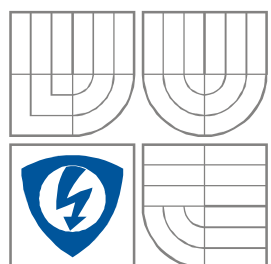


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V
BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DVOUPÁSMOVÁ ANTÉNA S KRUHOVOU POLARIZACÍ PRO PÁSMO 145 A 435 MHz

DUALBAND CIRCULARLY POLARIZED ANTENNA FOR VHF AND UHF
BAND

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

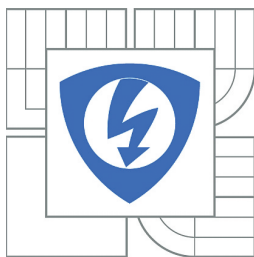
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Tomáš Urbánek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
BRNO, 2012

Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Tomáš Urbánek

ID: 125682

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Dvoupásmová anténa s kruhovou polarizací pro pásmo 145 a 435 MHz

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte literaturu týkající se kruhově polarizovaných drátových antén pro radioamatérské kmitočty 145 a 435 MHz. Zaměřte se na křížový dipól s kruhovou polarizací. V programu 4NEC proveďte návrh antény pro jednotlivé kmitočty, poté anténu modifikujte pro dvoupásmový provoz.

Navrhnutou anténu ověřte simulací v dalším komerčním programu, konečný vzorek antény vyrobte, proměřte její vlastnosti a ověřte v reálném provozu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Internetová stránka programu 4NEC <http://home.ict.nl/~arivoors/>

[2] PROCHÁZKA, M. Antény - Encyklopedická příručka. Praha: BEN - technická literatura, 2000.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D.

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

Práce je zaměřena na dvoupásmovou kruhovou polarizovanou anténu, která je určena pro příjem na radioamatérských frekvencích 145 a 435 MHz. Nejdříve práce popisuje principy antén, poté se práce soustřeďuje na návrh a simulace. Anténa je simulovaná v programu 4nec2 a CST MICROWAVE STUDIO.

Klíčová slova

Křížový dipól, kruhová polarizace, půlvlnný dipól, družicová komunikace, AR, axiální poměr.

Abstrakt

The project is focused on the dualband circularly polarized antenna, which is designed for receiving amateur radio frequencies income 145 and 435 MHz. First the work describes the principles of the antennas, then it focuses on the design and simulation. The antenna is simulated in the program 4nec2 and CST MICROWAVE STUDIO.

Keywords

Cross dipole, polarized circle, half-wave dipole, satellite communications, AR, axial ratio.

URBÁNEK, T. *Dvoupásmová anténa s kruhovou polarizací pro pásmo 145 a 435 MHz*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zbyněk Lukeš, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Dvoupásmová anténa s kruhovou polarizací pro pásmo 145 a 435 MHz 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 tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 25. května 2012

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zbyňkovi Lukešovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování bakalářské práce.

V Brně dne 25. května 2012

.....
podpis autora

Obsah

ÚVOD.....	1
1 Základní vlastnosti antén	2
2 Antény.....	4
2.1 Půlvlnný dipól.....	4
2.2 Šroubovicová anténa.....	5
2.3 Křížový dipól	6
3 Návrh křížového dipólu	6
3.1 Návrh křížového dipólu pro kmitočet 145 MHz.....	6
3.2 Návrh křížového dipólu pro kmitočet 435 MHz.....	10
3.3 Spojení křížových antén.....	14
3.4 Návrh a konstrukce LC slučovače a přizpůsobení.....	15
3.5 Závislosti axiálního poměru na délce fázovacího vedení	19
3.6 Závislosti axiálního poměru a zisku na vzdálenosti antén.....	21
4 Ověření v programu CST MICROWAVE STUDIO	23
5 Konstrukce antény	25
6 Změřené parametry antény	27
6.1 Změřené parametry antény rezonující na 145 MHz	27
6.2 Změřené parametry antény rezonující na 435 MHz	29
6.3 Změřené parametry sloučené antény	31
7 Závěr	33
8 Literatura.....	34
9 Seznam použitých zkratk a symbolů.....	35
10 Seznam příloh	36

Seznam obrázků

Obr. 1. Vertikální a horizontální polarizace (převzato z [1]).....	2
Obr. 2. Kruhová polarizace (převzato z [6])	2
Obr. 3. Faradayova rotace závislá na frekvenci (převzato z [7]).....	3
Obr. 4. Rozložení proudů na půlvlnném dipólu	4
Obr. 5. Vyzářovací charakteristika	4
Obr. 6. Činitel zkrácení (převzato z [5]).....	5
Obr. 7. Šroubovicová anténa (převzato z [6])	5
Obr. 8. Křížový dipól (převzato z [8])	6
Obr. 9. Závislost PSV na frekvenci	7
Obr. 10. Závislost impedance a fáze na frekvenci	7
Obr. 11. Vyzářovací charakteristika a rozložení proudů na dipólu.....	7
Obr. 12. Přizpůsobovací vedení	8
Obr. 13. Závislost PSV frekvence.....	8
Obr. 14. Závislost impedance a fáze na frekvenci	9
Obr. 15. Vyzářovací charakteristika a rozložení proudů na dipólu.....	9
Obr. 16. Axiální poměr	10
Obr. 17. Závislost PSV na frekvenci	11
Obr. 18. Závislost impedance a fáze na frekvenci	11
Obr. 19. Vyzářovací charakteristika a rozložení proudů na dipólu.....	11
Obr. 20. Přizpůsobovací vedení	12
Obr. 21. Závislost PSV na frekvenci	12
Obr. 22. Závislost impedance a fáze na frekvenci	13
Obr. 23. Vyzářovací charakteristika a rozložení proudů na dipólu.....	13
Obr. 24. Axiální poměr	14
Obr. 25. LC slučovač	16
Obr. 26. Přenos slučovače	16
Obr. 27. Schéma zapojení	17
Obr. 28. Závislost PSV na frekvenci	17
Obr. 29. Vyzářovací charakteristika a axiální poměr.....	18
Obr. 30. Vyzářovací charakteristika a axiální poměr.....	18
Obr. 31. Vyzářovací charakteristika a axiální poměr.....	19
Obr. 32. Vyzářovací charakteristika a axiální poměr.....	19
Obr. 33. Vyzářovací charakteristika a axiální poměr.....	20
Obr. 34. Vyzářovací charakteristika a axiální poměr.....	21
Obr. 35. Vyzářovací charakteristika a axiální poměr.....	21
Obr. 36. Vyzářovací charakteristika a axiální poměr.....	22
Obr. 37. Vyzářovací charakteristika	23
Obr. 38. Axiální poměr	23
Obr. 39. Vyzářovací charakteristika	24
Obr. 40. Axiální poměr	24
Obr. 41. LC slučovač DSP	25
Obr. 42. Výsledné zapojení antény.....	25
Obr. 43. Půdorys krabičky s vyvrtanou dírou pro přívod koaxiálního kabelu	26
Obr. 44. Bokorys krabičky s vyvrtanou dírou pro přívod koaxiálního kabelu.....	26
Obr. 45. Vzdálenost krabiček od sebe	26
Obr. 46. Činitel odrazu na antény laděné na frekvenci 145 MHz	27
Obr. 47. PSV antény laděné na frekvenci 145 MHz.....	28
Obr. 48. Smithův diagram antény laděné na frekvenci 145 MHz	28

Obr. 49. Činitel odrazu na antény laděné na frekvenci 435 MHz	29
Obr. 50. PSV antény laděné na frekvenci 435 MHz.....	30
Obr. 51. Smithův diagram antény laděné na frekvenci 435 MHz	30
Obr. 52. PSV výsledné antény	31

ÚVOD

Práce popisuje návrh dvoupásmové kruhové polarizované antény.

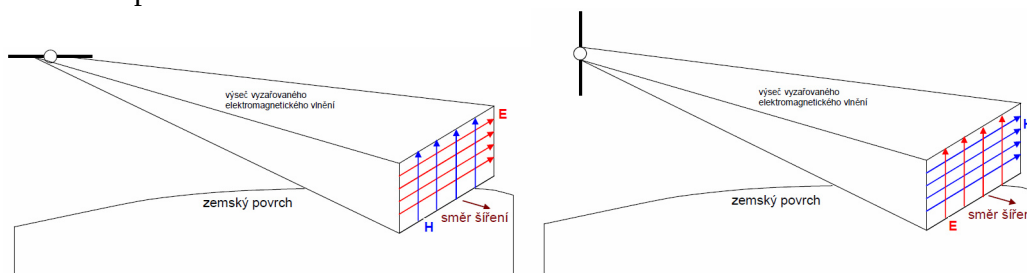
Práce se zaměřuje na anténu, která bude konstruována jako křížový dipól. Anténa bude vyladěna na kmitočtech 145 a 435 MHz. Frekvenční pásma 145 a 435 MHz jsou tzv. radioamatérská. Tato dvě pásma se využívají pro družicový amatérský příjem. Jedná se o pásma 144 - 146 MHz a 432 - 438 MHz. Kruhově polarizovaná anténa je schopna přijímat jak polarizaci vertikální, tak horizontální - díky tomu se hodí využívat ji v místech, ve kterých přesně nevíme, jakou polarizovanou vlnu budeme přijímat. Jedná se hlavně o provoz ve městech nebo družicový příjem, kde z důvodu Faradayovy rotace a dalších vlivů může signál změnit polarizaci. V první části se práce zaměří na základní parametry antén a uvede do problému, v další části bude anténa navržena. V poslední části bude navržená anténa zkonstruována a změřena. Práce je simulována v programech 4nec2 a CST MIROWAVE STUDIO.

1 Základní vlastnosti antén

Každá anténa je vlastně jakýmsi otevřeným rezonančním obvodem, jehož kapacita a indukčnost je tvořena vodičem. Vodič má délku L , délka L je větší než tloušťka d , $L \gg d$. Anténa v rezonanci musí mít délku L , která musí být celistvým násobkem $\lambda/2$ nebo obvodem RLC v rezonanci [3]. Rezonanční kmitočet lze spočítat pomocí Thomsonova vztahu

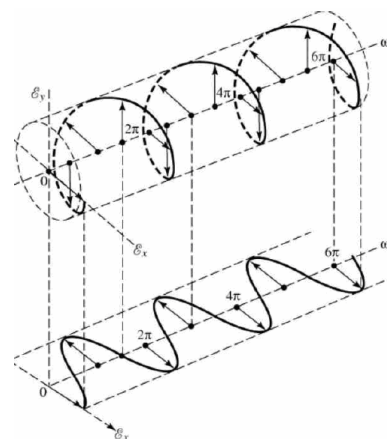
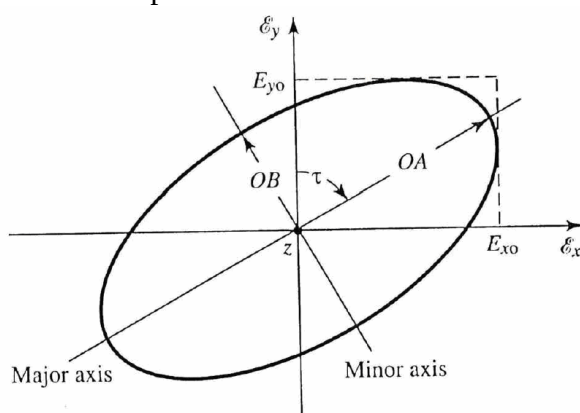
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (1.1)$$

Další důležitou vlastností je polarizace. „Polarizace vlny udává orientaci vektoru intenzity elektrického pole E vůči rovině dopadu. Rovina dopadu je rovina proložená směrem šíření a kolmá na rovinu rozhraní“ [9]. Elektromagnetickou vlnu tvoří elektrické a magnetické pole, složky jsou k sobě kolmé. Pokud jsou siločáry elektrického pole kolmé k zemskému povrchu, říkáme, že se jedná o vlnu vertikálně polarizovanou. Pokud jsou elektrické siločáry rovnoběžné se zemským povrchem, je vlna horizontálně polarizována. Vlevo na **Obr. 1.** je znázorněna horizontální polarizace, napravo vertikální polarizace.



Obr. 1. Vertikální a horizontální polarizace (převzato z [1])
(vlevo horizontální polarizace, vpravo vertikální polarizace)

Práce navrhuje kruhově polarizovanou anténu, proto se zaměříme na kruhovou polarizaci. Pokud se přijímá kruhově polarizovanou anténou lineárně polarizovaná vlna, je jedno, jakou polarizaci přijímaná vlna má, vlna může mít jak vertikální, tak horizontální polarizaci.



Obr. 2. Kruhová polarizace (převzato z [6])

Pro zjištění, zda je anténa naladěna na kruhovou nebo jinou polarizaci, se zavádí poměr AR neboli axial ratio, česky axiální poměr. Axiální poměr je poměr ortogonálních elektrických polí. E_{x0} je elektrické pole v rovině x a E_{y0} je elektrické pole v rovině y. Kruhová polarizace má AR 1 nebo 0 dB. Kruhová polarizace se skládá ze dvou elektrických polí, mezi kterými je úhel 90° . Výsledek rovnice 1.2 nám udává axiální poměr

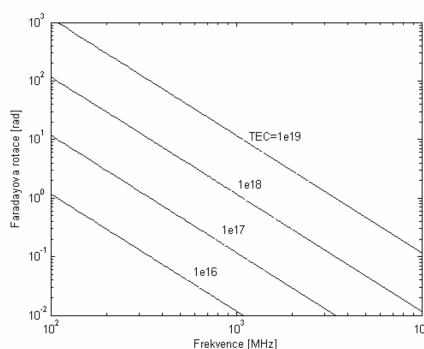
$$AR = \frac{E_{x0}}{E_{y0}}, \quad (1.2)$$

$$AR = 0, \quad \text{lineární polarizace, může být vertikální i horizontální polarizací} \quad (1.3)$$

$$AR = 1, \quad \text{kruhová polarizace, může být pravotočivá i levotočivá} \quad (1.4)$$

$$AR = (0,1). \quad \text{eliptická polarizace} \quad (1.5)$$

Kruhová polarizace se používá v případech, kdy se neví, jakou polarizaci bude mít přijímaná vlna. Tento případ se stává nejen ve městech, ale i při družicovém příjmu. Práce se zaměřuje na družicový příjem. Hlavním důvodem používání kruhové polarizace v satelitní komunikaci je nepředvídatelná polarizace. Na kmitočtech menších než 1 GHz je lineární polarizace schopna stočit se o několik násobků 2π . **Obr. 3.** udává závislost Faradayovy rotace na frekvenci a počtu elektronů.

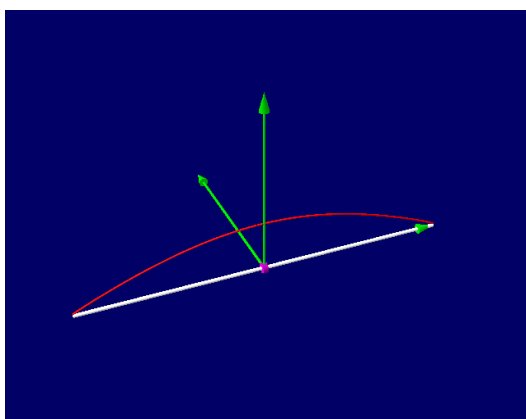


Obr. 3. Faradayova rotace závislá na frekvenci (převzato z [7])
TEC je počet elektronů v 1 m^2 v ionosféře

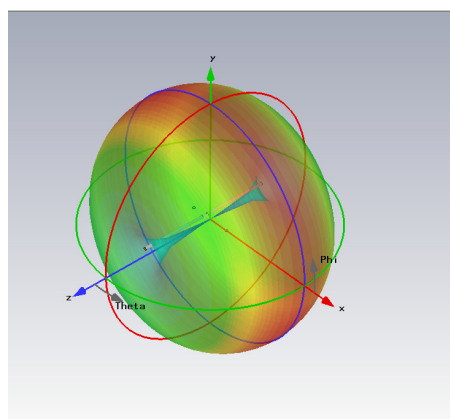
2 Antény

2.1 Půlvlnný dipól

Práce se zaměřuje na půlvlnný dipól. Půlvlnný dipól patří k nejjednodušším anténám. Jedná se o dva dráty stejné délky $\lambda/4$. Celá anténa má délku $\lambda/2$. V případě, že je půlvlnný dipól polarizovaný horizontálně, jeho vyzařovací charakteristika je znázorněna na **Obr. 5**. V případě vertikální polarizace by byla vyzařovací charakteristika téměř identická, s jediným rozdílem - půlvlnný dipól by nebyl rovnoběžný s osami z, x, ale s osou y. Na **Obr. 4** je vidět rozložení proudů.



Obr. 4. Rozložení proudů na půlvlnném dipólu
[4nec2]

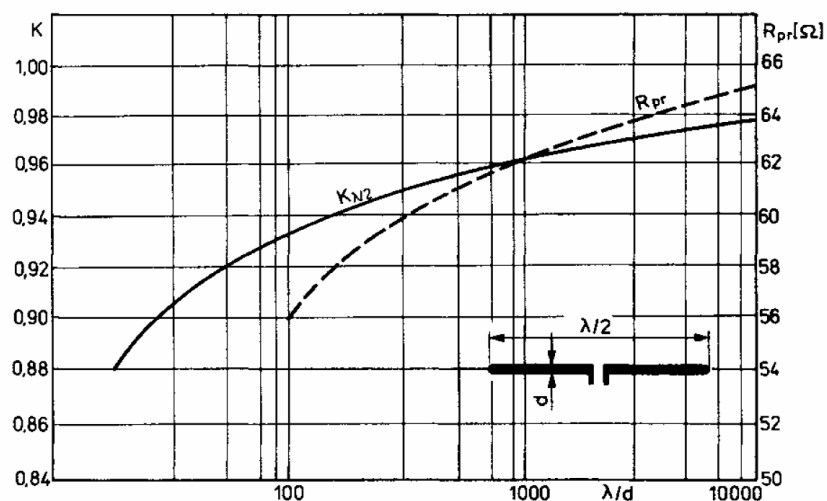


Obr. 5. Vyzařovací charakteristika
[CST MICROWAVE STUDIO]

K přesné délce půlvlnného dipólu je nutné znát hodnotu činitele zkrácení. Činitel zkrácení vyjadřuje hodnotu „kolikrát se zmenší vlnová délka v materiálu“ – viz **Obr. 6**., který ukazuje závislost činitele zkrácení na geometrickém útvaru dipólu

$$k = \frac{\lambda_E}{\lambda_0} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_R}} = \frac{Z_E}{Z_0} = \frac{l_f}{l_e} . \quad (2.1.1)$$

k	činitel zkrácení
λ_0	vlnová délka ve volném prostředí
λ_E	vlnová délka materiálu
ϵ_r	relativní permitivita dielektrika
Z_E	charakteristická impedance vedení s dielektrikem o reaktivní permitivitě ϵ_r
Z_0	charakteristická impedance vedení bez dielektrika
l_f	skutečná fyzikální délka vedení
l_e	elektrická délka vedení



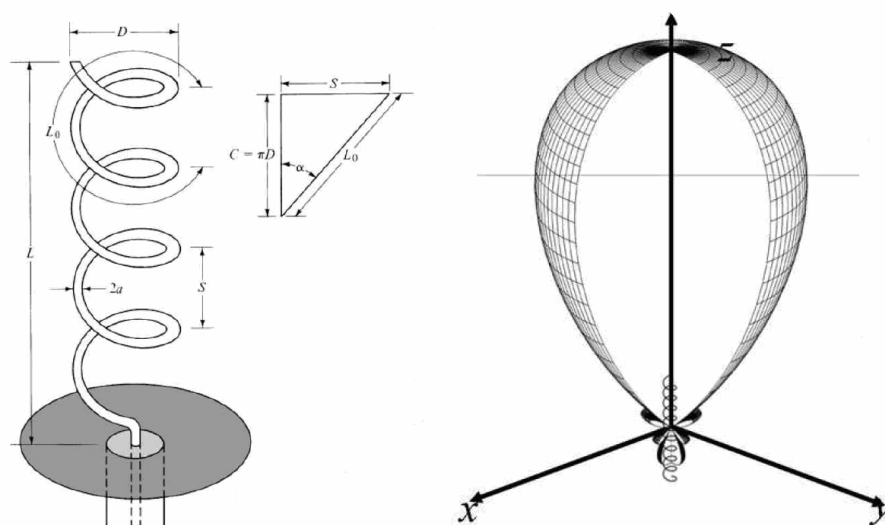
Obr. 6. Činitel zkrácení (převzato z [5])

Délku dipólu lze vypočítat ze vztahu 2.1.2. Jedná o délku celého dipólu, ne jen jednoho ramene

$$l = \frac{c \cdot k}{2f} \quad (2.1.2)$$

2.2 Šroubovicová anténa

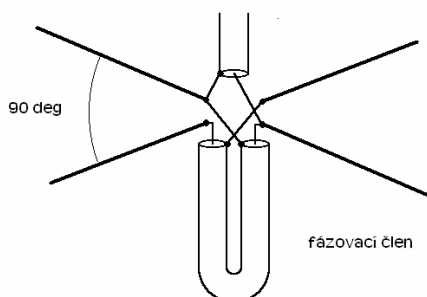
Šroubovicová anténa se v anglicky psané literatuře nazývá Helical anténa. Šroubovicová anténa se používá pro příjem a vysílání kruhové polarizace. Na Obr. 7. je znázorněna její konstrukce a vyzářovací charakteristika.



Obr. 7. Šroubovicová anténa (převzato z [6])

2.3 Křížový dipól

Křížový dipól je anténa, která se skládá ze dvou dipólů svírajících uhel 90°, mezi kterými je fázový posuv 90°. Fázový posuv nám umožňuje přijímat kruhovou polarizaci. Kruhová polarizace se nachází v kříži půlvlnných dipólů, na jedné straně je pravotočivá, na druhé straně levotočivá. Výhodou křížového dipólu je zvětšení frekvenčního pásma. Vyzařovací charakteristika je relativně všesměrová. Fázový posuv 90° je realizován jako vedení o délce čtvrtiny vlnové délky, která je snížena o činitel zkrácení. Na tento druh antény se zaměřuje zbytek práce. Anténa je zobrazena na obrázku **Obr. 8**.



Obr. 8. Křížový dipól (převzato z [8])

3 Návrh křížového dipólu

Jelikož má být anténa dvoupásmová, je návrh rozdělen na čtyři části. První část se zabývá návrhem křížového dipólu, který bude vyladěn na frekvenci 145 MHz. Druhá část se zabývá křížovým dipólem, který bude laděn na frekvenci 435 MHz, v třetí části práce se oba tyto křížové dipóly sloučí v jednu anténu laděnou na frekvencích 145 a 435 MHz. Poslední - čtvrtá část je zaměřena na návrh LC slučovače. Antenní systém bude navržen v programu 4nec2 a PSpice.

3.1 Návrh křížového dipólu pro kmitočet 145 MHz

Anténa bude navržena následovně. Nejdříve bude navržen půlvlnný dipól, který bude vyladěn na frekvenci 145 MHz. Pro zjednodušení se uvažuje rychlost světla $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

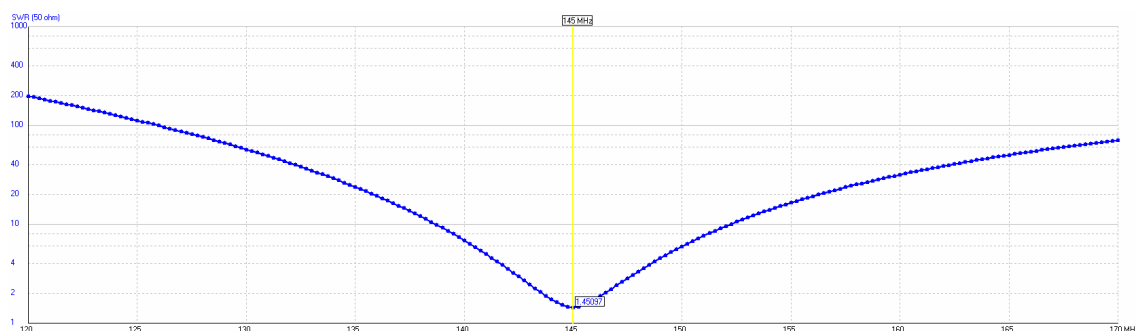
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{145 \cdot 10^6} = 2,069 \text{ m} . \quad (3.1.1)$$

λ je pouze délka vlny. Jelikož se navrhuje půlvlnný dipól, musí se spočítat i délka dipólu. Při návrhu se musí uvažovat délka ramene

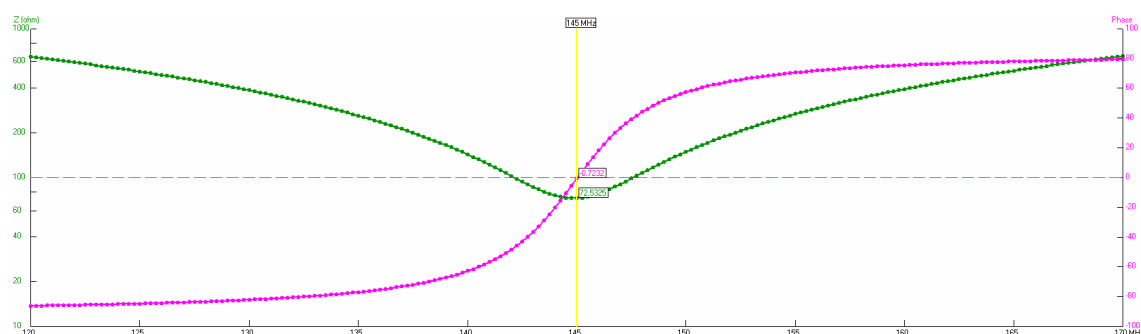
$$l_{dipole} = \frac{\lambda}{2} k = \frac{2,069}{2} 0,95 = 0,983 \text{ m}, \quad (3.1.2)$$

$$l_{ramene} = \frac{l_{dipole}}{2} = \frac{0,962}{2} = 0,491 \text{ m}. \quad (3.1.3)$$

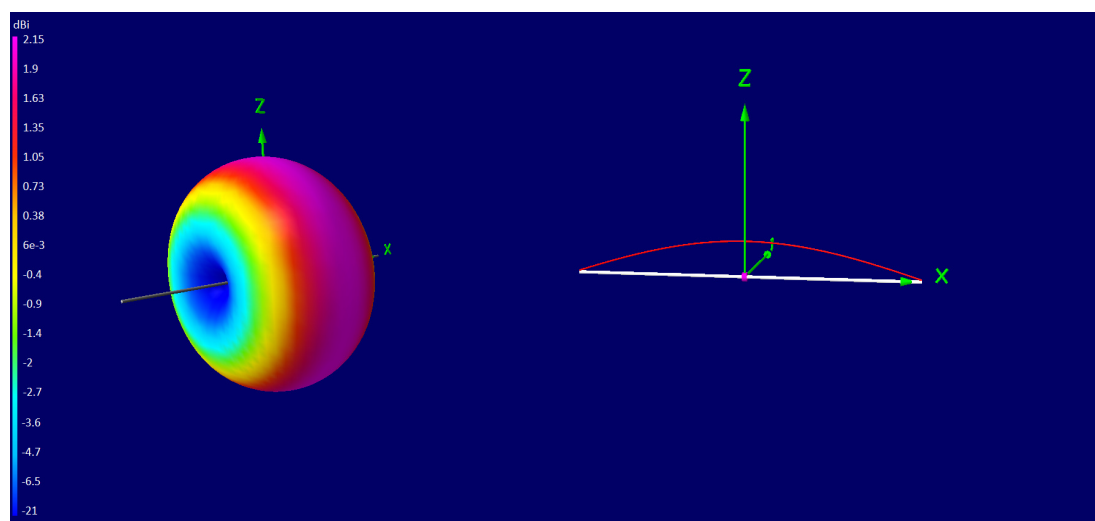
l_{dipole} je délka ideálního půlvlnného dipólu. Anténa byla optimalizována a výsledná délka ramene dipólu je 0,473 m. Na **Obr. 9.** je vidět závislost PSV na frekvenci. Na frekvenci 145 MHz mělo PSV hodnotu 1,45097. Hodnota PSV je vyšší z důvodu nepřízpůsobení antény na impedanci 50 Ω . Půlvlnný dipól měl impedanci 72,5325 Ω .



Obr. 9. Závislost PSV na frekvenci
[4nec2]



Obr. 10. Závislost impedance a fáze na frekvenci
[4nec2]



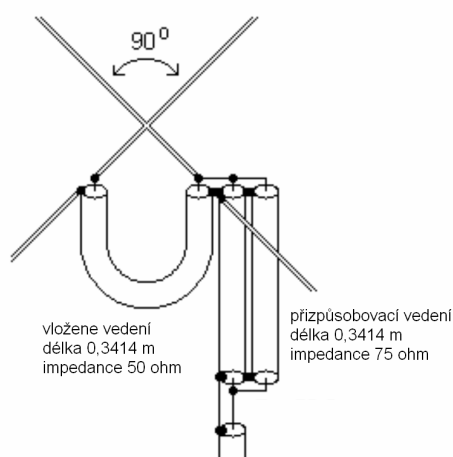
Obr. 11. Vyzařovací charakteristika a rozložení proudů na dipólu
[4nec2]

Poté práce pokračuje v návrhu křížového dipólu. Jelikož se křížový dipól skládá ze dvou půlvlnných dipólů, které jsou vzájemně posunuty fázově o 90° , musí se mezi dipóly vložit vedení o délce $\lambda/4$

$$l_{\text{vlozene}} = \frac{\lambda}{4} k = \frac{2,069}{4} \cdot 0,66 = 0,3414 \text{ m} . \quad (3.1.4)$$

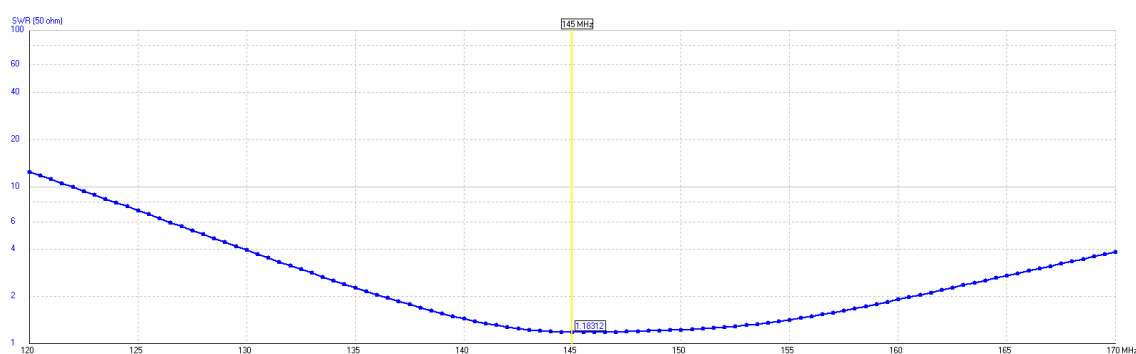
Vedení je zkráceno o činitel zkrácení, který činí 0,66. Dále se musí anténa přizpůsobit impedanci 50Ω . Přizpůsobení popisuje **Obr. 12**. Jedná se o úzkopásmové přizpůsobení. Přizpůsobovací vedení má impedanci 75Ω a délku $2 \cdot \lambda/4$

$$l_{\text{prizpusobeni}} = \frac{\lambda}{4} k = \frac{2,069}{4} \cdot 0,66 = 0,3414 \text{ m} . \quad (3.1.5)$$

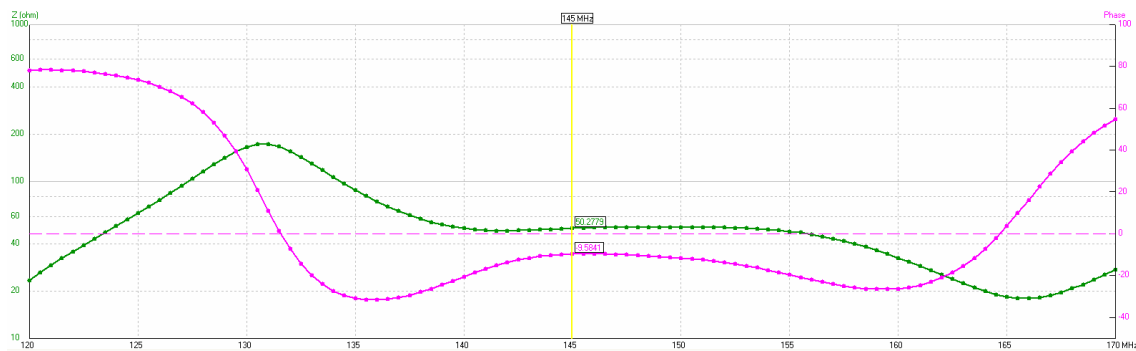


Obr. 12. Přizpůsobovací vedení

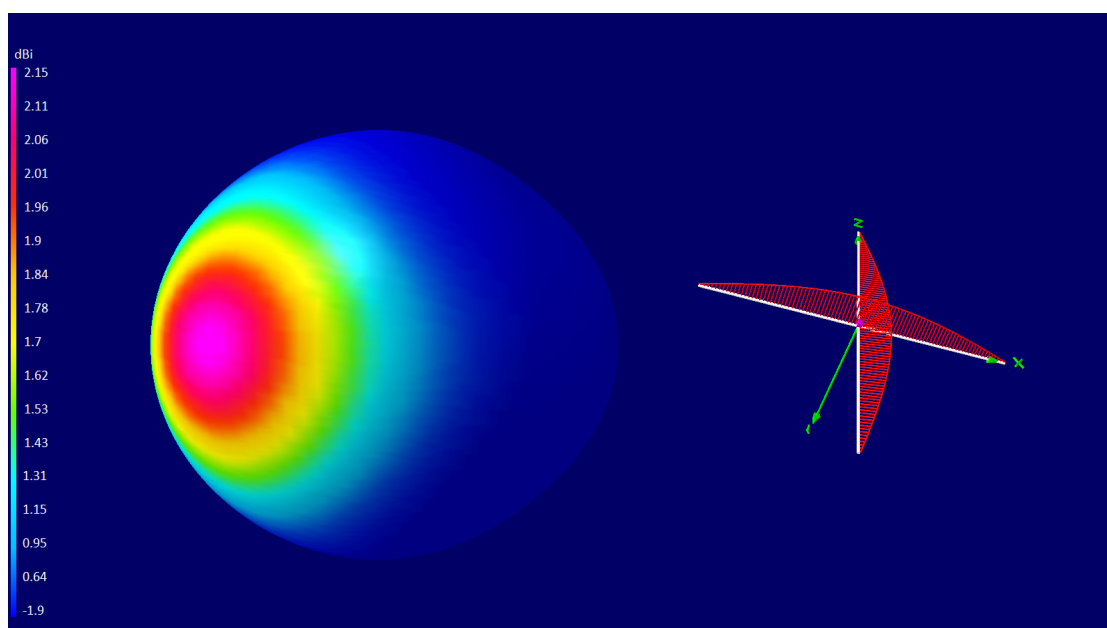
Na frekvenci 145 MHz měla anténa PSV hodnotu 1,18312. Na **Obr. 13** je vidět rozšíření pracovního pásma. Impedance antény byla $50,2779 \Omega$.



Obr. 13. Závislost PSV frekvence
[4nec2]

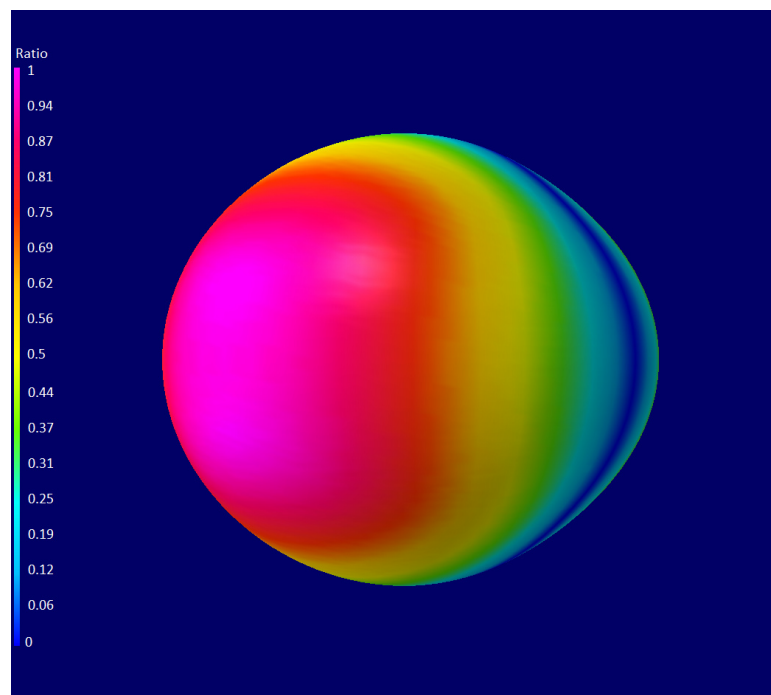


Obr. 14. Závislost impedance a fáze na frekvenci
[4nec2]



Obr. 15. Vyzářovací charakteristika a rozložení proudů na dipólu
[4nec2]

Na **Obr. 16.** je vidět axiální poměr na vyzářovací charakteristice. Fialová místa jsou místa s kruhovou polarizací. Téměř celá horní část charakteristiky je tvořena kruhovou polarizací. Lineární polarizace se nachází jen v části, která je souměrná s dipóly, část mezi lineární a kruhovou polarizací je polarizace eliptická.



Obr. 16. Axiální poměr
[4nec2]

3.2 Návrh křížového dipólu pro kmitočet 435 MHz

Návrh byl obdobný jako při návrhu křížového dipólu pro 435 MHz. Pro zjednodušení se uvažuje rychlost světla $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

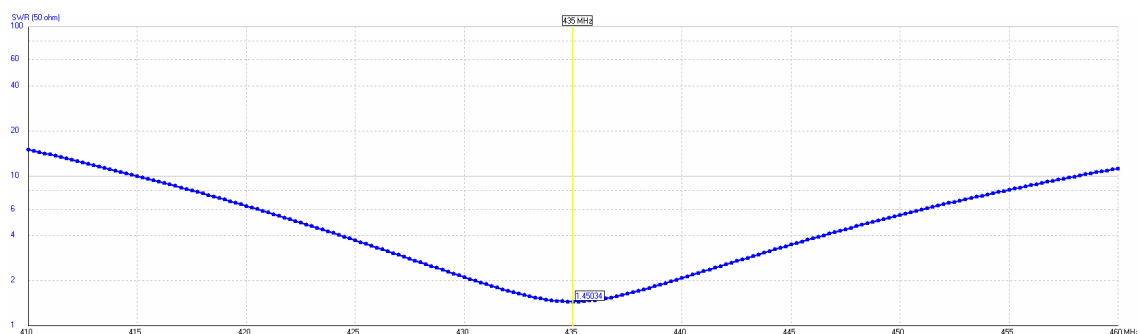
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{435 \cdot 10^6} = 0,68966 \text{ m} . \quad (3.2.1)$$

λ je pouze délka vlny. Jelikož se navrhuje půlvlnný dipól, musí se spočítat i délka dipólu. Při návrhu se musí uvažovat délka ramene

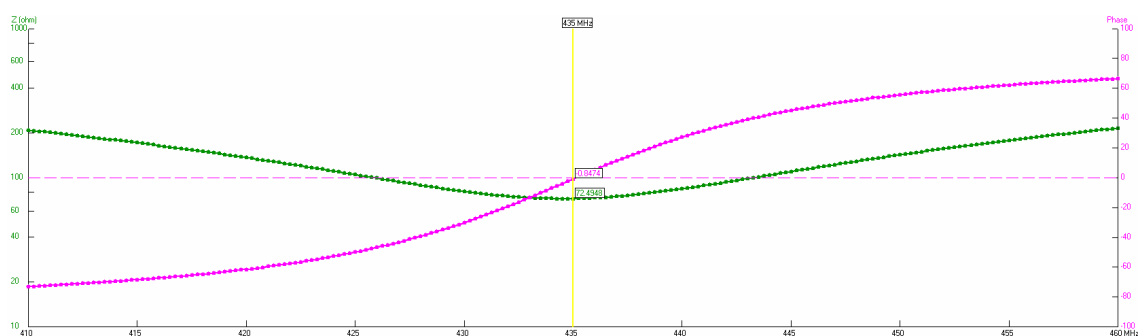
$$l_{\text{dipole}} = \frac{\lambda}{2} k = \frac{0,68966}{2} 0,94 = 0,3241 \text{ m} , \quad (3.2.2)$$

$$l_{\text{ramene}} = \frac{l_{\text{dipole}}}{2} = 0,162 \text{ m} . \quad (3.2.3)$$

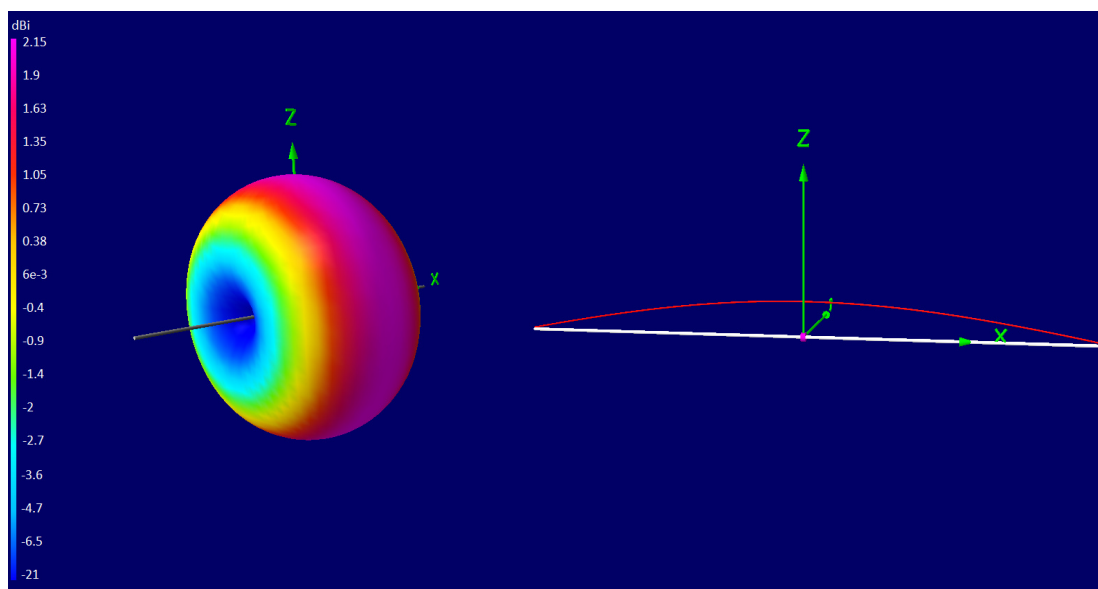
l_{dipole} je délka ideálního půlvlnného dipólu. Anténa byla optimalizována a výsledná délka dipólu je 0,156 m. Na Obr. 17. je vidět závislost PSV na frekvenci. Na frekvenci 435 MHz bylo PSV 1,45034. PSV je vyšší z důvodu, že se půlvlnný dipól nepřizpůsoboval na impedanci 50Ω . Půlvlnný dipól měl impedanci $72,5948 \Omega$.



Obr. 17. Závislost PSV na frekvenci
[4nec2]



Obr. 18. Závislost impedance a fáze na frekvenci
[4nec2]



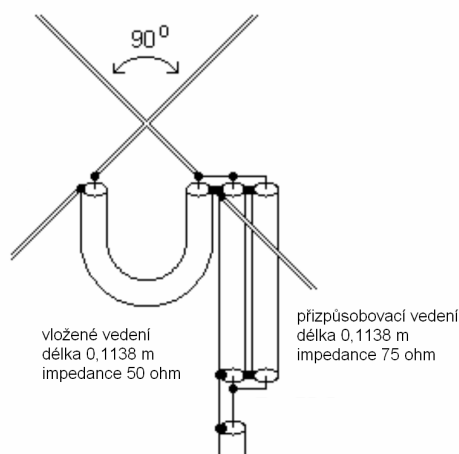
Obr. 19. Vyzařovací charakteristika a rozložení proudů na dipólu
[4nec2]

Poté práce pokračuje v návrhu křížového dipólu. Jelikož se křížový dipól skládá ze dvou půlvlnných dipólů, které jsou vzájemně posunuty fázově o 90° , musí se mezi dipóly vložit vedení o délce $\lambda/4$

$$l_{\text{vlozene}} = \frac{\lambda}{4} k = \frac{0,68966}{4} \cdot 0,66 = 0,1138 \text{ m} . \quad (3.2.4)$$

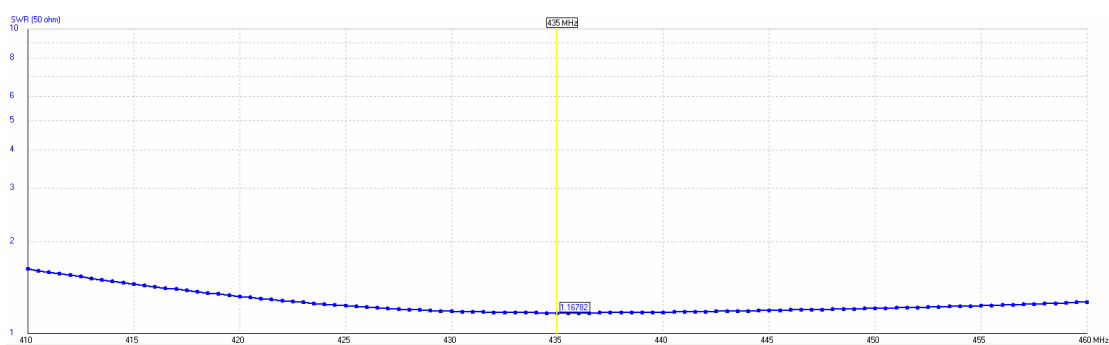
Vedení je zkráceno o činitel zkrácení, který činí 0,66. Dále byla anténa přizpůsobena na 50 Ω . Přizpůsobení popisuje **Obr. 20**. Jedná se o úzkopásmové přizpůsobení. Přizpůsobovací vedení má impedanci 75 Ω a délku $2 \cdot \lambda / 4$

$$l_{\text{prizpusobeni}} = \frac{\lambda}{4} k = \frac{0,68966}{4} \cdot 0,66 = 0,1138 \text{ m} . \quad (3.2.5)$$

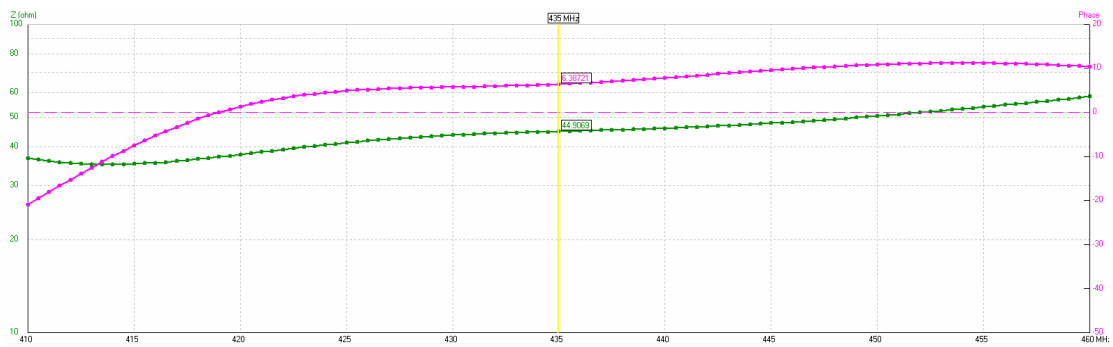


Obr. 20. Přizpůsobovací vedení

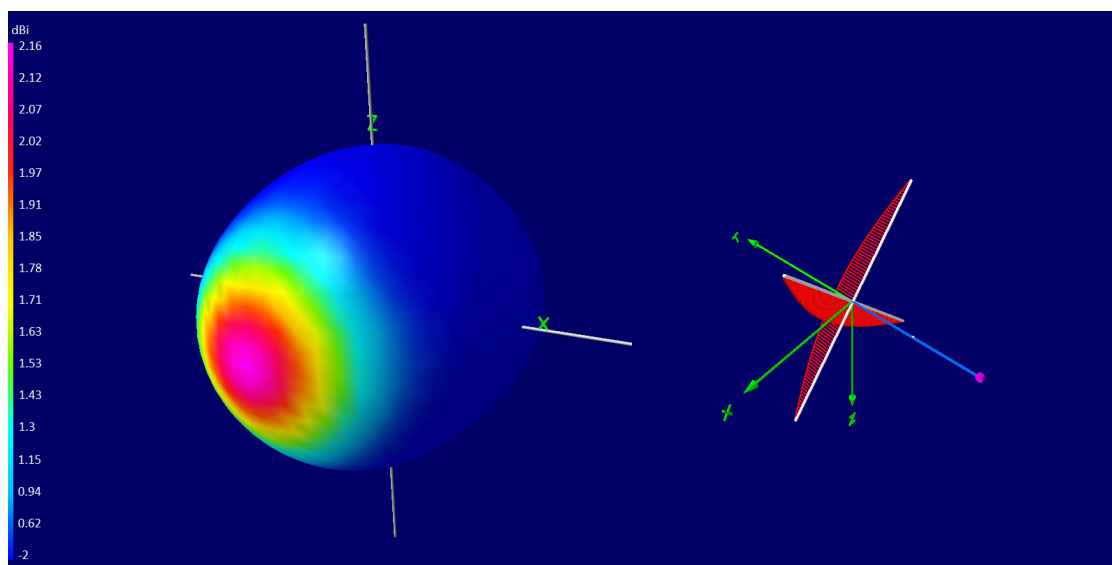
Na frekvenci 435 MHz bylo PSV 1,16782. Na **Obr. 21** je vidět rozšíření pracovního pásma. Impedance antény byla 44,9069 Ω .



Obr. 21. Závislost PSV na frekvenci
[4nec2]

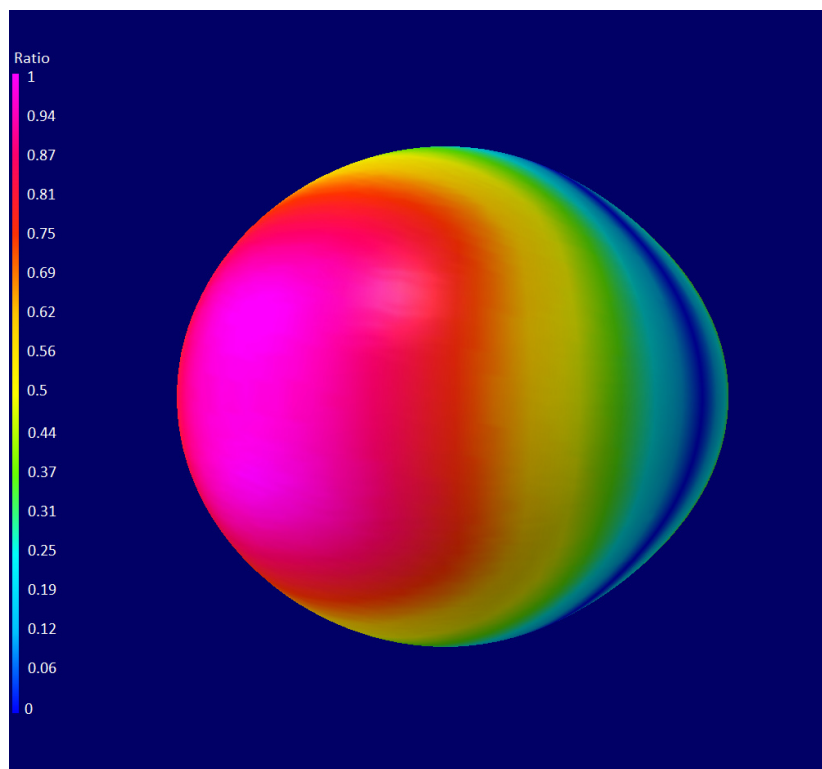


Obr. 22. Závislost impedance a fáze na frekvenci
[4nec2]



Obr. 23. Vyzařovací charakteristika a rozložení proudů na dipólu
[4nec2]

Na **Obr. 24.** je vidět axiální poměr na vyzařovací charakteristice. Fialová místa jsou místa s kruhovou polarizací. Téměř celá horní část charakteristiky je tvořena kruhovou polarizací. Lineární polarizace se nachází jen v části, která je souměrná s dipóly, část mezi lineární a kruhovou polarizací je polarizace eliptická.



Obr. 24. Axiální poměr
[4nec2]

3.3 Spojení křížových antén

Po návrhu antén pro samostatný provoz musela být navržena anténa pro dvoupásmový provoz. Při připojení antén tzv. „natvrdo“ nedosahovaly antény příliš dobrých výsledků - vyššího PSV a nevyrovnané vyzařovací charakteristiky.

Anténa laděná na 145 MHz zasahovala do vyzařovací charakteristiky antény laděné na 435 MHz. Trojnásobek frekvence 145 MHz je 435 MHz, z tohoto důvodu anténa rezonovala i na frekvenci 435 MHz, což mělo za následek nepříliš dobrou vyzařovací charakteristiku. Anténa laděná na frekvenci na 145 MHz se chovala jako reflektor antény, který rezonoval na 435 MHz.

Závislost antény laděné na 435 MHz lze odstranit pomocí LC slučovače, který zde byl použit, LC slučovač funguje jako dolní propust, dále LC slučovač pracuje jako přizpůsobovací člen pro menší PSV. Pro další odstranění rušení antény bylo použito posunutí antén o 45°. Výsledná anténa je na **Obr. 27**. U všech parametrů je udán rozměr a impedance prvků.

3.4 Návrh a konstrukce LC slučovače a přizpůsobení

Návrh probíhal v programu PSpice a 4nec2. Základní návrh proběhl v programu PSpice, vypočítaný LC slučovač byl použit na sloučení antén. Navržený LC slučovač nedosahoval vlastností, které se očekávaly, a proto byl v programu 4nec2 LC slučovač doladěn. Výsledný slučovač je zobrazen na **Obr. 25**.

Návrh slučovací části pro 145 MHz (dolní propust):

$$L_{1,2-\text{navrh}} = \frac{Z_o}{2\pi f} = \frac{50}{2\pi \cdot 145 \cdot 10^6} = 54,88 \text{ nH} \quad (3.4.1)$$

$$C_{1-\text{navrh}} = 2 \frac{1}{2\pi f Z_o} = 2 \frac{1}{2\pi \cdot 145 \cdot 10^6 \cdot 50} = 43,90 \text{ pF} . \quad (3.4.2)$$

Návrh slučovací části pro 435 MHz (horní propust):

$$L_{3-\text{navrh}} = \frac{Z_o}{4\pi f} = \frac{50}{4\pi \cdot 435 \cdot 10^6} = 9,15 \text{ nH} \quad (3.4.3)$$

$$C_{2,3-\text{navrh}} = \frac{1}{2\pi f Z_o} = \frac{1}{2\pi \cdot 435 \cdot 10^6 \cdot 50} = 7,32 \text{ pF} . \quad (3.4.4)$$

Návrh byl optimalizován v programu 4nec2 a výsledné hodnoty byly:

$$\begin{array}{ll} C_1 = 27 \text{ pF} & L_1 = 50 \text{ nH} \\ C_2 = 8,2 \text{ pF} & L_2 = 73 \text{ nH} \\ C_3 = 4,7 \text{ nF} & L_3 = 45 \text{ nH} . \end{array}$$

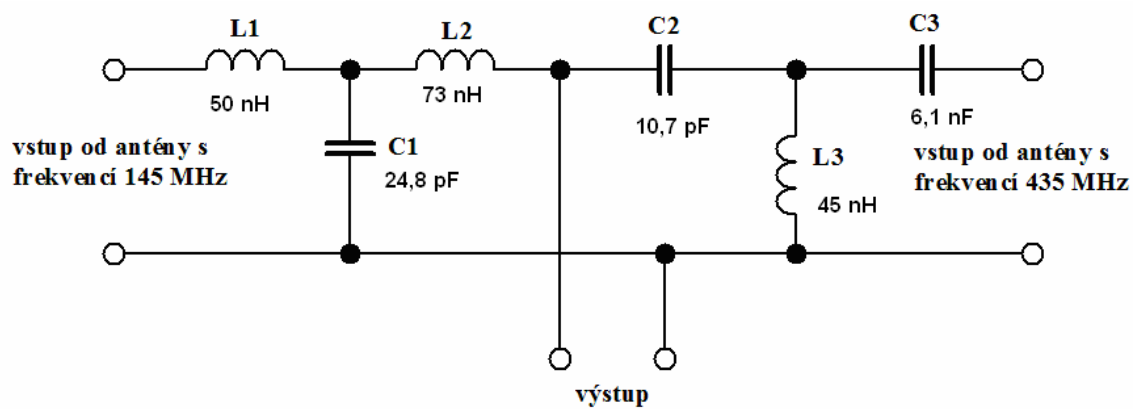
Cívky byly navinuty, byl použit drát 0,7mm. Výsledné cívky měly hodnoty:

$$\begin{array}{ll} L_1 = 50,5 \text{ nH} & Q_1 = 125 \\ L_2 = 73,2 \text{ nH} & Q_2 = 130 \\ L_3 = 46,3 \text{ nH} & Q_3 = 110 . \end{array}$$

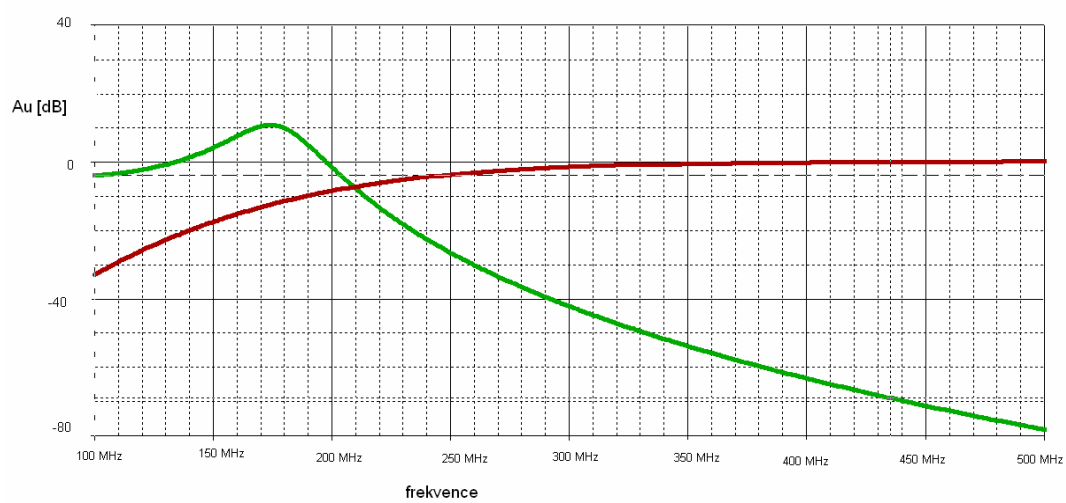
Poté byly vybrány kondenzátory, jelikož kondenzátory nejsou přesné, byly vybrány nejpřesnější z nalezených. Nalezené kondenzátory měly kapacitu:

$$\begin{array}{l} C_1 = 24,8 \text{ pF} \\ C_2 = 10,7 \text{ pF} \\ C_3 = 6,1 \text{ nF} . \end{array}$$

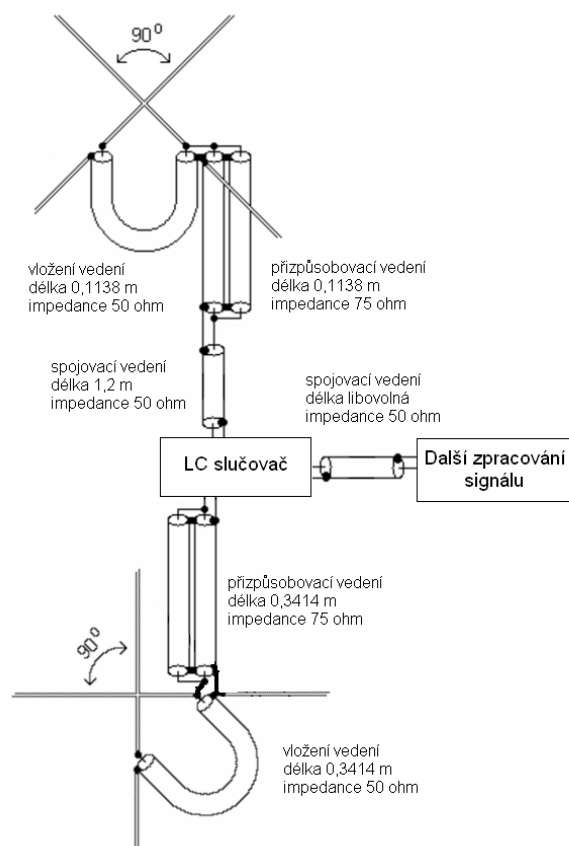
S těmito součástkami je výsledný průběh antény zobrazen na **Obr. 28**. Na **Obr. 26** je vidět přenos slučovače. Vstup antény rezonující na frekvenci 145 MHz měl na frekvenci 435 MHz útlum -68,97 dB.



Obr. 25. LC slučovač
[PSpice]

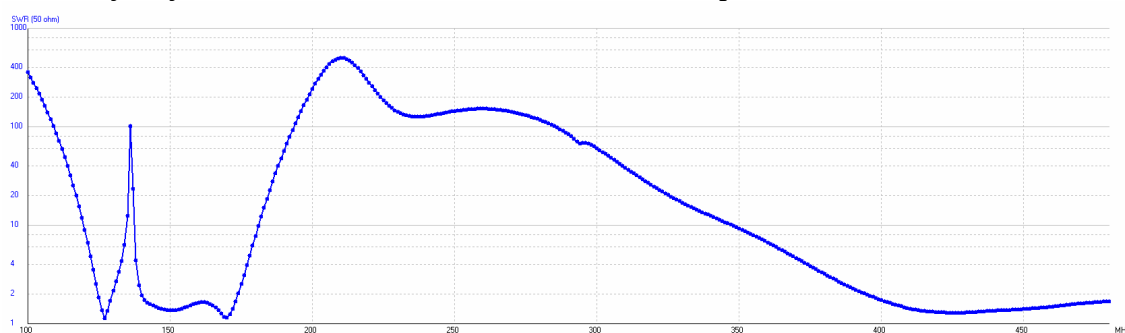


Obr. 26. Přenos slučovače
[PSpice] zelená-přenos vstupu 145 MHz červená-přenos vstupu 435 MHz



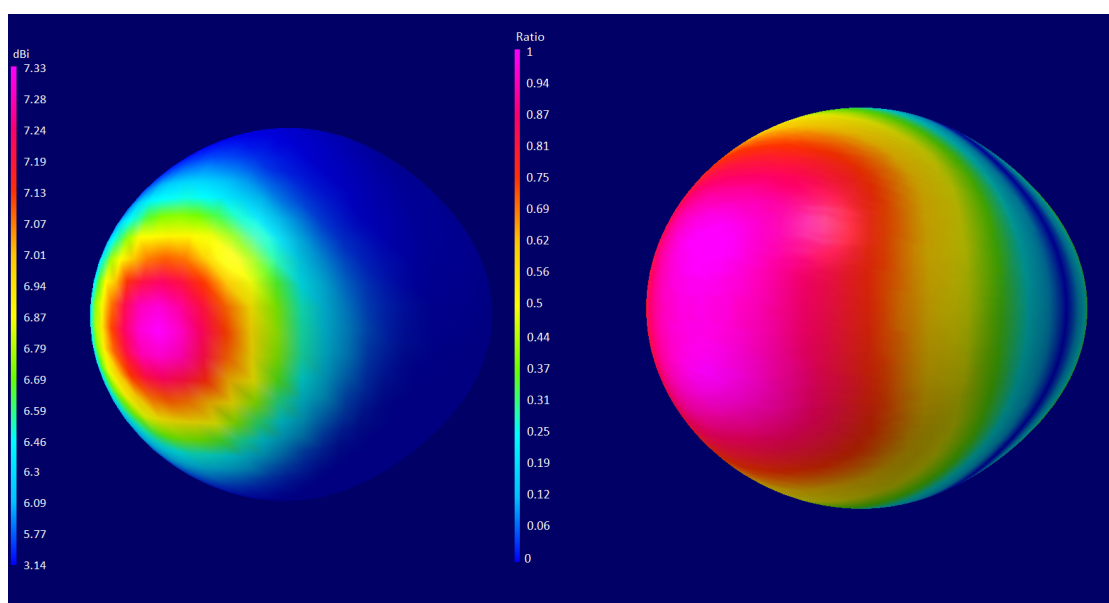
Obr. 27. Schéma zapojení

Na **Obr. 28.** je znázorněna závislost PSV na frekvenci. Pro frekvenci 145 MHz byla 1,48345, pro frekvenci 435 MHz byla 1,33129. Navržené PSV je vyšší z důvodu velmi složité výroby cívek o indukčnost menší než 10 nH a nepřesnosti kondenzátorů.



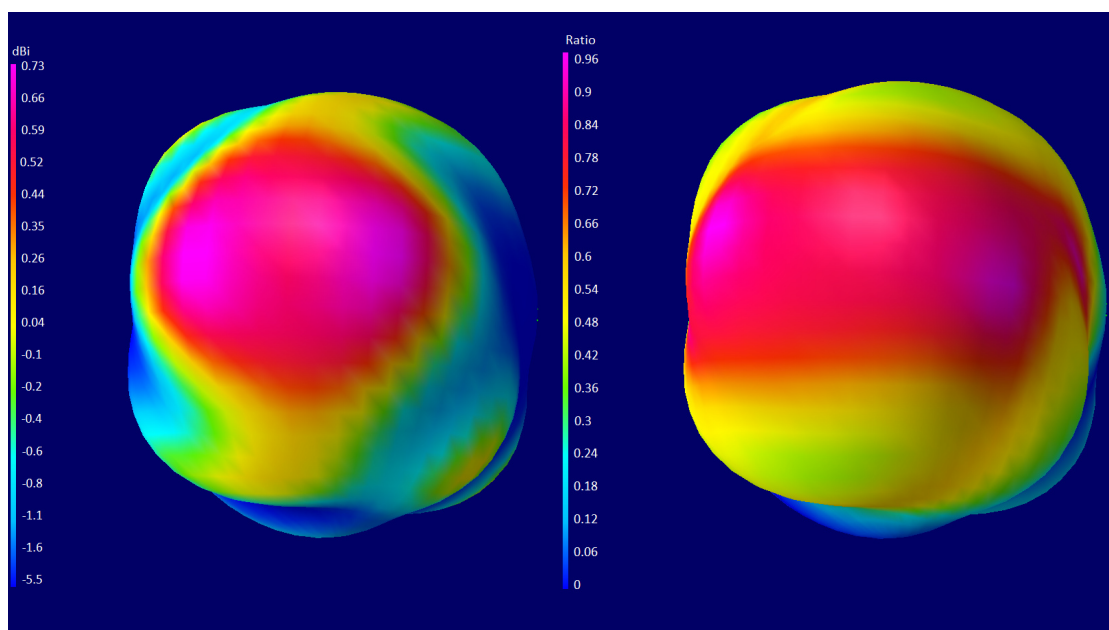
Obr. 28. Závislost PSV na frekvenci
[4nec2]

Na **Obr. 29.** je znázorněna vyzářovací charakteristika a axiální poměr antény laděné na 145 MHz.



Obr. 29. Vyzařovací charakteristika a axiální poměr
[4nec2]

Na **Obr. 30.** je znázorněna vyzařovací charakteristika a axiální poměr antény laděné na 435 MHz.

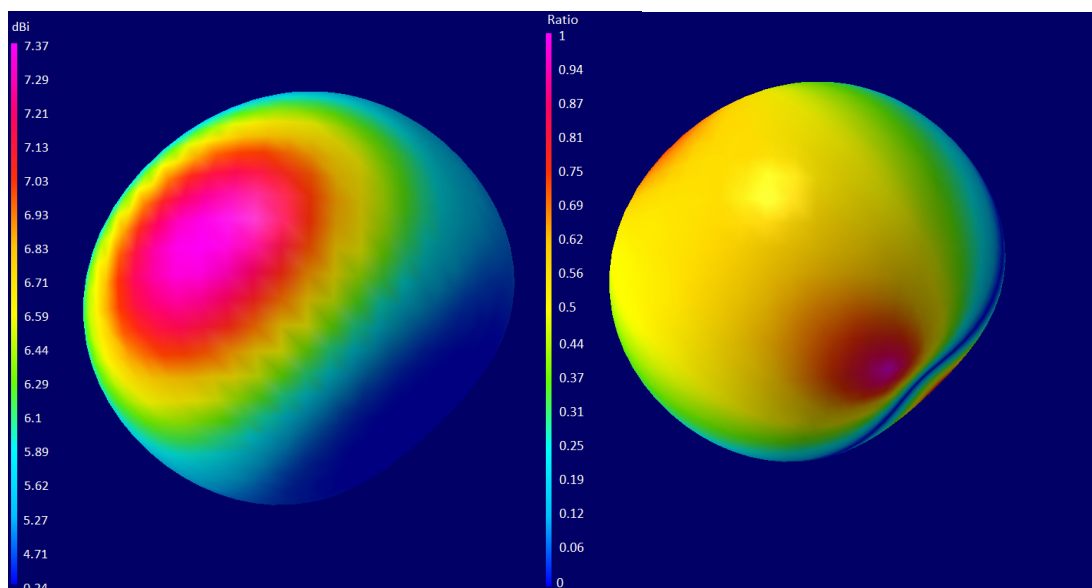


Obr. 30. Vyzařovací charakteristika a axiální poměr
[4nec2]

3.5 Závislosti axiálního poměru na délce fázovacího vedení

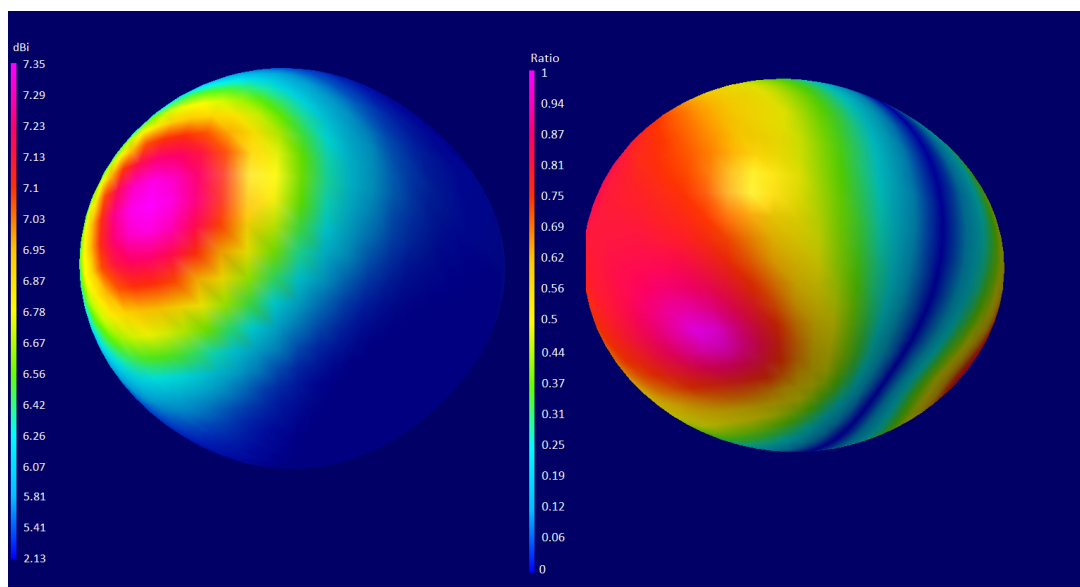
V této části práce je znázorněna závislost vyzařovací charakteristiky a axiálního poměru na délce fázovacího vedení.

Délka fázovacího vedení 0,7 m



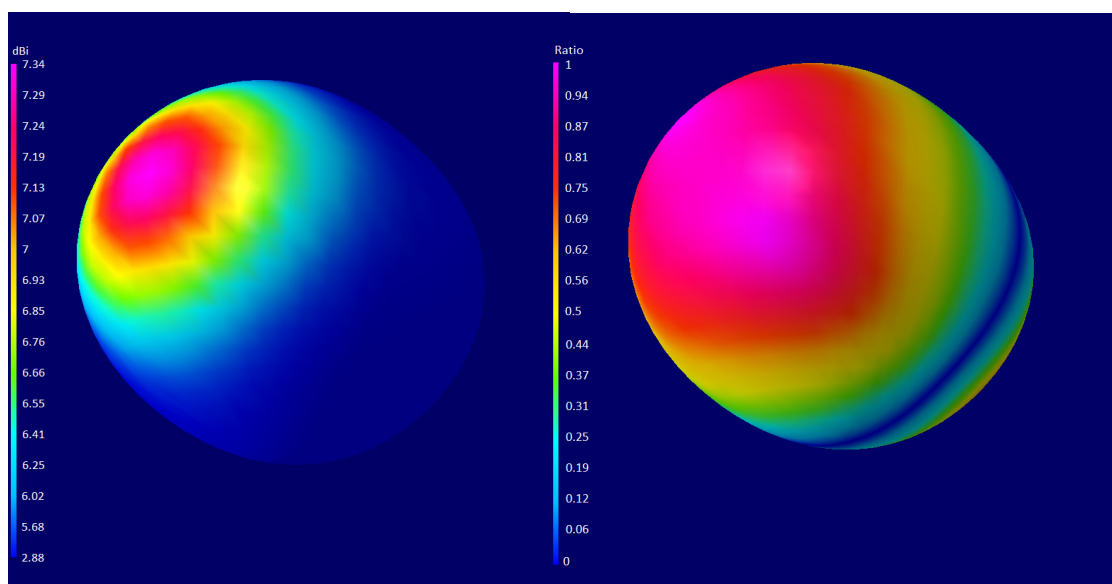
Obr. 31. Vyzařovací charakteristika a axiální poměr
[4nec2]

Délka fázovacího vedení 0,6 m



Obr. 32. Vyzařovací charakteristika a axiální poměr
[4nec2]

Délka fázovacího vedení 0,55 m



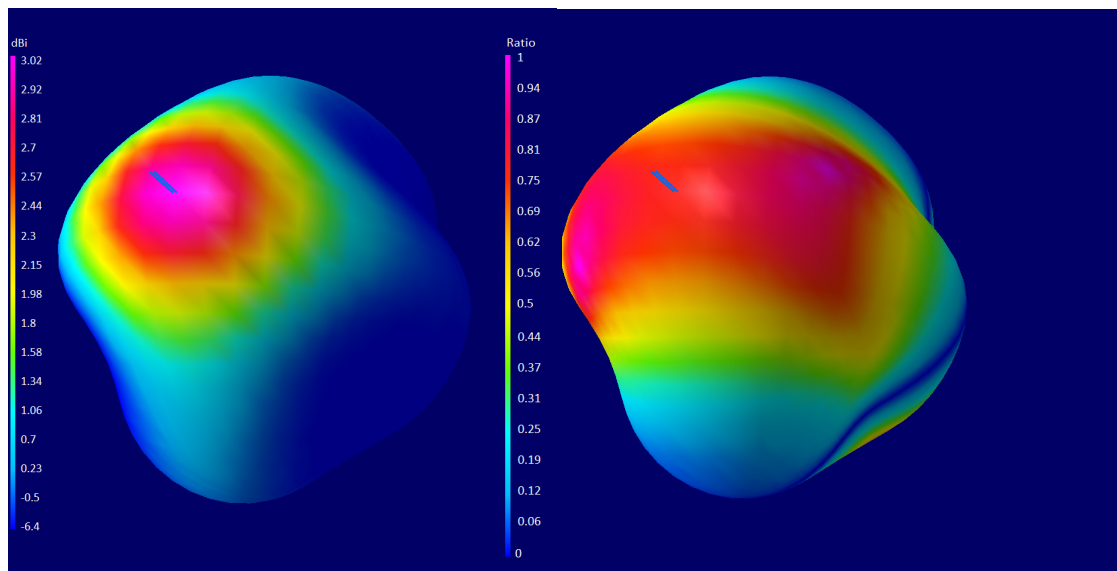
Obr. 33. Vyzařovací charakteristika a axiální poměr
[4nec2]

Z průběhu je zřejmé, že na fázovacím vedení závisí kruhová polarizace. Maximální nepřesnost fázovacího vedení je možná do 10%. **Obr. 33.** je téměř identický s **Obr. 29.** Obdobně by se průběhy měnily i při snižování fázovací délky vedení. Obdobný experiment proběhl i na frekvenci 435 MHz, výsledky byly podobné. Jelikož anténa laděná na 435 MHz nemá přesnou vyzařovací charakteristiku, pro ukázkou byla použita anténa, která rezonuje na frekvenci 145 MHz.

3.6 Závislosti axiálního poměru a zisku na vzdálenosti antén

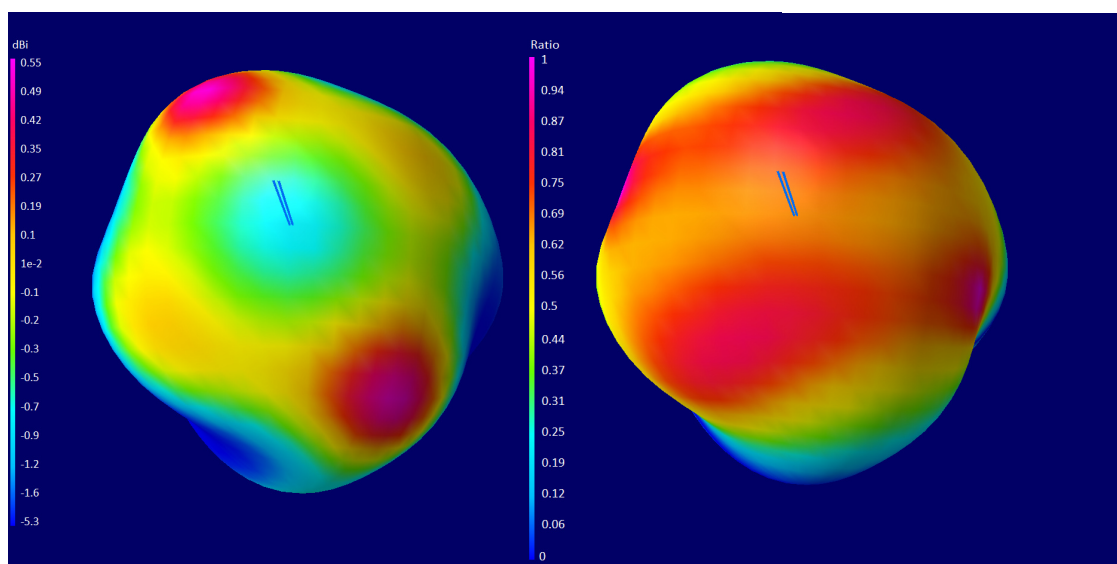
V této části se práce bude věnovat závislosti axiálního poměru a zisku na vzdálenostech antén od sebe. Charakteristiky budou ukázány jen pro anténu laděnou na frekvenci 435 MHz. Anténa laděná na 145 MHz nereaguje na změnu vzdálenosti.

Vzdálenost 0,1 m



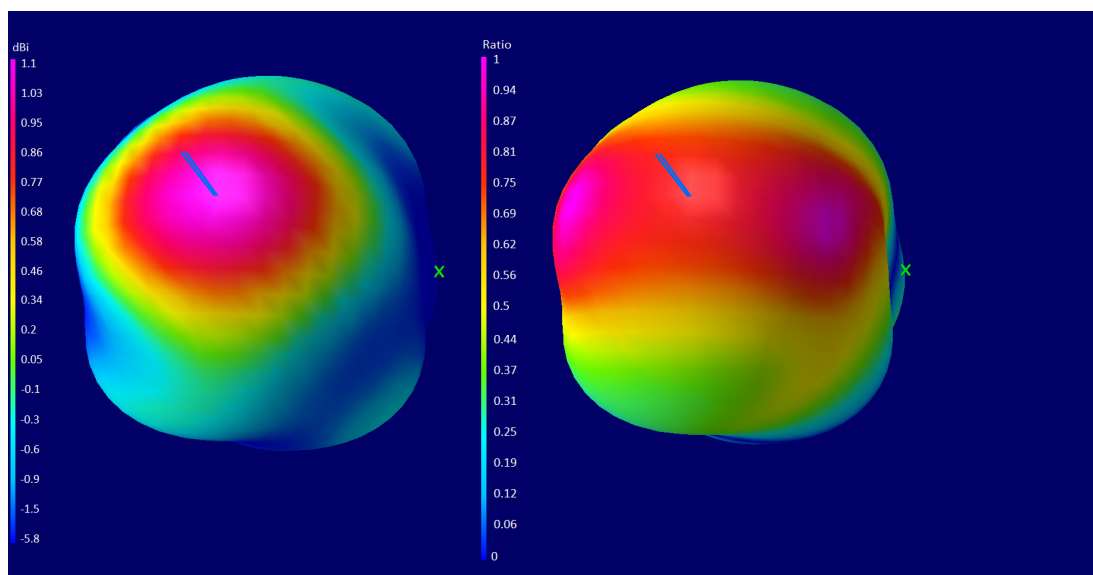
Obr. 34. Vyzářovací charakteristika a axiální poměr [4nec2]

Vzdálenost 0,3 m



Obr. 35. Vyzářovací charakteristika a axiální poměr [4nec2]

Vzdálenost 0,6 m

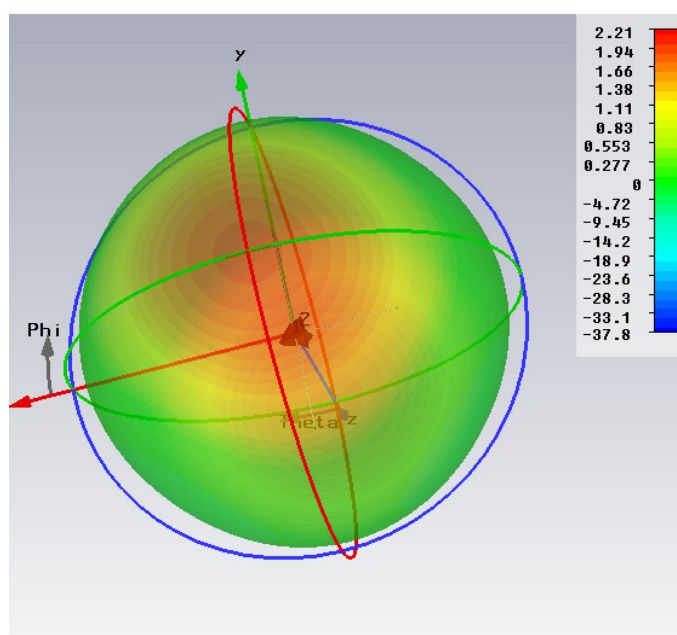


Obr. 36. Vyzařovací charakteristika a axiální poměr
[4nec2]

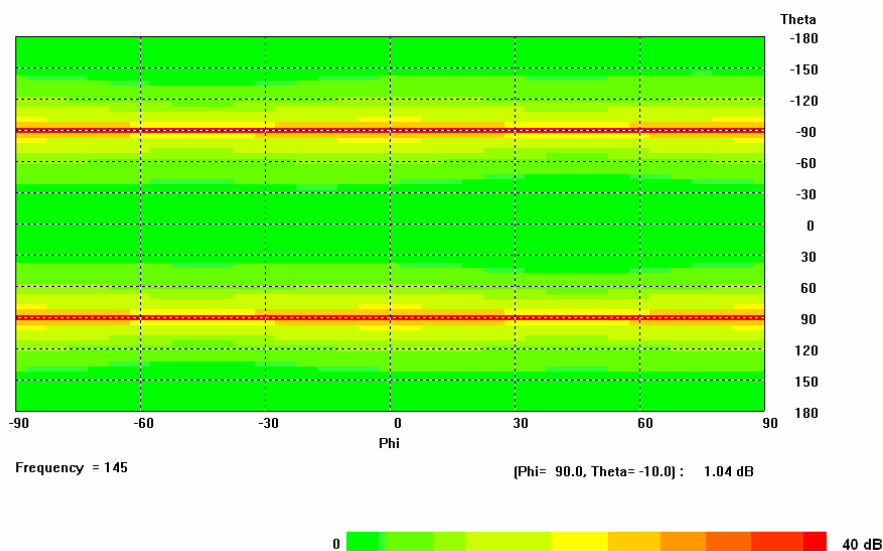
Z charakteristik jsou vidět závislosti změn vzdálenosti antén od sebe. Největšího zisku dosáhla anténa při vzdálenosti 0,1 m. Vzdálenost byla zvolena 1 m, což je vzdálenost $\lambda / 2$ antény laděné na 145 MHz.

4 Ověření v programu CST MICROWAVE STUDIO

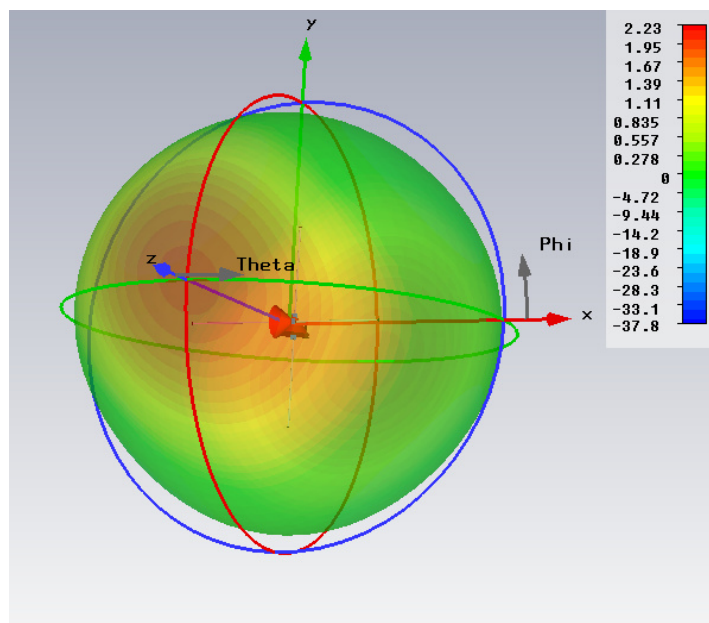
Anténa měla být ověřena v programu CST MICROWAVE STUDIO. Na **Obr. 37.** je vidět vyzařovací charakteristika a na **Obr. 38.** axiální poměr křížového dipólu, který rezonuje na frekvenci 145 MHz, zelená plocha u axiálního poměru je kruhová polarizace. Na **Obr. 39.** je vidět vyzařovací charakteristika a na **Obr. 40.** axiální poměr křížového dipólu, který rezonuje na frekvenci 435 MHz, zelená plocha u axiálního poměru je kruhová polarizace. 2D zobrazení pro Axiální poměr bylo použito pro větší přehlednost.



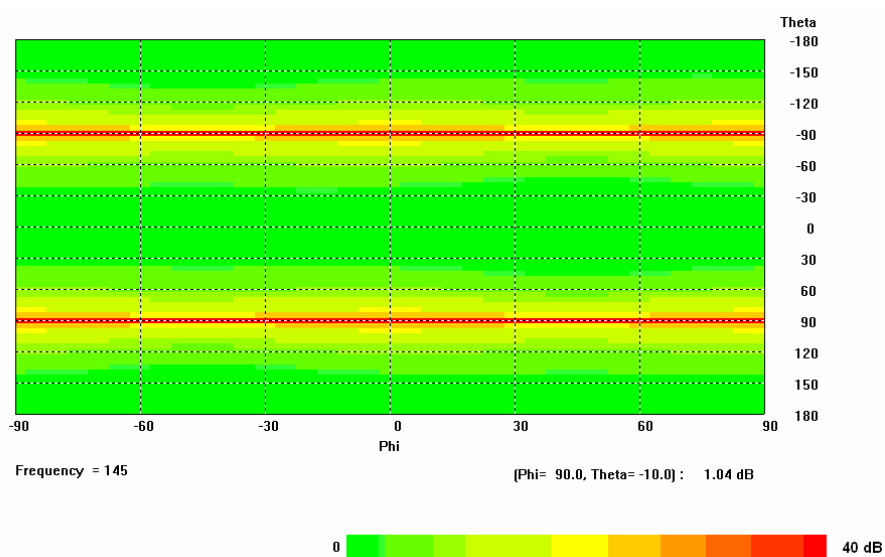
Obr. 37. Vyzařovací charakteristika



Obr. 38. Axiální poměr



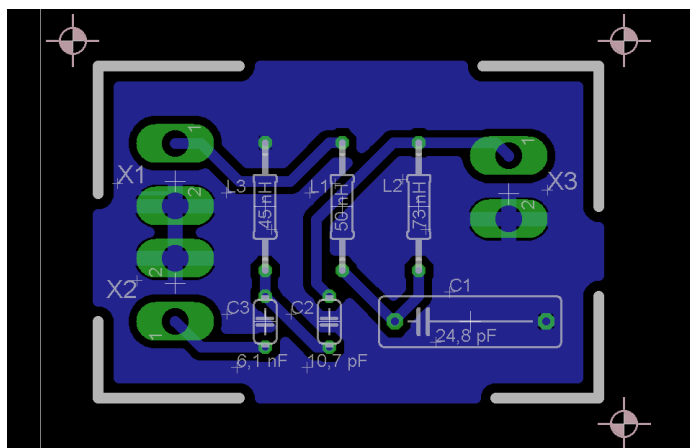
Obr. 39. Vyzařovací charakteristika



Obr. 40. Axiální poměr

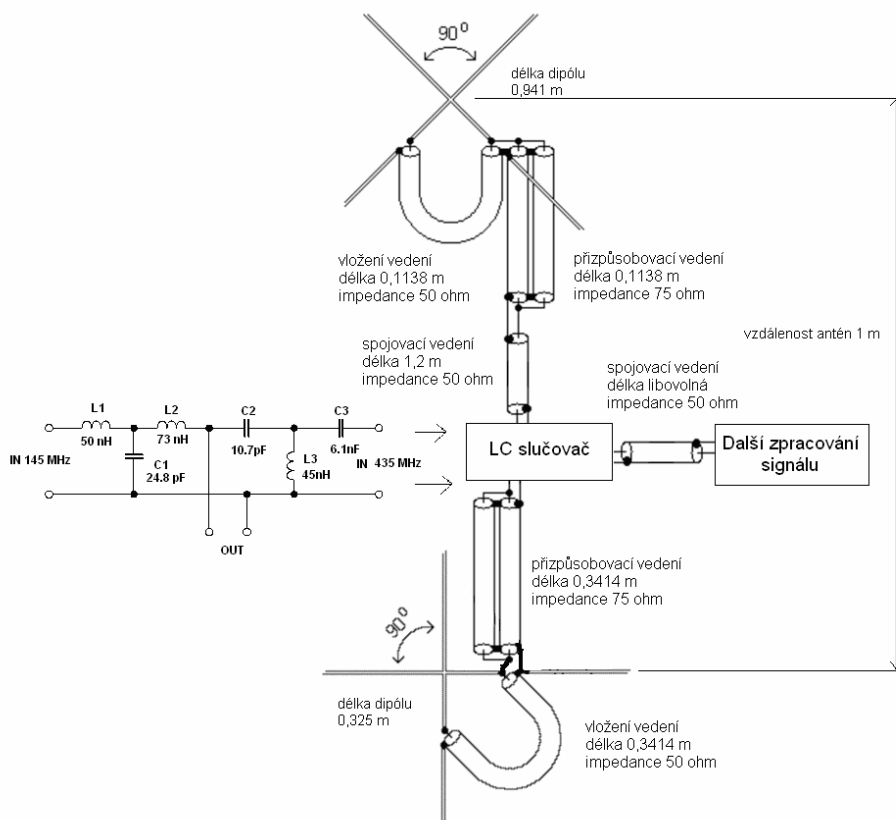
5 Konstrukce antény

Křížové dipóly jsou umístěny v elektroinstalačních krabičkách. Po stranách krabiček byly vyvrtány 4 díry na vývodky. V jedné krabici byla vyvrtána spodní část na průchod koaxiálního kabelu a v druhé i vrchní část na průchod koaxiálního kabelu. Ze svorkovnice byly vylopány ocelové konektory, které byly použity k uchycení koaxiálních kabelů. LC slučovač byl umístěn na cuprexitovou desku a klasicky zapájen. Deska je vidět na **Obr. 41**. „Zem byla vylita.“ Plastové části byly slepeny pomocí Chemoprenu.

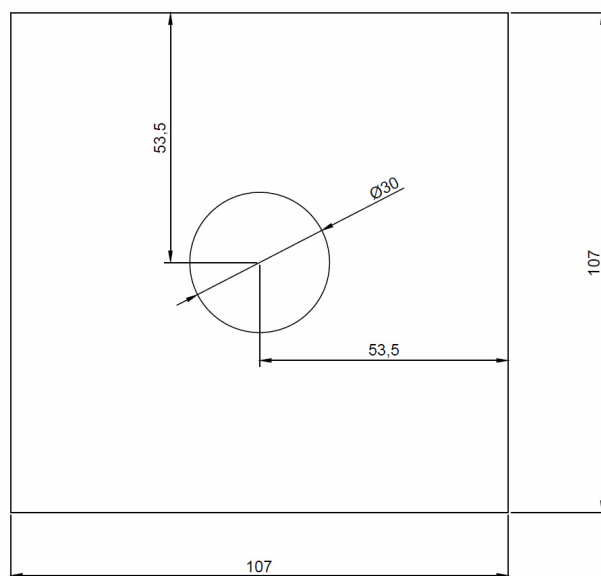


Obr. 41. LC slučovač DSP
[Eagle]

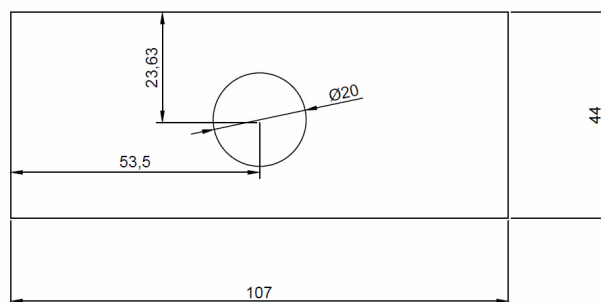
Koaxiální kabely byly navzájem spájeny. Na **obr 42**, je znázorněno výsledné zapojení.



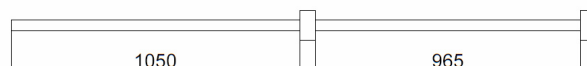
Obr. 42. Výsledné zapojení antény



Obr. 43. *Přídorys krabičky s vyvrtanou dírou pro přívod koaxiálního kabelu*
[AutoCAD]



Obr. 44. *Bokorys krabičky s vyvrtanou dírou pro přívod koaxiálního kabelu*
[AutoCAD]



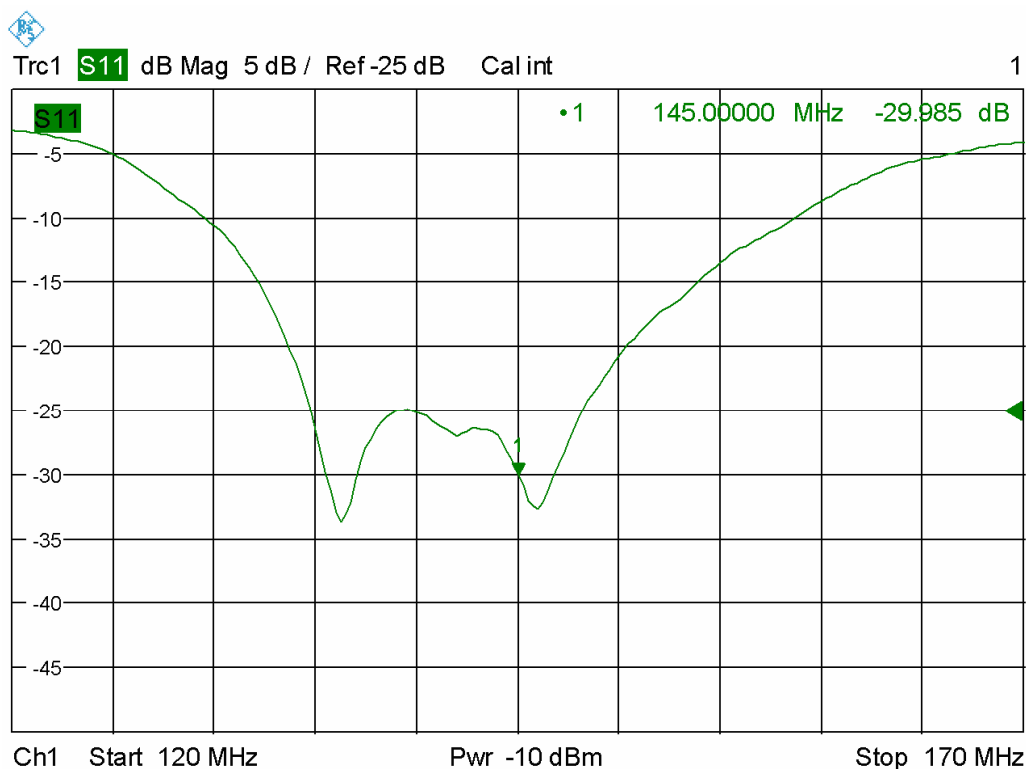
Obr. 45. *Vzdálenost krabiček od sebe*
[AutoCAD]

6 Změřené parametry antény

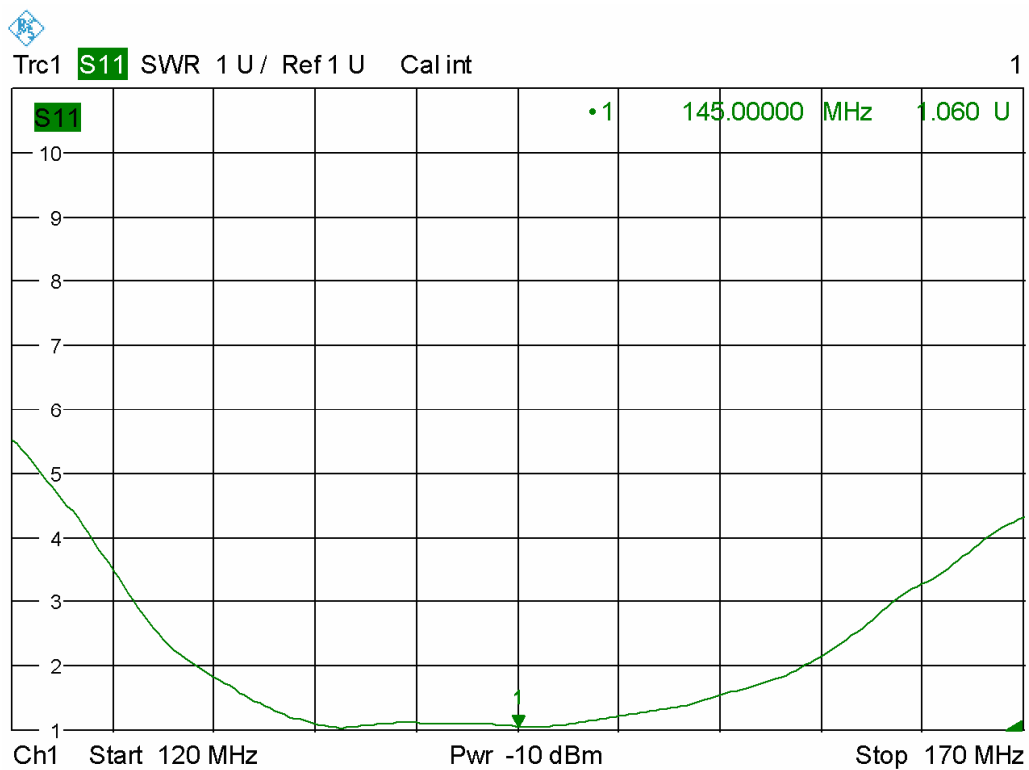
Měření probíhalo na vektorovém analyzátoru Rohde&Schwarz ZVL. Nejprve byly antény změřeny zvlášť, každá anténa byla vyladěna na nejlepší parametry, poté zafixována a změřena. Pro větší přehlednost zde bude práce rozdělena na tři části. V první části se zaměříme na vyladění antény, která rezonuje na frekvenci 145 MHz, ve druhé části na anténu rezonující na frekvenci 435 MHz a v poslední části na antény sloučené.

6.1 Změřené parametry antény rezonující na 145 MHz

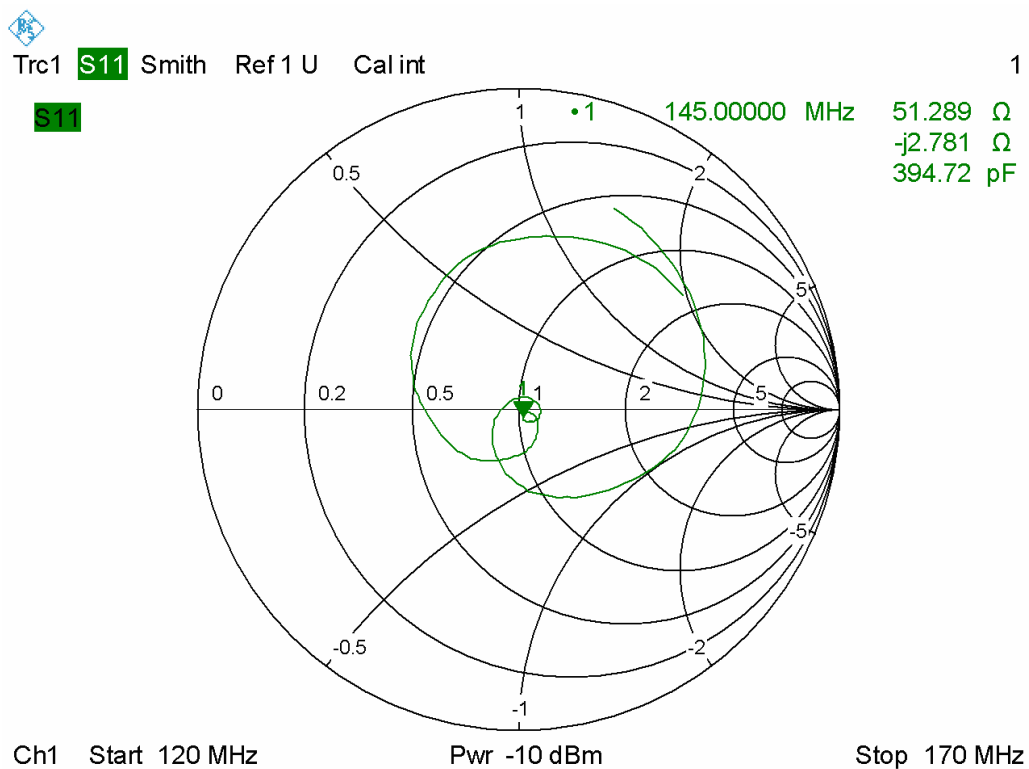
Na **Obr. 46.** je vidět parametr S11, který činil na 145 MHz -29,985 dB. Na kmitočtu 136,5 MHz je vidět pokles S11 na -33,5 dB, zde anténa nerezonovala, ale jednalo se o parazitní jev, parametr S11 na této frekvenci nebyl závislý na délce dipólu, během měření nebylo zjištěno, o jaký jev se jedná. Na **Obr. 47.** je vidět PSV, které bylo 1,06. PSV pod 1,1 se považuje za velmi dobrý výsledek. Na **Obr. 48.** je vidět Smithův diagram, kde vidíme impedanci $(52,289 - j 2,781) \Omega$. Výsledná délka ramene byla 0,4705 m.



Obr. 46. Činitel odrazu na antény laděné na frekvenci 145 MHz
[Rohde&Schwarz ZVL]



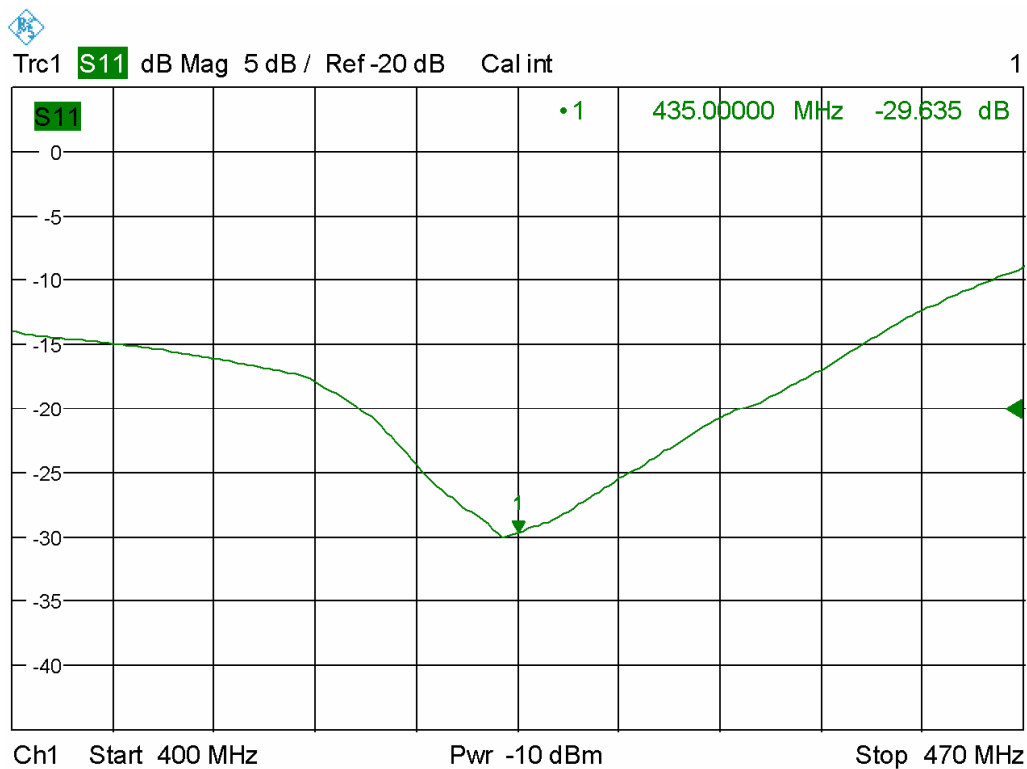
Obr. 47. PSV antény laděné na frekvenci 145 MHz
[Rohde&Schwarz ZVL]



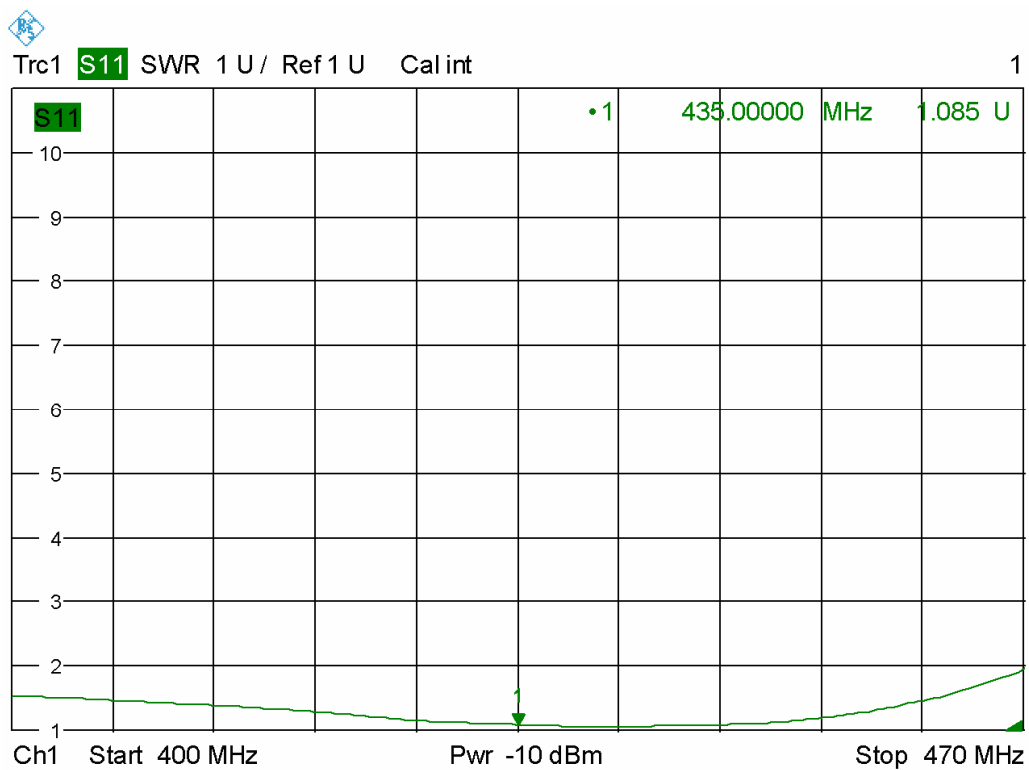
Obr. 48. Smithův diagram antény laděné na frekvenci 145 MHz
[Rohde&Schwarz ZVL]

6.2 Změřené parametry antény rezonující na 435 MHz

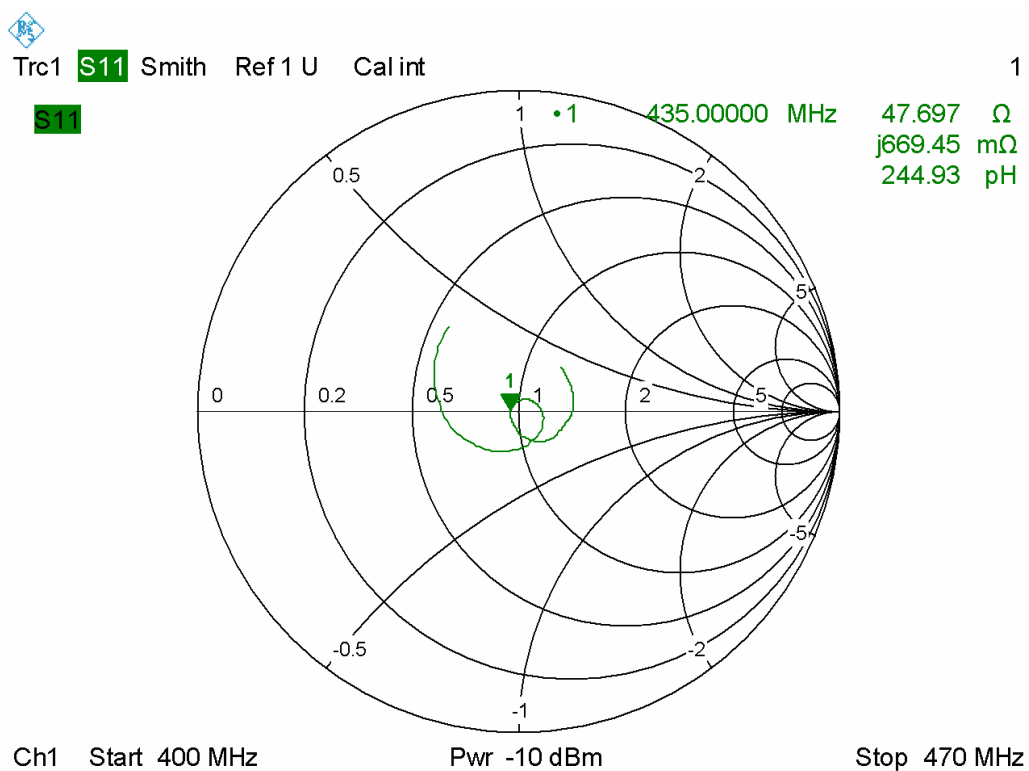
Na **Obr. 49.** je vidět parametr S11, který činil na 435 MHz -29,635 dB. Na **Obr. 50.** je vidět PSV, které bylo 1,085. PSV pod 1,1 se považuje za velmi dobrý výsledek. Na **Obr. 51.** je vidět Smithův diagram, kde vidíme impedanci $(47,697 - j 0.66954) \Omega$. Výsledná délka ramene byla 0,1625 m.



Obr. 49. Činitel odrazu na antény laděné na frekvenci 435 MHz
[Rohde&Schwarz ZVL]



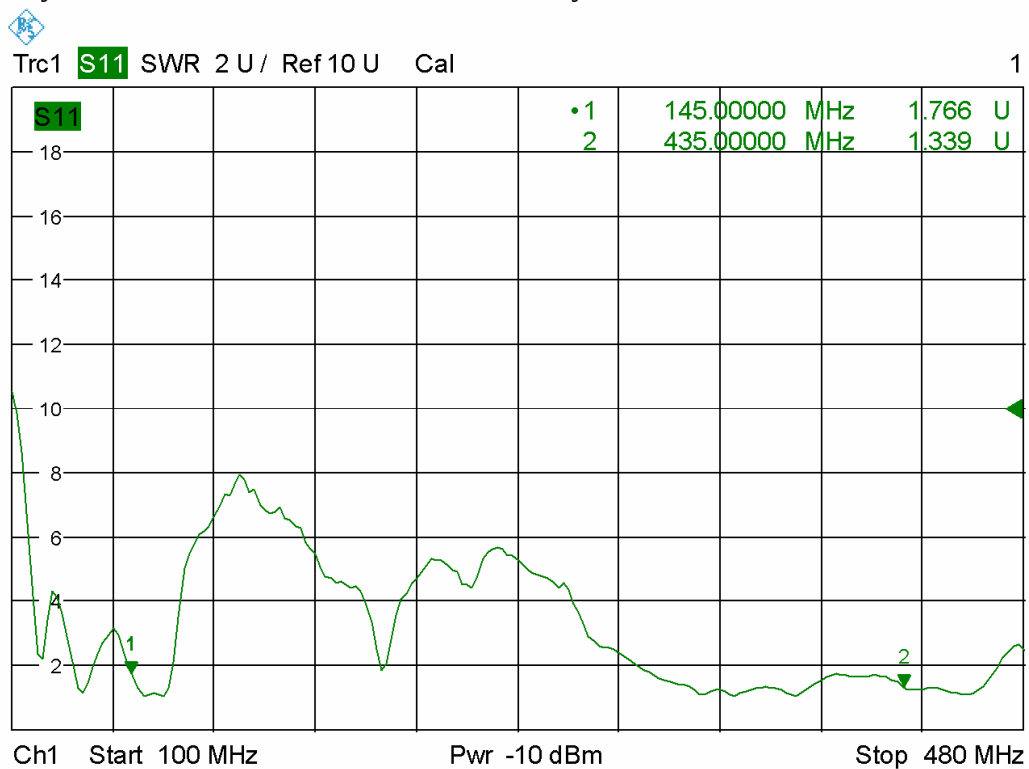
Obr. 50. PSV antény laděné na frekvenci 435 MHz
[Rohde&Schwarz ZVL]



Obr. 51. Smithův diagram antény laděné na frekvenci 435 MHz
[Rohde&Schwarz ZVL]

6.3 Změřené parametry sloučené antény

Na **Obr. 52.** je vidět závislost PSV na frekvenci výsledné antény. Na frekvenci 145 MHz bylo PSV 1,766 a na frekvenci 435 MHz bylo PSV 1,339.



Obr. 52. PSV výsledné antény
[Rohde&Schwarz ZVL]

7 Ověření antény v reálném provozu

Anténa měla být ověřena v reálném provozu. Ověření antény proběhlo v budově UREL VUT. Úkolem ověření bylo zjistit, zda anténa bude schopna přijímat signály, pro které byla zkonstruována. Anténa byla ověřena jak na pozemních cílech (provoz letiště Tuřany, či vysílání policie), tak i na satelitních cílech. Jednalo se o satelity letící ve výšce 600 – 800 km. Po navázání spojení byly u antény ověřeny vlastnosti. Mezi nejdůležitější vlastnosti antény patří kruhová polarizace, která se potvrdila u obou frekvencí - jak na 145 MHz, tak na 435 MHz. Kruhová polarizace byla ověřena točením antény o 360°, při točení nebyl zaznamenán pokles signálu. Dále byla ověřena vyzařovací charakteristika. Vyzařovací charakteristika byla ověřena na obou frekvencích, ale u antény na frekvenci 435 MHz úplně neodpovídala nasimulovaným výsledkům, měření napovídalo, že anténa měla dvě místa s větším ziskem, což sice potvrzují i výsledky nasimulované, ale dle měření má anténa mezi těmito dvěma zisky větší propad, než odpovídá simulace. Nasimulovaná vyzařovací charakteristika je na **Obr. 30**. Vyzařovací charakteristika antén byla zjišťována na principu postupného vychylování geometrického středu antény z místa záření signálu. Měření antén napovídalo, že antény by měly být provozuschopné, ale pro jistý závěr by musely proběhnout dlouhodobější testy. Anténa byla celkově testována 45 minut.

8 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout dvoupásmově kruhově polarizovanou anténu, která bude laděná na frekvencích 145 a 435 MHz. Anténa byla navržena v programu 4nec2. Anténa navržená v programu 4nec2 měla PSV 1,18312 na frekvenci 145 MHz a anténa laděná na 435 MHz měla PSV 1,16782. Poté byly antény sloučeny do jedné antény. Anténa rezonující na frekvenci 145 MHz ovlivňovala anténu rezonující na frekvenci 435 MHz, z tohoto důvodu nestačilo antény jen přizpůsobit, ale i kmitočtově odříznout, kmitočtové odříznutí proběhlo pomocí LC slučovače. Výsledný návrh měl PSV na frekvenci 145 MHz 1,48345 a na frekvenci 435 MHz 1,33129. Horší výsledky byly způsobeny přizpůsobením návrhu k přesnosti součástek, jednalo se hlavně o nepřesnost kondenzátorů. Aby nedocházelo k dalšímu ovlivňování, byly antény navzájem posunuty o úhel 45°. Anténa rezonující měla v kříži kruhovou polarizaci, ale anténa rezonující na 435 MHz byla částečně ovlivněna, a tak v kříži dipólu nebyla jen polarizace kruhová, ale i eliptická. Poté byly antény vyrobeny. Anténa rezonující na frekvenci 145 MHz měla PSV 1,06, což je přenos výkonu více než 99,9%. Anténa na frekvenci 435 MHz měla PSV 1,085, což odpovídá přenesenému výkonu více než 99,8%. Poté byly antény sloučeny v jednu anténu a výsledné PSV bylo na frekvenci 145 MHz 1,776, což se považuje za dobré přizpůsobení a na frekvenci 435 MHz bylo PSV 1,3319, což se považuje za dobré přizpůsobení. Ověření v reálném provozu proběhlo a ukázalo, že anténa by měla být funkční v dlouhodobějším reálném provozu, pro jistý závěr by musela být anténa testována déle, anténa byla testována 45 minut.

9 Literatura

- [1] NOBILIS, Jiří. *Teorie elektronických obvodů IX.*. Pardubice : SPŠE a VOŠ Pardubice, 2008. 118 s.
- [2] MATUSZCZYK, Jacek. *Antény prakticky*. Praha : BEN, 2005. 240 s.
- [3] PROCHÁZKA, Miroslav. *Antény Encyklopedická příručka*. Praha : BEN, 2000. 288 s.
- [4] *Mayer's home page* [online]. 2009 [cit. 2011-11-20]. [Http://hans.mayer.t](http://hans.mayer.t). Dostupné z WWW: <<http://hans.mayer.tv/html/crossdipole137.html>>
- [5] VÍTEK, Jiří. *DVOUPÁSMOVÁ ANTÉNA S PARALELNÍMI REZONANČNÍMI OBVODY*. Brno, 2010. 33 s. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [6] LUKEŠ, Zbyněk. *MASV* [online]. 2011 [cit. 2011-11-22]. Přednášky. Dostupné WWW: <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/MASV/downloads/.pdf>>.
- [7] KASAL, Miroslav. *PŘÍRODNÍ EFEKTY PŘI SATELITNÍ KOMUNIKACI* [online]. 4 s. Oborová práce. VUT Brno. Dostupné z WWW: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/studium/doc/dre2/satelit.pdf>.
- [8] *Experimental Omni-Directional Antennas for 6-Meters* [online]. 2006 [cit. 2011-12-13]. LU1DMA. Dostupné z WWW: <<http://www.lu1dma.com.ar/bkn/ex6.html>>.
- [9] ČERNOHORSKÝ, Dušan. *Antény a šíření rádiových vln* . 2001. Brno, 2001. 246 s.

10 Seznam použitých zkratek a symbolů

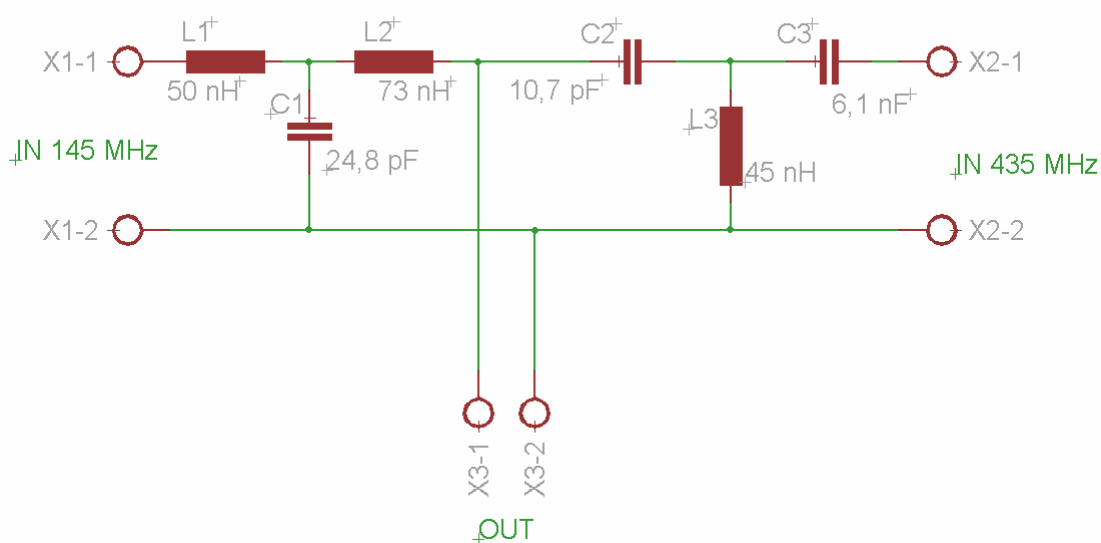
C	kapacita
c	rychlost světla
ČSV	činitel stojatých vln
dB	decibel
dBd	označení decibelu ve srovnání s půlvlnným dipólem
dBi	označení decibelu ve srovnání s izotropním zářičem
ϵ_r	relativní permitivita dielektrika
f	frekvence
G	zisk antén
k	činitel zkrácení
L	indukčnost
λ_0	vlnová délka ve volném prostředí
λ_e	vlnová délka materiálu
l_{dipole}	délka celého dipólu
l_e	elektrická délka vedení
l_f	skutečná fyzikální délka vedení
l_{ramene}	délka jednoho ramene dipólu
l_{vlozene}	délka vloženého vedení
PSV	poměr stojatých vln
S11	činitel odrazu
SWR	standing wave ratio
Z	impedance
Z_0	charakteristická impedance vedení bez dielektrika
Z_0	charakteristika impedance
Z_E	charakteristická impedance vedení s dielektrikem o reaktivní permitivitě ϵ_r

11 Seznam příloh

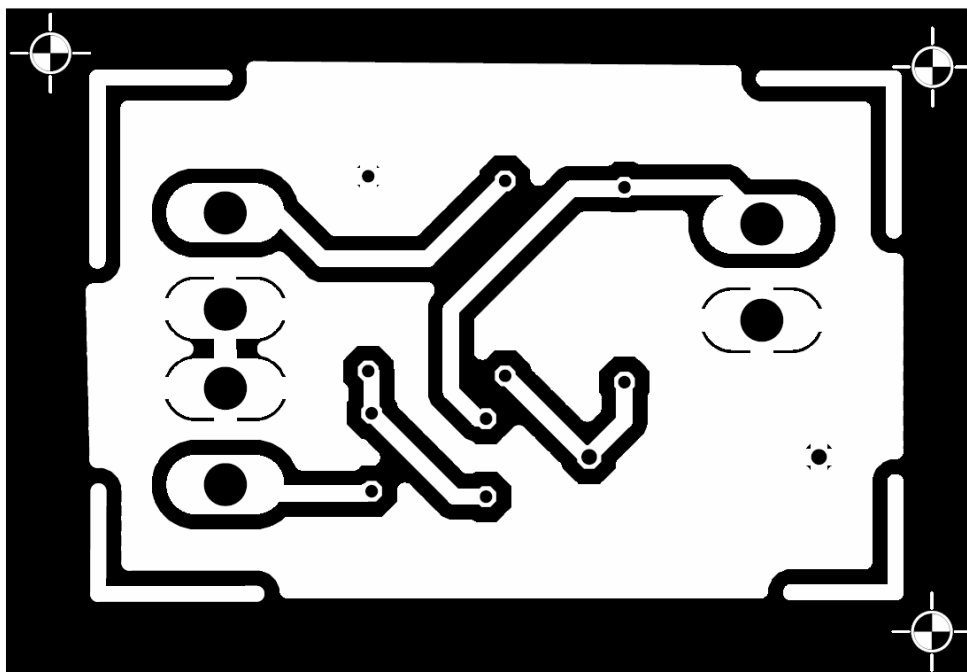
A	Obvodové řešení	36
A.1	Obvodové schéma LC slučovače	36
A.2	Deska plošných spojů – botton	37
B	Seznam součástek a materiálu	37
B.1	Seznam součástek	37
B.2	Seznam materiálu	38
C	Obrázky	38
C.1	POHLED DOVNITŘ KRABÍČKY	38
C.2	POHLED NA CELKOVOU ANTÉNU	39

A Obvodové řešení

A.1 Obvodové schéma LC slučovače



A.2 Deska plošných spojů – bottom



B Seznam součástek a materiálu

B.1 Seznam součástek

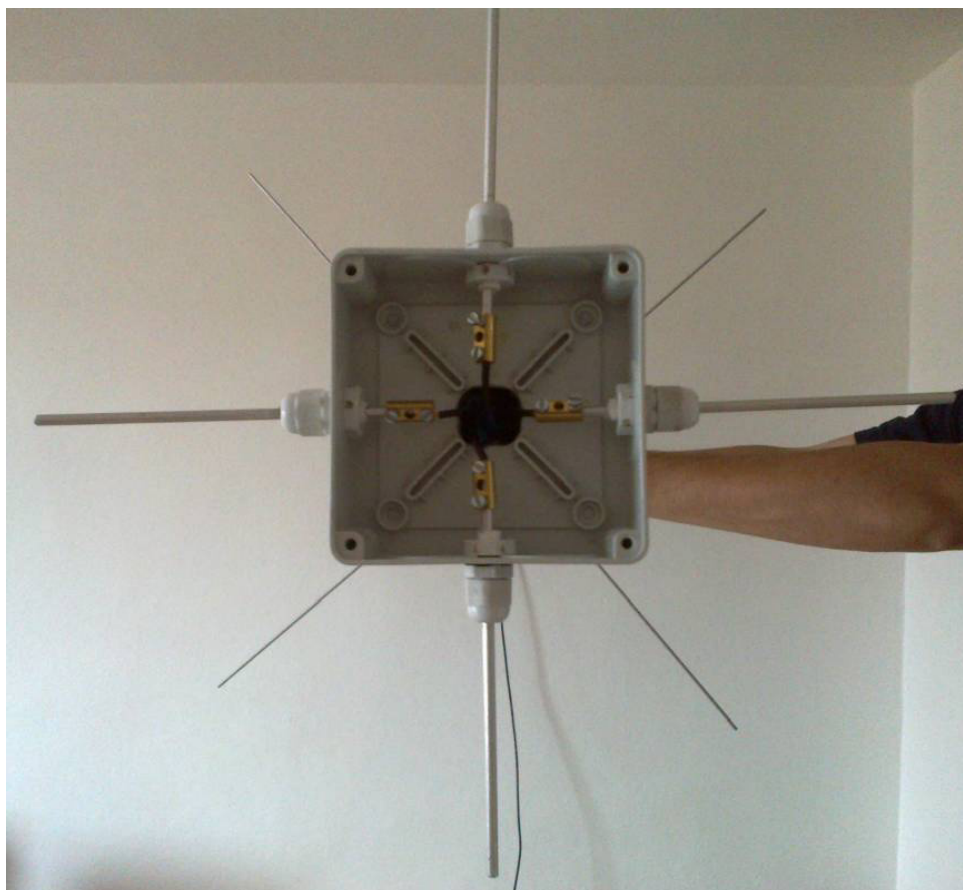
Part	Hodnota	Typ součástky
C1	24,8 pF	Svitkový kondenzátor
C2	10,7 pF	Keramický kondenzátor
C3	6,1 nF	Keramický kondenzátor
L1	50,5 nH	Vzduchová cívka
L2	73,2 nH	Vzduchová cívka
L3	46,3 nH	Vzduchová cívka

B.2 Seznam materiálů

Název	Typ	Délka/počet
Koaxiální kabel	RG 142B/U	0,5 m
Koaxiální kabel	RG 58C/U	2,5 m
Koaxiální kabel	RG 59B/U	1 m
Drát	Ø 0,5 cm	3 m
Svorkovnice	SVL 6,0	1 kus
Elektroinstalační krabička	LUCASYSTEM00846	2 kusy
Vývodky	Pg 7	8 kusů
Trubka	HTEM 40/1000	2 kusy

C Obrázky

C.1 POHLED DOVNITŘ KRABÍČKY



C.2 POHLED NA CELKOVOU ANTÉNU

