



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

ANTÉNY PRO PÁSMO GSM

ANTENNAS FOR GSM BANDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JIŘÍ ROUSEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KAMIL PÍTRA

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Jiří Rousek

ID: 140254

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Antény pro pásmo GSM

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy miniaturizace antén zejména pro pásmo GSM a stručně tyto techniky popište. Svoji pozornost zaměřte zejména na antény typu PIFA a IFA. Ve vhodném programu vytvořte numerické modely těchto antén. Numerické modely optimalizujte pro zadaný dielektrický substrát. Optimalizované antény vyrobte a experimentálně ověřte jejich vlastnosti. Důraz by měl být kladen na implementaci antén do mobilního telefonu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BALANIS, A. C. Antenna Theory: Analysis and Design, 3/E. New York: John Wiley & Sons, 1997.

[2] PROCHÁZKA, M. Antény - Encyklopedická příručka. Praha: BEN - technická literatura, 2005.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Kamil Pítra

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá miniaturizačními technikami planárních antén typu invertované F (PIFA). V práci jsou simulovány antény pro pásma GSM využívající meandrování zářiče antény, kapacitní zátěž a U-sloty v zářiči. Je studován vliv parametrů jednotlivých miniaturizačních technik na velikost a vlastnosti antén. U každé simulované antény je podrobně popsán postup jejího návrhu. Vybrané modely antén byly upraveny pro zadaný substrát a vyrobeny. Výsledky měření jsou porovnány se simulacemi.

KLÍČOVÁ SLOVA

PIFA, GSM, miniaturizace, kapacitní zátěž, meandrování zářiče, vícepásmová anténa

ABSTRACT

Bachelor thesis deals with miniaturization techniques of the planar inverted-F antenna (PIFA). In bachelor thesis were simulated antennas for the GSM bands using meandering of the radiating patch, capacitive load and U-slots. Influence of parameters of each miniaturization techniques on the antenna size and parameters were studied. The process of designing the antennas is described in detail. Selected models of antennas were adapted to given dielectric substrate and constructed. The measured results are presented and compared with simulations.

KEYWORDS

PIFA, GSM, miniaturization, capacitive load, meandering of radiating patch, multiband antenna

ROUSEK, J. *Antény pro pásmo GSM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 49 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Kamil Pítra.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Antény pro pásmo GSM jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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 bakalářské práce ing. Kamilu Pítrovi za odborné vedení práce, cenné rady a připomínky při vedení mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	vi
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Použité antény, miniaturizační techniky a kmitočtová pásma	2
1.1 Použité typy antény.....	2
1.1.1 Mikropásková anténa.....	2
1.1.2 Planární anténa typu invertované F (PIFA)	3
1.2 Techniky zmenšení velikosti antén.....	4
1.2.1 Substrát s vysokou relativní permitivitou	4
1.2.2 Meandrování zářiče antény	4
1.2.3 Kapacitní zátěž.....	5
1.2.4 Skládání zářiče	6
1.3 Použitá kmitočtová pásma	6
1.3.1 GSM.....	6
1.3.2 Pásma 2,4 GHz a 5 GHz	7
2 Jednopásmová anténa s meandrovaným zářičem a kapacitní zátěží	8
2.1 Napájení simulovaných antén.....	8
2.2 Návrh základní antény PIFA.....	9
2.3 Meandrování zářiče.....	11
2.3.1 Výsledky simulací.....	12
2.4 Kapacitní zátěž.....	13
2.4.1 Výsledky simulací.....	14
2.5 Shrnutí.....	16
3 Třípásmová anténa s výřezy pro vyšší rezonanční kmitočty	17
3.1 Návrh antény.....	17
3.1.1 Výsledky simulací.....	18
4 Anténa využívající U-sloty	22
4.1 Návrh antény.....	22

4.2	Kapacitní zátěž.....	25
5	Konstrukce antén a měření	27
5.1	Úpravy modelů antén pro konstrukci.....	27
5.1.1	Úprava zářiče antény s kapacitní zátěží.....	28
5.1.2	Vliv rozměrů zemní plochy na vyzařovací charakteristiku	28
5.2	Výsledky měření	29
5.2.1	Třípásmová anténa se zářičem meandrovaným bočními výřezy	30
5.2.2	Jednopásmová PIFA anténa.....	32
5.2.3	Dvoupásmová anténa s jedním U-slotem	33
5.2.4	Třípásmová anténa se dvěma U-sloty	34
5.2.5	Čtyřpásmová anténa se třemi U-sloty	36
5.2.6	Anténa se třemi U-sloty a kapacitní zátěží	38
6	ZÁVĚR	41
	Literatura	42
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	43
	SEZNAM PŘÍLOH	43

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Mikropásková anténa napájená a) mikropáskovým vedením b) koaxiální sondou c) detail antény b) (převzato z [2]).....	2
Obr. 1.2: Rozložení intenzity elektrického pole v substrátu, přechod k čtvrtvlnné struktuře (převzato z [3]).....	3
Obr. 1.3: Profil antény PIFA.....	3
Obr. 1.4: Distribuce povrchových proudů pro různou délku zkratovací stěny (převzato z [3]).....	4
Obr. 1.5: Meandrování zářiče antény (převzato z [1]).....	5
Obr. 1.6: Přidání kapacitní zátěže k anténě PIFA.....	5
Obr. 1.7: Příklady ohýbání (a) a přeložení (b) zářiče (převzato z [1]).....	6
Obr. 2.1: Geometrie navrhované antény.....	9
Obr. 2.2: Rozmítání parametru pL (délka zářiče, v mm).....	10
Obr. 2.3: Rozmítání parametru $feedL$ (vzdálenost napájení antény od zkratovací stěny).....	10
Obr. 2.4: Průběh činitele odrazu S_{11} pro původní (vypočítané) rozměry antény a po naladění.....	11
Obr. 2.5: Motiv zářiče s výřezy.....	11
Obr. 2.6: Rozmítání parametru sL (délka výřezů zářiče).....	12
Obr. 2.7: Rozmítání parametru sW (šířka výřezů zářiče).....	12
Obr. 2.8: 3D vyzařovací charakteristika antény s výřezy zářiče.....	13
Obr. 2.9: Simulace povrchových proudů na kmitočtu $f = 942,5$ MHz.....	13
Obr. 2.10: Pohled na simulovanou anténu s výřezy a kapacitní zátěží v CST.....	14
Obr. 2.11: Rozmítání parametru Wc (šířka kapacitní plošky).....	14
Obr. 2.12: Rozmítání parametru t (výška kapacitní plošky nad zemní plochou).....	15
Obr. 2.13: Průběh činitele odrazu antény s kapacitní zátěží s původními rozměry a po naladění.....	15
Obr. 2.14: 3D vyzařovací charakteristika antény s výřezy zářiče a kapacitní zátěží....	16
Obr. 3.1: Motiv zářiče třípásmové antény s výřezy (převzato z [7]).....	17
Obr. 3.2: Pohled na simulovanou třípásmovou anténu v CST.....	18
Obr. 3.3: Rozmítání parametru pL (délka zářiče třípásmové antény).....	18
Obr. 3.4: Rozmítání parametru s_2L (délka výřezu pro nastavení druhého rezonančního kmitočtu).....	19

Obr. 3.5: Rozmítání parametru s_{1L} (délka výřezu pro nastavení nejvyššího rezonančního kmitočtu).....	19
Obr. 3.6: Rozmítání parametru g_1V (vzdálenost horního zkratu od boční hrany zářiče).....	20
Obr. 3.7: Intenzity povrchových proudů na zářiči při kmitočtu a) 920 MHz b) 1795 MHz c) 2442 MHz.....	20
Obr. 3.8: Simulované směrové charakteristiky třípásmové antény s meandrováním zářičem, a) V rovině E, b) v rovině H.....	21
Obr. 4.1: Motiv zářiče antény se třemi U-slotty (převzato z [8]).....	22
Obr. 4.2: Rozmítání parametru L_1 (délka prvního U-slotu).....	23
Obr. 4.3: Průběhy činitele odrazu S_{11} při postupném přidávání U-slotů.....	24
Obr. 4.4: Rozmítání vzdálenosti U-slotů od zkratovací stěny (parametr U).....	24
Obr. 4.5: Simulované povrchové proudy čtyřpásmové antény bez kapacitní zátěže pro kmitočty a) 942,5 MHz, b) 1842,5 MHz, c) 2442 MHz a d) 5250 MHz.....	25
Obr. 4.6: Vyzařovací charakteristiky čtyřpásmové antény s U-slotty a) v rovině E, b) v rovině H.....	25
Obr. 4.7: Pohled na simulovanou čtyřpásmovou anténu s U-slotty a kapacitní zátěží v CST.....	26
Obr. 4.8: Průběh činitele odrazu naladěné čtyřpásmové antény s kapacitní zátěží.....	26
Obr. 5.1: Model antény s přidaným dielektrickým substrátem (pro názornost je průhledný).....	27
Obr. 5.2: Profil antény s přehnutým zkratovacím a kapacitním plíškem a body pájení.....	28
Obr. 5.3: Konečná podoba zářiče antény s kapacitní zátěží.....	28
Obr. 5.4: Činitel odrazu S_{11} antény s bočními výřezy.....	30
Obr. 5.5: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 940$ MHz.....	31
Obr. 5.6: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 1840$ MHz.....	31
Obr. 5.7: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 2440$ MHz.....	31
Obr. 5.8: Činitel odrazu S_{11} jednopásmové PIFA antény.....	32
Obr. 5.9: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 940$ MHz.....	32
Obr. 5.10: Činitel odrazu S_{11} dvoupásmové antény s jedním U-slotty.....	33
Obr. 5.11: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 940$ MHz.....	33
Obr. 5.12: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 1840$ MHz.....	34
Obr. 5.13: Činitel odrazu S_{11} třípásmové antény se dvěma U-slotty.....	34
Obr. 5.14: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 940$ MHz.....	35
Obr. 5.15: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 1840$ MHz.....	35
Obr. 5.16: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 2440$ MHz.....	35

Obr. 5.17: Činitel odrazu S_{11} čtyřpásmové antény se třemi U-slots.	36
Obr. 5.18: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 940$ MHz	36
Obr. 5.19: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 1840$ MHz ...	37
Obr. 5.20: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 2440$ MHz ...	37
Obr. 5.21: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 5250$ MHz	38
Obr. 5.22: Činitel odrazu S_{11} antény s kapacitní zátěží.	38
Obr. 5.23: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 940$ MHz	39
Obr. 5.24: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 1840$ MHz ...	39
Obr. 5.25: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 2440$ MHz ...	40
Obr. 5.26: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 5250$ MHz ...	40

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1: Přehled kmitočtových pásem standardů GSM 900 [11].....	6
Tab. 1.2: Rozsahy kmitočtů v pásmech 2,4 GHz a 5 GHz [6, 12].....	7
Tab. 2.1: Přehled rozměrů zářiče a šířky pásma při jednotlivých fázích miniaturizace.....	16
Tab. 4.1: Délky jednotlivých U-slotů po naladění antény na všechna 4 pásma.	23
Tab. 4.2: Rozměry výřezů po naladění antény s kapacitní zátěží na všechna 4 pásma.....	26
Tab. 5.1: Základní rozměry vyráběných antén.....	29
Tab. 5.2: Změřené rezonanční kmitočty, jejich odchylky a šířky pásma antény.....	30
Tab. 5.3: Změřené rezonanční kmitočty, jejich odchylky a šířky pásma antény.....	32
Tab. 5.4: Změřené rezonanční kmitočty, jejich odchylky a šířky pásma antény.....	33
Tab. 5.5: Změřené rezonanční kmitočty, jejich odchylky a šířky pásma antény.....	34
Tab. 5.6: Změřené rezonanční kmitočty, jejich odchylky a šířky pásma antény.....	36
Tab. 5.7: Změřené rezonanční kmitočty, jejich odchylky a šířky pásma antén.....	38

ÚVOD

V poslední době došlo k velkému rozvoji mobilní a komunikační techniky. Především vzrostl význam bezdrátového přenosu informace. Ať už jde o mobilní telefony, platební karty, bezdrátové periferie počítače, různé senzory nebo jiná komunikační zařízení. Mobilní telefony (chytré telefony, tablety) jsou dnes nedílnou součástí našeho života. Díky integraci stále většího množství funkcionalit a snaze o kompaktnost mobilních zařízení rostou také požadavky na používané antény. Kvůli množství obsluhovaných rádiových pásem je vhodné používat vícepásmové antény. Navíc je třeba se kvůli složitosti mobilních zařízení zamýšlet i nad možnostmi miniaturizace antén a jejich přizpůsobování tvaru telefonu. Ideální anténa je taková, o které uživatel ani neví.

V dnešní době se v mobilních telefonech téměř výhradně používají integrované antény. Nejčastěji jde o planární (fličkové) antény typu invertované F (PIFA) [1]. Zařízení s interní anténou jsou žádanější kvůli svému vzhledu, jsou kompaktní a nehrozí proto poškození antény. Fličkové antény lze vyrábět klasickou technikou plošných spojů ve velkých sériích, a jsou proto levné. Díky tomu je též možné tyto antény lehce navázat na ostatní vysokofrekvenční komponenty v mobilním telefonu.

Tato práce se zabývá návrhem a simulací antén typu PIFA využívajících několik miniaturizačních technik. V první kapitole je nejprve stručně popsán princip činnosti antény typu PIFA a také různé typy miniaturizačních technik. Návrh jednopásmové antény využívající meandrování a kapacitní zátěž, je v druhé kapitole. Třípásmová anténa využívající dvojice zkratovacích pinů a boční výřezy zářiče pro vyšší rezonanční kmitočty je simulována ve třetí kapitole [7]. Čtvrtá kapitola popisuje návrh čtyřpásmové antény s U-sloty a kapacitní zátěží [8].

Simulace antén je provedena v programu CST Microwave Studio 2011, u každé antény je podrobně popsán postup návrhu a je také ilustrován vliv klíčových parametrů na vlastnosti antén.

V páté kapitole je popsána úprava vybraných modelů antén pro zadaný dielektrický substrát. Tyto antény byly následně vyrobeny a byly změřeny jejich parametry. V druhé části kapitoly jsou výsledky měření porovnány se simulacemi.

1 POUŽITÉ ANTÉNY, MINIATURIZAČNÍ TECHNIKY A KMITOČTOVÁ PÁSMÁ

V následujícím textu je nejprve obecně popsán princip mikropáskových antén a planárních antén typu invertované F. Následně jsou popsány některé zajímavé miniaturizační techniky nejen pro tento typ antény. V závěru kapitoly jsou definována kmitočtová pásma, pro která budou antény navrženy.

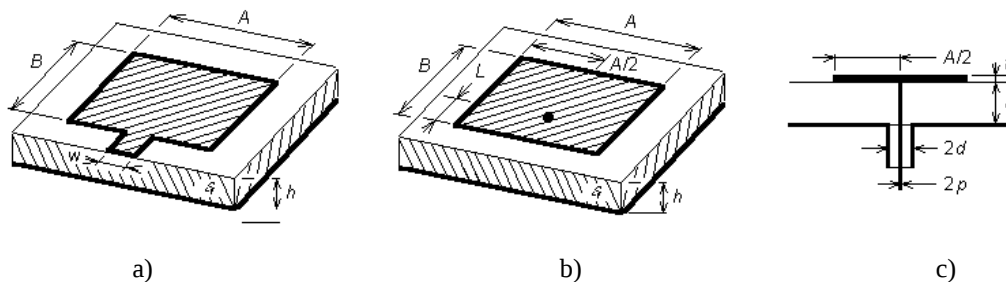
1.1 Použité typy antény

1.1.1 Mikropásková anténa

Mikropáskové (někdy se používá český název flíčkové) antény jsou dnes velice oblíbeným typem antén v bezdrátových komunikacích. Je to díky jejich nízkému profilu a také možnosti je snadno umístit na trupech letadel, stěnách budov či pod kryty mobilních telefonů. Lze je levně vyrábět klasickou technologií plošných spojů. Anténa je navíc relativně mechanicky odolná a vydrží i silné vibrace. Mezi nevýhody mikropáskových antén pak patří především jejich úzkopásmovost [1].

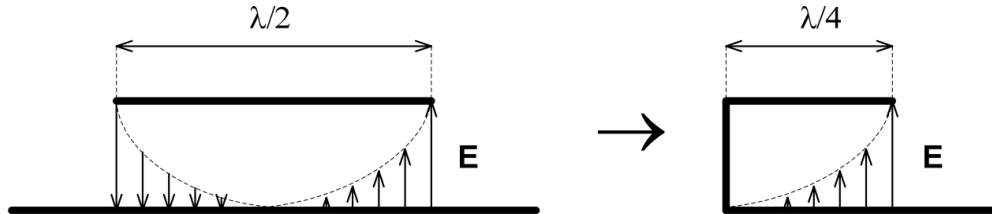
Mikropásková anténa se skládá ze zemní plochy a zářiče (mikropásku), které jsou naneseny na protilehlých stěnách dielektrického substrátu. Zemní plocha a zářič jsou z dobře vodivého materiálu, např. z mědi. Zatímco zemní plocha je typicky souvislá a pokrývá celou jednu stěnu substrátu, tvar zářiče může být různý (např. čtverec, obdélník, kruh, trojúhelník či prstenec).

Mikropásková anténa může být napájena několika způsoby. Na obr. 1.1a je obdélníková flíčková anténa napájená mikropáskovým vedením. Výhodou je jednoduchá výroba, nevýhodou je, že mikropáskové vedení vyzařuje a ovlivňuje tím vyzařovací charakteristiku antény [4]. Další možností je napájet anténu pomocí koaxiálního vodiče (viz obr. 1.1b). Vnitřní vodič koaxiálního kabelu prochází substrátem k zářiči, vnější vodič je připojen k zemní ploše (detail na obr. 1.1c). V této práci se bude uvažovat pouze druhý typ napájení antény, neboť umožňuje pevné připevnění SMA konektoru přímo k zemní ploše antény. Další výhodou je také impedanční přizpůsobení, neboť SMA konektor má impedanci $Z = 50 \Omega$ a na anténě pak stačí najít (např. experimentálně) místo se stejnou impedancí $Z = 50 \Omega$.



Obr. 1.1: Mikropásková anténa napájená **a)** mikropáskovým vedením, **b)** koaxiální sondou, **c)** detail antény z b) (převzato z [2]).

Mikropáskovou anténu si lze představit jako nestíněné mikropáskové vedení, které je na konci naprázdno. Šíří-li se podél tohoto vedení elektromagnetická vlna, je na rozšířeném úseku vedení (zářiči antény) vyzářena elektromagnetická energie. Pokud je délka zářiče B rovna polovině délky vyzářované vlny v použitém substrátu, je anténa v rezonanci (vstupní impedance antény je čistě reálná) [3]. Intenzita elektrického pole v substrátu je ilustrativně vyznačena na obr. 1.2.



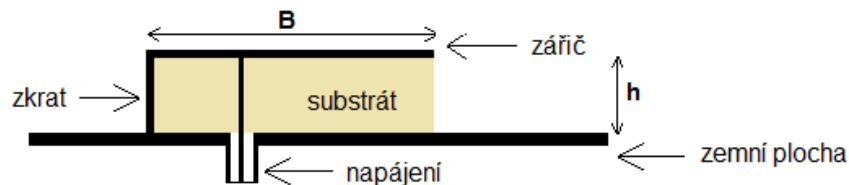
Obr. 1.2: Rozložení intenzity elektrického pole v substrátu, přechod k čtvrtvlnné struktuře (převzato z [3]).

1.1.2 Planární anténa typu invertované F (PIFA)

Jak vyplývá z výše uvedeného, intenzita elektrického pole podél zářiče ve směru delšího rozměru (B) je maximální na krajích zářiče a minimální uprostřed. Proto je možné zářič uprostřed zkratovat (spojit se zemní plochou). Mikropásek tak přejde z půlvlnné struktury na čtvrtvlnnou (obráz. 1.2) a délka zářiče B bude přibližně poloviční. Přesněji, podle [9], bude jeho délka

$$B = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_r}} - h - (A - A_{zkrat}), \quad (1.1)$$

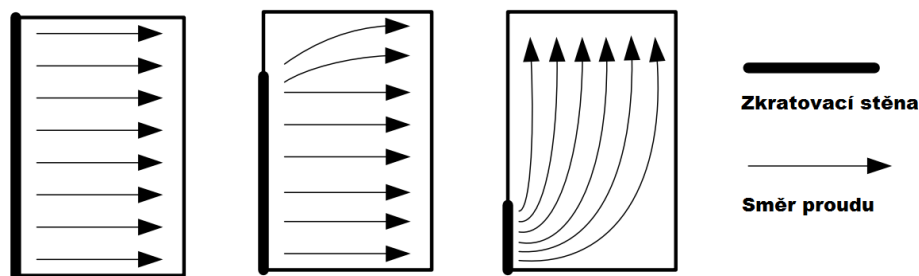
kde $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je rychlost světla ve vakuu, f [Hz] rezonanční kmitočet antény, ϵ_r je relativní permitivita substrátu, h je výška zářiče nad zemní plochou, A je šířka zářiče a A_{zkrat} je délka zkratovací stěny [9]. Vzniklá anténa připomíná z profilu obrácené písmeno F, proto název PIFA (Planar Inverted-F Antenna). Profil této antény je na obrázku 1.3.



Obr. 1.3: Profil antény PIFA.

Na délce zkratu závisí také distribuce povrchových proudů v zářiči. Pokud se bude dále zmenšovat délka zkratovací stěny, bude se prodlužovat „dráha“ povrchových proudů, jak je naznačeno na obr. 1.4. Dojde tak k dalšímu snížení rezonančního kmitočtu antény, respektive ke zmenšení rozměrů antény při zachování stejného

rezonančního kmitočtu. Proto je také délka zkratu A_{zkrat} a šířka zářiče A v rovnici 1.1.



Obr. 1.4: Distribuce povrchových proudů pro různou délku zkratovací stěny (převzato z [3]).

1.2 Techniky zmenšení velikosti antén

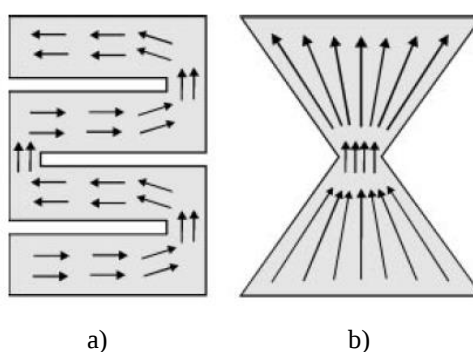
Kromě přechodu na čtvrtvlnnou anténu zkratováním zářiče (PIFA) jsou i další možnosti zmenšení velikosti antén. Zde budou zmíněny tyto techniky: použití substrátu s vyšší permitivitou, meandrování zářiče antény, přidání kapacitní zátěže a prostorové skládání zářiče antény.

1.2.1 Substrát s vysokou relativní permitivitou

Jak je patrné z rovnice 1.1, délka zářiče antény B klesá s rostoucí odmocninou relativní permitivity dielektrického substrátu ϵ_r . Tento vztah platí pro klasické mikropáskové i PIFA antény. Nevýhodou této techniky je však pokles zisku antény [1]. Další nevýhodou je malá šířka pásma antény (antény PIFA jsou obecně úzkopásmové), proto se tato technika výrazně neuplatňuje [4].

1.2.2 Meandrování zářiče antény

Meandrování (zakroucení) zářiče antény způsobí prodloužení dráhy povrchového proudu zářiče, který se podílí na vyzařování elektromagnetických vln ze zářiče. Při zachování určitého rezonančního kmitočtu tak dojde ke zmenšení plošného rozměru zářiče a tím i celé antény. V případě obdélníkového/čtvercového zářiče vytvoříme úzké dlouhé výřezy, které budou střídavě z protilehlých nevyzařujících stran zářiče tak, jak je to naznačeno na obr. 1.5a. Na obr. 1.5b jsou z obdélníkového zářiče odstraněny dva protilehlé trojúhelníky, čímž opět dojde k prodloužení dráhy povrchového proudu. [1]

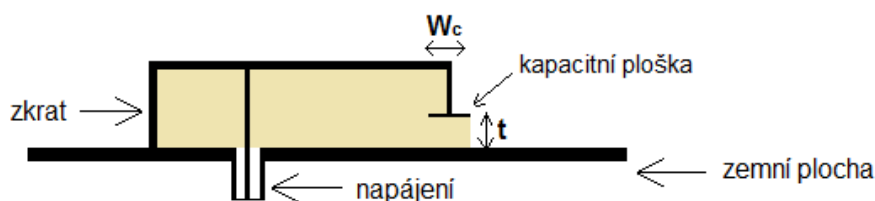


Obr. 1.5: Meandrování zářiče antény (převzato z [1]).

1.2.3 Kapacitní zátěž

Další používanou technikou na zmenšení velikosti antény je přidání kapacitní zátěže, případně napájení pomocí kapacitní sondy [1]. Kombinací obou přístupů lze dosáhnout zmenšení rozměru zářiče antény až na jednu osminu vlnové délky na daném kmitočtu v použitém substrátu ($\lambda/8$) [1].

Pokud je na anténu nahlíženo z pohledu impedance, je napájení koaxiálním kabelem umístěno v bodě nulové reaktivní impedance. Otevřený konec zářiče (viz. obr. 1.3) vpravo představuje paralelní kapacitu k zemní ploše. Naopak zkratovací stěna vlevo představuje paralelní indukčnost k zemní ploše. Pokud dojde ke zkrácení otevřeného konce zářiče, dojde ke zmenšení celkové kapacitní složky reaktance. Přidáním kapacity k otevřenému konci zářiče dojde k vykompenzování této „ztráty“ [9]. Přidání kapacitní zátěže je naznačeno na obrázku 1.6. Otevřený konec zářiče je ohnutý směrem k zemní ploše a je k němu přidána ploška rovnoběžná se zemní plochou (vznikne tak struktura připomínající deskový kondenzátor).



Obr. 1.6: Přidání kapacitní zátěže k anténě PIFA.

Pro velikost přidané kapacity je rozhodující vzdálenost kapacitní plošky od zemní plochy t a plocha kapacitní plošky A . Velikost kapacity lze podle [8] určit vztahem

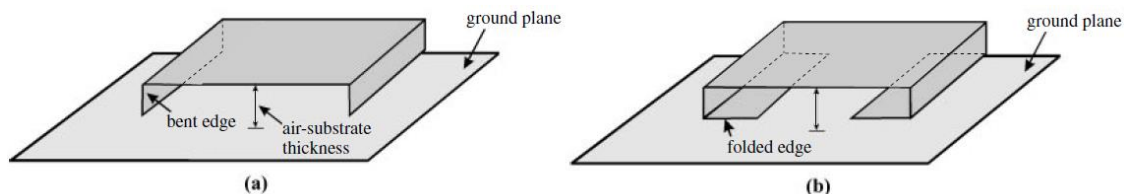
$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{t} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot W_c \cdot L_c}{t}, \quad (1.2)$$

kde W_c je šířka kapacitní plošky a délka kapacitní plošky L_c odpovídá často šířce zářiče A , ε_0 je permitivita vakua a ε_r je relativní permitivita dielektrika mezi zemní plochou a kapacitní ploškou.

Nevýhodou této techniky je menší šířka pásma antény a také její snížená účinnost [9].

1.2.4 Skládání zářiče

Další metodou zmenšení rozměrů antény je ohýbání zářiče směrem k zemní ploše, případně jeho úplné přeložení ve směru rezonance dané antény. Tím dojde k úpravě dráhy povrchových proudů a zmenšení rozměrů antény. Na obr. 1.7a je zářič na každé straně ohnut směrem k zemní ploše. Na obr. 1.7b je zářič ohnut a dále přeložen směrem dovnitř rovnoběžně se zemní plochou. Takto lze zářič přeložit i několikrát. [1]



Obr. 1.7: Příklady ohýbání (a) a přeložení (b) zářiče (převzato z [1]).

1.3 Použitá kmitočtová pásma

Cílem práce je navrhnout antény pro pásma GSM. Kromě dvou pásem standardu GSM budou použita také pásma 2,4 GHz a 5 GHz [8].

1.3.1 GSM

System GSM (Globální Systém pro Mobilní komunikaci) je nejrozšířenějším standardem pro mobilní telefony na světě. Jeho vývoj byl zahájen v osmdesátých letech 20. století organizacemi CEPT a ETSI. Patří mezi tzv. buňkové (celulární) mobilní systémy, kdy každá buňka obsluhuje určité území pomocí základnové stanice (BTS, Base Transceiver Station) [10].

Pro komunikaci mobilních zařízení (MS, mobile station) se základnovými stanicemi se využívá několika rádiových pásem. Tato pásma jsou vždy rozdělena na tzv. uplink (vysílá MS, přijímá BTS) a downlink (vysílá BTS, přijímá MS). Tato pásma jsou pak rozdělena na jednotlivé kanály.

Pro pásmo **GSM 900** bylo definováno několik kmitočtových pásem, která jsou uvedena v tabulce 1.1.

Tab. 1.1: Přehled kmitočtových pásem standardů GSM 900 [11].

Zkratka	Uplink [MHz]	Downlink [MHz]	Poznámka
P-GSM-900	890 - 915	935 - 960	Základní standard (primary)
E-GSM-900	880 - 915	925-960	Rozšířený standard (extended)
R-GSM-900	876 - 880	921-925	Drážní standard (railway, ČD)

V České Republice jsou mobilním operátorům přiděleny kmitočty v pásmu E-GSM-900 [11]. V této práci proto budou navrženy antény pro toto pásmo. Střední kmitočet pro celé pásmo je $f_c = 920$ MHz. Pro downlink je střední kmitočet přesně $f_{cD} = 942,5$ MHz a pro uplink pak $f_{cU} = 897,5$ MHz.

Pásmo **GSM 1800** (také DCS-1800) se liší od GSM 900 pouze kmitočty kanálů. Šířka pásma v jednotlivých kanálech je shodná. Pásmo GSM 1800 ovšem obsahuje třikrát více kanálů, tudíž trojnásobnou šířku pásma oproti GSM 900. Z principu šíření rádiových vln na vyšších kmitočtech navíc plyne, že kvůli většímu útlumu signálu budou buňky pro GSM 1800 menší a lze tedy častěji opakovat přidělené kmitočty. GSM 1800 využívá kmitočty 1710-1785 MHz pro uplink (střední kmitočet $f_{cU} = 1747,5$ MHz) a 1805-1880 MHz pro downlink (stř. kmitočet $f_{cD} = 1842,5$ MHz). Střední kmitočet celého pásma GSM 1800 je potom $f_c = 1795$ MHz.

1.3.2 Pásmo 2,4 GHz a 5 GHz

Pásmo 2,4 GHz a 5 GHz jsou využívána především pro širokopásmový bezdrátový přenos dat (standardy 802.11a/b/g/n – zkráceně tzv. „WiFi“, 802.15.1 - Bluetooth). Lze je využívat bez individuální licence, ale také bez záruky proti rušení ostatními uživateli. Zařízení pracující v těchto pásmech musí vyhovovat tzv. generálním licencím vydaným příslušným regulačním orgánem (pro naše území ČTÚ). Tato pásma jsou rozdělena na jednotlivé překrývající se (2,4 GHz) a nepřekrývající se (5 GHz) kanály. V těchto pásmech se nerozlišují frekvence pro uplink nebo downlink. V tabulce 1.2 jsou rozsahy kmitočtů bezlicenčních pásem dle ČTÚ. [6, 12]

Tab. 1.2: Rozsahy kmitočtů v pásmech 2,4 GHz a 5 GHz [6, 12].

Označení pásma	Rozsah kmitočtů [MHz]	Poznámka
2.4	2400 – 2483,5	WiFi 802.11b/g/n, Bluetooth
5.1	5150 - 5250	Jen uvnitř budov, WiFi 802.11a/n
5.2	5250 – 5350	Jen uvnitř budov, WiFi 802.11a/n
5.4	5470 - 5725	WiFi 802.11a/n

Je vhodné zmínit, že každé pásmo má regulátorem určené maximální povolené střední spektrální výkonové hustoty. Některá pásma je možné využít jen uvnitř budov, případně musí být zařízení v těchto pásmech vybavena automatickou regulací výkonu či technologiemi na potlačení rušení (automatická volba kanálu). To vše kvůli minimalizaci rušení v těchto pásmech. [6]

Střední kmitočet pásma **2,4 GHz** je $f_c = 2442$ MHz.

Pásmo **5 GHz** je pro bezlicenční použití rozděleno na 3 pásma (viz. tab. 1.2). Jelikož první dvě pásma jsou určena pro nižší výkony a pro použití uvnitř budov [6], budou tato pásma preferována i v této práci, střední kmitočet pro celé pásmo 5 GHz tak bude

$$f_{c(5GHz)} = \frac{f_{5.2-MAX} + f_{5.1-MIN}}{2} = \frac{5350MHz + 5150MHz}{2} = \underline{\underline{5250MHz}}. \quad (1.6)$$

2 JEDNOPÁSMOVÁ ANTÉNA S MEANDROVANÝM ZÁŘIČEM A KAPACITNÍ ZÁTĚŽÍ

V této kapitole je navržena jednopásmová anténa typu PIFA pro pásmo GSM 900. Vzhledem k její výrazné úzkopásmovosti je anténa laděna pouze pro downlink pásma GSM 900 (střední kmitočet 942,5 MHz). Nejprve je navržena základní struktura PIFA, poté je simulacemi ověřena technika meandrování zářiče pomocí výřezů. Nakonec je k navržené anténě přidána kapacitní zátěž. Je sledován vliv jednotlivých technik na rezonanční kmitočet antény a její velikost.

Všechny simulované antény mají standardní tloušťku pokovení zemní plochy a zářiče $tp = 0,035$ mm. Tloušťka zkratovací stěny byla zvolena $ZkratMt = 0,5$ mm (lepší opora zářiče, při případné realizaci bude použit materiál o podobné tloušťce). Antény jsou navrženy a simulovány bez substrátu – dielektrikem je vzduch [7].

2.1 Napájení simulovaných antén

Všechny antény v této práci budou navrženy pro napájení koaxiální sondou pomocí SMA konektoru [15]. V CST bylo nutné nejprve namodelovat koaxiální napáječ připojený k vlnovému portu, který bude napájet anténu. Koaxiální napáječ bude tvořen vnitřním vodičem o průměru d a vnějším vodičem o vnitřním průměru D . Mezi vodiči je dielektrikum o relativní permitivitě ϵ_r . Impedance vlnového portu v CST a impedance SMA konektoru je $Z = 50 \Omega$, průměr vnitřního vodiče koaxiálního napáječe je dle [15] $d = 1,247$ mm. Jako dielektrikum napáječe bude použit materiál PTFE s relativní permitivitou $\epsilon_r = 2,1$ [15]. Pro impedanci koaxiálního napáječe platí dle [16] vztah

$$Z_0 = \frac{138\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \log\left(\frac{D}{d}\right). \quad (2.1)$$

Po úpravě tedy pro vnitřní průměr vnějšího vodiče D platí

$$D = d \cdot 10^{\frac{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}}{138\Omega}} = 1,247 \text{ mm} \cdot 10^{\frac{50\Omega}{138\Omega} \sqrt{2,1}} = \underline{\underline{4,16 \text{ mm}}}. \quad (2.2)$$

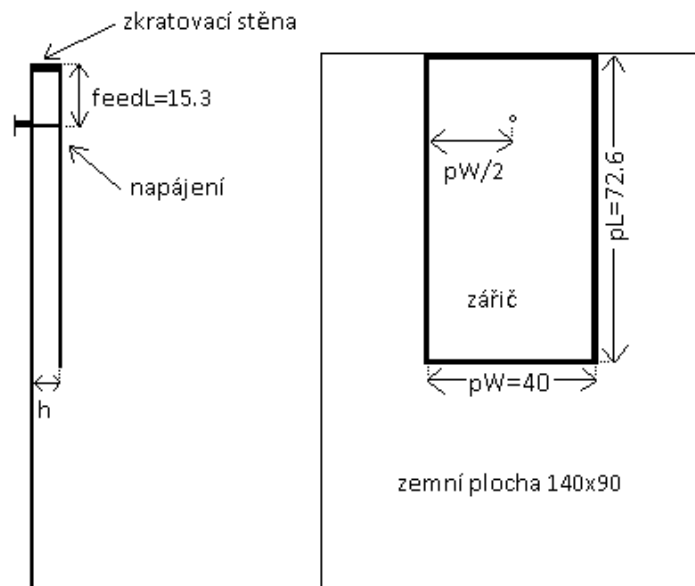
Pomocí koaxiálního napáječe s vypočítanými rozměry (o zvolené délce 5 mm [1, 16]) byly v CST napájeny simulované antény.

2.2 Návrh základní antény PIFA

V programu CST Microwave Studio byla vytvořena základní mikropásková anténa, ke které byla přidána zkratovací stěna podél jedné stěny zářiče. Rozměry zemní plochy byly voleny přibližně dvojnásobné oproti rozměru zářiče (rozměr zemní plochy by měl být obecně co největší) [2]. Výška zářiče nad zemní plochu je $h = 9$ mm [7]. Délka zářiče (parametr pL) se určí (vycházíme z rovnice 1.1) přibližně jako

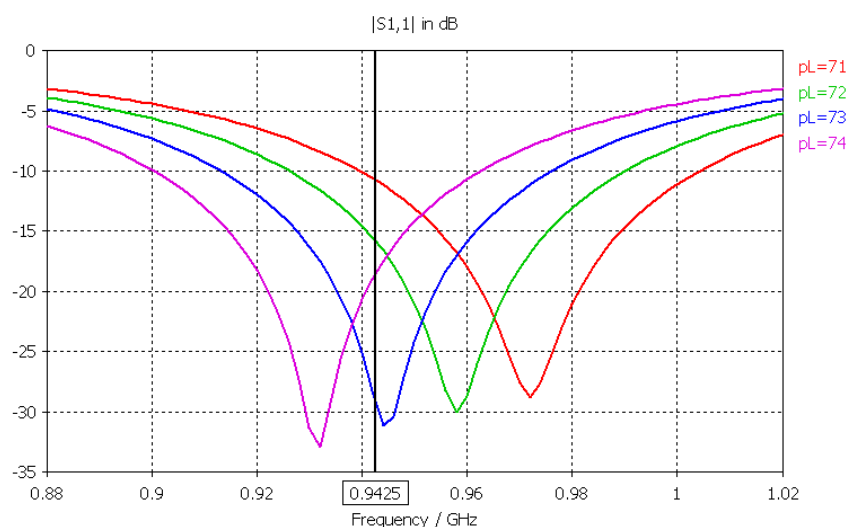
$$pL = \frac{c}{4f\sqrt{\varepsilon_r}} - h = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}}{4 \cdot 942,5 \cdot 10^6 \text{ Hz} \cdot \sqrt{1}} - 0,009 \text{ m} = 70,6 \text{ [mm]}. \quad (2.3)$$

Šířka zářiče pW je zvolena o něco větší než polovina jeho délky (40 mm). Napájení antény je umístěno v ose zkratované hrany ve vzdálenosti od zkratu, která je přibližně jedna čtvrtina délky zářiče ($feedL = 17,5$ mm). Tato vzdálenost je klíčová při impedančním přizpůsobování antény. Zářič lícuje zkratem s hranou zemní plochy [7, 8].



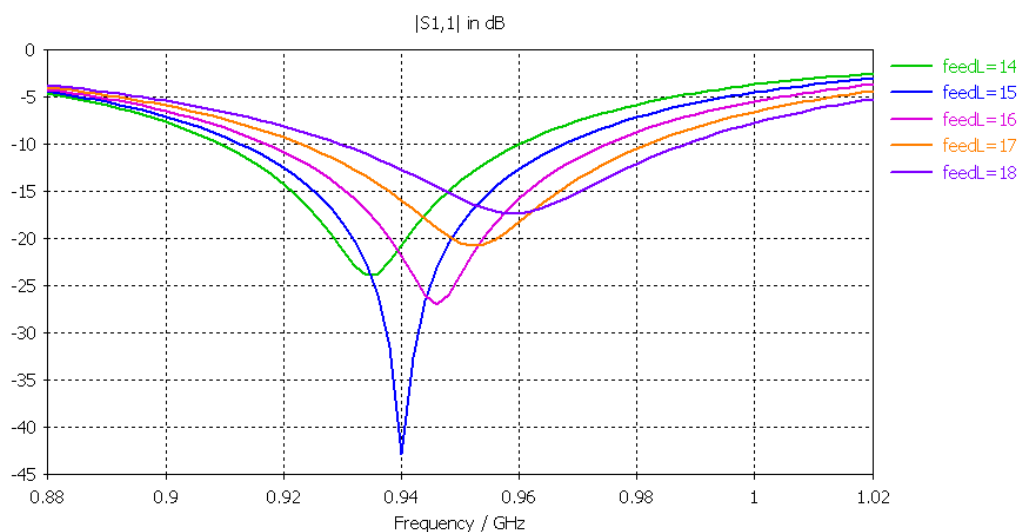
Obr. 2.1: Geometrie navrhované antény.

Po prvotní simulaci je minimum činitele odrazu S_{11} při kmitočtu $f_{rez} = 978$ MHz. Pro naladění antény na nižší pracovní kmitočet $f = 942,5$ MHz je třeba dle rovnice 1.1 zvětšit délku zářiče antény. Rozmítání délky zářiče (parametr pL) je na obr 2.2.



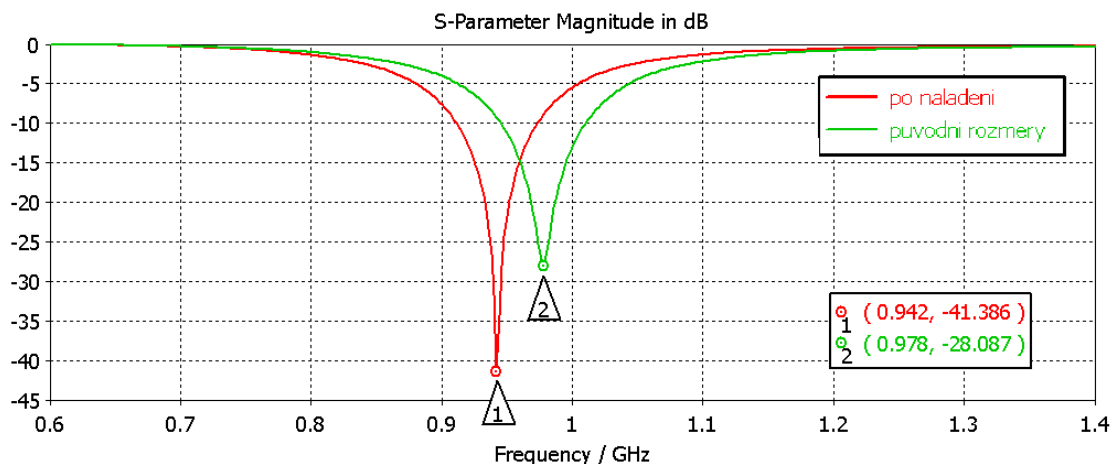
Obr. 2.2: Rozmítání parametru pL (délka zářiče, v mm).

Z obrázku 2.2 je patrné, že hledaná délka zářiče je přibližně $pL = 73$ mm. Z obrázku je také zřejmé, že pro tuto hodnotu nedosahuje průběh S_{11} svého globálního minima. Proto je třeba doladit impedanční přizpůsobení antény pomocí vzdálenosti napájení od zkratovací stěny. Rozmítání příslušného parametru ($feedL$) je na obr 2.3.



Obr. 2.3: Rozmítání parametru $feedL$ (vzdálenost napájení antény od zkratovací stěny).

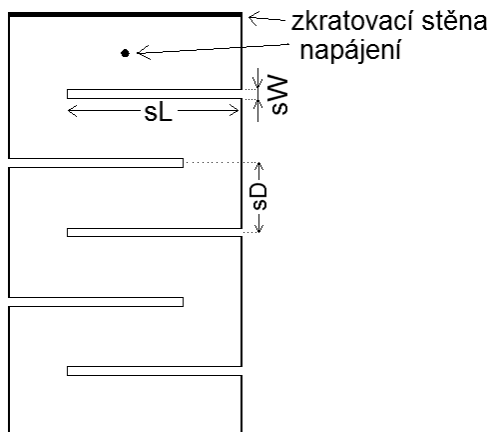
Nejlepší přizpůsobení je dle obr. 2.3 při vzdálenosti napájení $feedL = 15$ mm. Po opakování rozmítání parametru $feedL$ s menším krokem vychází nejlepší přizpůsobení při vzdálenosti napájení $feedL = 15,3$ mm. Přesné naladění antény na pracovní kmitočet je pak ještě dosaženo úpravou délky zářiče na $pL = 72,6$ mm. Průběh činitele odrazu naladěné antény je na obr. 2.4. Šířka pásma antény pro pokles činitele odrazu o 10 dB je přibližně $B = 63$ MHz (mezni kmitočty $f_1 = 911$ MHz a $f_2 = 974$ MHz). To je dostatečné pro zvolené pásmo.



Obr. 2.4: Průběh činitele odrazu S_{11} pro původní (vypočítané) rozměry antény a po naladění.

2.3 Meandrování zářiče

Jako první miniaturizační technika je použito meandrování zářiče antény. Do zářiče bylo vytvořeno 5 výřezů, jak to naznačuje obr. 2.5. Šířka zářiče byla zmenšena na $pW = 30$ mm. Délka výřezů byla zvolena $sL = 23$ mm (tedy o něco více, než jedna třetina šířky zářiče). Šířka výřezů $sW = 1$ mm a rozstup výřezů $sD = pL/7$ (u zkratovací stěny zůstane větší plocha pro ladění impedančního přizpůsobení). Výška zářiče nad zemní plochou byla snížena na $h = 6$ mm (kvůli celkové minaturizaci antény) [13, 14]. Napájení antény je prvotně umístěno ve vzdálenosti $feedL = 7$ mm od zkratovací stěny (aby nezasahovalo do výřezů). Rozestupy, délka i šířka výřezů značně ovlivňují vlastnosti antény.

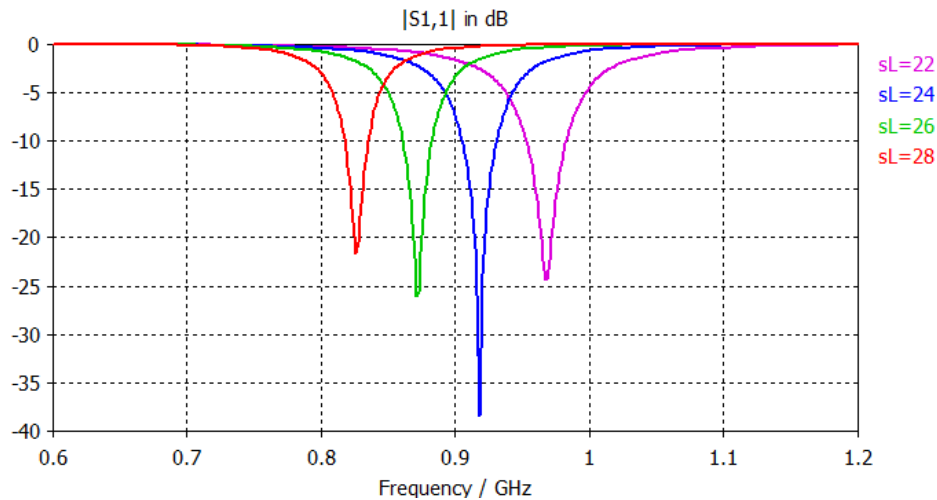


Obr. 2.5: Motiv zářiče s výřezy.

Po první simulaci byla anténa v rezonanci na kmitočtu $f = 670,5$ MHz. Zmenšením délky zářiče na $pL = 49,5$ mm byl dosažen potřebný rezonanční kmitočet $f = 942,5$ MHz. Impedanční přizpůsobení antény pak bylo docíleno změnou vzdálenosti napájení od zkratovací stěny na $feedL = 9,9$ mm (hodnoty byly získány pomocí rozmítání parametrů). Oproti původní anténě z kapitoly 2.1 tak došlo ke zmenšení plochy zářiče o 49%.

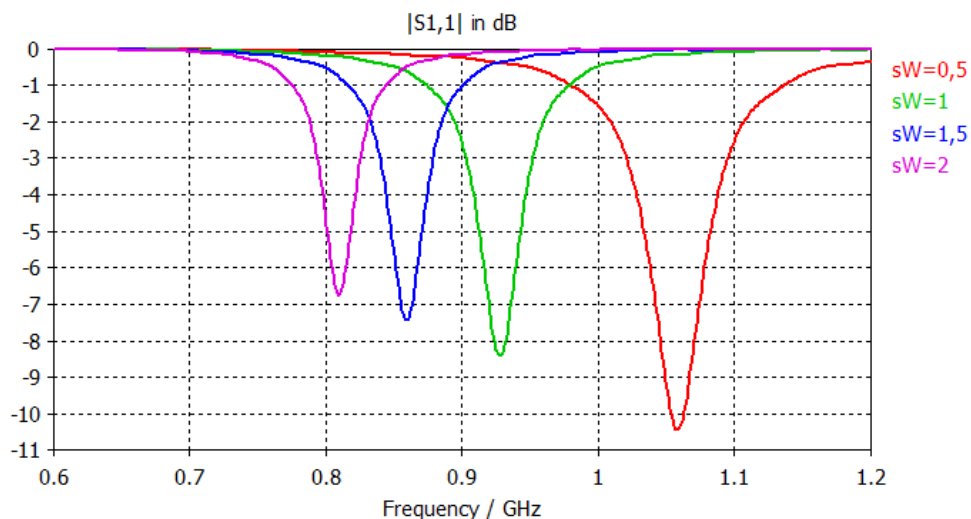
2.3.1 Výsledky simulací

Vliv délky výřezů na pracovní kmitočet je patrný z obr. 2.6, kdy byl rozmítán příslušný parametr (sL). Je patrné, že s rostoucí délkou výřezů se dále zmenšuje rezonanční kmitočet antény.

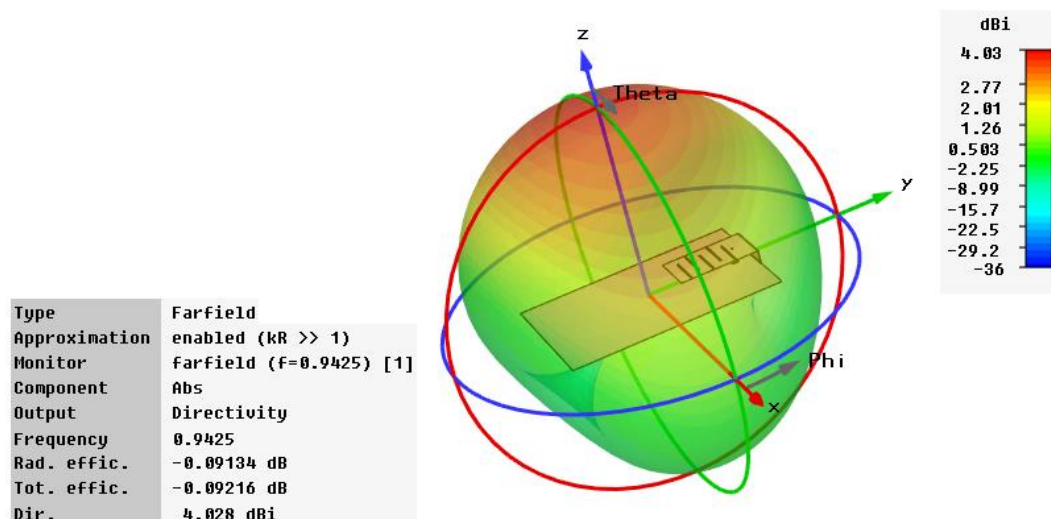


Obr. 2.6: Rozmítání parametru sL (délka výřezů zářiče).

Na obr. 2.7 jsou průběhy činitele odrazu pro různé šířky výřezů. S rostoucí šířkou výřezů se snižuje rezonanční kmitočet, ale zhoršuje se impedanční přizpůsobení antény. Zvolená šířka výřezů $sW = 1$ mm je tedy zřejmě vhodným kompromisem. Na obr. 2.8 je 3D vyzařovací charakteristika simulované antény.

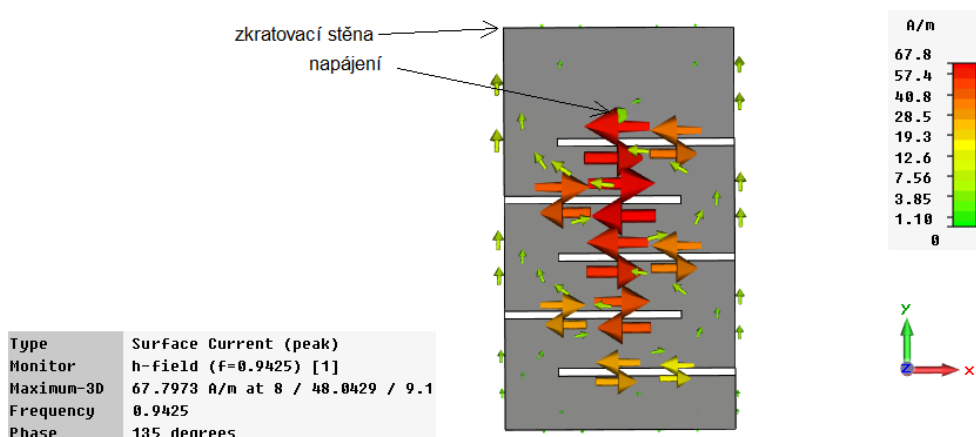


Obr. 2.7: Rozmítání parametru sW (šířka výřezů zářiče).



Obr. 2.8: 3D vyzařovací charakteristika antény s výřezy zářiče.

Na obr. 2.9 jsou simulované povrchové proudy na zářiči pro kmitočet $f = 942,5$ MHz. Je možné pozorovat, jak se povrchové proudy stáčí kolem výřezů.



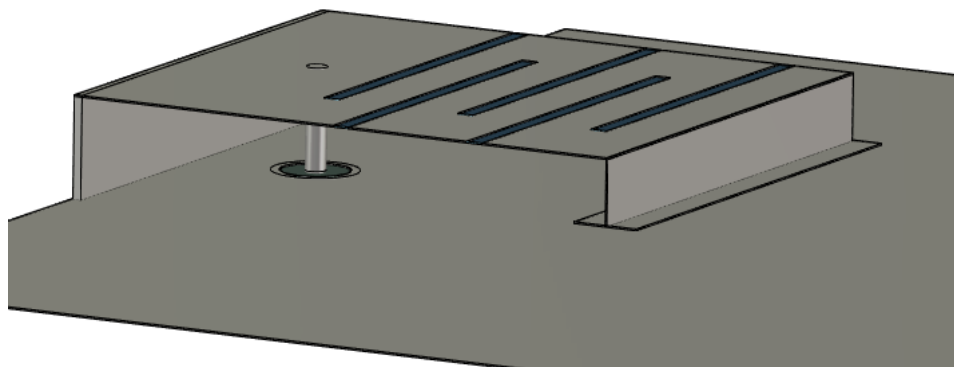
Obr. 2.9: Simulace povrchových proudů na kmitočtu $f = 942,5$ MHz.

Při simulaci této antény je důležité dávat pozor na strukturu tzv. mřížky (mesh) v CST a to především v oblasti výřezů zářiče. Mřížka je tvořena jednotlivými buňkami, pro které CST při simulaci počítá intenzity elektromagnetického pole. Při malém počtu buněk jsou výsledky simulace nepřesné (především se v tomto případě zvýší rezonanční kmitočet). Rozdíl rezonančních kmitočetů při výchozím nastavení mřížky v CST a po použití automaticky přizpůsobené mřížky (adaptive meshing) již nebyl zanedbatelný.

2.4 Kapacitní zátěž

Do modelu antény byl přidán ohyb zářiče směrem k zemní ploše a úzká ploška rovnoběžná se zemní plochou (deska kondenzátoru). Šířka kapacitní plošky byla zvolena $W_c = 4$ mm a její výška nad zemní plochou $t = 2$ mm [8]. Mezi zářič a zemní plochu tak byla přidána paralelní kapacita. Profil antény s vyznačenými rozměry

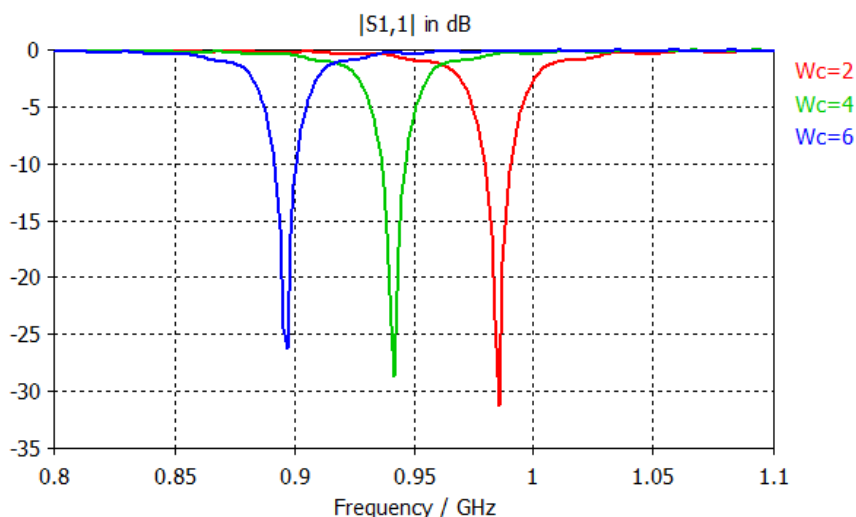
kapacitní plošky je na obr. 1.6. Rezonanční kmitočet, na který byla anténa naladěna v předchozí kapitole, se zmenšil na $f = 816$ MHz. Proto byla kvůli naladění dále zmenšena délka zářiče na $pL = 34,4$ mm. Anténa byla impedančně přizpůsobena nastavením vzdálenosti napájení od zkratovací stěny na $feedL = 7,9$ mm. Oproti předchozí kapitole došlo přidáním kapacitní zátěže k dalšímu zmenšení plochy zářiče o 31% (oproti původní anténě z kap. 2.1 byla plocha zářiče celkově snížena o 64%).



Obr. 2.10: Pohled na simulovanou anténu s výřezy a kapacitní zátěží v CST.

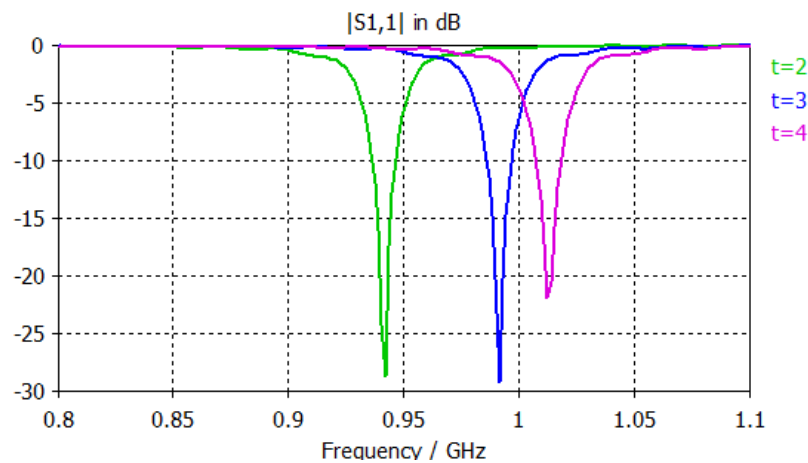
2.4.1 Výsledky simulací

Ze vzorce 1.2 vyplývá, že velikost přidané kapacity roste s plošnými rozměry kapacitní plošky a naopak klesá s rostoucí vzdáleností kapacitní plošky t od zemní plochy. Na obrázku 2.11 je rozmítání parametru Wc (šířka kapacitní plošky v mm). S rostoucí šířkou plošky dochází dle předpokladu k poklesu rezonančního kmitočtu.



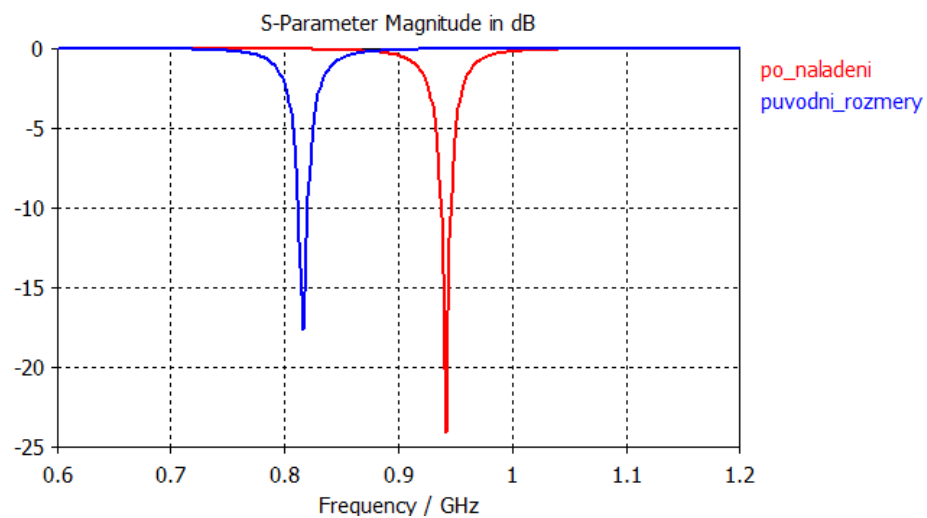
Obr. 2.11: Rozmítání parametru Wc (šířka kapacitní plošky).

Na obrázku 2.12 je rozmítání parametru t (vzdálenost kapacitní plošky od zemní plochy). S rostoucí vzdáleností klesá vložená paralelní kapacita a rezonanční kmitočet antény tak roste.

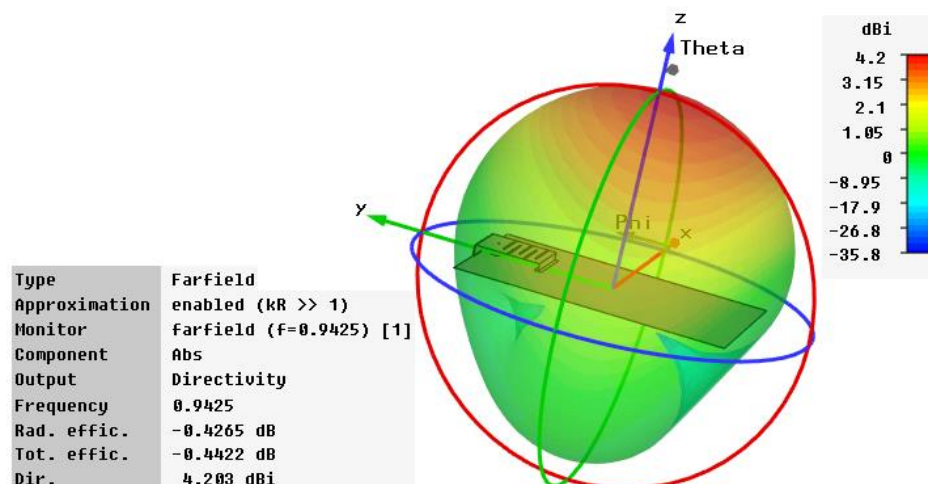


Obr. 2.12: Rozmítání parametru t (výška kapacitní plošky nad zemní plochou).

Na obr. 2.13 je průběh činitele odrazu antény s vloženou kapacitní zátěží s původními rozměry (z kapitoly 2.2) a po naladění na pracovní kmitočet a impedančním přizpůsobení. Na obr. 2.14 je 3D vyzařovací charakteristika antény.



Obr. 2.13: Průběh činitele odrazu antény s kapacitní zátěží s původními rozměry a po naladění.



Obr. 2.14: 3D vyzařovací charakteristika antény s výřezy zářiče a kapacitní zátěží.

2.5 Shrnutí

V tabulce 2.1 jsou přehledně uvedeny rozměry zářiče, zmenšení jeho plochy a dosažené šířky pásma (pro pokles činitele odrazu S_{11} o 10 dB) v jednotlivých fázích miniaturizace antény.

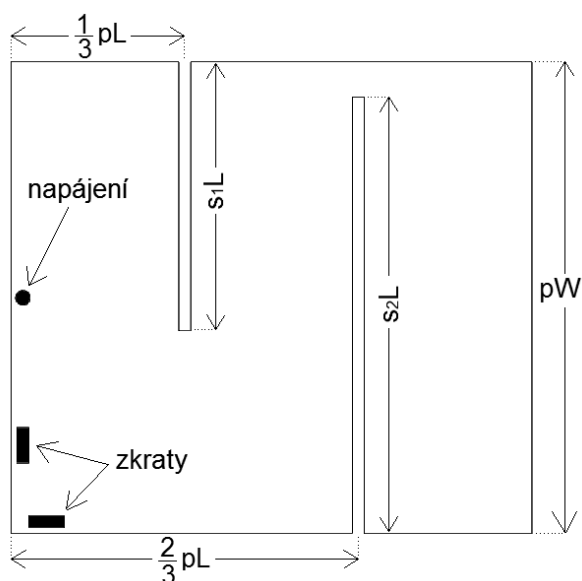
Tab. 2.1: Přehled rozměrů zářiče a šířky pásma při jednotlivých fázích miniaturizace.

Fáze miniaturizace	Délka zářiče [mm]	Šířka zářiče [mm]	Plocha zářiče vzhledem k výchozí anténě [%]	Šířka pásma [MHz]
Základní PIFA	72,6	40	100	63
Meandrování zářiče	49,5	30	51	15
Kapacitní zátěž	34,4	30	36	10

3 TŘÍPÁSMOVÁ ANTÉNA S VÝŘEZY PRO VYŠŠÍ REZONANČNÍ KMITOČTY

3.1 Návrh antény

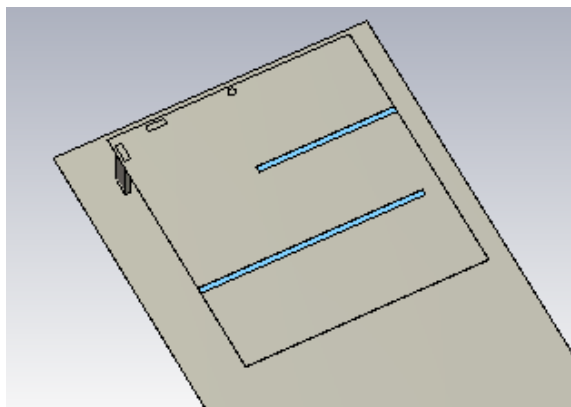
Tato třípásmová anténa využívá dvou výřezů v zářiči pro vybudování dvou vyšších rezonančních kmitočtů. Anténa bude naladěna pro pásma GSM 900, GSM 1800 a pásmo 2,4 GHz. Anténa používá dvojici zkratovacích kolíků, které jsou umístěny blízko sebe v jednom rohu zářiče [7]. Geometrie zářiče antény je na obr. 3.1.



Obr. 3.1: Motiv zářiče třípásmové antény s výřezy (převzato z [7]).

Rozměry zemní plochy jsou 114x52 mm. Výchozí délka zářiče antény je $pL = 44$ mm, jeho šířka je $pW = 40$ mm. Zářič nelícuje s horní hranou zemní plochy, ale jeho odstup je 6 mm [7], viz obrázek 3.2. Oba výřezy jsou široké $sW = 1$ mm, jejich vzdálenost od napájení antény je třetina, resp. dvě třetiny délky zářiče [7]. Délka obou bočních výřezů přímo koresponduje s vyššími rezonančními kmitočty antény. S rostoucí délkou výřezů se snižují rezonanční kmitočty, téměř nezávisle na sobě. Zkratovací kolíky mají rozměry 3x1 mm. První je vzdálen 6 mm od rohu zářiče a druhý 2 mm. Napájení je umístěno uprostřed zářiče antény 1 mm od horní hrany zářiče. Delší hrany zkratů jsou vzdáleny 0,5 mm od hran zářiče [7].

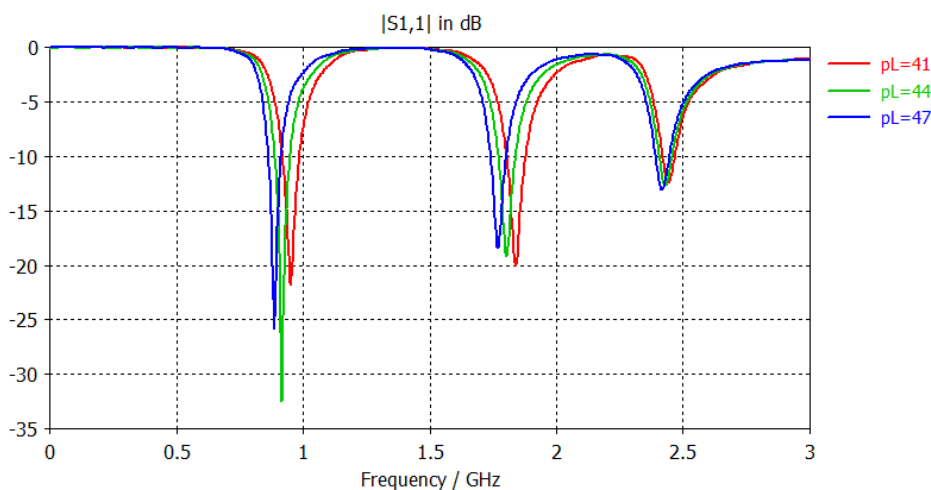
Po naladění antény na požadované kmitočty je délka zářiče $pL = 44,1$ mm, první výřez je dlouhý $s_1L = 22,8$ mm a druhý výřez pak $s_2L = 37$ mm. Na obrázku 3.2 je pohled na simulovanou anténu v CST.



Obr. 3.2: Pohled na simulovanou třípásmovou anténu v CST.

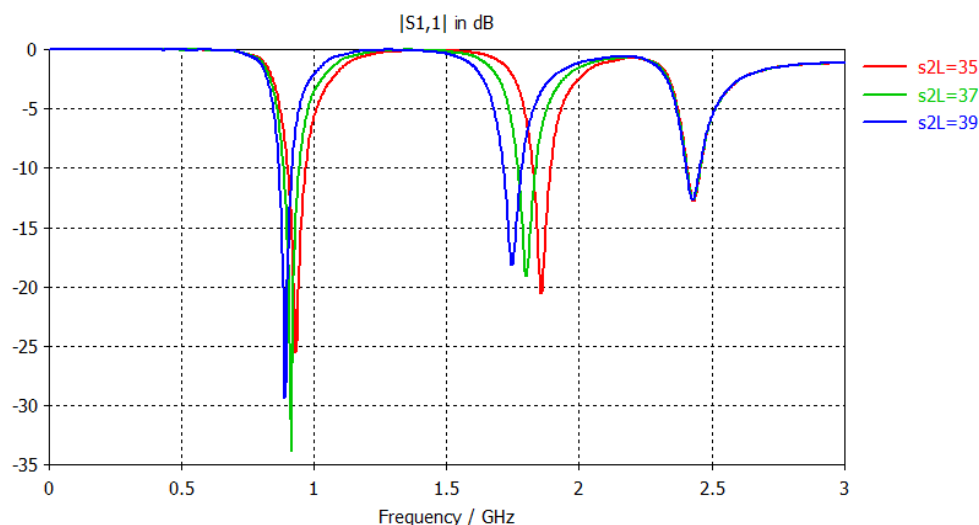
3.1.1 Výsledky simulací

Naladění na první rezonanční kmitočet bylo provedeno úpravou délky samotného zářiče pL . Rozmítání tohoto parametru je na obr. 3.3. Je patrné, že změna tohoto parametru má vliv i na druhý rezonanční kmitočet a nepatrný vliv na nejvyšší kmitočet.



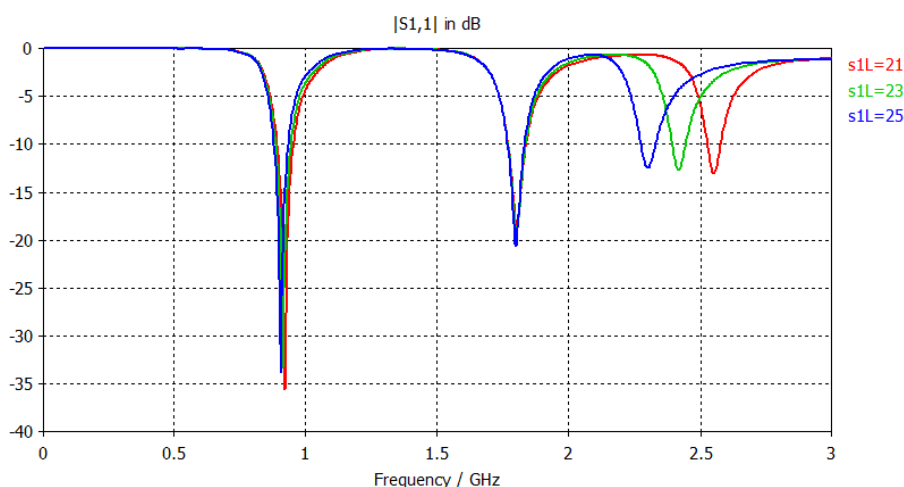
Obr. 3.3: Rozmítání parametru pL (délka zářiče třípásmové antény).

Druhý rezonanční kmitočet lze upravit především pomocí délky druhého (delšího) výřezu. Vliv změny tohoto parametru na činitel odrazu je na obr. 3.4. Největší změna nastává u druhého rezonančního kmitočtu, naopak nejvyšší rezonanční kmitočet je zcela beze změny. Menší změna je i u nejnižšího rezonančního kmitočtu. Důvodem je, že na prvním kmitočtu rezonuje celý zářič antény a změnou délky výřezů se mění dráha příslušných povrchových proudů.



Obr. 3.4: Rozmítání parametru s_2L (délka výřezu pro nastavení druhého rezonančního kmitočtu).

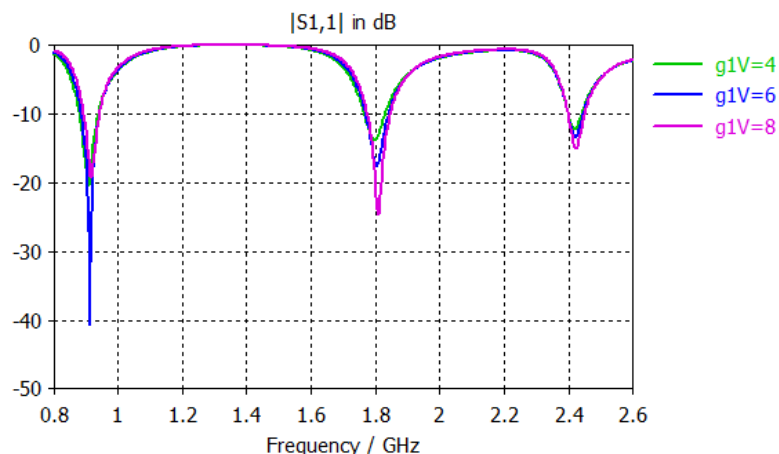
Nejvyšší rezonanční kmitočet se ladí změnou délky kratšího z výřezů (obr 3.5). Podobně jako v předchozím případě je vidět, že kromě nejvyššího rezonančního kmitočtu změna délky výřezu ovlivňuje v menší míře také kmitočet první rezonance.



Obr. 3.5: Rozmítání parametru s_1L (délka výřezu pro nastavení nejvyššího rezonančního kmitočtu).

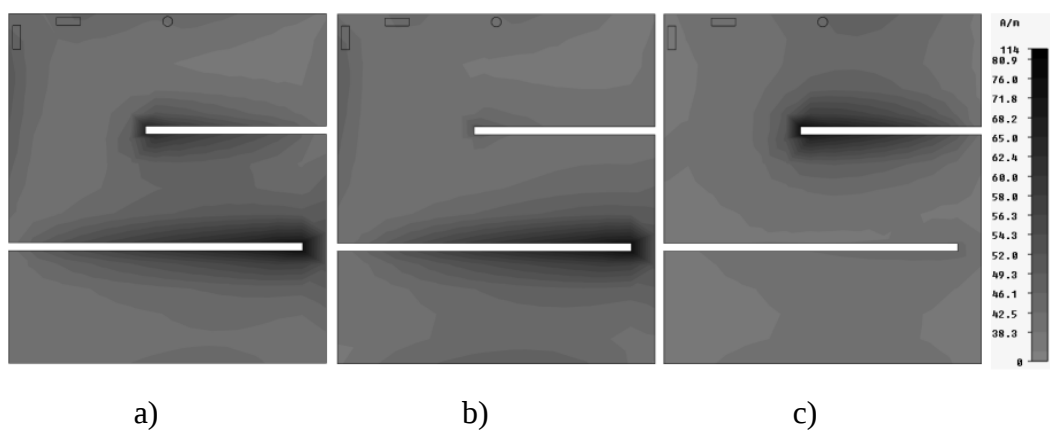
Impedanční přizpůsobení antény se provádí úpravou pozice zkratovacích kolíků [7]. Velkou roli hraje především vzdálenost zkratu, který je blíže napájení antény, od boční hrany zářiče. Tato vzdálenost má velký vliv na impedanční přizpůsobení na jednotlivých rezonančních kmitočtech antény, jak je to vidět na obr. 3.6. S rostoucí vzdáleností zkratu se zlepšuje přizpůsobení na vyšších rezonančních kmitočtech, naopak na nejnižším kmitočtu se přizpůsobení zhoršuje.

Vliv na přizpůsobení antény má také vzdálenost bočních výřezů od horní hrany zářiče (od bodu napájení). Např. při zvětšující se vzdálenosti prvního (kratšího) výřezu dochází k lepšímu přizpůsobení na vyšších rezonančních kmitočtech. Uvedené rozestupy výřezů v délce jedné třetiny celkové délky zářiče tedy nemusí být pevné.

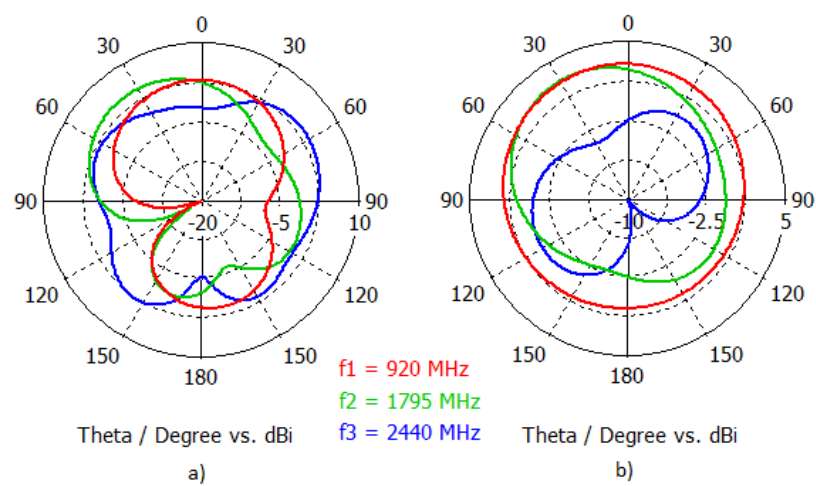


Obr. 3.6: Rozmítání parametru g_1V (vzdálenost horního zkratu od boční hrany zářiče).

Na obrázku 3.7 jsou simulované povrchové proudy na zářiči pro jednotlivé kmitočty. Na nejnižším kmitočtu rezonuje celá anténa, na prostředním delší výřez a na nejvyšším kmitočtu kratší výřez. Na obrázku 3.8 jsou simulované směrové charakteristiky antény v rovinách E a H.



Obr. 3.7: Intenzity povrchových proudů na zářiči při kmitočtu **a)** 920 MHz, **b)** 1795 MHz, **c)** 2442 MHz.



Obr. 3.8: Simulované směrové charakteristiky třípásmové antény s meandrovaným zářičem
a) v rovině E, **b)** v rovině H.

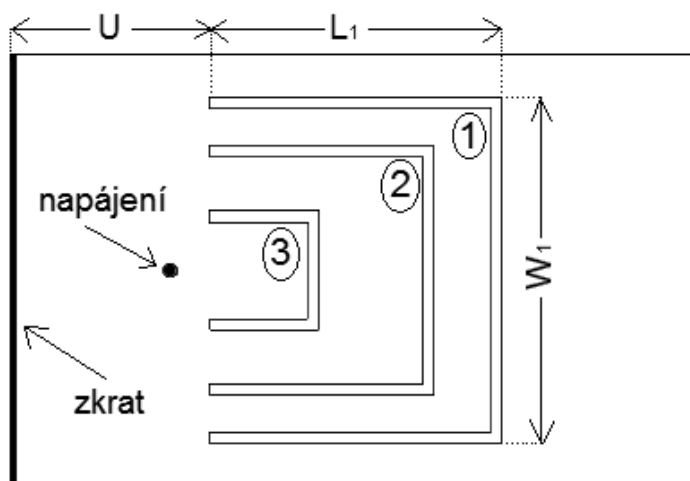
4 ANTÉNA VYUŽÍVAJÍCÍ U-SLOTY

Tato anténa využívá výřezů tvaru písmene „U“ v zářiči pro vybudzení vyšších rezonančních kmitočtů [8]. Anténa bude naladěna pro downlink pásem GSM 900 a GSM 1800. Dále pak pro pásma 2,4 GHz a 5,2 GHz.

4.1 Návrh antény

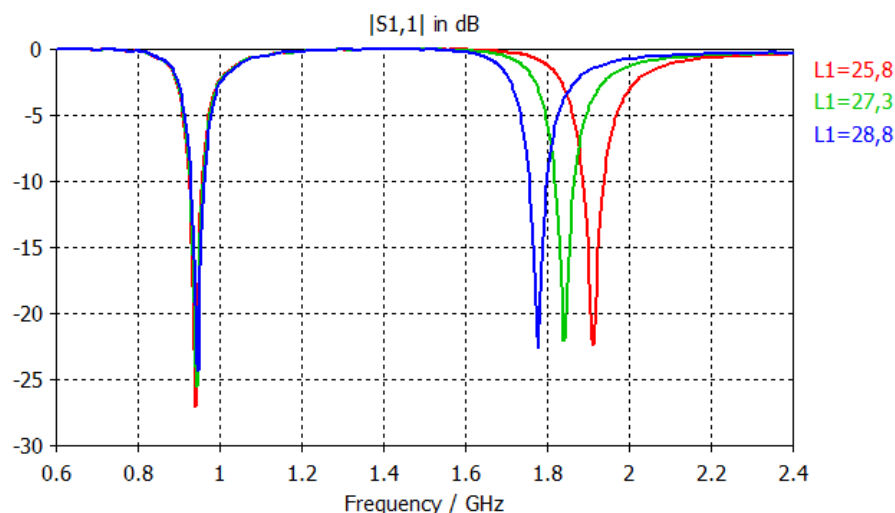
Základem je klasická anténa PIFA se zkratovací stěnou (viz. kapitola 2.1). Zemní plocha má rozměry 100x60 mm, výška zářiče nad zemní plochou je $h = 8$ mm. Šířka zářiče je zvolena $pW = 40$ mm [8]. Úpravou délky zářiče na $pL = 70,1$ mm byla anténa naladěna na downlink pásma GSM 900.

Po přidání prvního výřezu ve tvaru písmene „U“ (viz. obr. 4.1) začne anténa rezonovat na dalším kmitočtu. Tento kmitočet je dán rozměry výřezu a jeho vzdáleností od zkratovací stěny, která byla zvolena $U = 18,5$ mm [8]. Šířka výřezů bude vždy pevná a naladění na požadovaný kmitočet se bude provádět pomocí úpravy jeho délky. Tloušťka výřezů bude shodná, $UW = 1$ mm.



Obr. 4.1: Motiv zářiče antény se třemi U-slots (převzato z [8]).

První výřez bude mít šířku $W_1 = 32$ mm a počáteční délku $L_1 = 23$ mm [8]. Rozmítání parametru L_1 je na obr. 4.2. S rostoucí délkou výřezu klesá druhý rezonanční kmitočet, první se téměř nemění. Pro naladění na downlink pásma GSM 1800 je třeba nastavit délku výřezu $L_1 = 27,3$ mm, délka zářiče se upraví na $pL = 63,9$ mm (neboť přidáním výřezu byl ovlivněn i původní rezonanční kmitočet).

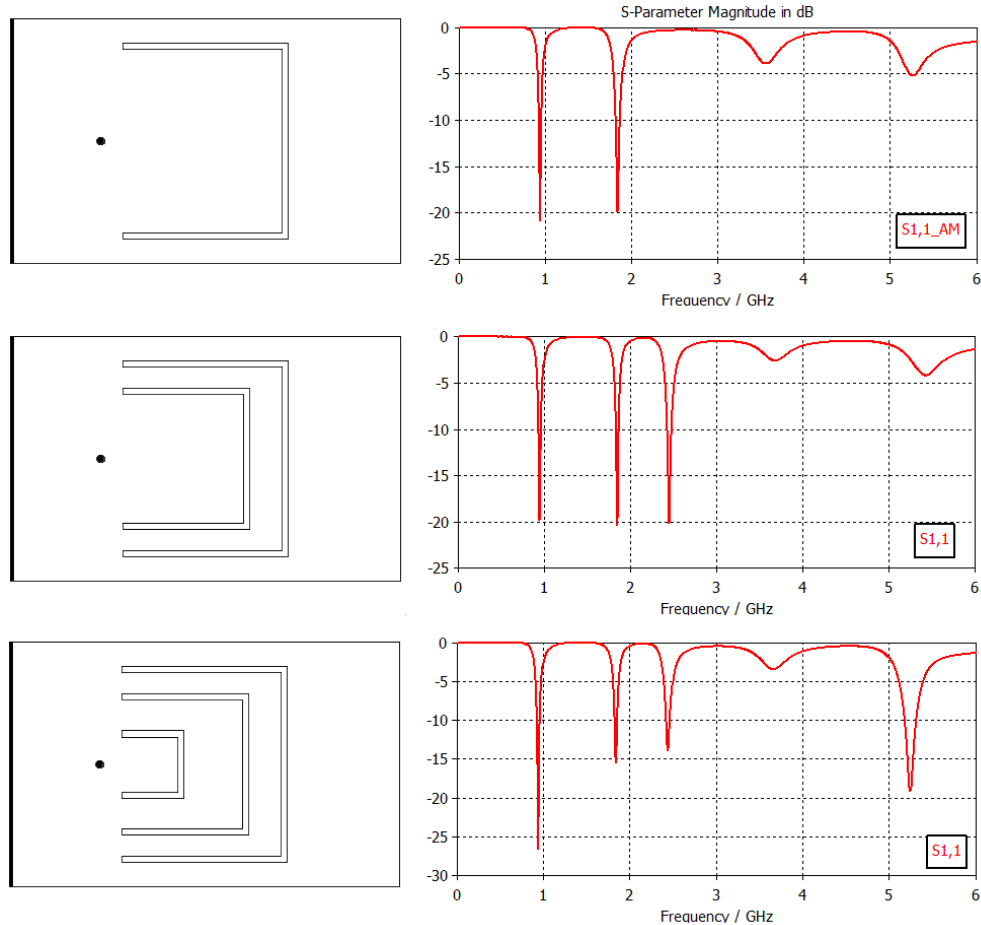


Obr. 4.2: Rozmítání parametru L_1 (délka prvního U-slotu).

Pro další dvě pásma byly v zářiči antény vytvořeny postupně další dva U-slotty (viz. obr. 4.1). Druhý výřez bude mít počáteční šířku $W_2 = 23$ mm a délku $L_2 = 18$ mm. Třetí výřez má šířku $W_3 = 11$ mm a počáteční délku $L_3 = 9,5$ mm. [8] Poté byla anténa úpravou délky všech výřezů a také samotného zářiče naladěna na požadovaná pásma. Na obr. 4.3 je srovnání činitele odrazu pro anténu s jedním, dvěma a třemi U-slotty. Je zde možné pozorovat, jak s U-slotty přibývají další rezonanční kmitočty. V tabulce 4.1 jsou délky jednotlivých výřezů, nová délka zářiče je $pL = 62,7$ mm.

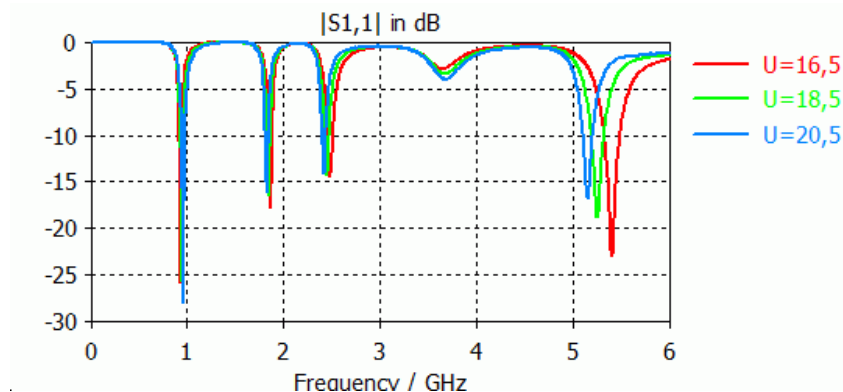
Tab. 4.1: Délky jednotlivých U-slotů po naladění antény na všechna 4 pásma.

U-slot č. (<i>i</i>)	1	2	3
Délka L_i [mm]	26,3	20,9	10



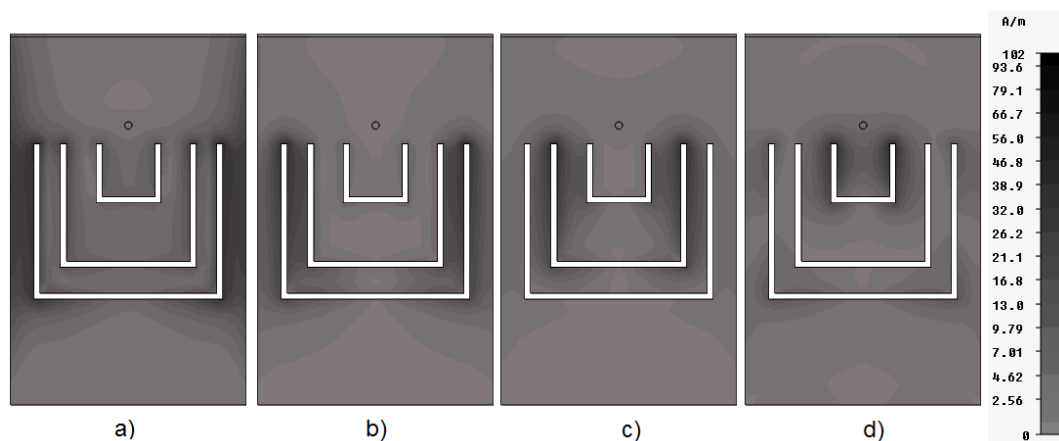
Obr. 4.3: Průběhy činitele odrazu S_{11} při postupném přidávání U-slotů.

U čtyřpásmové varianty antény (3 U-sloty) byl dále studován vliv parametru U , čili vzdálenosti U-slotů od zkratovací plochy. Z obrázku 4.4 je zřejmé, že vzdálenost U nemá na chování antény zásadní vliv (pouze na nejvyšší kmitočet). Negativní dopad na přizpůsobování antény by však mělo umístění U-slotů v těsné blízkosti zkratu, protože by umístění napaječe zasahovalo do U-slotů.

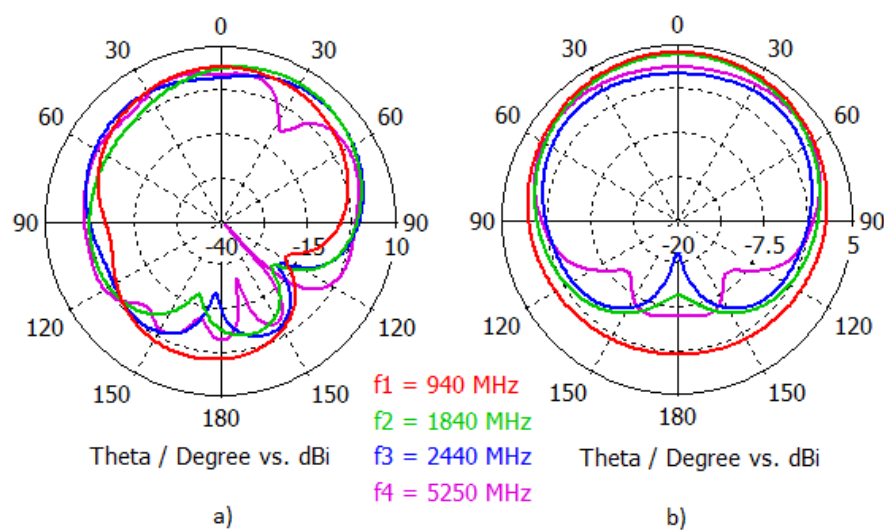


Obr. 4.4: Rozmítání vzdálenosti U-slotů od zkratovací stěny (parametr U).

Na obr. 4.5 jsou simulované povrchové proudy na povrchu zářiče při jednotlivých rezonančních kmitočtech. Největší intenzity proudů jsou u vyšších rezonančních kmitočtů podél příslušných U-slotů. Na obr. 4.6 jsou vyzařovací charakteristiky antény pro jednotlivé kmitočty. Vše pro čtyřpásmovou variantu antény.



Obr. 4.5: Simulované povrchové proudy čtyřpásmové antény bez kapacitní zátěže pro kmitočty **a)** 942,5 MHz, **b)** 1842,5 MHz, **c)** 2442 MHz a **d)** 5250 MHz.



Obr. 4.6: Vyzařovací charakteristiky čtyřpásmové antény s U-sloty **a)** v rovině E, **b)** v rovině H.

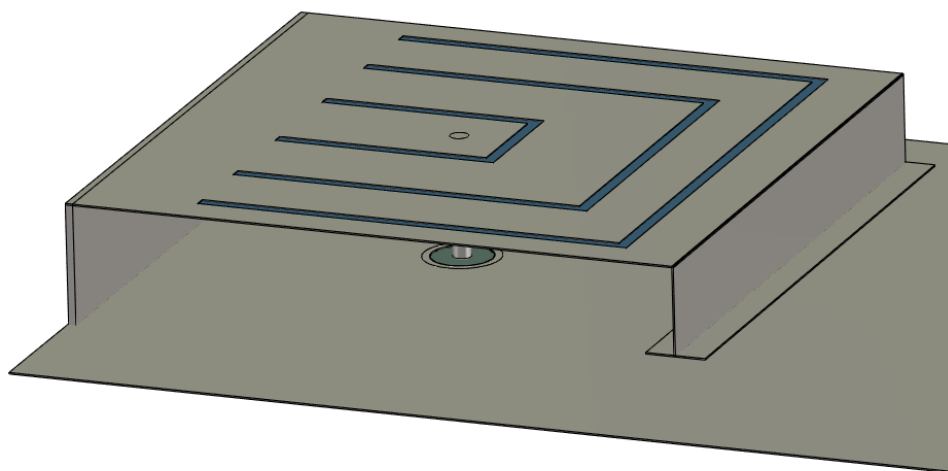
4.2 Kapacitní zátěž

K čtyřpásmové anténě navržené v kapitole 4.1 byla přidána kapacitní zátěž podobně jako v kapitole 2.4. Šířka kapacitní plošky je $W_c = 4$ mm a její výška nad zemní plochou je $t = 2$ mm [8]. Pohled na simulovanou anténu s kapacitní zátěží je na obr. 4.7. Po přidání kapacity došlo ke snížení pouze nejnižšího rezonančního kmitočtu. Proto byla zmenšena délka zářiče na $pL = 40,3$ mm. Kvůli zmenšení délky zářiče muselo dojít k mírnému zvětšení šířky výřezů a také úpravě jejich délek. Bylo také nutné U-sloty

posunout blíže ke zkratovací stěně ($U = 8$ mm). Šířka všech výřezů byla snížena na $UW = 0,8$ mm kvůli možnosti anténu lépe naladit a impedančně přizpůsobit. Oproti anténě z minulé kapitoly došlo ke zmenšení plochy zářiče o 31%. V tabulce 4.2 jsou uvedeny rozměry všech výřezů po naladění čtyřpásmové antény s kapacitní zátěží.

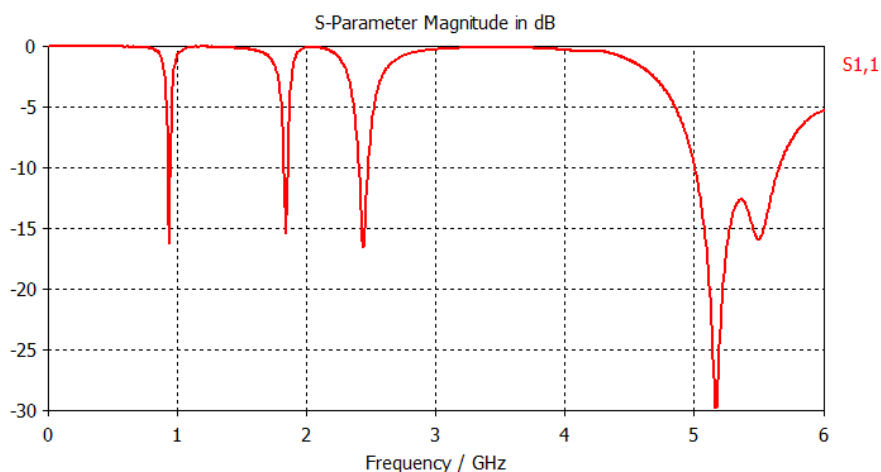
Tab. 4.2: Rozměry výřezů po naladění antény s kapacitní zátěží na všechna 4 pásma.

U-slot č. (i)	1	2	3
Šířka W_i [mm]	35	23	8,75
Délka L_i [mm]	28,3	24	14,75



Obr. 4.7: Pohled na simulovanou čtyřpásmovou anténu s U-slots a kapacitní zátěží v CST.

Na obr 4.8 je výsledný průběh činitele odrazu naladěné antény. Zajímavý je především velký nárůst šířky pásma v mezi kmitočty 5-6 GHz kvůli geometrii antény.



Obr. 4.8: Průběh činitele odrazu naladěné čtyřpásmové antény s kapacitní zátěží.

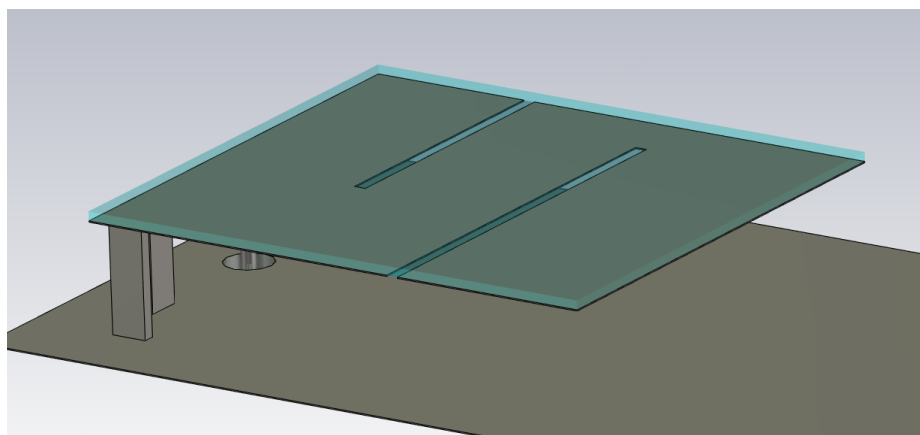
5 KONSTRUKCE ANTÉN A MĚŘENÍ

5.1 Úpravy modelů antén pro konstrukci

Pro ověření simulací praktickým měřením byly některé modely antén upraveny pro výrobu. Vybrána byla třípásmová anténa s bočními výřezy. Dále pak všechny antény s U-sloty (5 variant, včetně základní jednopásmové antény PIFA). Vyráběné antény byly v simulacích naladěné na stejná pásma. Dle počtu pásem dané antény to byly vždy následující střední kmitočty:

- $f_1 = 942$ MHz (downlink pásma E-GSM 900, pro všechny antény)
- $f_2 = 1842$ MHz (downlink pásma GSM 1800)
- $f_3 = 2442$ MHz (pásmo 2,4 GHz)
- $f_4 = 5250$ MHz (pásmo 5 GHz).

V CST bylo tedy nutné připravit celkem 6 modelů antén pro výrobu. Zářiče antén byly vytvořeny odleptáním mědi z jedné strany substrátu Arlon 25N (protější strana substrátu je bez pokovení). Relativní permitivita substrátu je $\epsilon_r = 3,38$ a tloušťka $t_{\text{Arlon}} = 0,762$ mm. Zářič antény byl umístěn na spodní straně substrátu (blíže k zemní ploše) kvůli lepšímu připojení zkratovacích plíšků u třípásmové meandrované antény. Pokovení substrátu (zářič antény) je také chráněno před případným poškozením. Po přidání substrátu došlo k rozladění antén, a proto byly antény opět naladěny.

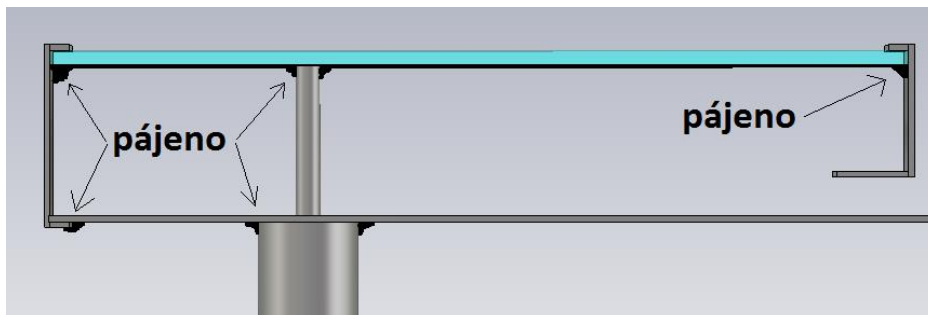


Obr. 5.1: Model antény s přidáním dielektrickým substrátem (pro názornost je průhledný).

Zemní plocha antén, zkratovací a kapacitní plíšky byly vyrobeny z pocínovaného plechu o tloušťce $t_{\text{plech}} = 0,3$ mm. Pro lepší mechanickou pevnost antény byla zemní plocha podél delších hran ohnuta o 90° směrem dozadu. Délka ohybu je $l_{\text{oHyb-zem}} = 5$ mm (negativní vliv této úpravy na vlastnosti antény byl simulacemi vyloučen). Ze stejného důvodu byly zkratovací a kapacitní plíšky ohnuty přes zářič antény a pod zemní plochu. Zde byla délka ohybu volena $l_{\text{oHyb}} = 1$ mm (kompromis mezi možnostmi ohýbačky plechů a vlivem vodivého plechu na elektrické vlastnosti antény). Přesah zkratovacího plíšku se v podstatě stal součástí zářiče antény (viz kapitola 1.2.4, Skládání zářiče). Délka zářiče se tak zvětšila, což znamená snížení rezonančního kmitočtu (a pochopitelně také rozladění antény). Proto bylo nutné antény opět

přizpůsobit na pracovní kmitočty (úpravou délky zářiče a polohy bodu napájení).

Zkratovací a kapacitní plíšky byly k zářiči antény a zemní ploše připájeny, jak je naznačeno na obr. 5.2. Stejně tak byl k zemní ploše připájen (ze zadní strany) SMA konektor a jeho střední vodič byl připájen k zářiči antény.

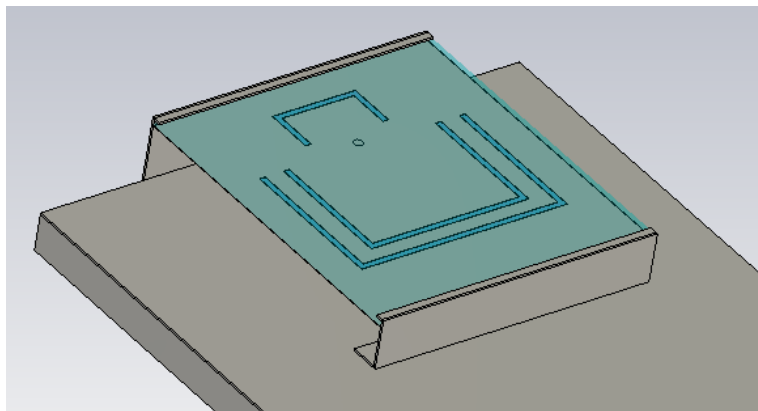


Obr. 5.2: Profil antény s přehnutým zkratovacím a kapacitním plíškem a body pájení.

5.1.1 Úprava zářiče antény s kapacitní zátěží

Po přidání substrátu docházelo u antény s kapacitní zátěží k problémům s naladěním na požadované kmitočty. Pro první a druhý U-slot vycházely takové rozměry, že vzájemná vzdálenost těchto dvou výřezů byla příliš malá (méně než 2 mm), což se projevvalo značným poklesem šířky pásma kolem druhého rezonančního kmitočtu. Mohlo by také dojít k poškození úzkého profilu pokovení mezi výřezy.

Východiskem z této situace bylo přemístění třetího (nejmenšího) U-slotu. Třetí U-slot byl otočen o 180° a přesunut blíže ke zkratovacímu plíšku, jak je vidět na obrázku 5.3. Napájení antény je tak obklopeno jednotlivými U-slotty. Po této úpravě už bylo anténu možné uspokojivě naladit.



Obr. 5.3: Konečná podoba zářiče antény s kapacitní zátěží.

5.1.2 Vliv rozměrů zemní plochy na vyzařovací charakteristiku

Při simulacích antén byla ve vyzařovacích charakteristikách na většině kmitočtů zjištěna v různých směrech nežádoucí minima. Pro minimalizaci těchto vad ve vyzařování antén byly upraveny rozměry zemních ploch. Pro každou anténu byly proto zvoleny optimální rozměry zemní plochy tak, aby byla minima na všech rezonančních kmitočtech co nejméně výrazná. V tabulce 5.1 jsou uvedeny výsledné rozměry zemních ploch všech

vyráběných antén včetně rozměrů zářičů a polohy napájení. Kompletní rozměry vyráběných antén lze nalézt v Příloze 1.

Tab. 5.1: Základní rozměry vyráběných antén.

Anténa	Počet pásem	L [mm]	W [mm]	pL [mm]	pW [mm]	$feedL$ [mm]	h [mm]
Boční výřezy	3	114	52	45	40	1	9
Základní PIFA	1	90	50	69	40	9,4	8
1 U slot	2	110	70	62,5	40	13,5	8
2 U-sloty	3	110	70	60,9	40	15,2	8
3 U-sloty	4	115	70	61,3	40	16,5	8
3 U-sloty, kapacita	4	115	70	44	40	13,2	8

Vysvětlivky: L – délka zemní plochy, W – šířka zemní plochy, pL – délka zářiče, pW – šířka zářiče, $feedL$ – vzdálenost napájení od zkratu (horního konce zářiče), h – výška antény.

5.2 Výsledky měření

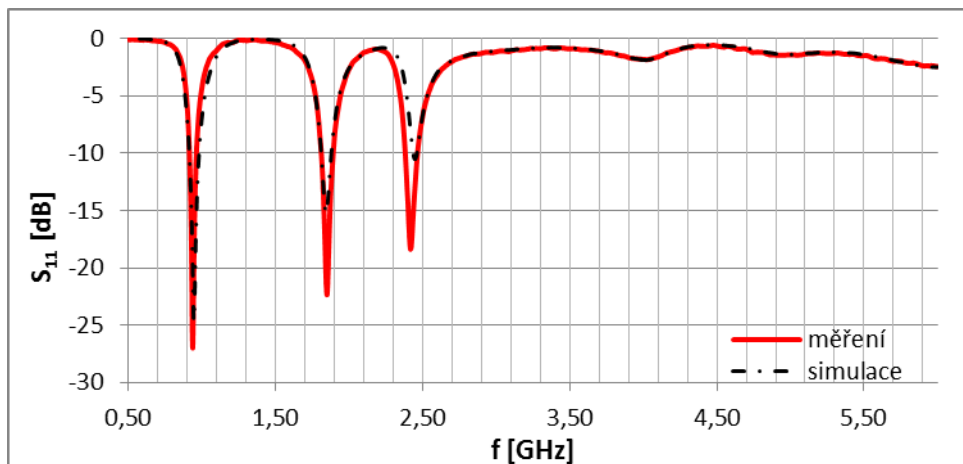
Po výrobě antén byla změřena jejich kmitočtová charakteristika (činitel odrazu). Měření probíhalo na zkalibrovaném vektorovém obvodovém analyzátoru ZVL firmy Rohde & Schwarz.

Změřené rezonanční kmitočty většinou odpovídaly simulacím. Největší relativní odchylky byly pozorovány v pásmu GSM 1800 u antén s více U-sloty. Příslušný rezonanční kmitočet byl u těchto antén přibližně o 40 MHz menší. Vzhledem k malé šířce pásma lze tyto antény považovat pro zadané pásmo za nepřizpůsobené. Na vině je pravděpodobně nepřesnost při výrobě antén.

Měření směrových charakteristik antén bylo provedeno v bezodrazové komoře. Měřená anténa byla upevněna k rotátoru, vždy ve dvou polohách v závislosti na měřené rovině (rovina E a H). Směrová charakteristika byla automaticky ukládána pomocí počítačového programu, který také řídil natočení rotátoru s měřenou anténou. Pro minimalizaci působení asymetrických proudů na stínění koaxiálního napáječe byl v těsné blízkosti antény přes přívodní kabel navlečen feritový kroužek.

U každé antény je uveden průběh činitele odrazu na vstupu antény a tabulka s naměřenými rezonančními kmitočty a šířkou pásma pro jednotlivá kmitočtová pásma. Všechny šířky pásma jsou uvedeny pro pokles činitele odrazu S_{11} o 10 dB. Dále jsou uvedena srovnání simulovaných a naměřených směrových charakteristik ve dvou rovinách pro každý rezonanční kmitočet antén.

5.2.1 Třípásmová anténa se zářičem meandrovaným bočními výřezy



Obr. 5.4: Činitel odrazu S_{11} antény s bočními výřezy.

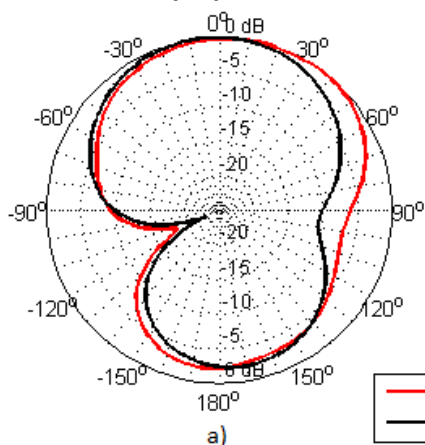
Tab. 5.2: Změřené rezonanční kmitočty, jejich odchylky a šířky pásma antény.

Pásmo	f_{s-sim} [MHz]	$f_{s-měř}$ [MHz]	Δf_s [MHz]	f_1 [MHz]	f_2 [MHz]	$B_{měř}$ [MHz]	B_{sim} [MHz]
0,9 GHz	942	935	- 7	913	961	48	49
1,8 GHz	1842	1849	7	1810	1891	81	70
2,4 GHz	2442	2417	- 25	2380	2465	85	20

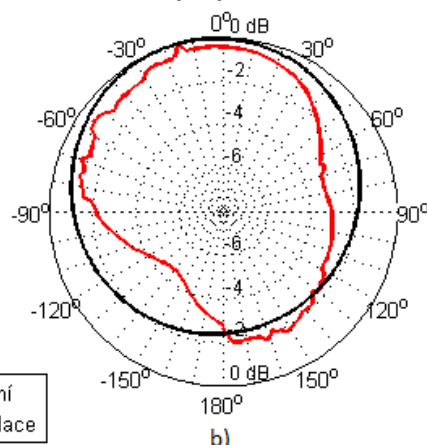
Vysvětlivky (platné pro všechny měřené antény): f_{s-sim} , $f_{s-měř}$ – simulovaný a naměřený rezonanční kmitočet, Δf_s – rozdíl naměřeného a simulovaného rezonančního kmitočtu, f_1 , f_2 – naměřené mezní kmitočty pro pokles S_{11} o 10 dB, $B_{měř}$, B_{sim} – změřená a simulovaná šířka pásma (pro pokles S_{11} o 10 dB).

Třípásmová anténa s bočními výřezy měla rezonanční kmitočty velice blízké simulovaným hodnotám. Ve všech kmitočtových pásmech měla také dostatečnou šířku pásma (je to jediná vyrobená anténa, která se dá považovat za přizpůsobenou pro celé pásmo GSM 1800 downlink). Z měření směrových charakteristik této i následujících antén vyplývá, že na vyšších rezonančních kmitočtech jsou minima ve vyzářování více výrazná, než při simulacích.

Anténa s bočními výřezy, $f = 940$ MHz, rovina E

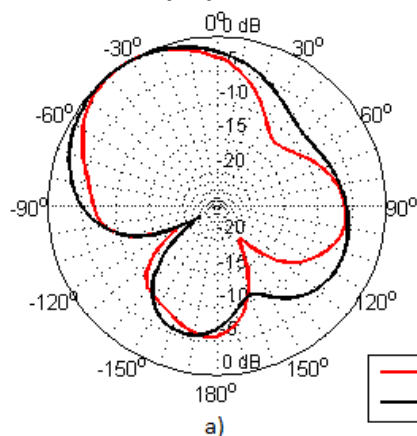


Anténa s bočními výřezy, $f = 940$ MHz, rovina H

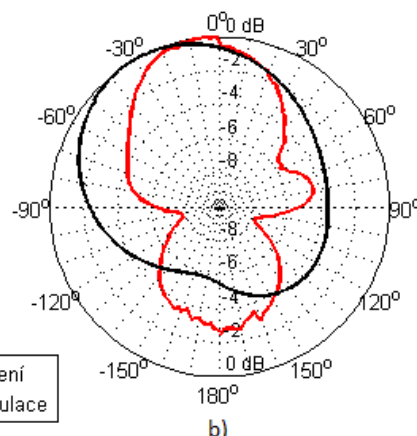


Obr. 5.5: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 940$ MHz
a) v rovině E, b) v rovině H.

Anténa s bočními výřezy, $f = 1840$ MHz, rovina E

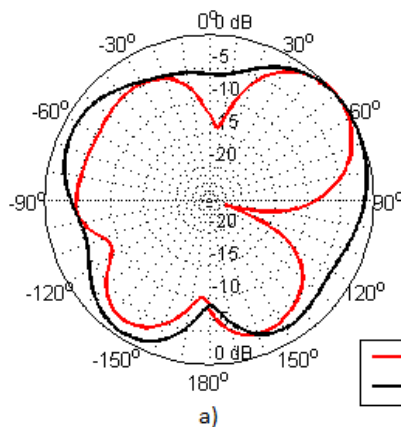


Anténa s bočními výřezy, $f = 1840$ MHz, rovina H

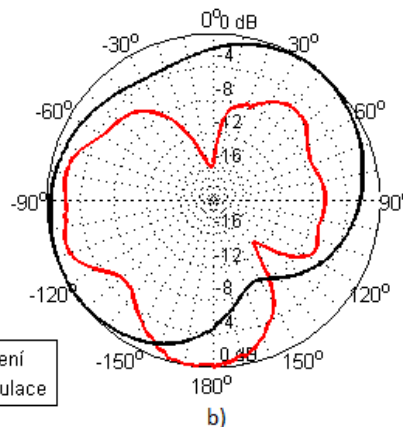


Obr. 5.6: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 1840$ MHz
a) v rovině E, b) v rovině H.

Anténa s bočními výřezy, $f = 2440$ MHz, rovina E

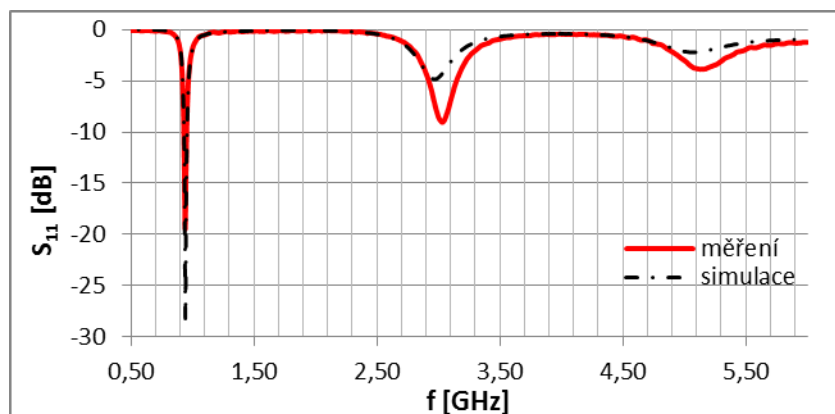


Anténa s bočními výřezy, $f = 2440$ MHz, rovina H



Obr. 5.7: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 2440$ MHz
a) v rovině E, b) v rovině H.

5.2.2 Jednopásmová PIFA anténa

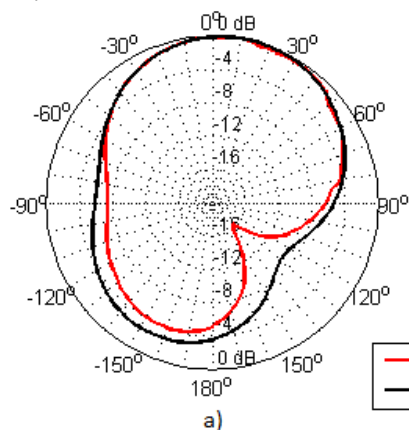


Obr. 5.8: Činitel odrazu S_{11} jednopásmové PIFA antény.

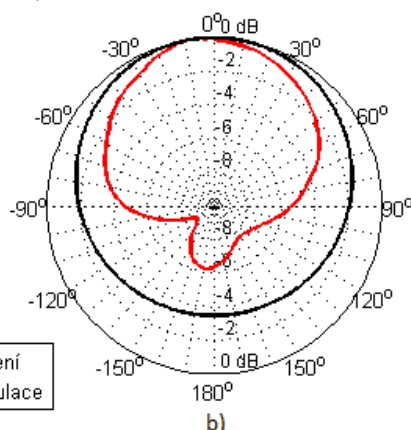
Tab. 5.3: Změřené rezonanční kmitočty, jejich odchylky a šířky pásma antény.

Pásmo	$f_{s\text{-sim}}$ [MHz]	$f_{s\text{-měř}}$ [MHz]	Δf_s [MHz]	f_1 [MHz]	f_2 [MHz]	$B_{\text{měř}}$ [MHz]	B_{sim} [MHz]
0,9 GHz	942	941	-1	930	952	22	25

Jednopásmová PIFA anténa, $f = 940$ MHz, rovina E

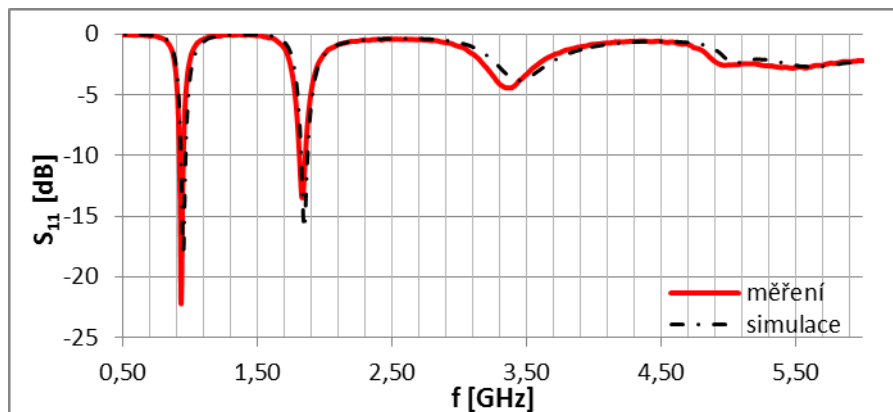


Jednopásmová PIFA anténa, $f = 940$ MHz, rovina H



Obr. 5.9: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 940$ MHz
a) v rovině E, **b)** v rovině H.

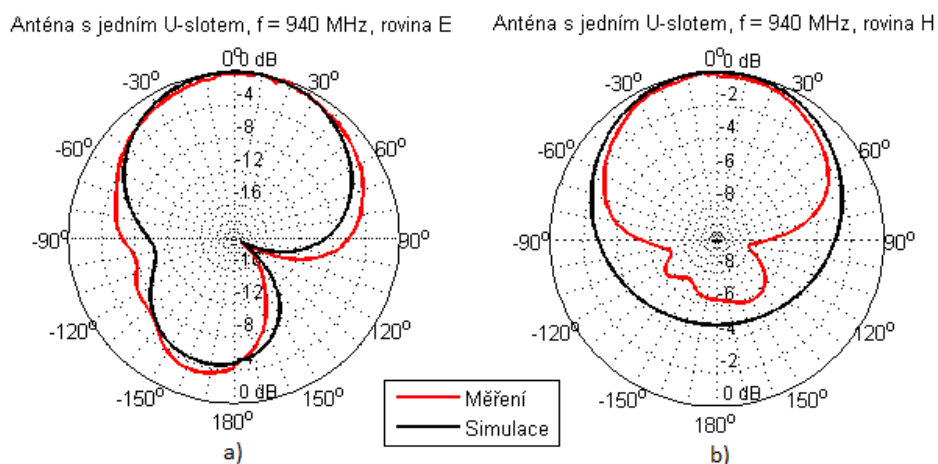
5.2.3 Dvoupásmová anténa s jedním U-slotem



Obr. 5.10: Činitel odrazu S_{11} dvoupásmové antény s jedním U-slotem.

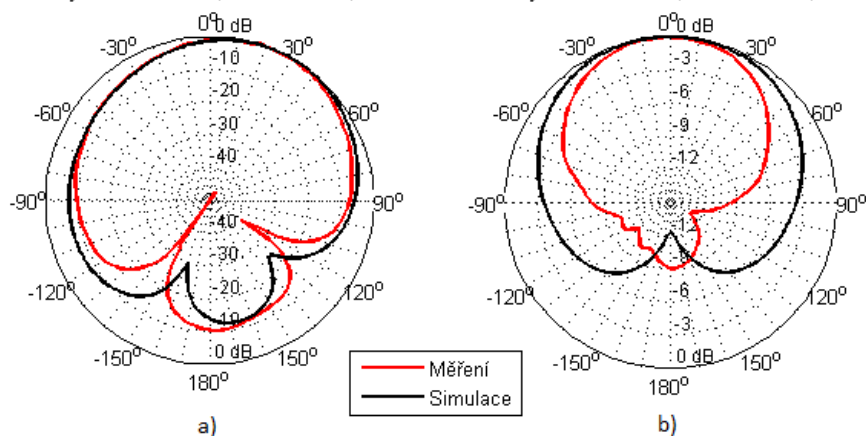
Tab. 5.4: Změřené rezonanční kmitočty, jejich odchylky a šířky pásma antény.

Pásmo	$f_{s\text{-sim}}$ [MHz]	$f_{s\text{-měř}}$ [MHz]	Δf_s [MHz]	f_1 [MHz]	f_2 [MHz]	$B_{\text{měř}}$ [MHz]	B_{sim} [MHz]
0,9 GHz	942	930	-12	917	947	30	36
1,8 GHz	1842	1830	-12	1809	1854	45	47



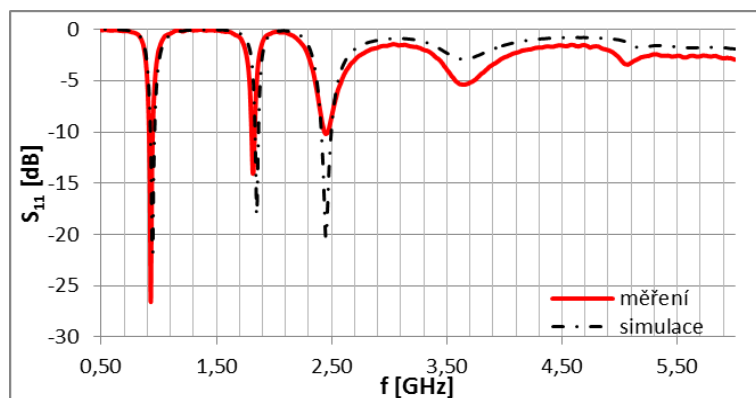
Obr. 5.11: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 940$ MHz
a) v rovině E, **b)** v rovině H.

Anténa s jedním U-slotem, $f = 1840$ MHz, rovina E Anténa s jedním U-slotem, $f = 1840$ MHz, rovina H



Obr. 5.12: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 1840$ MHz
a) v rovině E, b) v rovině H.

5.2.4 Třípásmová anténa se dvěma U-slotty

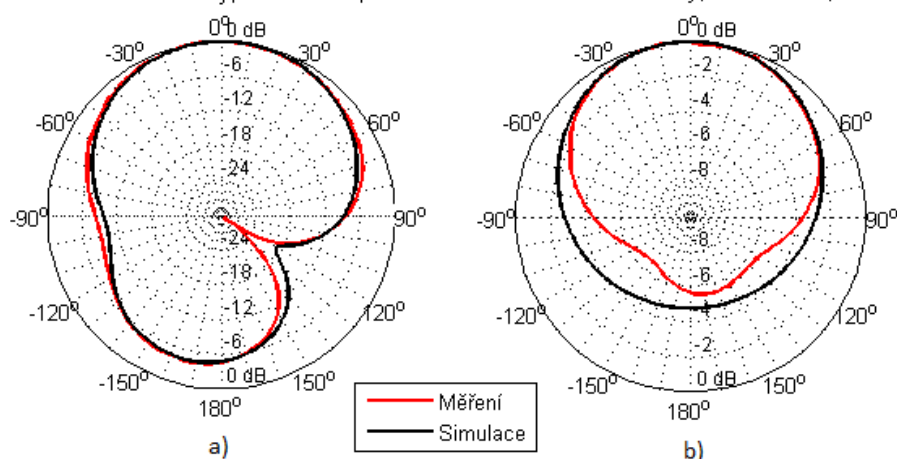


Obr. 5.13: Činitel odrazu S_{11} třípásmové antény se dvěma U-slotty.

Tab. 5.5: Změřené rezonanční kmitočty, jejich odchylky a šířky pásma antény.

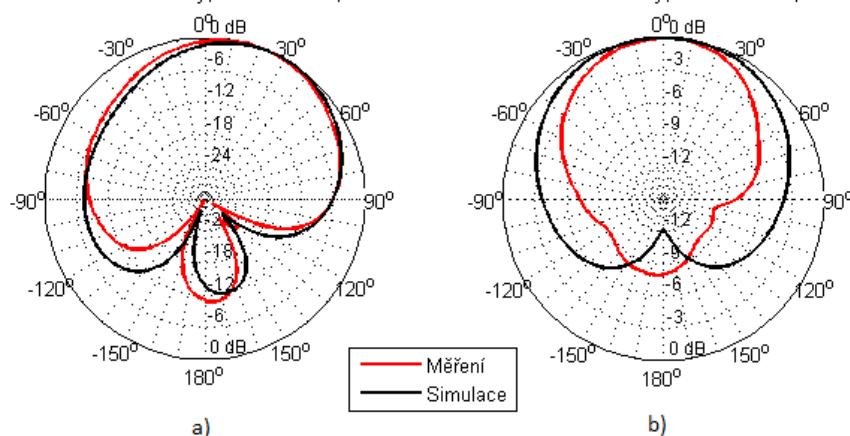
Pásmo	f_{s-sim} [MHz]	$f_{s-měř}$ [MHz]	Δf_s [MHz]	f_1 [MHz]	f_2 [MHz]	$B_{měř}$ [MHz]	B_{sim} [MHz]
0,9 GHz	942	930	-12	920	940	20	37
1,8 GHz	1842	1818	-24	1805	1832	27	29
2,4 GHz	2442	2450	8	2435	2472	37	87

Anténa se dvěma U-sloty, $f = 940$ MHz, rovina E Anténa se dvěma U-sloty, $f = 940$ MHz, rovina H



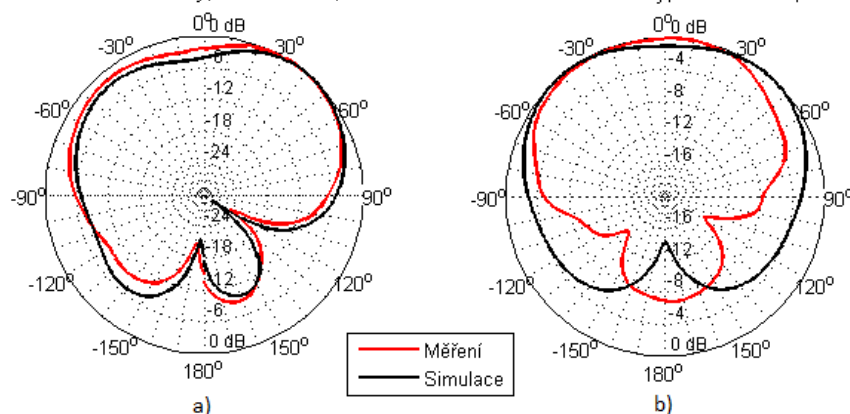
Obr. 5.14: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 940$ MHz
a) v rovině E, b) v rovině H.

Anténa se dvěma U-sloty, $f = 1840$ MHz, rovina E Anténa se dvěma U-sloty, $f = 1840$ MHz, rovina H



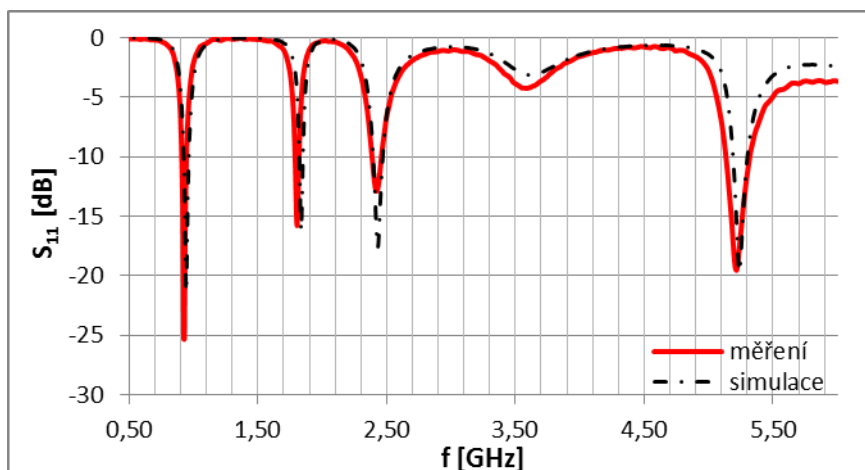
Obr. 5.15: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 1840$ MHz
a) v rovině E, b) v rovině H.

Anténa se dvěma U-sloty, $f = 2440$ MHz, rovina E Anténa se dvěma U-sloty, $f = 2440$ MHz, rovina H



Obr. 5.16: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 2440$ MHz
a) v rovině E, b) v rovině H.

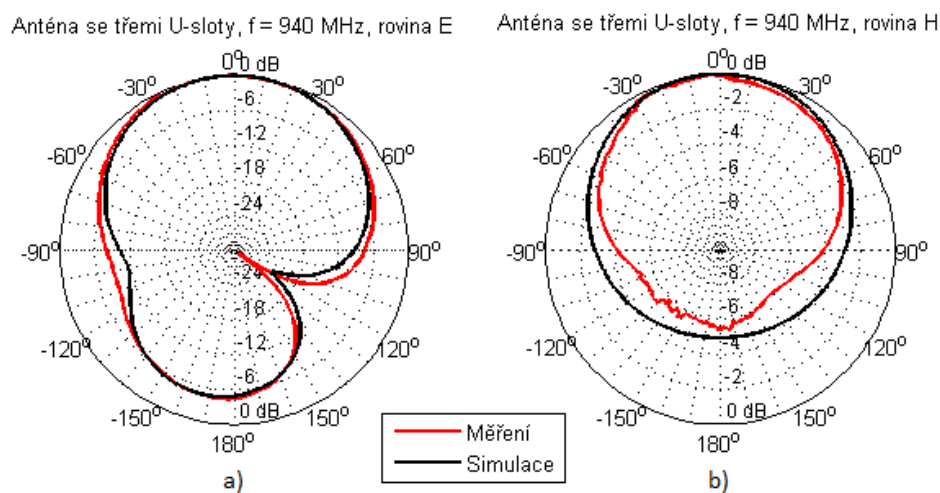
5.2.5 Čtyřpásmová anténa se třemi U-slots



Obr. 5.17: Činitel odrazu S_{11} čtyřpásmové antény se třemi U-slotsy.

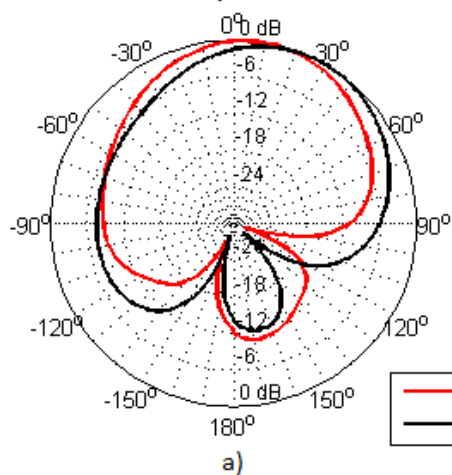
Tab. 5.6: Změřené rezonanční kmitočty, jejich odchylky a šířky pásma antény.

Pásmo	$f_{s\text{-sim}}$ [MHz]	$f_{s\text{-měř}}$ [MHz]	Δf_s [MHz]	f_1 [MHz]	f_2 [MHz]	$B_{\text{měř}}$ [MHz]	B_{sim} [MHz]
0,9 GHz	942	927	-15	908	945	37	41
1,8 GHz	1842	1805	-37	1788	1820	32	29
2,4 GHz	2442	2422	-20	2386	2460	74	74
5,2 GHz	5250	5215	-35	5135	5320	185	115

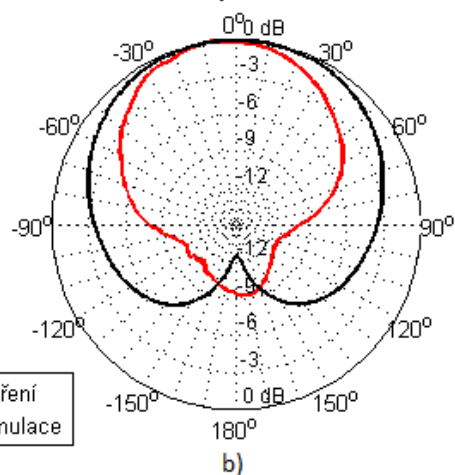


Obr. 5.18: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 940$ MHz
a) v rovině E, b) v rovině H.

Anténa se třemi U-sloty, $f = 1840$ MHz, rovina E

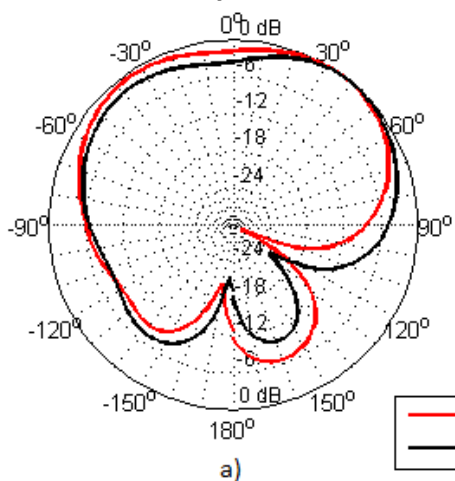


Anténa se třemi U-sloty, $f = 1840$ MHz, rovina H

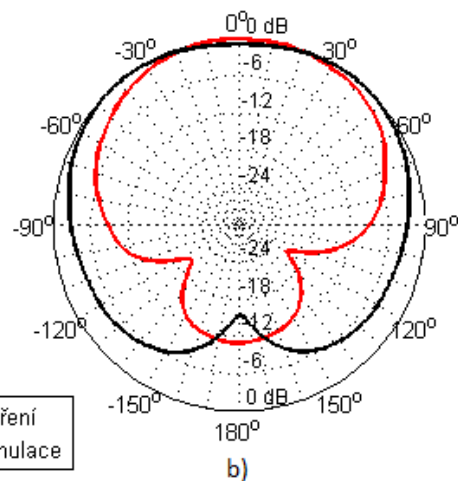


Obr. 5.19: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 1840$ MHz
a) v rovině E, b) v rovině H.

Anténa se třemi U-sloty, $f = 2440$ MHz, rovina E

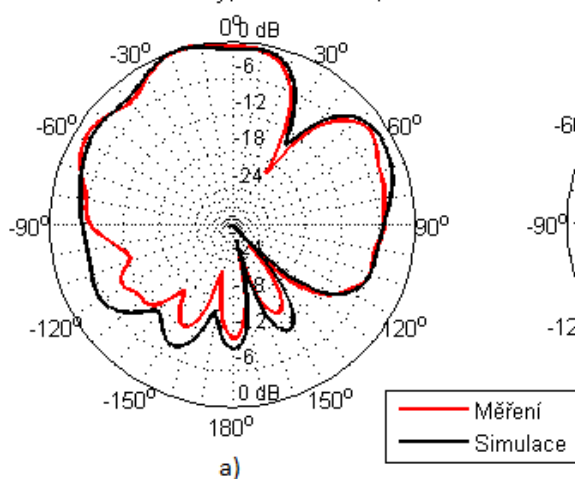


Anténa se třemi U-sloty, $f = 2440$ MHz, rovina H

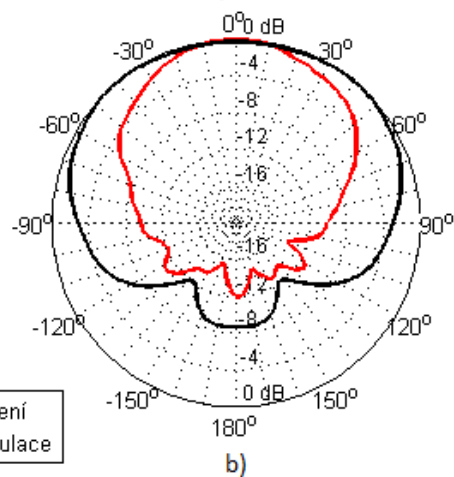


Obr. 5.20: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 2440$ MHz
a) v rovině E, b) v rovině H.

Anténa se třemi U-slotty, $f = 5250$ MHz, rovina E

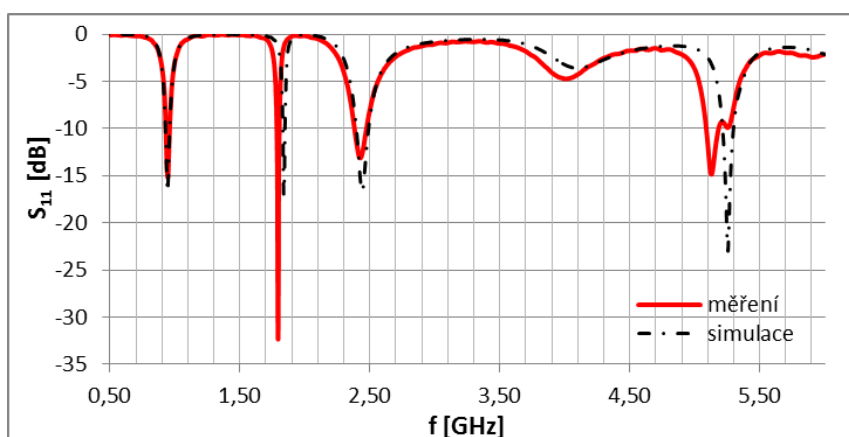


Anténa se třemi U-slotty, $f = 5250$ MHz, rovina H



Obr.5.21: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 5250$ MHz
a) v rovině E, b) v rovině H.

5.2.6 Anténa se třemi U-slotty a kapacitní zátěží



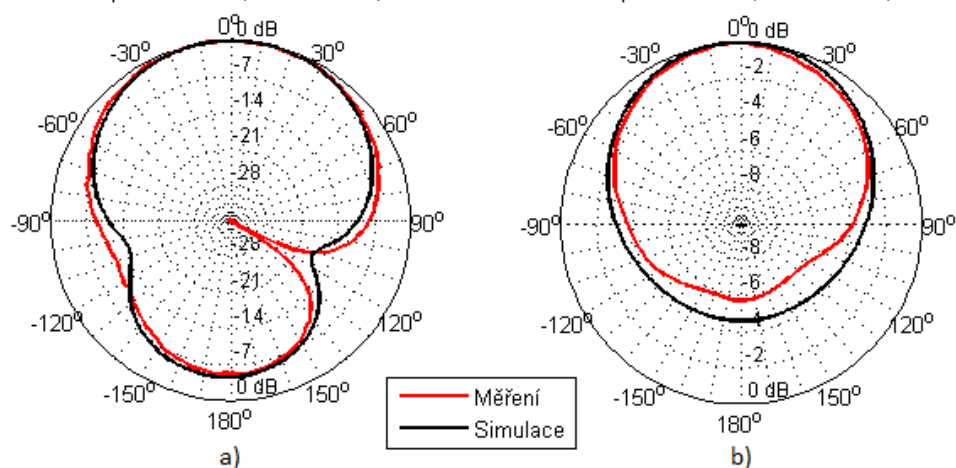
Obr. 5.22: Činitel odrazu S_{11} antény s kapacitní zátěží.

Tab. 5.7: Změřené rezonanční kmitočty, jejich odchylky a šířky pásma antény.

Pásmo	f_{s-sim} [MHz]	$f_{s-měř}$ [MHz]	Δf_s [MHz]	f_1 [MHz]	f_2 [MHz]	$B_{měř}$ [MHz]	B_{sim} [MHz]
0,9 GHz	942	948	6	932	958	26	33
1,8 GHz	1842	1798	-44	1788	1806	18	17
2,4 GHz	2442	2428	-14	2380	2472	92	96
5,2 GHz	5250	5175	-75	5090	5260	170	85

Anténa s kapacitní zátěží, $f = 940$ MHz, rovina E

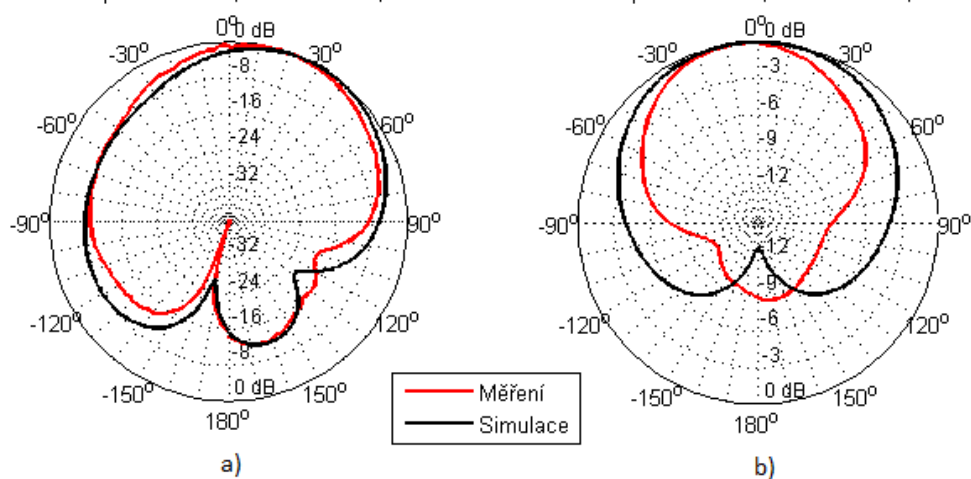
Anténa s kapacitní zátěží, $f = 940$ MHz, rovina H



Obr. 5.23: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 940$ MHz
a) v rovině E, **b)** v rovině H.

Anténa s kapacitní zátěží, $f = 1840$ MHz, rovina E

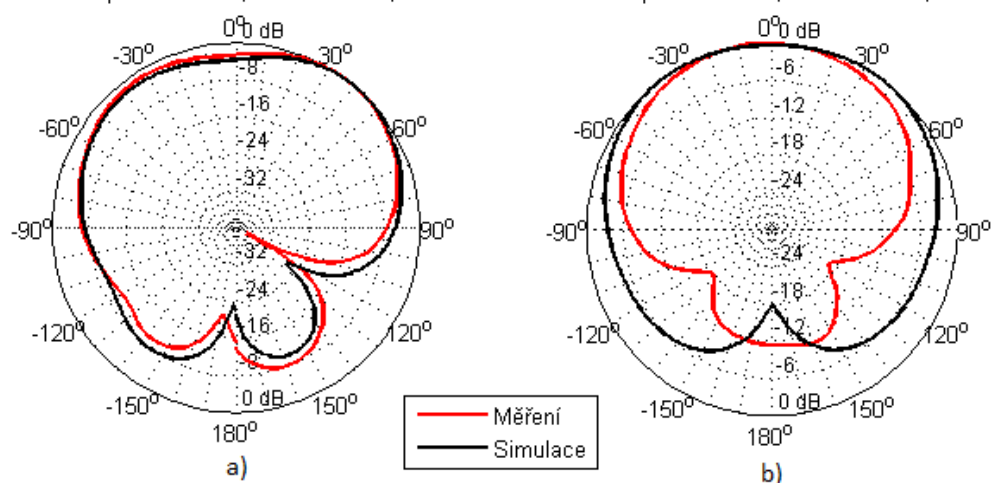
Anténa s kapacitní zátěží, $f = 1840$ MHz, rovina H



Obr. 5.24: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 1840$ MHz
a) v rovině E, **b)** v rovině H.

Anténa s kapacitní zátěží, $f = 2440$ MHz, rovina E

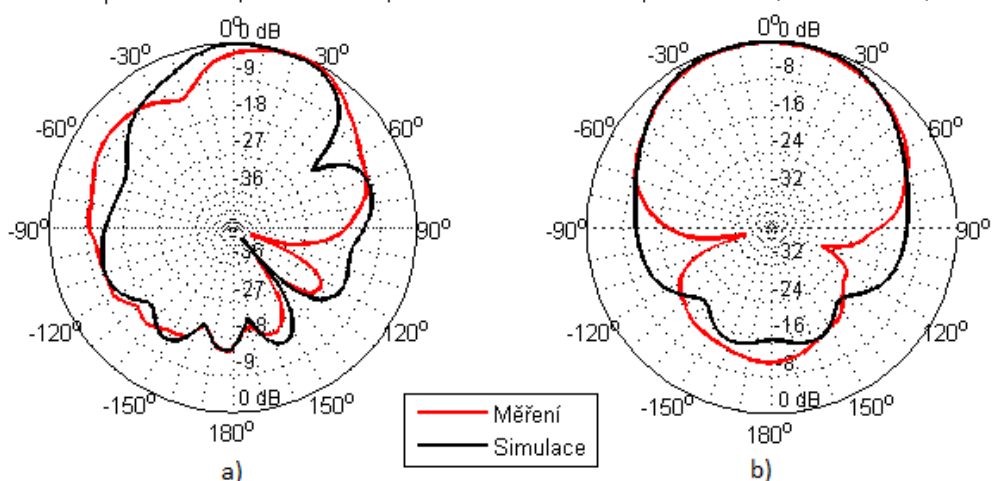
Anténa s kapacitní zátěží, $f = 2440$ MHz, rovina H



Obr. 5.25: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 2440$ MHz
a) v rovině E, b) v rovině H.

Anténa s kapacitní zátěží, $f = 5250$ MHz, rovina E

Anténa s kapacitní zátěží, $f = 5250$ MHz, rovina H



Obr. 5.26: Normované směrové charakteristiky antény pro kmitočet $f = 5250$ MHz
a) v rovině E, b) v rovině H.

6 ZÁVĚR

V práci bylo navrženo několik různých antén typu PIFA. Důraz byl kladen na ověření několika zvolených miniaturizačních technik. Dále byly ověřeny některé techniky vytváření vícepásmových antén.

Vliv jednotlivých miniaturizačních technik na velikost a vlastnosti antén je popsán v 2. kapitole. Nejprve je navržena a simulována základní anténa typu PIFA se zkratovací stěnou. Zářič této antény je posléze meandrován pomocí výřezů a nakonec je přidána kapacitní zátěž. V prvním kroku došlo ke zmenšení plochy zářiče o 49%, ve druhém pak o dalších 31%. Výrazně se však zmenšila šířka pásma, která byla menší, než by vyžadovala případná aplikace antény.

Dále byla navržena a simulována třípásmová anténa typu PIFA se zářičem meandrováním dvěma bočními výřezy vhodné délky. Patrně nejzajímavější je vícepásmová anténa využívající U-sloty. U tohoto typu antény způsobí přidávání výřezů zářiče ve tvaru písmene U vyvolání nových rezonančních kmitočtů. Při návrhu antény je možné téměř nezávisle ovládat jednotlivé rezonanční kmitočty pomocí rozměrů příslušných výřezů. Čtyřpásmová varianta byla navíc miniaturizována přidáním kapacitní zátěže, čímž byla plocha zářiče zmenšena více než o jednu třetinu.

Celkem 6 variant výše zmíněných dvou typů antén bylo optimalizováno pro výrobu a zkonstruováno. Následně bylo provedeno měření činitele odrazu na vstupu antény a měření směrových charakteristik. Výsledky měření většinou kopírují simulované průběhy.

Nejlépe je pro zadaná pásma přizpůsobená třípásmová anténa s bočními výřezy. Tato anténa také dosahuje ze všech vyrobených antén největších šířek pásma. Naopak problémem antén s U-sloty stále zůstává relativně malá šířka pásma (především v pásmu vybuzeném prvním U-slotem, tedy 1,8 GHz). Řešením by mohlo být použití substrátů s nízkou relativní permitivitou [1].

Ze simulovaných i naměřených směrových charakteristik vyplývá, že antény většinou vyzařují dobře především ve směru před zářič. To je vzhledem k možnému využití těchto typů antén v mobilních komunikačních zařízeních výhodné (útlum směrem k lidskému tělu).

Přínos práce vidím především v názorné ukázce některých technik miniaturizace planárních antén a prozkoumání vlivu některých parametrů těchto technik na vlastnosti antén. Dále je předvedeno několik metod vytváření vícepásmových antén. Konstrukce vybraných typů antén a srovnání výsledků měření s počítačovými simulacemi navíc dokazuje funkčnost všech prezentovaných postupů.

LITERATURA

- [1] WONG, K. L. *Compact and Broadband Microstrip Antennas*. New York: J. Wiley & Sons, 2002.
- [2] RAIDA, Z. a kol. Multimediální učebnice [online]. Brno: FEKT VUT, 2010 – [cit. 3. prosince 2012]. Dostupné na www: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia>.
- [3] POKORNÝ, M., HORÁK, J., RAIDA, Z. *Planar Tri-Band Antenna Design*. Radioengineering. Praha: Fakulta elektrotechnická ČVUT - Středisko vědeckotechnických informací, 2008, roč. 17, č. 1, s. 28-36. ISSN 1210-2512. Dostupné na www: http://www.radioeng.cz/fulltexts/2008/08_01_28_36.pdf.
- [4] KOLLÁR, M. *Návrh antény PIFA pro GSM pásma*. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2011.
- [5] SNÁŠEL, J. GSM 1800: jak je to s druhým pásmem. *MobilMania.cz* [online]. 26.8.2004 [cit. 4. prosince 2012]. Dostupné na www: <http://www.mobilmania.cz/clanky/gsm-1800-jak-je-to-s-druhym-pasmem/sc-3-a-1107979/>.
- [6] *Všeobecné oprávnění č. VO-R/12/09.2010-12*. ČTÚ [online]. Praha: 2010. Dostupné na www: http://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok_2010/vo-r_12-09_2010-12.pdf.
- [7] DOU, W. P., CHIA, Y. W.M. Novel meandered planar inverted-F antenna for triple-frequency operation. In *Microwave and Optical Technology Letters*. John Wiley & Sons, 2000, roč. 27, č. 1, s. 58-60. ISSN 1098-2760.
- [8] NASHAAT, D. M., ELSADEK, H. A., GHALI, H. Single Feed Compact Quad-Band PIFA Antenna for Wireless Communication Applications. In *Antennas and Propagation, IEEE Transactions*. IEEE Antennas and Propagation Society, 2005, roč. 53, č. 8, s. 2631-2635. ISSN 0018-926X.
- [9] *PIFA - The Planar Inverted-F Antenna* [online]. [cit. 1. prosince 2012]. Dostupné na www: <http://www.antenna-theory.com/antennas/patches/pifa.php>.
- [10] HANUS, S. *Rádiové a mobilní komunikace*. Skripta FEKT VUT v Brně. Brno 2009.
- [11] *Frekvenční přiděl na pásmech GSM, DCS a UMTS v ČR* [online]. [cit. 2. prosince 2012]. Dostupné na www: <http://www.gsmweb.cz/clanky/freq2.htm>.
- [12] *Bluetooth and WLAN* [online] [cit. 2. prosince 2012]. Dostupné na www: <http://www.conserver.com/consoles/BlueConsole/BLTandWLAN.html>.
- [13] CHIU, Ch. Y., CHAN, Ch. H. A miniaturized PIFA utilizing via-patch loading. In *Microwave Conference Proceedings*. Asia-Pacific Conference Proceedings, 2005, roč. 1.
- [14] WONG, K. L., YANG, K. P. Modified planar inverted F antenna. In *Electronics Letters*. 1998, roč. 34, č. 1.
- [15] Pasternack Enterprises, Inc. *SMA-PE44200* [katalogový list] [online] [cit. 25. ledna 2013] Dostupné na www: <http://www.pasternack.com/images/ProductPDF/PE44200.pdf>.
- [16] RF Cafe. *Coaxial Cable Equations Formulas*. [online] [cit. 25. ledna 2013] Dostupné na www: <http://www.rfcafe.com/references/electrical/coax.htm>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

f	Kmitočet
Z	Impedance
Hz	Hertz
B, pL	Délka zářiče
A, pW	Šířka zářiče
ϵ_r	Relativní permitivita
c	Rychlost světla ve vakuu
A_{zkrat}	Délka zkratovací stěny
h	Výška zářiče nad zemní plochou
λ	Vlnová délka
W_c	Šířka kapacitní plošky
L_c	Délka kapacitní plošky
t	Výška kapacitní plošky nad zemní plochou
T_p	Tloušťka pokovení substrátu
W_i	Délka i-tého U-slotu
L_i	Šířka i-tého U-slotu
U	Vzdálenosti U-slotů od zkratovací stěny
UW	Tloušťka U-slotů a výřezů zářiče
$feedL$	Vzdálenost napájení od zkratovací stěny
s_iL	Délka i-tého výřezu
s_iD	Vzdálenost i-tého výřezu od napájení antény
g_iV	Vzdálenost i-tého zkratu od levého horního rohu zářiče
$zkratMt$	Šířka zkratovacího plíšku
t_{Arlon}	Tloušťka substrátu zářiče antény
l_{ohyb}	Délka ohybu zemní plochy, zkratovacích a kapacitních plíšků

SEZNAM PŘÍLOH

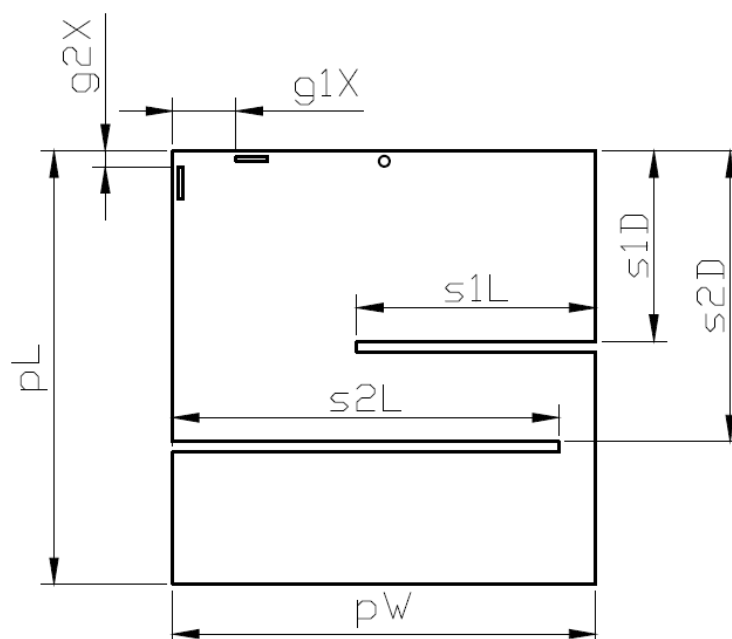
Příloha A: Tabulky s rozměry antén, nákresy zářičů.

Příloha B: Fotografie vyrobených antén.

PŘÍLOHA A

A.1 Třípásmová anténa se zářičem meandrovaným bočními výřezy

Rozměr	Zkratka / kóta	Velikost [mm]
Délka zemní plochy	L	114
Šířka zemní plochy	W	52
Délka zářiče	pL	41,25
Šířka zářiče	pW	40
Výška	h	9
Vzdálenost napájení od zkratu	$feedL$	1
Vzdálenost prvního výřezu od zkratu	S_1D	17
Délka prvního výřezu	S_1L	22,3
Vzdálenost druhého výřezu od zkratu	S_2D	28
Délka druhého výřezu	S_2L	36,35
Tloušťka výřezů	UW	1
Vzdálenost 1. zkratu od hrany zářiče	g_1X	8
Vzdálenost 2. zkratu od hrany zářiče	g_2X	1,5
Délka zkratovacích plíšků	gL	3
Tloušťka zkratovacích plíšků	gW	0,3



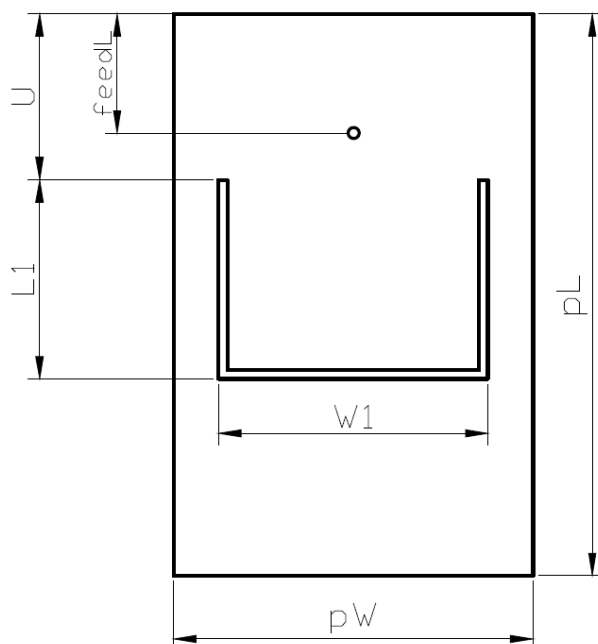
Obr. 1: Náskres zářiče třípásmové antény s bočními výřezy.

A.2 Základní jednopásmová PIFA anténa

Rozměr	Zkratka	Velikost [mm]
Délka zemní plochy	L	90
Šířka zemní plochy	W	50
Délka zářiče	pL	69,2
Šířka zářiče	pW	40
Výška	h	8
Vzdálenost napájení od zkratu	$feedL$	9,3

A.3 Dvoupásmová anténa s jedním U-slotem

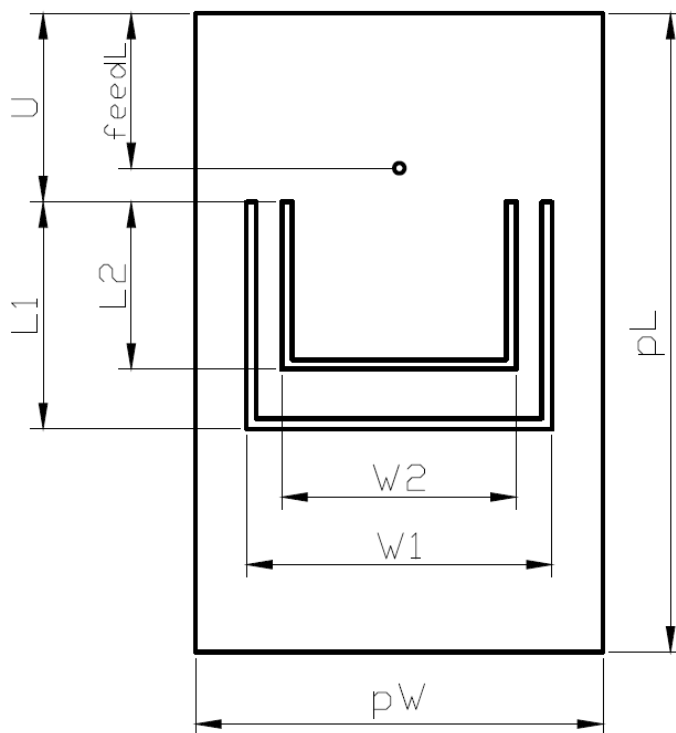
Rozměr	Zkratka / kóta	Velikost [mm]
Délka zemní plochy	L	110
Šířka zemní plochy	W	70
Délka zářiče	pL	62,6
Šířka zářiče	pW	40
Výška	h	8
Vzdálenost napájení od zkratu	$feedL$	13,1
Vzdálenost U-slotů od zkratu	U	18,5
Délka 1. U-slotu	L_1	22,2
Šířka 1. U-slotu	W_1	30
Tloušťka U-slotů	UW	1



Obr. 2: Náčrtek zářiče dvoupásmové antény s jedním U-slotem.

A.4 Třípásmová anténa se dvěma U-slotty

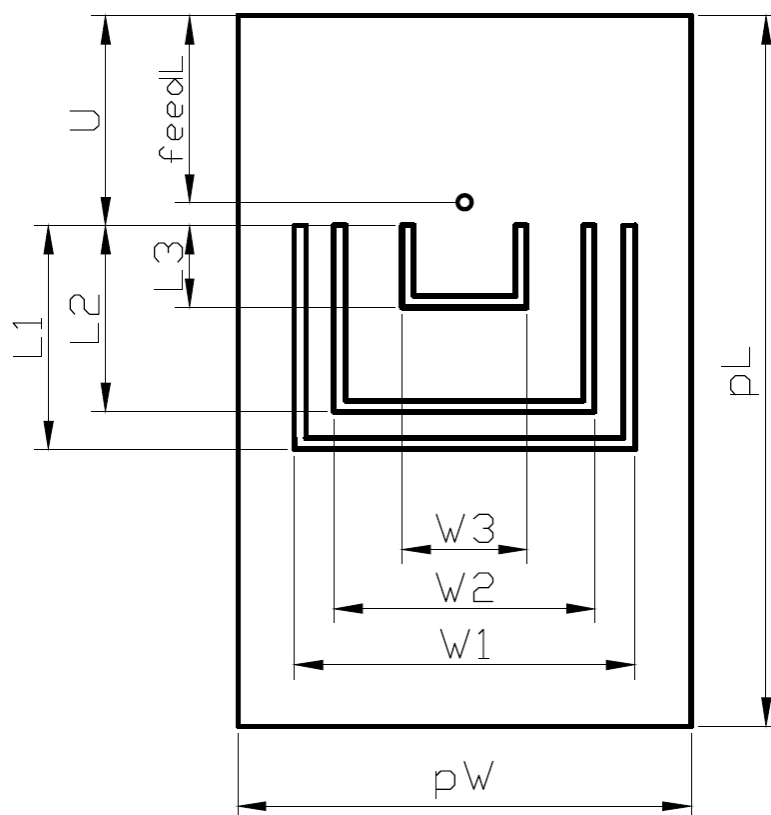
Rozměr	Zkratka / kóta	Velikost [mm]
Délka zemní plochy	L	110
Šířka zemní plochy	W	70
Délka zářiče	pL	61
Šířka zářiče	pW	40
Výška	h	8
Vzdálenost napájení od zkratu	$feedL$	15,2
Vzdálenost U-slotů od zkratu	U	18,5
Délka 1. U-slotu	L_1	19,58
Šířka 1. U-slotu	W_1	32
Délka 2. U-slotu	L_2	16,4
Šířka 2. U-slotu	W_2	23
Tloušťka U-slotů	UW	1



Obr. 3: Náčrtek zářiče třípásmové antény se dvěma U-slotty.

A.5 Čtyřpásmová anténa se třemi U-sloty

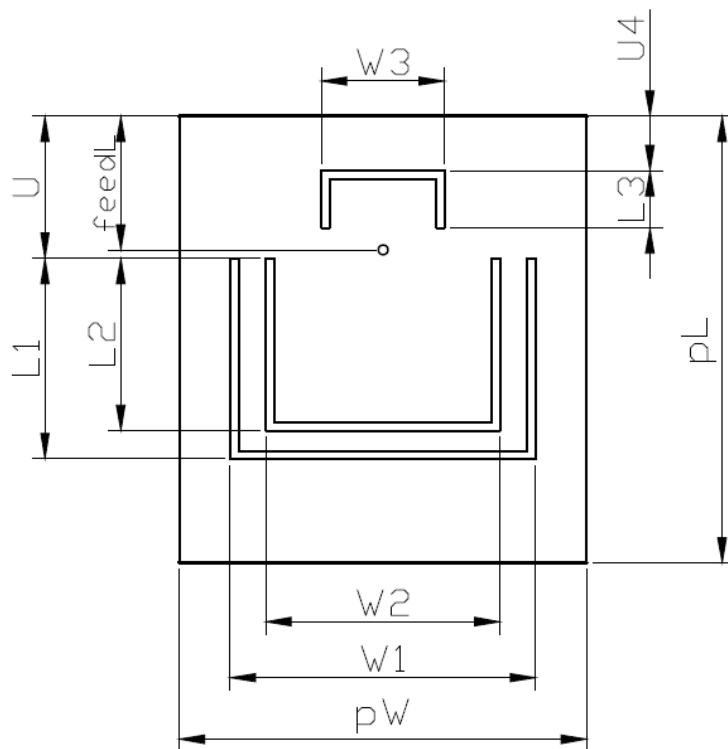
Rozměr	Zkratka / kóta	Velikost [mm]
Délka zemní plochy	L	115
Šířka zemní plochy	W	70
Délka zářiče	pL	61,3
Šířka zářiče	pW	40
Výška	h	8
Vzdálenost napájení od zkratu	$feedL$	16,5
Vzdálenost U-slotů od zkratu	U	18,5
Délka 1. U-slotu	L_1	16,59
Šířka 1. U-slotu	W_1	32
Délka 2. U-slotu	L_2	16,12
Šířka 2. U-slotu	W_2	23
Délka 3. U-slotu	L_3	7,21
Šířka 3. U-slotu	W_3	11
Tloušťka U-slotů	UW	1



Obr. 4: Nákras zářiče čtyřpásmové antény se třemi U-slotty.

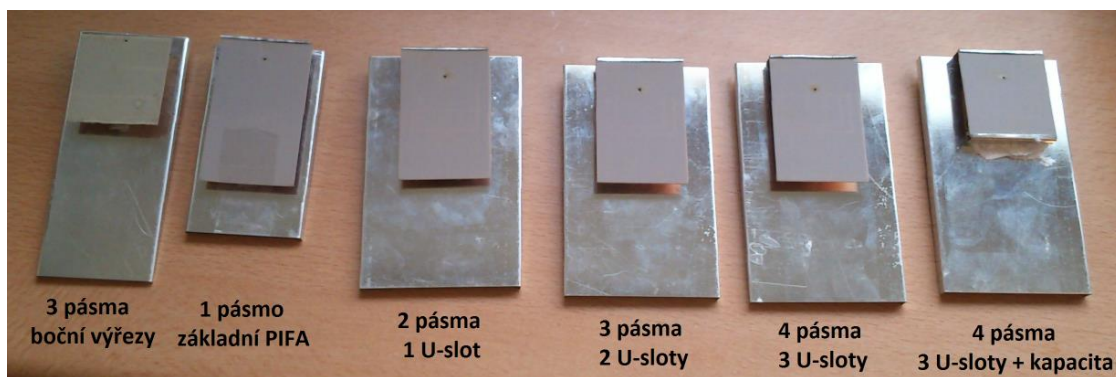
A.6 Čtyřpásmová anténa se třemi U-sloty a kapacitní zátěží

Rozměr	Zkratka / kóta	Velikost [mm]
Délka zemní plochy	L	115
Šířka zemní plochy	W	70
Délka zářiče	pL	44
Šířka zářiče	pW	40
Výška	h	8
Vzdálenost napájení od zkratu	$feedL$	13,2
Vzdálenost U-slotů od zkratu	U	14
Délka 1. U-slotu	L_1	19,75
Šířka 1. U-slotu	W_1	30
Délka 2. U-slotu	L_2	16,95
Šířka 2. U-slotu	W_2	23
Délka 3. U-slotu	L_3	5,64
Šířka 3. U-slotu	W_3	12,1
Vzdálenost třetího U-slotu od zkratu	U_4	5,36
Tloušťka U-slotů	UW	0,8
Délka kapacitního plíšku	L_c	40
Šířka kapacitního plíšku	W_c	4
Výška kapacitního plíšku nad zemní plochou	t	2



Obr. 5: Náčrtek zářiče čtyřpásmové antény s kapacitní zátěží.

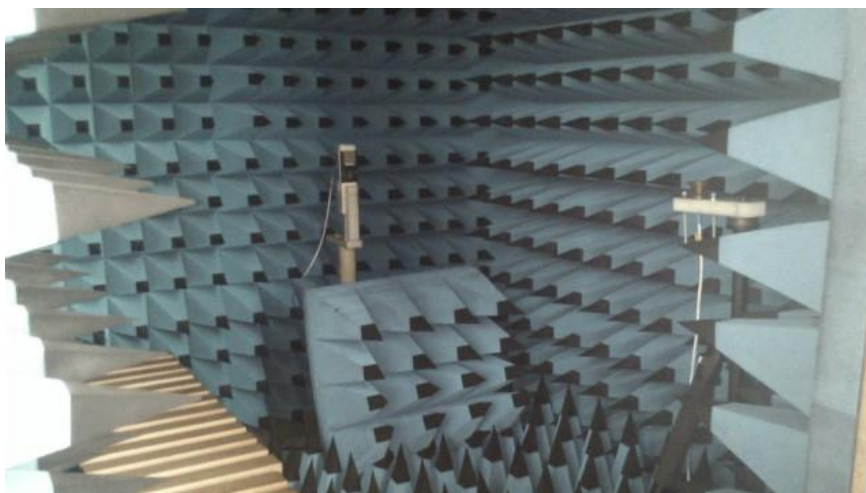
PŘÍLOHA C



Obr. 1: Fotografie vyrobených antén.



Obr. 2: Detailní fotografie čtyřpásmové antény se třemi U-slotsy.



Obr. 3: Měření směrových charakteristik antény v bezodrazové komoře.