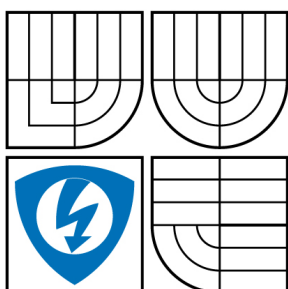




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

POČÍTAČOVÉ MODELOVÁNÍ PLANÁRNÍ LOGARITMICKO-PERIODICKÉ ANTÉNY

MODELING OF LOG-PERIODIC PLANAR ANTENNA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

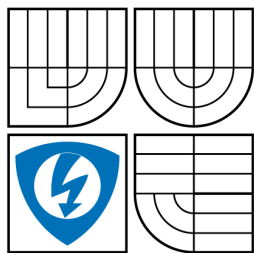
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VÍTĚZSLAV MARTIŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAROSLAV LÁČÍK, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Vítězslav Martiš

ID: 77701

Ročník: 3

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Počítačové modelování planární logaritmicko-periodické antény

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem logaritmicko-periodických antén. Svou pozornost zaměřte hlavně na planární variantu těchto antén. Seznamte se s programem Zeland IE3D a vše stručně popište. Dle požadavků vedoucího projektu navrhnete planární logaritmicko-periodickou anténu a tu modelujete v programu Zeland IE3D.

Diskutujte a navrhnete vhodný napájecí obvod pro navrženou anténu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

[2] DEL RIO, D. Characterization of Log Periodic Folded Slot Antenna Array. Diplomová práce. University of Puerto Rico. Dostupné na WWW: <http://grad.uprm.edu/tesis/delriodelrio.pdf>

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 5.6.2009

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Láčák, Ph.D.

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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO
uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan

Jméno a příjmení: Bc. Karel Malý
Bytem: Nuzířov 789, 77396, Nuzířov pod Novohrad-
skou Jevišovkou
Narozen (datum a místo): 23.5.1982, Brno

(dále jen autor)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství
se sídlem Technická 2896/2, Královo Pole, 61669, Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
Kdo podepíše licenci za fakultu

(dále jen nabyvatel)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☒ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Vliv dlouhého názvu závěrečné práce na zlom řádku, popis problému a návrh jednoduchého použitelného řešení
Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Rastafarián Brtka, DrSc.
Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Datum obhajoby VŠKP: neuvedeno

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v¹:

- ☐ tištěné formě — počet exemplářů 2
- ☐ elektronické formě — počet exemplářů fasfa

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

¹hodící se zaškrtněte

Čl. 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedeného díla nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☒ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením §47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Čl. 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

Nabyvatel

Autor

ABSTRAKT

Obsahem této práce je rozbor metody návrhu a simulace planární logaritmicko-periodické antény. Simulací byly ověřeny vlivy hlavních rozměrů antény na její funkci. Pomocí výsledků pak byla navržena vhodná anténa, včetně napájecího obvodu. Ta byla podrobena simulaci v programu IE3D, pracujícím integrální frekvenční metodou.

KLÍČOVÁ SLOVA

Planární logaritmicko-periodická anténa, analýza parametrická, integrální metoda, IE3D, koplanární vedení, impedanční transformátor, balun Double-Y.

ABSTRACT

The content of this work is a analysis of the project method and a simulation of planar logarithmically-periodic antenna. The simulation verified effects of main antenna-dimensions on her function. Through the use of results was designed acceptable antenna, inclusive of supply circuit. This was remitted to simulation-progress by the program IE3D, working in integral frequency method.

KEYWORDS

Planar logarithmically-periodic antenna, parametrize analyze, integrated method, IE3D, coplanar Lines, impedance taper, balun Double-Y

MARTIŠ, V. *Počítačové modelování planární logaritmicko-periodické antény*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2009. 41 s., 10 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Láčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Počítačové modelování planární logaritmicko-periodické antény, 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 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

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH.....	1
SEZNAM OBRÁZKŮ	2
SEZNAM TABULEK	4
ÚVOD	5
1 PLANÁRNÍ ANTÉNA	6
2 PLANÁRNÍ LOGARITMICKO-PERIODICKÁ ANTÉNA	7
2.1 VLASTNOSTI LOGARITMICKO-PERIODICKÝCH ANTÉN	7
2.2 PRACOVNÍ KMITOČET	8
2.3 REALIZACE ANTÉNY	9
2.4 PARAMETRY ANTÉN	10
3 ANALÝZA ANTÉN	11
3.1 ZELAND SOFTWARE, INC	11
3.1.1 IE3D	11
3.1.2 Fidelity	12
3.2 PRÁCE V MGRID	12
4 PARAMETRICKÁ ANALÝZA	13
4.1 ZMĚNA ROZMĚRŮ	13
4.1.1 Úhel a	13
4.1.2 Koeficient e	14
4.1.3 Koeficient t	15
4.1.4 Šířka pásku w	15
4.1.5 Vliv vnitřních prvků	16
4.1.6 Úhel b	16
5 VÝSLEDKY SIMULACÍ	17
5.1 BEZ NAPÁJECÍHO OBVODU	17
5.2 NAPÁJECÍ OBVOD ANTÉNY	20
5.3 VÝSLEDKY SIMULACE S NAPÁJECÍM OBVODEM	22
6 ZÁVĚR	26
7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A JINÝCH ZDROJŮ	28
8 SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	29
9 SEZNAM PŘÍLOH V ELEKTRONICKÉ PODOBĚ	31
10 PŘÍLOHA	34

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Základní typy planárních antén	6
Obr. 2 Rozměry a základní tvar PLPA	7
Obr. 3 Definování prostorových úhlů <i>Phi</i> a <i>Theta</i> pro grafy vyzařovacích charakteristik	10
Obr. 4 Tvary antén pro dané úhly α	14
Obr. 5 Vliv úhlu α na činitel odrazu (pro přizpůsobenou impedanci 250 Ω)	14
Obr. 6 Extrémní tvary antén pro zadané koeficienty ϵ	14
Obr. 7 Činitel odrazu pro extrémní koeficienty ϵ (pro přizpůsobenou impedanci 250 Ω)	14
Obr. 8 Extrémní tvary antén pro zadané koeficienty τ	15
Obr. 9 Vliv koeficientu τ na činitel odrazu (pro přizpůsobenou impedanci 250 Ω)	15
Obr. 10 Extrémní tvary antén pro různé šířky pásků dipólů	15
Obr. 11 Vliv šířky pásku dipólů w na činitel odrazu (pro přizpůsobenou impedanci 230 Ω)	15
Obr. 12 Anténa s vnitřními prvky a bez prvků	16
Obr. 13 Vliv vnitřních prvků na činitel odrazu (pro 250 Ω)	16
Obr. 14 Tvary antén pro dané úhly β	16
Obr. 15 Vliv úhlu β na činitel odrazu (pro přizpůsobenou impedanci 250 Ω)	16
Obr. 16 Výsledný tvar nejlepšího modelu, včetně hlavních kót v mm a s buňkovou sítí	17
Obr. 17 Činitel odrazu modelu antény pro přizpůsobenou impedanci 250 Ω	17
Obr. 18 Reálná a imaginární složka impedance antény v pásmu 3-25 GHz	17
Obr. 19 Poměr stojatých vln pro 3-25 GHz pro přizpůsobenou impedanci 250 Ω	17
Obr. 20 Maximální zisk antény pro pásmo 0-20 GHz	18
Obr. 21 Maximální směrovost antény pro pásmo 0-20 GHz	18
Obr. 22 Vyzařovací charakteristiky antény pro úhel $\Phi = 0^\circ$	18
Obr. 23 Prostorová vyzařovací charakteristika na kmitočtu $f = 3,4$ GHz	19
Obr. 24 Prostorová vyzařovací charakteristika na kmitočtu $f = 7,4$ GHz	19
Obr. 25 Prostorová vyzařovací charakteristika na kmitočtu $f = 9,9$ GHz	19
Obr. 26 Prostorová vyzařovací charakteristika na kmitočtu $f = 13,7$ GHz	19
Obr. 27 Prostorová vyzařovací charakteristika na kmitočtu $f = 16,0$ GHz	19
Obr. 28 Prostorová vyzařovací charakteristika na kmitočtu $f = 20,5$ GHz, včetně znázornění přesné polohy antény	19
Obr. 29 Sestava napáječe antény včetně naznačení impedancí v jednotlivých částech	20
Obr. 30 Impedanční transformátor IT1, včetně kót a diskretizační sítě pro analýzu	21
Obr. 31 Činitel odrazu IT1, kde port 1 je nastaven na impedanci 50 Ω a port 2 na impedanci 95 Ω	21
Obr. 32 Širokopásmový balun Double-Y	21
Obr. 33 Činitel odrazu balunu, kde port 1 je nastaven na impedanci 95 Ω a port 2 na impedanci 117 Ω	21
Obr. 34 Impedanční transformátor IT2	21
Obr. 35 Činitel odrazu IT2, kde port 1 je nastaven na impedanci 117 Ω a port 2 na impedanci 250 Ω	21
Obr. 36 Tvar přizpůsobené antény	22
Obr. 37 Činitel odrazu antény při přizpůsobení vstupní impedance 50 Ω ,	

pro pásmo 0-20 GHz.....	23
Obr. 38 Průběh reálné a imaginární složky vstupní impedance antény pro pásmo od 4-16 GHz.....	23
Obr. 39 Poměr stojatých vln na anténě při přizpůsobení vstupní impedance 50 Ω pro pásmo 4-16 GHz	23
Obr. 40 Maximální zisk antény pro pásmo 0-16 GHz	23
Obr. 41 Maximální směrovost antény pro pásmo 0-16 GHz	23
Obr. 42 Postupný „vznik“ směru zisku antény na kmitočtu 4,1 GHz	24
Obr. 43 Postupný „zánik“ směru zisku antény na kmitočtu 12,3 GHz	24
Obr. 44 Prostorová vyzařovací charakteristika na kmitočtu $f = 4,0$ GHz	25
Obr. 45 Prostorová vyzařovací charakteristika na kmitočtu $f = 4,1$ GHz	25
Obr. 46 Prostorová vyzařovací charakteristika na kmitočtu $f = 4,3$ GHz	25
Obr. 47 Prostorová vyzařovací charakteristika na kmitočtu $f = 5,4$ GHz.....	25

Obr. P1 Vyzařovací charakteristika antény na kmitočtu 4,3 GHz

Obr. P2 Vyzařovací charakteristika antény na kmitočtu 5,5 GHz

Obr. P3 Vyzařovací charakteristika antény na kmitočtu 7,8 GHz

Obr. P4 Vyzařovací charakteristika antény na kmitočtu 10,2 GHz

Obr. P5 Vyzařovací charakteristika antény na kmitočtu 12,3 GHz

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Doporučené mezní hodnoty PLPA	8
Tab. 2 Zadání parametrů antény, pro první model, dle obr. 2	9
Tab. 3 Zadání parametrů antény, pro nejlepší model antény bez napáječe	17

ÚVOD

Před samotným řešením práce o anténách, je vhodné připomenout si první pokusy, patenty, bez kterých by slovo „anténa“ nemělo význam.

Zajímavostí je, že první bezdrátový přenos neuskutečnil Marconi Guglielmo, nýbrž pan Morse, a to již v roce 1842. Stalo se to, když chtěl dokázat, že dráty ponořené pod hladinou moře, můžou přenášet telegrafní signál. Právě během pokusu, mu ale dráty pod vodou přetrhala jedna z lodí. Ovšem i přesto se přenos slanou vodou uskutečnil. S nadsázkou se dá říct, že se jednalo o první bezdrátový přenos. Samozřejmě ne s pomocí elektromagnetických vln. Teprve roku 1864 zveřejnil James Clerk Maxwell teorii o spojitosti elektřiny, magnetismu a světla jako vlnového záření.

Následuje mezní rok 1888, kdy vědec Heinrich Hertz potvrdil Maxwellovu teorii a experimentálně dokázal existenci elektromagnetických vln. Nicméně patent na rádiový přenos získal v roce 1897, již zmiňovaný pan Marconi a roku 1901 překlenul bezdrátově oceán pomocí elektromagnetických vln.

Uplynulo století a prostředí je přeplněno elektromagnetickými vlnami. Život bez mobilního telefonu je pro mnohé, stěží představitelný, propojovací kabely počítačových sítí se nahrazují volným prostorem, brány otevíráme ovladačem, z interiéru vozidel, atd. Lze předpokládat, že bezdrátová technologie zažívá renesanci. Pro potřebu miniaturizace zařízení vznikly nové typy malých, plošných antén. Vynikají rozměry, lacinou a reprodukovatelnou výrobou a možnostmi použití. Planární antény se často ladí hlavními rozměry a nelze je přesně předem definovat. K posouzení vlastností navržené antény slouží návrhové programy. Jedná se o matematické simulátory elektromagnetického pole, které ozáří anténu a sledují její chování. Simulátory vypočítají veškeré parametry antén, struktur, ale i vlnodů a rezonátorů.

Cílem této práce je řešení návrhu planární logaritmicko-periodické antény a její analýza v programu IE3D. V práci uvádím důležité kroky pro správné zadání antény a nastavení simulací v programu IE3D. Před samotným návrhem nejprve zjistím pomocí postupných analýz vliv geometrických parametrů antény na její vlastnosti. Sledovat budu průběh činitele odrazu. Z výsledků vytvořím nejlépe pracující anténu, tu podrobím hlubší analýze a zjistím její vlastnosti bez napájecího obvodu. Při simulaci s napájecím obvodem, by nebyla zajištěna správná funkce antény a vhodné impedanční přizpůsobení.

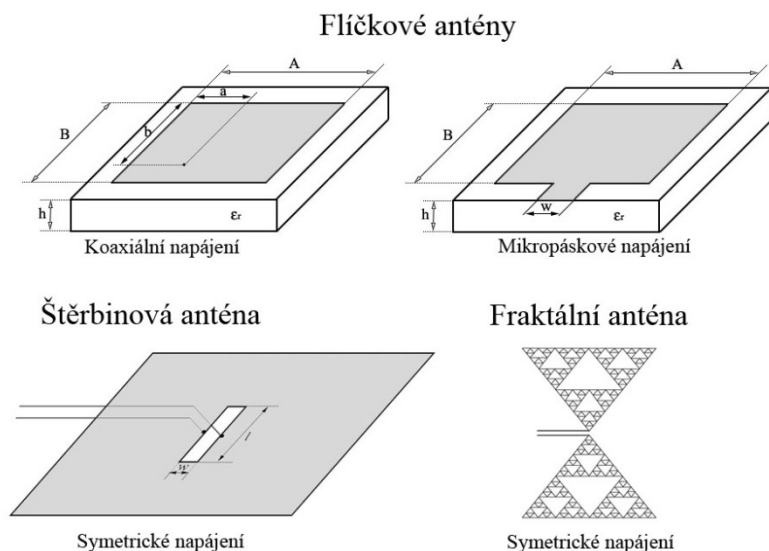
Napáječ antény sestavím z lineárních impedančních transformátorů, na základě rozšiřování koplanárního vedení CPS a CPW a z širokopásmového balunu. Balun použiji *Double-Y*, s motivem na jedné straně substrátu. Napáječ navrhnu pro připojení koaxiálního kabelu s impedancí $50\ \Omega$. Jednotlivé části napájecího obvodu (impedanční transformátory, balun) budu analyzovat zvlášť, pro zajištění nejlepšího impedančního přizpůsobení.

V posledním kroku nasimuluji celou anténu včetně napáječe a zjistím skutečnou použitelnost antény, napájené koaxiálním kabelem.

1 PLANÁRNÍ ANTÉNA

Již před 60. lety se na světě objevil návrh planární (plošné) antény. Jednalo se o jednoduchý vryp do desky tištěného spoje. Vzniklá štěrbina, osazená napáječem, zářila do prostoru nad deskou antény. Modifikací základní ideje vznikla celá řada planárních typů antén.

Základní, nejjednodušší a nejpoužívanější planární anténa je flíčková (obr. 1). Skládá se převážně z čtvercové, nebo obdélníkové vodivé vrstvy nanesené na dielektrický substrát.



Ten je definován permitivitou ϵ_r , tloušťkou h a ztrátovým činitelem $tg\delta$. Substrát se volí dle použití antény a měl by vykazovat co nejmenší ztráty. Spodní vrstva tohoto substrátu, je celá pokovená a tvoří zemní odrazovou desku antény - reflektor. Anténa proto září jenom do prostoru nad flíčkem. Rozměry čtvercového flíčku (angl. patch - časté označení antény) odpovídají přibližně poloviční vlnové délce.

Obr. 1 Základní typy planárních antén

Výhodou planárních antén je jejich jednoduchá, lehce reprodukovatelná a levná výroba, malé rozměry a možnost přímého spojení s monolitickými integrovanými obvody bez použití konektorů, nebo symetrizačních prvků, které ovlivňují vlastnosti antén. Jednoduché je i doplnění antény o aktivní prvky. Antény lze snadno napájet mikropáskovým vedením, které lze jednoduše impedančně i symetricky přizpůsobit napáječi. Mikropáskové vedení je výhodné zejména při sestavování flíčků do maticových polí. Jiný způsob napájení umožňuje připojení koaxiálního napáječe do impedančně přizpůsobených míst na ploše antény.

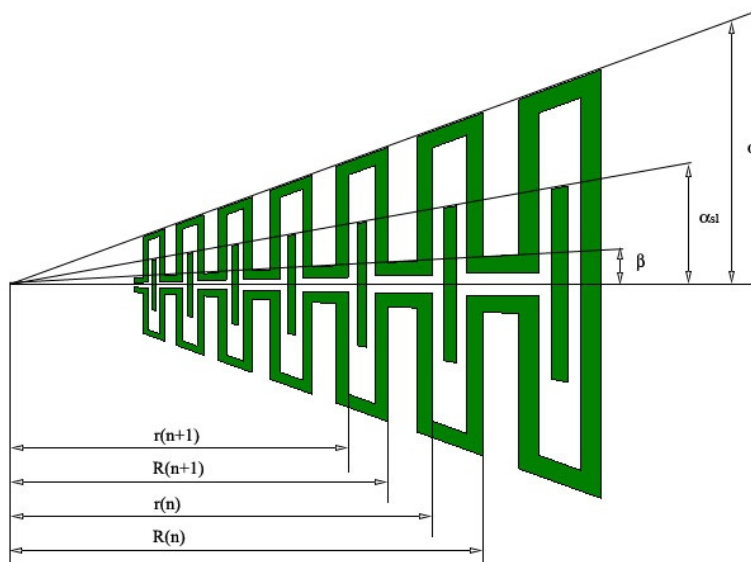
Nedostatkem planárních antén je malý zisk a malý vysílací výkon. Zvětšení zisku antén se řeší skládáním jednotlivých aparatur do maticového pole. Propojení mezi nimi je jednoduché, uskutečňuje se mikropáskovým, rozvětvovaným vedením.

Variací planárních antén vzniká celá řada typů, kde návrh motivu směřuje k vylepšení vlastností, zejména pak širokopásmovosti a směrovosti. Pro širší pracovní spektrum antén se výhodně uplatňují antény fraktální. Jedná se o motiv, kde se jednotlivé dílčí prvky opakují a to v různém měřítku. Tím se jednotlivé prvky ladí na svoji pracovní frekvenci a tak vzniká široké spektrum. Na stejném principu je založena i anténa logaritmicko-periodická. Je složena z dipólů různých, přesně daných, délek. Planární logaritmicko-periodická anténa se často používá v sestavách čtyř, pyramidálně seskupených antén, nebo bývá součástí konvektorů u parabolických antén.

2 PLANÁRNÍ LOGARITMICKO-PERIODICKÁ ANTÉNA

2.1 VLASTNOSTI LOGARITMICKO-PERIODICKÝCH ANTÉN

Planární logaritmicko-periodické antény (dále PLPA) jsou konstruovány postupným skládáním řady dipólů (obr. 2).



Obr. 2 Rozměry a základní tvar PLPA

Celá anténa je matematicky definována pomocí koeficientů daných rovnicemi (1) a (2), viz [1] a odpovídajícími úhly a , b a a_{SL} :

$$\tau = \frac{R(n+1)}{R(n)} = \frac{r(n+1)}{r(n)}, \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{r(n)}{R(n)}. \quad (2)$$

Příčné rozměry těchto dipólů tvoří geometrickou řadu s koeficientem t . Příspěvky lineárně posunutých rezonancí dipólů, určují její širokopásmovost. Tím vykazují stejné, opakující se vlastnosti, v celém pracovním pásmu. Vstupní impedance se periodicky mění s logaritmem kmitočtu s periodou $\log(1/t)$ a dvojnásobnou periodou se mění i perioda změny diagramu záření, viz [3].

Ozářením skládaných dipólů vzniká na anténě tzv. aktivní oblast. Jedná se o oblast, kde má pole stejnou orientaci fáze. Tato aktivní oblast zasahuje, u úzce směrových antén, oblast jednoho dipólu, u širších směrových antén se aktivní oblast rozšiřuje přes několik dipólů. Změnou pracovního kmitočtu se tato oblast po dipólech posouvá.

Motiv antény lze různě modifikovat, s dodržením mezních hodnot parametrů t a e a úhly a a b , viz tab.1. Mezní hodnoty jsou převzaty z lit. [3].

Rozměr	od	do
t [-]	0,58	0,9
e [-]	$\sqrt{\tau}$	
a [°]	15	35
a_{SL} [°]	$0,33\alpha$	$1,5\alpha$
b [°]	$0,33\alpha$	

Tab. 1 Doporučené mezní hodnoty PLPA

2.2 PRACOVNÍ KMITOČET

Pro nastavení antény do správného kmitočtového rozsahu jsou nejdůležitější parametry, příčné rozměry krajních dipólů. Horní kmitočtové pásmo f_{MAX} je omezeno rozměrem nejkratšího dipólu l_{MIN} , viz [1]. Jeho délka odpovídá polovině vlnové délky l_{MIN}

$$l_{MIN} = \frac{\lambda_{MIN}}{2}. \quad (3)$$

Protože je anténa na dielektrické vrstvě, musí se počítat s délkou vlny l_{MIN} v substrátu, který vykazuje permitivitu ϵ_r a je dána jako

$$\lambda_{MIN} = \frac{\lambda_{0MIN}}{\sqrt{\left(\frac{\epsilon_0 + \epsilon_r}{2}\right)}}, \quad (4)$$

kde l_{0MIN} je délka vlny ve vzduchu, pro maximální pracovní kmitočet f_{MAX} , ϵ_0 permitivita vzduchu a poté je

$$\lambda_{0MIN} = \frac{c}{f_{MAX}}, \quad (5)$$

kde $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ je rychlost světla.

Stejně tak dolní kmitočet je dán polovinou vlnové délky nejdelšího dipólu.

Šířka pásma je tak definována délkou nejkratšího dipólu a délkou nejdelšího dipólu. Abychom dosáhli plynulejší impedance v celém pásmu, použijeme více dipólů. Tím se rozšíří aktivní oblast přes více dipólů a impedance antény bude mít ideálnější průběh. Pro běžnou praxi však stačí empirický vzorec pro výpočet počtu dipólů n , viz [1] definovaný jako:

$$n = \frac{\log\left(\frac{f_{MIN}}{f_{MAX}}\right)}{\log \tau} + 1. \quad (6)$$

2.3 REALIZACE ANTÉNY

Motiv antény je nanesen na dielektrický materiál ARLON 25N, který má tloušťku $h = 0,7878$ mm, relativní permitivitu $\epsilon_r = 3,24$ a ztrátový činitel $\text{tg}\delta = 0,0025$ pro 1 GHz. V mém případě není na druhé straně dielektrika kovová zemní plocha, anténa proto bude zářit na obě strany, na rozdíl, např. od flíčkových antén, kde zemní deska brání záření pod motiv antény.

Rozměry krajních dipólů antény pro rozsah 3 GHz až 12 GHz, při použití substrátu s permitivitou $\epsilon_r = 3,24$ jsou:

$$l_{MIN} = 0.5 \cdot \frac{\frac{c}{f_{MAX}}}{\sqrt{\left(\frac{\epsilon_0 + \epsilon_r}{2}\right)}} = 0.5 \cdot \frac{\frac{3 \cdot 10^8}{12 \cdot 10^9}}{\sqrt{\left(\frac{8.85 \cdot 10^{-12} + 3.24}{2}\right)}} = 9.76 \text{ mm} , \quad (7)$$

$$l_{MAX} = 0.5 \cdot \frac{\frac{c}{f_{MIN}}}{\sqrt{\left(\frac{\epsilon_0 + \epsilon_r}{2}\right)}} = 0.5 \cdot \frac{\frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^9}}{\sqrt{\left(\frac{8.85 \cdot 10^{-12} + 3.24}{2}\right)}} = 39.04 \text{ mm} . \quad (8)$$

Pro daný rozsah kmitočtů a volbě $\tau = 0.8$ bude přibližný počet dipólů roven dle vzorce (6):

$$n = \frac{\log\left(\frac{f_{MIN}}{f_{MAX}}\right)}{\log \tau} + 1 = \frac{\log\left(\frac{3 \cdot 10^9}{12 \cdot 10^9}\right)}{\log 0.9} + 1 = 7.2 \text{ dipólů} . \quad (9)$$

I přes dodržení doporučených rozmezí parametrů antény, dle tab. 1, se může stát, že nám podle vzorce (6) nebude odpovídat počet dipólů n vzhledem k šířce pásma a úhlu α . Poté platí pravidlo zhotovení více dipólů a podle potřeby výsledků analýzy počet redukovat.

První model antény navrhují dle doporučujících hodnot. Parametry jsou uvedeny v tab. 2. Poslouží jako výchozí stav antény, ze kterého budu provádět parametrickou analýzu v kapitole 4.

ϵ_r [-]	h [mm]	t [-]	e [-]	a [°]	b [°]	w_1 [mm]
3,24	0,7878	0,8	0,8944	20	10	0,5

Tab. 2 Zadání parametrů antény, pro první model, dle obr. 2

ϵ_r .. permitivita substrátu

h výška substrátu

w_1 ... šířka prvního (nejmenšího) dipólu

2.4 PARAMETRY ANTÉN

Parametr s_{11}

Vstupní napěťový činitel odrazu (dále pouze činitel odrazu). Definuje velikost kvality přizpůsobení antény vzhledem k napájecí. Protože se jedná o kmitočtově závislou veličinu, je zobrazována graficky. Je vždy menší než 1 ($s_{11} < 1$). Nejčastěji se přepočítává na decibelovou hodnotu, která je daná jako

$$s_{11dB} = 20 \cdot \log s_{11}. \quad (10)$$

Je-li vyjádřena v dB , je vždy menší než 0 ($s_{11dB} < 0$) a čím zápornějších hodnot dosahuje, tím je lepší přizpůsobení antény. Optimální přizpůsobení širokopásmové antény je pod hodnotou -10 dB.

Poměr stojatých vln (PSV)

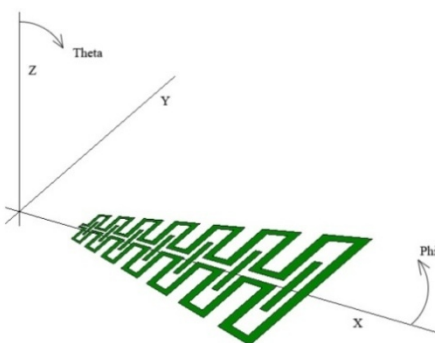
S činitelem odrazu souvisí i parametr poměru stojatých vln (anglická zkratka - *VSWR* - *Voltage Standing Wave Ratio*). Je definován jako

$$PSV = VSWR = \frac{1+s_{11}}{1-s_{11}}. \quad (11)$$

Ideální přizpůsobení je definováno pro $PSV = 1$, reálné hodnoty pro přijímací antény jsou $1,3 < PSV < 4$.

Vyzařování antény

Kmitočtově závislé, grafické podání funkce záření antény v řezu roviny, daných úhly θ a ϕ (značení θ a ϕ zanechávám protože jsou tak i zaznačeny v grafech programu IE3D).



Obr. 3 Definování prostorových úhlů ϕ a θ pro grafy vyzařovacích charakteristik

Velikost úhlu θ určuje odklon od osy z k ose x a ϕ odklon od osy x k ose y viz. obr. 3. Nejčastější grafické podání je pro $\phi = 0^\circ$, nebo 90° a $\theta = 90^\circ$. Grafy záření antén, jsou pouze pro $\phi = 0^\circ$, se středem v počátku souřadnic ($x=0, y=0, z=0$), v polárních souřadnicích.

Zisk

Je definován jako čtverec poměru intenzity elektrického pole měřené antény, k intenzitě elektrického pole referenční antény, ve stejném místě, napájené stejným výkonem. Referenční anténou může být izotropická anténa, nebo půlvlnný dipól. Podobně lze zisk popsát i jako součin směrovosti antény a účinnosti vyzařování vůči izotropické anténě.

Šířka pásma

Je dána rozmezím pracovních kmitočtů, kdy některý charakteristický parametr antény překročí určitou velikost. Nejčastějším kritériem je vstupní činitel odrazu. Ale může to být i zisk, vstupní impedance, atd.

3 ANALÝZA ANTÉN

Protože má anténa spoustu parametrů, které ovlivňují její vlastnosti, je důležitým krokem, před výrobou, její analýza a zjištění výsledných parametrů. Dostupné programy dokážou vypočítat všechny důležité parametry antén. A to nejenom planárních, ale i klasických antén, nebo vlastnosti vlnovodů. Rozhodující výsledky pro modelování budou, již zmíněné parametry:

činitel odrazu s_{11} , poměr stojatých vln (*PSV*), vyzařování antény a šířka pásma.

Při analýze antén se řeší soustava Maxwellových rovnic, s počátečními okrajovými podmínkami. Pro řešení této soustavy rovnic se používají různé typy numerických metod podle toho, v jakém tvaru jsou Maxwellovy rovnice. Pokud jsou v diferenciálním tvaru, tak je možné použít metodu konečných diferencí, nebo konečných prvků. Pokud je ale soustava Maxwellových rovnic v integrálním tvaru, tak se pro jejich řešení používám metoda momentů. Dále je možné toto řešení provést ve frekvenční nebo časové oblasti.

3.1 ZELAND SOFTWARE, INC.

Společnost Zeland Software, Inc. vyvinula během 16 let sadu programů pro analýzu struktur diferenční i integrační metodou a to jak v časové, tak i ve frekvenční oblasti. Nejpoužívanější jsou IE3D a Fidelity.

3.1.1 IE3D

Programy IE3D jsou založeny na integrační vlnové elektromagnetické simulaci a optimalizaci, pro analýzu a modelování trojrozměrných a planárních mikrovlnných struktur, MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits), RFIC (Radio Frequency Integrated Circuits), RFID (Radio Frequency Identification), antén, digitálních obvodů a HS-PCB (High Speed - Printed Circuit Boards), převzato z [8]. Při simulaci se diskretizuje vrstva na struktuře do sítě buněk.

Součástí souboru IE3D jsou programy:

- § MGrid - hlavní program pro modelování struktur, definování vrstev, rozměrů, parametrů simulací a samotný výpočet
- § Modua - zobrazuje volitelné grafy z vypočtených simulací.
- § CurView - zobrazuje proudové rozložení na strukturách
- § PatternView - zobrazuje vyzařovací charakteristiky struktur do definovaných rovin daných směry úhlů *Theta* a *Tau*
- § ZDibAnimator - vytváří animace proudových rozložení v čase
- § Ie3DLibrary - projektový manažer

3.1.2 Fidelity

Program Fidelity - trojrozměrný elektromagnetický simulátor, založený na výpočtech v konečné diferenční časové i kmitočtové (FDTD) oblasti, převzato z [9]. Součástí souboru Fidelity jsou některé stejné programy jako v IE3D a to zejména pro zobrazování výsledků. Simulace ve Fidelity je několikanásobně delší jak u IE3D. Je to dáno tím, že se na výsledcích podílí i prostor nad strukturami. Ten je také pro simulaci diskretizován sítí buněk a počítá se s každým příspěvkem.

3.2 PRÁCE V MGRID

Zevrubně zde uvedu několik důležitých kroků, vedoucích ke správné simulaci. V souboru IE3D je hlavní program MGrid, kde se celá sestava vymodeluje, nastaví se parametry simulací a simulace se spustí.

Prvotní kroky spočívají v nastavení jednotlivých vrstev antény. *Metallic Strip* je předem definován pro kovovou plochu antény. Dielektrické vrstvy se skládají na sebe podle souřadnic *z*. Neopomíjí se vrstva vzduchu ($\epsilon_r = 1$) definována až do maximální *z*-ové souřadnice. U dielektrických vrstev se nastavují jejich relativní permitivity, *z*-ové souřadnice a ztrátový činitel $\tan\delta$.

Podle poznámek v části 2.2 jsem vytvořil jednoduchý výpočetní program pro Matlab (program je součástí elektronické přílohy), kde zadám vstupní rozsah vlnových délek, některé důležité parametry a skript vypočítá a vypíše souřadnice jednotlivých bodů antény. Jedná se o matematické vyjádření antény pomocí funkcí tangens a úhlů *a*, *a_{sl}*, *b*. Souřadnice lze jednoduše zadat do programu MGrid, kde se vykreslí do podoby antény na obr. 2. Jedná se o funkci *Create and Edit Vertices*. Tím je motiv antény navržený a musí se nastavit budící porty. V případě napáječe koaxiálním kabelem, např. přes konektor, je port uprostřed pozitivní a porty na zemních plochách jsou negativní. Tím je anténa připravená k simulaci.

Po stisku tlačítka *Simulation*, se objeví okno, kde je důležité nastavit maximální měřící kmitočet (*Meshing Freq*), optimální počet buněk na vlnovou délku (*Cells/Wavelength*) a rozsah kmitočtů, na kterých bude měření provedeno. Pro hlavní simulaci volím maximální kmitočet 16 GHz, dále pak 17 Cells/Wavelength a 200 měřících bodů kmitočtu. Po výběru dalších simulací, se nastavují okna s jejich parametry.

Výstupní soubory výsledků se ukládají s příponami pro:

- § proudové rozložení na struktuře s příponou *.cur
- § vyzařovací charakteristiky s příponou *.pat
- § uložení s-parametrů do souborů *.sp

Po simulaci se otevřou programy s jednotlivými výsledky, kde lze volit, jaké parametry chceme zobrazit. Při optimalizaci je simulace delší, probíhá totiž mezi jednotlivými změnami geometrických tvarů. Výhodou je, že se každá simulace uloží zvlášť (pro případné pozdější nahlédnutí).

4 PARAMETRICKÁ ANALÝZA

Než přistoupím k modelu antény s dobrými vlastnostmi, provedu tzv. parametrickou analýzu. Na základní anténě, bez napájecího obvodu, budu měnit její hlavní rozměry. Pro všechny změny vysleduji vliv na výsledky činitele odrazu. Při současné změně jednoho rozměru nebudu měnit další, důležité je poznat vliv změny. Každá změna rozměrů bude u výsledných grafů označená, zbylé jsou dány v tab. 2. Grafické výsledky všech optimalizací uvedeny nebudou. Pro přehlednost budou uvedeny pouze rozhodující výsledky do jednoho grafu. Na základně hodnocení parametrické analýzy vytvořím v další kapitole anténu, která by odpovídala nejlepším výsledkům a provedu její analýzu včetně volby napáječe.

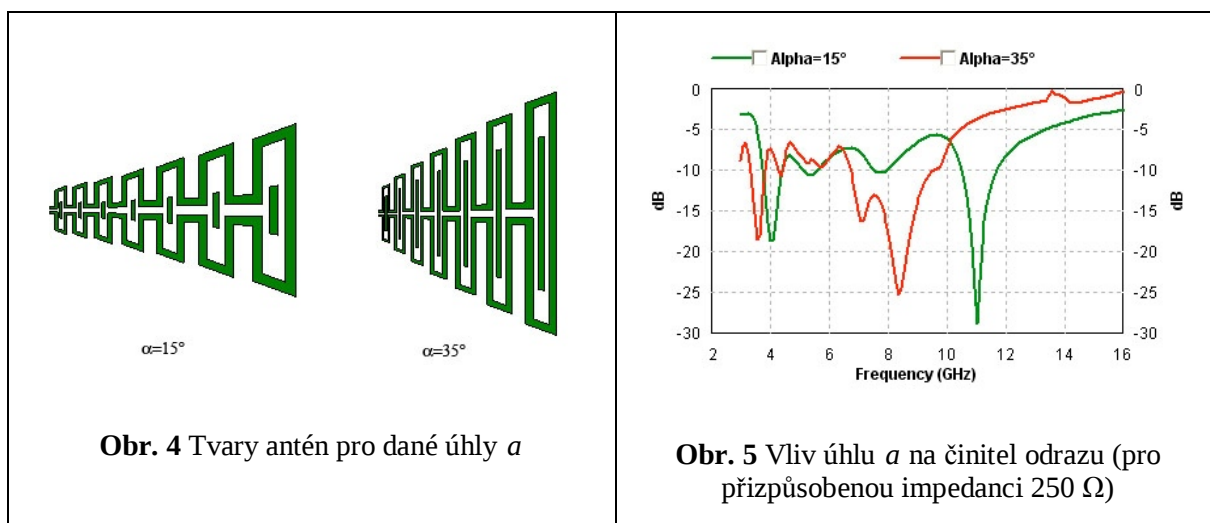
Veškeré simulace parametrických analýz jsou provedeny pro 200 kmitočtů v rozsahu 3 GHz až 16 GHz. Na daný rozsah volím pouze 10 buněk na vlnovou délku, vzhledem k časové náročnosti a k tomu, že výsledky jsou pouze ilustrativní. Stačí vysledovat vliv parametrů. U analýzy v následující kapitole již použiji doporučený počet od výrobce programu Zeland Inc., a to 17 buněk na vlnovou délku.

4.1 ZMĚNA ROZMĚRŮ

Pro pochopení významu koeficientů a rozměrových parametrů antény, je užitečné zjistit jejich vlivy na vlastnostech antény. Parametrickou analýzu provedu na úhlech a , b , koeficientech e a t , šířce pásků antény a zjistím vliv vnitřních prvků uprostřed dipólů. Sledovat budu změny činitele odrazu a budu hledat nejlepší průběhy. Změny rozměrů se nebudou provádět přepočtem souřadnic, což je časově náročné a navíc by docházelo ke změnám všech souřadnic, nýbrž změnou geometrie v programu MGrid.

4.1.1 Úhel a

Pro modifikaci rozměrů motivu antény je program MGrid vybaven funkcí *Geometry Tuning*, kde lze měnit souřadnice vyznačených bodů. Změnu polohy lze nastavit pro jakýkoli úhel, a to i v měřítku. Toho lze jednoduše využít při modifikaci úhlu a . Nejdelší dipól je prodloužen maximálně a následovně jsou zvětšovány v měřítku. Program provede nastavenou simulaci v několika krocích a jednoduše zobrazí v reálném čase, tvar antény, výsledek simulace a posuvný ukazatel pro modifikaci tvaru.

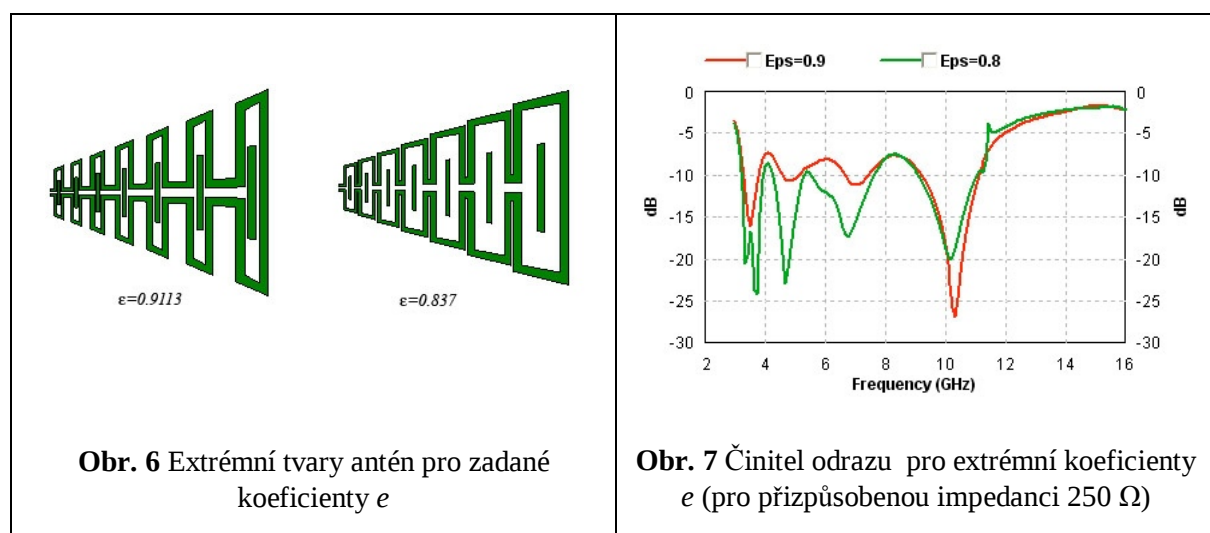


Na obr. 4 jsou dva extrémy, s maximální velikostí úhlu $\alpha = 35^\circ$ (červená křivka obr. 5) a s minimální velikostí úhlu $\alpha = 15^\circ$ (zelená křivka obr. 5). Z výsledků je patrný zásadní vliv úhlu α . Při jeho zmenšování, se fyzické délky dipólů zkracují, taktéž i vlnové délky a anténa tak vyniká na vyšších kmitočtech. Tím dochází i k rozšíření pracovních kmitočtů.

Optimálnější je anténa s menším úhlem α .

4.1.2 Koeficient e

Podobně jako u změny úhlu α , lze i změnu koeficientu e , simulovat pomocí funkce *Geometry Tuning*. Provede se zmenšování mezer mezi dipóly, aniž by se měnily hlavní rozměry antény. Simulace je provedena pro extrémní hodnoty koeficientů e , a to od 0,9113 do 0,837 (více by daný tvar antény neumožnil, viz. obr. 6). Koeficient e určuje šířky dipólů při zachování jejich distančních vzdáleností.

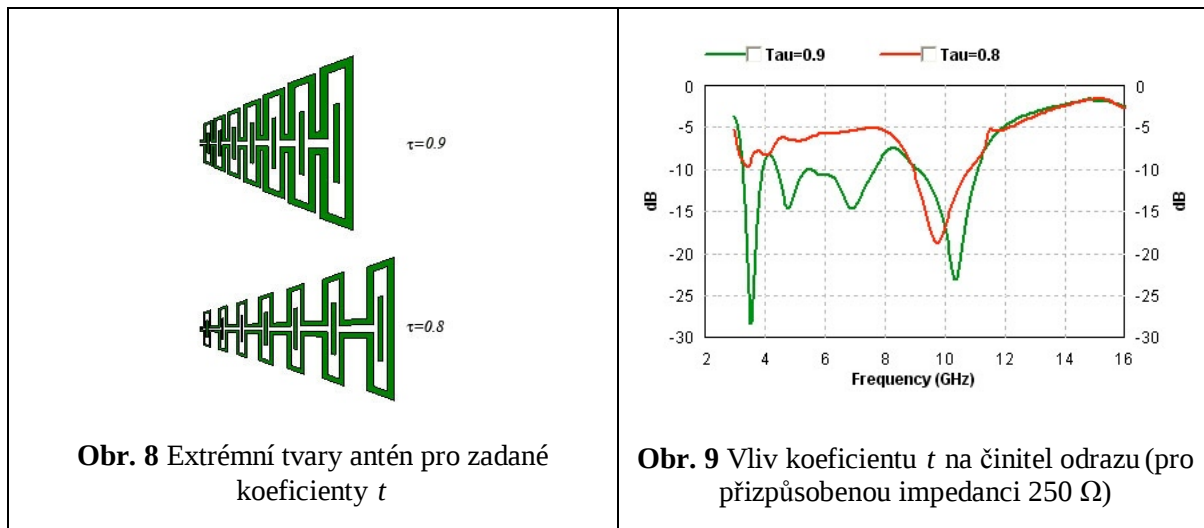


Při analýze vlivu extrémních hodnot koeficientu e jsou výsledky činitele odrazu lepší u antény se širokými dipóly (obr. 7). Šířka pásma se nezměnila, což je dáno zachováním podélných rozměrů dipólů.

Optimálnější anténa bude s menším e .

4.1.3 Koeficient t

Koeficient t určuje distanční vzdálenosti mezi dipóly. Opět se bude měnit pomocí funkce *Geometry Tuning* v rozmezí od 0,9 do 0,8, viz obr. 8.

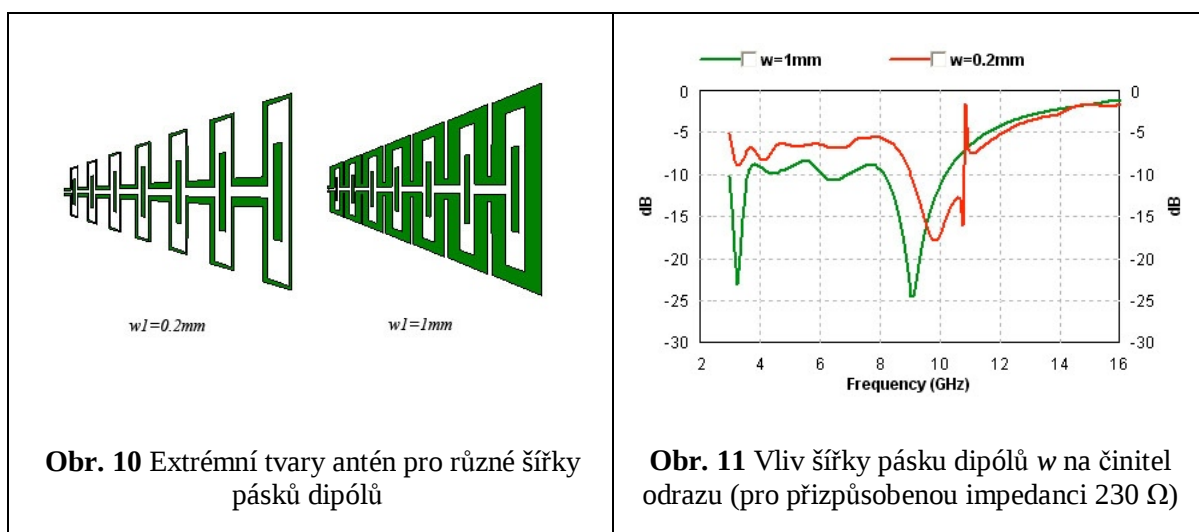


Koeficient t má zásadní vliv na činitel odrazu. Při analýze antény pro $\tau = 0,9$ se činitel odrazu zlepšil až o 4 dB. Aktivní oblast vznikající mezi dipóly je lépe vázaná na dipólech, které jsou blíže sebe.

Optimální anténa by měla mít koeficient t , vzhledem k rozměrům, větší.

4.1.4 Šířka pásku w

Důležitým parametrem je šířka pásku antény w . Uvedené hodnoty šířky w_1 jsou pro první, nejmenší dipól. Následující dipóly mají šířku (t^{-1})-krát větší. Při analýze se bude měnit pouze šířka dipólů. Šířka vnitřních reflektorů a vodorovných napáječů dipólů se při analýze nemění (obr. 10).

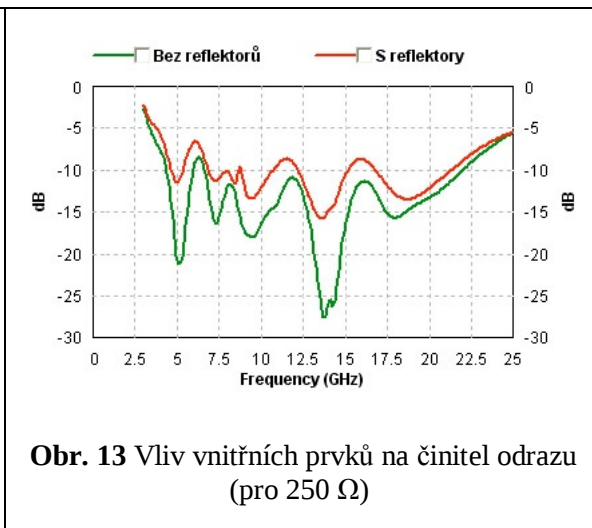
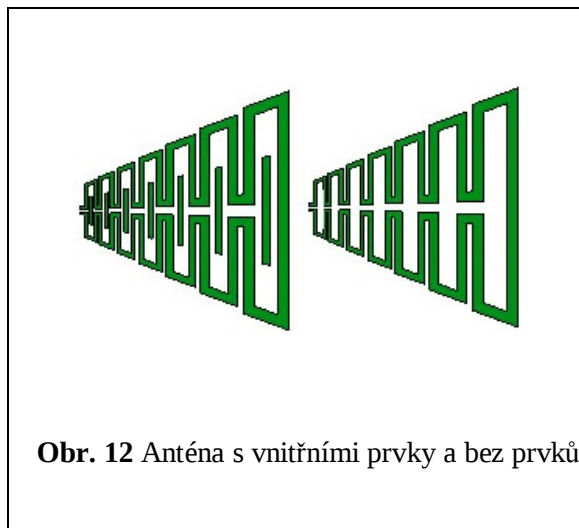


Z výsledků je patrné, že anténa se širšími pásy má lepší činitel odrazu až o 4 dB (obr. 11). Šířka pásů má také zásadní vliv na impedanci antény. Úzké pásy vykazují větší impedanci, zatímco širší i o polovinu menší, což je další výhoda pro přiblížení hodnoty

impedance k impedanci koaxiálního kabelu. Optimální anténa by měla mít šířku prvního dipólu kolem 0,8 mm.

4.1.5 Vliv vnitřních prvků

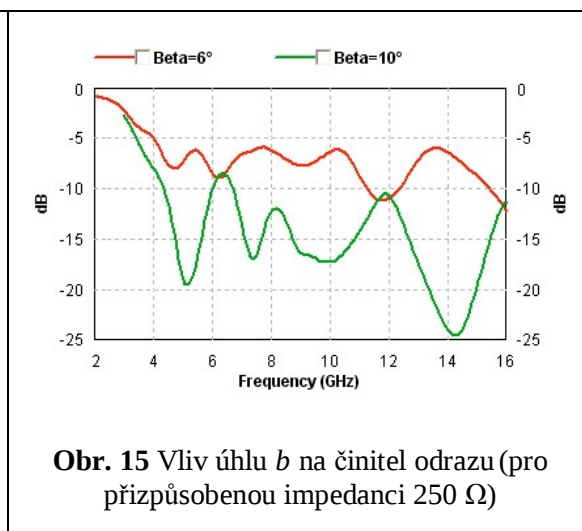
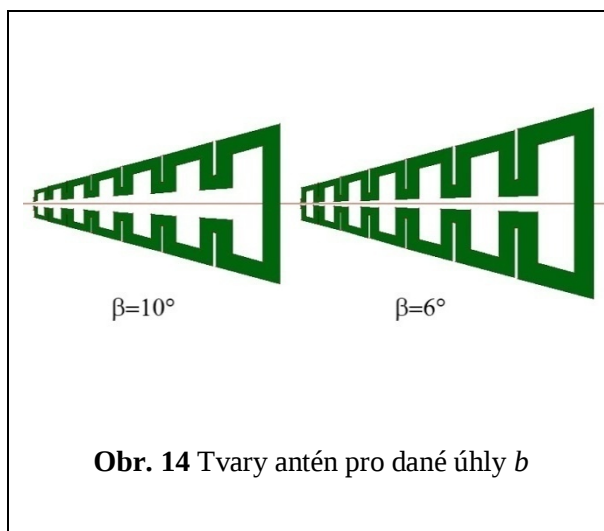
Dalším krokem analýzy je zjistit vliv vnitřních prvků (obr.12). Literatura [1] udává, že vnitřní prvky pomáhají stabilizovat činitel odrazu.



Z průběhu činitele odrazu je vidět, že lepšího parametru dosahuje anténa bez prvků uvnitř (obr. 13). Jedná se o pokles o 4 dB v celém frekvenčním pásmu, což přináší značnou výhodu. Optimální anténa by měla být bez vnitřních prvků.

4.1.6 Úhel b

Simulace pro změnu úhlu b je již provedena na optimalizované anténě bez vnitřních prvků.



Z průběhu činitele odrazu je patrný zásadní vliv úhlu b na přizpůsobení antény. Celkové zlepšení činitele odrazu je až 7 dB (obr. 15) s anténou, která má větší rozestup ve vnitřní části.

Optimální anténa by měla mít úhel $b = 10^\circ$. Větší úhel již zhoršuje parametr činitele odrazu s_{11} obdobně pak antény s menším úhlem b .

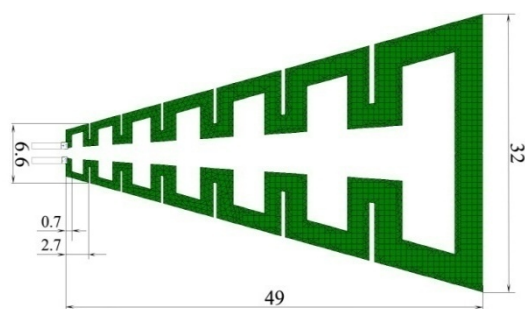
5 VÝSLEDKY SIMULACÍ

5.1 BEZ NAPÁJECÍHO OBVODU

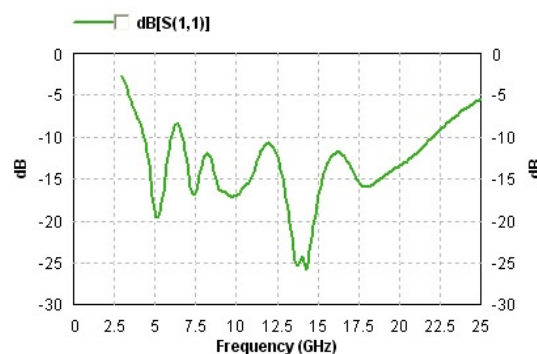
Z předchozích výsledků parametrické analýzy je navržena, co možná nejlépe fungující planární logaritmicko-periodická anténa, v zadaném kmitočtovém pásmu (3 GHz až 16 GHz). Anténa zatím nebude přizpůsobená impedanci koaxiálního kabelu, jedná se o analýzu, kde zjistíme vlastnosti antény „naprázdno“, abychom posléze zjistili vliv napájecího obvodu. Anténa bude mít parametry uvedené v tab.3. Netechnicky definované jako, malý úhel α , relativně velký úhel β , šířku prvního pásku 0,7 mm, dipóly budou hustě u sebe a anténa nebude mít vnitřní prvky. Tvar antény je na obr. 16 včetně hlavních rozměrů.

ϵ_r [-]	h [mm]	t [-]	e [-]	a [°]	b [°]	w_1 [mm]
3,28	0,7878	0,7727	0,84	15	7	0,7

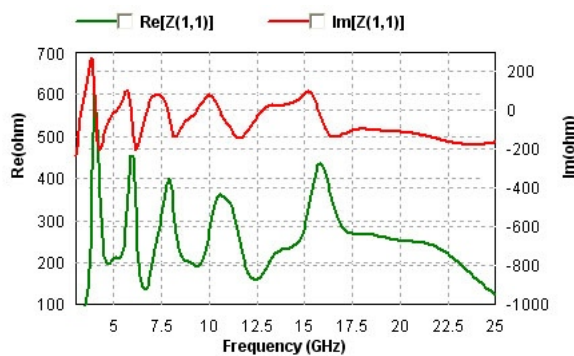
Tab. 3 Zadání parametrů antény, pro nejlepší model antény bez napáječe



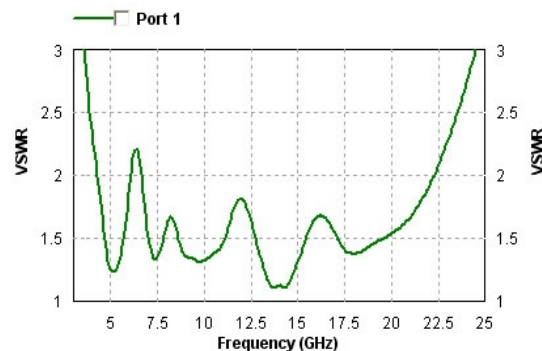
Obr. 16 Výsledný tvar nejlepšího modelu, včetně hlavních kót v mm a s buňkovou sítí



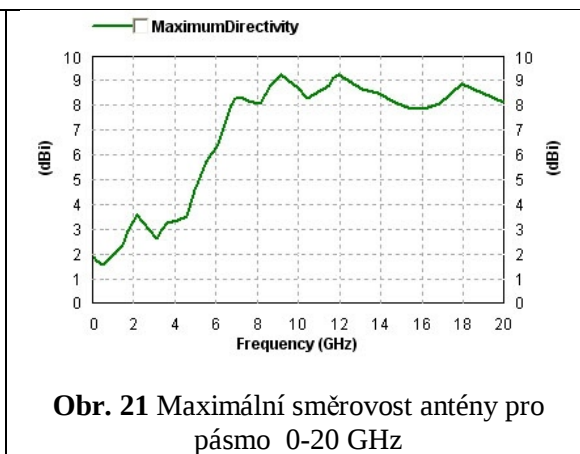
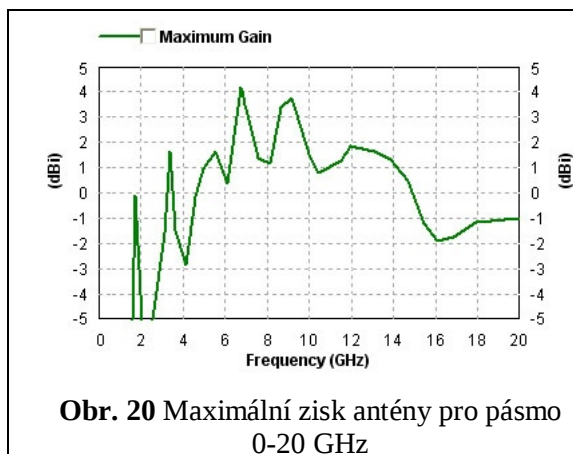
Obr. 17 Činitel odrazu modelu antény pro přizpůsobenou impedanci 250 Ω



Obr. 18 Reálná a imaginární složka impedance antény v pásmu 3-25 GHz



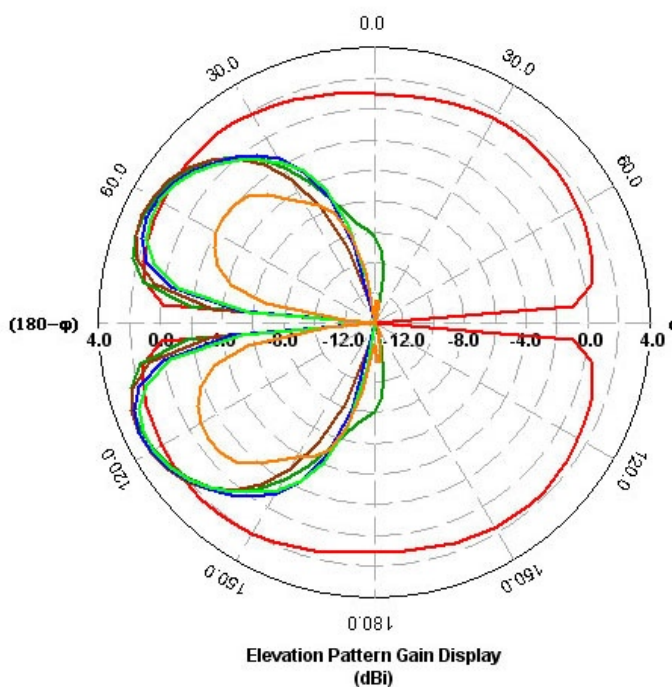
Obr. 19 Poměr stojatých vln v pásmu 3-25 GHz pro přizpůsobenou impedanci 250 Ω



Z výsledku první simulace vykazovala anténa v pásmu nad 16 GHz výborný činitel odrazu, posunul jsem tudíž horní kmitočet simulace na 25 GHz. Podle vypočítané hodnoty činitele odrazu, lze soudit, že by anténa mohla dobře pracovat na kmitočtech od 4 GHz do 21 GHz při vstupní impedanci 250 Ω. Ovšem u kmitočtu 6,3 GHz má nedokonale přizpůsobenou malou oblast. Činitel odrazu tam dosahuje -8,5 dB. Impedance antény se skokově mění a je v rozmezí přibližně od 400 Ω do 200 Ω. Právě nalezení nejlepšího průběhu impedance znamenalo spoustu úsilí a analýz. Tento průběh je vybrán jako nejlepší z mnoha analyzovaných, rozměrově optimalizovaných, antén.

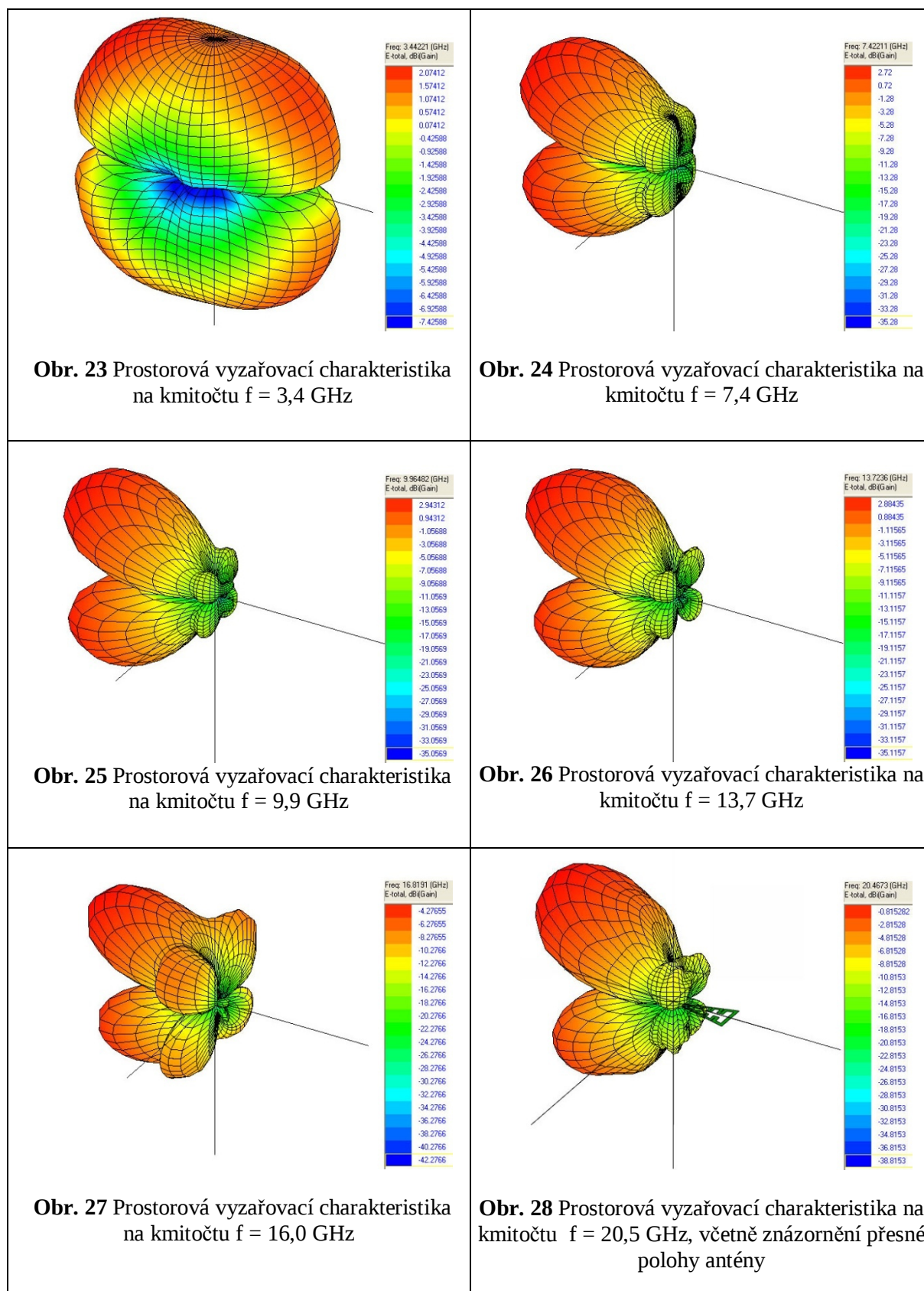
Vzhledem k přizpůsobení činitele odrazu, má anténa velkou šířku pásma. Poměr stojatých vln se pohybuje pod hranicí 1,8 (obr. 19), při vstupní impedanci 250 Ω. Průběh maximálního zisku vybraného ze všech směrů, je na obr. 20. Dalším kritériem antény může být kladný zisk antény. Tím se změní relativní šířka pásma - pracovní kmitočet antény s kladným ziskem je od 4,5 do 15 GHz

- f=3.4(GHz), E-total
- f=7.4(GHz), E-total
- f=9.9(GHz), E-total
- f=13.7(GHz), E-total
- f=14.1(GHz), E-total
- f=20.4(GHz), E-total



Směrovost antény je nad 6 GHz výborná (obr. 21), dosahuje průměrné hodnoty 8,5 dBi. Vyzařovací charakteristiky antény (obr. 22), jsou zvoleny pro šest kmitočtů a zobrazují řez rovinou pod úhlem $\phi = 0^\circ$, což je rovina xy (názornější definice je na obr. 3).

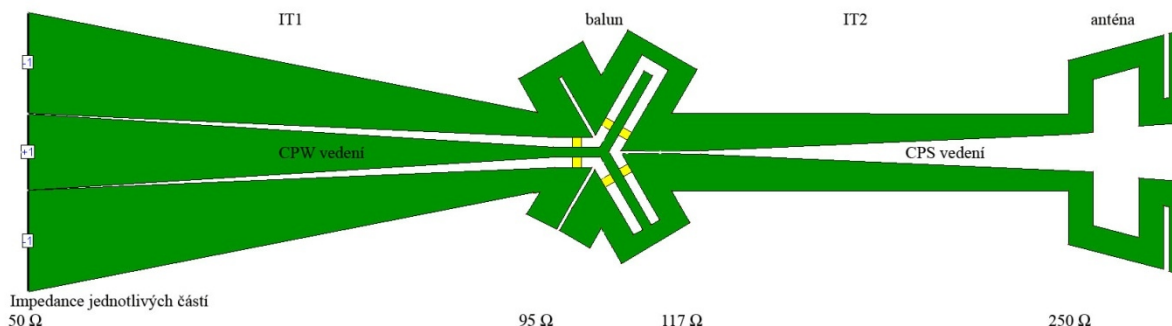
Na vybraných pracovních kmitočtech dosahuje anténa zisk kolem 2 dBi, na kmitočtu 13,7 GHz až 2,9 dBi. Ačkoli je anténa na kmitočtu 20,4 GHz dobře přizpůsobená, je z vyzařovacích charakteristik již patrný záporný zisk (oranžový průběh). Pro lepší přehlednost uvádím níže (obr. 23-28), prostorové vyzařovací charakteristiky, opět na stejných kmitočtech.



Je patrné, že na kmitočtu 3,4 GHz, je anténa ještě všesměrová. Ze zvyšujícím se kmitočtem vzniká, na celém pracovním pásmu, směrový zisk. Orientace směru hlavního zisku je pod úhlem $\Phi = 0^\circ$, $\Theta = 115^\circ$ a druhý je zrcadlově pod rovinou antény. Na posledním obrázku (obr. 28) je do charakteristiky přesně vložena anténa. Je v měřítku, pro představu její polohy u vyzařovacích charakteristik.

5.2 NAPÁJECÍ OBVOD ANTÉNY

Sestava napáječe se začátkem antény je na obr. 29. Jedná se o sestavu impedančních transformátorů (dále IT) a širokopásmového balunu Double-Y.



Obr. 29 Sestava napáječe antény včetně naznačení impedancí v jednotlivých částech

Anténa se napájí koplanárním vedením CPS. Jedná se o dvoupáskové symetrické vedení bez zemní plochy, viz obr. 29. Definuje se šířka pásků a mezera mezi nimi. Pomocí těchto rozměrů lze vypočítat, při použití eliptických integrálů, impedanci tohoto vedení. Výpočet je ale náročný, proto ke zjištění impedance vedení využiji výpočetní grafy z lit.[13]. Přesnou impedanci je dobré zjistit simulací vedení (např. s rozměrem vlnové délky). Tato kontrola je důležitá v dalším kroku při návrhu balunu. Obdobou vedení CPS je vedení CPW - koplanární vlnovod. Jedná se o nesymetrické vedení, kdy je signálový vodič ve středu, mezi dvěma zemními pásky. Koplanární vlnovod je výhodný pro připojení konektoru koaxiálního kabelu. Ke zjištění impedancí se přistupuje stejně jako u CPS vedení.

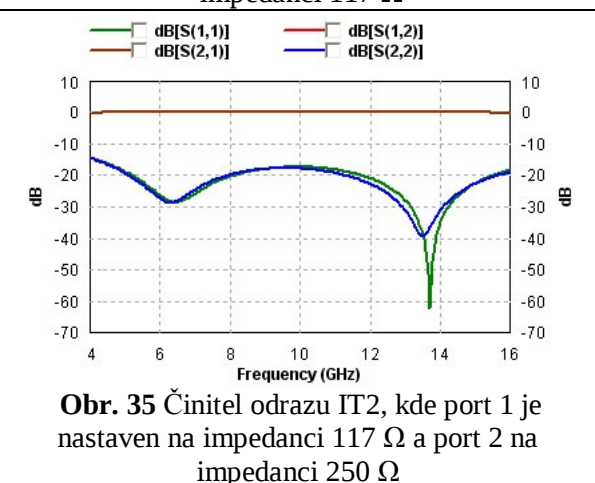
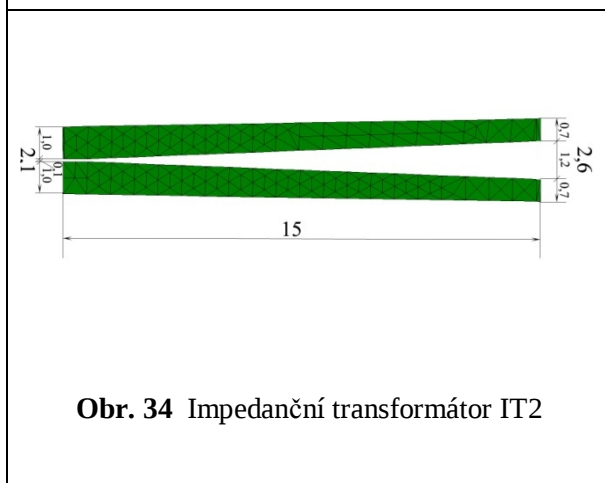
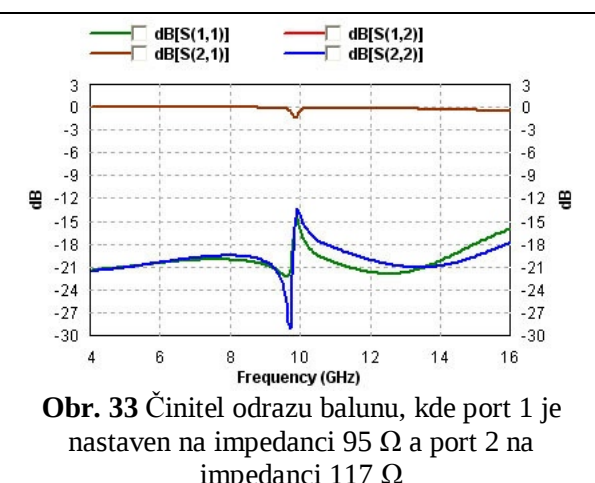
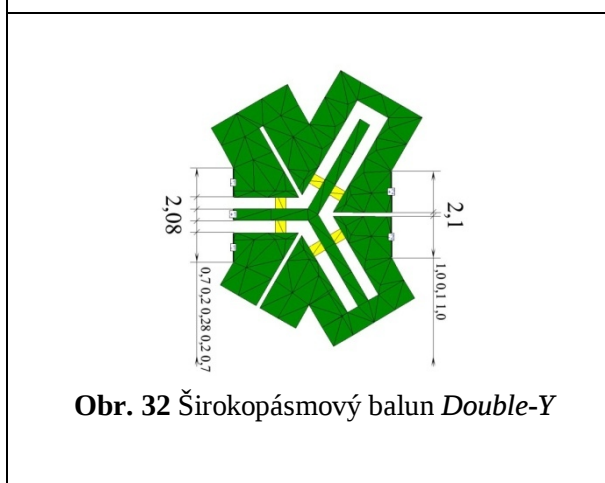
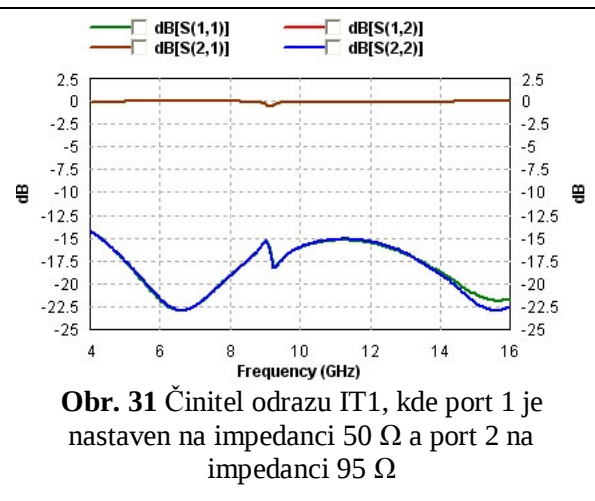
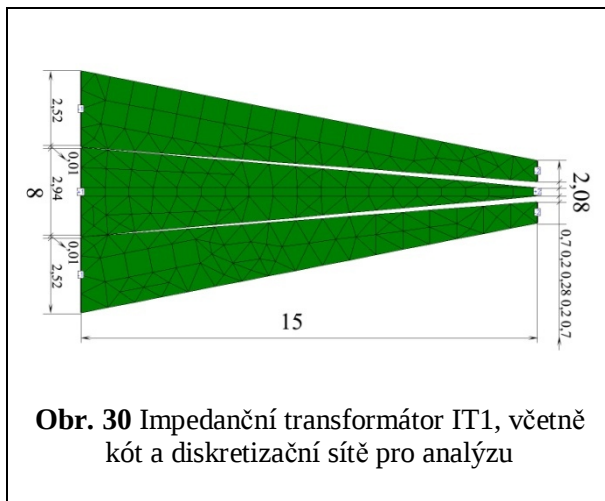
Pro transformaci ze symetrického na nesymetrické vedení, slouží širokopásmový balun označovaný jako *Double-Y*, nebo *PCW to CPS balun*. Jedná se o obvod se čtyřmi, vzájemně natočenými, pahýly z vedení CPW a CPS. Pahýly jsou zakončeny nakrátko i naprázdno. Důležitou podmínkou je, aby obojí vedení mělo shodnou impedanci, nejlépe okolo 100 Ω. Jejich délka by měla být $1/4 \cdot \lambda_{\text{MIN}}$, dle lit. [1] a [13], nebo $1/8 \cdot \lambda_{\text{MIN}}$ jak uvádí lit. [14] (délku vedení objasním níže). Další součástí balunu jsou drátové propojky, zajišťující stejný, nulový potenciál na zemních plochách. Pro simulaci jsou propojky uskutečněny kovovými pásky na druhé straně substrátu (na obr. 29 to jsou žluté obdélníky), na obou stranách zakotveny do antény. Jedná se o konkrétní funkci programu MGrid, kdy vytvoří spoj přes substrát. Na reálné anténě se propojky vyřeší drátem, musí se však brát na zřetel parazitní vyzářování.

Správná funkce balunu je zajištěna při zachování vstupní i výstupní impedance přibližně okolo 100 Ω. Protože však anténa ani koaxiální kabel nedosahují této impedance, musí se vhodně přizpůsobit. K tomu poslouží impedanční transformátory (dále IT) vhodně vyrobené z vedení CPS a CPW. Změnou šířky jednotlivých pásků, nebo zemních ploch, případně sužováním mezer, se mění impedance vedení. Podle toho, jak se mění šířka pásků, rozlišují se různé druhy IT. Já jsem zvolil IT, u kterých se šířka mění lineárně.

V průběhu návrhu napáječe jsem musel pozměnit některé teoretické úvahy. Tak například, nejdříve se přizpůsobí anténa s impedancí 250 Ω na impedanci blízkou 100 Ω, která je nezbytná pro dobrou funkci balunu. Přizpůsobení je provedeno rozšířením a sbíháním CPS pásků, podle grafů vypočítaných hodnot impedancí, viz [13] (grafy posloužily určením pouze přibližných rozměrů pásků - přesné nastavování impedancí jsem prováděl analýzou v

IE3D). Problémem je, že hodnoty $100\ \Omega$ lze dosáhnout buďto velmi širokými pásy, nebo je přiblížit více k sobě (méně jak $0,1\ \text{mm}$). Obě varianty jsem opustil, aby nebyl problém s návrhem balunu, nebo výrobou, a vedení jsem přizpůsobil na $117\ \Omega$ a této hodnotě přizpůsobím i impedanci CPW vedení. Další změnou byly délky pahýlů v balunu. Po simulaci s délkou $1/4 \cdot \lambda_{\text{MIN}}$ vykazoval průběh impedance značné kolísání, přizpůsobení antény se nepodařilo. Poté, co jsem délku pahýlů zkrátil (dle doporučení z literatury [14]) na délku $1/8 \cdot \lambda_{\text{MIN}}$, se výsledky podstatně zlepšily.

Pro názornost impedančního přizpůsobování uvádím výsledky simulací jednotlivých částí napájecího obvodu. Jednotlivé části sestavy jsou zakresleny v různém měřítku, jsou však pro představu okótovány rozměry v mm.

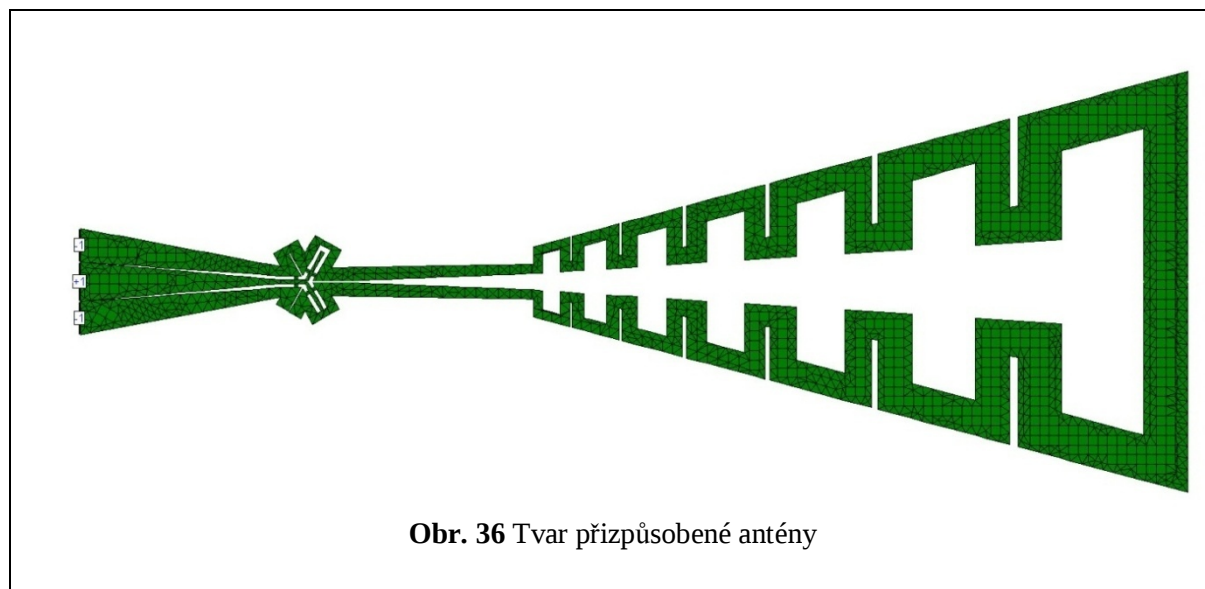


Na předchozích obrázcích (obr. 30-35) je zobrazeno přizpůsobování jednotlivých částí sestavy. IT1 má silný připojovací signálový vodič. Jeho šířka je 2,94 mm, přičemž průměr středního pinu u konektoru SMA je 0,76 mm. S užším páskem nebylo možno přizpůsobit vstup na 50 Ω . Taktéž kritická sbíhající se mezera mezi středním a zemními vodiči je nutná (během návrhu jsem zanalyzoval mnoho motivů IT a balunů, vybrané prvky jsou maximálně přizpůsobené dané anténě). Při návrhu impedančních transformátorů jsem prvotně vycházel z lit [13], přičemž jsem musel pozměnit některé šířky pásků z výsledků analýz vedení. Předpokladem bylo, že impedanci je možno zmenšit rozšířením signálových vodičů, nebo zúžením mezer jimi. Vliv šířky zemních ploch je, u IT1 na straně konektoru, nepatrný. Nejzásadnější ovlivnění impedance je zúžením mezer, kde se ovšem musí vzít v úvahu zvýšená náročnost výroby.

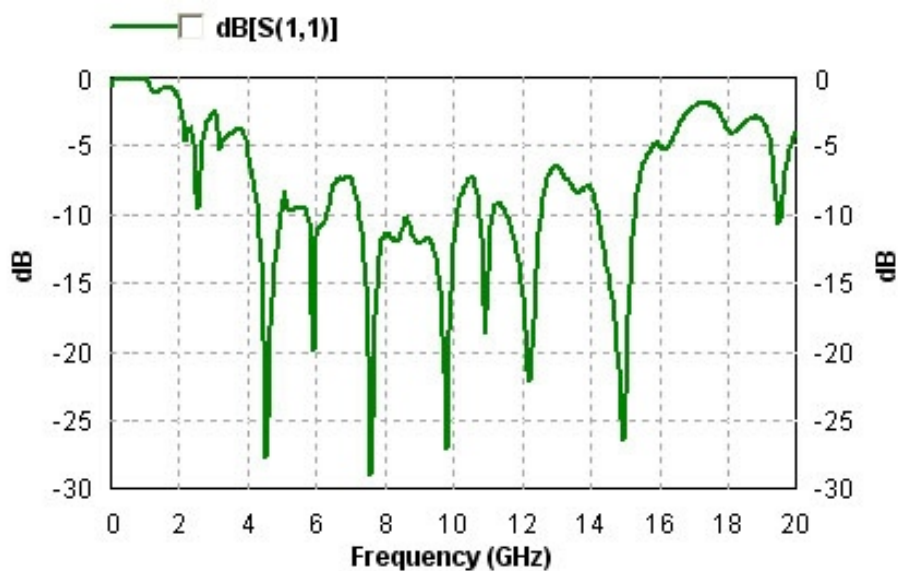
Balun se podařilo přizpůsobit při vstupní impedanci CPW vedení 95 Ω , na hodnotu 117 Ω na CPS vedení. Poslední transformační člen mění impedanci 117 Ω na impedanci antény 250 Ω . Jeho délka 15 mm je opět dána nejlepším výsledkem analýz různých délek impedančních transformátorů.

5.3 VÝSLEDKY SIMULACE S NAPÁJECÍM OBVODEM

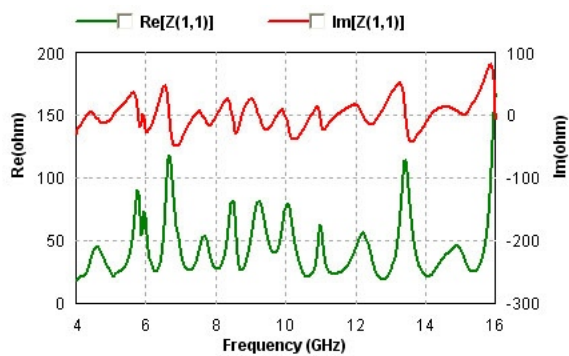
Celková sestava napáječe a antény je na obr. 36. Sestava byla podrobena analýze o celkovém počtu diskretizačních buněk 3020, při vzorkování 50 kHz na kmitočtech od 0 GHz do 20 GHz ($17 \text{ cell}/\lambda$).



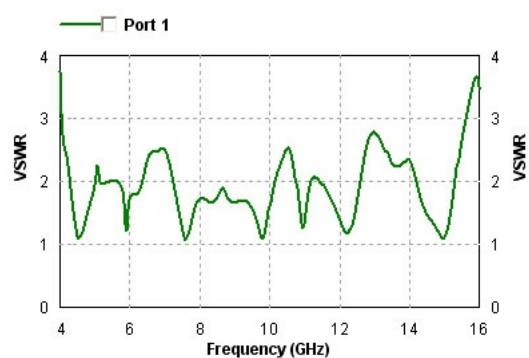
Obr. 36 Tvar přizpůsobené antény



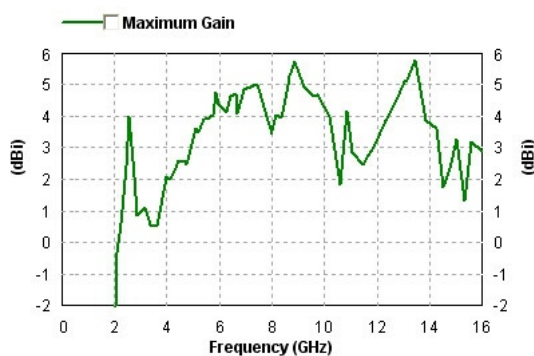
Obr. 37 Činitel odrazu antény při přizpůsobení vstupní impedance 50 Ω , pro pásmo 0-20 GHz



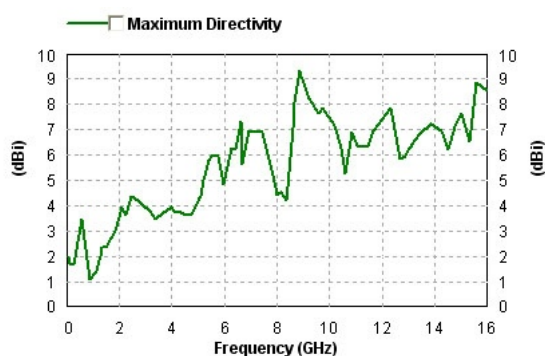
Obr. 38 Průběh reálné a imaginární složky vstupní impedance antény pro pásmo od 4-16 GHz



Obr. 39 Poměr stojatých vln na anténě při přizpůsobení vstupní impedance 50 Ω pro pásmo 4-16 GHz



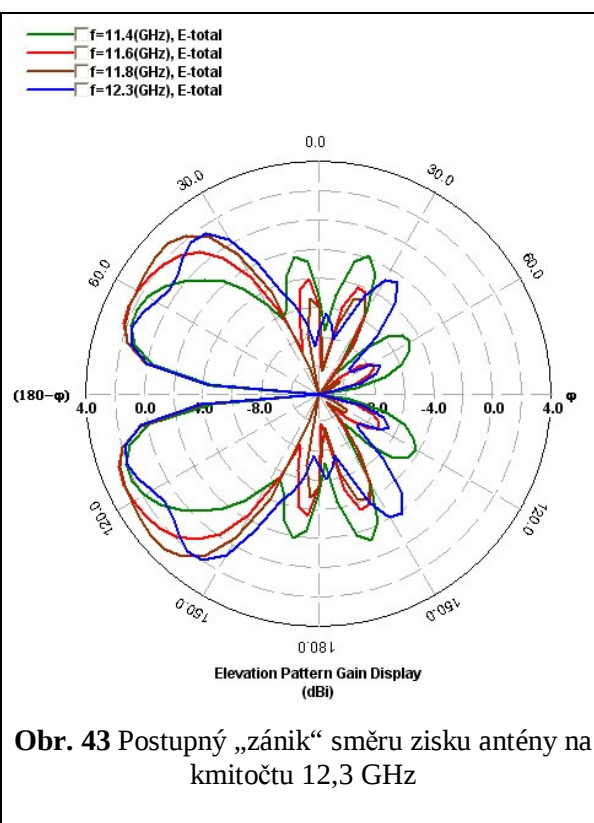
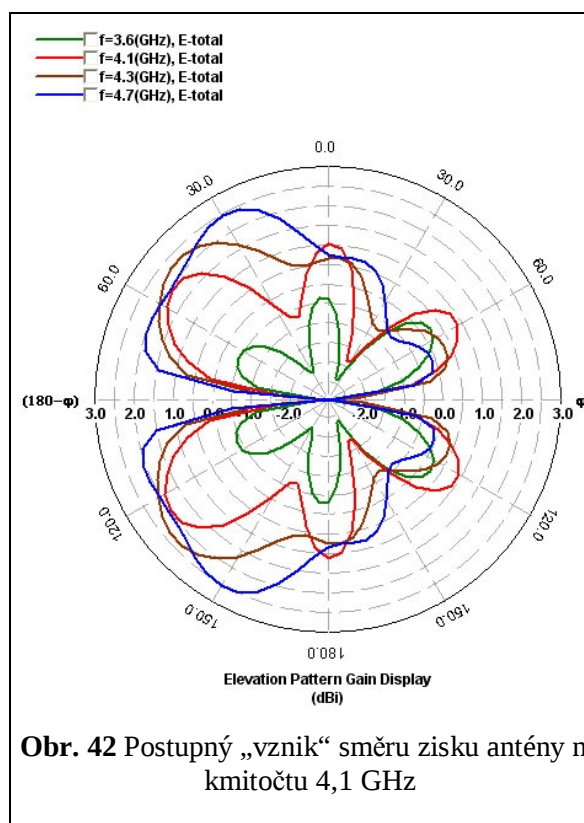
Obr. 40 Maximální zisk antény pro pásmo 0-16 GHz



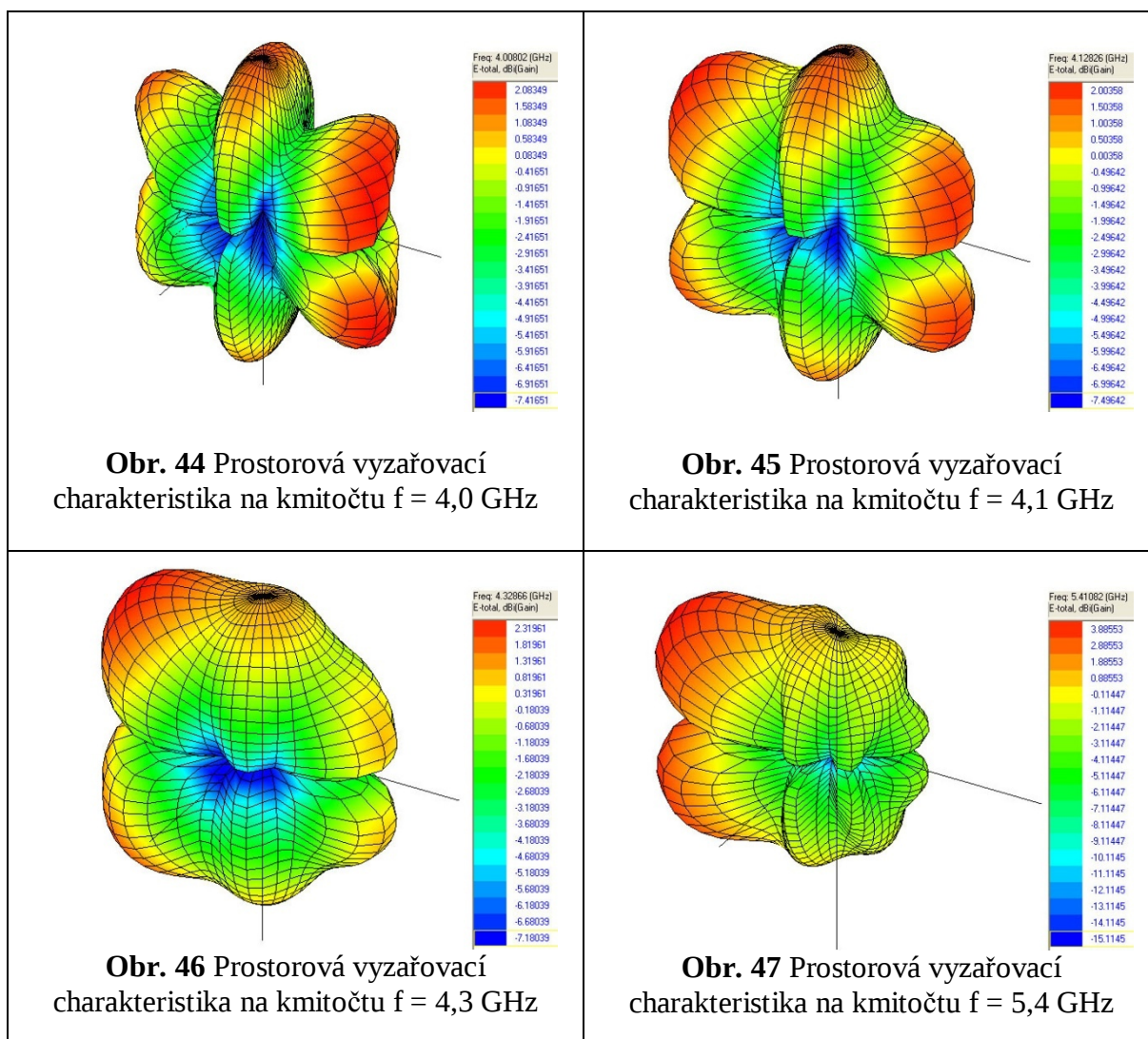
Obr. 41 Maximální směrovost antény pro pásmo 0-16 GHz

Z výsledku analýzy průběhu činitele odrazu (obr. 37), je patrná pracovní oblast antény. Jedná se o kmitočtový rozsah od 4,2 GHz do 15 GHz, kde se hodnota činitele odrazu pohybuje kolem hranice -10 dB. Nejedná se o ideální přizpůsobení, ale vzhledem k šířce pásma a vzhledem k širokému rozsahu vstupní impedance samotné antény (obr. 18) je tato hodnota uspokojivá (opět se jedná o nejlepší průběh z několika odlišných modelů).

Průběh reálné a imaginární složky impedance na vstupu antény je na obr. 38. Poměr stojatých vln v pásmu od 4,2 GHz do 15 GHz nepřekročí hodnotu 2,7. Jeho střední hodnota se pohybuje kolem 1,8 (obr. 39). Zisk antény se zlepšil (obr. 40), v podstatě pro celé pracovní pásmo je kladný, nejedná se však o kritérium funkčnosti antény, protože např. průběh vyzařovacích charakteristik (obr. 42 a 43) není pro celé pásmo vyhovující.



Na obr. 42 je znázorněn „vznik“ směrového zisku. Pro kmitočet 3,6 GHz (zelená křivka) je vyzařovací charakteristika nesměrová. Při zvýšení kmitočtu na 4,1 GHz (červená křivka) je již patrné zlepšení vyzařování do jednoho směru a při kmitočtech vyšších jsou již boční a zadní laloky mnohem menší, než-li lalok hlavní. Na obr. 41 je vidět opačný jev, vznik zadního laloku pro kmitočet 12,3 GHz a zmenšování hlavního laloku. Pro vyšší kmitočty je již anténa nepoužitelná. Lepší názornost je samozřejmě u prostorových vyzařovacích grafů (obr. 44 až 47).



Kritériem správné funkčnosti je i vhodné vyzařování antény. Proto je daná anténa omezena na pásmo od kmitočtu 4,3 GHz do 12,3 GHz (obr. 42 a 43). V tomto pásmu dosahuje poměr stojatých vln maximálně 2,5 (obr. 39).

Ve srovnání s anténou naprázdno, dochází, při přizpůsobení na impedanci koaxiálního napáječe, k omezení šířky pásma antény téměř o 8 GHz a mírného zhoršení poměru stojatých vln. Omezení šířky pásma je způsobeno nevhodnou vyzařovací charakteristikou, která je ovlivněna vyzařováním napájecího obvodu.

6 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce je návrh a počítačové modelování planární logaritmicko-periodické antény, včetně jejího napájecího obvodu. V práci seznamuji čtenáře s tímto typem antén, uvádím vztahy pro realizaci a stručný postup nastavení správné simulace, v programu IE3D. Motiv antény zadávám do IE3D pomocí souřadnic bodů, které vypočítá jednoduchý příkazový program, v prostředí Matlab. Program je součástí přílohy, stačí vyplnit parametry výsledného motivu antény.

Po analýze prvního modelu antény, jsem se s výsledkem neuspokojil. Anténa se nechovala dle představ a proto jsem hledal vlivy rozměrů motivů antén na jejich vlastnosti. Tak vznikl stručný systematický přehled parametrické analýzy těchto antén. Pomocí výsledků jsem navrhnul již dobře fungující model antény, zatím bez přizpůsobení koaxiálnímu napájení. Výsledky analýzy modelu antény jsou výborné. Podle kritéria činitele odrazu, je šířka pásma modelu antény od 4,5 GHz až do 21 GHz. Malou odchylku impedance na kmitočtu 6,3 GHz, nebylo možné nijak odstranit, zvýšila tak lokálně činitel odrazu na hodnotu -8,5 dB. Pro poměr stojatých vln to v pracovním pásmu znamená, mírný přesah optimální hodnoty, na hodnotu 2,2. Bereme-li dalším kritériem zisk antény, je pracovní pásmo poněkud užší. Zisk totiž nedosahuje nad hranici 15 GHz kladných hodnot, čímž definuje horní pracovní kmitočet. Anténa má ostrou směrovou charakteristiku od kmitočtu 6 GHz a výše, kde má v celém horním pásmu téměř shodný průběh (na rozdíl od prvního neúspěšného modelu, kde anténa nad 10 GHz zářila různými směry - nebyla správně navržena).

Základem napájecího obvodu antény je balun, značený jako *Double-Y*. Jedná se o širokopásmový balun na jedné straně substrátu. Oboustranný typ balunu, vykazoval horší výsledky analýzy, proto jsem volil jednostranný typ. Také se tím vyloučí dražší výroba při použití oboustranného motivu. Jednotlivé prvky napájecího obvodu jsem impedančně přizpůsoboval. Prvotní při návrhu byl impedanční transformátor, který měnil impedanci motivu antény z 250 Ω na impedanci 117 Ω , blízkou impedanci balunu. Délka impedančního transformátoru je opět volena z nejlepších průběhů činitele odrazu z několika různě dlouhých úseků. Návrh balunu je založen na analýze krátkých CPS a CPW vedení, které mají vykazovat stejné hodnoty charakteristické impedance. V návrhu délek pahýlů se mnohé literatury, např. [13] a [14] lišily, mě se osvědčila délka rovna $1/8 \cdot \lambda_{\text{MIN}}$. Podobně tak i přesné umístění drátových propojek je věc spíše volitelná. Mírným posunutím blíže do středu pásků se průběhy impedancí značně změnily, balun se choval zcela jinak. Proto jsem pásky umístil 0,1 mm od kraje a již s nimi neměnil. Na konkrétní anténě se vytvoří přemostěním drátem.

Posledním prvkem napájecího obvodu je impedanční transformátor, který má impedanci balunu na straně CPW o velikosti 95 Ω , přetransformovat na impedanci 50 Ω koaxiálního kabelu. Při zachování délky impedančního transformátoru (podmínkou je délka menší, než délka vlny) se musí pro změnu impedance na straně koaxiálního kabelu, střední pásek rozšířit a mezera mezi ním a zemními pásky se musí zmenšit. Pro danou situaci je šířka středního pásku větší, než-li je průměr připojovacího kolíku na konektoru koaxiálního kabelu. Situaci nelze řešit, protože zužováním středního pásku vede ke zvyšování impedance a anténu pak nelze přizpůsobit na 50 Ω . Obdobně tak i šířka mezer je kritická a nelze ji měnit. Šířky zemních pásků vstupní impedanci zásadně nemění.

Z výsledků činitele přenosu, lze jednoznačně určit šířku pásma antény - od kmitočtu 4,3 GHz do 15,3 GHz se průběh mění kolem střední hodnoty -10 dB. Nejedná se však o ideální přizpůsobení. Poměr stojatých vln, v daném pásmu, dosahuje maximální špičky 2,7. Jeho střední hodnota se pohybuje okolo 1,8. Šířka pásma definovaná činitelem odrazu, však není pracovní šířkou pásma. Z výsledků vyzařovacích charakteristik se musí šířka pracovního pásma omezit, protože anténa při kmitočtech nad 12,3 GHz, vykazuje nepřípustné vyzařování do různých směrů. Dochází již k zásadnímu ovlivňování pole antény a polem napáječe.

Pracovní pásmo planární logaritmicko-periodické antény, připojitelné na koaxiální kabel o impedanci $50\ \Omega$, je od 4,3 GHz do 12,3 GHz. V tomto pásmu dosahuje anténa maximálního poměru stojatých vln 2,5, při směrové vyzařovací charakteristice. Směr hlavního zisku je v rovině pod úhlem $\phi = 115^\circ$ a druhá je zrcadlová, pod rovinou antény.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A JINÝCH ZDROJŮ

- [1] DEL RIO, D. Characterization of Log Periodic Folded Slot Antenna Array. Diplomová práce. University of Puerto Rico. Dostupné na WWW: <http://grad.uprm.edu/tesis/delriodelrio.pdf>
- [2] BALANIS, C., A. Antenna Theory and Design. New York: John Willey & Sons, 1997.
- [3] ING. PROCHÁZKA, CSC., Miroslav. *Antény : Encyklopedická příručka*. 3. aktualiz. vyd. Praha : BEN, 2005. 328 s., CD.
- [4] ČÁP, Aleš. *Širokopásmové planární antény s poruchovými prvky*. [s.l.], 2005. 56 s. VUT Brno. Diplomová práce. Dostupný z WWW: <http://www.ieee.cz/mtt/soutez05/prace/cap/cap.pdf>.
- [5] NANGNOSTOU, Dimitrios, et al. *A Small Planar Log-Periodic Koch-Dipole Antenna* [online]. 2005 [cit. 2008-12-01]. Dostupný z WWW: users.ece.gatech.edu/~etentze/APS06_Log_Anagnostou.pdf.
- [6] JILKOVÁ, Jana. *Širokopásmové planární dipóly s koplanárním vedením*. [s.l.], 2007. 69 s. VUT Brno. Vedoucí diplomové práce Prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida. Dostupný z WWW: www.ieee.cz/mtt/soutez07/Jilkova.pdf.
- [7] NOVÁČEK, Zdeněk. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení*. [s.l.] : [s.n.], 2003. 135 s.
- [8] *IE3D User's Manual*. [s.l.] : [s.n.], 2008. 630 s. Dostupný z WWW: www.zeland.com.
- [9] *Fidelity Manual : Getting Started*. [s.l.] : [s.n.], 2006. 103 s. Dostupný z WWW: www.zeland.com.
- [10] RAIDA, Zbyněk. *Elektromagnetické vlny. Multimediální učebnice* [online]. 2008 [cit. 2008-01-12]. Dostupný z WWW: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/>.
- [11] BAHL, L.R., et al. *Microstrip Antenna Design Handbook*. [s.l.] : Artech House, 2001. 325 s.
- [12] KOUDELKA, Vlastimil. *Neuronová síť pro návrh širokopásmové antény*. [s.l.], 2007. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida. Dostupný z WWW: <http://www.ieee.cz/mtt/soutez07/Koudelka.pdf>.
- [13] DVOŘÁK, O. *Modelování širokopásmových planárních symetrizačních obvodů a antén*. [s.l.], 2007. 83 s. VUT Brno. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Láčík, PhD.
- [14] VENKATESAN, Jaikrishna, et al. *Investigation of the Double-Y Balun for Feeding Pulsed Antennas* [online]. 2003 [cit. 2009-05-01]. Dostupný z WWW: <http://smartech.gatech.edu/handle/1853/5036>.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	- Hlavní úhel antény
a_{SL}	- Úhel rozbíhajících se reflektorů uvnitř antény
B	- Šířka pásma
b	- Úhel rozbíhajících se napáječů
CPS	- Koplanární páskové vedení
CPW	- Koplanární vlnovod
D	- Vnější průměr koaxiálního kabelu
d	- Vnitřní průměr koaxiálního kabelu
dBd	- Jednotka zisku vztažená k dipólu
dBi	- Jednotka zisku vztažená k izotropnímu zářiči
Double-Y	- Širokopásmový planární balun
ϵ	- Koeficient antény
ϵ_0	- Permitivita vzduchu
ϵ_r	- Permitivita substrátu
f_0	- Rezonanční kmitočet
FDTD	- Finite-Difference Time-Domain, analýza v časové oblasti metodou konečných diferencí
f_{MAX}	- Horní kmitočet antény
f_{MIN}	- Dolní kmitočet antény
h	- Výška substrátu
HS-PCB	- High Speed - Printed Circuit Boards, vysokorychlostní desky plošných spojů
l_{0MAX}	- Maximální délka vlny ve volném prostředí
l_{0MIN}	- Minimální délka vlny ve volném prostředí
l_{MAX}	- Maximální délka vlny v dielektriku
l_{MAX}	- Minimální délka vlny v dielektriku
l_{MAX}	- Délka nejdelšího dipólu
l_{MIN}	- Délka nejkratšího dipólu
LPA	- Logaritmicko-periodická anténa
MIO	- Monolitické integrované obvody
MMIC	- Monolithic Microwave Integrated Circuits, monolitické mikrovlnné integrované obvody
n	- Počet dipólů antény
Φ	- Úhel odklonění od osy x k ose y , pro $z=0$
PLPA	- Planární logaritmicko-periodická anténa
PSV	- Poměr stojatých vln
Q	- Činitel kvality
RFIC	- Radio Frequency Integrated Circuits, vysokofrekvenční integrované obvody
RFID	- Radio Frequency Identification, identifikační systém pomocí vysokofrekvenčních vln
S	- Vzdálenost mezi pásky napáječe

s_{11}	- Činitel vstupního odrazu antény
s_{11dB}	- Činitel vstupního odrazu antény s jednotkou <i>dB</i>
t	- Koeficient antény
θ	- Úhel odklonění od osy z k ose x , pro $y=0$
$VSWR$	- Voltage Standing Wave Ratio, poměr stojatých vln
W	- Šířka páskového napáječe
w_1	- Šířka pásku prvního dipólu
w_2	- Šířka vnitřních reflektorů antény
Z_0	- Impedance antény
Z_D	- Impedance jednoho dipólu

9 SEZNAM PŘÍLOH V ELEKTRONICKÉ PODOBĚ

IE3D

Všechny modely jsou včetně výsledků simulací

- output - složka pro výsledky simulací
- Balun.geo - model Double-Y balunu
- IT1.geo - model prvního impedančního transformátoru
- IT2.geo - model druhého impedančního transformátoru
- LPA01.geo - model antény bez napájecího obvodu
- LPA01 IT2 balun IT2.geo - celková sestava antény a napájecího obvodu

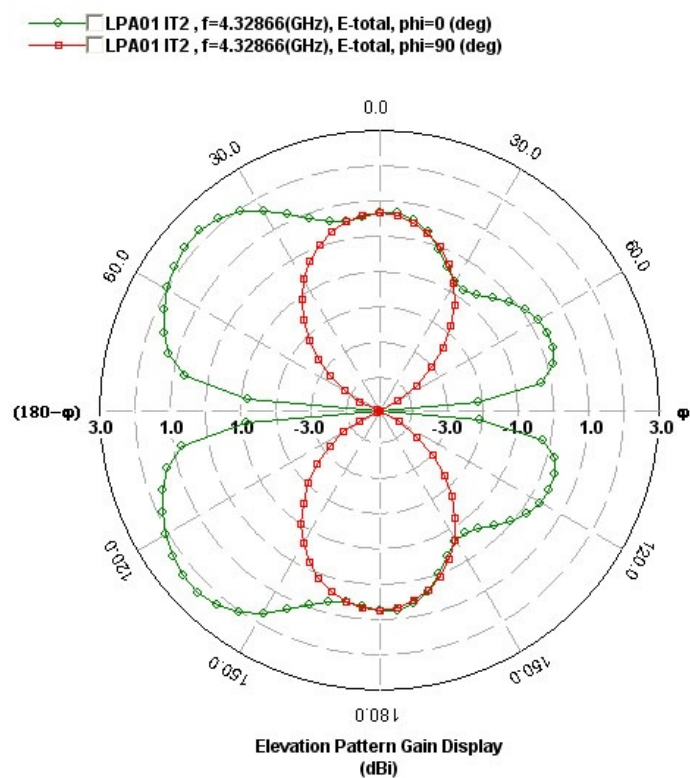
Matlab

- PLPA.m - jednoduchý výpočetní skript na souřadnice PLPA

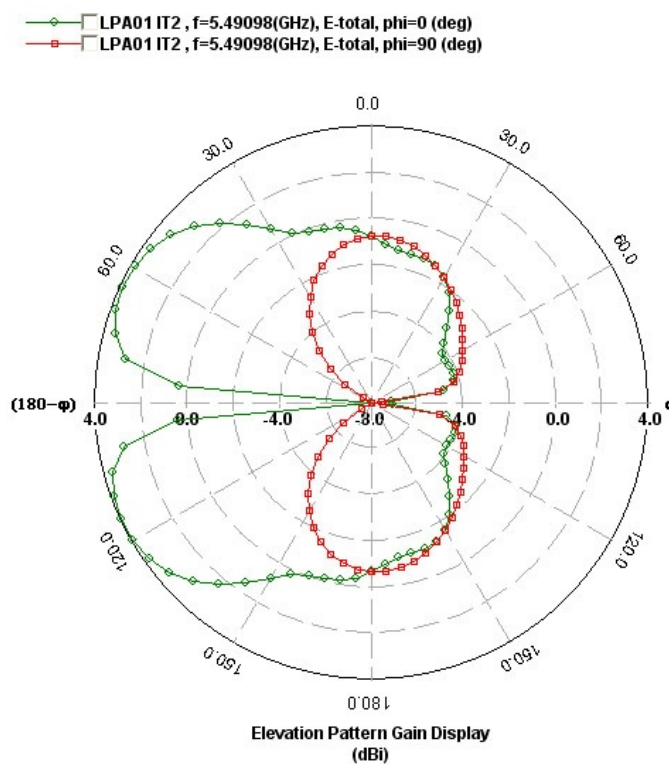
Práce

- verze práce ve formátu pdf

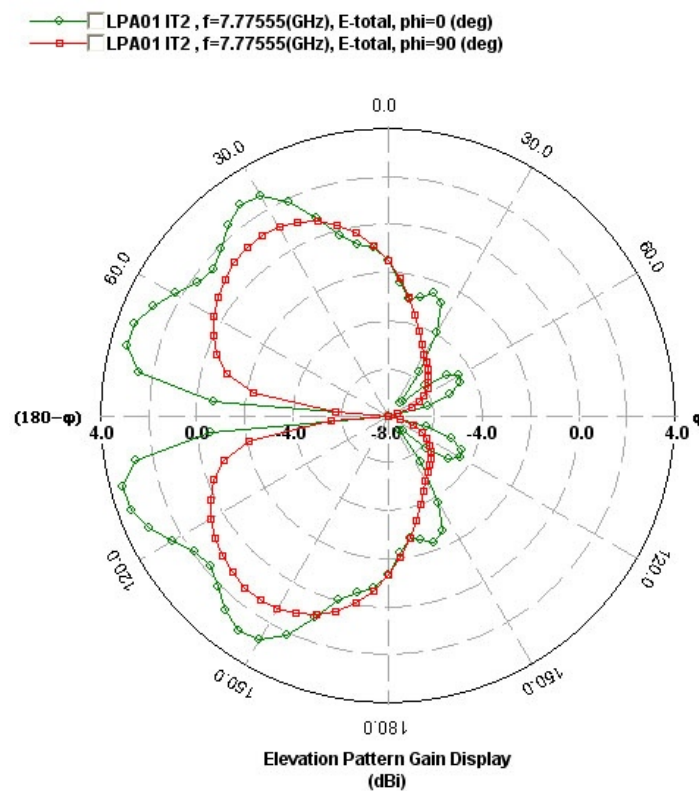
10 PŘÍLOHA



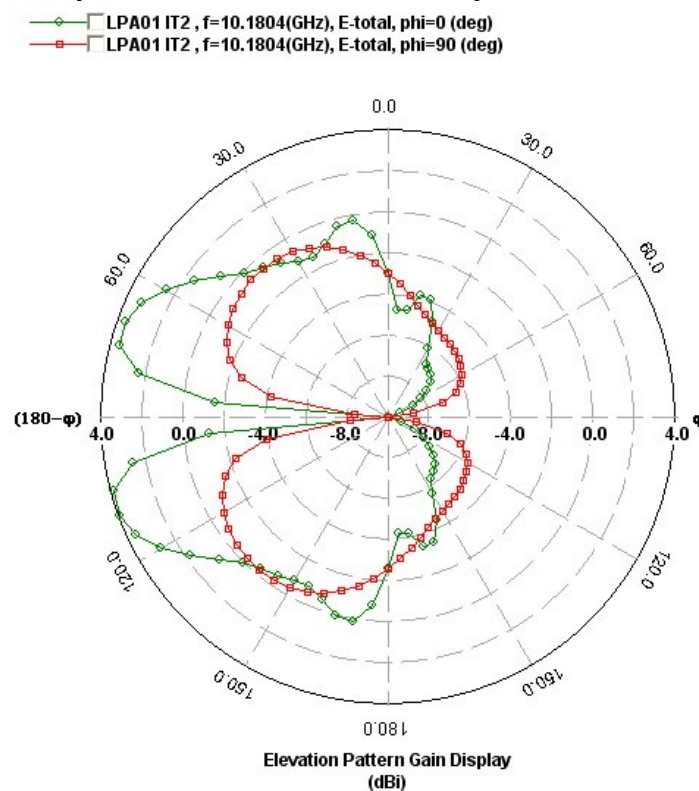
Obr. P1 Vyzařovací charakteristika antény na kmitočtu 4,3 GHz



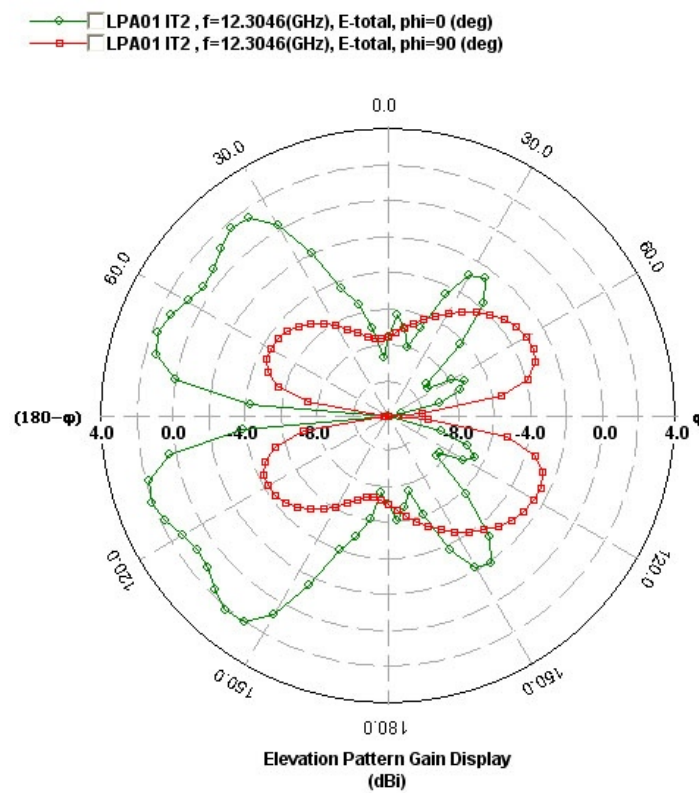
Obr. P2 Vyzařovací charakteristika antény na kmitočtu 5,5 GHz



Obr. P3 Vyzařovací charakteristika antény na kmitočtu 7,8 GHz



Obr. P4 Vyzařovací charakteristika antény na kmitočtu 10,2 GHz



Obr. P5 Vyzarovací charakteristika antény na kmitočtu 12,3 GHz

```

% konzolový skript na výpočet souřadnic
% planární logaritmicko-periodické antény

% skript počítá souřadnice pro 7 dipólů

% do prvního odstavce se zadávají hlavní parametry antény
% kromě kmitočtu, musí se zadat hodnota vlnové délky,
% odpadá tak výpočet přes kmitočet a parametry substrátu.

tau=0.772727          %hlavní koeficient antény

eps=0.8395            %nejlépe parametr tau

alpha=15              %hlavní úhel antény

da=12                 %uhel rozbíhajících se reflektorů uvnitř

beta=7;              %vnitřní úhel

lambdamin=5.25        %minimální rozměr dipólu /mm/

lambdamax=40;         %nemá vliv pro n počet dipólů

w1=0.7               %šířka prvního dipólu

wd1=0.6              %šířka vnitřních prvků


%      VÝPOČTY SOUŘADNIC

ar=alpha*(pi/180);    %alpha v radiánech
dar=da*(pi/180);
ASL=0.5*dar;
br=beta*(pi/180);     %beta v radiánech

w0=w1*tau;            %virtuální nultý dipól pro vypočítání x00a
w2=w1/tau;
wd2=wd1/tau;
w3=w2/tau;
wd3=wd2/tau;
w4=w3/tau;
wd4=wd3/tau;
w5=w4/tau;
wd5=wd4/tau;
w6=w5/tau;
wd6=wd5/tau;
w7=w6/tau;
wd7=wd6/tau;
w8=w7/tau;
wd8=wd7/tau;

```

%x-ové souřadnice

```
x1=(0.5*lambdamin)/tan(ar);
x99=x1*tau;
x0=((x99+w0-eps*w0)/eps);
x2=((x1+w1-eps*w1)/eps);
x3=(x1/tau);
x4=((x3+w2-eps*w2)/eps);
x5=(x3/tau);
x6=((x5+w3-eps*w3)/eps);
x7=(x5/tau);
x8=((x7+w4-eps*w4)/eps);
x9=(x7/tau);
x10=((x9+w5-eps*w5)/eps);
x11=(x9/tau);
x12=((x11+w6-eps*w6)/eps);
x13=(x11/tau);
x14=((x13+w7-eps*w7)/eps);
x15=(x13/tau);
x16=((x15+w8-eps*w8)/eps);
x17=(x15/tau);
```

%souřadnice

```
x00a=(x0+w0);      y00a=(x00a*tan(br));
x01a=x1;            y01a=(x1*tan(br));
x02a=x1;            y02a=(x1*tan(ar));
x03a=x2+w1;         y03a=(x03a*tan(ar));
x04a=x2+w1;         y04a=((x04a*tan(br)-w1));
x05a=x2;            y05a=((x2*tan(br)-w1));
x06a=x2;            y06a=(x2*tan(ar)-(w1/(cos(ar))));
x07a=x1+w1;         y07a=((x1+w1)*tan(ar)-(w1/cos(ar)));
x08a=x1+w1;         y08a=(x08a*tan(br)-w0-(0.5*(w1-w0)));
x09a=x00a;          y09a=(x09a*tan(br)-w1);

x00b=x2+w1;         y00b=(x00b*tan(br));
x01b=x3;            y01b=(x3*tan(br));
x02b=x3;            y02b=(x3*tan(ar));
x03b=x4+w2;         y03b=(x03b*tan(ar));
x04b=x4+w2;         y04b=(x04b*tan(br)-w2);
x05b=x4;            y05b=(x4*tan(br)-w2);
x06b=x4;            y06b=(x4*tan(ar)-(w2/(cos(ar))));
x07b=x3+w2;         y07b=((x3+w2)*tan(ar)-(w2/cos(ar)));
x08b=x3+w2;         y08b=(x08b*tan(br)-w1-(0.5*(w2-w1)));
x09b=x00b;          y09b=(x09b*tan(br)-w2);

x00c=x4+w2;         y00c=(x00c*tan(br));
x01c=x5;            y01c=(x5*tan(br));
x02c=x5;            y02c=(x5*tan(ar));
x03c=x6+w3;         y03c=(x03c*tan(ar));
x04c=x6+w3;         y04c=(x04c*tan(br)-w3);
x05c=x6;            y05c=(x6*tan(br)-w3);
x06c=x6;            y06c=(x6*tan(ar)-(w3/(cos(ar))));
x07c=x5+w3;         y07c=((x5+w3)*tan(ar)-(w3/cos(ar)));
x08c=x5+w3;         y08c=(x08c*tan(br)-w2-(0.5*(w3-w2)));
x09c=x00c;          y09c=(x09c*tan(br)-w3);

x00d=x6+w3;         y00d=(x00d*tan(br));
x01d=x7;            y01d=(x7*tan(br));
x02d=x7;            y02d=(x7*tan(ar));
x03d=x8+w4;         y03d=(x03d*tan(ar));
x04d=x8+w4;         y04d=(x04d*tan(br)-w4);
x05d=x8;            y05d=(x8*tan(br)-w4);
x06d=x8;            y06d=(x8*tan(ar)-(w4/(cos(ar))));
```

```

x07d=x7+w4;          y07d=((x7+w4)*tan(ar))-(w4/cos(ar));
x08d=x7+w4;          y08d=(x08d*tan(br)-w3-(0.5*(w4-w3)));
x09d=x00d;           y09d=(x09d*tan(br)-w4);

x00e=x8+w4;          y00e=(x00e*tan(br));
x01e=x9;              y01e=(x9*tan(br));
x02e=x9;              y02e=(x9*tan(ar));
x03e=x10+w5;          y03e=(x03e*tan(ar));
x04e=x10+w5;          y04e=(x04e*tan(br)-w5);
x05e=x10;             y05e=(x10*tan(br)-w5);
x06e=x10;             y06e=(x10*tan(ar)-(w5/(cos(ar))));
x07e=x9+w5;           y07e=((x9+w5)*tan(ar))-(w5/cos(ar));
x08e=x9+w5;           y08e=(x08e*tan(br)-w4-(0.5*(w5-w4)));
x09e=x00e;           y09e=(x09e*tan(br)-w5);

x00f=x10+w5;          y00f=(x00f*tan(br));
x01f=x11;             y01f=(x11*tan(br));
x02f=x11;             y02f=(x11*tan(ar));
x03f=x12+w6;          y03f=(x03f*tan(ar));
x04f=x12+w6;          y04f=(x04f*tan(br)-w6);
x05f=x12;             y05f=(x12*tan(br)-w6);
x06f=x12;             y06f=(x12*tan(ar)-(w6/(cos(ar))));
x07f=x11+w6;          y07f=((x11+w6)*tan(ar))-(w6/cos(ar));
x08f=x11+w6;          y08f=(x08f*tan(br)-w5-(0.5*(w6-w5)));
x09f=x00f;           y09f=(x09f*tan(br)-w6);

x00g=x12+w6;          y00g=(x00g*tan(br));
x01g=x13;             y01g=(x13*tan(br));
x02g=x13;             y02g=(x13*tan(ar));
x03g=x14+w7;          y03g=(x03g*tan(ar));
x04g=x14+w7;          y04g=(x04g*tan(br)-w7);
x05g=x14;             y05g=(x14*tan(br)-w7);
x06g=x14;             y06g=(x14*tan(ar)-(w7/(cos(ar))));
x07g=x13+w7;          y07g=((x13+w7)*tan(ar))-(w7/cos(ar));
x08g=x13+w7;          y08g=(x08g*tan(br)-w6-(0.5*(w7-w6)));
x09g=x00g;           y09g=(x09g*tan(br)-w7);

```

%výpočty pro dipóly uvnitř antény

```

xd00a=x07a+[[[x06a-x07a]*0.5]-0.5*wd1];
la=xd00a*tan(ASL);

xd00b=x07b+[[[x06b-x07b]*0.5]-0.5*wd2];
lb=xd00b*tan(ASL);

xd00c=x07c+[[[x06c-x07c]*0.5]-0.5*wd3];
lc=xd00c*tan(ASL);

xd00d=x07d+[[[x06d-x07d]*0.5]-0.5*wd4];
ld=xd00d*tan(ASL);

xd00e=x07e+[[[x06e-x07e]*0.5]-0.5*wd5];
le=xd00e*tan(ASL);

xd00f=x07f+[[[x06f-x07f]*0.5]-0.5*wd6];
lf=xd00f*tan(ASL);

xd00g=x07g+[[[x06g-x07g]*0.5]-0.5*wd7];
lg=xd00g*tan(ASL);

```

%TISK SOUŘADNIC pro 7 dipólů:

x00a,y00a
x01a,y01a
x02a,y02a
x03a,y03a

x00b,y00b
x01b,y01b
x02b,y02b
x03b,y03b

x00c,y00c
x01c,y01c
x02c,y02c
x03c,y03c

x00d,y00d
x01d,y01d
x02d,y02d
x03d,y03d

x00e,y00e
x01e,y01e
x02e,y02e
x03e,y03e

x00f,y00f
x01f,y01f
x02f,y02f
x03f,y03f

x00g,y00g
x01g,y01g
x02g,y02g
x03g,y03g

x03g,y03g=y03g*(-1)
x02g,y02g=y02g*(-1)
x01g,y01g=y01g*(-1)
x00g,y00g=y00g*(-1)

x03f,y03f=y03f*(-1)
x02f,y02f=y02f*(-1)
x01f,y01f=y01f*(-1)
x00f,y00f=y00f*(-1)

x03e,y03e=y03e*(-1)
x02e,y02e=y02e*(-1)
x01e,y01e=y01e*(-1)
x00e,y00e=y00e*(-1)

x03d,y03d=y03d*(-1)
x02d,y02d=y02d*(-1)
x01d,y01d=y01d*(-1)
x00d,y00d=y00d*(-1)

x03c,y03c=y03c*(-1)
x02c,y02c=y02c*(-1)
x01c,y01c=y01c*(-1)

$x_{00c}, y_{00c} = y_{00c} * (-1)$
 $x_{03b}, y_{03b} = y_{03b} * (-1)$
 $x_{02b}, y_{02b} = y_{02b} * (-1)$
 $x_{01b}, y_{01b} = y_{01b} * (-1)$
 $x_{00b}, y_{00b} = y_{00b} * (-1)$
 $x_{03a}, y_{03a} = y_{03a} * (-1)$
 $x_{02a}, y_{02a} = y_{02a} * (-1)$
 $x_{01a}, y_{01a} = y_{01a} * (-1)$
 $x_{00a}, y_{00a} = y_{00a} * (-1)$
 $x_{09a}, y_{09a} = y_{09a} * (-1)$
 $x_{08a}, y_{08a} = y_{08a} * (-1)$
 $x_{07a}, y_{07a} = y_{07a} * (-1)$
 $x_{06a}, y_{06a} = y_{06a} * (-1)$
 $x_{05a}, y_{05a} = y_{05a} * (-1)$
 $x_{08b}, y_{08b} = y_{08b} * (-1)$
 $x_{07b}, y_{07b} = y_{07b} * (-1)$
 $x_{06b}, y_{06b} = y_{06b} * (-1)$
 $x_{05b}, y_{05b} = y_{05b} * (-1)$
 $x_{08c}, y_{08c} = y_{08c} * (-1)$
 $x_{07c}, y_{07c} = y_{07c} * (-1)$
 $x_{06c}, y_{06c} = y_{06c} * (-1)$
 $x_{05c}, y_{05c} = y_{05c} * (-1)$
 $x_{08d}, y_{08d} = y_{08d} * (-1)$
 $x_{07d}, y_{07d} = y_{07d} * (-1)$
 $x_{06d}, y_{06d} = y_{06d} * (-1)$
 $x_{05d}, y_{05d} = y_{05d} * (-1)$
 $x_{08e}, y_{08e} = y_{08e} * (-1)$
 $x_{07e}, y_{07e} = y_{07e} * (-1)$
 $x_{06e}, y_{06e} = y_{06e} * (-1)$
 $x_{05e}, y_{05e} = y_{05e} * (-1)$
 $x_{08f}, y_{08f} = y_{08f} * (-1)$
 $x_{07f}, y_{07f} = y_{07f} * (-1)$
 $x_{06f}, y_{06f} = y_{06f} * (-1)$
 $x_{05f}, y_{05f} = y_{05f} * (-1)$
 $x_{08g}, y_{08g} = y_{08g} * (-1)$
 $x_{07g}, y_{07g} = y_{07g} * (-1)$
 $x_{06g}, y_{06g} = y_{06g} * (-1)$
 $x_{06g}, y_{06g} = y_{06g} * (-1)$
 $x_{07g}, y_{07g} = y_{07g} * (-1)$
 $x_{08g}, y_{08g} = y_{08g} * (-1)$
 $x_{05f}, y_{05f} = y_{05f} * (-1)$
 $x_{06f}, y_{06f} = y_{06f} * (-1)$
 $x_{07f}, y_{07f} = y_{07f} * (-1)$
 $x_{08f}, y_{08f} = y_{08f} * (-1)$
 $x_{05e}, y_{05e} = y_{05e} * (-1)$
 $x_{06e}, y_{06e} = y_{06e} * (-1)$
 $x_{07e}, y_{07e} = y_{07e} * (-1)$
 $x_{08e}, y_{08e} = y_{08e} * (-1)$

```

x05d, y05d=y05d*(-1)
x06d, y06d=y06d*(-1)
x07d, y07d=y07d*(-1)
x08d, y08d=y08d*(-1)

```

```

x05c, y05c=y05c*(-1)
x06c, y06c=y06c*(-1)
x07c, y07c=y07c*(-1)
x08c, y08c=y08c*(-1)

```

```

x05b, y05b=y05b*(-1)
x06b, y06b=y06b*(-1)
x07b, y07b=y07b*(-1)
x08b, y08b=y08b*(-1)

```

```

x05a, y05a=y05a*(-1)
x06a, y06a=y06a*(-1)
x07a, y07a=y07a*(-1)
x08a, y08a=y08a*(-1)
x09a, y09a=y09a*(-1)

```

'souřadnice dipólu'

've větvi a'

```

xd01a=xd00a,      yd01a=la
xd02a=xd00a+wd1, yd02a=yd01a+wd1*tan(ASL)
xd03a=xd02a,      yd03a=-yd02a
xd04a=xd01a,      yd04a=-yd01a

```

've větvi b'

```

xd01b=xd00b,      yd01b=lb
xd02b=xd00b+wd2, yd02b=yd01b+wd2*tan(ASL)
xd03b=xd02b,      yd03b=-yd02b
xd04b=xd01b,      yd04b=-yd01b

```

've větvi c'

```

xd01c=xd00c,      yd01c=lc
xd02c=xd00c+wd3, yd02c=yd01c+wd3*tan(ASL)
xd03c=xd02c,      yd03c=-yd02c
xd04c=xd01c,      yd04c=-yd01c

```

've větvi d'

```

xd01d=xd00d,      yd01d=ld
xd02d=xd00d+wd4, yd02d=yd01d+wd4*tan(ASL)
xd03d=xd02d,      yd03d=-yd02d
xd04d=xd01d,      yd04d=-yd01d

```

've větvi e'

```

xd01e=xd00e,      yd01e=le
xd02e=xd00e+wd5, yd02e=yd01e+wd5*tan(ASL)
xd03e=xd02e,      yd03e=-yd02e
xd04e=xd01e,      yd04e=-yd01e

```

've větvi f'

```

xd01f=xd00f,      yd01f=lf
xd02f=xd00f+wd6, yd02f=yd01f+wd6*tan(ASL)
xd03f=xd02f,      yd03f=-yd02f
xd04f=xd01f,      yd04f=-yd01f

```

```
've větvi g'  
xd01g=xd00g,      yd01g=lg  
xd02g=xd00g+wd7, yd02g=yd01g+wd7*tan(ASL)  
xd03g=xd02g,      yd03g=-yd02g  
xd04g=xd01g,      yd04g=-yd01g
```