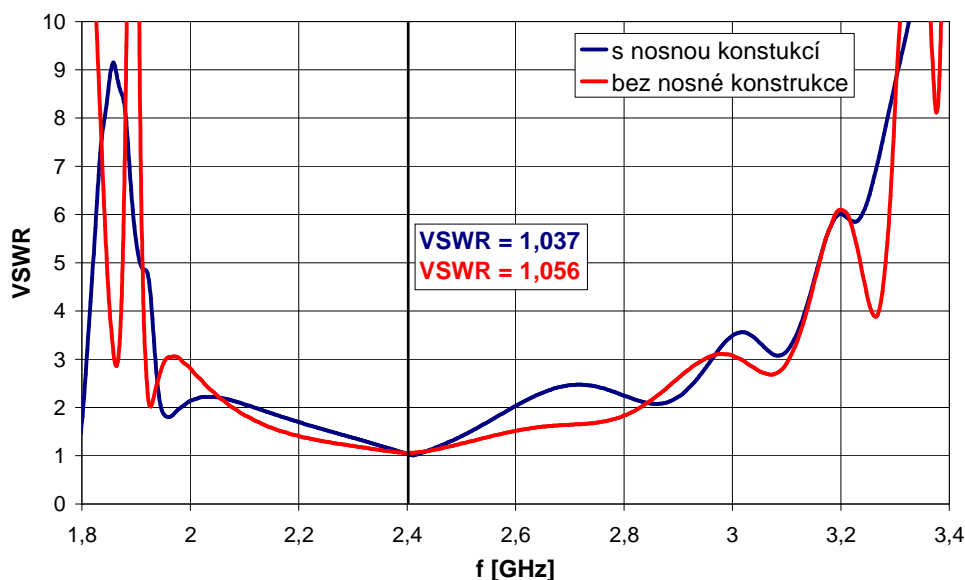


Obr. 3.3: Závislost modulu vstupní impedance na frekvenci šroubovicové antény

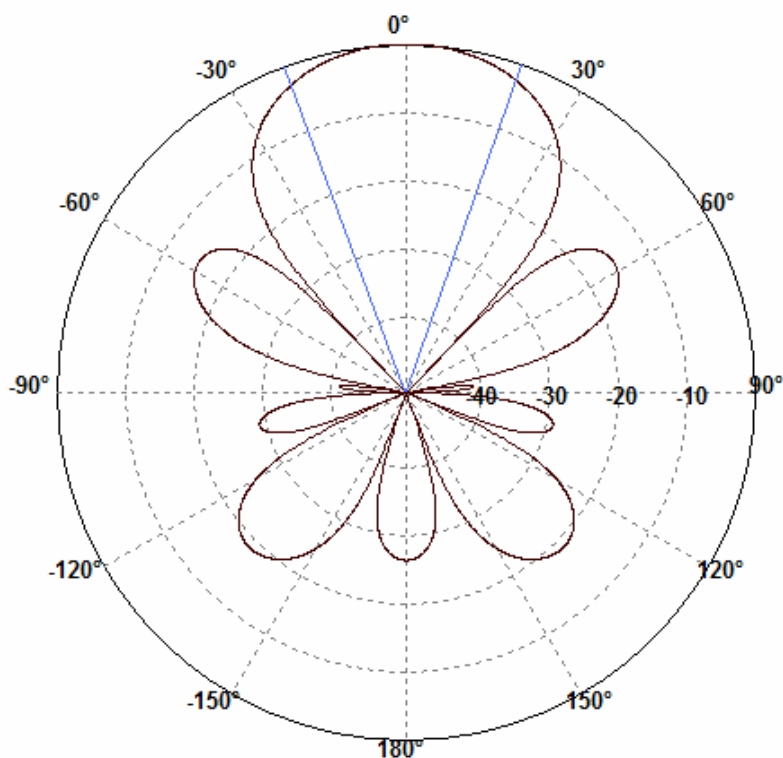


Obr. 3.4: Závislost fáze vstupní impedance na frekvenci šroubovicové antény

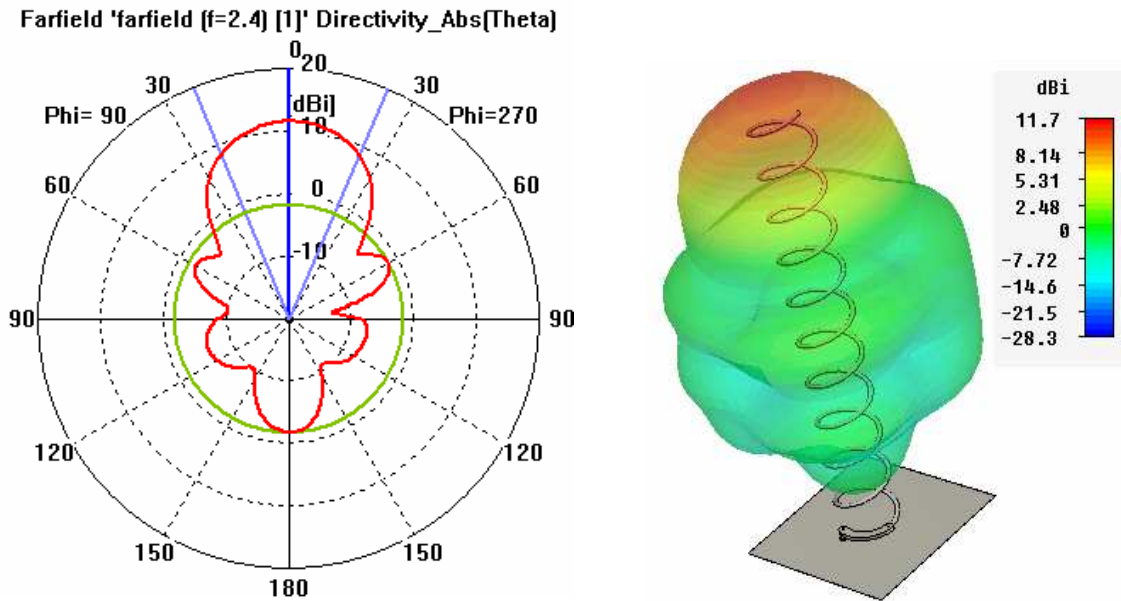
Na výše uvedených obrázcích jsou zobrazeny průběhy vstupní impedance šroubovicové antény s nosnou a bez nosné konstrukce. Na obr. 3.3 je uvedena závislost modulu vstupní impedance v závislosti na frekvenci a na obr. 3.4 je závislost fáze vstupní impedance antény na kmitočtu. V obou grafech jsou uvedeny hodnoty pro frekvenci 2,4 GHz. Na obr. 3.5 jsou uvedeny závislosti poměru stojatých vln $VSWR$ na kmitočtu šroubovicové antény s nosnou konstrukcí a bez ní.



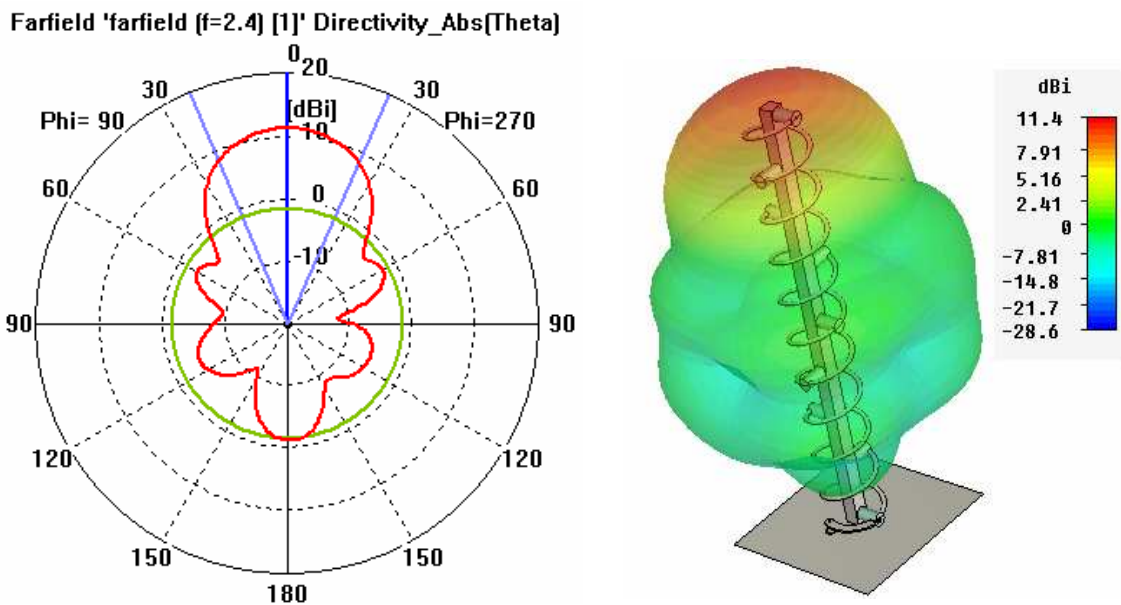
Obr. 3.5: Závislost poměru stojatých vln $VSWR$ na kmitočtu šroubovicové antény



Obr. 3.6: Směrová charakteristika na $f = 2,4$ GHz z programu Helix Calculator



Obr. 3.7: Směrové charakteristiky šroubovicové antény bez nosné konstrukce



Obr. 3.8: Směrové charakteristiky šroubovicové antény s nosnou konstrukcí

Obr. 3.6 zobrazuje směrovou charakteristiku šroubovicové antény na frekvenci 2,4 GHz ve vertikálním řezu, která byla vypočítána programem Helix Calculator [7]. Zisk antény vypočítaný tímto programem je 14,36 dBi a úhel vyzařování v hlavním směru pro pokles o 3 dB je 41,6°. Na obr. 3.7 jsou zobrazeny směrové charakteristiky v polárních souřadnicích a 3D zobrazení pro šroubovicovou anténu bez nosné konstrukce na frekvenci 2,4 GHz. Zisk antény v hlavním vyzařovacím směru je 11,7 dBi. Úhel vyzařování antény pro pokles o 3 dB je 45,5° a úroveň postranních laloků je -13,3 dB. Směrové charakteristiky šroubovicové antény s nosnou konstrukcí pro frekvenci 2,4 GHz jsou zobrazeny na obr. 3.8. Zisk této antény je 11,4 dBi s úhlem vyzařování pro pokles o 3 dB je 46,7°. Úroveň postranních laloků je -12,6 dB.

3.3 Přehled dosažených výsledků

Tab. 3.3: Přehled výsledků simulací na frekvenci 2,4 GHz

symbol	název veličiny	Helix Calculator	CST MWS	
			konstrukce a)	konstrukce b)
S_{11}	činitel odrazu [dB]	-	-31,3	-34,8
B	šířka pásma [MHz]	-	730	370
$B_{\%}$	šířka pásma [%]	-	30,4	15,4
Z	modul vstupní impedance [Ω]	-	53,28	49,25
φ	fáze vstupní impedance [°]	-	0,78	-1,27
$VSWR$	poměr stojatých vln	-	1,056	1,037
G	zisk antény [dBi]	14,3	11,7	11,4
θ	úhel vyzařování (pokles o 3 dB) [°]	41,6	45,5	46,7

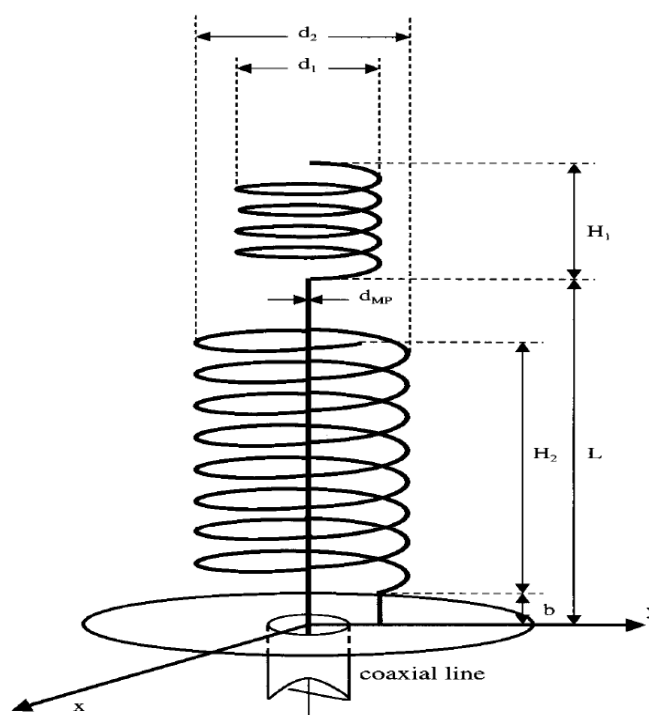
V tabulce 3.3 jsou uvedeny nejdůležitější parametry navrhované šroubovicové antény. Jsou zde porovnány hodnoty vypočtené programem Helix Calculator a programem CST MWS, kde byly simulovány dvě konstrukce antény. Konstrukce a) je šroubovicová anténa bez nosné konstrukce a konstrukce b) je anténa s nosnou konstrukcí. Anténa bez nosné konstrukce měla o poznání větší šířku pásma i nepatrně větší zisk. Lepšího přizpůsobení antény bylo ale dosaženo ve variantě b), kdy na frekvenci 2,41 GHz byl činitel odrazu $S_{11} = -55,25$ dB, $Z = 50,58 \Omega$, $\varphi = -0,17^\circ$ a poměr stojatých vln byl $VSWR = 1,003$. Zisku antény vypočteného programem Helix Calculator nebylo dosaženo, ale simulovaná anténa měla větší úhel vyzařování v hlavním směru o $5,1^\circ$.

4 DVOUPÁSMOVÉ ŠROUBOVICOVÉ ANTÉNY

Vzhledem k neustále rostoucím nárokům na bezdrátové systémy, je zapotřebí používat místo klasických jednopásmových antén antény vícepásmové. Vícepásmovou anténu lze vytvořit i z antény šroubovicové. Tato kapitola je zaměřena především na některé způsoby konstrukce dvoupásmové šroubovicové antény.

4.1 Dvoupásmová anténa s parazitní šroubovicovou anténou

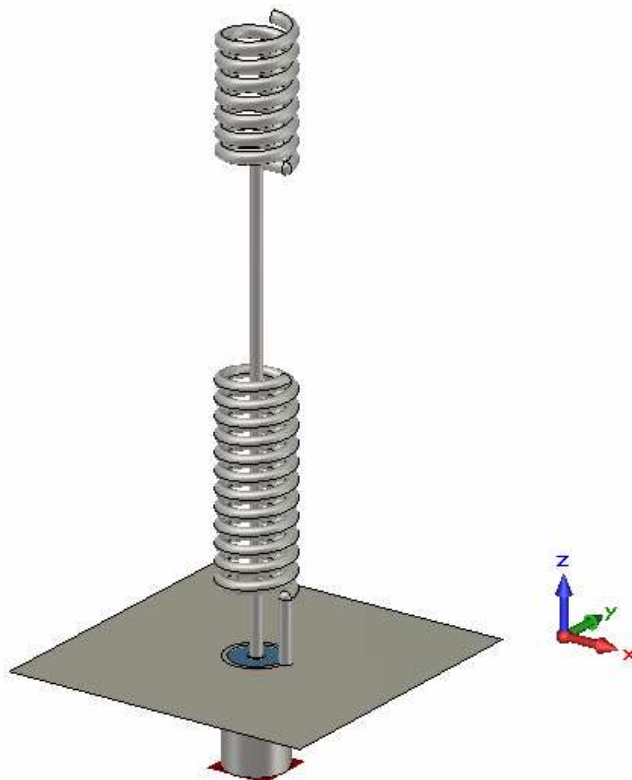
Jedním z možných řešení dvoupásmové šroubovicové antény je použití parazitní šroubovicové antény. Tato anténa je složena ze dvou šroubovicových antén, z nichž jedna je umístěna na monopólu, který prochází středem osy parazitní šroubovice. Struktura této antény je zobrazena na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Dvoupásmová anténa s parazitní šroubovicovou anténou [4]

Z obr. 4.1 je patrné, že šroubovicová anténa o délce H_1 a průměru d_1 je napájena z koaxiálního vedení přes monopól, který prochází středem osy parazitní šroubovice. Tato parazitní šroubovice o délce H_2 a průměru d_2 je připevněna přímo na reflektor. Délka monopólu, na kterém je umístěna šroubovice H_1 , má délku L a průměr d_{MP} . Vodič, který spojuje parazitní šroubovici s reflektorem, má délku b a je označován jako kompenzační. Vytvoření druhého frekvenčního pásma a jeho vlastnosti jsou přímo závislé na přítomnosti parazitní šroubovice. [4]

Na obr. 4.2 je zobrazen model dvoupásmové šroubovicové antény v programu CST MWS. Rozměry antény jsou definovány podle [4] pro frekvenční pásma $f_1 = 900$ MHz a $f_2 = 1800$ MHz. Podle těchto rozměrů se nepodařilo dosáhnout výsledků uvedených ve [4].

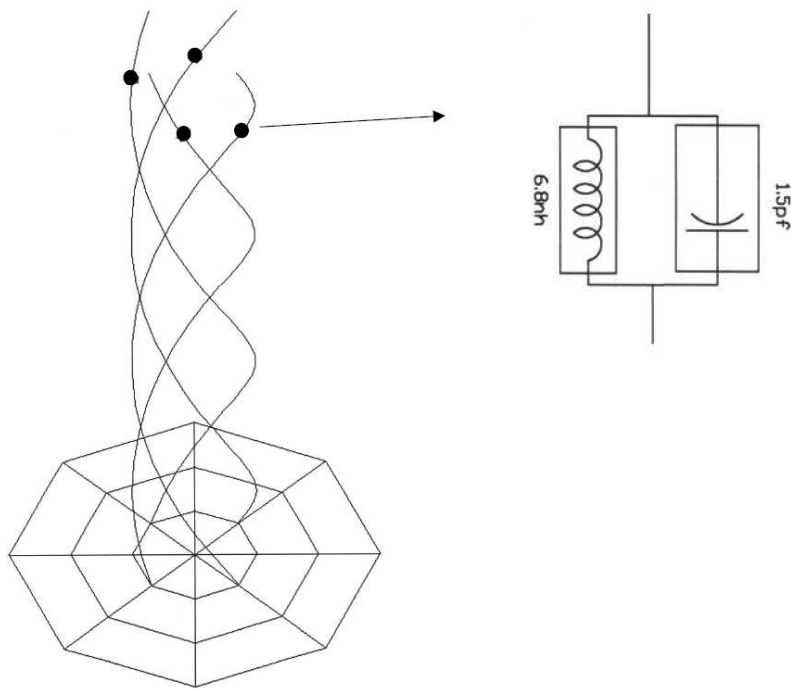


Obr. 4.2: Model dvoupásmové šroubovicové antény v programu CST

4.2 Šroubovicová anténa s paralelním LC obvodem

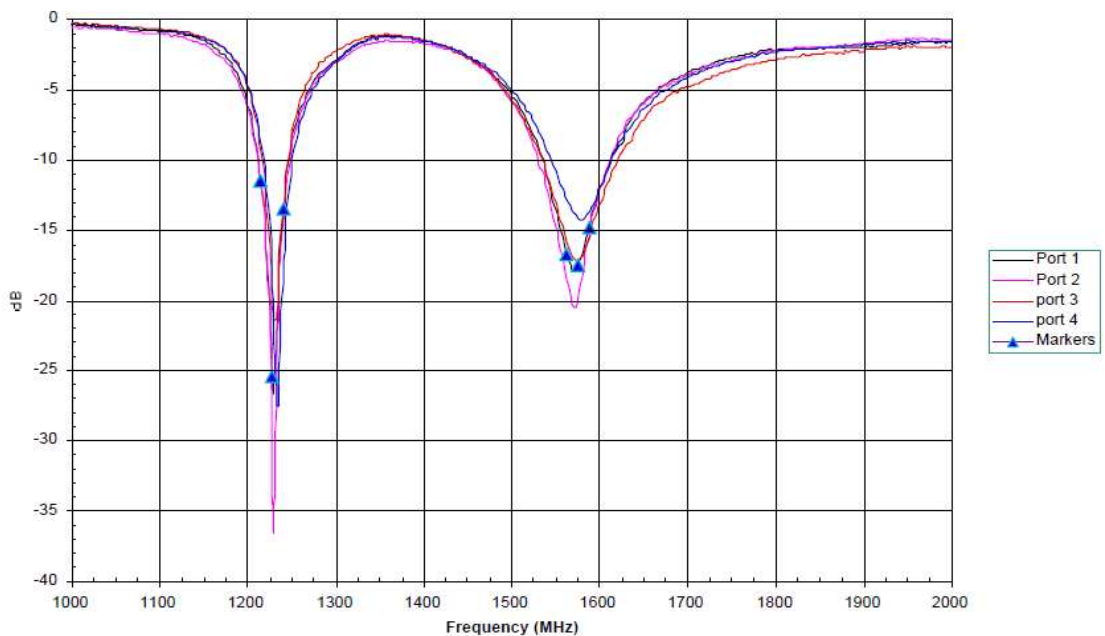
Rezonanční quadrifilární šroubovicové antény jsou používány především pro ruční přijímače GPS signálu a pro některé mobilní komunikační systémy. Mezi významné výhody této antény patří především kompaktní velikost a souměrný tvar směrové charakteristiky. Níže popsaná technika dosažení dvoupásmové antény poskytuje stejný výkon pro obě oddělená frekvenční pásma a nemá dopad na celkovou velikost šroubovice.

Každé ze čtyř ramen šroubovicové antény má délku jedné otáčky, přičemž jeden konec je vždy otevřený a druhý konec je připojen na napájení. Struktura antény je zobrazena na obr. 4.3. Délka ramene určuje rezonanci antény na nižším frekvenčním pásmu. Vyšší frekvenční pásmo je dáno umístěním paralelního rezonančního obvodu LC do vhodného místa na rameni každé šroubovice. Tento obvod funguje jako přepínač. Na rezonanční frekvenci má nekonečně velkou impedanci. Při nižší frekvenci má LC obvod nízkou impedanci, která kompenzuje malou změnu celkové délky šroubovice. Všechna čtyři ramena jsou buzena s různým fázovým posuvem (0° , 90° , 180° a 270°) k získání kruhové polarizace. [8]



Obr. 4.3: Šroubovicová anténa s paralelním LC obvodem [8]

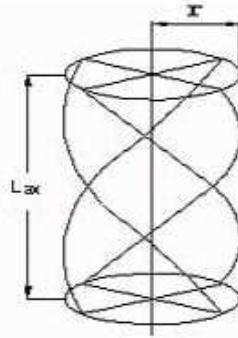
Model této antény uvedený na obr. 4.3 je navržen pro provoz ve dvou frekvenčních pásmech $f_1 = 1227$ MHz a $f_2 = 1575$ MHz. Ramena šroubovice jsou tvořena měděnými pásky navinutými na válec. Rezonanční obvody jsou umístěny přes mezeru v každém ramenu šroubovice. Na obr. 4.4 je zobrazena charakteristika S_{11} pro všechny čtyři ramena quadrifilární šroubovicové antény. [8]



Obr. 4.4: Charakteristika S_{11} parametrů pro všechna čtyři ramena antény [8]

4.3 Dvoupásmová quadrifilární šroubovicová anténa

Quadrifilární anténa je složena ze čtyř vodičů, které jsou rovnoměrně navinuty na válci. Jednotlivé vodiče jsou napájeny se stejnou amplitudou s fázemi 0° , 90° , 180° a 270° . Struktura antény je zobrazena na obr. 4.5, kde L_{ax} je délka šroubovice a r je poloměr šroubovice. Quadrifilární šroubovicová anténa může být považována za kombinaci dvou bifilárních šroubovic.



Obr. 4.5: Quadrifilární šroubovicová anténa [6]

Dvoupásmového provozu této antény lze dosáhnout dvěma způsoby. Vždy je zapotřebí použít dvě odlišné quadrifilární antény, které vhodným způsobem spojíme. Jednou z možností je napojení jedné antény (G) na vrchol druhé (B), nebo umístění jedné antény (G) do středu druhé (B), jak je ukázáno na obr. 4.6.

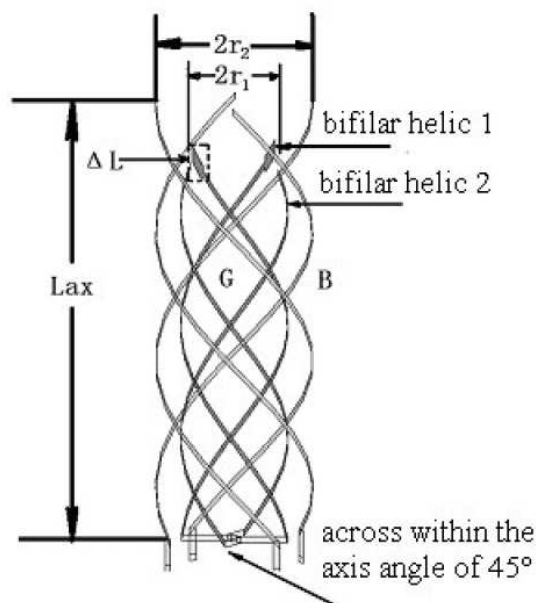


Obr. 4.6: Spojení dvou quadrifilárních šroubovicových antén [6]

Takto spojené antény mají řadu nepříznivých účinků na výsledné vlastnosti antény. Jedním z nich je například velký pokles zisku nebo výrazné snížení elevačního úhlu.

Řešením těchto problémů je použití dvou quadrifilárních vinutí, které jsou umístěné v sobě, jako v předchozím případě, ale jejich vinutí je dlouhé pouze $\frac{3}{4}\lambda$. Každé ze čtyř ramen obou quadrifilárních antén má $\frac{3}{4}$ otáčky, přičemž horní konec je otevřený a anténa se napájí na spodní straně. Struktura antény je zobrazena na obr. 4.7.

Ramena obou antén jsou v celé délce vinuta pod úhlem 45° , čímž je zabráněno vzájemnému ovlivňování mezi oběma anténami. Změnou poměru mezi délkou antény L_{ax} a poloměrem r lze měnit tvar vyzářovací charakteristiky a kruhovou polarizaci. [6]

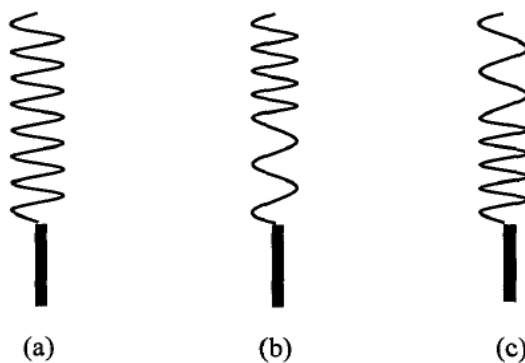


Obr. 4.7: Dvoupásmová quadrifilární šroubovicová anténa [6]

4.4 Šroubovicová anténa s rozdílnými úhly stoupání závitů

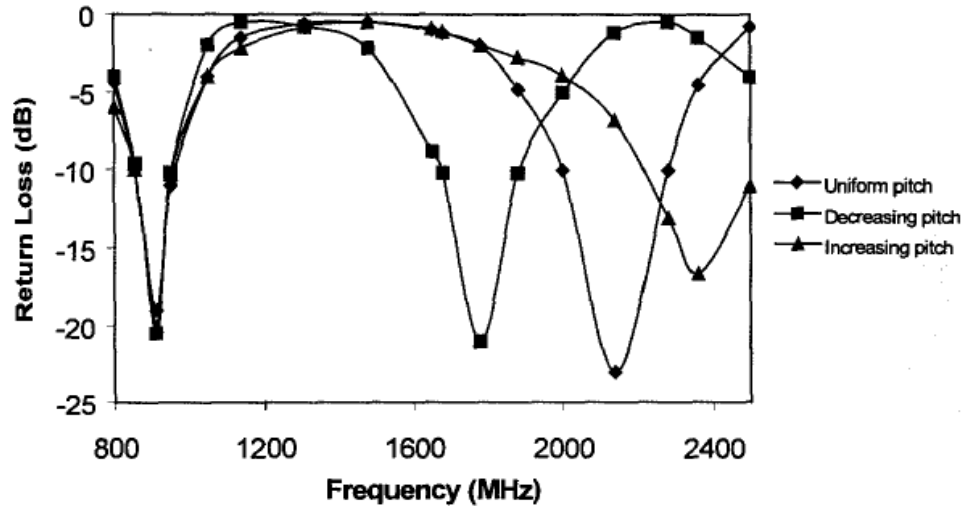
Vzhledem k velikosti antény a k její polarizaci je toto řešení vhodné především k mobilním komunikacím. Výhodou této dvoupásmové antény je jednoduchá konstrukce zhotovena pouze z jednoho vodiče, na kterém jsou vytvořena dvě vinutí s různým úhlem stoupání závitů.

Dvoupásmového provozu lze jednoduše docílit tím, že celková délka vodiče určuje dolní frekvenční pásmo a úhel stoupání závitů určuje horní frekvenční pásmo. Tímto způsobem může být anténa naladěna na jakékoliv frekvenční pásmo. Nicméně jakákoliv změna průměru, délky vodiče nebo i úhlu stoupání závitů má za následek nežádoucí posunutí i druhého (nižšího nebo vyššího) frekvenčního pásma. Z tohoto důvodu je správné naladění velmi složité. Požadovaného dvoupásmového provozu je možné dosáhnout pouze v případě, že úhel stoupání závitů je upraven podle obr. 4.8, který ukazuje tři možnosti úhlu stoupání závitů. [9]



Obr. 4.8: Konstrukce šroubovicové antény s rozdílnými úhly stoupání závitů [9]

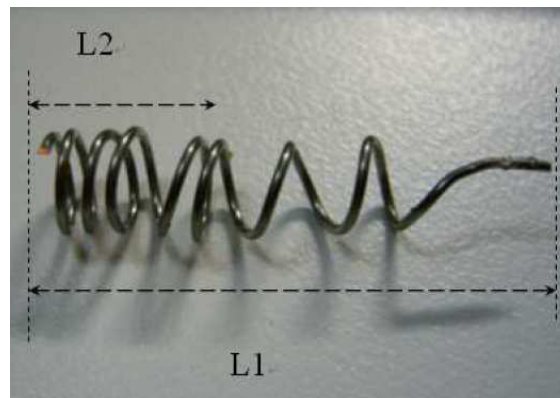
Obr. 4.8(a) zobrazuje klasickou konstrukci šroubovicové antény s jednotným úhlem stoupání závitů. Na obr. 4.8(b) je dvoupásmová šroubovicová anténa, jejíž úhel stoupání závitů postupně klesá podél osy antény. Na obr. 4.8(c) je naopak konstrukce antény, kdy úhel stoupání závitů podél osy antény postupně roste.



Obr. 4.9: Charakteristika S_{11} parametrů pro různé úhly stoupání závitů [9]

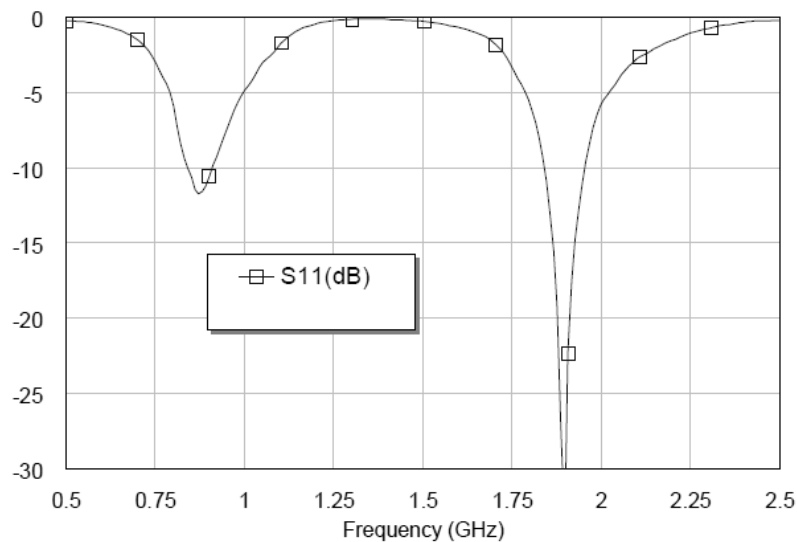
Na obr. 4.9 jsou zobrazeny charakteristiky S_{11} parametrů, které odpovídají výše zmíněným konstrukcím šroubovicových antén. [9]

Na obr. 4.10 je zobrazena anténa, která je dle [5] navržena pro použití v mobilních telefonech pro technologie 2,5G a 3G. Nižší frekvenční pásmo je na frekvenci 892 MHz a vyšší je na frekvenci 1960 MHz. Uvedeným frekvenčním pásmům odpovídají délky šroubovic $L_1 = 30$ mm a $L_2 = 10$ mm a průměr šroubovice $D = 5$ mm.



Obr. 4.10: Šroubovicová anténa s dvěma odlišnými vinutími [5]

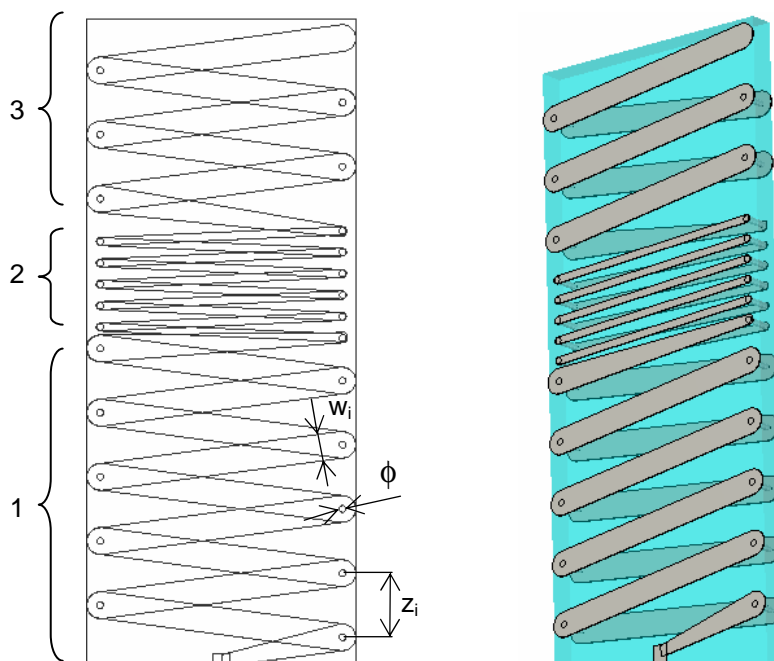
Šroubovicová anténa pro nižší frekvenční pásmo má délku L_1 . Šroubovicová anténa pro vyšší frekvenční pásmo má délku L_2 . Délka vodiče, ze kterého jsou navinuty jednotlivé šroubovice, odpovídá přibližně čtvrtvlnné délce požadovaného frekvenčního pásma. Výsledná charakteristika S_{11} parametru je zobrazena na obr. 4.11.



Obr. 4.11: Charakteristika S_{11} parametru dvoupásmové šroubovicové antény [5]

4.5 Planární šroubovicová anténa s rozdílnými úhly stoupání závitů

Další možností vytvoření dvoupásmové antény je převedení drátové šroubovicové antény s rozdílnými úhly stoupání závitů do planární podoby. Anténa je navržena na oboustranně pokoveném substrátu, na kterém jsou vytvořeny vodivé pásy tvořící jednotlivé závitky šroubovice. Závitky na opačných stranách substrátu jsou spojeny prokovy. Struktura této antény je uvedena na obr. 4.12. Toto řešení je výhodné především z hlediska výroby, která je velmi jednoduchá a levná. [10]



Obr. 4.12: Planární dvoupásmová šroubovicová anténa s rozdílnými úhly stoupání závitů

Anténa uvedená na obr. 4.12 je zhotovena na substrátu o tloušťce $h = 1$ mm s relativní permitivitou $\epsilon_r = 4,4$. Rozměr desky, na které je vytvořena šroubovice, je 16×10 mm. Základní rozměry antény jsou dány parametry:

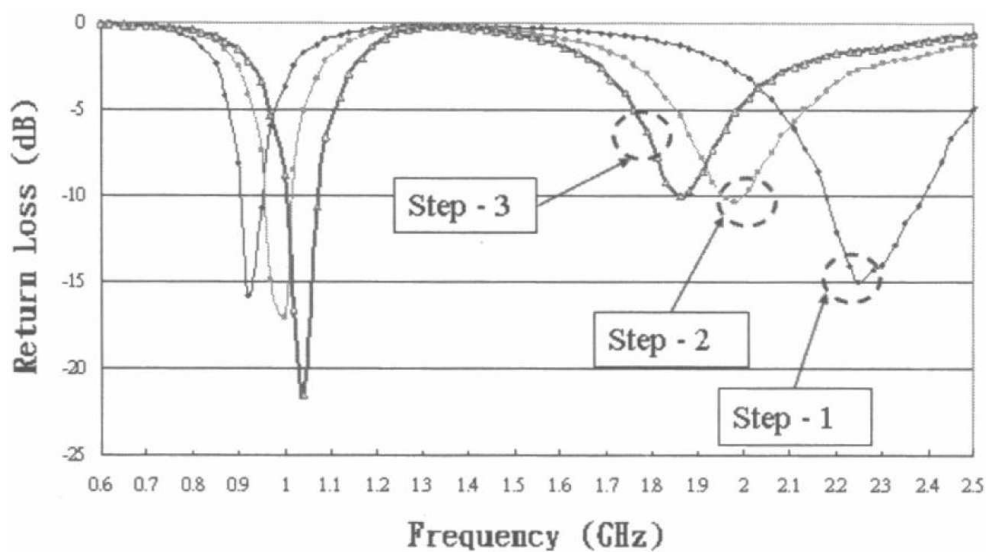
- z_i – poloviční vzdálenost mezi závity
- w_i – šířka pásku tvořící závit šroubovice
- ϕ – průměr prokovu mezi horní a spodní stranou substrátu.

Anténa je navržena na frekvenční pásma 900 MHz a 1850 MHz a je rozdělena na tři části podle rozměrů z a w . Rozměry antény jsou uvedeny v tab. 4.1. Průměr prokovů je u všech částí stejný $\phi = 0,3$ mm. [10]

Tab. 4.1: Rozměry planární šroubovicové antény

step	část	z [mm]	w [mm]	N
1	1	1,2	1,0	5
	2	0,4	0,3	5
	3	1,2	1,0	5
2	1	1,2	1,0	7
	2	0,4	0,3	5
	3	1,2	1,0	3
3	1	1,2	1,0	8
	2	0,4	0,3	5
	3	1,2	1,0	2

Na obr. 4.13 jsou zobrazeny kmitočtové závislosti činitelů odrazů S_{11} planární šroubovicové antény pro různé počty závitů jednotlivých částí antény.

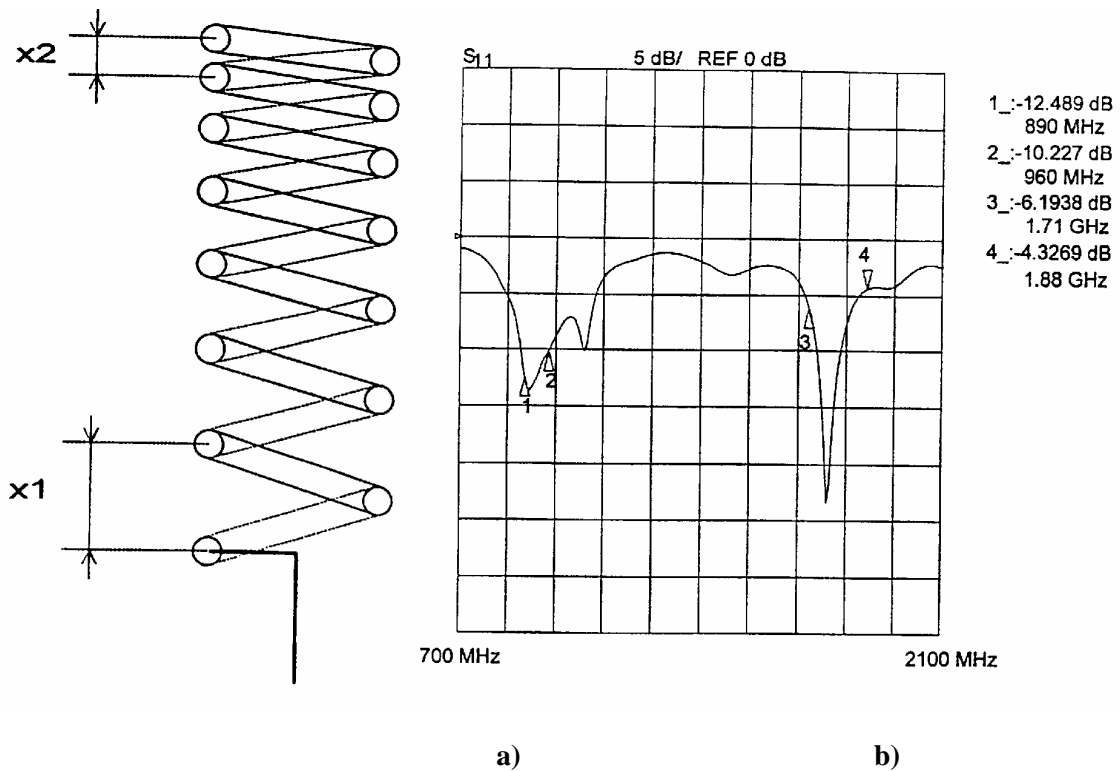


Obr. 4.13: Charakteristiky S_{11} parametrů dvoupásmové planární šroubovicové antény [10]

Tato anténa byla překreslena do programu CST MWS podle daných rozměrů, ale bohužel nebylo dosaženo předpokládaných výsledků uvedených v [10] na obr. 4.13.

Další varianta dvoupásmové planární šroubovicové antény je s postupnou změnou stoupání závitů podél osy antény. Struktura této antény je zobrazena na obr. 4.14a. Anténa na tomto obrázku má 7 závitů a je z něho patrné, jak se vzdálenosti mezi jednotlivými závitů x_1 a x_2 rovnoměrně zmenšují. Anténa může být konstruována i opačně s postupným stoupáním vzdáleností závitů. Vzdálenosti mezi závitů x_1 a x_2 rovnoměrně rostou.

Na obr. 4.14b je pak zobrazena kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} této antény. První frekvenční pásmo je v rozsahu 880 ÷ 960 MHz a druhé pásmo je v rozmezí frekvencí 1730 ÷ 1800 MHz. Šířky obou pásem jsou uvedeny pro činitel odrazu $S_{11} = -10$ dB. Trojúhelník na svislé ose vyznačuje hodnotu $S_{11} = 0$ dB a jeden dílek osy je 5 dB. [11]



Obr. 4.14: Planární šroubovicová anténa s rovnoměrně zmenšující se vzdáleností mezi závitů a) struktura antény, b) kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} [11]

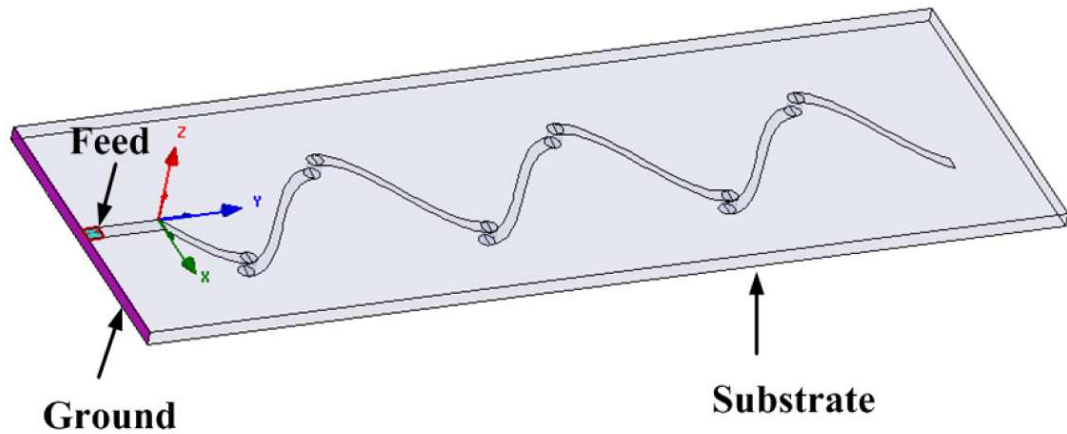
Jiné řešení vytvoření planární šroubovicové antény je vytvoření motivu závitů, který je podobný klasickým drátovým šroubovicovým anténám. Závity antény jsou definovány rovnicemi [12]

$$x(t) = D \sin(A \cdot t), \quad (4.1)$$

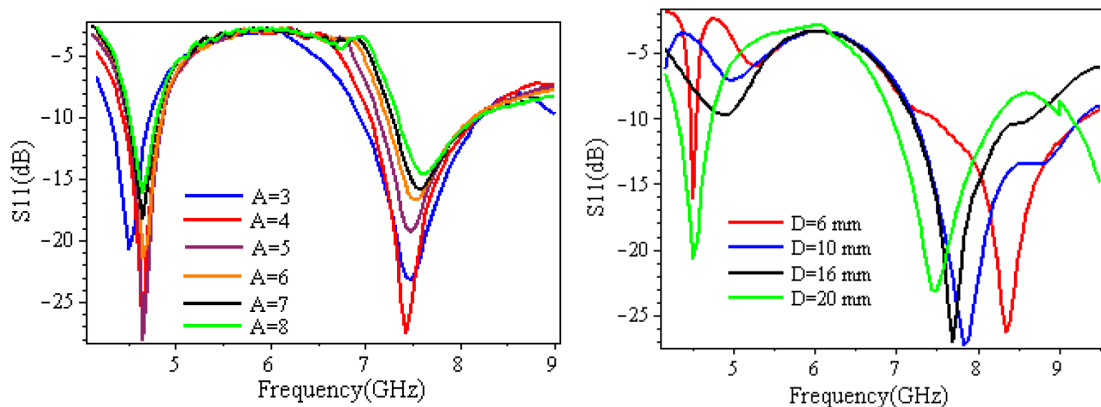
$$y(t) = t, \quad (4.2)$$

kde D je průměr antény a A je délka antény. Z těchto rovnic je patrné, že rozměr antény v ose y je lineární a v ose x je závislý na funkci sinus. Struktura antény je zobrazena na obr. 4.15. Anténa je vytvořena na substrátu o výšce $h = 2$ mm s relativní permitivitou $\epsilon_r = 4,4$. Rozměry celé antény jsou 120x40 mm. Závity na obou stranách substrátu jsou opět spojeny prokovy. Anténa je napájena mikropáskovým vedením, které umožňuje napájet anténu z 50Ω vedení.[12]

Na obr. 4.16 jsou zobrazeny výsledky parametrické analýzy pro průběhy činitele odrazu S_{11} při změně parametrů A a D . Jako výchozí délka antény je $A = 100$ mm.



Obr. 4.15: Struktura planární šroubovicové antény [12]



Obr. 4.16: Závislost činitele odrazu S_{11} na změně parametru A a D [12]

5 ŠROUBOVICOVÁ ANTÉNA PRO WIFI PÁSMO 2,4 GHz A 5 GHz

Prověřením několika různých konstrukcí dvoupásmových šroubovicových antén, byla za nejvhodnější vybrána varianta šroubovicové antény s rozdílnými úhly stoupání závitů. Tato anténa byla simulována v konstrukčních variantách klasické drátové šroubovicové antény a planární šroubovicové antény.

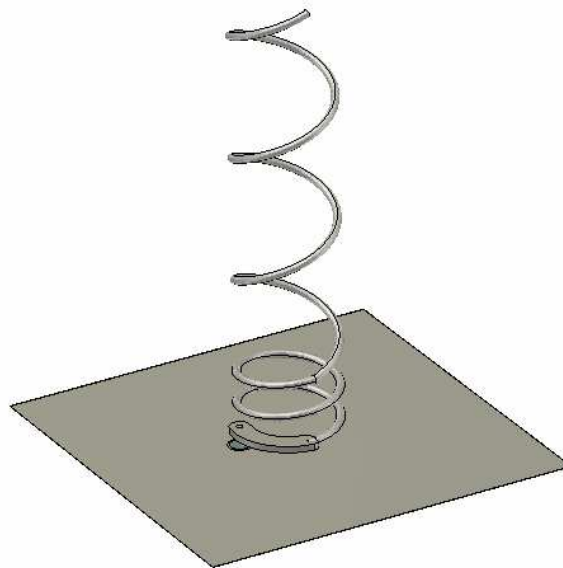
Obě varianty antén jsou navrhovány pro WiFi pásma 2,4 GHz a 5 GHz. Frekvenční rozsah nižšího WiFi pásma je přibližně 2,40 ÷ 2,49 GHz. Rozsah vyššího frekvenčního WiFi pásma je 5,15 ÷ 5,85 GHz. Anténa je tedy navržena tak, aby pokryla celá tato pásma. Uvedené výsledky simulací jsou z programu CST MWS.

5.1 Drátová šroubovicová anténa

Podobně jako jednopásmová šroubovicová anténa je i tato anténa složena ze tří částí. Vodivý drát, ze kterého je navinuta šroubovice s dvojitým úhlem stoupání, přizpůsobovací člen tvořen čtvrtvlnným vedením a reflektor. Konstrukce antény je uvedena na obr. 5.1.

5.1.1 Konstrukce antény

Šroubovicová anténa má průměr $D = 24$ mm a je navržena tak, že je rozdělena na dvě části. První část tvoří dva závity se vzdáleností mezi závity $S_1 = 8$ mm. Na ní přímo navazuje druhá část, která je tvořena třemi závity se vzdáleností závitů $S_2 = 31$ mm. Jedná se tedy o anténu s rostoucím stoupáním závitů podél osy antény.



Obr. 5.1: Drátová šroubovicová anténa pro WiFi pásmo 2,4 GHz a 5 GHz

Čtvrtvlnné přizpůsobovací vedení je navrženo podle postupu uvedeného v kapitole 2.2. Pro výpočet rozměrů antény byla uvažována střední frekvence $f_{stř} = 4 \text{ GHz}$, která leží přibližně uprostřed mezi oběma pásmy. Délka jednoho závitu C byla zvolena podle podmínky pro axiální mód (2.5) na hodnotu $C = 1 \cdot \lambda$. V rovnicích (5.1) ÷ (5.5) jsou uvedeny výpočty vlnové délky λ , délky jednoho závitu C , průměru šroubovice D , impedance antény Z_{ant} a impedance přizpůsobovacího vedení Z_{ved} .

$$\lambda = \frac{c}{f_{stř}} = \frac{c}{4 \cdot 10^9} = 75 \text{ mm} \Rightarrow \frac{\lambda}{4} = 18,75 \text{ mm} \quad (5.1)$$

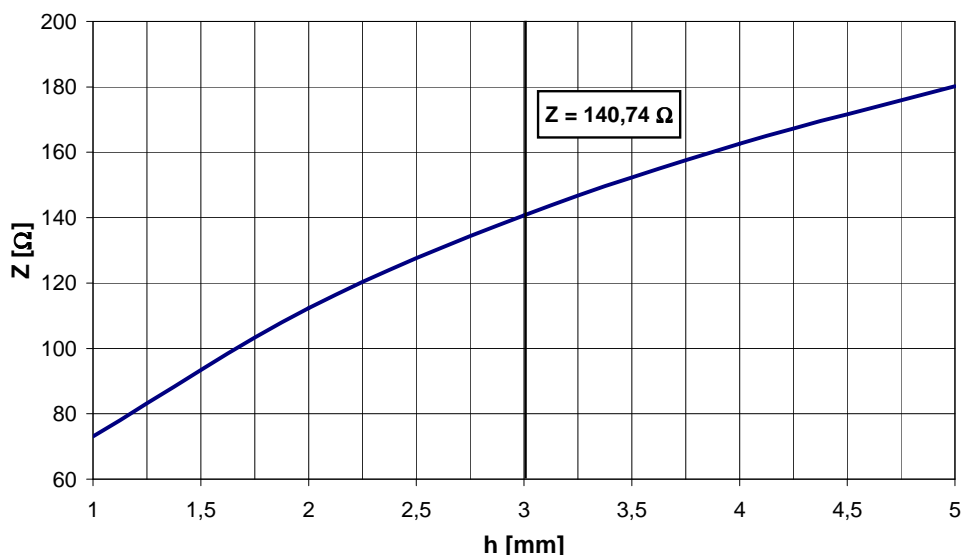
$$C = 1 \cdot \lambda = 1 \cdot 75 \cdot 10^{-3} = 75 \text{ mm} \quad (5.2)$$

$$D = \frac{C}{\pi} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{\pi} = 23,9 \text{ mm} \quad (5.3)$$

$$Z_{ant} = 140 \cdot \frac{\pi \cdot D}{\lambda} = 140 \cdot \frac{\pi \cdot 23,9 \cdot 10^{-3}}{75 \cdot 10^{-3}} = 140,2 \Omega \quad (5.4)$$

$$Z_{ved} = \sqrt{Z_0 \cdot Z_{ant}} = \sqrt{50 \cdot 140,2} = 83,7 \Omega \quad (5.5)$$

Podle kapitoly 2.2.1 byl proveden návrh přizpůsobovacího vedení v programu CST MWS. Na obr. 5.2 je uvedena závislost výstupní impedance přizpůsobovacího vedení na vzdálenosti od reflektoru h . Přičemž šířka vedení má šířku $w = 5 \text{ mm}$ a délka vedení je $\lambda/4$. Z grafu je patrné, že optimální hodnota vzdálenosti od reflektoru pro impedance přizpůsobení šroubovice s impedancí $Z_{ant} = 140,2 \Omega$ je přibližně $h = 3 \text{ mm}$.



Obr. 5.2: Závislost výstupní impedance přizpůsobovacího vedení na vzdálenosti h

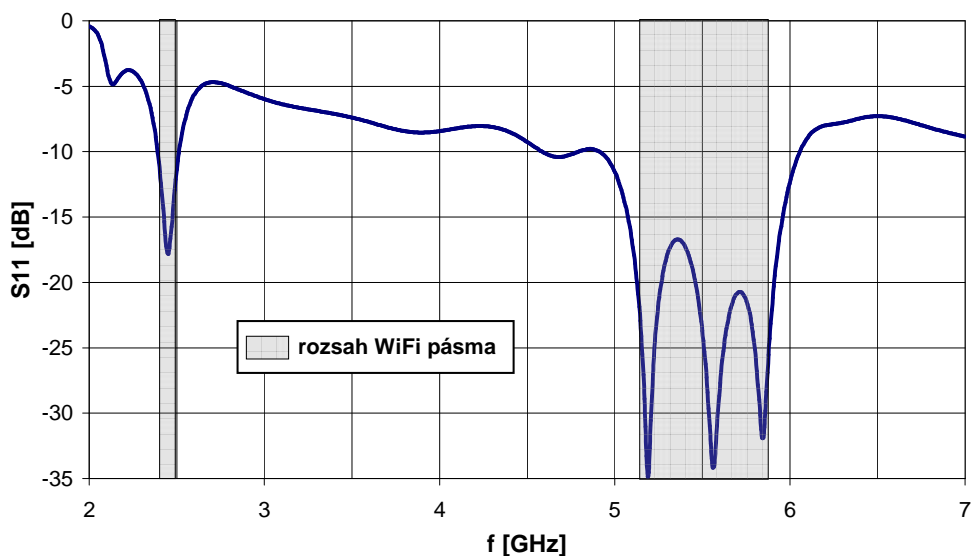
Rozměry drátové dvoupásmové šroubovicové antény pro WiFi pásmo 2,4 GHz a 5 GHz jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Tab. 5.1: Rozměry drátové šroubovicové antény pro WiFi pásmo 2,4 GHz a 5 GHz

symbol	název veličiny	rozměry [mm]
D	průměr šroubovice	24
S_1	vzdálenost mezi závity první části šroubovice	8
S_2	vzdálenost mezi závity druhé části šroubovice	31
N_1	počet závitů první části šroubovice	2 z
N_2	počet závitů druhé části šroubovice	3 z
L	délka šroubovice	109
a	poloměr vodiče šroubovice	1
w	šířka přizpůsobovacího vedení	5
h	vzdálenost přizpůsobovacího vedení od reflektoru	3
t	tloušťka přizpůsobovacího vedení	1,5
w_r	velikost čtvercového reflektoru	95

5.1.2 Výsledky simulace

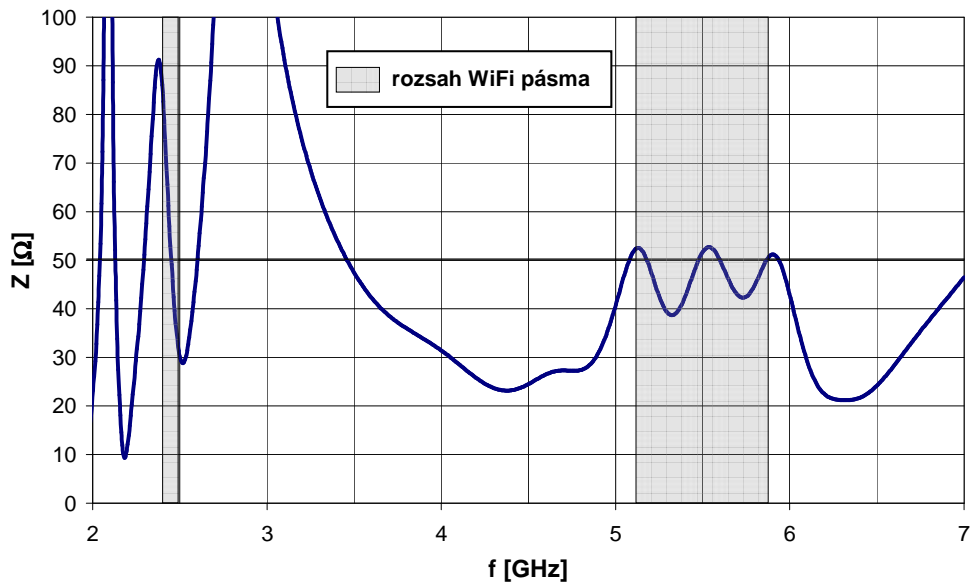
Na obr. 5.3 je uvedena kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} dvoupásmové šroubovicové antény. Šedivým polem jsou zde vyznačena rozmezí používaných WiFi pásem na frekvencích 2,4 GHz a 5 GHz. První pásmo antény je na frekvenci $f_1 = 2,45$ GHz, kde je minimální hodnota činitele odrazu $S_{11} = -17,8$ dB. Šířka tohoto pásma je $B_1 = 120$ MHz, což je 4,9 %. Střed druhého frekvenčního pásma je na frekvenci $f_2 = 5,5$ GHz. Rozsah tohoto pásma je 4,91 GHz ÷ 6,05 GHz. Šířka pásma je $B_2 = 1,14$ GHz, což odpovídá 20,7 %.



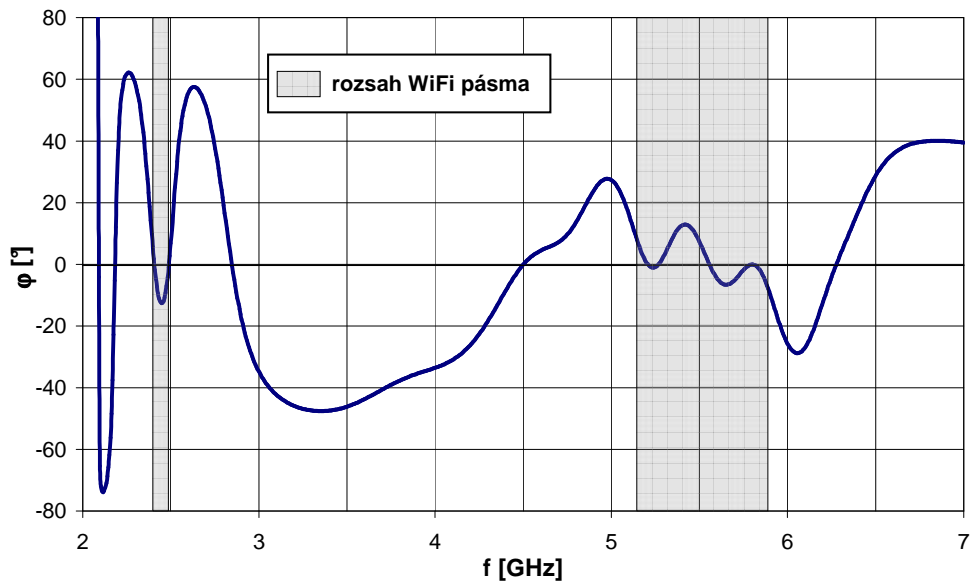
Obr. 5.3: Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} na vstupu šroubovicové antény

Na obr. 5.4 je uvedena závislost modulu vstupní impedance na frekvenci dvoupásmové drátové šroubovicové antény. Impedance na frekvenci prvního WiFi pásma 2,45 GHz je $Z = 49,2 \Omega$. Impedance na střední frekvenci 5,5 GHz druhého frekvenčního WiFi pásma je $Z = 51,7 \Omega$.

Obr. 5.5 zobrazuje závislost fáze vstupní impedance na frekvenci dvoupásmové drátové šroubovicové antény. Fáze vstupní impedance na frekvenci prvního WiFi pásma 2,45 GHz je $\varphi = -12,5^\circ$. Fáze vstupní impedance na střední frekvenci vyššího WiFi pásma 5,5 GHz je $\varphi = 7,3^\circ$.



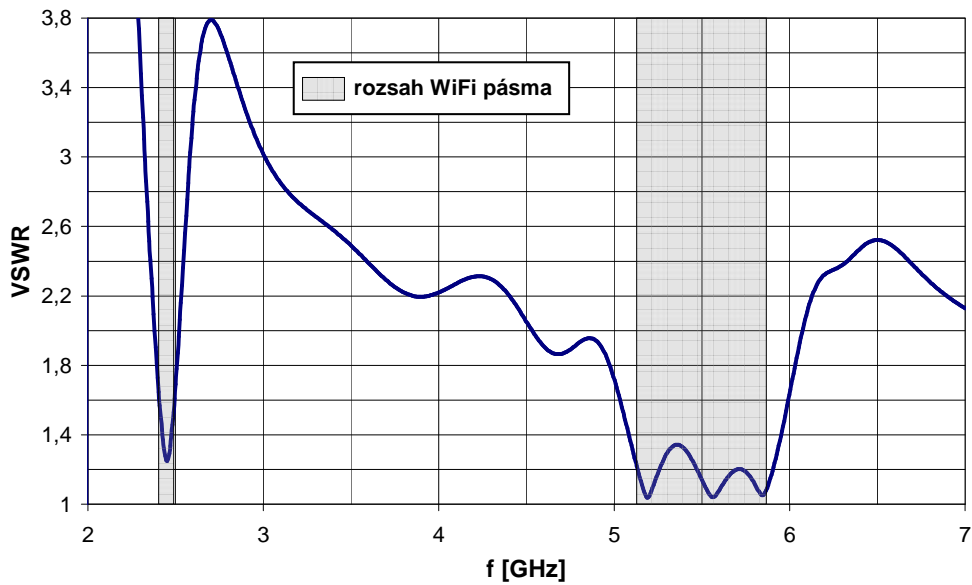
Obr. 5.4: Závislost modulu vstupní impedance na frekvenci drátové šroubovicové antény



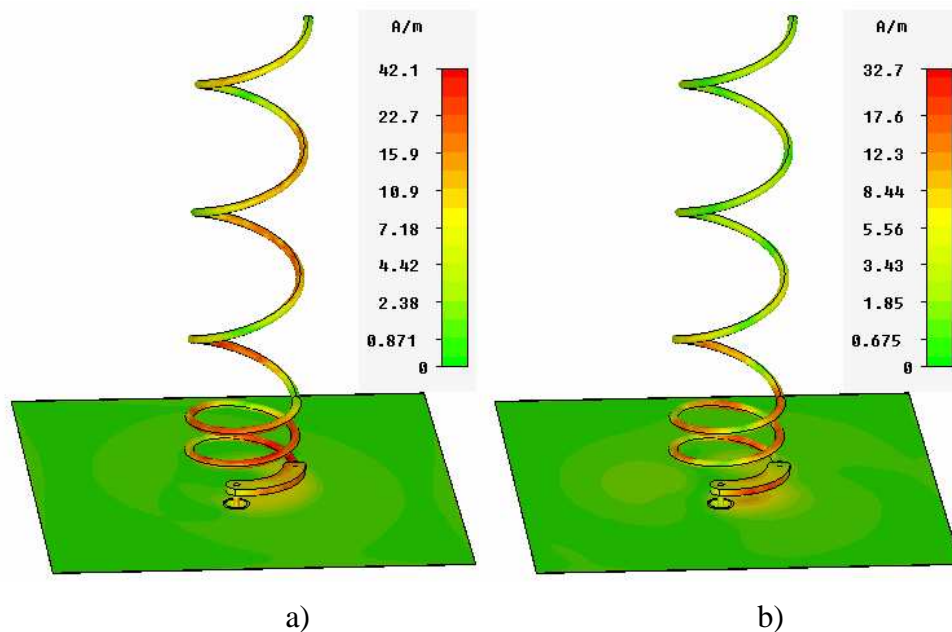
Obr. 5.5: Závislost fáze vstupní impedance na frekvenci drátové šroubovicové antény

Na obr. 5.6 je uvedena závislost poměru stojatých vln $VSWR$ na kmitočtu dvoupásmové drátové šroubovicové antény. Poměr stojatých vln na frekvenci 2,45 GHz je $VSWR = 1,25$ a na druhé frekvenci 5,5 GHz je $VSWR = 1,14$.

Obr. 5.7 zobrazuje proudové rozložení na šroubovicové anténě pro dvě frekvenční pásma: a) pro frekvenci 2,45 GHz, b) pro frekvenci 5,5 GHz.



Obr. 5.6: Závislost poměru stojatých vln na kmitočtu drátové šroubovicové antény

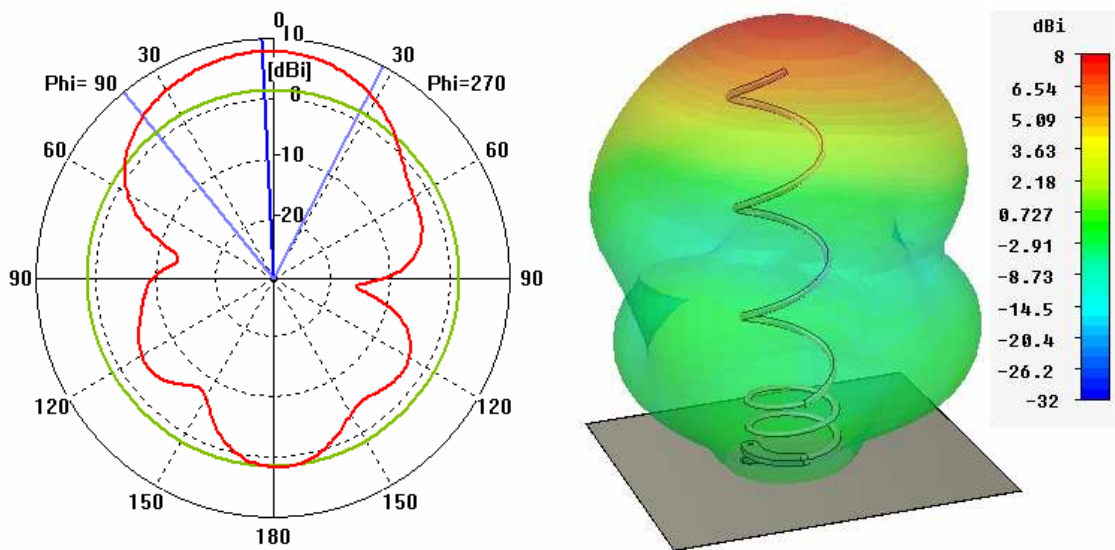


Obr. 5.7: Proudové rozložení na anténě pro frekvenci a) 2,45 GHz, b) 5,5 GHz

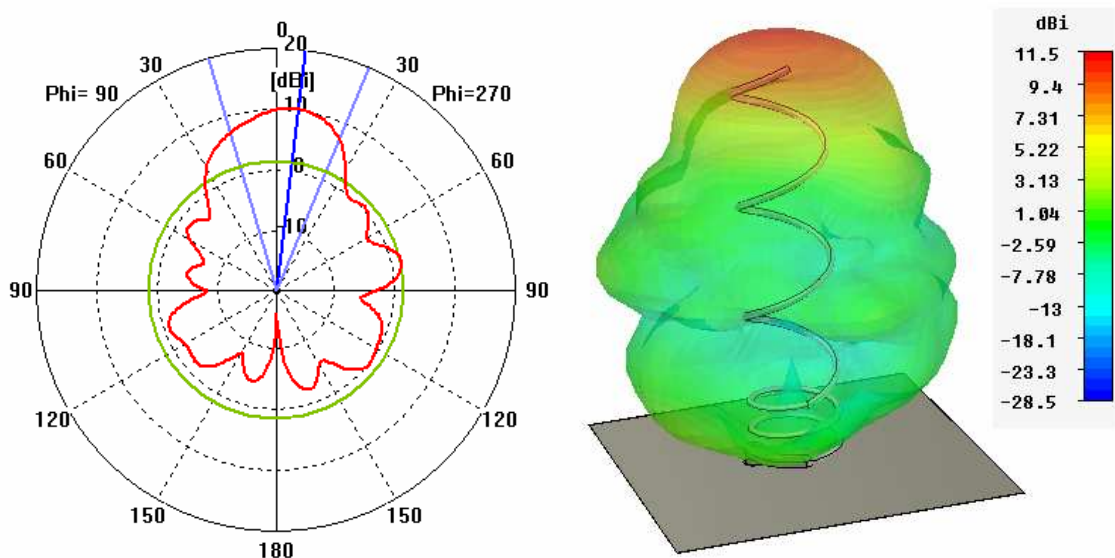
Směrové charakteristiky jsou zobrazeny v polárních souřadnicích a ve 3D zobrazení. Na obr. 5.8 jsou uvedeny směrové charakteristiky na frekvenci 2,45 GHz. Zisk antény v tomto frekvenčním pásmu je 8 dBi. Úhel vyzařování pro pokles o 3 dB je $66,8^\circ$ a úroveň postranních laloků je $-6,4$ dB.

Směrové charakteristiky pro druhé pásmo WiFi na frekvenci 5,5 GHz jsou uvedeny na obr. 5.9. Zisk šroubovicové antény v tomto frekvenčním pásmu v hlavním vyzařovacím směru je 10,3 dBi a úroveň postranních laloků je $-8,8$ dB. Úhel vyzařování pro pokles o 3 dB je $39,4^\circ$.

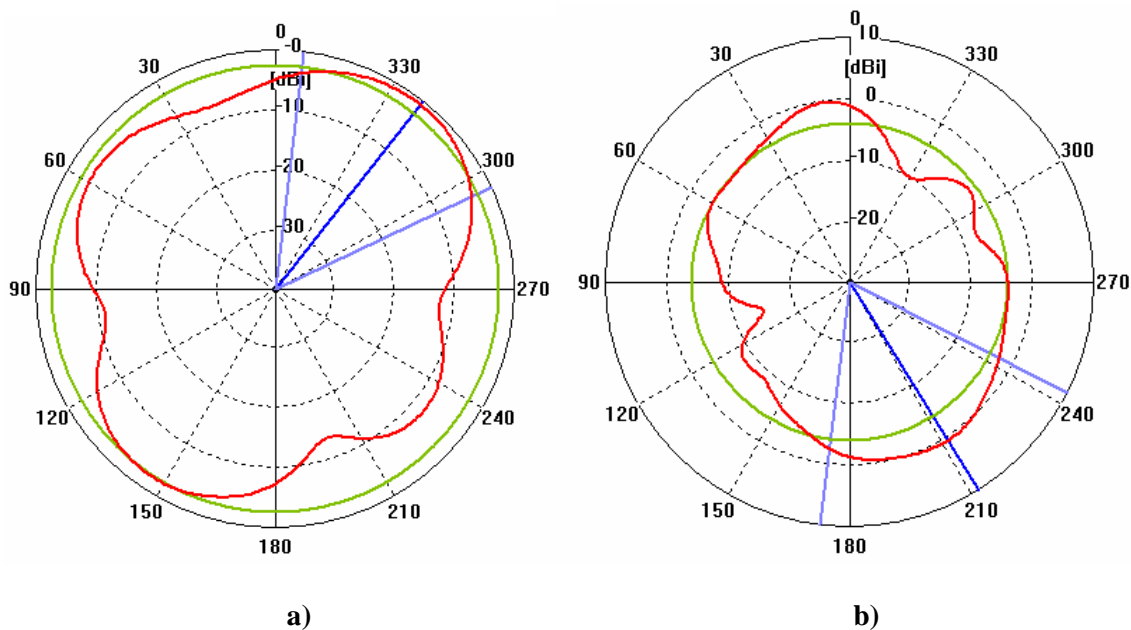
Na obr. 5.10 jsou pak uvedeny směrové charakteristiky šroubovicové antény v rovině H . Obr. 5.10a odpovídá frekvenci 2,45 GHz a obr. 5.10b odpovídá frekvenci 5,5 GHz.



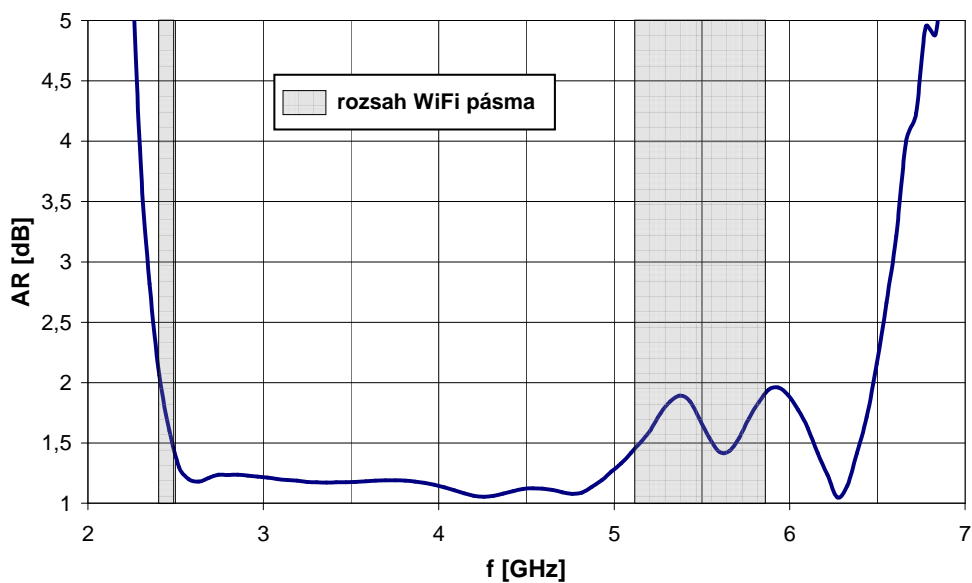
Obr. 5.8: Směrová charakteristika drátové šroubovicové antény na frekvenci 2,45 GHz



Obr. 5.9: Směrová charakteristika drátové šroubovicové antény na frekvenci 5,5 GHz



Obr. 5.10: Směrové charakteristiky antény v rovině H pro frekvenci a) 2,45 GHz, b) 5,5 GHz



Obr. 5.11: Kmitočtová závislost osového poměru AR

Na obr. 5.11 je zobrazena kmitočtová závislost osového poměru AR antény. Za mezní hodnotu kruhové polarizace je považována hodnota $AR = 3$ dB, což navržená anténa splňuje v obou frekvenčních pásmech.

5.1.3 Přehled dosažených výsledků

Tab. 5.2: Přehled dosažených výsledků simulací v programu CST MWS

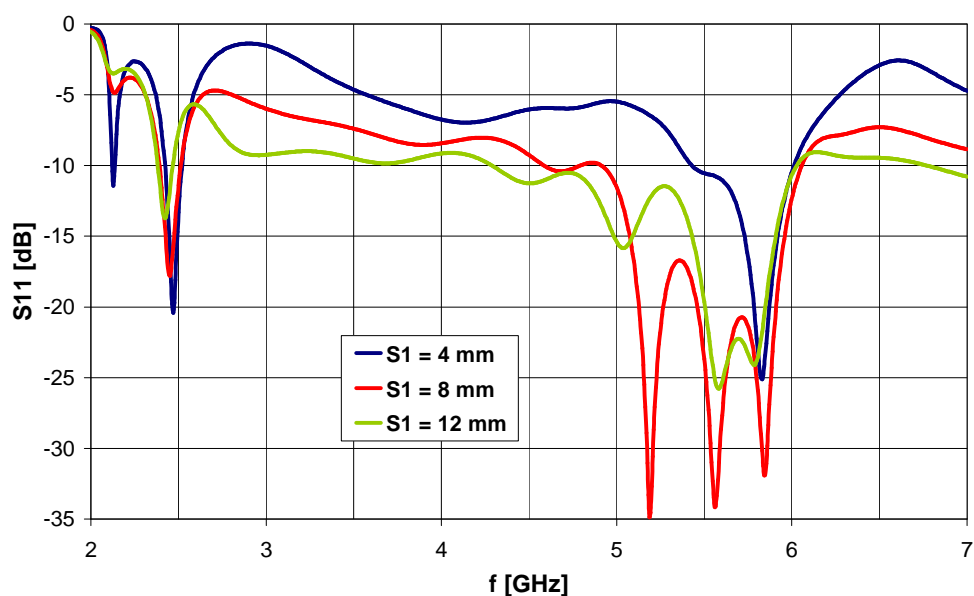
symbol	název veličiny	frekvenční pásmo	
		$f = 2,45 \text{ GHz}$	$f = 5,5 \text{ GHz}$
S_{11}	činitel odrazu [dB]	-17,8	-23,7
f_{min}	dolní frekvence pásma [GHz]	2,39	4,91
f_{max}	horní frekvence pásma [GHz]	2,51	6,05
B	šířka pásma [GHz]	0,12	1,14
$B_{\%}$	šířka pásma [%]	4,9	20,7
Z	modul vstupní impedance [Ω]	49,2	51,7
φ	fáze vstupní impedance [°]	-12,5	7,3
$VSWR$	poměr stojatých vln	1,25	1,14
G	zisk antény [dBi]	8,0	10,3
θ	úhel vyzařování (pokles o 3 dB) [°]	66,8	39,4

V tab. 5.2 jsou porovnány dosažené výsledky simulace dvoupásmové drátové šroubovicové antény pro WiFi pásmo 2,4 GHz a 5 GHz. Obě frekvenční pásma navržené šroubovicové antény svým rozsahem plně pokryjí obě WiFi pásma. Zisk antény je větší pro vyšší frekvenční pásmo. Naopak úhel vyzařování je větší pro nižší frekvenční pásmo.

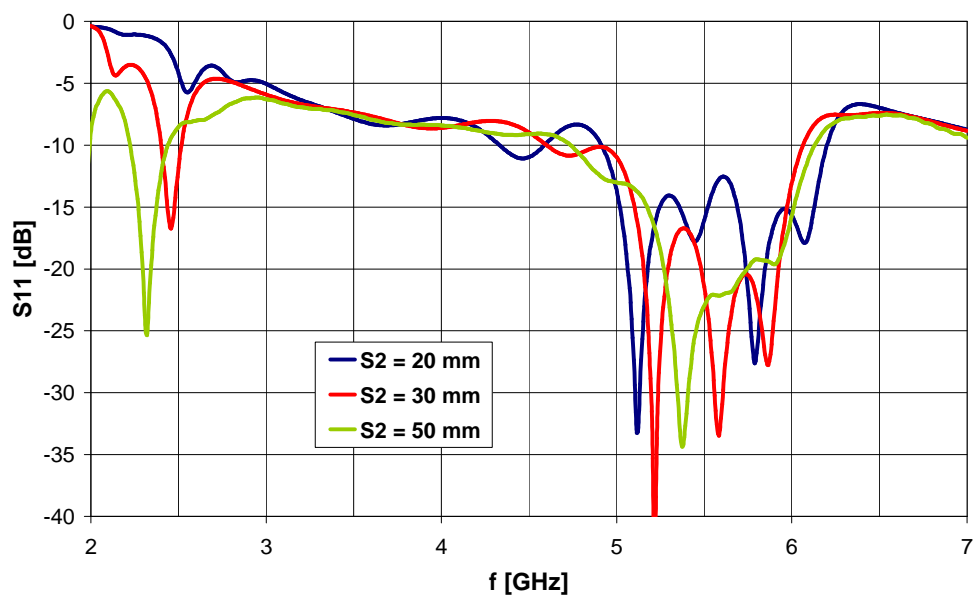
5.1.4 Parametrická analýza

Na následujících grafech je zobrazen vliv změn rozměrů a parametrů antény na její naladění. Především pak změna stoupání závitů první a druhé části antény S_1 , S_2 a průměru antény D .

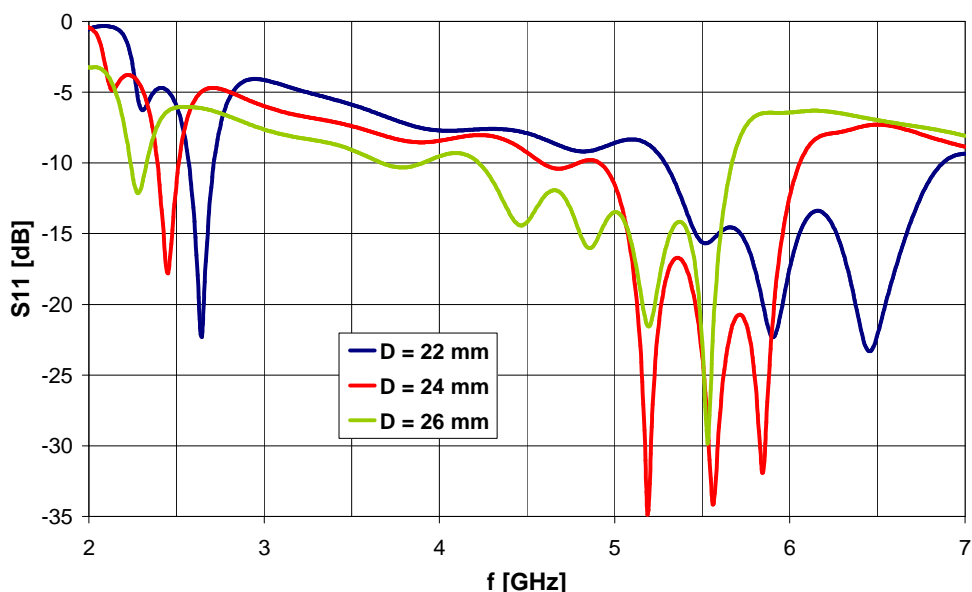
Na obr. 5.12 je zobrazen vliv změny vzdálenosti mezi závity první části antény S_1 na kmitočtovou závislost činitele odrazu S_{11} . Na obr. 5.13 je pak zobrazen vliv změny vzdálenosti mezi závity S_2 druhé části šroubovice. Obr. 5.14 ukazuje, jak se mění činitel odrazu S_{11} v závislosti na změně průměru šroubovice D .



Obr. 5.12: Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} při změně parametru S_1



Obr. 5.13: Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} při změně parametru S_2

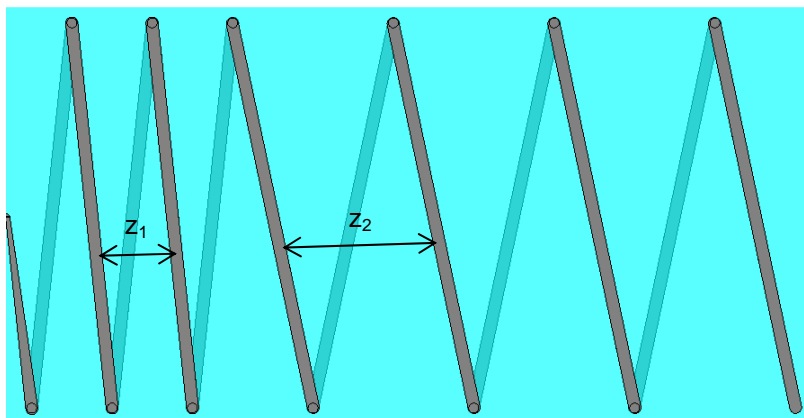


Obr. 5.14: Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} při změně parametru D

Z výše uvedených grafů je patrné, že změna vzdálenosti mezi závitů první části šroubovice S_1 , má největší vliv na vyšší frekvenční pásmo. Změnou tohoto parametru dochází k posunu spodní hranice pásma, a tím ke změně šířky druhého pásma. Naopak změna vzdálenosti mezi závitů druhé části šroubovice S_2 má vliv především na první frekvenční pásmo. S rostoucí vzdáleností S_2 dochází k jeho posunu na nižší frekvence. Při rostoucím průměru šroubovice D dochází k posunu obou frekvenčních pásem na nižší frekvence.

5.2 Planární šroubovicová anténa

Jak bylo již popsáno v kapitole 4.5, hlavními důvody pro návrh a použití planární verze šroubovicové antény, jsou především kompaktní rozměry a jednoduchá výroba. Struktura antény vychází přímo z drátového modelu antény pro WiFi pásmo 2,4 GHz a 5 GHz, což je zobrazeno na obr. 5.15.



Obr. 5.15: Struktura dvoupásmové planární šroubovicové antény

Motiv šroubovicové antény je vytvořen na oboustranně pokoveném substrátu s relativní permitivitou $\epsilon_r = 3,38$ a s výškou $h = 1,524$ mm. Pásky o šířce $w_1 = 1,2$ mm jsou spojeny prokovy o průměru $\phi = 1$ mm.

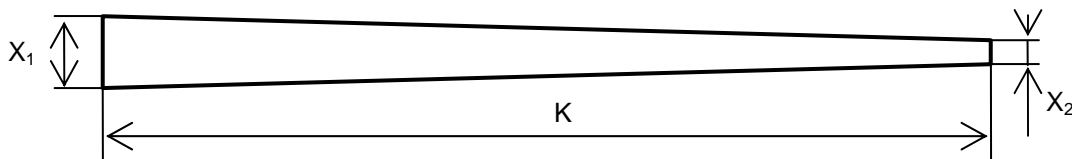
Pro tento typ antény je problematické přesné určení impedance antény. Z tohoto důvodu je složité navrhnout správný impedanční transformátor. Za tímto účelem byl vybrán Klopfensteinův impedanční transformátor, který je zobrazen na obr. 5.16. Jedná se o širokopásmový impedanční transformátor, který je odvozen z Tschebysheva transformátoru s N úseky. Při N jdoucím k nekonečnu se z něho stává spojitá křivka. Logaritmus charakteristické impedance $Z(l)$ Klopfensteinova transformátoru je dán vztahem [13]

$$\ln(Z(l)) = \frac{1}{2} Z_L Z_0 + \frac{\Gamma_0}{\cosh A} A^2 \Phi\left(\frac{2l}{L} - 1, A\right), \text{ pro } 0 \leq l \leq L, \quad (5.4)$$

kde $\Phi(x, A)$ je definován jako

$$\Phi(x, A) = \int_0^x \frac{I_1(A\sqrt{1-y^2})}{A\sqrt{1-y^2}} dy, \text{ pro } |x| \leq 1, \quad (5.5)$$

kde $I_1(x)$ je modifikovaná Besselova funkce. Bližší rozbor je uveden v odkazu [13], podle kterého byl transformátor navržen.



Obr. 5.16: Klopfensteinův impedanční transformátor

Klopfensteinův impedanční transformátor je navržen na stejném substrátu jako šroubovicová anténa. Na jedné straně substrátu je vytvořen motiv uvedený na obr. 5.16 a na druhé straně je zemnicí plocha.

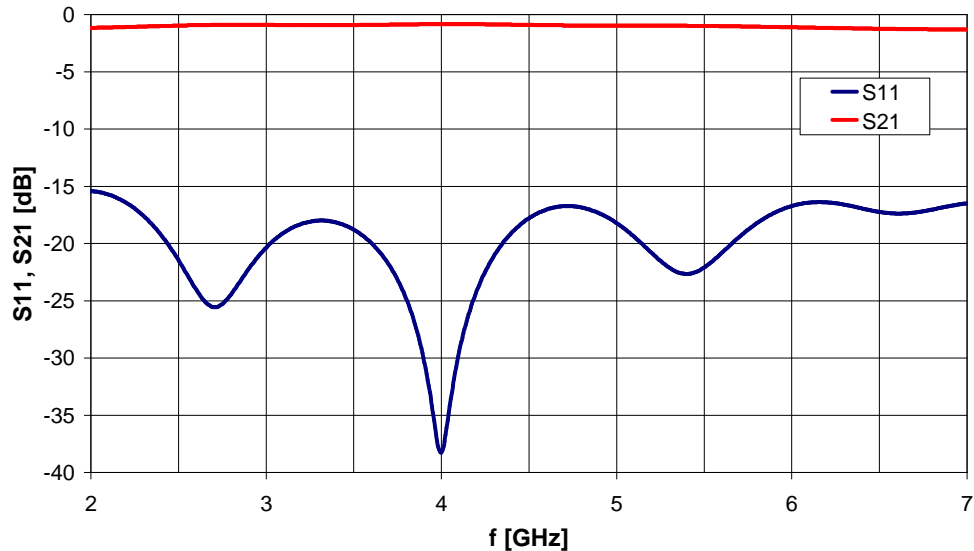
Planární šroubovicová anténa vychází z navržené drátové šroubovicové antény. Pro výpočet impedance antény byl použit stejný postup jako v případě drátové antény. Návrh se lišil pouze v přepočtu vlnové délky ve volném prostředí λ na efektivní vlnovou délku v dielektriku λ_{ef} .

$$\lambda = \frac{c}{f_{stř}} = \frac{c}{4 \cdot 10^9} = 75 \text{ mm} \Rightarrow \lambda_{ef} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3,38}} = 40,8 \text{ mm} \quad (5.6)$$

$$Z_{ant} = 140 \cdot \frac{C}{\lambda_{ef}} = 140 \cdot \frac{40,8 \cdot 10^{-3}}{40,8 \cdot 10^{-3}} = 140 \Omega \quad (5.7)$$

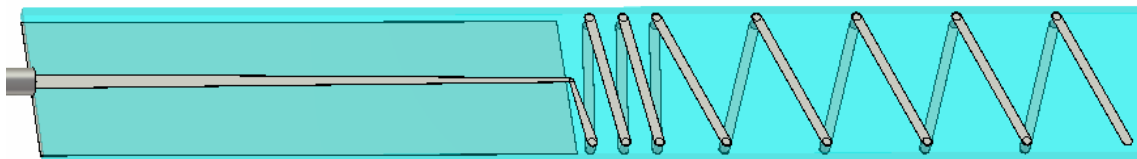
Při úvaze, že délka jednoho závitu odpovídá vlnové délce, dostáváme průměr antény $D = 18,8$ mm.

Rozměry transformátoru pro přizpůsobení antény z impedance vedení $Z_0 = 50 \Omega$ na impedanci antény $Z_{ant} = 140 \Omega$ jsou: $K = 64$ mm, $X_1 = 2,21$ mm a $X_2 = 0,58$ mm. Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} a přenosu S_{21} Klopfensteinova impedančního transformátoru je uvedena na obr. 5.17. Z grafu je patrné, že impedanční transformátor je dobře přizpůsoben v celém frekvenčním rozsahu 2 ÷ 7 GHz, kde činitel odrazu S_{11} je pod hodnotou -15 dB.

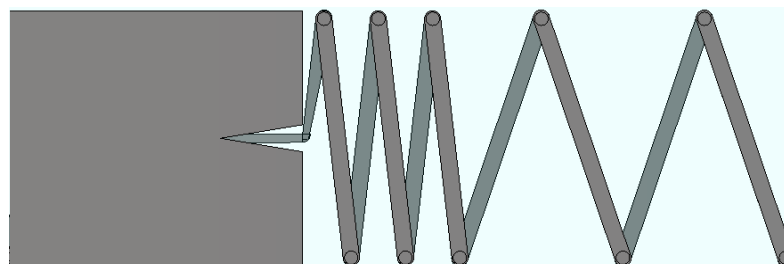


Obr. 5.17: Frekvenční závislost činitele odrazu S_{11} a přenosu S_{21} Klopfensteinova impedančního transformátoru

Struktura navrženého impedančního transformátoru a šroubovicové antény je zobrazena na obr. 5.18. Jako problematické se jeví místo přechodu z impedančního transformátoru na šroubovici, kde rovná hrana zemnicí plochy způsobuje odrazy a velká část vlny se odrazí zpět. Z tohoto důvodu byl v zemnicí ploše v místě ukončení transformátoru vyseknut trojúhelníkový přechod, který umožní plynulejší přechod vlny do šroubovice, viz obr. 5.19. Šířka přechodu je $y_1 = 1$ mm a délka $y_2 = 4$ mm.

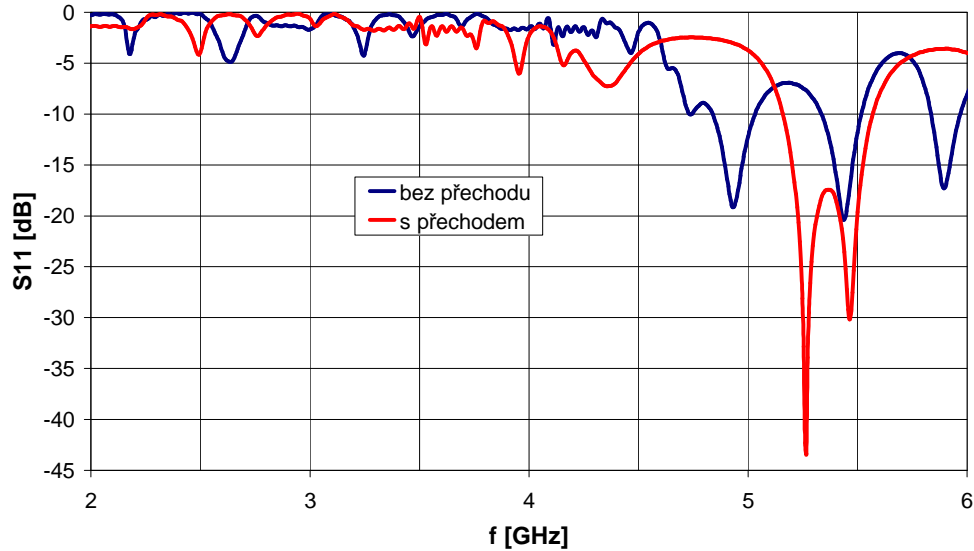


Obr. 5.18: Planární šroubovicová anténa s impedančním transformátorem



Obr. 5.19: Přechod z impedančního transformátoru na šroubovici

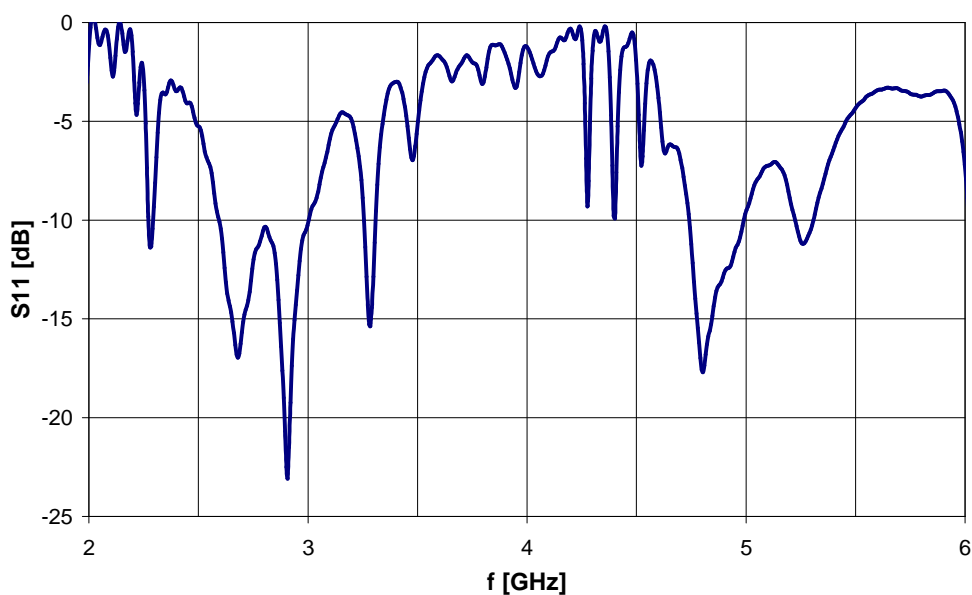
Porovnání činitele odrazu S_{11} s tímto plynulým přechodem a bez přechodu, je zobrazen na obr. 5.20. Z grafu je patrné, jak výrazně tento krok pomohl k přizpůsobení antény. Rozměry antény jsou uvedeny v tab. 5.3. Tato anténa by mohla být použita jako jednopásmová pro WiFi pásmo 5 GHz.



Obr. 5.20: Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} pro anténu s přechodem a bez přechodu

Frekvenční pásmo je posunuto na vyšší frekvenci, než bylo očekáváno na základě vypočtených rozměrů antény. Parametrickými analýzami bylo proto nutné upravit rozměry antény tak, aby se toto pásmo přesunulo na nižší požadovanou frekvenci.

Zvětšením rozměrů antény se změní zároveň i její impedance, která byla experimentálně určena na hodnotu 200Ω . Nejlepších výsledků bylo dosaženo pro rozměry antény uvedené v tab. 5.3. Na obr. 5.21 je uvedena kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} dvoupásmové planární šroubovicové antény. Z tohoto průběhu je patrné, že anténa má dvě frekvenční pásma. Nepodařilo se bohužel dosáhnout optimálního průběhu pro frekvenční pásma 2,4 GHz a 5 GHz. Bylo by vhodné, věnovat více času simulacím antény a návrhu impedančního transformátoru.



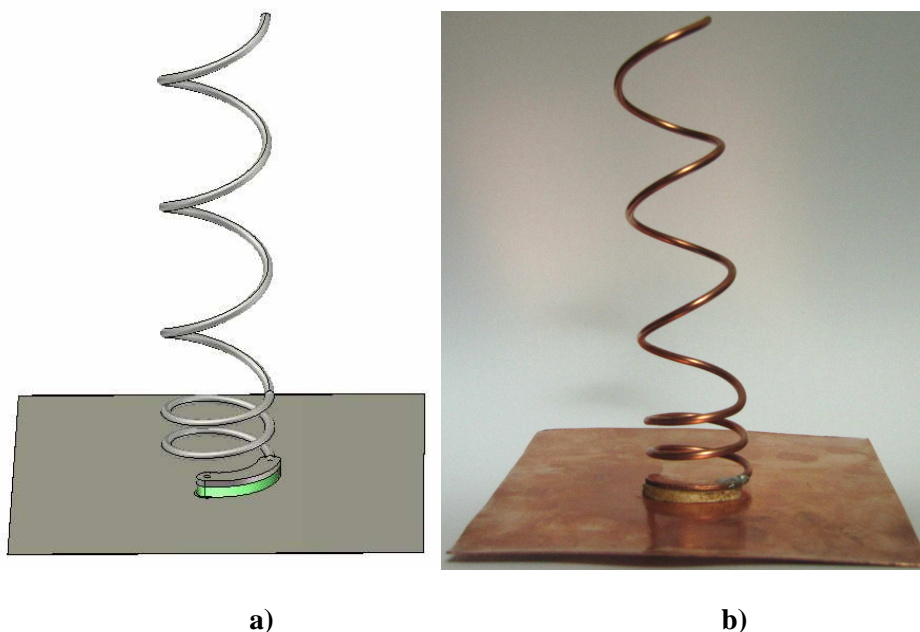
Obr. 5.21: Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} dvoupásmové planární šroubovicové antény

Tab. 5.3: Rozměry planární šroubovicové antény

symbol	název veličiny	vypočtené rozměry [mm]	výsledné rozměry [mm]
D	průměr šroubovice	18,8	40
z_1	vzdálenost mezi závity první části šroubovice	2	5
z_2	vzdálenost mezi závity druhé části šroubovice	6	8
N_1	počet závitů šroubovice první části šroubovice	3 z	3 z
N_2	počet závitů šroubovice druhé části šroubovice	4 z	4 z
L	délka šroubovice	66,2	100,8
w_1	šířka pásku který tvoří závity šroubovice	1,2	1,2
ϕ	průměr prokovů	1	1
h	výška substrátu	1,524	1,524
ϵ_r	relativní permitivita substrátu	3,38	3,38
y_1	šířka přizpůsobovacího přechodu	2	2
y_2	délka přizpůsobovacího přechodu	4	6
K	délka Klopfensteinova transformátoru	64	64
X_1	šířka transformátoru na straně vedení	2,21	1,88
X_2	šířka transformátoru na straně antény	0,58	0,40

6 MĚŘENÍ ANTÉNY

Tato kapitola je zaměřena na praktické ověření funkčnosti navržené dvoupásmové drátové šroubovicové antény pro WiFi pásmo 2,4 a 5 GHz. Konstrukce antény byla navržena a upravena tak, aby bylo možné anténu vyrobit a zároveň se vyvarovat případnému mechanickému poškození a tím i jejímu rozladění. Tato úprava je provedena vložením dielektrického materiálu mezi reflektor a přizpůsobovací vedení, čímž dojde k fixaci celé šroubovice k reflektoru, jak je vidět na obr. 6.1a. Jako dielektrikum byla použita balza, která má malou relativní permitivitu $\epsilon_r = 1,4$. Díky nízké relativní permitivitě dojde pouze k nepatrné změně impedance přizpůsobovacího vedení. Vyrobena anténa, která byla měřena je zobrazena na obr. 6.1b.

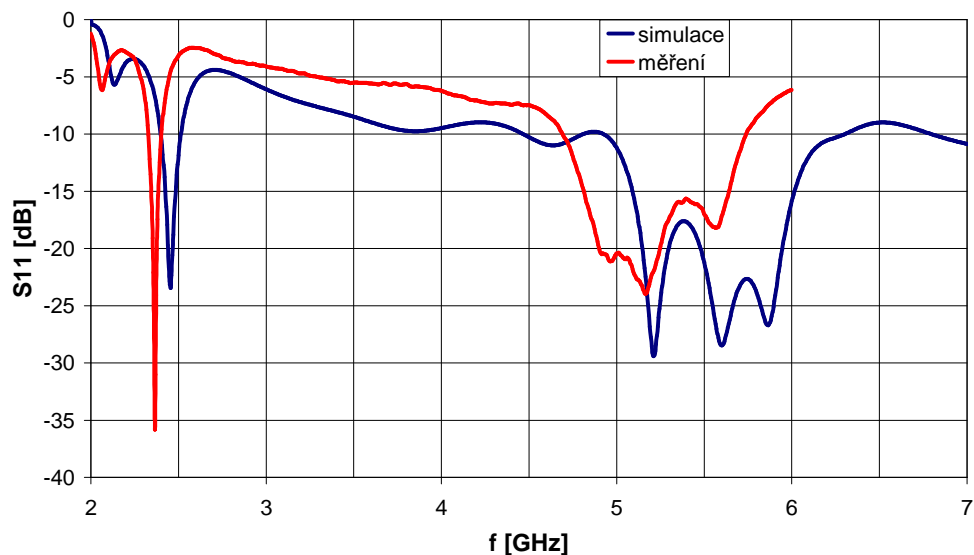


Obr. 6.1: Konstrukce dvoupásmové šroubovicové antény a) model v CST MWS, b) měřená anténa

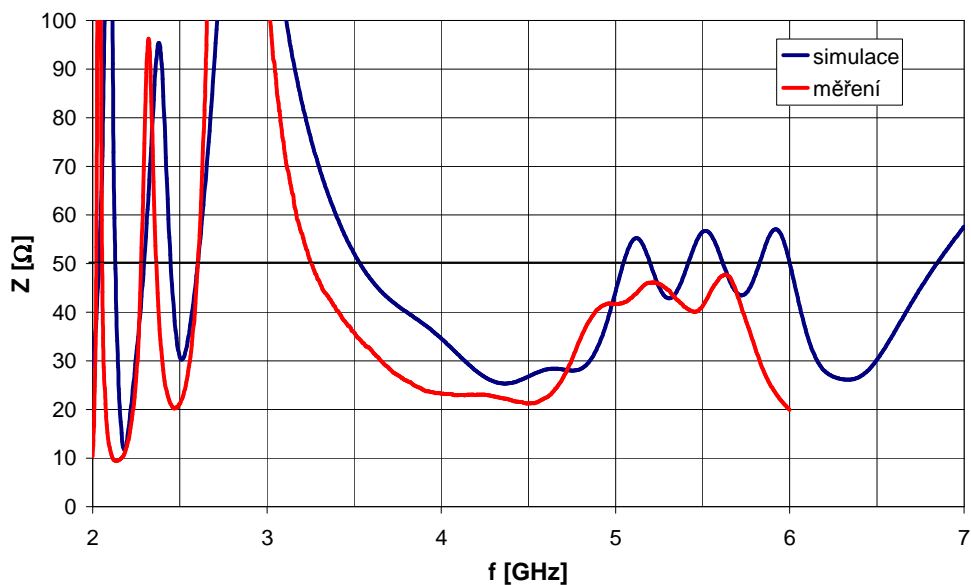
Šroubovice je vyrobena z měděného drátu, který byl navinut na válec o požadovaném průměru. Zajištění přesné vzdálenosti mezi jednotlivými závity bylo provedeno nejprve navinutím pásků papíru na válec, které tyto vzdálenosti přesně vymezovaly. Vzhledem k pružnosti drátu se pak válec jednoduše vysunul. Přizpůsobovací vedení je vyrobeno z měděné pásoviny o tloušťce $t = 1,5$ mm. Reflektor tvoří měděný plech. Z druhé strany reflektoru je připájen SMA konektor pro připojení napájecího vedení o charakteristické impedanci $Z_0 = 50 \Omega$.

Šroubovicová anténa byla měřena na vektorovém analyzátoru ROHDE&SCHWARZ VECTOR NETWORK ANALYZERS. Na obr. 6.2 jsou porovnány činitele odrazu S_{11} v závislosti na frekvenci. Modře je zobrazen průběh simulovaný v programu CST MWS a červeně je uvedena naměřená charakteristika. Jak je z tohoto grafu patrné, jsou obě pásma posunuta na nižší frekvence oproti simulaci. Posun je způsoben nepatrným zvětšením průměru šroubovice vlivem pružnosti drátu.

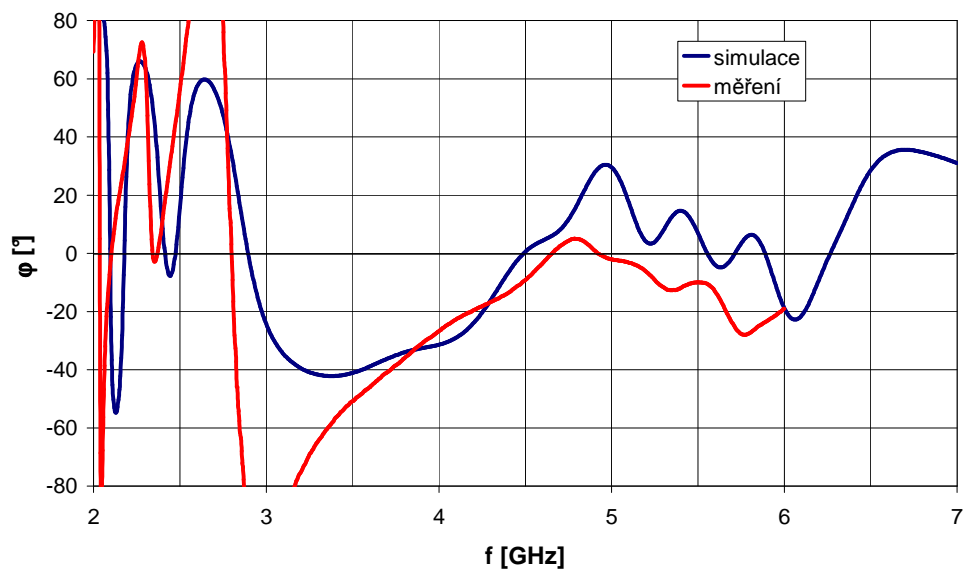
Na obr. 6.3 je zobrazena závislost modulu vstupní impedance v závislosti na frekvenci. Na obr. 6.4 je závislost fáze vstupní impedance antény na kmitočtu. V obou grafech jsou porovnány simulované výsledky z programu CST MWS s naměřenými průběhy. Z obou grafů je patrné, že s výjimkou frekvenčního posuvu způsobeného větším průměrem šroubovice, jsou oba průběhy téměř totožné.



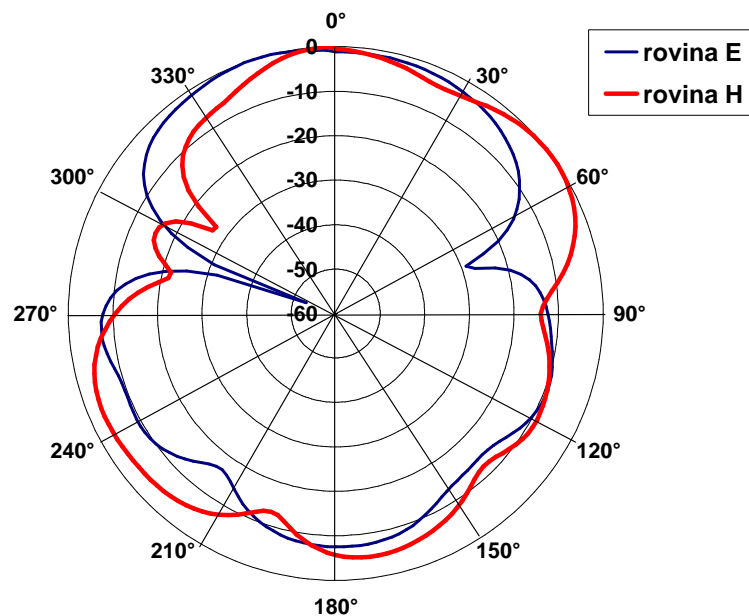
Obr. 6.2: Kmitočtová závislost činitele odrazu S_{11} měřené a simulované antény



Obr. 6.3: Závislost modulu vstupní impedance na frekvenci měřené a simulované antény

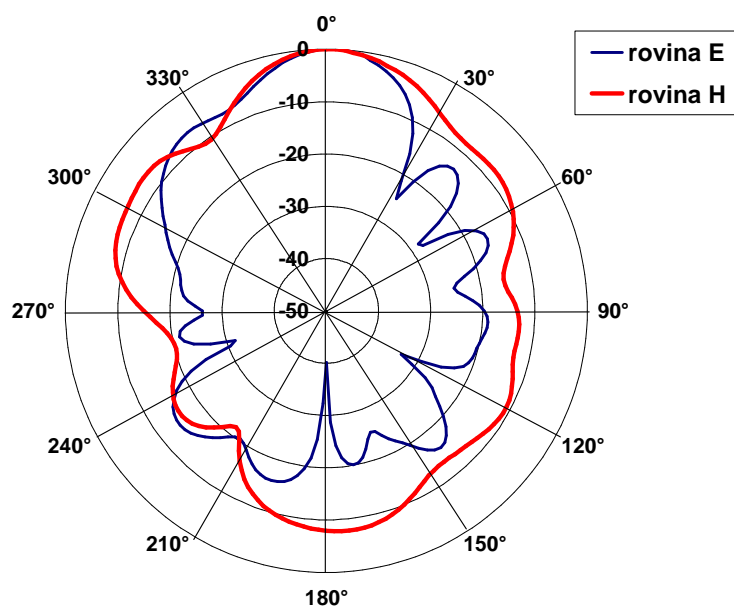


Obr. 6.4: Závislost fáze vstupní impedance na frekvenci měřené a simulované antény



Obr. 6.5: Směrová charakteristika měřené antény pro frekvenci 2,35 GHz

Na obr. 6.5 je zobrazena změřená směrová charakteristika šroubovicové antény pro frekvenci 2,35 GHz. Modrá křivka odpovídá rovině E a červená rovině H . Obr. 6.6 zobrazuje směrové charakteristiky pro frekvenci 5,4 GHz. Úhel vyzařování v hlavním směru pro pokles o 3 dB a frekvenci 2,35 GHz je $\theta = 44^\circ$ a pro frekvenci 5,4 GHz je $\theta = 29^\circ$.



Obr. 6.6: Směrová charakteristika měřené antény pro frekvenci 5,4 GHz

6.1 Porovnání měřených a simulovaných výsledků

V tab. 6.1 jsou porovnány dosažené výsledky dvoupásmové šroubovicové antény pro WiFi pásmo 2,4 a 5 GHz navržené v programu CST MWS s naměřenými výsledky z vektorového analyzátoru ROHDE&SCHWARZ VECTOR NETWORK ANALYZERS. Vlivem pružnosti drátu, ze kterého je navinuta šroubovice, došlo k nepatrnému zvětšení průměru antény a tím i k posunu obou frekvenčních pásem na nižší hodnoty.

Tab. 6.1: Porovnání naměřených a simulovaných hodnot dvoupásmové antény

symbol	název veličiny	program CST MWS		měření	
		střed frekvenčního pásma [GHz]		střed frekvenčního pásma [GHz]	
		$f = 2,45$	$f = 5,5$	$f = 2,36$	$f = 5,2$
S_{11}	činitel odrazu [dB]	-23,5	-21,5	-35,7	-22,1
f_{min}	dolní frekvence pásma [GHz]	2,39	4,92	2,33	4,69
f_{max}	horní frekvence pásma [GHz]	2,51	6,30	2,40	5,74
B	šířka pásma [GHz]	0,12	1,38	0,07	1,05
$B_{\%}$	šířka pásma [%]	4,9	25,1	3,0	20,2
Z	modul vstupní impedance [Ω]	48,5	56,5	50,2	46,2
φ	fáze vstupní impedance [°]	-7,41	6,85	-1,34	-6,66
θ	úhel vyzářování (pokles o 3 dB) [°]	66,8	39,4	44*	29**

*) hodnota pro frekvenci 2,35 GHz, **) hodnota pro frekvenci 5,4 GHz

ZÁVĚR

V diplomové práci byl proveden návrh jednopásmové šroubovicové antény pro WiFi pásmo 2,4 GHz. Nejprve byly určeny přibližné rozměry antény pomocí programu Helix Antenna Calculator. Následně byla anténa simulována v programu CST MWS. Praktické zhotovení antény vyžadovalo přidání nosné konstrukce, která zajistila mechanickou odolnost antény.

Vzhledem k tomu, že hlavním cílem práce je vytvoření dvoupásmové šroubovicové antény, jsou zde rozebrány dostupné možnosti jejího vytvoření. Jednou z možností vytvoření druhého frekvenčního pásma je použití šroubovicové antény s parazitní šroubovicí. Jiná možnost je použití quadrifilární šroubovicové antény s rezonančním LC obvodem. Další způsob konstrukce je spojení dvou quadrifilárních šroubovicových antén.

Poslední z rozebíraných možností je použití šroubovicové antény s rozdílnými úhly stoupání závitů. Tato varianta je vhodná především proto, že celá anténa je zhotovena pouze z jednoho vodiče, na kterém jsou vytvořeny dvě šroubovice s rozdílnými úhly stoupání závitů. Tento typ antény lze zkonstruovat i v planárním provedení. Vzhledem ke svým vlastnostem byla tato anténa vybrána jako nejvhodnější řešení pro návrh dvoupásmové šroubovicové antény pro WiFi pásmo.

Dvoupásmová šroubovicová anténa je navržena pro WiFi pásmo 2,4 GHz a 5 GHz. Tato anténa byla nejprve simulována a optimalizována v programu CST MWS. Mechanickému poškození antény a rozladění bylo zabráněno přidáním dielektrické podpěry, která fixuje šroubovici k reflektoru. Takto navržený model antény byl vyroben a změřen.

Poslední část této práce je zaměřena na návrh dvoupásmové planární šroubovicové antény, která vychází z navržené drátové šroubovicové antény. Jako impedanční přizpůsobení byl navržen a použit Klopfensteinův impedanční transformátor. Simulací antény na základě vypočtených rozměrů je tato anténa naladěna na druhé WiFi pásmo 5 GHz. Pomocí parametrických analýz byly rozměry antény změněny, což způsobilo změnu její impedance. Impedance antény byla experimentálně určena hodnotu 200 Ω . Vzhledem k tomu, že neznáme přesnou impedanci antény, je obtížné její optimální přizpůsobení a naladění. Bohužel se nepodařilo tuto anténu naladit na potřebná frekvenční pásma. Pro správné naladění antény by bylo vhodné vyzkoušet i jiné možnosti impedančního přizpůsobení a věnovat více času simulacím v programu CST MWS.

Na závěr byla drátová šroubovicová anténa pro WiFi pásmo 2,4 GHz a 5 GHz měřena a výsledky byly porovnány se simulacemi. Toto měření prokázalo správnost návrhu antény, kterou se podařilo naladit na potřebná frekvenční pásma. Šířky obou pásem zcela pokrývají používaná pásma WiFi na frekvencích 2,4 GHz a 5 GHz. Výhodou navržené antény je také její kruhová polarizace. Rozdíl mezi simulovanými a měřenými výsledky je způsoben nepatrným zvětšením průměru šroubovice při výrobě vlivem pružnosti drátu.

LITERATURA

- [1] KRAUS, J. D.; MARHEFKA, R. J. *Antennas For All Applications*. Third Edition. Boston : McGraw-Hill, 2002. 938 s. ISBN 0-07-232103-2.
- [2] LUKEŠ, Z. *Antény a šíření elektromagnetických vln - Širokopásmové antény v pásmech UKV a uV*. Přednáška MASV 6. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010.
- [3] PROCHÁZKA, M. *Antény : Encyklopedická příručka*. 3. rozšířené vydání. Praha : BEN - Technická literatura, 2005. 377 s. ISBN 80-7300-166-7.
- [4] CHOW, Y. W.; YUNG, E. K. N.; HUI, H. T. Dual Frequency Monopole-Helical Antenna By Using a Parasitic Normal Mode Helix For Mobile Handsets . In . *Microwave Conference, 2000 Asia-Pacific* . Sydney : [s.n.], 2000. s. 958 - 961 . ISBN 0-7803-6435-X.
- [5] LO, Chia-Min, et al. Helical Antenna Design and Measurement for Cellular Phone Operation. In *NEW ASPECTS of APPLIED INFORMATICS, BIOMEDICAL ELECTRONICS & INFORMATICS and COMMUNICATIONS*. Taipei, Taiwan : [s.n.], 2010. s. 181-184. ISBN 978-960-474-216-5, ISSN 1792-460X.
- [6] WANG, Xiao-fei, et al. A Novel Dual-frequency Quadrifilar Helix Antenna in GPS/BD Applications. *International Symposium on Antennas and Propagation*. 2006, s. 3556-3559. ISBN 978-1-4244-0877-1.
- [7] KRAHÚNEK, Matúš. *Antény* [online]. 30.12.2010 [cit. 2011-12-08]. Helix Antenna Calculator v1.0. Dostupné z WWW: <<http://www.em.tym.sk/programy.htm>>.
- [8] LAMENSDORF, David. Dual-Band Quadrifilar Helix Antenna. In: *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. 2002. San Antonio, Texas, 07 August 2002. s. 488 - 491 . ISBN 0-7803-7330-8.
- [9] ZHOU, Guangping. A Non-Uniform Pitch Dual Band Helix Antenna. In: *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. 2000. Salt Lake City, Utah, 16 July 2000. s. 274 - 277 . ISBN 0-7803-6369-8.
- [10] HUANG, T.-F. Methodology of external dual-band printed helix design. In: *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. 2005. Washington, DC, 3-8 July 2005. s. 458- 461. ISBN 0-7803-8883-6.
- [11] ANNAMAA, P., T. KUITTINEN, M. BORDI a P. PUURUNEN. ANNAMAA ET AL. *Dual-Frequency Helix Antenna* [patent]. US 6340954 B1. Uděleno 22.1.2002. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US6340954>.
- [12] XING, Lei, Y. SU, J. DING a Ch. GUO. Investigation on modified planar helical antenna. *Signals Systems and Electronics (ISSSE)* [online]. 2010, s. 1-4 [cit. 2012-05-10]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5607105&isnumber=5606922>
- [13] NOVÁK, Ondřej. *Modelování širokopásmových planárních symetrických obvodů a antén*. Brno, 2007. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jaroslav Láčík.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ϕ	Průměr prokovů
α	Úhel stoupání závitů
θ	Úhel vyzařování antény v hlavním směru pro pokles o 3 dB
λ	Vlnová délka ve volném prostředí
λ_{ef}	Efektivní vlnová délka v dielektriku
ϵ_r	Relativní permitivita
a	Poloměr vodiče
AR	Osový poměr (Axial Ratio)
B	Šířka pásma antény
C	Obvod šroubovice
CST	Computer Simulation Technology
D	Průměr šroubovice
d_{vzp}	Průměr dielektrické vzpěry
G	Zisk antény
h	Výška dielektrické vrstvy
K	Délka Klopfensteinova impedančního transformátoru
L	Délka šroubovice
L_0	Délka jednoho závitů
MWS	Microwave Studio
N	Počet závitů
$S_{1,2}$	Vzdálenost mezi závitů drátové antény
S_{11}	Vstupní napěťový činitel odrazu
t	Tloušťka přizpůsobovacího vedení
$VSWR$	Poměr stojatých vln (Voltage Standing Wave Ratio)
w	Šířka přizpůsobovacího vedení
w_n	Šířka středového hranolu
w_r	Šířka čtvercového reflektoru
X_1	Šířka Klopfensteinova impedančního transformátoru na straně vedení
X_2	Šířka Klopfensteinova impedančního transformátoru na straně antény
y_1	Šířka přizpůsobovacího přechodu

y_2	Délka přizpůsobovacího přechodu
$z_{1,2}$	vzdálenost mezi závity planární dvoupásmové antény
Z_0	Charakteristická impedance vedení
Z_{ant}	Vstupní impedance antény
Z_{ved}	Impedance přizpůsobovacího vedení