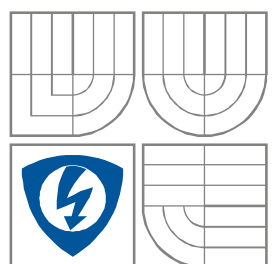


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ANTÉNA PRO DISTRIBUCI TELEVIZNÍHO SIGNÁLU STANDARDU DVB-T

ANTENNA FOR TELEVISION SIGNAL DISTRIBUTION IN STANDARD DVB-T

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Radek Vehovský

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Michal Pokorný, Ph.D.

BRNO, 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Elektronika a sdělovací technika

Student: Radek Vehovský

Ročník: 3

ID: 115307

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Anténa pro distribuci televizního signálu standardu DVB-T

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte různé varianty anténních systémů určené pro vysílání standardu DVB-T vyšších výkonových úrovní na kanálech 21 až 69. Ve vhodném simulátoru elektromagnetického pole ověřte vlastnosti vybraných řešení.

Navrhněte anténní systém s pracující v kmitočtovém pásmu 470 až 862 MHz s vertikální polarizací a výkonovým ziskem na středu pásma 6 dB. Poměr stojatých vln v celém pracovním pásmu by měl být menší než 1,4. Anténu následně realizujte a experimentálně ověřte její vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] BALANIS, A. C. Antenna Theory: Analysis and Design, 2/E. New York: J. Wiley & Sons, 1996.
- [2] NOVÁČEK, Z. Elektromagnetické vlny, antény a vedení. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 27.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Michal Pokorný, 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá rozбором základních typů všesměrových anténních systémů určených pro vysílání standardu DVB-T. Pomocí simulátoru elektromagnetického pole CST Microwave Studio byla navržena kolineární anténa pracující v kmitočtovém pásmu 470 až 862 MHz.

Klíčová slova

Všesměrová anténa, kolineární anténa, širokopásmová anténa, UHF, DVB-T.

Abstract

This bachelor's thesis deals with the analysis of basic omnidirectional antenna systems used for broadcasting in standard DVB-T. Collinear antenna for operating frequency 470 to 862 MHz was designed with the assistance of electromagnetic field simulator CST Microwave Studio.

Keywords

Omnidirectional antenna, collinear antenna, wideband antenna, UHF, DVB-T.

Prohlášení

Jako autor uvedené bakalářské práce na téma „Anténa pro distribuci televizního signálu standardu DVB-T“ 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 zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 27. května 2011

.....
podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne 27. května 2011

.....
podpis autora

Obsah

ÚVOD.....	7
1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY ANTÉN	8
2 TYPY ANTÉN PRO VŠESMĚROVÉ VYSÍLÁNÍ VE IV. A V. TELEVIZNÍM PÁSMU ...	10
2.1 SMĚROVÉ ANTÉNNÍ JEDNOTKY	10
2.2 ANTÉNNÍ SYSTÉMY SLOŽENÉ ZE SMĚROVÝCH JEDNOTEK	11
2.3 ANTÉNNÍ SYSTÉMY SLOŽENÉ Z KRUHOVĚ ZÁŘÍČÍCH ANTÉNNÍCH JEDNOTEK.....	11
3 KOLINEÁRNÍ ANTÉNY.....	12
3.1 SÉRIOVĚ NAPÁJENÁ ANTÉNA	12
3.2 PARALELNĚ NAPÁJENÁ ANTÉNA	13
4 NAPÁJENÍ ANTÉN.....	14
4.1 IMPEDANČNÍ PŘIZPŮSOBENÍ ANTÉN	14
4.2 SYMETRIZAČNÍ OBVODY	15
4.2.1 <i>Symetrizace půlvlnou smyčkou</i>	16
4.2.2 <i>Gamma článek</i>	17
4.2.3 <i>Symetrizace pahýlem</i>	17
4.3 DĚLIČE VÝKONU	18
5 ANALÝZA ZÁŘIČE KOLINEÁRNÍ ANTÉNY	19
5.1 VÝCHOZÍ KONSTRUKCE	19
5.2 ZVĚTŠENÍ ŠÍŘKY PÁSMU.....	21
5.3 VYLEPŠENÍ MECHANICKÉ STRUKTURY	22
6 VÝSLEDNÝ NÁVRH ANTÉNY	25
6.1 GAMMA ČLÁNEK.....	25
6.2 SYMETRIZACE PAHÝLEM	27
6.2.1 <i>Úprava vstupní impedance dipólu</i>	27
6.2.2 <i>Vlastní realizace symetrizačního členu</i>	29
6.2.3 <i>Návrh napájecího vedení</i>	30
7 REALIZACE ANTÉNY	35
7.1 MĚŘENÍ VYZAŘOVACÍCH CHARAKTERISTIK	35
7.2 MĚŘENÍ IMPEDANČNÍHO PŘIZPŮSOBENÍ	37
ZÁVĚR.....	39
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	41

Úvod

Televize je široce používaný jednosměrný telekomunikační systém vysílání a přijímání signálu. Aby mohl televizní divák přijímat určitý program je zapotřebí do jeho přijímače dopravit obrazový a zvukový signál. Po dlouhou dobu byl obraz a zvuk přenášén ve formě analogového elektrického signálu. Dnes se již, díky větší náročnosti diváka, od této metody ustupuje a je ve většině světa nahrazena digitálním televizním vysíláním DVB (Digital Video Broadcasting). Existují tři základní způsoby digitálního televizního vysílání: pozemské DVB-T, družicové DVB-S a kabelové DVB-C.

Principem pozemského vysílání je vyzařování energie do prostoru pomocí vysílací antény a následný příjem přijímací anténou na straně uživatele. Tento přenos elektromagnetických vln se realizuje ve III. ($174 \div 230$ MHz), IV. ($470 \div 606$ MHz) a V. ($606 \div 862$ MHz) televizním pásmu, přičemž šířka pásma jednoho kanálu je 8 MHz. Frekvenční pásmo se v porovnání s analogovým vysíláním nemění, tudíž i antény pro DVB-T se používají převážně shodné jako dříve.

Požadavky na vysílací antény jsou jiné než na antény přijímací. Velmi často mají vyzařovat všesměrově, ale zároveň v úzkém vertikálním laloku, abychom nevyzařovali zbytečně energii k nebi či zemi. Je zde také mnohem důležitější dokonalé přizpůsobení antény k napájecí.

Cílem této práce je popsat různé varianty anténních systémů používaných pro vysílání ve frekvenčním pásmu 470 až 862 MHz. Popisované systémy by měly mít všesměrovou vyzařovací charakteristiku v horizontální rovině a zářit s vertikální polarizací. Dále si zvolit vhodné řešení z uvedených a to navrhnout pomocí simulátoru elektromagnetického pole. Poměr stojatých vln v celém pracovním pásmu by měl být menší než 1,4, výkonový zisk na středu pásma 6 dB. Nakonec anténu realizovat a experimentálně ověřit její vlastnosti.

1 Základní parametry antén

Vysílací anténu můžeme považovat za transformátor, který převádí šířící se vlnění podél vedení na vlnění ve volném prostoru. Přijímací anténa má funkci opačnou.

Zdrojem záření elektromagnetického vlnění může být proud vodičem – lineární antény nebo ozářená plocha – plošné antény. Lineární antény se užívají pro nižší kmitočty až do několika gigahertzů, plošné jsou typické pro centimetrové vlny a kratší.

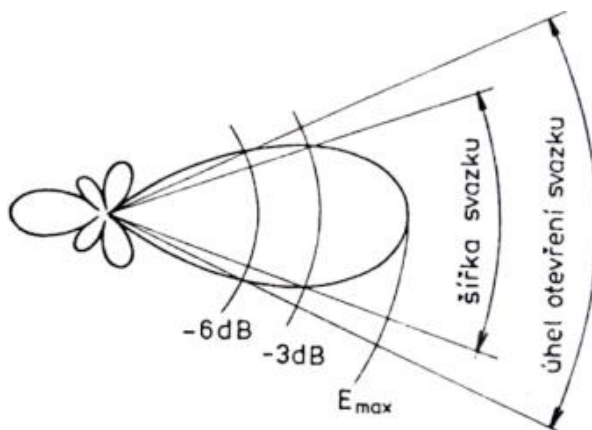
V následujících odstavcích jsou uvedené základní parametry libovolných antén. Především jsou zdůrazněny ty, které se v této práci vyskytují.

Směrová charakteristika antény

Mezi základní parametry vysílacích antén patří směrová (vyzařovací) charakteristika. Je to grafické vyjádření funkce záření, které nám udává, kterým směrem a s jakou intenzitou bude anténa zářit. Vykresluje se ve 3D zobrazení nebo také jako průnik do souřadných rovin. Pro televizní vysílání je žádoucí, aby byla charakteristika anténního systému v horizontální rovině všesměrová, zatímco ve vertikální rovině měla pouze úzký lalok a nedocházelo tedy ke zbytečnému úniku energie k zemi či nebi, kde to není potřeba.

V úhlech se udává:

- úhlová šířka svazku záření, tj. úhlový rozsah, v němž intenzita záření nepoklesá o více než 3 dB,
- úhel otevření svazku antény, což je úhlový rozsah, v němž intenzita záření nepoklesá více než o 6 dB (tj. na 50 %) od maxima.



Obr. 1. Vyzařovací diagram směřové antény ve 2D zobrazení

Vstupní napěťový činitel odrazu

Činitel odrazu (ρ , S_{11}) je dalším důležitým parametrem antén neboť vyjadřuje přizpůsobení antény k napájecímu zdroji. Pro správný režim antény je nutné, aby její vstupní impedance Z_{vst} byla blízká (ideálně shodná) k charakteristické impedanci napáječe Z_0 . Podmínku $Z_{vst} = Z_0$ není vždy možné splnit úplně přesně. Pak se snažíme stavu přizpůsobení alespoň přiblížit. Jedním z možných vyjádření kvality přizpůsobení je absolutní hodnota činitele odrazu

$$|\rho| = \left| \frac{Z_{vst} - Z_0}{Z_{vst} + Z_0} \right|. \quad (1)$$

Někdy se zavádí také veličina poměr stojatých vln (PSV , σ , $VSWR$)

$$PSV = \frac{1 + \rho}{1 - \rho}. \quad (2)$$

Ideální impedanční přizpůsobení nastává pro hodnoty $|\rho| = 0$, $PSV = 1$. Pro hodnocení kvality přizpůsobení je možné použít tyto hodnoty, [9]:

- velmi dobré přizpůsobení $PSV < 1,1$ (např. televizní vysílače),
- dobré přizpůsobení $PSV < 1,5$ až 2 (běžná zařízení),
- vyhovující přizpůsobení $PSV < 3$ až 5 (nenáročná zařízení).

Činitel směrovosti

Činitel směrovosti (D) vyjadřuje množství energie vyzážené do jednotlivých směrů. Hodnot větších než jedna nabývá ve směrech, kam se zdroj záření soustřeďuje a kde je záření potlačováno má velikost menší než jedna. U izotropního zdroje je roven pro všechny směry jedné. Má-li anténa dobře vyjádřený hlavní lalok a nevelké boční laloky, můžeme jeho maximální hodnotu určit z přibližného vztahu

$$D_{max} \approx \frac{35000}{2\theta_E \cdot 2\theta_H}, \quad (3)$$

kde $2\theta_E$ a $2\theta_H$ jsou úhlové šířky hlavního laloku v rovinách E a H vyjádřené ve stupních. Úhlová šířka hlavního laloku je úhel mezi směry, ve kterých intenzita pole poklesne o 3dB vůči maximální hodnotě.

Zisk antény

Zisk antény G je velmi důležitý parametr definující příjmové nebo zářivé vlastnosti antén. Vyjadřuje skutečný přínos vzniklý soustředěním vyzážené energie do žádaného směru v prostoru. Absolutní zisk (vůči izotropnímu zářiči) se určí ze vztahu

$$G_{abs} = 10 \cdot \log D_{max} \quad (4)$$

a udává se v jednotkách dBi.

Relativní zisk (vůči půlvlnnému dipólu) je dán vztahem

$$G_{rel} = 10 \cdot \log \left(\frac{D_{max}}{1,64} \right) \quad (5)$$

a jednotkou dBd. Konstanta 1,64 je maximální hodnotou činitele směrovosti půlvlnného dipólu.

V praxi se používají obě možnosti vyjádření zisku. Pro jejich přepočítání platí

$$dBi = 2,15 + dBd. \quad (6)$$

Pokud je hodnota zisku uvedena pouze v jednotce dB, je tím myšlena hodnota v dBd.

Polarizace vyzárování

Polarizace je orientace vektoru elektrického pole prostorem se šířící elektromagnetické vlny vzhledem k zemskému povrchu. Základní rozdělení je na horizontální (vodorovnou) a vertikální (svislou). Kromě trychtýřových a šterbinových antén je rovina polarizace totožná s rovinou prvků antény, [4].

2 Typy antén pro všesměrové vysílání ve IV. a V. televizním pásmu

Televizní vysílací antény jsou složeny z většího počtu dílčích, systematicky uspořádaných zářivých prvků (jednotek), tvořících anténní soustavu (systém).

Výsledný zářivý efekt anténních systémů závisí na rozmístění anténních jednotek do prostoru a jejich způsobu záření. Nezanedbatelný vliv na vyzařovací diagram má také způsob napájení, vliv nosné konstrukce antény a také kryt antény. Při návrhu soustavy je třeba dále respektovat vzájemné vazby mezi anténními jednotkami, mechanickou pevnost a odolnost proti povětrnostním vlivům, ochranu proti námraze, bleskům i přístupnost pro případné opravy.

2.1 Směrové anténní jednotky

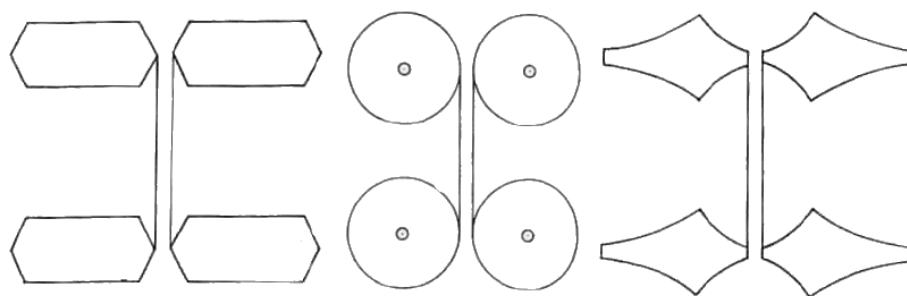
Směrové anténní jednotky jsou stavebními zářivými prvky. Sestavují se do pater kolem svislé nosné konstrukce. Podle způsobu rozmístění po jejím obvodu a podle jejich počtu je možno sestavovat anténní systémy s přibližně všesměrovým nebo různě tvarovaným vyzařovacím diagramem.

Jejich zářičem jsou většinou dipóly v půlvlnné nebo celovlnné rezonanci, umístěné před odraznou stěnou. Bývají sestaveny do dvojic, čtveřic nebo osmic s jediným společným napájecím kolektorem. Všechny dipóly jsou napájeny soufázově.

Vzdálenost mezi dipólem a odraznou stěnou bývá kolem $0,25 \cdot \lambda$. Tato vzdálenost je zvolena proto, že vlnění směřující k odrazné stěně na dráze tam i zpět se zpozdí o 180° a o dalších 180° při odrazu, takže před odraznou stěnou jsou přímá a odražená vlna soufázové. Toto má příznivý vliv na výsledný zisk jednotky.

Pokud máme v anténní jednotce dipóly dva a jejich vzdálená rozteč je $0,5 \cdot \lambda$ (což je elektricky přibližně 180°), příspěvky záření jdoucí od jednoho dipólu ke druhému jsou tedy v protifázi a nemohou se v tomto směru společně šířit. V rovině dipólů, která je rovnoběžná s odraznou stěnou je tedy ve všech směrech minimum záření. Díky tomu je vstupní impedance takové jednotky v podstatě nezávislá na počtu jednotek v anténním systému.

Dvojici dipólů před odraznou stěnou lze proto považovat za základní anténní jednotku i za základ všech jednotek vícedipólových, Obr. 2. Zisk dvojice dipólů složené z půlvlnných dipólů je cca 6,5 dB, dvojice z celovlnných dipólů cca 8 dB a čtveřice z celovlnných dipólů 9,5 až 12 dB. Kolem těchto hodnot se jejich zisk mění v závislosti na kmitočtu a detailním provedení, [14].



Obr. 2. Používané typy širokopásmových dipólů v anténních jednotkách, [14]

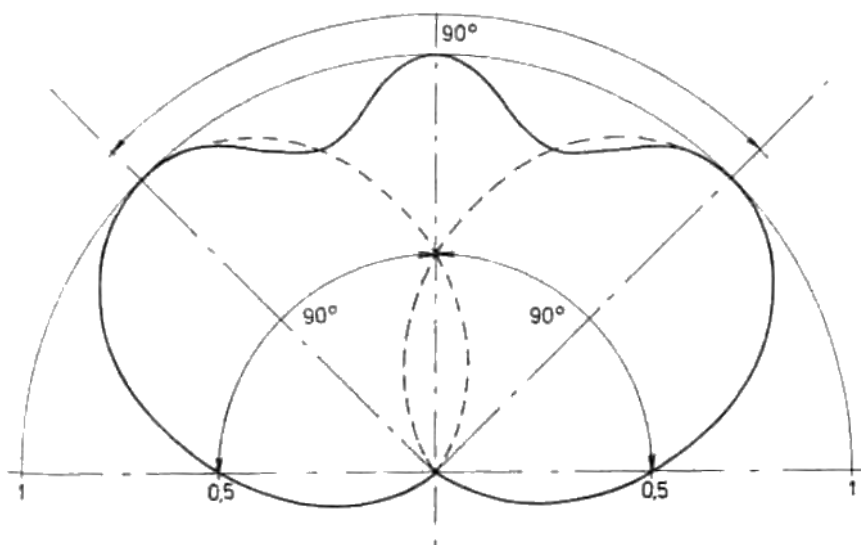
2.2 Anténní systémy složené ze směrových jednotek

Pro dosažení kruhového vyzařovacího diagramu se směrové anténní jednotky umísťují kolem svislé nosné konstrukce, vždy po několika jednotkách v jedné výškové úrovni. Optimální tvar jejich vyzařovacího diagramu by měl mít podobu kruhové výšeče s vrcholovým úhlem

$$\chi = \frac{360^\circ}{n}, \quad (7)$$

kde n je počet výšečí.

Takový zříč je obtížné v praxi realizovat, sestavují se proto anténní systémy z jednotek, jejichž vyzařovací diagram má tvar oválu, vejce nebo kapky. Příspěvky záření od jednotlivých, obvykle jen od sousedních anténních jednotek v dané úrovni, se sčítají. V úvahu se bere velikost zisku v daném směru a také fáze, která je při soufázovém napájení jednotek daná dráhovými rozdíly jednotlivých příspěvků. V ose úhlu mezi hlavními směry záření sousedních stěn se sčítají jejich příspěvky ve fázi. Má-li být takto vzniklé maximum stejně velké jako maxima záření jednotek v jejich hlavním směru, musí být intenzita jejich záření pro tento směr poloviční, Obr. 3.



Obr. 3. Část vertikálního vyzařovacího diagramu u zříčů s úhlem otevření svazku 90° , [14]

Pro kruhový vyzařovací diagram se musí úhel otevření svazku hlavního laloku alespoň přiblížit vztahu (7), tj. 120° při užití tří jednotek, 90° u čtyř jednotek nebo 72° u pěti jednotek v jednom patře.

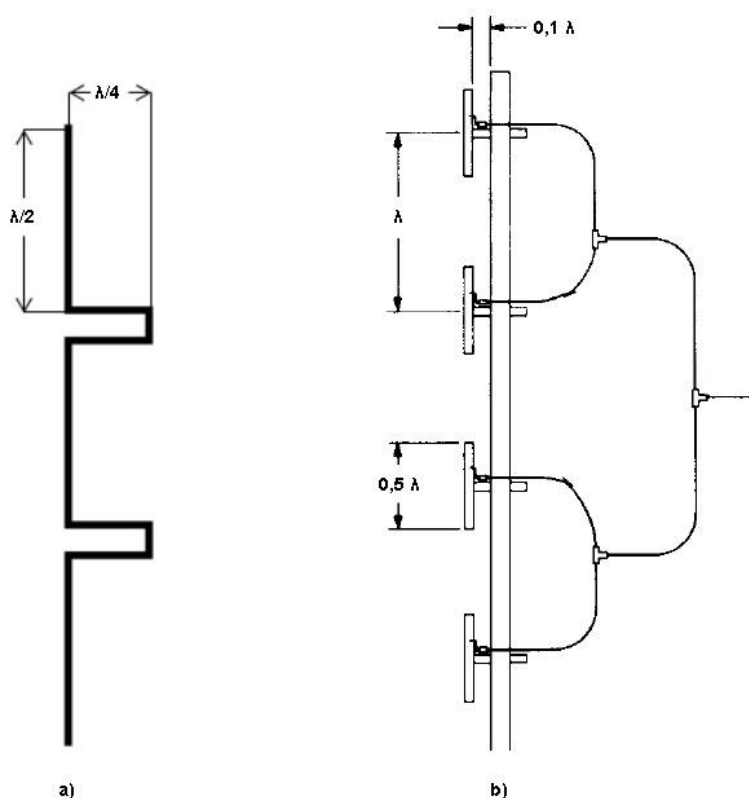
2.3 Anténní systémy složené z kruhově zářících anténních jednotek

Anténní systémy složené ze směrových jednotek se sice v praxi hojně využívají díky svému velkému zisku, ale mají tu nevýhodu, že jejich vyzařovací diagram nebude nikdy ideálně kruhový. Tohoto stavu lze dosáhnout anténou složenou z vertikálních souose upevněných dipólů, tzv. kolineární anténou.

3 Kolineární antény

Kolineární anténa je vertikální řada souose umístěných dipólů, které jsou soufázově napájeny. Existují dvě základní možnosti realizace této antény:

- napájet anténu sériově a soufázovosti jednotlivých dipólů dosáhnout pomocí úseků vedení umístěného kolmo k dipólům mezi konec jednoho a začátek druhého dipólu, tzv. Franklinova anténa,
- napájet anténu paralelně, tzn. připojit každý dipól samostatně k nosnému stožáru a každý dipól také samostatně napájet.



Obr. 4. Kolineární antény s přibližnými rozměry: a) se sériovým napájením, b) s paralelním napájením

3.1 Sériově napájená anténa

Na první pohled toto řešení vypadá jednoduše, nicméně má několik velkých nevýhod.

Jedna z nich je, že konstrukční chyby se sčítají. Pokud se kmotočet spodního dipólu jen nepatrně liší od rezonančního, bude již tato odchylka u zbytku dipólů minimálně stejná. Díky této vlastnosti je zřejmé, že vyladit tuto anténu ke správné činnosti je poměrně složité. Pokud je již vyladěna, tak je velmi úzkopásmová.

I když tato anténa lze teoreticky uchytit pouze ve spodní části, v praxi je třeba pro dosažení stability a ochranou před větrem použít tyč nebo alespoň anténu uchytit nahoře. Tyto opatření mohou mít nepříznivý vliv na vyzářovací charakteristiku antény.

Pokud je již tato anténa sestavena a nepracuje korektně, je již velmi obtížné zjistit či opravit příčinu.

3.2 Paralelně napájená anténa

Tato metoda řešení nabízí hned několik výhod.

Dipóly nemusíme bezpodmínečně napájet uprostřed, ale můžeme si zvolit místo, ve kterém je imaginární složka impedance nulová nebo místo s impedancí, která usnadní provedení napájecího vedení. Případně lze také vstupní impedanci dipólu upravit různou změnou tvaru.

Další výhodou je, že konstrukce antény je velmi pevná a pokud použijeme nosnou tyč z kovu, můžeme anténu uzemněním chránit před blesky.

Při použití vhodných širokopásmových dipólů je možné s touto anténou dosáhnout velké šířky pásma.

4 Napájení antén

Přenos signálu ze svorek antény na vstup přijímače je zprostředkován vysokofrekvenčním vedením zvaným napáječ. Součástí napájecí sítě bývají také přizpůsobovací a symetrizační prvky, jejichž úkolem je přizpůsobit vnitřní impedanci generátoru k impedanci napáječe a zároveň impedanci napáječe k vlastní anténě. Napáječe by měly splňovat tyto tři základní požadavky:

- přenášet energii elektromagnetického pole s co nejmenšími ztrátami,
- schopnost přenášet potřebný výkon,
- nesmí samy vyzařovat,
- odolnost proti vf rušení.

Existují dva typy napáječů: stíněné a otevřené. Stíněné napáječe, jejichž typických představitelem je koaxiální kabel, mají výhodu v malém vyzařování a jednoduchosti montáže. Otevřené napáječe, mezi které řadíme dvou vodičové vedení, dosahují malých ztrát a jsou konstrukčně jednodušší.

Další možností rozdělení napáječů je na symetrické (např. dvou vodičové vedení) a nesymetrické (např. koaxiální kabel). Symetrické vedení má elektrickou osu symetrie, zatímco nesymetrické ji nemá. Negativní vliv na symetrické vedení mají blízké vodivé předměty, které zasahují do elektromagnetického pole vedení, dále také ohyby vedení.

Základním parametrem každého napáječe je jeho charakteristická impedance. Její hodnota je závislá na geometrických rozměrech a uspořádání vodičů. Charakteristickou impedanci koaxiálního vedení můžeme vypočítat podle vzorce

$$Z_{ov} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{a_2}{a_1}, \quad (8)$$

kde a_2 a a_1 jsou poloměry vnějšího a vnitřního vodiče. Pro dvou vodičové vedení platí vztah

$$Z_{ov} = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{d}{a}, \quad (9)$$

kde d je vzdálenost mezi středy vodičů a a je jejich poloměr.

Dalším parametrem, který se zvyšuje s rostoucím pracovním kmitočtem, je útlum napáječe. Jeho hodnotu určuje především kvalita materiálů, z jakých jsou vyrobeny – ztráty dielektrik a vodivost vodičů. V praxi se proto rozměry dielektrik zmenšují na minimum. Další přídavné ztráty bývají způsobeny vyzařováním a odrazy vln na napáječích.

4.1 Impedanční přizpůsobení antén

Charakteristická impedance napájecího vedení je obvykle reálná, zatímco impedance anténních jednotek nabývá většinou hodnot komplexních. Generátor dodá do zátěže maximální výkon, jsou-li vnitřní impedance generátoru a impedance zátěže komplexně sdružené. Pro správnou činnost antény musí být proto navrženy přizpůsobovací obvody, které v požadovaném frekvenčním rozsahu transformují reálnou složku impedance antény a zároveň kompenzují jalovou složku opačnou reaktancí, než má anténa.

Nejjednodušší možnost impedančního přizpůsobení je pomocí úseků vedení. Vstupní impedance úseku vedení délky l o charakteristické impedanci Z_{ov} a zakončeného Z_k je dána vztahem

$$Z_{vst} = Z_{ov} \cdot \frac{Z_k \cos kl + jZ_{ov} \sin kl}{Z_{ov} \cos kl + jZ_k \sin kl} \quad (10)$$

Pro vedení na konci zkratované dostaneme dosazením $Z_k = 0$

$$Z_{vst} = jZ_{ov} \tan kl, \quad (11)$$

pro vedení nakrátko $Z_k = \infty$ a

$$Z_{vst} = -jZ_{ov} \cot kl. \quad (12)$$

Různou délkou zkratovaných a otevřených úseku vedení můžeme realizovat libovolnou reaktanci, kterou připojíme sériově nebo paralelně s vedením v místě, kde normalizovaná impedance či admitance má reálnou část jednotkovou. Názorné řešení impedance pomocí úseků vedení je použití Smithova diagramu. Tento způsob kompenzace se používá především u dvou vodičových vedení, kdy lze jednoduše měnit polohu kompenzačního členu.

U koaxiálních vedení připojením kompenzačního elementu musíme narušit plášť. Proto se používají spíše čtvrtvlnné transformátory, které mohou být zapojeny i kaskádně. Čtvrtvlnné vedení transformuje impedanci podle vztahu

$$Z_{vst} = \frac{Z_{ov}^2}{Z_k}. \quad (13)$$

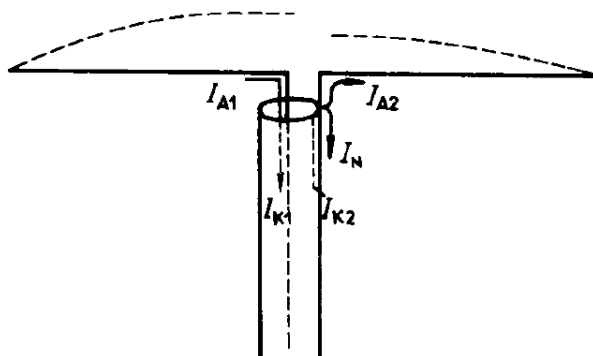
Pokud je impedance zátěže komplexní, přidává se k zátěži nejprve úsek vedení, ten změní její impedanci na reálnou, kterou pak následující čtvrtvlnný úsek transformuje na požadovanou hodnotu Z_{ov} . Při transformaci impedancí R_k výrazně odlišných od hodnoty Z_{ov} je možno šířku kmitočtového pásma zvětšit rozdělením transformace do několika kaskádních stupňů, [9].

Jednotlivé metody pomocí úseku vedení jsou pouze pro jediný, námi zvolený kmitočet neboť transformační vedení určité geometrické délky má při různých kmitočtech různou délku elektrickou. Často je však potřeba pracovat v různém kmitočtovém rozsahu. Požadavek dokonalého přizpůsobení je však nemožné ve větším rozsahu splnit, proto stanovíme maximální poměr stojatých vln, který by neměl být v požadovaném rozsahu překročen.

4.2 Symetrizační obvody

Většina antén používaných v pásmu UHF jsou antény symetrické. Pro napájení je však vhodnější používat koaxiální (nesymetrické) vedení neboť je výrobně jednodušší a levnější. Nesymetrické napáječe při spojení se symetrickými vstupy antén vyžadují pro správnou činnost použití symetrizačních členů. Symetrizační obvody se nazývají také baluny – anglická zkratka pro „balanced to unbalanced convertor“.

Pokud bychom připojili nesymetrický napáječ přímo k symetrické anténě (Obr. 5), tak se proud procházející po vnitřní straně vnějšího vodiče nedostane celý do pravého ramene dipólu, ale jeho část I_N prochází po vnější straně. Vytvoří to nesymetrické rozložení proudu na ramenech dipólu a tím i otočení maxima vyzařování z příčného směru. Dále proud I_N vytváří své vyzařované pole, které je symetrické kolem tohoto proudu a projeví se především ve vyplnění nulových míst původní směrové charakteristiky dipólu. Kromě toho proud I_N , který prochází kolmo k proudu I_A , vytváří kolmo polarizované pole, což může v některých aplikacích vadit, [12].



Obr. 5. Uspořádání proudů při spojení symetrického dipólu s nesymetrickým napáječem, [12]

Při pokusu jednoduše připojit symetrické anténní svorky k nesymetrickému vedení vzniknou tedy ztráty výkonu nepřizpůsobením a navíc fázové chyby, které deformují vyzařovací diagram antény. Anténa „šilhá“ a zmenší se její zisk. U směrových, přijímacích antén vede deformace vyzařovacího diagramu často k mylným úvahám o směru, ze kterého je signál přijímán.

Symetrizační obvody může dělit podle různých kritérií:

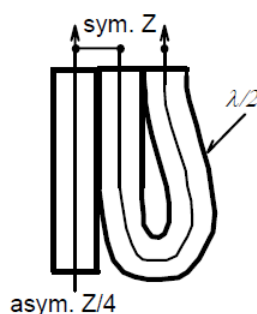
- úzkopásmové / širokopásmové,
- rezonanční / útlumové,
- bez / s transformací impedance.

V následujících odstavcích jsou popsány některé základní a používané typy symetrizačních obvodů.

4.2.1 Symetrizace půlvlnou smyčkou

Symetrizace půlvlnou smyčkou je jeden z nejnázřejších a často používaných symetrizačních obvodů. Obě ramena symetrické zátěže jsou připojena na střední vodič napájecího kabelu a smyčka o délce $\lambda/2$ působí jako fázový invertor. Proudů svorkami zátěže mají opačný směr, tedy správně u symetrického napáječe.

Z hlediska impedance je impedance Z sériovým spojením impedancí $Z/2$ obou ramen. Ke koaxiálnímu vedení jsou však obě ramena připojena paralelně, takže kabel je zatěžován impedancí $Z/4$. Šířka pásma tohoto symetrizačního obvodu se udává kolem $\pm 10\%$ a je ovlivněna především změnou fáze proudu procházejícím smyčkou.



Obr. 6. Symetrizace půlvlnou smyčkou, [9]

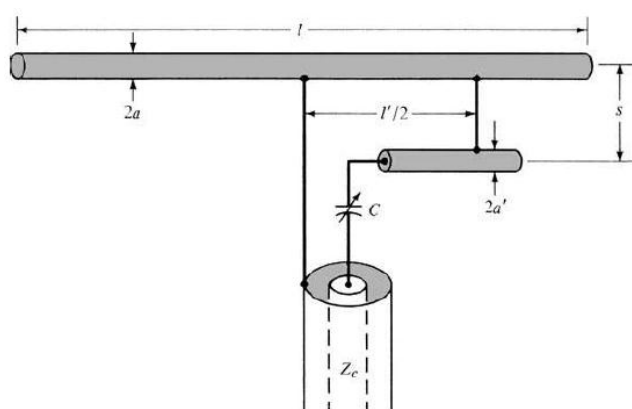
4.2.2 Gamma článek

Lineární antény bývají často napájeny koaxiálními kabely, které představují nesouměrný typ vedení. Vhodná metoda připojení dipólových antén k 50 nebo 75 ohmovému koaxiálnímu kabelu a dosažení přizpůsobení antény je gamma článek – anglicky „gamma match“, který představuje jednu z možností bočníkově napájené antény, [1].

Gamma článek plní dvě základní funkce:

- chová se jako symetrizační obvod, zabraňuje tedy průtoku asymetrického proudu po vnějším obvodu pláště vedení,
- transformuje vstupní impedanci antény blíže k impedanci koaxiálního vedení.

Využitím těchto vlastností článku je anténa lépe impedančně přizpůsobena a zároveň dosažen efektivnější přenos energie.



Obr. 7. Přizpůsobovací Gamma článek, [1]

Při návrhu článku obvykle známe délku půlvlnného dipólu (l) a charakteristickou impedanci napájecího koaxiálního kabelu (Z_c). Určit potřebujeme poloměry a , a' , délku $l'/2$ a kapacitu C , kterou dosáhneme přizpůsobení.

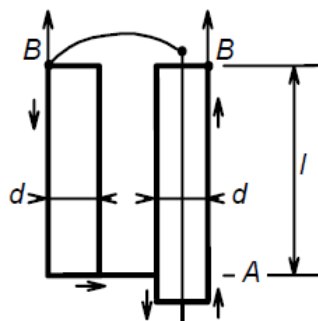
Protože vstupní impedance výrazně nezávisí na a , a' a s , obvykle se tyto hodnoty zvolí a hodnoty zůstávají fixní. Grafická metoda řešení popsaná v [1] předpokládá, že $l'/2$ se zvolí a kapacita C se vypočítá. Pokud vstupní odpor není roven charakteristické impedanci vedení Z_c a výpočet je opakován do té doby než $R_{in} = Z_c$. Grafická metoda je názornější na představu, jak by se mělo $l'/2$ změnit k dosažení přizpůsobení.

4.2.3 Symetrizace pahýlem

Předchozí způsoby symetrizace měly tu nevýhodu, že jejich působení bylo závislé na kmitočtu a hlavním omezujícím činitelem byla vzniklá nesymetrie. Symetrizace pahýlem je obvod, který symetrizuje v širokém kmitočtovém pásmu. Řadí se také mezi členy, které zachovávají charakteristickou impedanci koaxiálních vedení.

Na anténní konec napáječe je připojeno symetrické vedení tvořené vnějším povrchem stínění napáječe a pomocným pahýlem. Charakteristická impedance pahýlu musí být pro správnou činnost shodná s charakteristickou impedancí pláště koaxiálního kabelu, což je zaručeno stejným průměrem. Dole, v určité vzdálenosti l , je pomocný pahýl připojen k vnějšímu povrchu stínění napáječe a tím se zkratuje.

Symetrizace pahýlem vyloučí asymetrický proud kompenzací. Cesta asymetrických proudů na zem po vnějším povrchu pláště je možná z obou svorek symetrické zátěže. Proudů, které vzniknou na svorkách, jsou vyvolány napětími opačné polaroty, mají tedy opačný směr a od místa A k zemi se zruší, Obr. 8.



Obr. 8. Symetrizace pahýlem, [9]

Z hlediska symetrizačního účinku je délka l libovolná. Aby však obvod nezatěžoval napáječ, musí být mezi body B-B veliká impedance. Pro vstupní impedanci bezeztrátového vedení nakrátko platí vztah, [9]

$$Z_{vst} = jZ_{ov} \cdot \tan \alpha l, \quad (14)$$

kde Z_{ov} je charakteristická impedance dvouvodičového vedení (9) a α je měrná fáze

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (15)$$

Z uvedených vztahů je zřejmé, že nejvhodnější délka vedení je pro liché násobky $\lambda/4$, kdy je vedení tvořené vnějším povrchem pláště a pomocnou trubkou v paralelní rezonanci a zádržná impedance je tedy největší. Mimo paralelní rezonanci bude zádržná impedance tím větší, čím větší je Z_{ov} . Ze vztahu (9) tedy vyplývá, že poměr d/a by měl být co největší.

4.3 Děliče výkonu

Napájecí obvod v anténních systémech lze přirovnat k větvení stromu. Od vysílače k anténnímu systému vede kmenový napáječ, který se člení na několik hlavních dílčích napáječů. V místech větvení jsou zapojeny děliče výkonu, které zajišťují mechanické a hermeticky těsné spojení vstupního a výstupních napáječů, rozdělení výkonu do jednotlivých větví podle předem stanoveného poměru a transformaci impedance. U televizních antén nesmějí děliče výkonu na připojených vedeních způsobovat PSV vyšší než 1,03 a to v celém pásmu pracovních kmitočtů, [14].

Výkonová zatížitelnost antény je dána právě použitým děličem výkonu a také konektory napájecího vedení. Pomocí katalogových listů konektorů lze nalézt hodnotu pracovního napětí a při uvážení impedance konektoru můžeme určit maximální dovolený výkon pro anténu. Použijeme-li N konektor, který má poměrně vysokou výkonovou zatížitelnost, bude dovolený výkon přibližně 2 kW. Musíme však zohlednit také použitý dělič výkonu.

5 Analýza zářiče kolineární antény

Cílem této části práce je návrh a ověření vlastností zvolené antény. Díky výše uvedeným důvodům byla k analýze zvolena právě paralelní verze kolineární antény. Jelikož žádnými analytickými vztahy neumíme popsat, jak přesně se bude výsledný anténní systém chovat, bude se v této práci vycházet z již ověřené konstrukce a ta se bude pomocí simulátoru elektromagnetického pole upravovat pro dosažení požadovaných parametrů.

Jako simulátor elektromagnetického pole byl vybrán komerční nástroj CST Microwave studio a jeho nejflexibilnější nástroj transient solver. Tato simulační technika má pozoruhodnou účinnost pro většinu vysokofrekvenčních a mikrovlnných aplikací jako jsou konektory, přenosová vedení, antény a jiné. Nástroj je zvláště vhodný pro struktury, které se výrazně neliší svou velikostí od vlnové délky elektromagnetické vlny, [2].

Požadavky na navrženou anténu jsou následující:

- kmitočtový rozsah 470 – 862 MHz,
- $PSV < 1,4 \Rightarrow S_{11} < -15,56$ dB dle rovnice (2),
- $G > 6$ dBd = 8,15 dBi dle vztahu (6),
- zvlnění horizontální charakteristiky na střed pásmu ± 3 dB.

5.1 Výchozí konstrukce

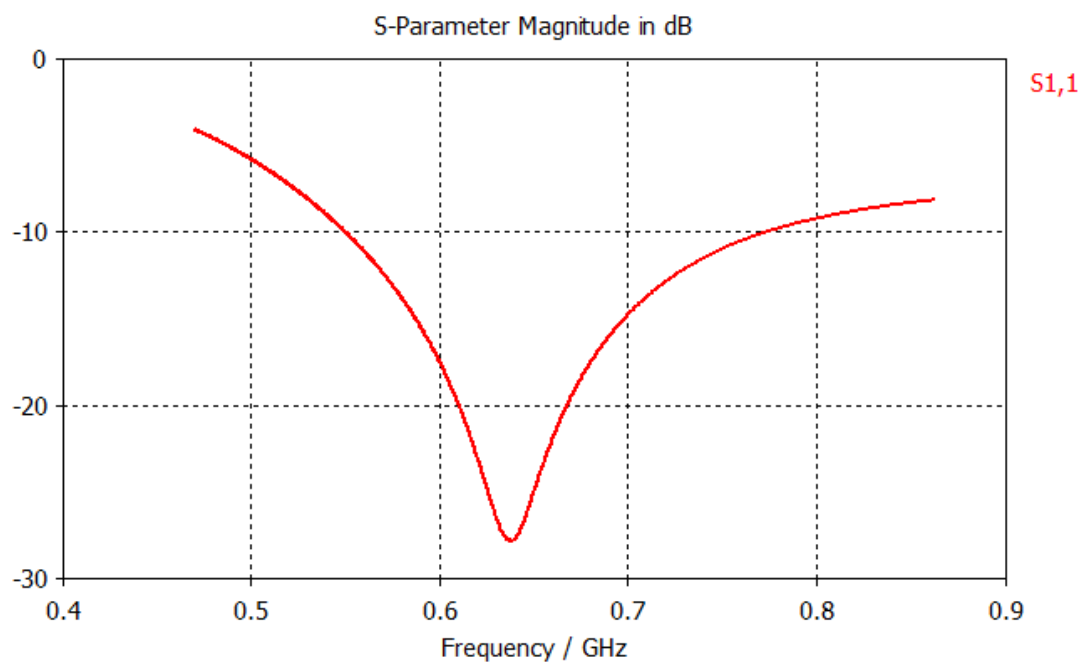
Jako výchozí konstrukce byla vybrána ověřená verze antény uvedená v [13]. Rozměry uvedené jako parametr vlnové délky jsou pouze transformovány na střední frekvenci 666 MHz, která leží uprostřed požadovaného kmitočtového rozsahu. Simulace slouží pouze k ověření správné činnosti antény, nejsou zahrnuty žádné negativní vlivy na činnost antény (vliv konektorů, nosné tyče). Osa z je vertikální osou antény.



Obr. 9. Pohled na výchozí konstrukci antény

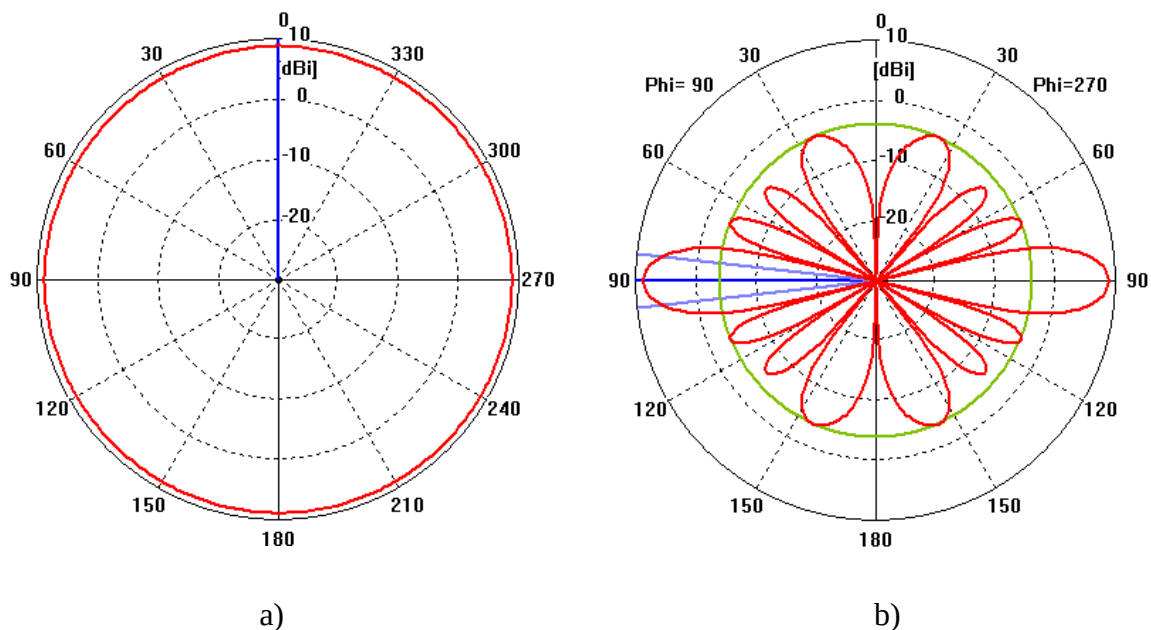
Parametry simulované antény jsou:

- délka jednoho válcového dipólu 207 mm,
- poloměr podstavy válce 13 mm,
- mezera mezi jednotlivými dipóly 230 mm,
- impedance diskrétních portů 70 Ω .



Obr. 10. Frekvenční závislost činitele odrazu výchozí konstrukce

Z uvedené závislosti je patrné, že anténa není přizpůsobena v celém kmitočtovém rozsahu, který požadujeme. Kritérium $PSV < 1,4$ splňuje anténa ve frekvenčním rozsahu 590 – 695 MHz, což odpovídá pouze 27 % rozsahu požadovaného.



Obr. 11. Vyzařovací charakteristiky výchozí konstrukce: a) horizontální rovina, b) vertikální rovina

Horizontální charakteristika je opravdu ideálně kruhová. Zisk soustavy je tedy v celé horizontální rovině stejný - 8,8 dBi, což s rezervou splňuje požadovanou hodnotu. Tímto je ověřeno, že soustava se čtyřmi dipóly je dostačující.

U vertikální charakteristiky je úhlová šířka hlavního laloku $13,3^\circ$.

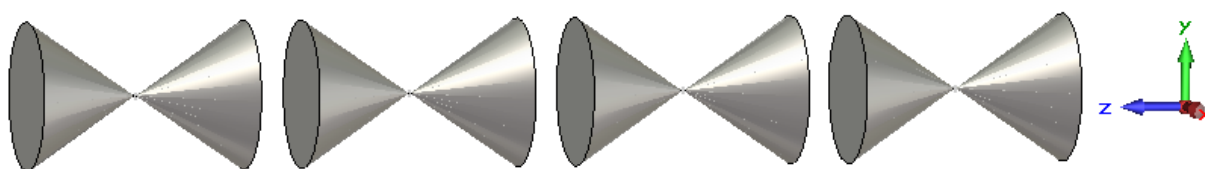
5.2 Zvětšení šířky pásma

U výchozí konstrukce nebyl splněný jeden z hlavních požadavků - šířka pásma antény. Tu lze rozšířit použitím dipólů s větší šířkou pásma. Různé typy širokopásmových dipólů jsou popsány v [1].

Jedním z nejjednodušších řešení, které se nabízí, je zvětšení průměru válcového dipólu. Tato možnost byla experimentálně ověřena, nicméně požadovaných hodnot nebylo dosaženo.

Další z možností je použití tzv. bikónických dipólů. Tyto dipóly se již dlouhou dobu používají v UHF pásmu právě díky své širokopásmovosti.

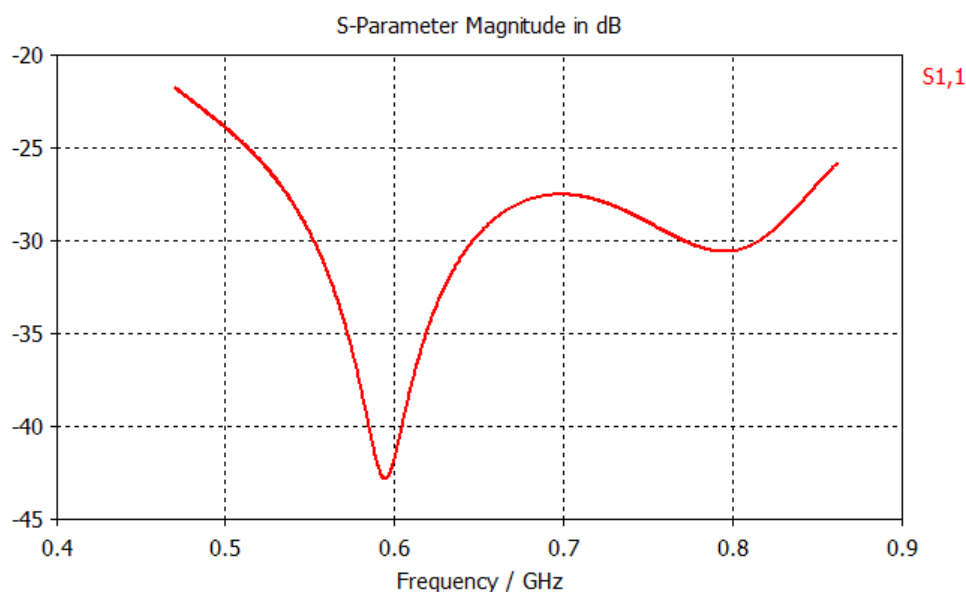
Nejprve byl v programu CST Microwave Studio proveden návrh samostatného dipólu tak, aby byl impedančně přizpůsobený v celém požadovaném pásmu. Bylo použito funkce parametrického rozmítání. Následně byla vytvořena a vyladěna celá soustava čtyř dipólů, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů.



Obr. 12. Pohled na navrženou anténu s rozšířenou šířkou pásma

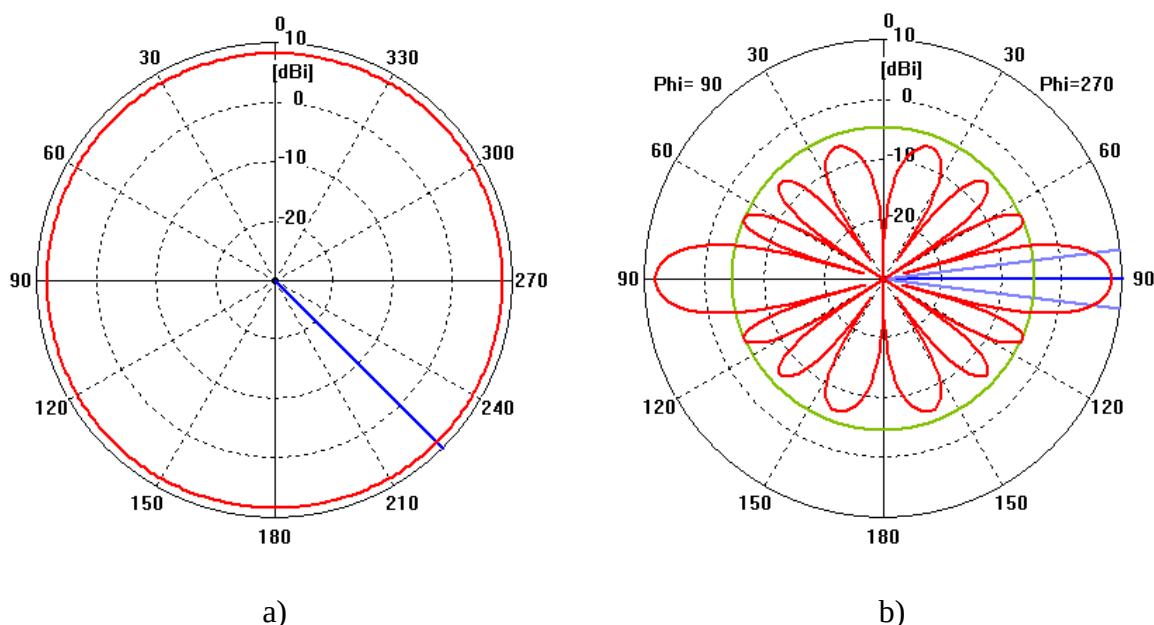
Parametry antény jsou:

- výška jednoho kužele 155 mm,
- poloměr podstavy kužele 105 mm,
- délka jednoho dipólu 315 mm,
- celková výška antény 1,52 m,
- impedance diskrétních portů 160 Ω .



Obr. 13. Frekvenční závislost činitele odrazu antény s rozšířenou šířkou pásma

Z uvedené závislosti je zřejmé, že anténa je již přizpůsobena v celém kmitočtovém rozsahu. Od frekvence 528 MHz dále je již $PSV < 1,1$, což odpovídá velmi dobrému přizpůsobení.



Obr. 14. Vyzařovací charakteristiky antény s rozšířenou šířkou pásma: a) horizontální rovina, b) vertikální rovina

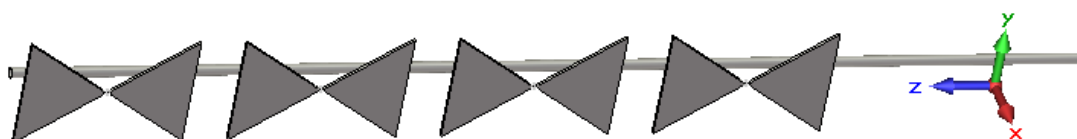
Zisk antény na středu pásma je 8,5 dBi, v horizontální rovině září opět všesměrově. Požadavek na zisk je tedy také splněn. Úhlová šířka hlavního laloku ve vertikální rovině je $8,3^\circ$.

5.3 Vylepšení mechanické struktury

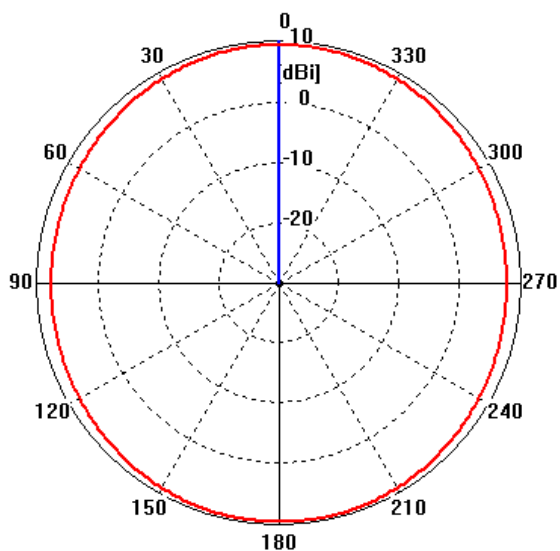
Předchozí anténa splňuje všechny zadané požadavky, nicméně realizace bikónického dipólu je náročná díky jeho struktuře. Alternativou může být tzv. motýlkový dipól, který sice nevykazuje takové širokopásmové vlastnosti, zato je ale mnohem jednodušší na konstrukci, [1].

Osou předchozí konstrukce byl vynesena kvádr (plech) o tloušťce 6 mm. Výsledná anténa je dána průnikem plechu a konstrukce předchozí. Konstrukce je doplněna také o nosnou trubku antény. Je na ní ukázán vliv na vyzařovací charakteristiku antény. Ideální vzdálenost stožáru od antény by měla být alespoň $\lambda/2$, dobrých výsledků však dosahuje dle [13] také hodnota $0,12 \cdot \lambda$, což je v našem případě přibližně 5 cm.

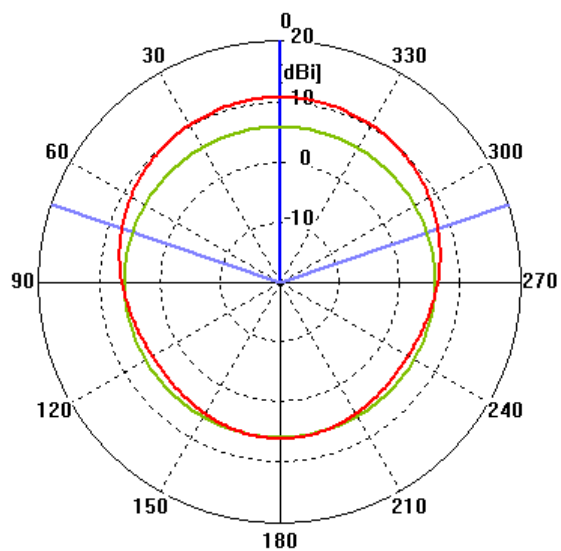
Pro dosažení lepšího poměru stojatých vln bylo třeba také přizpůsobit impedanci diskrétních portů. Impedance diskrétních portů byla zvolena 260Ω .



Obr. 15. Pohled na konstrukci s vylepšenou mechanickou strukturou

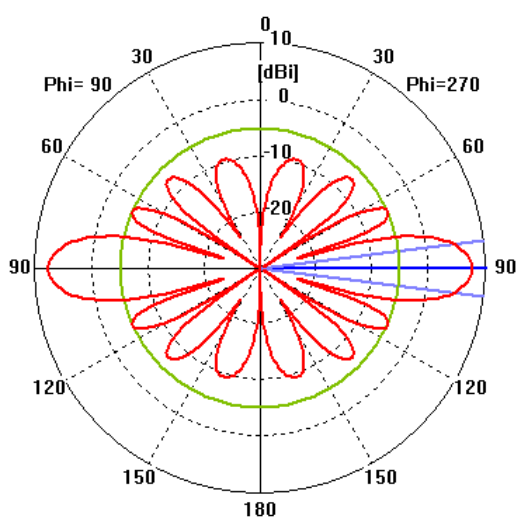


a)

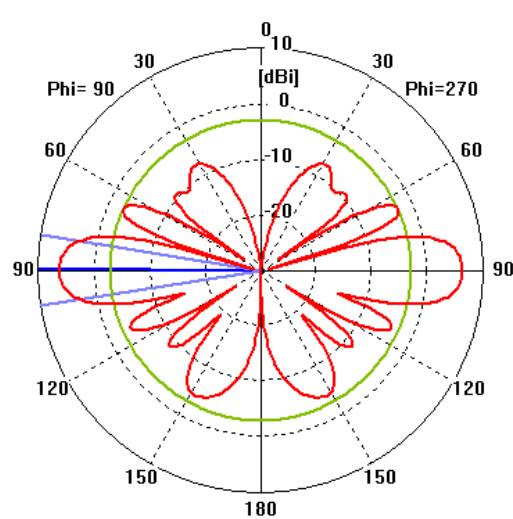


b)

Obr. 16. Horizontální vyzařovací charakteristiky výsledné antény: a) bez tyče, b) s tyčí



a)

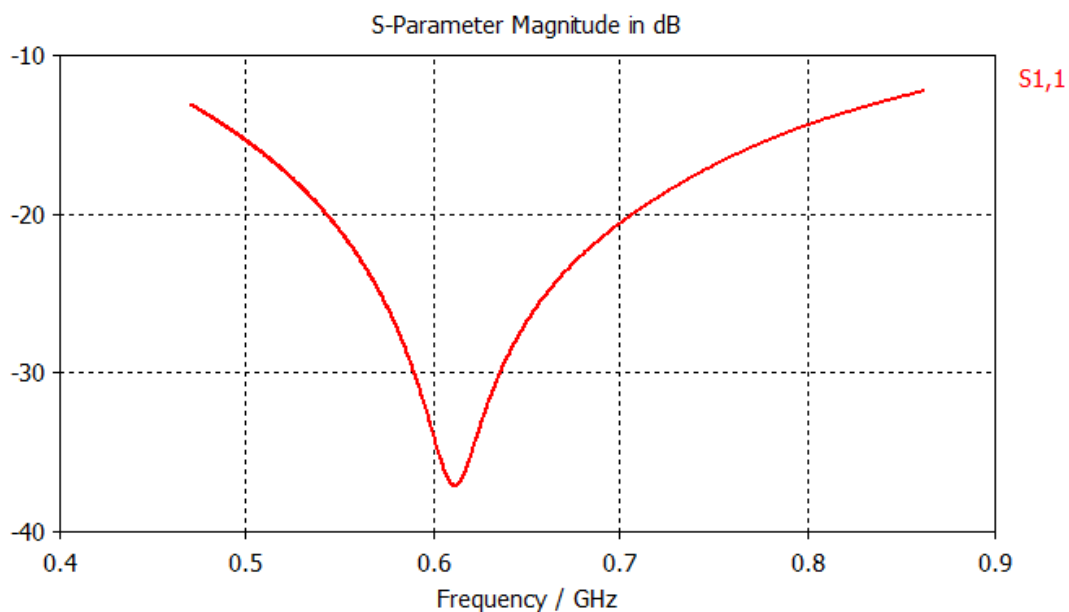


b)

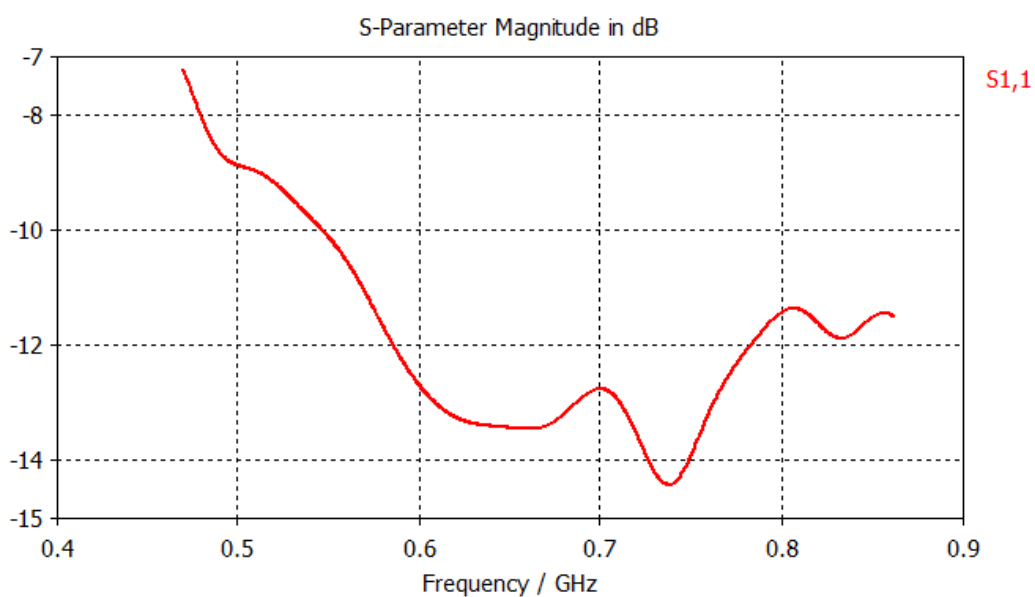
Obr. 17. Vertikální vyzařovací charakteristiky výsledné antény: a) bez tyče, b) s tyčí

Rozdíl mezi maximem a minimem zisku horizontální charakteristiky vyzařování je u antény bez nosné tyče přibližně 1,5 dB, u antény s nosnou tyčí 4,5 dB.

U vertikálních vyzařovacích charakteristik nosná tyč pouze mírně deformuje postranní laloky.



Obr. 18. Frekvenční závislost činitele odrazu výsledné antény bez tyče



Obr. 19. Frekvenční závislost činitele odrazu výsledné antény s tyčí

Grafem na obr. 14 je dokázáno, že tato anténa není tolik širokopásmová jako předchozí konstrukce pomocí bikonálních dipólů. Z uvedených závislostí dále vyplývá, že nosná tyč umístěna poblíž antény mění její vstupní impedanci. Pokud by se tedy nastavila vhodnější impedance diskrétních portů u antény s nosnou tyčí, měl by dosahovat činitel odrazu menších hodnot.

6 Výsledný návrh antény

V předchozí kapitole byly popsány pouze zářiče antény. V praxi je však potřeba tyto zářiče napájet určitým reálným vedením. Jelikož se kolineární anténa skládá ze čtyř stejných elementů, je vhodné nejprve analyzovat jeden element, dále vzít v úvahu elementy zbývající a nakonec výslednou konstrukci doladit.

Nejvhodnějším napáječem pro připojení antén je pro pásmo UHF koaxiální kabel. Sériově vyráběné koaxiální kabely mají charakteristickou impedanci 50 nebo 75 ohmů, přičemž pro vysílací účely se používá 50ti ohmová varianta. Z tohoto důvodu musí být v místě připojení napáječe impedance 50 ohmů a to pokud možno v celém pracovním kmitočtovém rozsahu.

6.1 Gamma článek

Tento člen se velmi často používá v praxi pro své nesporné výhody a to zejména snadnému přizpůsobení napáječe k anténě a velmi dobrého vyladění PSV, pro antény symetrické i nesymetrické.

Grafický postup návrhu článku uvedený v [1] předpokládá dipól válcového tvaru. Proto byl jako výchozí konstrukce zvolen obyčejný, úzkopásmový dipól. Pomocí postupu z knihy byl článek navržen tak, aby reálná složka vstupní impedance byla 50 ohmů. Imaginární složka vyšla 117 ohmů, která se dá vykompenzovat kapacitorem zapojeným v sérii. Potřebná kapacita se vypočte ze vztahu

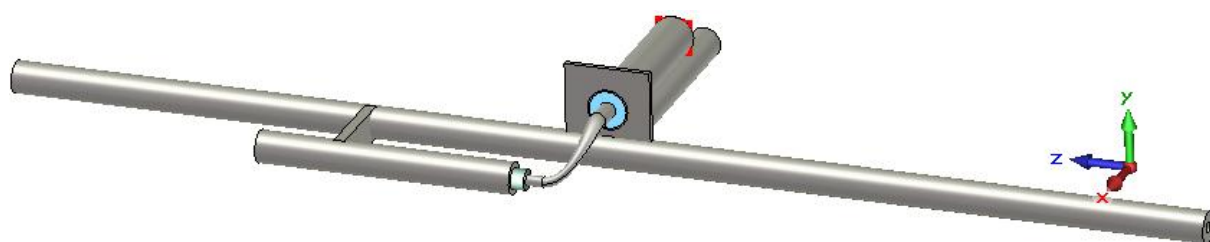
$$C = \frac{1}{2\pi f_0 X_{in}} \quad (16)$$

a při střední frekvenci 666 MHz je rovna 2,04 pF. Použitý kondenzátor je válcového typu, zasunutý do napájecí tyče, jehož kapacita se určí vztahem

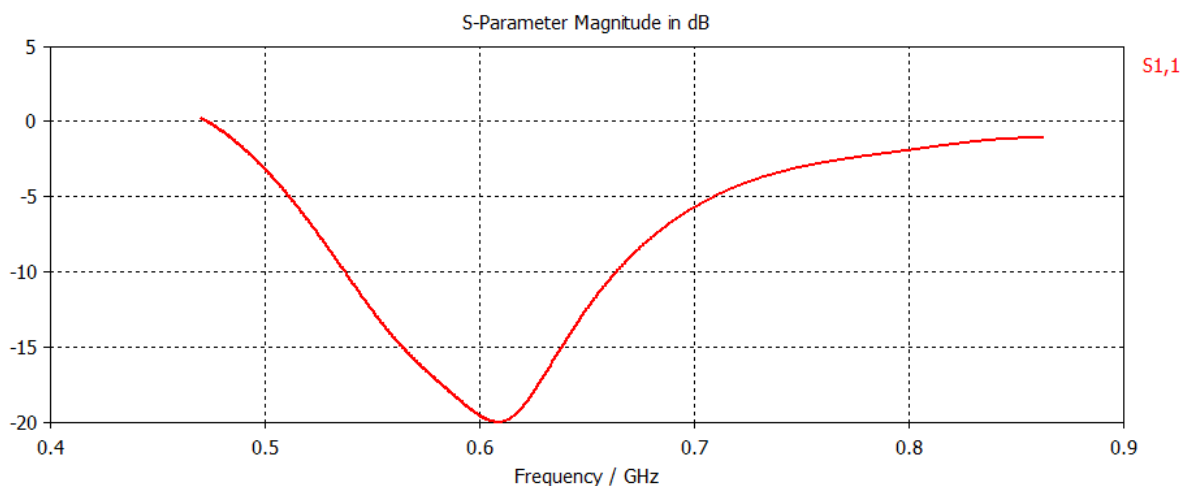
$$C = 2\pi\epsilon \frac{l}{\ln \frac{b}{a}}, \quad (17)$$

kde b je poloměr konce dielektrika, a je poloměr vnitřního vodiče a l je délka kondenzátoru.

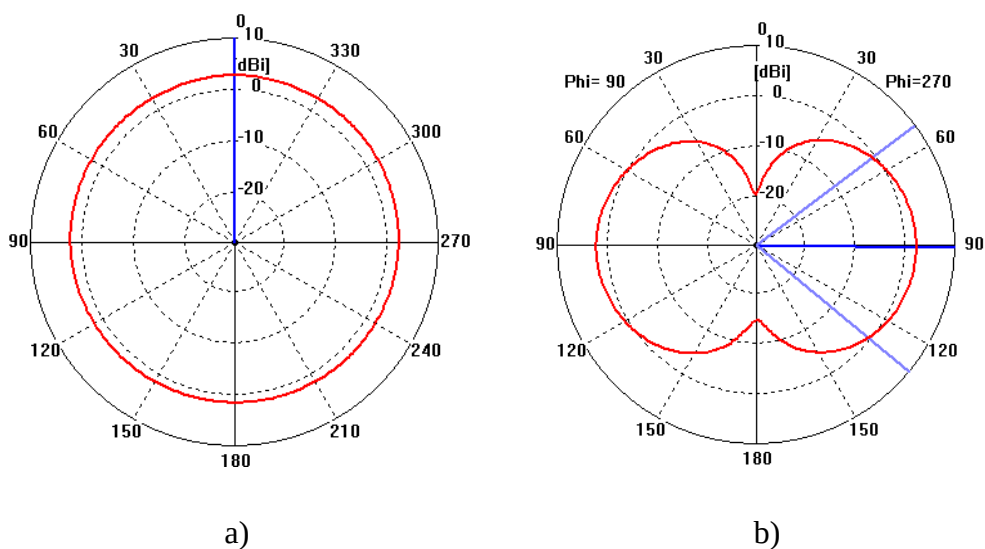
V simulátoru elektromagnetického pole byla ověřena funkčnost článku. Jako napájecí konektor byl použit konektor typu N, který je možné zatížit poměrně velkým výkonem. Dále je na obrázku znázorněna část nosné tyče, která nemá na funkčnost obvodu vliv.



Obr. 20. Napájení dipólu pomocí gamma článku



Obr. 21. Frekvenční závislost činitele odrazu gamma článku



Obr. 22. Vyzařovací charakteristiky gamma článku: a) horizontální rovina, b) vertikální rovina

Výše uvedené grafy jsou typické pro obyčejný jednoduchý dipól. Gamma článkem se dá tedy velmi dobře dipól napájet. Z grafu činitele odrazu vyplývá, že anténa je dobře impedančně přizpůsobena ($PSV < 1,4$) v rozsahu přibližně 70 MHz.

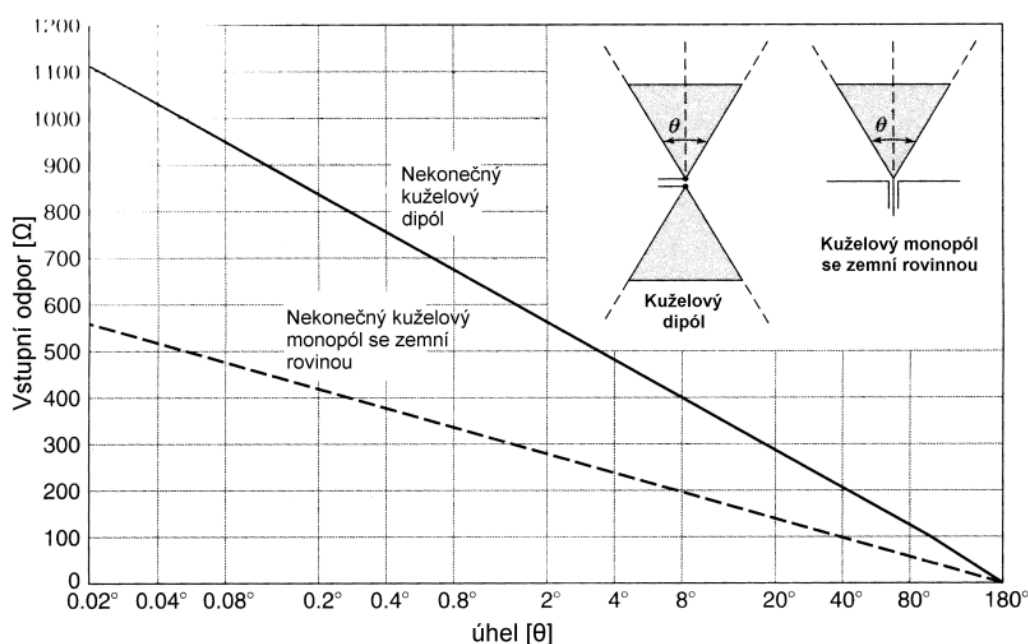
Další postup v simulátoru vedl k „seříznutí“ dipólu v ose na planární tvar a dále rozšiřování ramene až na podobu uvedenou v kapitole 5.3. Nicméně každou další změnou se impedanční přizpůsobení postupně zhoršovalo a žádná změna parametrů (C , $l/2$) nevedla k výraznému zlepšení. Možnost napájet širokopásmový planární dipól gamma článkem se tedy nepodařilo prokázat.

6.2 Symetrizace pahýlem

Symetrizace pahýlem, jak již bylo uvedeno výše, symetrizuje obvod v širokém kmitočtovém pásmu. Jedná se také o obvod, který nijak netransformuje vstupní impedanci antény. Dipóly uvedené v kapitole 5.3 mají však impedanci odlišnou od 50ti ohmového koaxiálního napáječe.

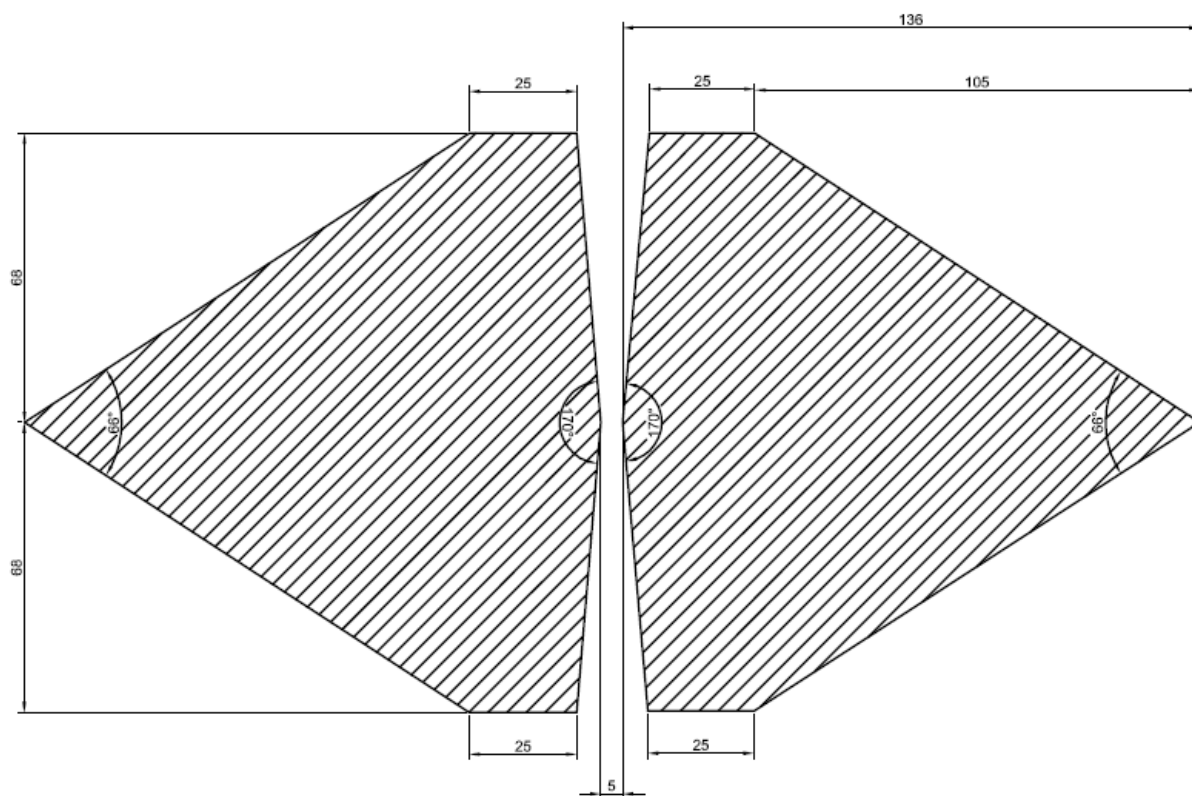
6.2.1 Úprava vstupní impedance dipólu

Jedna z možností vyřešení situace je úprava tvaru dipólu, při současném zachování jeho širokopásmových a vyzařovacích vlastností. Impedance motýlkových dipólů klesá s rostoucím úhlem elementů, pro 50 ohmů je úhel přibližně 100°, Obr. 23. Šířka pásma závisí výrazně na šířce ramene, rovnoměrnou impedanční charakteristiku a další snížení vstupní impedance lze dosáhnout zúžením konců ramen dipólu.



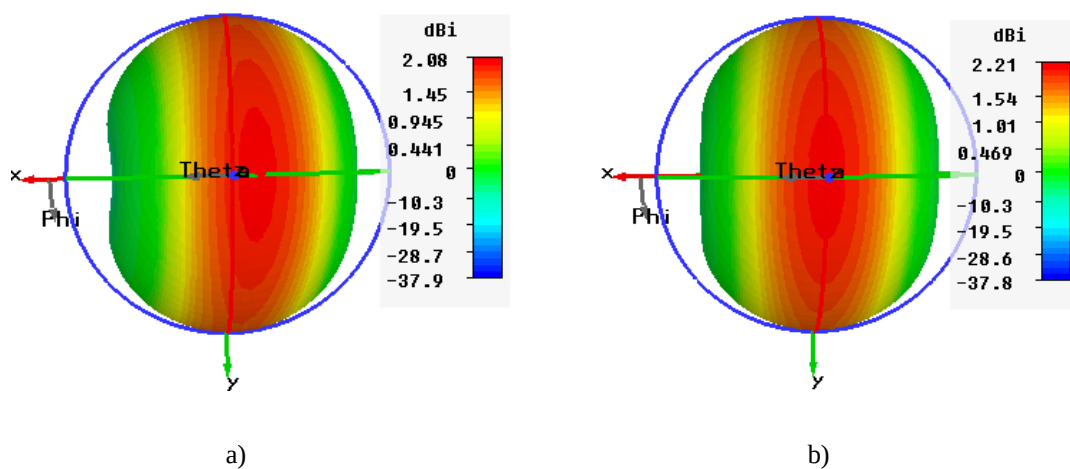
Obr. 23. Závislost vstupní rezistance kuželových antén na úhlu ramene, [6]

Dipól o impedanci 50 ohmů byl tedy navržen v simulátoru elektromagnetického pole a napájen diskretním portem. Jeho rozměry jsou uvedeny na Obr. 24, tloušťka plechu je uvažována 0,4 mm, neboť je tento rozměr dostupný.



Obr. 24. Rozměry navrženého dipólu se vstupní impedancí 50Ω (v mm)

Při napájení dipólu koaxiálním kabelem se může na první pohled zdát, že je všechno v pořádku – poměr stojatých vln dosahuje nízkých hodnot, dipól září. Při bližším pohledu je však vidět, že vyzařovací charakteristika není přesně souměrná, jako u správně pracujícího dipólu. Je to dáno nesymetrickými proudy, které tečou po plášti kabelu a je tedy třeba tyto proudy eliminovat. Na Obr. 25 je znázorněná jednak vyzařovací charakteristika ovlivněná nesymetrickými proudy a jednak charakteristika správná při použití diskretního portu. Obě charakteristiky jsou vypočítány pro frekvenci 470 MHz, kde je nesymetrie nejvýraznější. Z charakteristik je také zřejmé, že vlivem nesymetrických proudů dochází ke zmenšení zisku antény i při správném impedančním přizpůsobení.



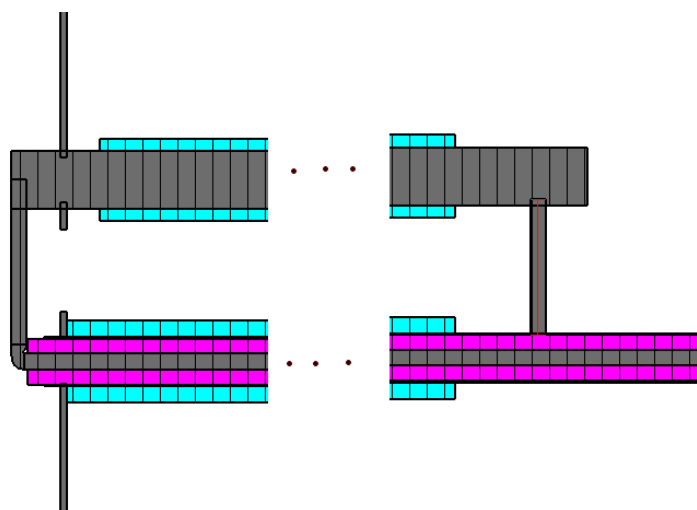
Obr. 25. Vyzařovací charakteristiky dipólu napájeného: a) nesymetricky, b) ideálním napáječem

6.2.2 Vlastní realizace symetrizačního členu

Symetrizační obvod s pahýlem byl navržen dle Obr. 8. Použit byl 50ti ohmový kabel Nordix MWC 4/50, který tvoří jeden vodič. Jeho parametry jsou:

- průměr vnitřního vodiče: 0,94 mm,
- dielektrikum: Cellular PE s průměrem 2,79 mm a relativní permitivitou 1,7,
- průměr vnějšího vodiče: 2.95 mm,
- plášť: PE s průměrem 4,95 mm.

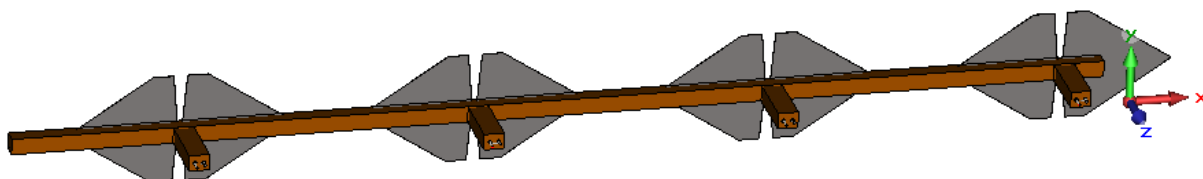
Druhý vodič (pahýl) tvoří měděný kabel o průměru vodiče 3,5 mm, což je hodnota velmi blízká průměru vnějšího vodiče koaxiálního kabelu. Vzájemná rozteč středů vodičů je 11 mm. Dohromady tedy oba kabely tvoří symetrické vedení o charakteristické impedanci (9) 177 Ω . Oba vodiče jsou prostrčeny dipólem, ke kterému jsou elektricky připojeny, a za ním je spojen vnitřní vodič koaxiálního kabelu s pahýlem ve vzdálenosti 2,5 mm od povrchu dipólu. Vzdálenost l , při které je obvod zkratován, je rovna dle teorie čtvrtině vlnové délky na středním kmitočtu, tedy 113 mm.



Obr. 26. Boční pohled na symetrizační obvod v řezu

Funkčnost dipólu napájeného pomocí symetrizačního obvodu byla ověřena v simulátoru elektromagnetického pole. Konstrukce byla proto doplněna o zbývající dipóly posunem o vzdálenost 363 mm. Tato vzdálenost byla již numericky ověřena v kapitole 5.2 jako nejvýhodnější a přibližně odpovídá teoretické hodnotě $3/4 \cdot \lambda$ na středním kmitočtu, [8].

Pro praktické uchycení antény byl vybrán dřevěný nosný hranol o rozměrech 2 × 2 mm, ke kterému jsou přilepeny další 4 hranoly o rozměrech 2 × 2,5 mm pro uchycení symetrizačních členů v rovině.



Obr. 27. Výsledná konstrukce bez napájecího vedení

6.2.3 Návrh napájecího vedení

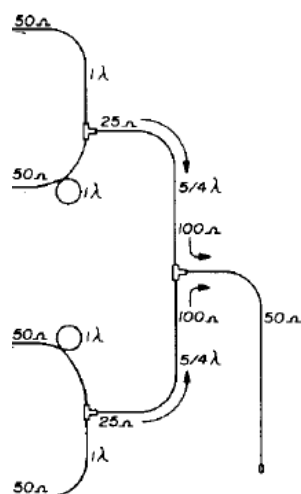
V předchozí konstrukci byla anténa napájena čtyřmi vlnovodnými porty. Ve skutečnosti se však anténa napájí z jednoho napáječe. Proto je dále potřeba navrhnout napájecí vedení, které umožní anténu z jednoho místa napájet.

Pro návrh napáječe je využito těchto základních vlastností vedení:

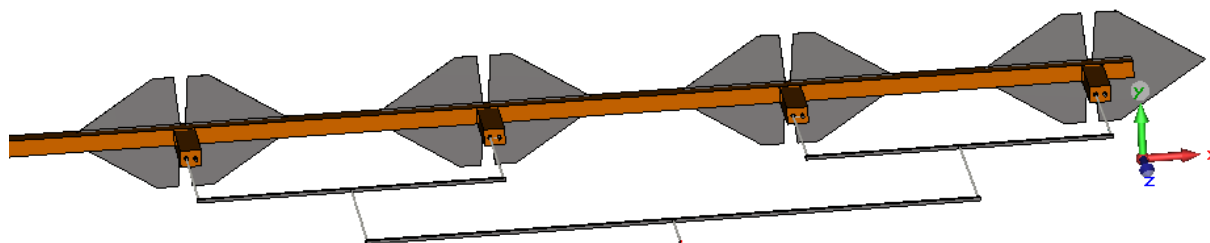
- vedení délky $n \cdot \lambda/2$ má na vstupu impedanci stejnou, jako je impedance zátěže,
- vedení délky $(2n-1) \cdot \lambda/4$ transformuje vstupní impedanci dle vztahu (13), tedy na hodnotu úměrnou její převrácené hodnotě.

Návrh vedení je znázorněn na Obr. 28. Všechny 4 dipóly o vstupní impedanci 50Ω jsou spárovány pomocí dvou T konektorů $3 \times N$ do dvou větví pomocí celovlnného vedení. Impedance za T konektorem budou tedy 25Ω . Pomocí vedení o délce $5/4 \cdot \lambda$ se impedance větví transformují na 100Ω a dalším T konektorem jsou paralelně spojeny k jednomu výslednému napáječi. Vstupní impedance vedení je shodná s charakteristickou impedancí napáječe, který se může připojit pomocí N konektoru ke generátoru.

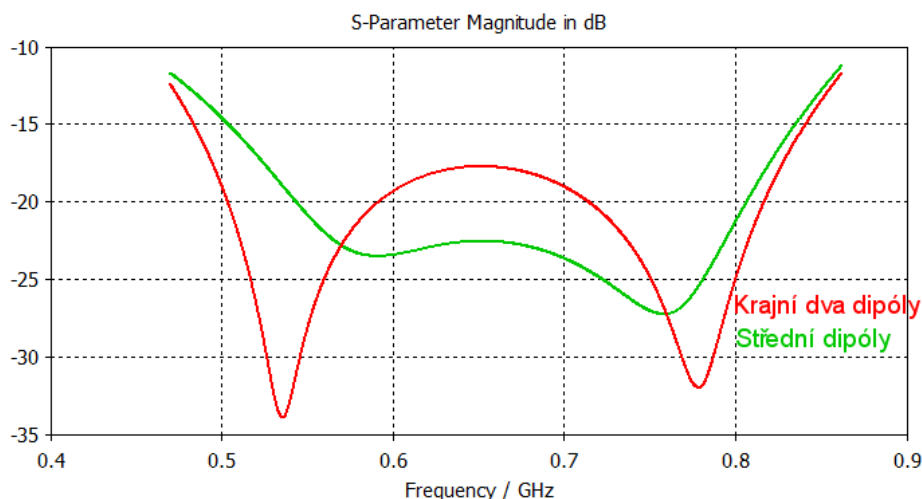
Vzhledem k tomu, že délka vedení je ke všem dipólům stejná, je zaručeno soufázové napájení v celém kmitočtovém pásmu.



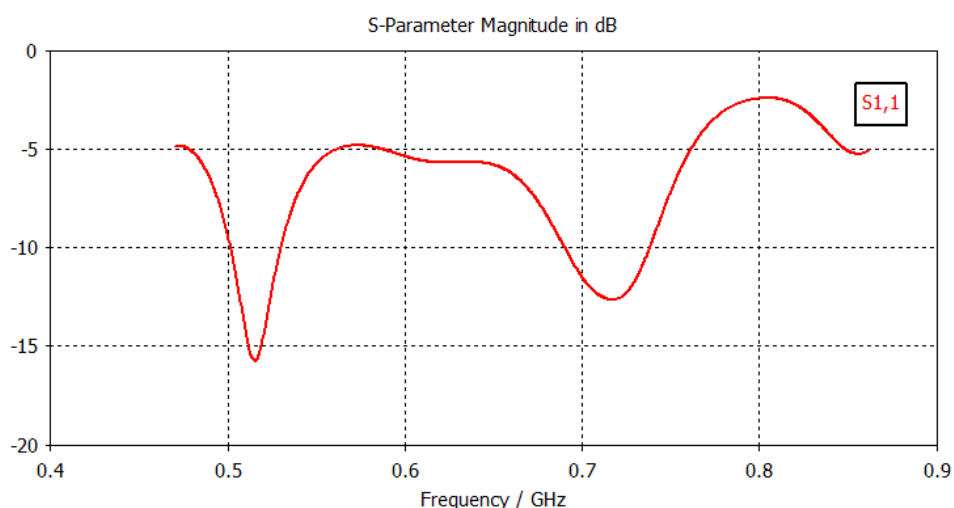
Obr. 28. Schéma napájecího vedení



Obr. 29. Výsledná konstrukce včetně napájecího vedení



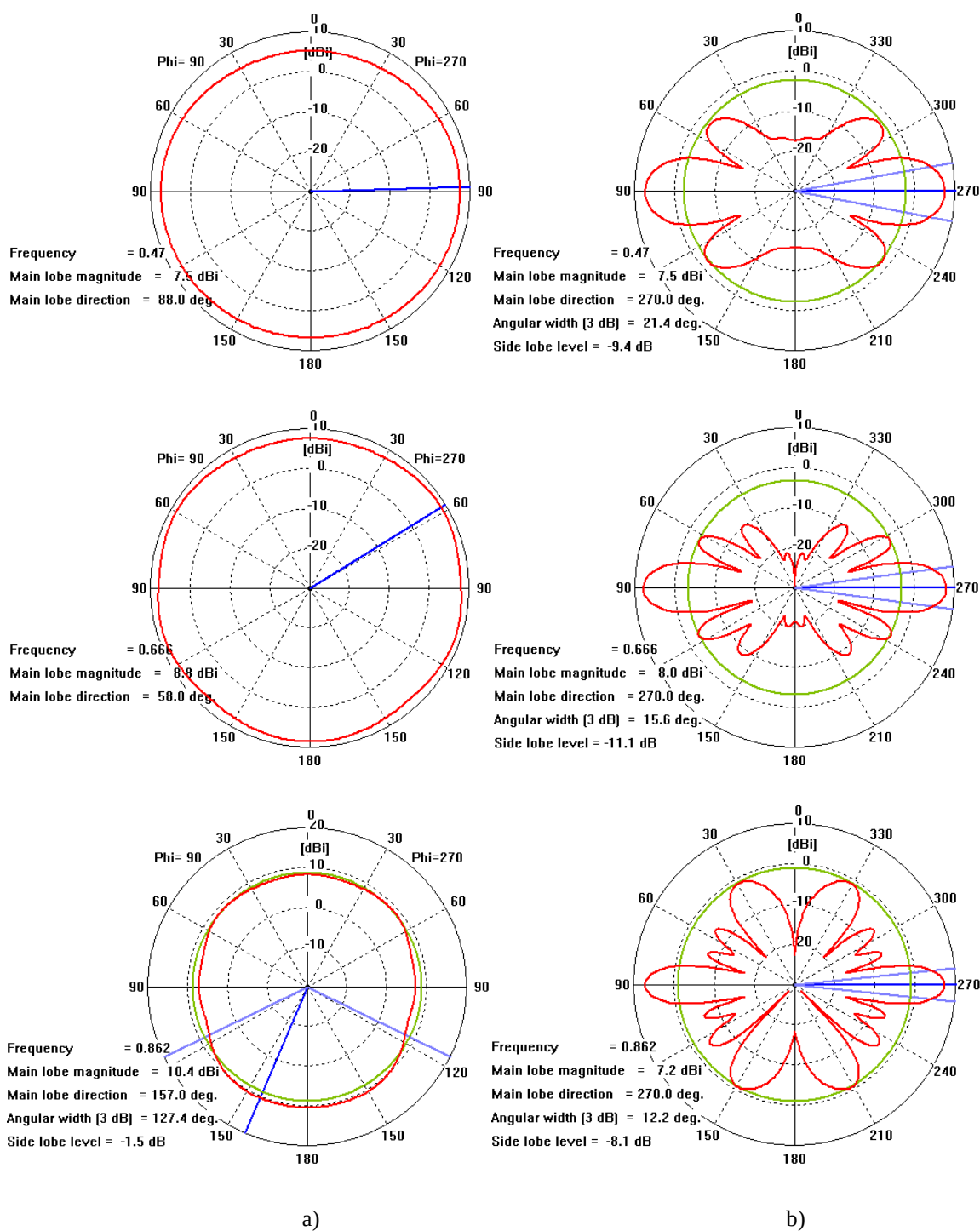
Obr. 30. Činitel odrazu výsledné konstrukce bez napájecího vedení



Obr. 31. Činitel odrazu výsledné konstrukce včetně napájecího vedení

Pokud napájíme symetrizační obvody dipólů čtyřmi porty, tak je impedanční přizpůsobení v pořádku. Dipóly jsou ovlivňovány vzájemnou impedancí, proto se přizpůsobení krajních dipólů liší od vnitřních. Výsledný činitel odrazu bude však jistě dosahovat vyšších hodnot než uvedené dílčí průběhy.

V případě reálného napáječe popsaného výše, tomu tak již ve velkém kmitočtovém rozsahu není. Napáječ je totiž velmi úzkopásmový. Největší odchylka je způsobena úsekem vedení délky $5/4 \cdot \lambda$, neboť pokud je vstupní impedance u celovlnných vedení skutečných 50Ω , tak vedení o stejné charakteristické impedanci nebude impedanci ovlivňovat při jakékoliv délce.

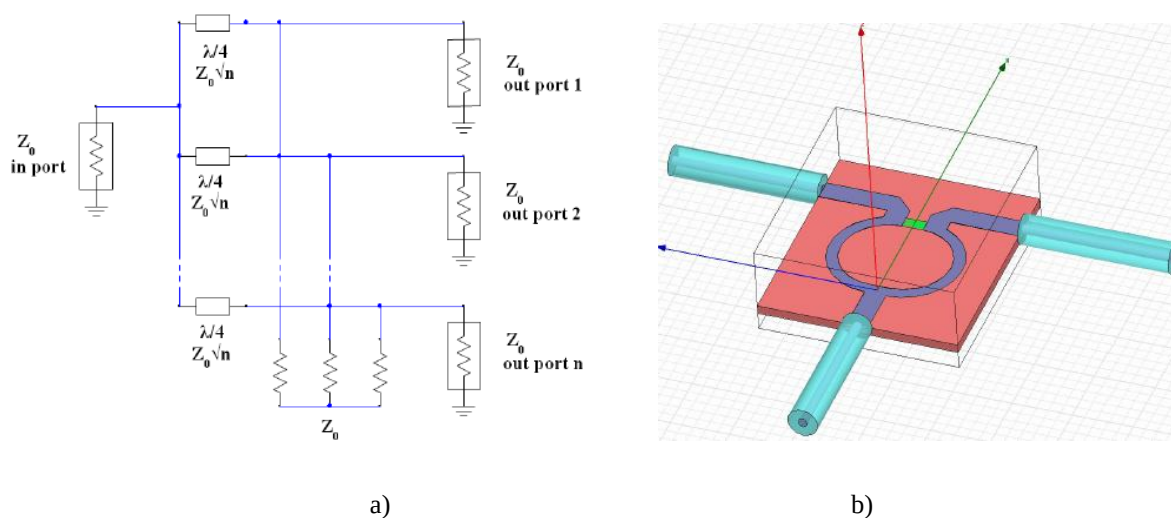


Obr. 32. Vyzářovací charakteristiky výsledné konstrukce včetně napájecího vedení: a) horizontální rovina, b) vertikální rovina

Z vyzářovacích charakteristik vyplývá, že výsledná konstrukce v horizontální rovině vyzářuje všesměrově dle zadání. Největší odchylka zisku je 3 dB na kmitočtu 862 MHz, ale zároveň je na tomto kmitočtu největší zisk. Na středním kmitočtu je maximální zisk 8,8 dBi s maximální odchylkou 2 dB, což odpovídá zadání.

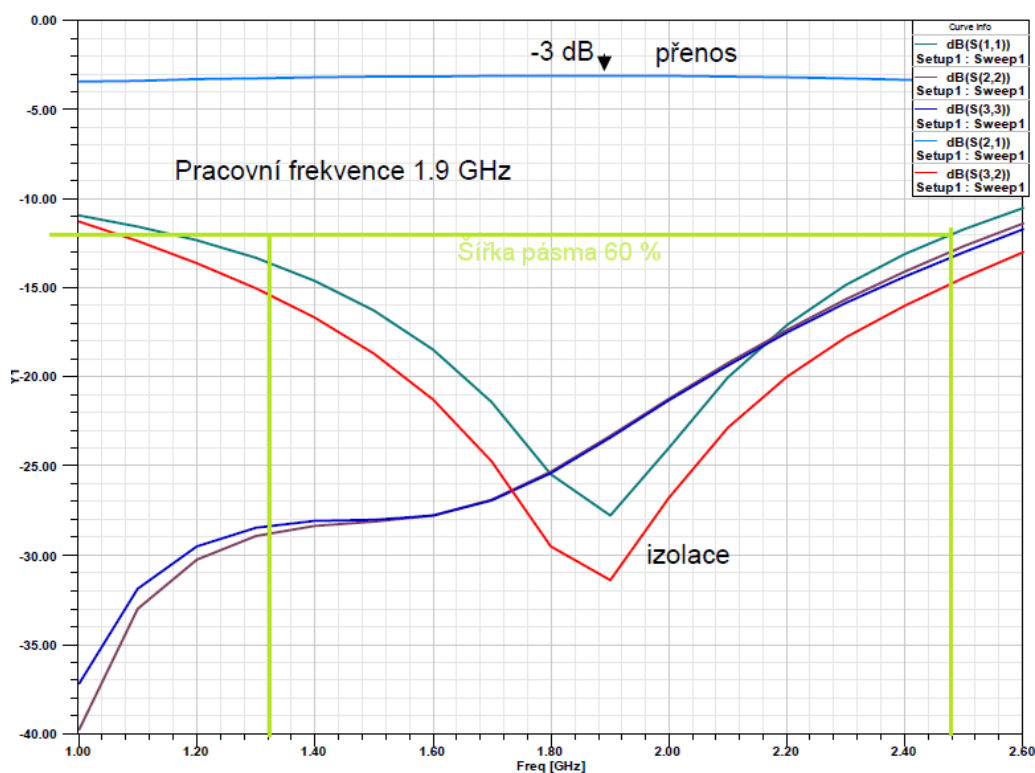
Ve vertikální rovině jsou nejvíc potlačeny postranní laloky na středním kmitočtu.

Z výše uvedených důvodů je potřeba pro napájení antény zvolit jiný způsob. Jako vhodný se jeví mikropáskový vícecestný dělič výkonu, pro rovnoměrné rozdělení výkonu do 4 vstupů, který vychází z Wilkinsonova děliče s rozloženými parametry.



Obr. 33. Děliče výkonu: a) vícecestný – schéma, b) Wilkinsonův dělič dvoucestný v Ansoft HFSS

Wilsonův dělič výkonu byl navržen v počítačovém cvičení předmětu Počítačové řešení komunikačních subsystémů. Výsledky simulace v programu Ansoft HFSS jsou uvedeny na Obr. 34. Čtyřcestný dělič výkonu pracuje na stejném principu, bude jen větších rozměrů, díky čtyřem čtvrtvlnným vedením.



Obr. 34. Frekvenční charakteristiky rozptylových parametrů Wilkinsonova děliče v Ansoft HFSS

Požadovaná šířka pásma antény je dle zadání přibližně 60%. Z grafu rozptylových parametrů Wilkinsonova děliče při stejné šířce pásma dosahuje nejhorších hodnot parametr S_{11} přibližně -12 dB na okrajích pásma. Tato hodnota není ideální, proto by bylo vhodnější navrhnout dělič s dvěma čtvrtvlnnými sekcemi, který bude lépe impedančně přizpůsoben v zadaném frekvenčním rozsahu.

Dále je z grafu zřetelné, že útlum děliče je přibližně 3 dB.

7 Realizace antény

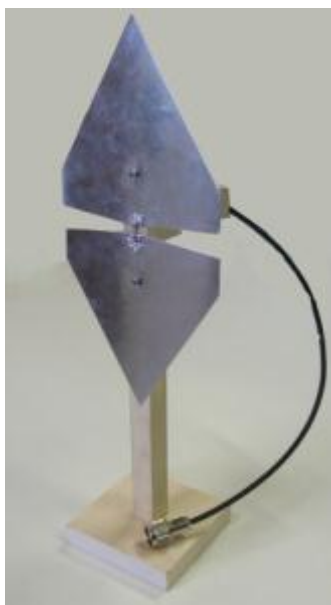
Pro měření směrových charakteristik antény musí být pomocná anténa umístěna ve vzdálené oblasti měřené antény, tedy minimální vzájemná vzdálenost mezi pomocnou a testovanou anténou musí vyhovovat podmínce, [10]

$$r \geq r_{min} = \frac{2 \cdot d^2}{\lambda}, \quad (18)$$

kde d je největší (příčný) rozměr měřené antény a λ je vlnová délka.

Celková výška všech zářičů navržené antény je 137 cm. Dle vztahu (18) by tedy měřicí vzdálenost měla být minimálně 11 m při kmitočtu 862 MHz. Tak velká bezodrazová komora není však nikde v Brně k dispozici. Směrové charakteristiky by se tedy musely měřit na volném prostranství, kde je dále problém s elektřinou.

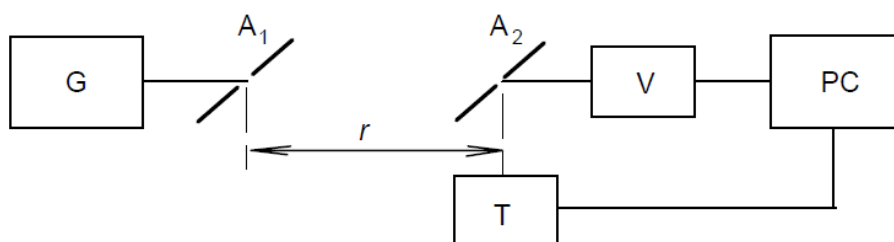
Pro výrobu antény a její následné měření byl z výše uvedených důvodů vybrán pouze jeden její element. Rozměry dipólu jsou uvedeny na Obr. 24, symetrizační člen je popsán v kapitole 6.2.2. Dipóly byly vyrobeny z pocínovaného plechu o tloušťce 0,4 mm.



Obr. 35. Pohled na vyrobenou anténu

7.1 Měření vyzařovacích charakteristik

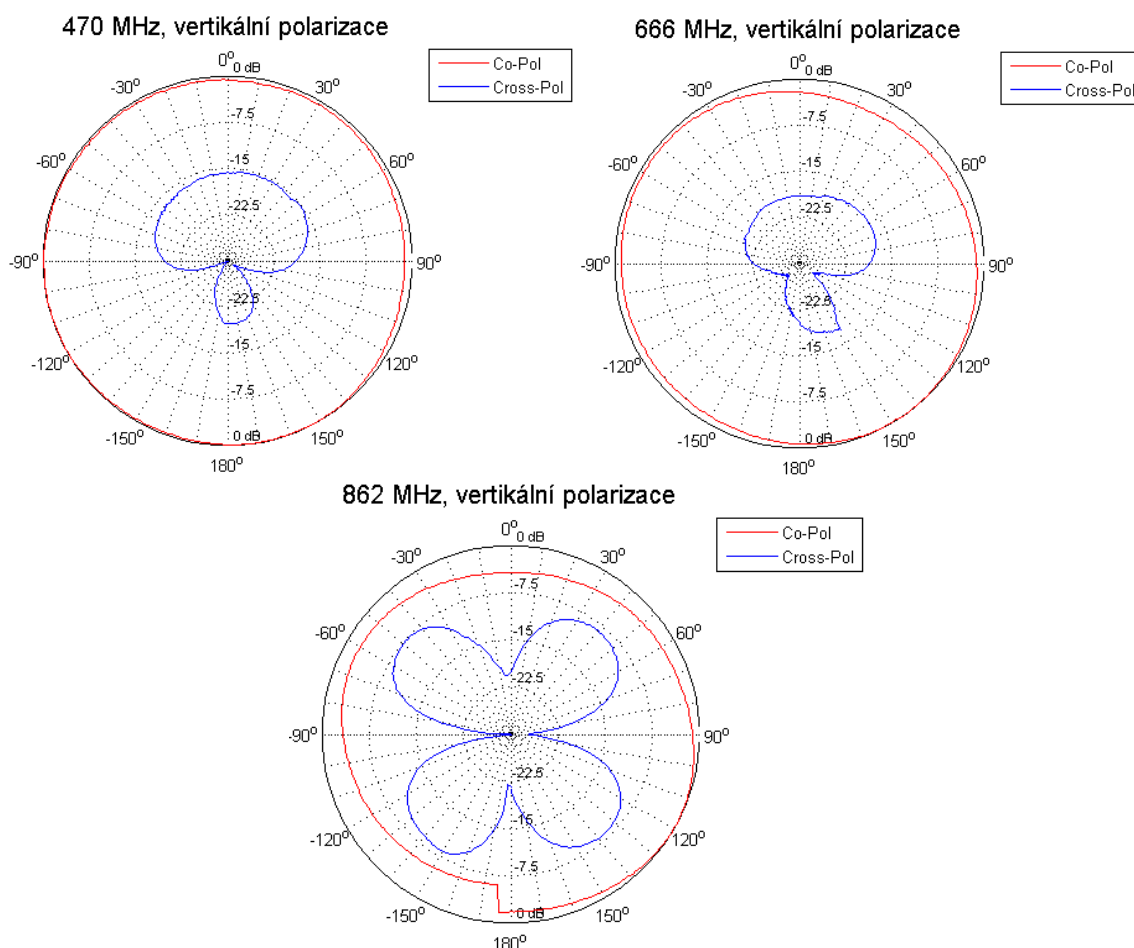
Vyzařovací charakteristiky jednoho elementu vyžadují mnohem menší měřicí vzdálenost než celá anténa a mohly být tedy změřeny v bezodrazové komoře školní laboratoře antén a elektromagnetického pole. Uspořádání měřicího pracoviště je na Obr. 36.



Obr. 36. Uspořádání měřicího pracoviště pro měření vyzařovacích charakteristik, [10]

Pomocná anténa je A_1 je buzena generátorem G. Měřená anténa A_2 je upevněna na točném T, při měření se otáčí v horizontální rovině a přijímá vlnění vybuzené pomocnou anténou. Pohyb točny je řízen počítačem. Napětí indukované na vstupu antény je měřeno měřičem úrovně V a získaná data včetně úhlové polohy jsou přenášeny do počítače.

Pokud je pomocná anténa orientovaná souhlasně s anténou měřenou mluvíme o co-polarizační charakteristice, pokud je k ní kolmá jedná se o cross-polarizaci.



Obr. 37. Naměřené vyzařovací charakteristiky realizované antény

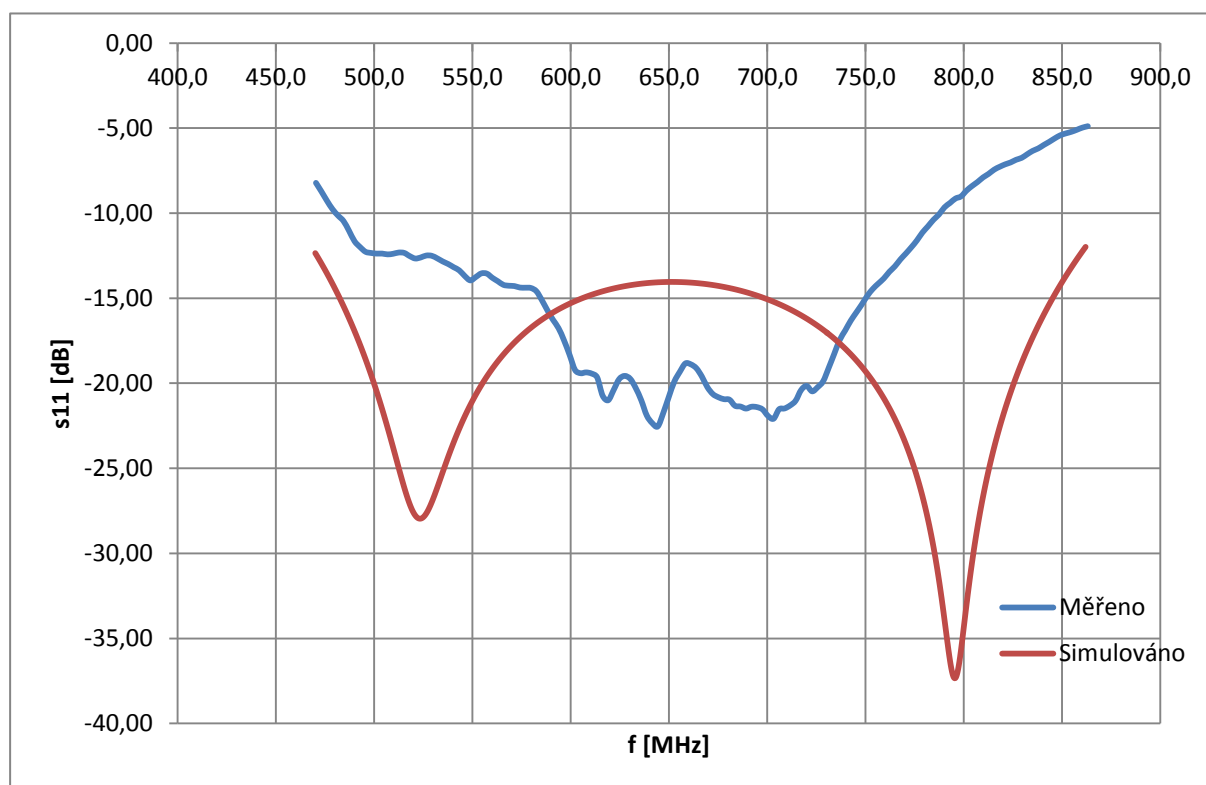
Naměřené vyzařovací charakteristiky nevyjadřují přímo zisk antény, ale pouze její směrovost. Z grafů vidíme, že cross-polarizační složky jsou ve všech charakteristikách potlačeny, což je žádoucí.

Na středu pásma je maximální odchylka při souhlasné orientaci polarizací 3 dB, hodnota je to přijatelná.

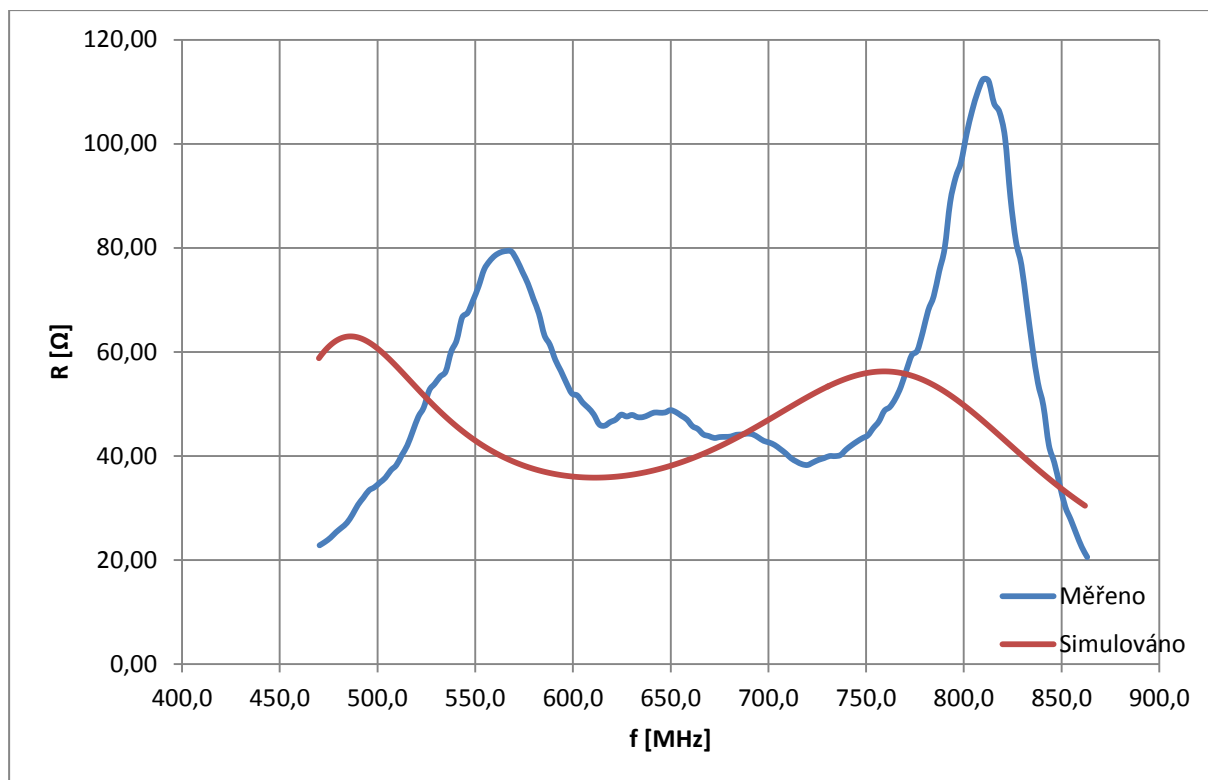
Nejhorší výsledek nastal při nejvyšší měřené frekvenci. Může to být dáno konstrukcí bezodrazové komory, která již nepracuje úplně korektně na vyšších kmitočtech a část energie odráží. Dále při tomto kmitočtu mírně tlumí zisk také dřevěná konstrukce antény, což bylo dokázáno v simulátoru CST Microwave Studio.

7.2 Měření impedančního přizpůsobení

Impedanční charakteristiky byly změřeny ve školní laboratoři pomocí vektorového obvodového analyzátoru R&S ZVL. Pro dosažení požadované přesnosti měření musí být nejdříve analyzátor zkalibrován. Anténa se připojuje přes vhodný kabel na měřicí port přístroje. Analyzátor se pak kalibruje v místě připojení antény.



Obr. 38. Frekvenční závislost činitele odrazu vyrobené antény



Obr. 39. Frekvenční závislost reálné složky impedance vyrobené antény

Z výše uvedených charakteristik je zřejmé, že i když pracuje anténa poměrně správně, tak se naměřené hodnoty výrazně liší od hodnot simulovaných.

Simulované hodnoty jsou výstupem programu CST Microwave Studio. Hustota sítě byla nastavena 35 čar na vlnovou délku. Dále bylo použito adaptivní meshování s maximálním počtem iterací 6 a maximální odchylka S-parametrů dvou po sobě následujících iterací 0,02.

Podle reálné složky impedance můžeme usoudit, že rezonanční kmitočet je posunut směrem k vyšší frekvenci. Rozměry antény jsou však vyrobeny s milimetrovou přesností. Největší odchylka od parametrů je pravděpodobně způsobena „na čele dipólu“. Pahýl a stínění koaxiálního kabelu bylo potřeba připojit k dipólu, přičemž byla na dipólu nanесena vrstva cínu a dále ve vzdálenosti 2,5 mm od dipólu bylo potřeba spojit vnitřní vodič koaxiálního kabelu s pahýlem, což je velmi malá vzdálenost, takže se výrobní nepřesnosti se můžou výrazně projevit.

Na naměřeném činiteli odrazu můžeme dále vidět dvě lokální maxima uprostřed pásma, z nichž jedno leží na frekvenci 626 MHz, což je frekvence 2 multiplexu digitální televize v Brně, který mohl měření ovlivnit.

Závěr

Jedním z cílů práce bylo popsat různé varianty anténních systémů používaných pro vysílání ve frekvenčním pásmu 470 až 862 MHz. Popisované systémy měly mít všesměrovou vyzařovací charakteristiku v horizontální rovině a zářit s vertikální polarizací.

Nejprve byly popsány směrové anténní jednotky, které jsou základním elementem většiny anténních systémů. Dále je uvedeno, jakým způsobem lze z těchto směrových jednotek vytvořit systém zářící všesměrově. Tyto řešení se v praxi velmi často používají díky možnosti dosažení velkého zisku pomocí více jednotek umístěných nad sebe a relativně všesměrového diagramu již při situování jednotek do čtyř horizontálních směrů.

Dalším z možných řešení je umístění více vertikálních souose upevněných dipólů, tzv. kolineární anténa. Jsou dvě možnosti realizace této antény. Buď napájet celou anténu sériově z jednoho místa nebo paralelně každý dipól zvlášť. K důkladnějšímu rozboru byla vybrána právě paralelní varianta kolineární antény hlavně díky tomu, že je konstrukčně jednodušší a lze u ní, při zvolení vhodných dipólů, dosáhnout velké šířky pásma.

Dále byla rozebrána problematika napájení antén. Byly popsány napáječe, které se používají v UHF pásmu, možnosti impedančního přizpůsobení a některé často používané typy symetrizačních obvodů. Zmíněno bylo také o děličích výkonu.

Následujícím cílem práce bylo ověření vybraného řešení anténního systému v simulátoru elektromagnetického pole. Jako simulátor byl vybrán komerční produkt CST Microwave Studio.

Nejprve byla provedena simulace výchozí konstrukce popsané v literatuře. Tou byla ověřena činnost kolineární antény, nebylo ale dosaženo požadované šířky pásma. Té je možné dosáhnout použitím širokopásmových dipólů namísto jednoduchých válcových. S pomocí bikónických dipólů byly všechny zadané parametry beze zbytku splněny, nicméně tato konstrukce je složitá vyrobit. Proto bylo použito dipólů motýlkových. Anténa neměla takové vlastnosti jako předchozí, víceméně ale odpovídala požadavkům.

Následně byla provedena analýza možností napájení. Nejprve se jevila vhodná možnost použít jako napáječ gamma článek, který transformuje vstupní impedanci antény a zároveň slouží jako symetrizace. Nicméně u širokopásmových planárních dipólů se jeho funkčnost nepodařila prokázat. Byl proto vybrán symetrizační obvod s pahýlem, který je širokopásmový, vstupní impedance dipólů byla upravena na 50 ohmů. Napájecí síť byla simulována pomocí úseků koaxiálních vedení, ale je díky vlastnostem vedení úzkopásmová. Byla proto naznačena jiná, širokopásmová možnost řešení pomocí čtyřcestného mikropásmového děliče výkonu s dvěmi čtvrtlennými sekcemi, která již nebyla z časových a výpočetních důvodů na konkrétní anténě ověřena.

Pro realizaci byl vybrán pouze jeden element kolineární antény. Mimo jiné díky tomu, že výsledná anténa je vysoká 1,5 m a jediná možnost měření směrových charakteristik by byla na větším volném prostranství, což znamená problém s napájením měřících přístrojů. Impedanční přizpůsobení vyrobené antény je vyhovující, nicméně se značně liší od simulovaných hodnot. Odchylka je pravděpodobně způsobena nepřesnou výrobou antény. Vyzařovací směrové charakteristiky s drobnými odchylkami odpovídají simulovaným a teoretickým hodnotám.

Seznam literatury

- [1] BALANIS, A. C. *Antenna Theory: Analysis and design*, 3rd. ed. New Jersey: J. Wiley & Sons, 2005. 1073 p. ISBN 0-471-66782-X.
- [2] CST Microwave Studio 2009 – *Workflow and Solver Overview*.
- [3] DAHLQUIST Bob. Four-element colinear array for two meters. *Ham radio magazine*, 1971, vol. 4., no. 5, p. 6-12.
- [4] DANEŠ, Josef, et al. *Amatérská radiotechnika a elektrotechnika*. Praha: Naše vojsko, 1986. 592 s.
- [5] GREGORA, Pavel; VÍT, Vladimír. *Televizní technika: Zařízení pro přenos a vysílání televizního signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. 176 s. ISBN 80-86056-89-9.
- [6] KRAUS, J. D.; MARHEFKA, R. J. *Antennas For All Applications*, 3rd. ed. New York: McGraw-Hill, 2002. ISBN 0-07-232103-2.
- [7] LEGÍŇ, Martin. *Televizní technika DVB-T*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 288 s. ISBN 80-7300-204-3.
- [8] MATUSZCZYK, Jacek. *Antény prakticky*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-178-0
- [9] NOVÁČEK, Zdeněk. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení*. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006. 143 s.
- [10] NOVÁČEK, Zdeněk. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení: Laboratorní měření*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007. 47 s.
- [11] PROCHÁZKA, Miroslav. *Antény – encyklopedická příručka*. 3. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 384 s. ISBN 80-7300-166-7.
- [12] PROKOP, Jaroslav; VOKURKA, Jaroslav. *Šíření elektromagnetických vln a antény*. Praha: SNTL, 1980. 388 s.
- [13] RIVERA, Juan. Four-element collinear antenna for 440 MHz. *Ham radio magazine*, 1973, vol. 6, no. 5, p. 38-45.
- [14] ŠIMÍČEK, Bohumil. *Antény pro televizní a rozhlasové vysílání na VKV*. Praha: Nadas, 1990. 304s. ISBN 80-7030-095-7.

Seznam použitých zkratk a symbolů

CST	-	Computer Simulation Technology
DVB	-	Digital Video Broadcasting
DVB-T	-	Digital Video Broadcasting – Terrestrial
DVB-S	-	Digital Video Broadcasting – Satellite
DVB-C	-	Digital Video Broadcasting – Cable
UHF	-	Ultra high frequency (300 MHz – 3 GHz)
ρ	-	Činitel odrazu
S_{11}	-	Činitel odrazu
Z_0	-	Charakteristická impedance napáječe
Z_{vst}	-	Vstupní impedance antény
PSV	-	Poměr stojatých vln
$VSWR$	-	Voltage Standing Wave Ratio, poměr stojatých vln
λ	-	Vlnová délka
D	-	Činitel směrovosti antény
G_{ABS}	-	Zisk antény absolutní (vůči izotropnímu zářiči)
G_{REL}	-	Zisk antény relativní (vůči půlvlnnému dipólu)
φ	-	Vrcholový úhel kruhové výseče