



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Ing. Jiří Matyáš

Mikropáskové antény na bázi elektricky vodivých nanočástic

Microstrip Antennas Based on Electrically Conductive Nanoparticles

Disertační práce

Studijní program: Inženýrská informatika

Studijní obor: Inženýrská informatika

Školitel: prof. Ing. Karel Vlček, CSc.

Zlín, prosinec 2016

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé disertační práce panu profesoru Karlu Vlčkovi za vedení a konzultační podporu, kterou mi poskytoval po celou dobu studia a zejména v průběhu řešení mé disertační práce.

Dále bych rád poděkoval mým spolupracovníkům doc. Petru Slobodianovi, Ph.D. a Ing. Robertovi Olejníkovi, Ph.D. za příznivé podmínky, které mi poskytli při prováděných experimentech.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma Mikropáskové antény na bázi elektricky vodivých nanočástic vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Karla Vlčka, CSc. za použití literatury a zdrojů uvedených na konci mé disertační práce v seznamu použité literatury a zdrojů.

Ve Zlíně dne:

ABSTRAKT

Tato disertační práce se zabývá využitím elektricky vodivých nanomateriálů ke konstrukci pasivních mikropáskových antén. Práce rovněž klade důraz na softwarové simulace experimentálních anténních konstrukcí v prostředí CST Microwave Studio. První část disertační práce popisuje antény jakožto základní prvky komunikačních zařízení a vymezuje základní terminologii v dané oblasti s důrazem na nezbytný matematický aparát. V experimentální části disertační práce jsou popsány dosavadní experimenty autora s anténami na bázi elektricky vodivých nanočástic. V následujících částech disertační práce jsou představeny konkrétní anténní konstrukce a výsledky ze simulací i měření experimentálních antén.

Klíčová slova: mikropásková anténa, nanočástice, nositelná elektronika

ABSTRACT

This doctoral thesis deals with the use of electrically conductive nanomaterials for the construction of passive microstrip antennas. The work also places emphasis on the software simulation of experimental antenna constructions carried out in the CST Microwave Studio. The first part of the PhD thesis describes the antennas as fundamental elements of communication devices and defines the basic terminology within the given area with emphasis on the necessary mathematical tools. In its experimental part the PhD thesis describes the author's previous experiments with antennas based on electrically conductive nanoparticles. The following sections of the PhD thesis are devoted to the actual antenna designs and results of simulations and experimental measurements of antennas.

Keywords: microstrip antenna, nanoparticles, wearable electronics

OBSAH

ÚVOD.....	8
1 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU.....	9
1.1 Současné směry při konstrukci antén.....	9
1.1.1 V současnosti používané konstrukční materiály	9
1.1.2 Definice antény.....	9
1.1.3 Elektrický rozměr u antén	10
1.1.4 Originalita zkoumaných experimentálních antén.....	10
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	11
3 METODY VÝZKUMU POUŽITÉ V DISERTAČNÍ PRÁCI	12
4 TEORETICKÝ ZÁKLAD ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	13
4.1 Mikropáskové antény.....	13
4.1.1 Typy mikropáskových antén	14
4.2 modelování mikropáskových antén	16
4.2.1 Oblasti vyzařování antény	16
4.2.2 Směrová a vyzařovací charakteristika.....	17
4.2.3 Intenzita vyzařování, směrovost, zisk	18
4.3 Impedanční přizpůsobení antény	19
4.3.1 Odvození S_{11} přes napěťové vlny a přizpůsobení	19
4.3.2 Výkonové přizpůsobení impedance antény a generátoru.....	20
4.4 Účinnost antény a vyzářený výkon.....	21
4.5 Činitel jakosti Q a jeho význam pro optimalizaci antény.....	22
4.5.1 Přibližné určení Q	23
4.6 Fyzikální omezení mikropáskových a elektricky malých antén.....	24
4.6.1 Chu limit.....	24
4.6.2 McLean limit	25
4.6.3 Thal limit	25
4.7 Metody návrhu pravoúhlého mikropásku.....	26
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	27
5.1 Použité elektricky vodivé nanomateriály.....	27

5.2	Definice nanomateriálu	27
5.3	Antény na bázi uhlíkových nanotrubic.....	28
5.3.1	Definice uhlíkových nanotrubic.....	28
5.3.2	Rozdělení uhlíkových nanotrubic	28
5.4	Experimentální anténa na bázi MWCNTs	29
5.4.1	Výsledky měření a simulací antény na bázi MWCNTs.....	32
5.4.2	Výsledky měření antény na bázi MWCNTs při vystavení organickým parám.....	37
5.5	Experimentální antény na bázi stříbrných nanočástic	38
5.5.1	Výsledky měření a simulací antény na bázi nanočástic stříbra	40
5.6	Použití fraktální geometrie ke konstrukci antény.....	46
5.6.1	Výběr vhodného fraktálu	47
5.6.2	Fraktální anténa na bázi nanočástic stříbra s motivem „Sierpinského Arrowhead“ křivky.....	48
5.6.3	Výsledky měření a simulací antény na bázi nanočástic stříbra s fraktálním motivem využívající čtvrtou iteraci „Sierpinského Arrowhead“ křivky	49
5.6.4	Další příklad mikropáskové geometrie antény na bázi nanočástic stříbra natištěné na PET substrátu.....	55
5.6.5	Výsledky měření a simulací mikropáskové geometrie antény na bázi nanočástic stříbra natištěné na PET substrátu	56
6	ZAČLENĚNÍ VYHOTOVENÝCH ANTÉN Z POHLEDU SOUČASNÝCH KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ	62
7	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI.....	63
7.1	Přínos vědě	63
7.2	Přínos praxi.....	63
8	ZÁVĚR	64
	POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE.....	65
	SEZNAM OBRÁZKŮ	73
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	76
	PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA	78
	PROFESNÍ ŽIVOTOPIS	82

ÚVOD

Většina nově vyrobených přenosných elektronických zařízení komunikuje s okolním světem a ostatními přístroji pomocí pasivní antény. Elektronická zařízení používají pasivní antény pro přenos informací mezi uživatelem a sítí, případně si zařízení vyměňují informace mezi sebou a to bez zásahu uživatele, například M2M (Machine to Machine) komunikace. Tyto takzvané pasivní antény se používají u velkého množství elektronických zařízení s důrazem na přenosná zařízení. Nejčastěji se s nimi můžeme setkat u mobilních telefonů, tabletů, vysílaček, notebooků, navigací a v neposlední řadě i u nositelné elektroniky.

Pasivní anténu lze vyrobit z velkého množství elektricky vodivých materiálů. Nicméně, ne všechny elektricky vodivé materiály, které se v elektrotechnice používají, jsou vhodné k výrobě miniaturizovaných antén s velmi nízkou hmotností. V současné době se často používají takzvané mikropáskové antény využívající nejčastěji měděné materiály a jejich nejrůznější modifikace, mezi které patří například měděné fólie, měděné plíšky, vrstvy na nejrůznějších substrátech - například známý substrát FR-4. Velké množství vědeckých týmů experimentuje s anténami založenými na velmi populárních substrátech produkovaných společností Rogers Corporation. U některých typů komunikačních zařízení je možné se setkat i se specifickou konstrukcí antén, které využívají například meandrové struktury v kombinaci s krycími plasty. Použití základního konstrukčního materiálu má velký a rozhodující vliv na parametry antény zejména na její přizpůsobení [1]. V současné době používané materiály v anténní technice mají sice využitelné parametry, ale schopnost ukotvit tyto již vyráběné antény do polymerních substrátů je nízká. Výroba antén na bázi elektricky vodivých nanočástic stříbra případně uhlíku je unikátní v tom, že je možné antény vyrobit na základě použité vodivé vrstvy z nanočástic tak, aby dosahovaly co možná nejnížší váhy a byl využit malý prostor pro jejich umístění v zařízení. Čímž se pak stávají součástí krytu a mnohdy jsou ukotveny přímo na polymeru, z něhož je kryt vyroben. Tento trend lze spatřovat zejména u flexibilní nositelné elektroniky.

1 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU

1.1 Současné směry při konstrukci antén

Zefektivnění a miniaturizaci při zachování výkonu antén na základě konstrukčních úprav, které vedou k zefektivnění antén, si klade za cíl celá řada vědeckých týmů, každý tým se snaží přispět svým konkrétním vylepšením antén, a to nejčastěji v podobě konstrukcí, které by lépe zefektivnily přenosový řetězec přenášených informací. Konstrukční parametry antény jsou odvozeny od budoucího použití v konkrétní aplikaci, například v bezdrátovém čidle nebo v chytrém mobilním telefonu. Právě to, kde bude anténa použita, je nejvíce pro konstruktéra limitující. Současné materiály, které jsou běžně používány nelze efektivně upravovat a miniaturizovat tak, aby bylo možné je zakomponovat do povrchu obalů, například v podobě elektricky vodivé vrstvy odpovídající požadované frekvenci. Limitujícím faktorem je u většiny současných antén zejména, nevyhovují hmotnost a nestabilita z hlediska použití u flexibilních aplikací.

Téměř všechny antény jsou naladěny svým tvarem a fyzikálními možnostmi materiálu na určitou frekvenci, kde anténa vykazuje nejlepší přizpůsobení. Je možné se setkat i s aplikací fraktálních obrazců, které jsou často oblíbené při tvorbě vícepásmových takzvaných fraktálních mikropásmových antén.

1.1.1 V současnosti používané konstrukční materiály

Velmi často používaným materiálem na výrobu antén je hliník a měď. Jakýkoliv jiný vodivý materiál je samozřejmě možné použít také - ovšem s vědomím, že některá z vlastností například cena bude odlišná. Vyrobit anténu například ze železa není problém a její přijímací (vysílací) vlastnosti to nikterak neovlivní. Schopnost antény transformovat elektromagnetické vlnění v prostoru na elektrický proud a naopak totiž nikterak nesouvisí s použitým materiálem [1, 2]. Toto tvrzení je obecné, ale nemusí platit pro všechny typy antén. Zejména pro miniaturní antény velmi vysokých frekvencí (řádově desítky GHz), kde jsou kladeny vysoké nároky právě na použité konstrukční materiály. U takových antén nejde v první řadě o jejich cenu, ale především o kvalitu a vysokou spolehlivost. Proto je vždy důležité zvážit v jakém zařízení a pro jakou frekvenční oblast bude anténa použita.

1.1.2 Definice antény

Anténa je zařízení k příjmu nebo k vysílání rádiových signálů, je to část vysokofrekvenčního vedení upravená tak, aby účinně vyzařovala energii do prostoru. Antény se dělí na antény přijímací a antény vysílací (v principu ale může každá anténa vysílat i přijímat). Vysílací anténa je určena k přeměně elektrické energie na energii elektromagnetických vln. Přijímací anténa naopak

slouží k přeměně energie elektromagnetických vln na elektrický signál přijímací a vysílací zároveň [1, 2].

Elektromagnetické vlny vyzařuje každý vodič, kterým prochází střídavý elektrický proud. Anténa je vodič upravený takovým způsobem, aby vyzařoval maximální množství elektrické energie. Jako nejjednodušší anténu lze využít takzvaný dipól (Obr. 3a.) [1, 2].

1.1.3 Elektrický rozměr u antén

Elektrický rozměr se v anténní technice vyskytuje poměrně často. Jedná se o rozměr vztažený k vlnové délce signálu v daném prostoru. Pokud je tedy nějaký rozměr antény vyjádřený například jako 2λ , pak je dvojnásobkem vlnové délky přijímaného signálu [1–3].

Elektrický proud se ovšem šíří v různém prostředí různou rychlostí, proto absolutní rozměry (v metrech) jsou závislé právě na druhu prostředí, ve kterém se vlna nachází. Za tímto účelem se používá tzv. „činitel zkrácení“, který vyjadřuje, v jakém poměru je délka vlny v daném prostředí k délce vlny ve vzduchu (ve vakuu). Proto se třeba u koaxiálních kabelů setkáváme s činitelem zkrácení 0,8 nebo 0,66 apod. Uvedené koeficienty jsou závislé na použitém materiálu dielektrika kabelu [1, 2].

1.1.4 Originalita zkoumaných experimentálních antén

Originalita tohoto výzkumu spočívá ve využití nových možností a inovativních postupů při použití elektricky vodivých nanomateriálů za účelem miniaturizace mikropáskového designu antény. Na základě použití nanočástic stříbra nebo uhlíku lze vytvořit optimální zmenšenou konstrukci mikropáskové antény, kterou je možné zakomponovat do polymerní matrice skládající se z elektricky vodivé nano vrstvy.

Touto konstrukcí docílíme velmi malých rozměrů antény. A u použití metody tisku vodivým inkoustem lze dosáhnout vysoké flexibility a reprodukovatelnosti konkrétního tvaru antény. Rovněž těmito konstrukčními postupy pro vyhotovení antény lze ještě lépe dosáhnout požadované vzdálenosti mezi jednotlivými anténami v multi-antenním systému (MIMO) u koncových uživatelských stanic na hodnotu cca $\lambda/2$.

Dodržení parametru $\lambda/2$, který určuje vzdálenost mezi jednotlivými anténami, klade vysoké nároky na anténní konstrukce a jejich miniaturizaci z důvodů účinnější optimalizace využití omezeného fyzického prostoru zařízení, do něhož mají být antény implementovány. Z těchto důvodů považují tento výzkum za přínosný a originální. Nově zaváděné standardy mobilních sítí, jako je například standard Long Term Evolution (LTE), počítají s možností využití více antén u mobilních zařízení, což bude vyžadovat optimalizaci rozložení jednotlivých antén, tak aby nedocházelo mezi nimi k nežádoucím interferencím.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce si klade za cíl vytvoření experimentálních konstrukcí mikropáskových antén, kde jako hlavní konstrukční materiál budou použity elektricky vodivé nanočástice uhlíku a stříbra. Za předpokladu, že budou zhotoveny na základě provedených simulací modelů antén v softwarovém prostředí CST Microwave Studio.

- **Hlavní cíl**

Hlavním cílem disertační práce je:

- z výchozích softwarových simulací vytvořit experimentální mikropáskové antény na bázi elektricky vodivých nanočástic uhlíku a stříbra, umístěných na polymerních substrátech

- **Dílčí cíle**

Disertační práce má tyto dílčí cíle:

- pomocí softwarového prostředí CST Microwave Studio prověřit vlastnosti navržených modelů antén,
- pomocí měření a mikroskopií analyzovat experimentální vzorky antén na bázi elektricky vodivých nanomateriálů,
- prověřit vlastnosti méně používaných substrátů zejména substrátů na polymerních bázích,
- specifikovat začlenění vyhotovených antén z pohledu současných komunikačních technologií,
- ochránit vybrané experimentální vzorky antén pomocí patentu.

3 METODY VÝZKUMU POUŽITÉ V DISERTAČNÍ PRÁCI

- **Simulace**

Metoda simulace byla použita k simulování některých parametrů antén. Tato metoda dokáže ještě před vyrobením konkrétní antény lépe popsat, jak by se mohla daná anténa chovat v reálných podmínkách. Pro metodu simulace se používá specifické simulační softwarové prostředí (CST Microwave Studio), které je přímo určeno pro simulaci antén. Tato metoda je společně s metodou měření vhodná k efektivnímu porovnání parametrů před vyhotovením (simulace) antény a po vyhotovení antény (měření). Díky porovnání výsledů z obou dvou metod jsme schopni lépe a především efektivněji upravit konkrétní antény, tak aby její parametry byly použitelné v reálném provozu.

- **Měření**

V disertační práci byla použita metoda měření. Tato metoda se používá u většiny prováděných experimentů a jejím cílem je v tomto případě získání veličin o vyrobených anténách. Metoda měření slouží k porovnání naměřených veličin u vyrobených vzorků antén. Zejména byla použita v první fázi pro měření vyhotovených konstrukčních materiálů. V druhé fázi pro měření kompletních anténních konstrukcí.

- **Analýza**

Analýza patří mezi základní a nejčastěji užívané vědecké metody. Tato metoda byla použita k analyzování měřených a simulovaných veličin. Jedná se o základní a velmi důležitou metodu při řešení disertační práce. Analýza je důležitá ve všech krocích výroby antény. Dobře analyzovat naměřené veličiny ve všech krocích výroby antény je velmi důležitý krok. Pro analyzování veličin se mnohdy používají specifické matematické postupy, na základě nichž je lépe možné popsat naměřené veličiny, které se pak dále používají v řešení dané problematiky.

4 TEORETICKÝ ZÁKLAD ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

4.1 Mikropáskové antény

Mikropáskové antény jsou v současných systémech bezdrátových komunikací velice rozšířeným druhem antén. Je to dáno tím, že tyto antény vynikají velice nízkým profilem, proto je jednodušší jejich implementace do mobilních telefonů a nositelné elektroniky. Klasické mikropáskové antény jsou vyráběny stejnou technologií jako plošné spoje, proto je jejich výroba velmi levná a dobře reprodukovatelná. Mikropáskové antény lze velice snadno integrovat přímo do mikrovlnných obvodů založených na mikropáskové technologii a tudíž není zapotřebí žádných speciálních vedení, symetrizačních členů či konektorů, jako je tomu v případě většiny odlišných konstrukcí antén [1–5].

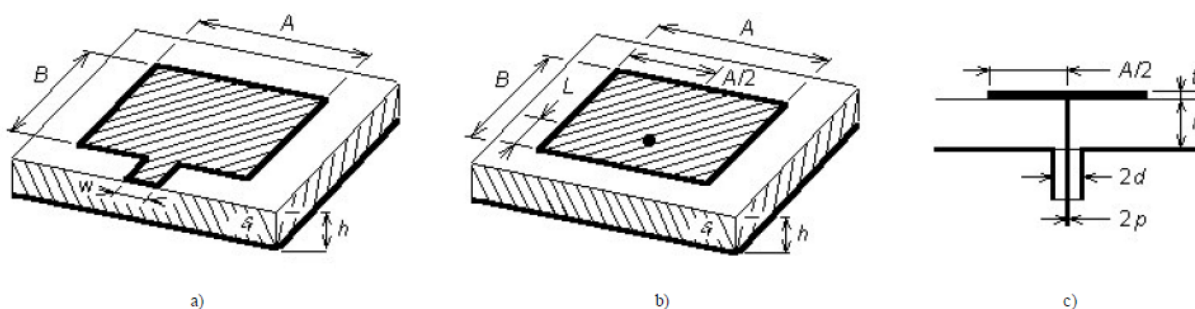
Nicméně, mikropáskové antény mají i své stinné stránky. Hlavní nevýhodou těchto antén přitom bývá jejich úzkopásmovost. Díky této úzkopásmovosti je pak velmi složité navrhovat mikropáskové anténní řady s dostatečně nízkou úrovní bočních laloků. Problémy mohou vznikat i s napájecím mikropáskovým vedením: jeho parazitní vyzařování může deformovat směrovou charakteristiku [3–5].

Jeden z nejčastěji používaných typů mikropáskové antény je schématicky nakreslen na Obr.1a (patch antenna, v české literatuře se někdy používá termín flíčková anténa). Anténu tvoří vodivý obdélník o rozměrech $A \times B$, který je nanesený na dielektrickém substrátu. Anténa bývá napájena mikropáskovým vedením (na Obr. 1. vede mikropásek z dolní hrany substrátu šikmo zleva). Druhá strana substrátu (na Obr.1a je nakreslena jako spodní) je souvisle pokovená. Tato pokovená strana tvoří jakýsi reflektor alespoň v tom smyslu, že má (z hlediska napájení) nulový potenciál a že omezuje vyzařování směrem dolů. V dalším textu tuto plochu nazýváme zemní plochou [4, 5].

Na mikropáskovou anténu napájenou mikropáskovým vedením (Obr.1a) můžeme pohlížet jako na otevřené (nestíněné) mikropáskové vedení na konci naprázdno, které je u konce výrazně rozšířeno. Pokud se podél tohoto mikropáskového vedení šíří elektromagnetická vlna, dochází na nehomogenitách (skokové rozšíření mikropásku na hranici mezi napájecím vedením a anténním prvkem a otevřený konec vedení na konci mikropáskového elementu) k vyzařování elektromagnetické energie do okolního prostoru. Struktura se tedy chová jako vysílací anténa. Pokud je navíc délka mikropáskového anténního prvku rovna polovině vlnové délky na tomto rozšířeném vedení, vstupní impedance antény je čistě reálná [4, 5]. Říkáme, že anténa je v rezonanci.

Vyzařování mikropáskové antény je možno vysvětlit i jinými způsoby. Můžeme např. vycházet z rozložení proudu na mikropáskovém anténním prvku, na který se pak můžeme dívat jako na drátovou anténu sestávající z velmi širokého a velmi tenkého anténního vodiče. Nebo můžeme vyjít ze siločar vektoru elektrické intenzity na přední a na zadní hraně anténního prvku (z hlediska napájecího mikropásku) a vyzařování můžeme vysvětlit pomocí výrazné horizontální složky (tj. složky rovnoběžné se zemní plochou) vektoru elektrické intenzity na těchto hranách [3–5].

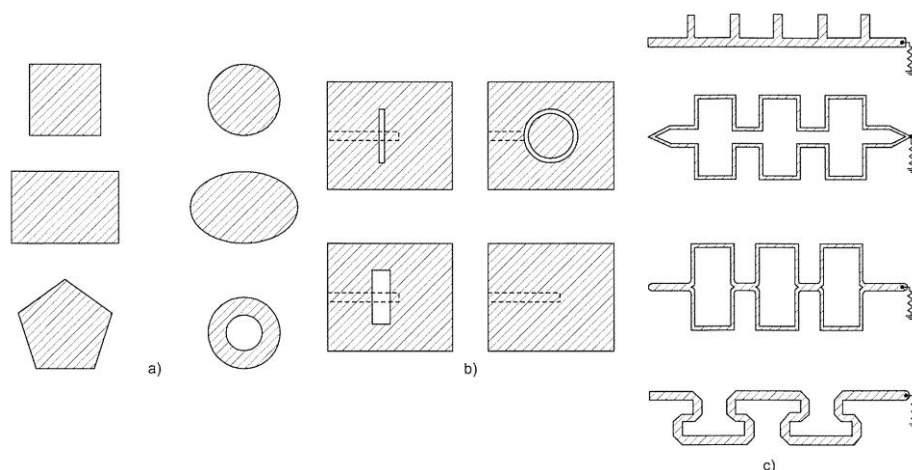
Alternativou k napájení mikropáskové antény mikropáskovým vedením je napájení koaxiálním kabelem (Obr. 1b). Zatímco vnější vodič koaxiálního kabelu je připojen k zemní desce, vnitřní vodič prochází otvorem v této zemní ploše směrem do dielektrického substrátu a přes něj pokračuje k mikropáskovému anténnímu prvku, na který je napojen (Obr. 1c). Velkou výhodou koaxiálního napájení je přitom výrazné potlačení parazitního vyzařování napájecího vedení [4].



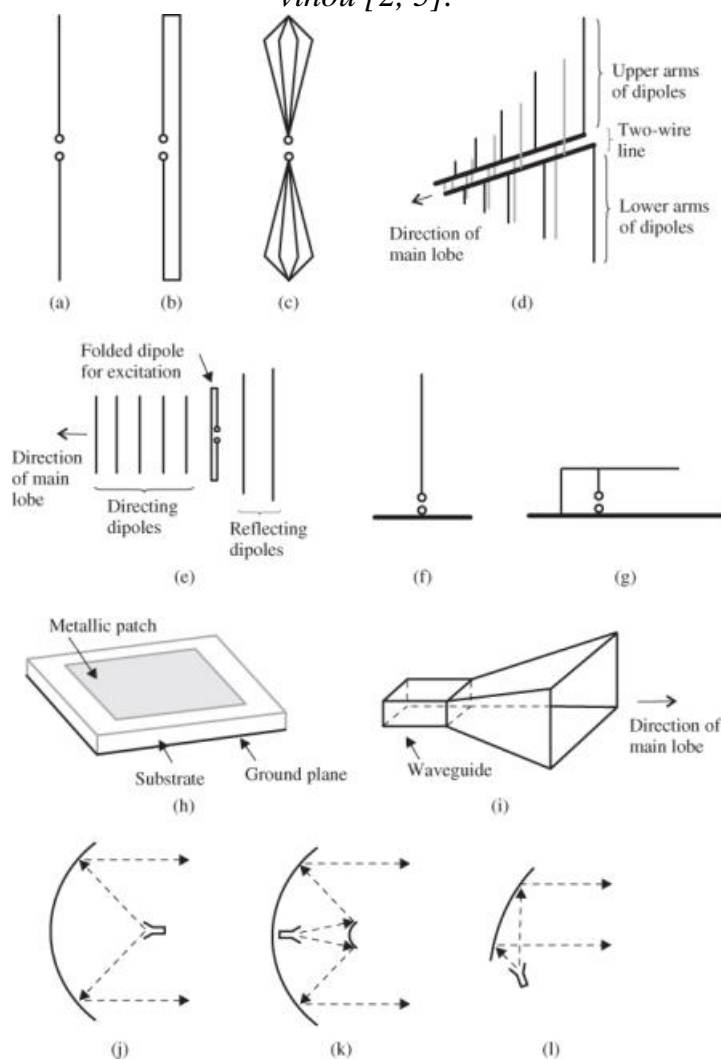
Obr. 1.: Mikropásková anténa, sestávající z jediného obdélníkového mikropáskového anténního prvku, a) napájení mikropáskovým vedením, b) napájení koaxiálním vedením, c) průřez anténou, d) v rovině středního vodiče koaxiálního napáječe [4, 5].

4.1.1 Typy mikropáskových antén

Díky velkému zájmu o mikropáskové antény (Obr. 1. a Obr. 2.) vzniklo a stále vzniká velké množství jejich různých modelů, které se od sebe v různých aspektech odlišují. Numerické modely mají různé obory platnosti (některé modely jsou dostatečně přesné pouze pro nižší mikrovlnné kmitočty, jiné platí jen v omezeném intervalu rozměrů). Velké rozdíly mezi numerickými modely jsou rovněž v jejich výpočetní náročnosti (zatímco některé modely je možno popsat vztahy v uzavřeném tvaru, takže jejich výpočetní nároky jsou minimální, jiné modely jsou založeny na numerických metodách, takže při dostatečně jemné diskretizaci musíme pracovat s rozlehlými maticemi, a tudíž potřebujeme velký výpočetní výkon). Velké odlišnosti jsou mezi metodami i v dosahované přesnosti [4, 5].



Obr. 2.: Typy mikropáskových antén: a) ploškové, b) štěrbinové, c) s postupnou vlnou [2, 5].

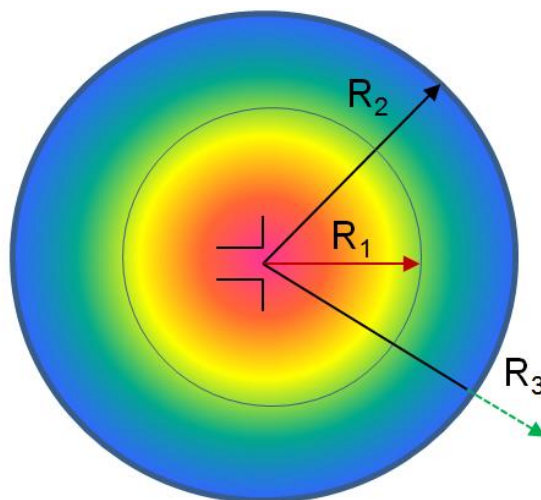


Obr. 3.: Základní typy antén: (a) dipól, (b) složený dipól, (c) bikonický dipól, (d) logaritmicko periodická dipólová anténa (LPDA), (e) Yagi-Uda anténa, (f) monopól, (g) anténa invertované -F, (h) mikropásková anténa, (i) trychtýřová anténa, (j) parabolická anténa, (k) parabolická anténa se sub-reflektorem (Cassegrain) a (l) parabolická anténa s ofsetovým napáječem [6].

4.2 modelování mikropáskových antén

Následující podkapitola popisuje nezbytný matematický aparát potřebný k návrhu antén. Důraz je kladen na parametry ovlivňující celkovou účinnost antény.

4.2.1 Oblasti vyzařování antény



Obr. 4.: Vyzařovací oblast antény [7].

Blízká reaktanční oblast: je reprezentována vnitřkem koule o poloměru

$$R_1 = 0,62 \sqrt{\frac{d^3}{\lambda}}, \quad (4.1)$$

kde λ je vlnová délka a d značí největší rozměr antény. Po vygenerování vlny anténou je fázová rychlost (touto rychlostí se rozumí rychlost pohybu siločar od zdroje) vlny, kde pole má nestálý charakter [7].

Blízká zářivá oblast (Fresnelova oblast): je to přechodná oblast mezi blízkou reaktanční zónou a vzdálenou oblastí. Je možné ji definovat vnějším poloměrem oblasti, pro který platí vztah (4.2), (za předpokladu, že pro vnější rozměr d musí platit $d > \lambda$) [7]:

$$R_2 = \frac{2d^2}{\lambda}. \quad (4.2)$$

Vzdálená oblast (Fraunhoferova oblast): poslední zmíněná oblast se nachází vně koule, kterou reprezentuje následující rovnice, která je velmi podobná vztahu (4.2) pro blízkou zářivou oblast (za předpokladu, kdy $\lambda > d$) [7]:

$$R_3 = \frac{2d^2}{\lambda} + \lambda. \quad (4.3)$$

Jakmile bylo dosaženo této oblasti, fázová rychlost klesala, až dosáhla velikosti skupinové rychlosti, která určuje skutečnou rychlost šíření vlny. V této oblasti je již elektromagnetické pole ustálené a jeho složky jsou kolmé na směr šíření [7, 8].

4.2.2 Směrová a vyzařovací charakteristika

Směrová a vyzařovací charakteristika jsou reciproké pojmy, přičemž první se užívá u přijímacích antén a druhý u antén vyzařovacích [8]. Oba pojmy určují směrové vlastnosti antén a je nutné je při návrhu antény důkladně posoudit, protože mají zásadní vliv nejen na kvalitu bezdrátové komunikace [7].

Obvykle se elektromagnetické pole antény definuje ve sférických souřadnicích obecným vztahem:

$$E = C \cdot Ae^{j\psi} \mathbf{a}_0 F(\vartheta, \varphi) \cdot \frac{e^{-jkr}}{r}, \quad (4.4)$$

kde C obsahuje konstanty prostředí, $Ae^{j\psi} \mathbf{a}_0$ je funkce buzení, $F(\vartheta, \varphi)$ je vyzařovací charakteristika a $\frac{e^{-jkr}}{r}$ má význam závislosti amplitudy a fáze pole na vzdálenosti (tzv. skalární *Greenova funkce*). Směrová charakteristika se ve většině případů definuje pro Fraunhoferovu oblast [7].

Pakliže budeme provádět měření antény, je její směrová charakteristika často měřena jako trojrozměrná, přičemž se z důvodu přehlednosti zobrazuje v řezech. Nejdůležitějšími řezy jsou vertikální a horizontální řez, které se zobrazují v závislosti na jediném úhlu, zpravidla v polárních nebo kartézských souřadnicích. Pokud se protne vyzařovací charakteristika $F(\vartheta, \varphi)$ rovinou tvořenou vektorem intenzity elektrického pole \mathbf{E} (resp. vektorem intenzity magnetického pole \mathbf{H}), vznikne vyzařovací charakteristika v E -rovině (resp. vyzařovací charakteristika v H -rovině) [7].

Většinou vyzařovací charakteristiky antény obsahují i postranní a zpětné laloky, které by v ideálním případě anténa neměla vůbec mít. Nicméně pasivní anténa není tak dokonalá, aby tyto jevy dokázala sama potlačit. V praxi se u mikropáskových antén z části eliminuje zpětné vyzařování celoplošným zemnicím pokovením zadní strany substrátu, což zároveň zvýší směrovost (zisk) v ideálním případě o 3 dB. Předtím než se vytvoří anténa fyzicky, je nezbytné provést návrh antény tak, že si vykreslíme její trojrozměrnou a dvojrozměrnou směrovou charakteristiku pomocí profesionálního softwaru CST Microwave Studio. Tento software nám umožní vytvořit si dobrou představu o vyzařovacích vlastnostech navrhované antény [7].

4.2.3 Intenzita vyzařování, směrovost, zisk

Intenzita vyzařování U reprezentuje výkon, který je vyzařován anténou do jednotkového prostorového úhlu. Zmíněný parametr lze získat vynásobením výkonové hustoty druhou mocninou vzdálenosti [1, 7]):

$$U = r^2 W_{vyz}, \quad (4.5)$$

kde U je intenzita vyzařování [$W \cdot sr^{-1}$], W_{vyz} je hustota vyzařovaného výkonu [$W \cdot m^{-2}$], r představuje vzdálenost od antény [m].

Velikost vyzářeného výkonu lze zjistit integrací intenzity vyzařování přes celý prostorový úhel 4π [7]:

$$P_{vyz} = \oint_{\Omega} U_0 d\Omega = 4\pi U_0, \quad (4.6)$$

kde U_0 je intenzitou pro izotropní zářič a $d\Omega = \sin\vartheta d\vartheta d\varphi$, což vyjadřuje jednotkový element prostorového úhlu. Vztah (4.6) lze vyjádřit následovně [7]:

$$U_0 = \frac{P_{vyz}}{4\pi}, \quad (4.7)$$

tento vztah dokazuje, že intenzita izotropního zářiče má kulový tvar, což lze velmi dobře pozorovat na simulacích provedených v CST Microwave Studiu. V praktickém návrhu antény bude mít spíše tvar připomínající elipsoid.

Pro směrovost D platí, že je poměrem mezi intenzitou vyzařování v daném směru k intenzitě vyzařování referenční antény, viz vztah (4.8) [7]:

$$D(\vartheta, \varphi) = \frac{U(\vartheta, \varphi)}{U_0} = \frac{4\pi U(\vartheta, \varphi)}{P_{vyz}}. \quad (4.8)$$

Důležitým vztahem je zisk antény G , lze jej definovat jako poměr mezi vysílaným výkonem a výkonem, který je dodáván na vstup antény [7]:

$$G(\vartheta, \varphi) = \frac{4\pi U(\vartheta, \varphi)}{P_{vst}}. \quad (4.9)$$

Zisk G nezahrnuje ztráty v anténě ani ztráty vznikající nepřizpůsobením, jsou zahrnuty v obecné účinnosti η . Zisk a směrovost jsou spolu svázány obecným vztahem [7]:

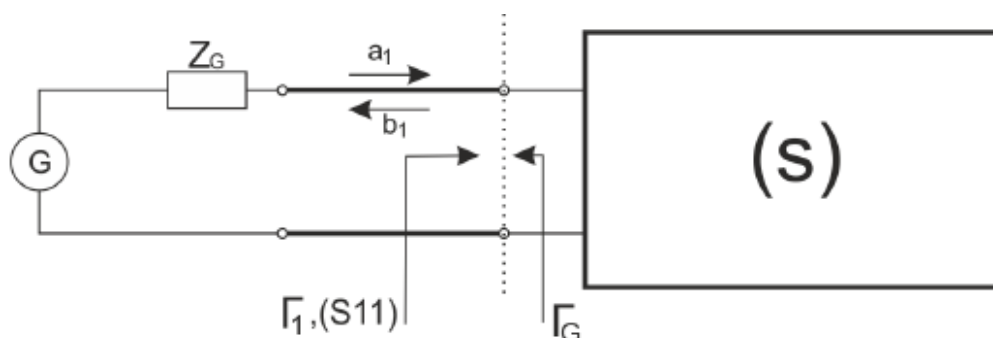
$$G = \eta D. \quad (4.10)$$

4.3 Impedanční přizpůsobení antény

Impedančním přizpůsobením rozumíme situaci, při níž činitelé odrazu zátěže Γ_L a zdroje (generátoru) Γ_G jsou komplexně sdružené. Za této situace nedochází ke vzniku stojatého vlnění. Formulací "činitelé odrazu zátěže a zdroje" máme vlastně na mysli toto: rozdělíme-li přizpůsobený obvod myšlenou čarou či řezem na dvě části, pak nezávisle na poloze řezu platí, že koeficienty odrazu Γ_L a Γ_G bran takto vzniklých jsou čísla navzájem komplexně sdružená [1].

4.3.1 Odvození S_{11} přes napěťové vlny a přizpůsobení

Při návrhu antény se lze setkat s nejrůznějšími omezeními toto omezení souvisí s problémem, že nelze navrhnout libovolně malou anténu v libovolně malém prostoru při zachování požadované šířky pásma BW (Bandwidth), vysoké účinnosti η a správného impedančního přizpůsobení [8]. Jelikož je anténa z pohledu vnějších obvodů jednobran (Obr. 5), bude nás zajímat pouze souvislost parametru S_{11} s impedančním přizpůsobením antény [7].



Obr. 5.: Dopadající a odražené napěťové vlny na jednobran (anténu) [7].

Na obrázku (Obr. 5), lze vidět dopadající normovanou napěťovou vlnu a_1 , odraženou normovanou napěťovou vlnu b_1 , vstupní koeficient odrazu Γ_L a koeficient odrazu zdroje Γ_G (jednobran jej „vidí“ na své bráně). [7] Koeficienty odrazu jsou definovány následovně:

$$\Gamma_L = \frac{b_1}{a_1}, \quad \Gamma_G = \frac{a_1}{b_1}. \quad (4.11)$$

Z (Obr. 5), i z (4.11) vyplývá, že Γ_L a Γ_G jsou inverzní parametry. Rozptylové parametry dvouhranu [9] lze příznivě použít i pro určení parametru S_{11} u našeho jednobranu a jsou definovány vztahem [7]:

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11} \cdot a_1 + S_{12} \cdot a_2, \\ b_2 &= S_{21} \cdot a_1 + S_{22} \cdot a_2. \end{aligned} \quad (4.12)$$

U jednobranu vlny a_2 , $b_2 = 0$ (neexistují), takže se nám (4.12) zredukuje na:

$$b_1 = S_{11} \cdot a_1. \quad (4.13)$$

Pokud je vstup antény impedančně přizpůsoben ($\Gamma_G = 0$), tak platí:

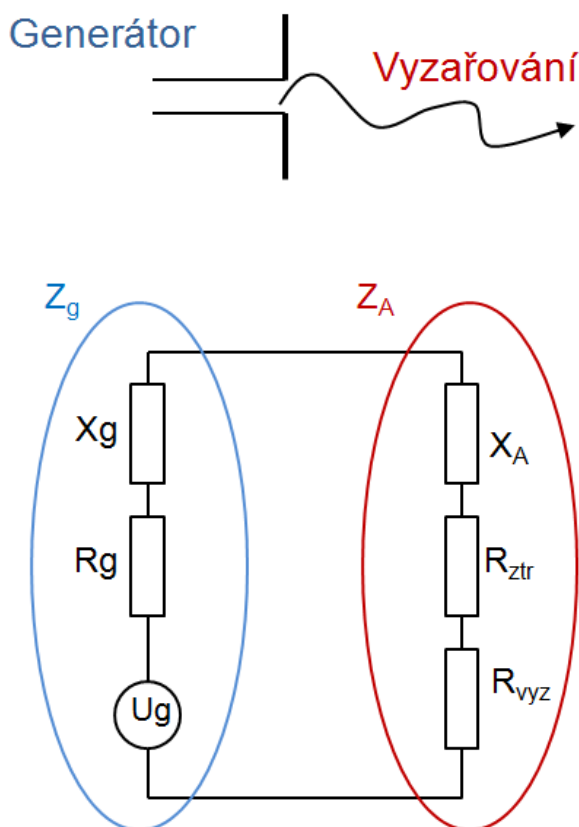
$$\Gamma_1 = \frac{b_1}{a_1} = S_{11}. \quad (4.14)$$

Z (4.14) vyplývá, že S_{11} je vstupní koeficient odrazu, který se v logaritmické míře definuje jako:

$$RL_{input} = 20 \cdot \log|S_{11}|, \quad [dB] \quad (4.15)$$

4.3.2 Výkonové přizpůsobení impedance antény a generátoru

Jestliže bychom chtěli přizpůsobení vyjádřit pomocí impedancí [7, 8], musíme respektovat náhradní obvod antény, který je reprezentován (Obr. 6).



Obr. 6.: Náhradní obvod obecné antény [7].

Na (Obr. 6) je znázorněn náhradní obvod obecné antény, který se skládá z anténní a generátorové části, přičemž tyto dva základní bloky jsou tvořeny ještě různými druhy odporů a reaktancí. Vstupní impedance antény Z_A je definována jako [7]:

$$Z_A = R_{vyz} + R_{ztr} + jX_A, \quad (4.16)$$

kde R_{vyz} je vyzařovací odpor (žádoucí), R_{ztr} je ztrátový odpor (nežádoucí) a X_A je reaktancí antény. Analogicky můžeme vyjádřit vnitřní impedanci generátoru jako součet vnitřního odporu generátoru R_g a reaktance X_g [7]:

$$Z_g = R_g + jX_g. \quad (4.17)$$

Pro stav výkonového přizpůsobení musí platit vztahy (4.18) a (4.19):

$$R_g = R_{vyz} + R_{ztr}, \quad (4.18)$$

$$X_A = -X_g. \quad (4.19)$$

4.4 Účinnost antény a vyzářený výkon

Z důvodu případného impedančního přizpůsobení vznikají ztráty odrazem výkonu η_{odr} , které se popisují pomocí činitele odrazu, který se také dá určit pomocí impedancí antény a impedance napájecího vedení [7, 8]:

$$\eta_{odr} = 1 - |\Gamma_1|^2, \quad (4.20)$$

$$\Gamma_1 = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0}, \quad (4.21)$$

Z_A je vstupní impedance antény a Z_0 je impedance (standardně udávána pro 50Ω) napájecího vedení. Účinnost antény také ovlivňují ztráty způsobené konečnou vodivostí materiálu η_c a ztráty v dielektriku η_d , viz [7, 8] a [10]. Zmíněné ztráty v sobě slučuje vyzařovací účinnost η_{vyz} , která je jedním z nejdůležitějších fyzikálních parametrů antény, kvalitativně popisuje její vlastnosti a je definována jako:

$$\eta_{vyz} = \frac{R_{vyz}}{R_{ztr} + R_{vyz}} = \eta_c \eta_d, \quad (4.22)$$

Zmíněný vztah (4.22) je možné definovat rovněž jako poměr mezi vyzářeným výkonem (vztah (4.23)) do prostoru a výkonem, který se ztratí uvnitř anténní struktury (zpravidla se jeho největší část přemění na teplo) [7].

$$P_{vyz} = \eta_{vyz} \eta_{odr} P_{vst}, \quad (4.23)$$

kde P_{vst} je výkon vstupující do antény. Snahou při návrhu mikropáskové antény musí být maximalizace vyzařovacího výkonu. Pokud je menší, tím je více

negativně ovlivněná výsledná účinnost antény kvůli jinému ztrátovému prvku uvnitř struktury. Ještě se uvádí celková účinnost, která už zahrnuje odrazy nepřizpůsobením [7]:

$$\eta_{celk} = \eta_{vyz}\eta_{odr} = \frac{P_{vyz}}{P_{vst}}. \quad (4.24)$$

4.5 Činitel jakosti Q a jeho význam pro optimalizaci antény

Činitel jakosti je velmi důležitý pro další optimalizaci antény. Obecně platí, že pokud budeme „zlepšovat“ jeden parametr, v důsledku se budou „zhoršovat“ dva zbývající parametry. Proto výsledná optimalizace musí být vhodným kompromisem mezi všemi parametry, aby se celkové fyzikální parametry nezhoršily natolik, že by anténa nebyla použitelná [7].

Definice činitele jakosti Q není obecně zcela ustálená. Uvedeme tři definice, které nám poskytnou představu o tom, co vlastně tento parametr představuje a co a jak ovlivňuje. Dle literatury [11, 7] lze definovat jako:

$$Q = 2\pi \frac{W_{ae}}{W_{ze}} \quad (4.25)$$

kde W_{ae} je akumulovaná energie oscilujícího rezonátoru a W_{ze} je ztracená energie. Zmíněný vztah se po úpravě používá pro popis Q u antén, ve kterém jsou již zahrnuty vlivy elektrického a magnetického pole [7, 12]:

$$Q = \frac{2\omega_0 \max\{W_e, W_m\}}{P_{vyz}} \quad (4.26)$$

W_e (W_m) je celková energie elektrického (magnetického) pole, P_{vyz} vyzářený výkon a ω_0 úhlová frekvence.

Další definice (vztah (4.27)) [7] je vhodná pro odhad šířky pásma antény (pro úzkopásmové antény):

$$\frac{1}{FBW} = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{f_0}{f_+ - f_-} \cong Q, \quad (4.27)$$

kde FBW je poměrné pásmo, f_0 střední (rezonanční) frekvence a Δf je šířka pásma, ve kterých je pozorovaný anténní parametr v daných mezích. Poslední vztah popisuje souvislost mezi šířkou pásma BW , poměrem stojatých vln (VSWR) a činitelem jakosti Q [7]:

$$BW = \frac{PSV-1}{Q\sqrt{PSV}} \quad (4.28)$$

Poměr stojatých vln (PSV) lze vyjádřit jako:

$$PSV = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|}. \quad (4.29)$$

Dle literatury [1, 7] a [13] by poměr stojatých vln měl být teoreticky v požadovaném frekvenčním rozsahu menší než 2 (v praxi by mělo platit $PSV \leq 1,5$ až 1,2).

Celkový činitel jakosti Q_T bývá ovlivněn čtyřmi dílčími činiteli jakosti (viz (4.30)), podle [1, 7]:

$$\frac{1}{Q_T} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_{sw}} + \frac{1}{Q_{rad}}, \quad (4.30)$$

přičemž se na pravé straně rovnice vyskytují členy, které vyjadřují ztráty (platí pro $(h \ll \lambda_0)$), lze použít u velmi tenkých substrátů [1, 7]:

vodivostní (= ztráty v kovu)

$$Q_c = h\sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (4.31)$$

dielektrické ztráty v substrátu

$$Q_d = \frac{1}{\tan(\delta)} \quad (4.32)$$

ztráty povrchovými vlnami Q_{sw} se nemusí, v případě substrátů s malou výškou nebo s $\varepsilon_r = 1$, uvažovat.

Největší vliv má vyzařovací činitel jakosti Q_{rad} definovaný následovně [1, 7]:

$$Q_{rad} = \frac{2\omega\varepsilon_r}{hG_t/l} \cdot K \quad K = \frac{\iint_{plocha} |E|^2 dA}{\oint_{obvoda} |E|^2 dl} \quad (4.33)$$

Ze vztahu (2.33) pro Q_{rad} je patrná jeho závislost na parametrech substrátu, na jeho relativní permitivitě ε_r a na výšce h , která má pro velmi tenké substráty významný vliv. G_t/l je konduktance na jednotku délky vyzařující apertury [7].

Nevýhodou mikropáskových antén je jejich relativně malá šířka pásma (jednotky %, vyšší Q_T) v porovnání s klasickými trychtýřovými nebo liniovými anténami, jejichž šířka pásma může dosahovat i několika desítek %, nižší Q_T . Naše snaha bude minimalizovat Q_T na sledované frekvenci, čímž dosáhneme většího FBW [7].

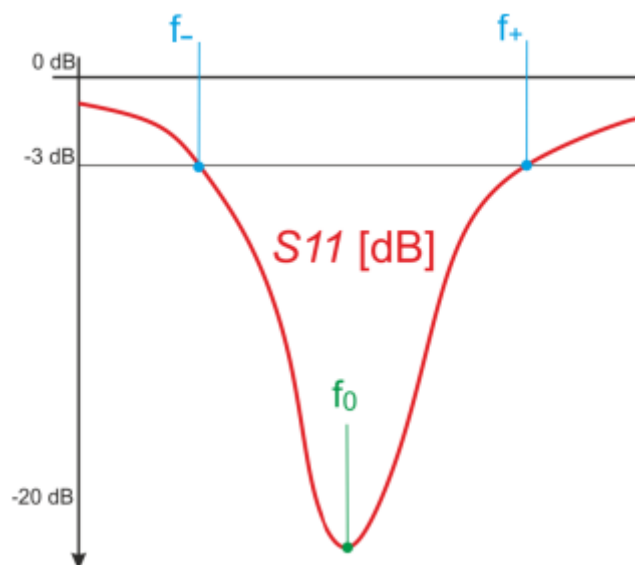
Vztah (4.34) vyjadřuje propojení předchozích závislostí do jednoho celku. Velkou výhodou tohoto vztahu je fakt, že poskytuje rychlý a snadný odhad o požadovaném rozměru antény, pokud musíme splnit nějak definovanou šířku pásma a anténa musí mít alespoň přibližně stanovenou účinnost, podle [1, 7] a [14].

$$BW = \frac{16}{\eta} \left(\frac{\pi \cdot a}{\lambda} \right)^3 = \frac{2}{\eta} k^3 a^3 \quad (4.34)$$

4.5.1 Přibližné určení Q

V literatuře [15] je odvozen postup, jak „zhruba“ určit činitel Q , odečteme jej z grafu závislosti parametru S_{11} na frekvenci (Obr. 7). Celé odvození tu nebudeme pro jeho komplexnost uvádět. Zmíníme pouze konečný vztah [7]:

$$Q_Z = \frac{2}{FBW_{-3dB}} \quad (4.35)$$



Obr. 7.: Určení Q_z grafu S_{11} [7].

4.6 Fyzikální omezení mikropáskových a elektricky malých antén

Při matematických výpočtech u návrhu antén se stále hledá matematický vztah, jak přesně určit teoreticky nejnižší možnou hodnotu činitele Q . V literatuře se vyskytuje mnoho aproximativních vztahů, které jsou vhodné jen za určitých podmínek a pro daný typ antén. Zpravidla existují tři aproximativní vztahy, jejichž názvy byly zvoleny podle příjmení autorů [7].

4.6.1 Chu limit

Chu ve své práci z roku 1948 [16] uvádí tři základní kritéria pro dosažení optimálního vyzařovacího výkonu. Prvním kritériem je maximalizace zisku pro danou složitost anténní struktury. Druhým kritériem je minimalizace činitele Q . Třetím kritériem je maximalizace poměru mezi ziskem G a činitelem Q [7].

Chu při svém odvození vycházel z všesměrové malé antény, jejíž pole odvodil pomocí sférických funkcí. Chu ve svých odvozeních dospěl ke vztahu (4.38):

$$Q_{Chu} = \frac{1+3k^2a^2}{k^3a^3(1+k^2a^2)} \approx \frac{1}{k^3a^3}, \quad a \ll \lambda \quad (4.36)$$

a pro maximální dosažitelný zisk odvodil vztah:

$$G_{max} \cong \frac{4a}{\lambda}. \quad (4.37)$$

Chu zjistil, že pokud by se překročila zmíněná hodnota maximálního zisku, tak činitel Q začne dramaticky vzrůstat.

4.6.2 McLean limit

McLean ve své práci [17] představil nové odvození výrazů (vztahy (4.38) a (4.39)) pro určení limitního Q . Odvození vychází ze složek pole elementárního dipólu s uvážením základních módů TE nebo TM. McLean také oddělil vyzařovanou energii od energie akumulované v okolí zářiče [7].

$$Q_{McLean} = \frac{1}{k^3 a^3} + \frac{1}{ka}, \quad (4.38)$$

$$Q_{McLean} = \frac{1}{k^3 a^3}, \quad ka \ll 1 \quad (4.39)$$

Ze vztahů (4.36) a (4.39) lze vyčíst, že pro velmi malé ka se McLeanův limit shoduje s limitem odvozeným Chuem. V opačném případě (pro $ka = 1$) je chyba 100% ($Q_{McLean} = 2Q_{Chu}$), [7].

4.6.3 Thal limit

Ve svém díle [18] Thal uvažoval zvláštní případ sférické drátové antény, kde zahrnul nenulovou reaktivní energii uvnitř objemu koule a z náhradního obvodu odvodil limitní vztah [7]:

$$Q_{Thal} \approx \frac{1,5}{k^3 a^3} + \frac{0,6}{ka}. \quad (4.40)$$

4.7 Metody návrhu pravoúhlého mikropásku

Pro jednoduchý návrh rozměrů pravoúhlého mikropásku uvádí literatura [1] tyto základní vztahy:

pro šířku mikropásku platí

$$W = \frac{1}{2f_r\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r+1}}, \quad (4.41)$$

kde ε_0 značí permitivitu vakua, μ_0 permeabilitu vakua, ε_r relativní permitivitu substrátu a f_r rezonanční kmitočet, pro nějž je velikost mikropásku navrhována,

pro efektivní permitivitu platí

$$\varepsilon_{r\,eff} = \frac{\varepsilon_r+1}{2} + \frac{\varepsilon_r-1}{2} \sqrt{\left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)}, \quad (4.42)$$

kde h označuje tloušťku substrátu,

pro ΔL vyjadřující polovinu rozdílu mezi efektivní a fyzickou délkou mikropásku platí

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\varepsilon_{r\,eff}+0,3)\left(\frac{W}{h}+0,264\right)}{(\varepsilon_{r\,eff}-0,258)\left(\frac{W}{h}+0,8\right)}, \quad (4.43)$$

pro rezonanční délku platí

$$L = \frac{1}{2f_r\sqrt{\varepsilon_{r\,eff}}\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} - 2\Delta L. \quad (4.44)$$

Při praktickém návrhu mikropásku je po výpočtu těchto rozměrů nutno ještě určit impedanci na okraji mikropásku a následně vypočítat pomocí vztahu (4.45) vzdálenost od okraje mikropásku, kam umístit napáječ, aby byl impedančně přizpůsoben.

$$R_{in}(y = y_0) = R_{in}(y = 0) \cos^2\left(\frac{\pi}{L}y_0\right) \quad (4.45)$$

kde $R_{in}(y = y_0)$ značí impedanci v místě připojení napáječe, $R_{in}(y = 0)$ značí vypočtenou impedanci na okraji mikropásku a y_0 značí vzdálenost umístění napáječe od okraje mikropásku.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

5.1 Použité elektricky vodivé nanomateriály

Nanomateriály jsou obecně vnímány jako materiály s lepšími a pokročilými vlastnostmi, jež nám poskytují nové možnosti využití. Z těchto důvodů se snaha využít nanočástice uhlíku v podobě tenké aktivní vrstvy, která je schopná přijímat a vysílat signál, jeví jako velmi výhodné řešení. V dnešních moderních přístrojích přijímajících bezdrátový signál se hledají nové cesty jak zefektivnit antény - jak po stránce tvaru, tak i např. zisku signálu či materiálového složení.

Mnohostěnné uhlíkové nanotrubic se vyrábí pomocí chemické depozice (CVD) napařováním acetyleny. Použité uhlíkové nanotrubic v této práci jsou dodány od společnosti Sun Nanotech Co. Ltd., China. Průměr použitých nanotrubic je 10 – 30 nm, délka 1 – 10 μm , čistota > 90% a měrný odpor 0,12 $\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Dalšími použitými nanočásticemi jsou stříbrné nanočástice. Stříbrné nanočástice byly připraveny pomocí solvotermální syntézy (viz strana 38).

5.2 Definice nanomateriálu

Vymezení pojmu Mezinárodní organizace pro normalizaci (International Organization for Standardization, ISO) definuje „nanomateriál“ jako „materiál s jakýmkoliv vnějšími rozměry velikosti v řádu nanometrů nebo s vnitřní strukturou nebo povrchovou strukturou v řádu nanometrů“, přesněji 1 – 100 nm [19, 20].

Dle doporučení Evropské komise ze dne 18. října 2011 se „nanomateriálem“ rozumí přírodní materiál, materiál vzniklý jako vedlejší produkt nebo materiál vyrobený obsahující částice v nesloučeném stavu nebo jako agregát či aglomerát, ve kterém je u 50 % nebo více částic ve velikostním rozdělení jeden nebo více vnějších rozměrů v rozmezí velikosti 1 – 100 nm. Evropská komise připouští i některé výjimky, co se týče nižšího (1 – 50 %) obsahu částic v tomto rozmezí. Mezi nanomateriály jsou též zahrnuty fullerény, grafenové vločky a jednostěnné uhlíkové nanotrubic s jedním nebo více rozměry pod 1 nm [19, 21].

Z pohledu definice se „částicí“ rozumí malá část hmoty s definovanými fyzikálními hranicemi, „agregátem“ pak částice složená z pevně vázaných nebo sloučených částic. „Aglomerát“ je shlukem slabě vázaných částic nebo agregátů, jejichž výsledný vnější povrch je podobný součtu povrchů jednotlivých složek [19, 21]. Americká Agentura pro ochranu životního prostředí (United States Environmental Protection Agency, US EPA) definuje nanomateriály jako materiály, které mají alespoň jeden rozměr menší než 100 nm. Mezi nanomateriály řadí US EPA i nanočástice, které mají nejméně dva rozměry mezi 1 a 100 nm [19, 22].

5.3 Antény na bázi uhlíkových nanotrubic

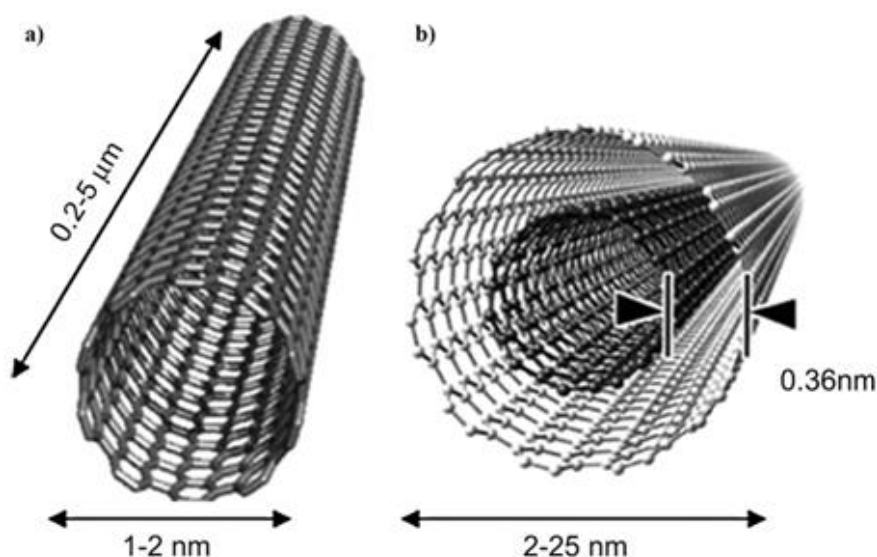
Následující část disertační práce popisuje dvě materiálově odlišné konstrukční báze antén založených na nanočásticích uhlíku a antén založených na nanočásticích stříbra. Jsou zde rozepsány charakteristiky použitých uhlíkových nanočástic v podobě mnohostěnných uhlíkových nanotrubic. A také jsou zde popsány použité nanočástice stříbra a jejich použití ve spojení s metodou vodivého inkoustového tisku.

5.3.1 Definice uhlíkových nanotrubic

Uhlíkové nanotrubičky jsou podlouhlé útvary, jejichž stěny jsou tvořeny atomy uhlíku o průměru 1 – 100 nanometrů a o délce do 100 μm . Lze je zařadit mezi poměrně nové formy uhlíku, a jak už podle názvu můžeme odvodit, velikostně dosahují rozměrů nanometrů. CNTs byly objeveny v roce 1991 japonským fyzikem Sumiem Iijimou, který zkoumal uhlíkový materiál vzniklý při syntéze fullerenů pomocí výboje v elektrickém oblouku, jež bylo pozorováno elektronovým mikroskopem. Tímto objevem se dostaly do podvědomí mnoha vědců a v dnešní době nalézají hodně praktických využití, jako jsou senzory, kompozitní materiály a mnoho dalších aplikací. [23].

5.3.2 Rozdělení uhlíkových nanotrubic

CNTs můžeme rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou jednostěnné uhlíkové nanotrubičky (SWCNTs), které se vyznačují stočením grafenové vrstvy do tvaru trubičky. Druhou skupinou jsou mnohostěnné uhlíkové nanotrubičky (MWCNTs), které jsou tvořené z několika grafenových listů, lišící se průměry. Na následujícím obrázku (Obr. 8.) je znázorněn rozdíl mezi jednostěnnými a mnohostěnnými uhlíkovými nanotrubičkami.

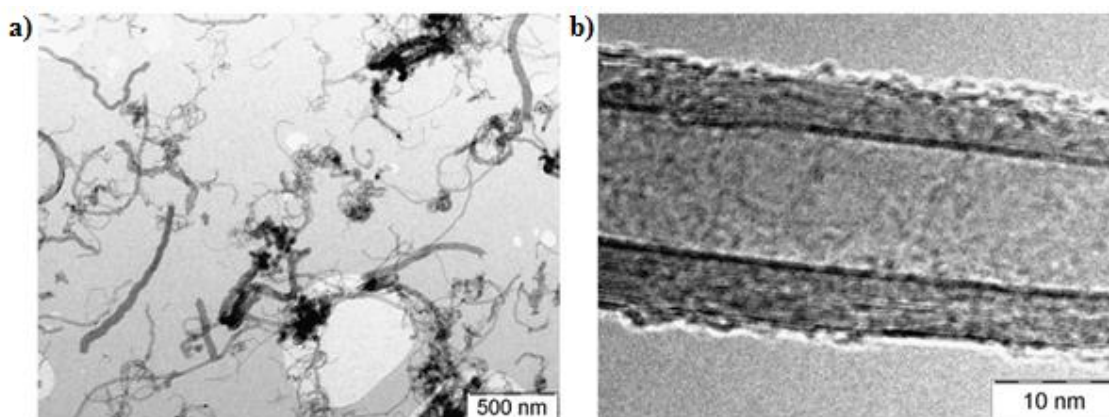


Obr. 8.: a) Jednostěnná uhlíková nanotrubička, označována jako SWCNT, b) Mnohostěnná uhlíková nanotrubička, označována jako MWCNT [24].

5.4 Experimentální anténa na bázi MWCNTs

Anténa na bázi MWCNTs je tvořena substrátem z elektricky nevodivého materiálu Polymethylmethakrylátu (PMMA) ve tvaru plošného útvaru, na jehož povrchu je nanese elektricky vodivá funkční vrstva se schopností příjmu/vysílání signálu a současně vratné adsorpce/desorpce molekul organických par konstituovaná na bázi náhodně zapletených nanotrubic (Obr. 9.).

Tato funkční vrstva je produktem vakuové filtrace disperze uhlíkových nanotrubic přes filtrační membránu z polymerních nanovláken a to buď jako samonosná funkční vrstva nebo s integrovanou filtrační membránou, která zůstává součástí vzniklé funkční vrstvy. Použité uhlíkové nanotrubice funkční vrstvy mají průměr 10 – 30 nm a délku 1 – 10 μm a funkční vrstva má tloušťku 30 μm – 500 μm .

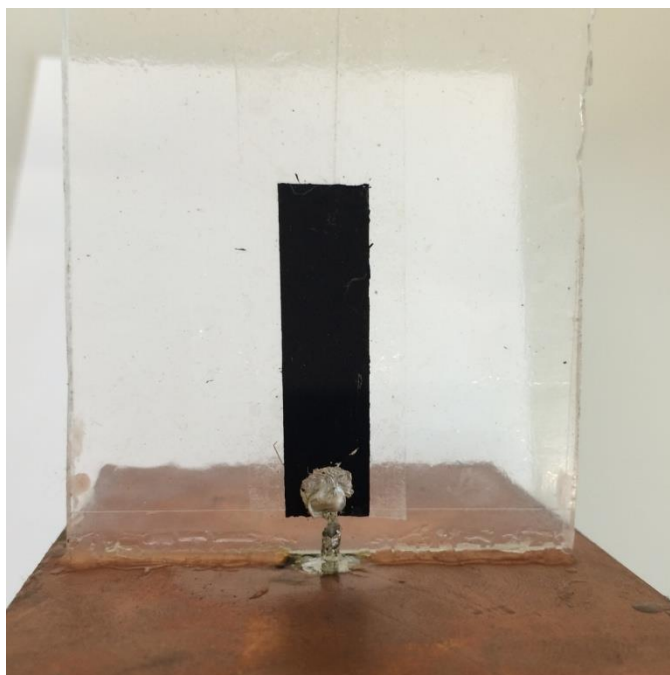


Obr. 9.: a) TEM analýza mnohostěnných uhlíkových nanotrubic, b) HRTEM detailní pohled na strukturu mnohostěnné uhlíkové nanotrubičky.

Experimentální anténa s integrovanou funkcí senzoru organických par má podobu monopólu. Může být zhotovena také v miniaturizovaném provedení jako PIFA anténa (Planar Inverted F Antenna). Tvar a velikost antény je možno přizpůsobit požadované frekvenci.

Dosavadní známá literatura [25–28] se věnuje velmi omezeně anténám, které by byly schopny pracovat v mikrovlnném pásmu, a zároveň by dokázaly detekovat organické páry na základě změny odporu použité vrstvy nanosené na substrátu používaném ve vysokofrekvenční technice. S pomocí nanotrubic lze konstrukčně navrhnout takovou anténu, která při detekci organických par neovlivní výrazně svoje přizpůsobení. Ovlivnění činitele odrazu antény je maximálně v jednotkách [dB]. To znamená, že celkové přizpůsobení se výrazně nezhorší a anténa tak může pracovat (tj. přijímat nebo vysílat). Takové řešení je inovativní z toho důvodu, že lze na malé plošce v podobě antény zakomponované v mobilním zařízení provádět více funkcí, mezi které patří možnost přenosu signálu a možnost detekce organických par.

Anténa tedy může zároveň detekovat organické páry v ovzduší a po vyhodnocení upozornit uživatele takového zařízení, že se v ovzduší vyskytuje nějaký typ organické páry, která bývá ve většině případů ve větších i menších koncentracích nebezpečná pro zdraví člověka. Rizikovost koncentrace dané organické páry závisí na konkrétní nebezpečné látce, některé látky-jako je například Amoniak jsou nebezpečné již od jednotek PPM (Parts per milion). Samotné vyhodnocení není prováděno touto anténou, anténa je v tomto případě chápána jako součást zapojení spolu například s A/D převodníkem s vyhodnocovacím členem, kde je ve vyhodnocovacím řetězci na pozici pasivní antény a zároveň na pozici senzoru (čidla) organických par.

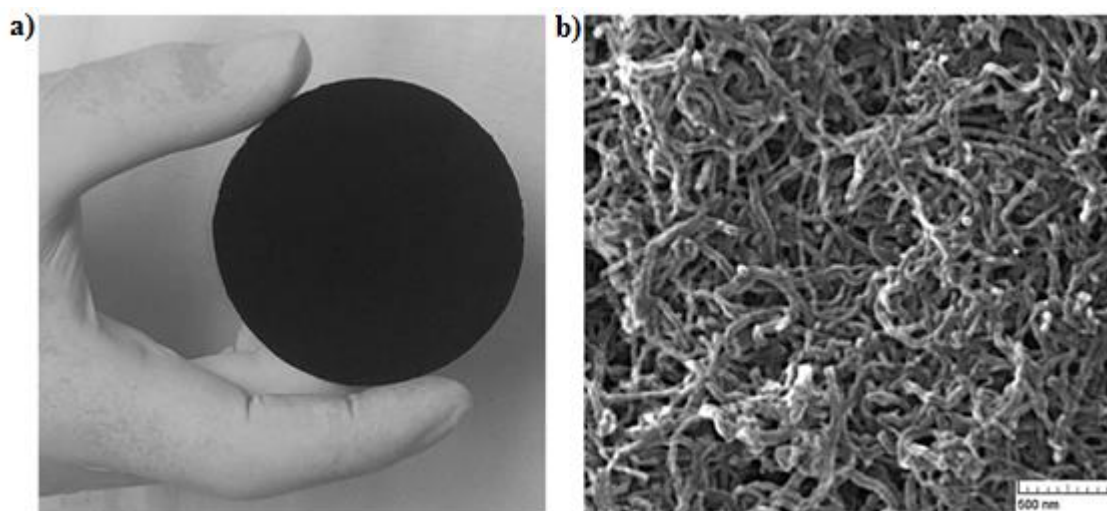


Obr. 10.: Fotografie experimentální antény na bázi mnohostěnných uhlíkových nanotrubic.

Mikropásková experimentální anténa (Obr. 10.) je tvořena funkční vrstvou z náhodně zapletených uhlíkových nanotrubic o délce 1 – 10 μm a průměru v rozmezí 10 – 30 nm [29–35]. Tato funkční vrstva je nanosená na elektricky nevodivém substrátu vyrobeném z PMMA. Substrát je tvořen páskem PMMA o délce 90 mm a šířce 45 mm, zakotveným v zemní rovině tvořené z jedné strany měděným cuprexitivovým substrátem standardu Flame Retardant 4 (FR-4). Tloušťka funkční vrstvy je 200 μm a navazuje na ni koaxiální vedení. Anténu lze zakomponovat do obalu přenosného zařízení využívajícího bezdrátový přenos informací.

Funkční vrstva (Obr. 11.) je vyrobena vakuovou filtrací kapalně disperze složené z uhlíkových nanotrubic a směsi surfaktantů přes polymerní membránu. Tato funkční vrstva byla podrobena analýze pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM). Filtrační polymerní membrána z polyuretanových nanovláken je vyrobena elektrostatickým zvlákněním z roztoku polyuretanu

v dimethylformamidu. Skrze tuto membránu je filtrováno takové množství disperze, které odpovídá tloušťce 200 μm . Po dosažení této tloušťky je vzniklá vrstva promyta alkoholem a vodou tak, aby se odstranily zbytky surfaktantů. Filtrační membrána je odstraněna a filtrovaná vrstva je sušena mezi filtračními papíry [36–37]. Po vysušení je z této vrstvy vytvořen vhodný tvar, který odpovídá požadavkům na frekvenci antény, v konkrétním případě proužek o délce 40 mm a šířce 9 mm. Proužek je nanesen na substrátu z PMMA. Takto vzniklý útvar je nejlépe přizpůsoben frekvenci 1,28 GHz.

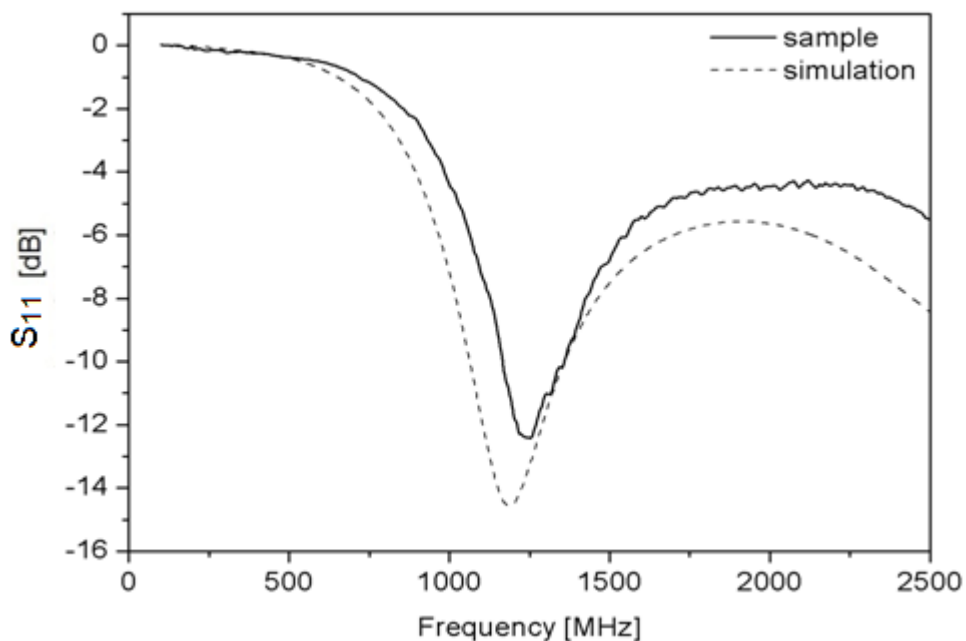


Obr. 11.: a) volně postavená síť z náhodně zapletených uhlíkových nanotrubic (MWCNTs) (kruh o průměru 75 mm a tloušťce 0.15 mm),
b) SEM snímek náhodně zapletených uhlíkových nanotrubic (MWCNTs).

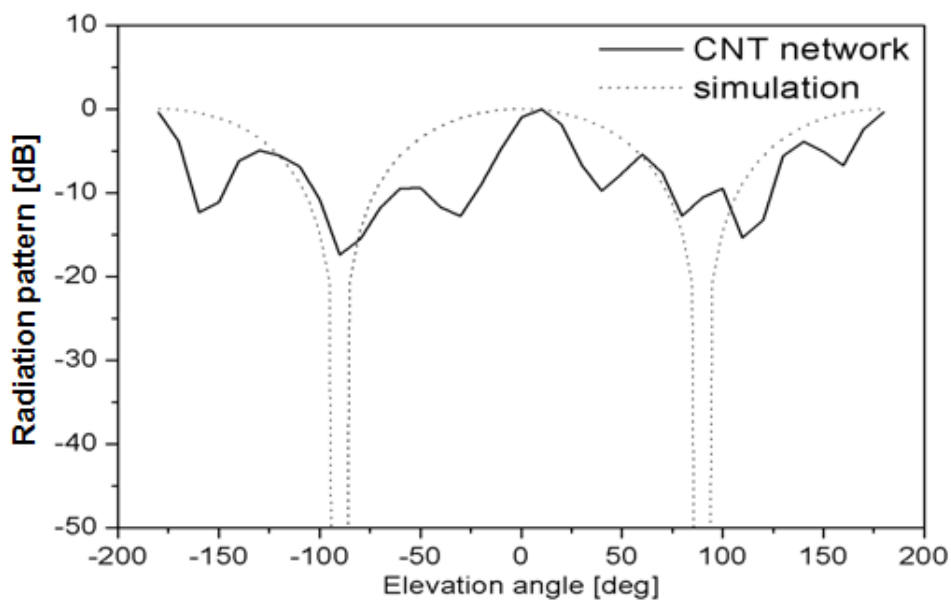
Vzniklá funkční vrstva se používá jako samonosná (filtrační nanovláknitá membrána je separována), je elektricky vodivá, schopná přijímat/vysílat signál. Je také schopná adsorpce molekul organických par při vystavení těmto parám. Tento proces je vratný, tedy při odstranění této vrstvy z par dochází k desorpci molekul organických par. Adsorpci a desorpci par lze jednoduše detekovat měřením změny stejnosměrného odporu. Je ale možné vyhodnocovat ji také skalárním měřením koeficientu odrazu antény tvořené z této odporové vrstvy nebo měřením změny jejího rezonančního kmitočtu, případně detekováním změny rezonanční frekvence antény, bez ztráty její funkce.

Nejlépe je přizpůsobena na frekvenci 1,28 GHz (Obr. 12., Obr. 13.). Měření antény bylo provedeno spektrálním analyzátozem FSH3 (model se sledovacím generátorem bez předzesilovače) s měřícím můstkem FSH-Z2, který je schopen měřit v šířce pásma od 100 kHz do 3 GHz. Simulaci pro šíření elektrického pole E u vyrobené experimentální antény reprezentuje obrázek (Obr. 14.). Simulaci magnetického pole H reprezentuje obrázek (Obr. 15.).

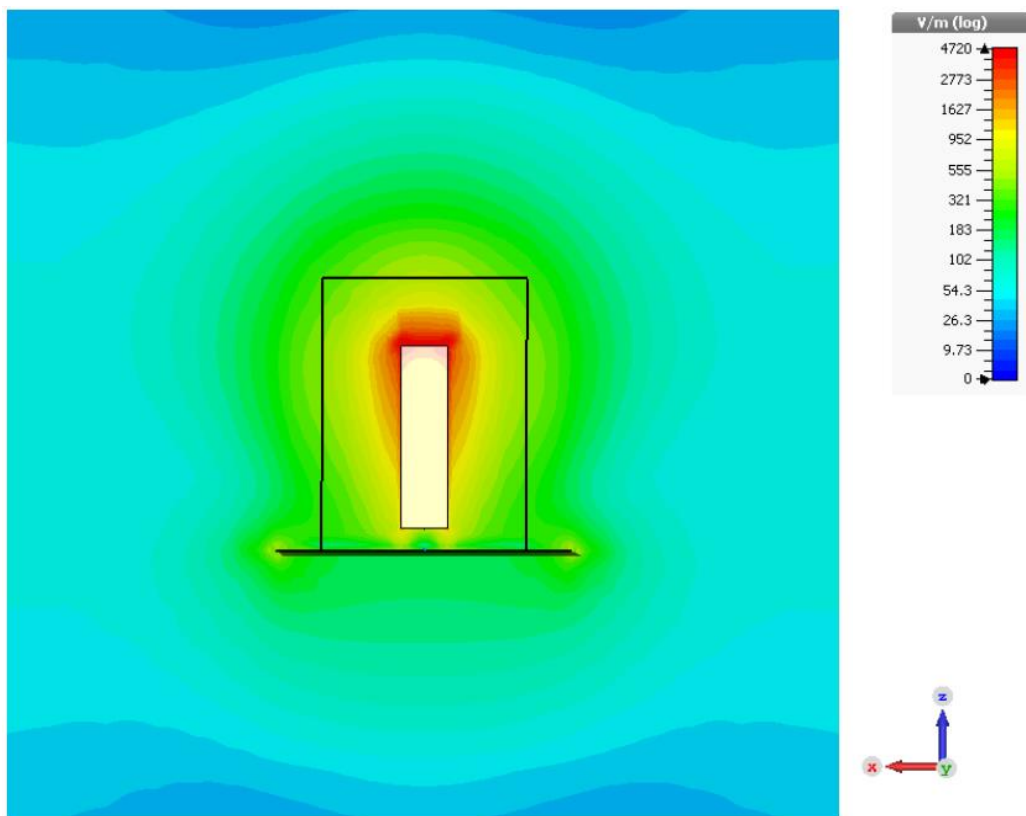
5.4.1 Výsledky měření a simulací antény na bázi MWCNTs



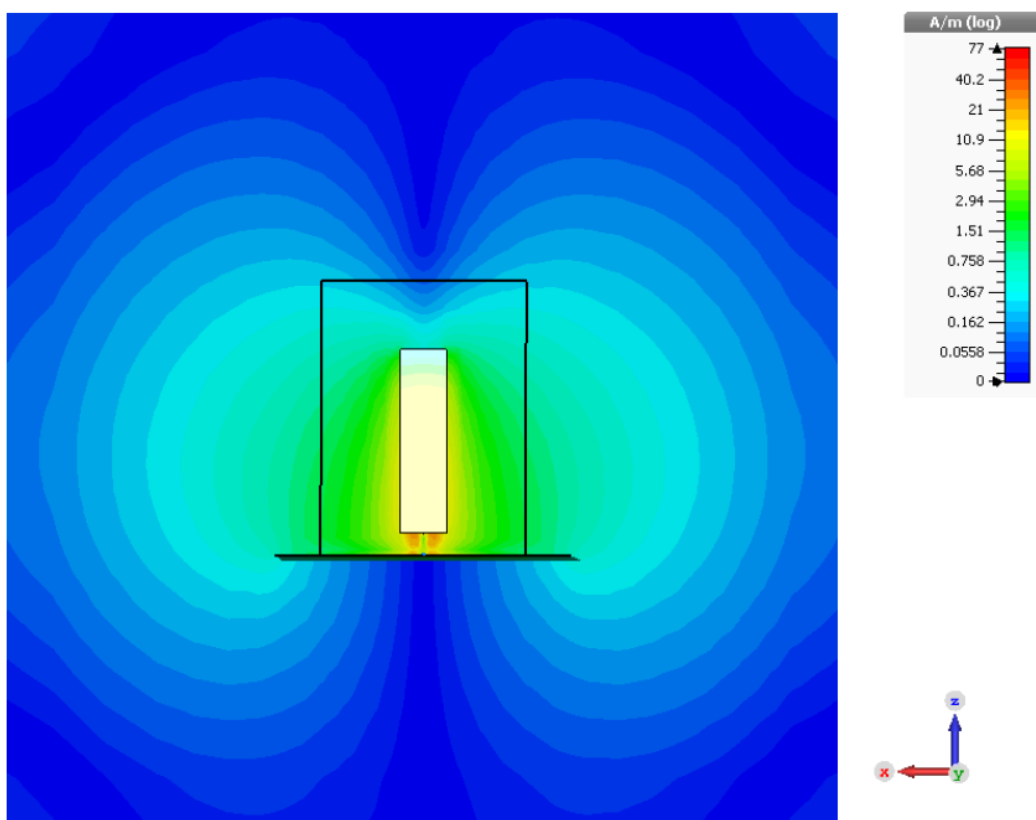
Obr. 12.: Tento graf reprezentuje činitel odrazu S_{11} , (vyjádřen v dB) v závislosti na frekvenci s přizpůsobením na 1,28 GHz, kde plná křivka znázorňuje reálný vzorek a přerušovaná simulaci.



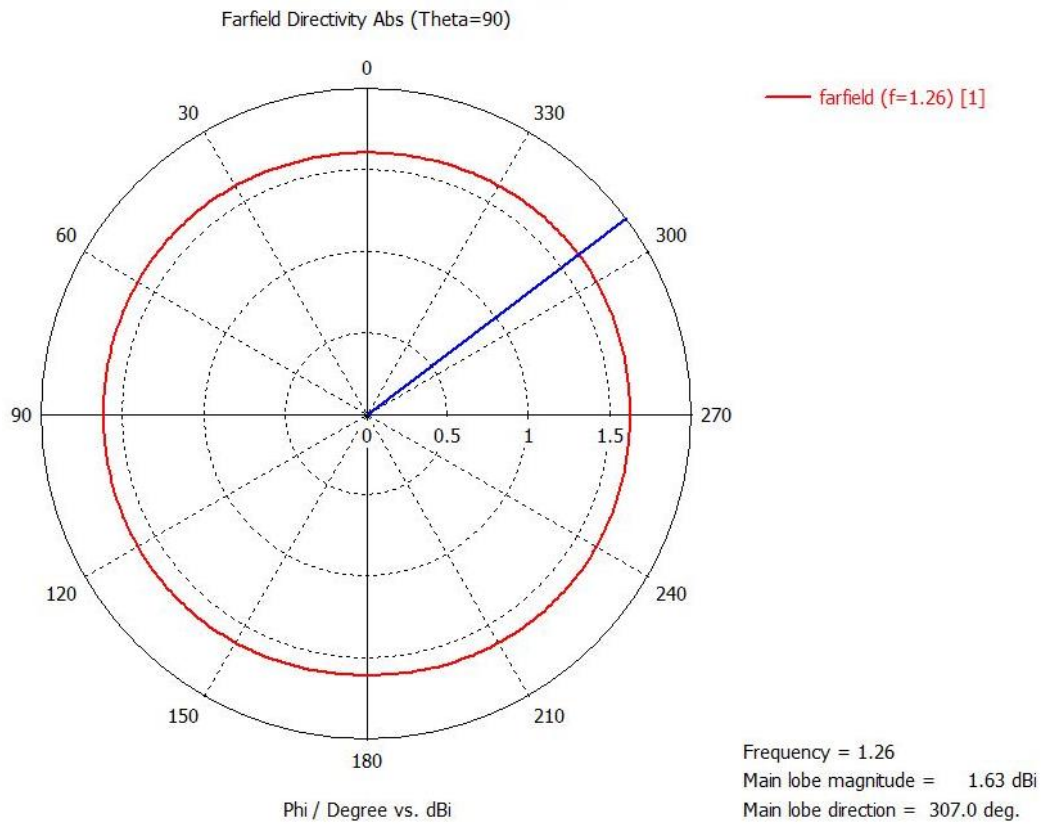
Obr. 13.: Tento graf reprezentuje vyzařování antény v porovnání se simulací.



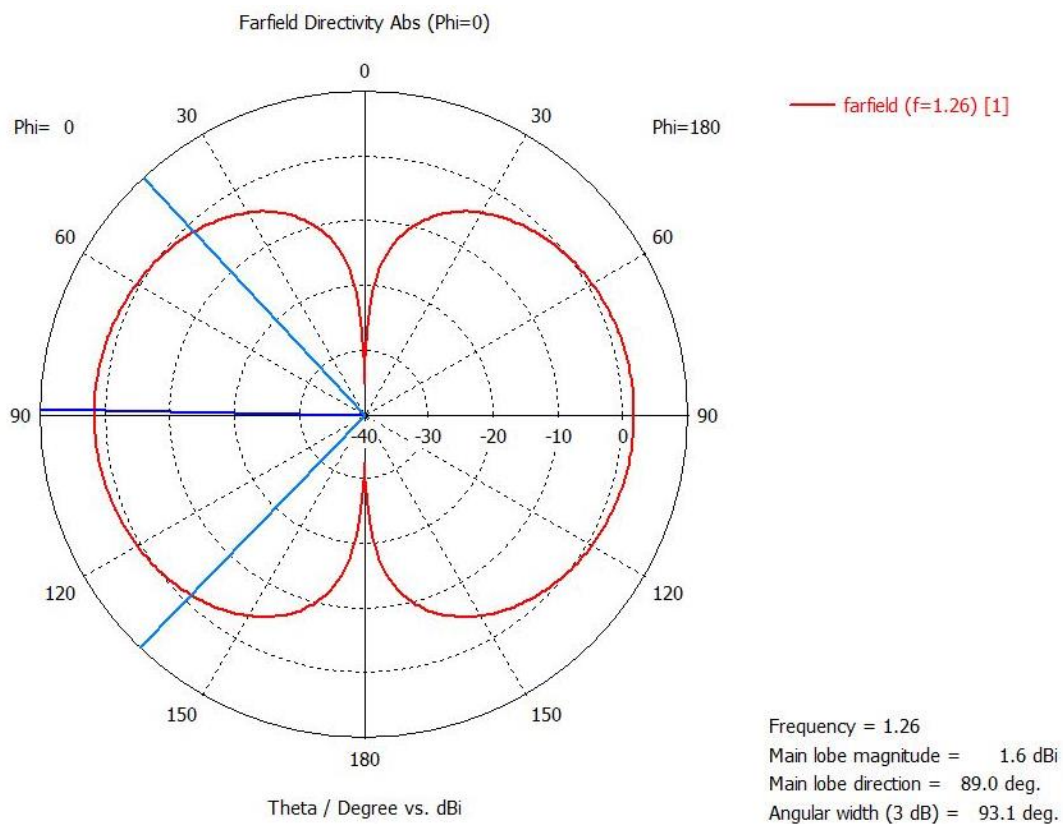
Obr. 14.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě (1,26 GHz).



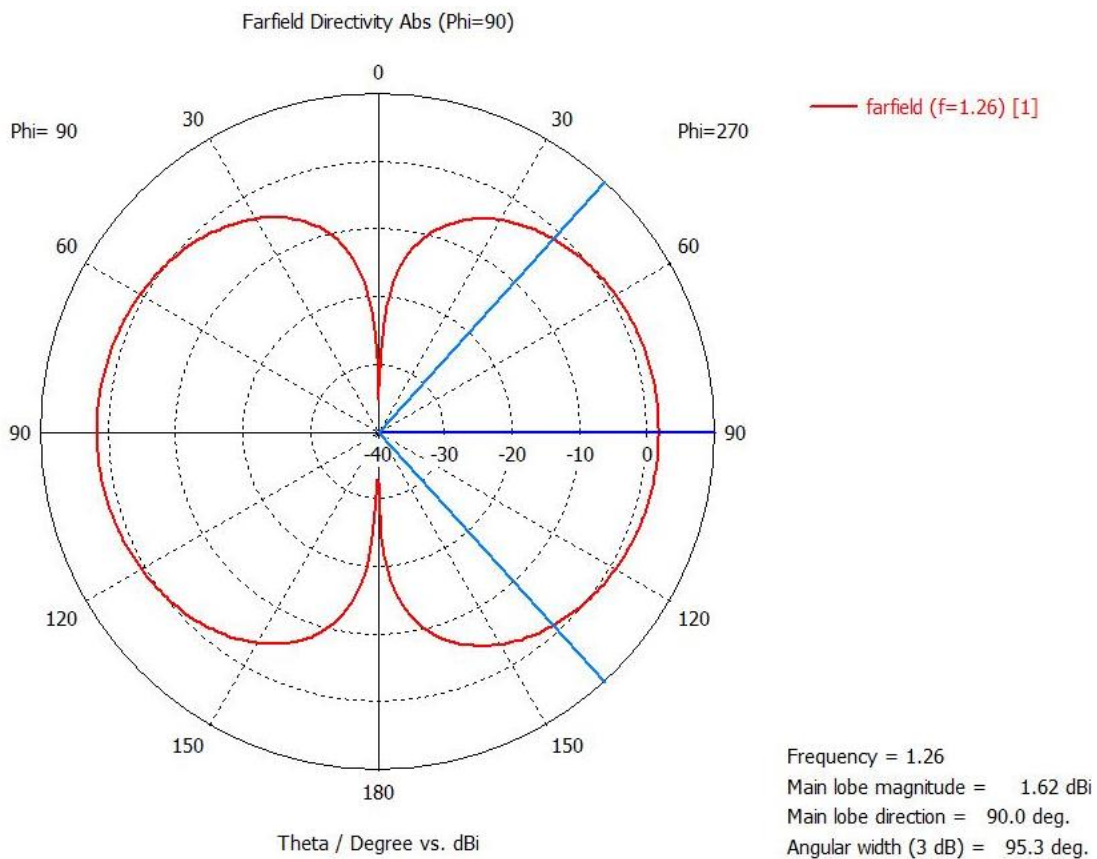
Obr. 15.: Rozložení intenzity magnetické pole H na anténě (1,26 GHz).



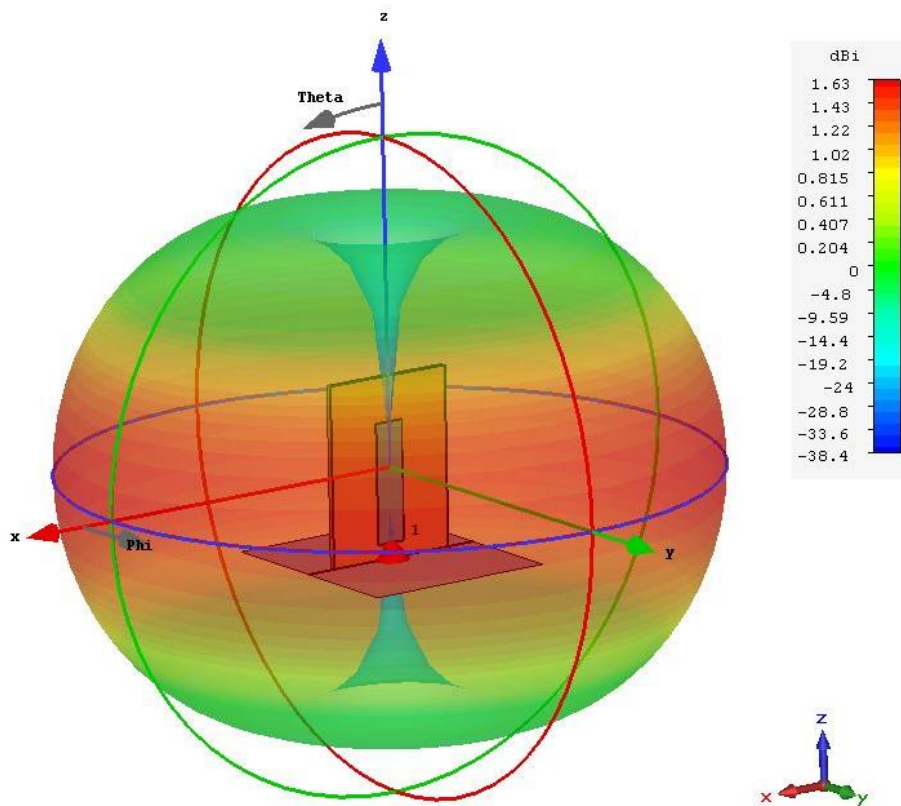
Obr. 16.: Směrová charakteristika antény rovina XY (1,26 GHz).



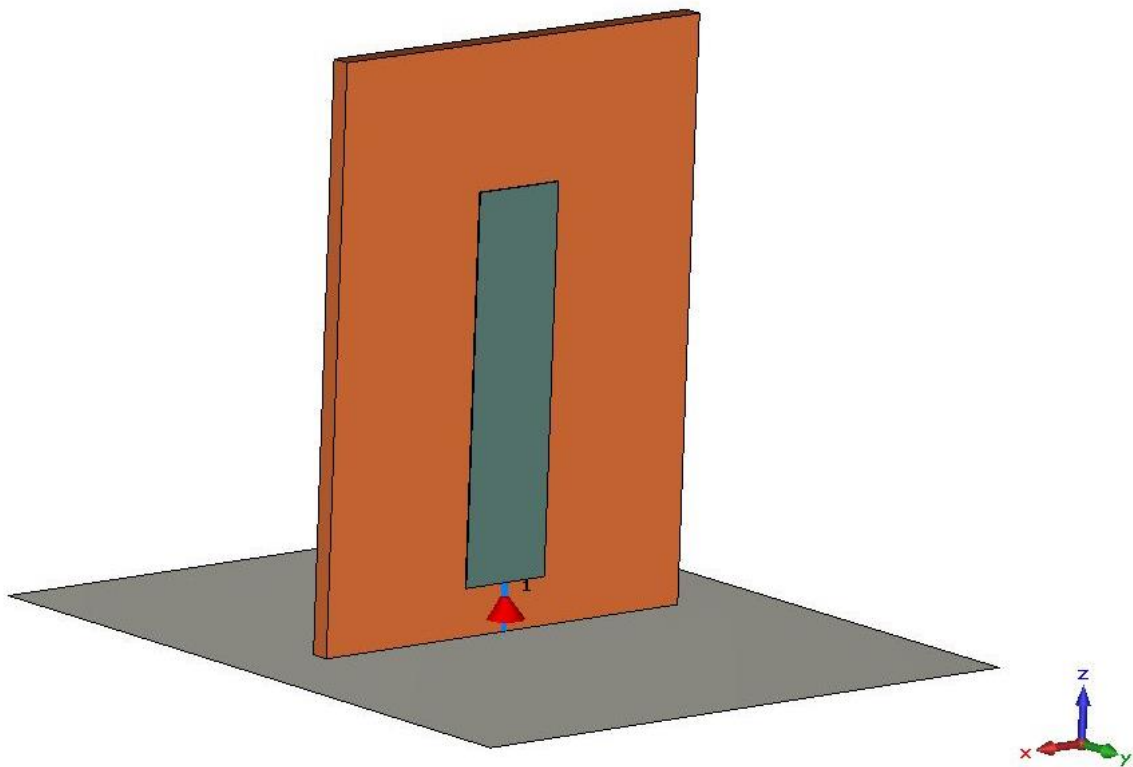
Obr. 17.: Směrová charakteristika antény rovina ZX (1,26 GHz).



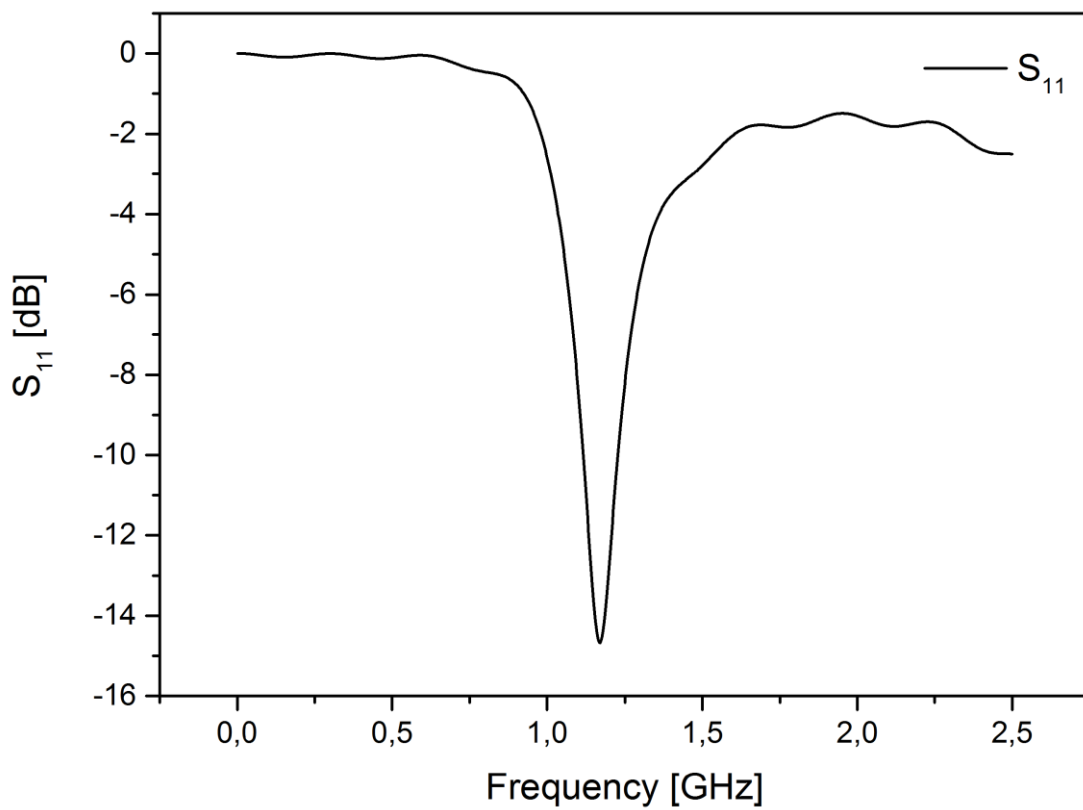
Obr. 18.: Směrová charakteristika antény rovina ZY (1,26 GHz).



Obr. 19.: Směrová charakteristika v 3D zobrazení (1,26 GHz).



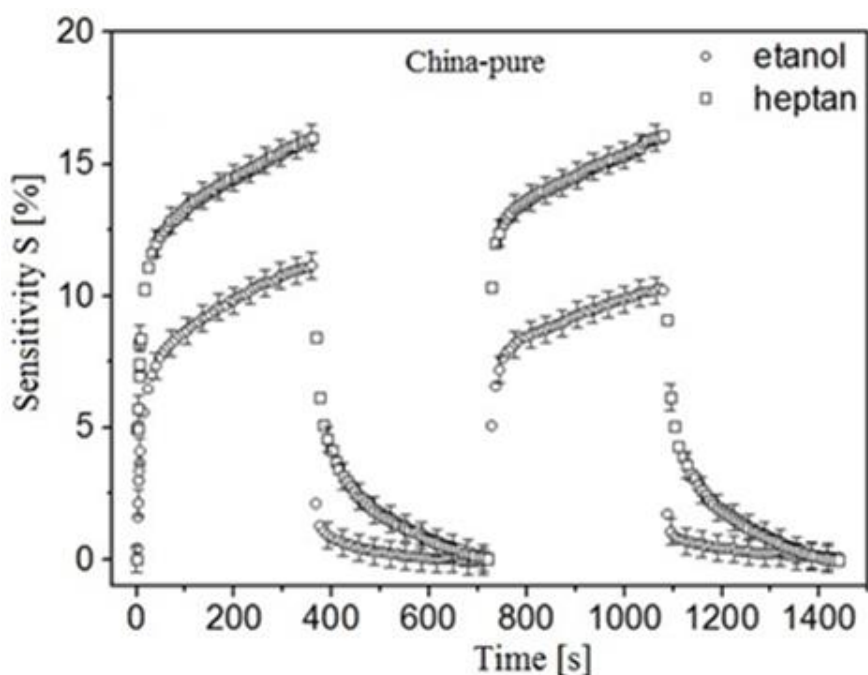
Obr. 20.: Model CNTs antény vložené do CST Microwave Studia.



Obr. 21.: Simulace parametru S_{11} .

5.4.2 Výsledky měření antény na bázi MWCNTs při vystavení organickým parám

Anténa byla vystavena parám dvou organických rozpouštědel, a to etanolu a heptanu. Následující graf (Obr. 22.) reprezentuje citlivost uhlíkové vrstvy na odezvu v procentech v závislosti na čase. Měření probíhá v termostatické komoře při atmosférickém tlaku, teplotě 25 °C a relativní vlhkosti vzduchu 40%. Anténa byla měřena po dobu 6 minut a poté byl experimentální vzorek antény vyjmutý na vzduch, kde byl ponechán opět 6 minut. Celkem byly naměřeny dva cykly pro etanol a dva cykly pro heptan.



Obr. 22.: Tento graf reprezentuje odezvu na páry dvou organických rozpouštědel (etanol, heptan) v závislosti na čase.

Z grafu je patrné, že výsledky měření jednotlivých rozpouštědel byly pro etanol v intervalu 9 – 11%, a heptan vykazuje citlivost v intervalu 15 – 17%. Z těchto výsledků je patrné, že anténa je citlivější na heptan. Cílem tohoto měření je poukázat na možnost použití antény jakožto senzoru organických par. Selektivita na jednotlivá rozpouštědla je až druhořadým měřicím kritériem, kterým se dá rovněž zabývat a následně tak určit konkrétní organické rozpouštědlo.

5.5 Experimentální antény na bázi stříbrných nanočástic

Mezi další antény, kterými se v rámci doktorského studia zabývám, patří antény na bázi stříbrných nanočástic. Tyto antény jsou vytištěny pomocí technologie inkoustového tisku na flexibilním substrátu. Z mnou testovaných polymerních elastických substrátů se nejvíce osvědčil substrát PET (Polyethylentereftalát). PET substrát v podobě PET fólie se velmi dobře zpracovává do požadovaného rozměru substrátu. Tato vlastnost PET substrátu je velmi výhodná i z pohledu jeho využití u nositelné elektroniky [38–56].

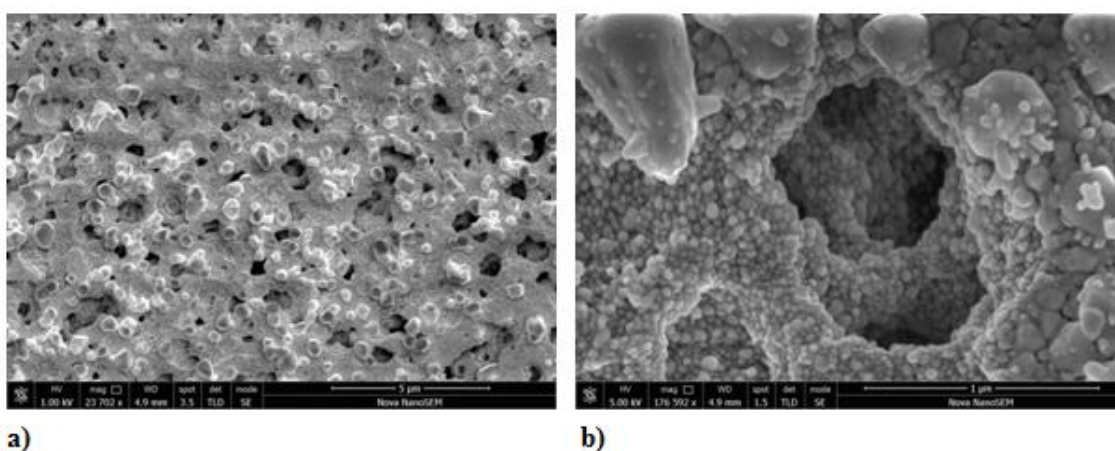
Anténa byla vytvořena za použití inkoustové tiskárny FUJIFILM Dimatix DMP-2800 (Obr. 23.). Pro nanášení materiálu, jenž tvořil tištěnou elektroniku, byl zvolen PET substrát (Novacentrix Novele IJ-220) o tloušťce PET podkladu 150 μm . Připravený inkoust byl založen na koncentrované a stabilizované suspenzi nanočástic stříbra; vysoce koncentrovaná disperze těchto nanočástic ($\sim 25 \text{ hm}\%$) byla připravena za použití solvotermální syntézy vysrážením nanočástic z roztoku dusičnanu stříbrného, organického srážecího činidla a polymerního aditiva, které posloužilo jako stabilizační činidlo v reakční směsi. K odstranění jakýchkoliv organických zbytků z procesu syntézy byly nanočástice stříbra promyty ethanolem a nadále uchovány ve stabilizované disperzi roztoku.

Ke snímkování takto připravených materiálů bylo využito skenovací elektronové mikroskopie (Nova NanoSEM 450), která ukázala přítomnost kulovitých nebo polyhedrálních částic s průměrem v rozmezí 20 – 200 nm (Obr. 24.). Dalším krokem byla příprava inkoustu. Nanočástice byly dispergovány v deionizované vodě za použití ultrazvukového homogenizátoru UZ SONOPULS HD 2070. Pro dosažení dobré disperze nanočástic v roztoku bylo přidáno 0,1 ml disperzního stabilizátoru k 10 ml disperzní kapaliny s následným přidavkem 25 $\text{hm}\%$ nanočástic; viskozita konečného inkoustu se pohybovala v rozmezí od 8 do 12 cP, což jsou hodnoty vhodné pro ink-jet printing. Cartridge typu DMP 2800 byla naplněna připraveným inkoustem a anténa byla úspěšně natištěna na PET podklad. Tiskové podmínky procesu byly nastaveny následovně: teplota cartridge byla 35 $^{\circ}\text{C}$, teplota substrátu 45 $^{\circ}\text{C}$ k dosažení dobrého spékání kapky na substrátu. Po procesu tisknutí byla anténa sušena ve vakuové sušárně při teplotě 120 $^{\circ}\text{C}$ po dobu 20 minut pro sesintrování nanočástic a tím k vytvoření kompaktní vrstvy.

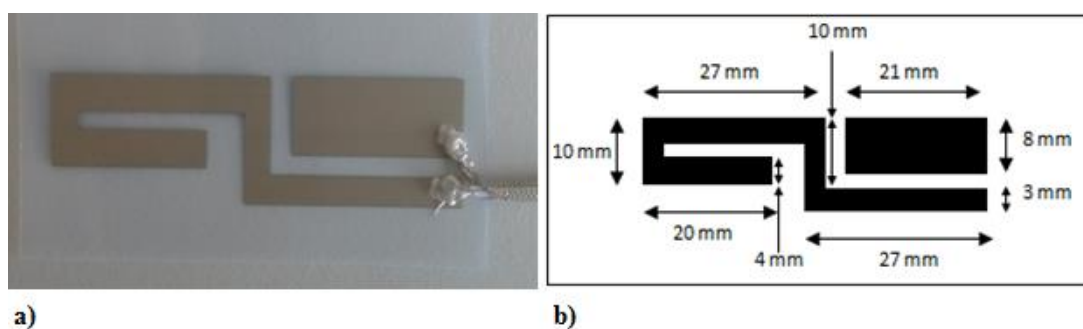
Vytištěná anténa (Obr. 25.) má hmotnost pouze 0,309 g. Anténa byla podrobena měření v bezodrazové komoře. Nejlépe je přizpůsobena na frekvencích 1,07 GHz, 1,5 GHz a 2,49 GHz (Obr. 26., Obr. 27.). Měření antény bylo provedeno spektrálním analyzátozem FSH3 (model se sledovacím generátorem bez předzesilovače) s měřícím můstkem FSH-Z2, který je schopen měřit v šířce pásma od 100 kHz do 3 GHz.



Obr. 23.: Proces inkoustového tisku flexibilní antény na PET substrát.

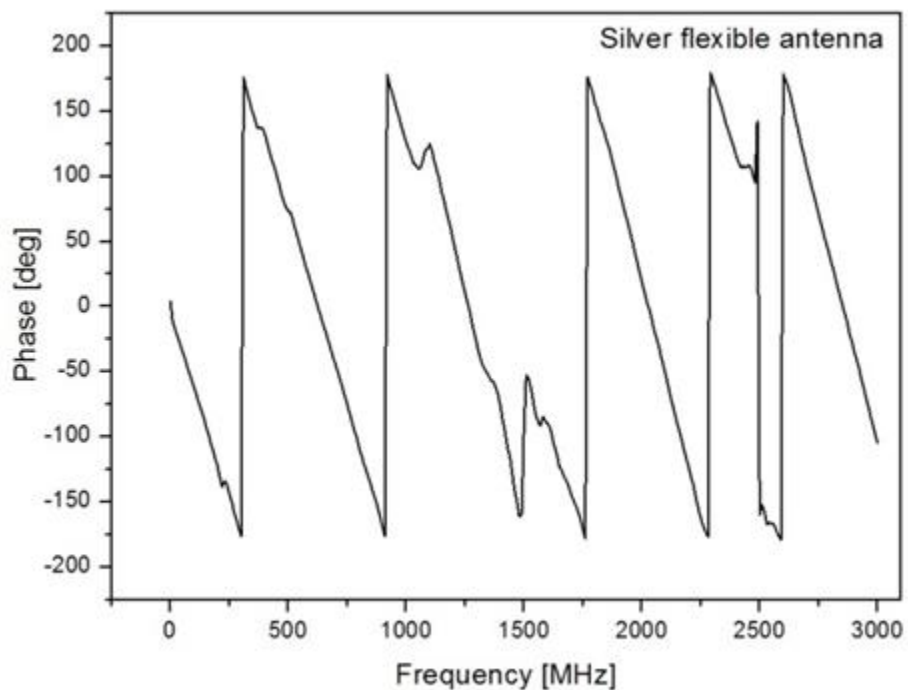


Obr. 24.: a) SEM mikroskopie struktury stříbrného inkoustu na PET substrátu o rozlišení 5 μm , b) detail nanočástic stříbra, zde je vidět jak jsou nanočástice stříbra vzájemně propojeny, tento snímek dokazuje vysokou vodivost tištěné vrstvy, rozlišení snímku je 1 μm .

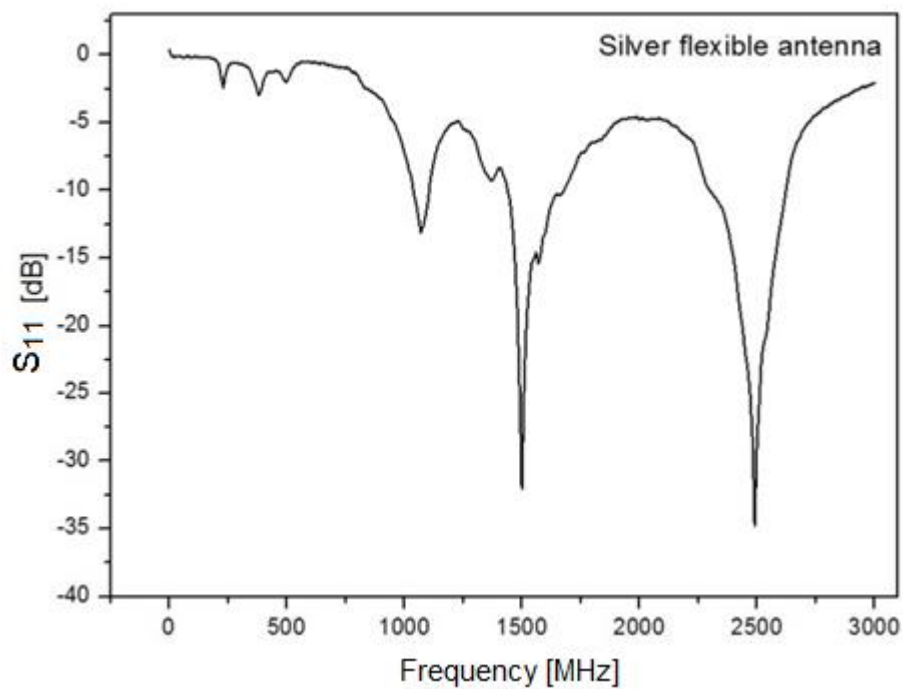


Obr. 25.: a) Fotografie vyrobené antény pomocí inkoustového tisku, b) rozměry vyrobené antény v jednotkách mm.

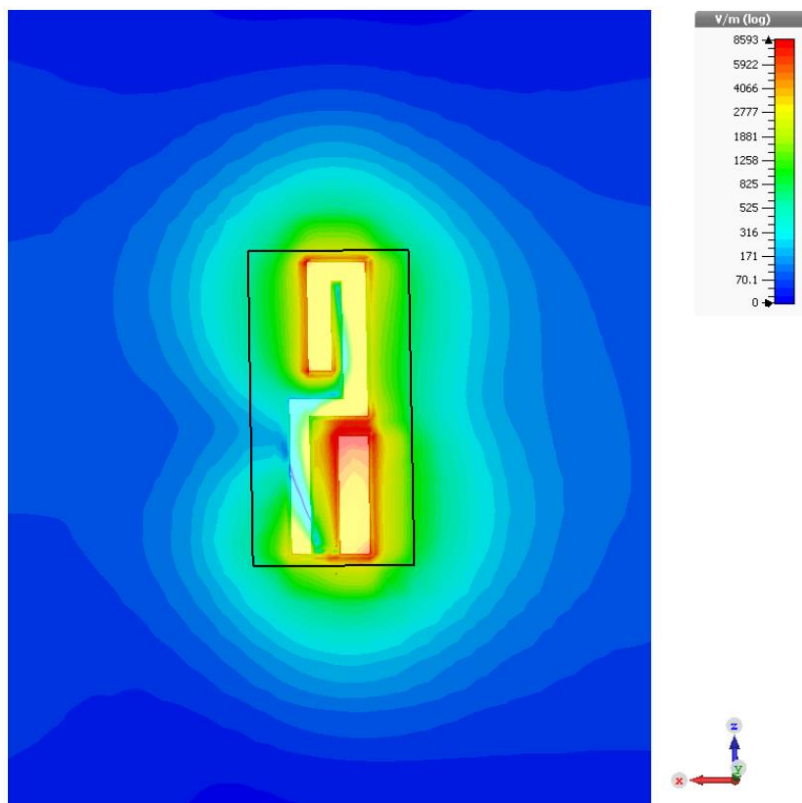
5.5.1 Výsledky měření a simulací antény na bázi nanočástic stříbra



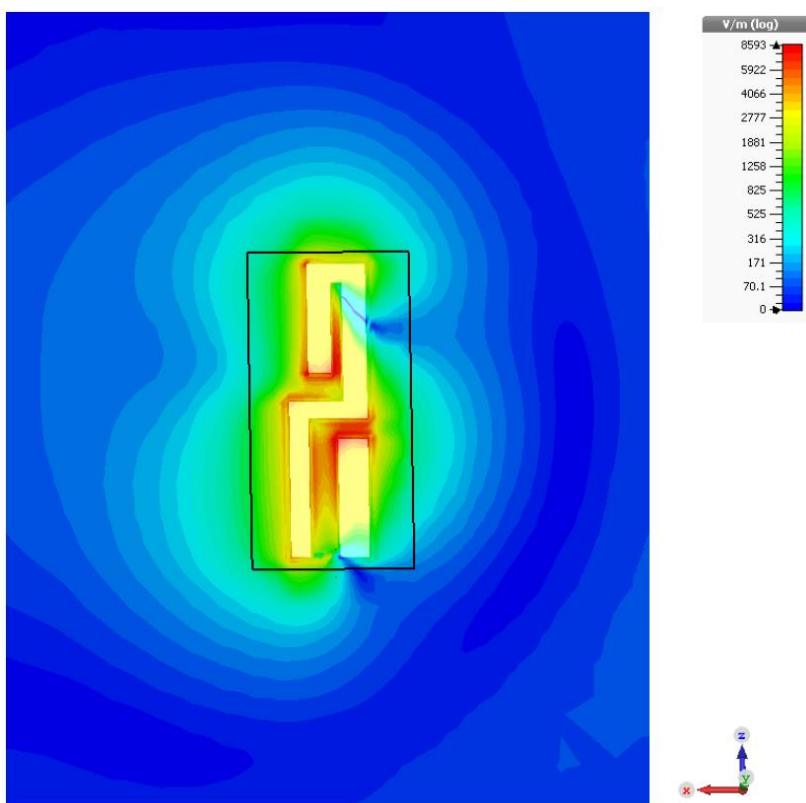
Obr. 26.: Tento graf reprezentuje průběh fáze komplexní impedance na frekvenci.



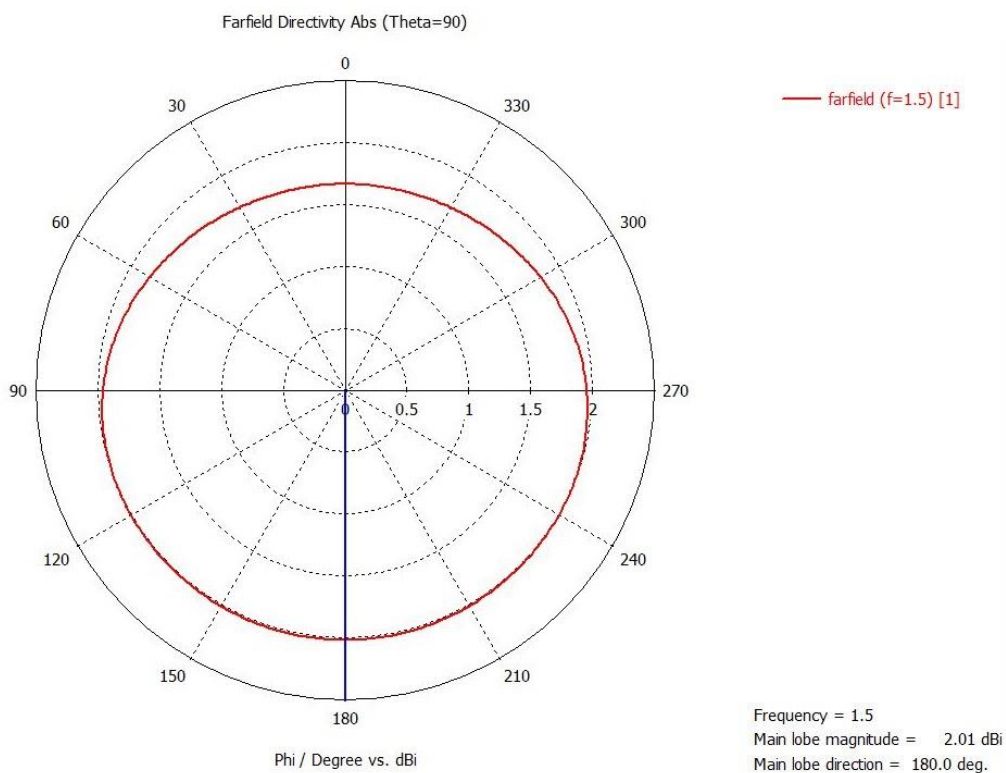
Obr. 27.: Tento graf reprezentuje činitel odrazu S_{11} , (vyjádřen v dB) v závislosti na frekvenci s přizpůsobeními na 1,07 GHz, 1,5 GHz a 2,49 GHz.



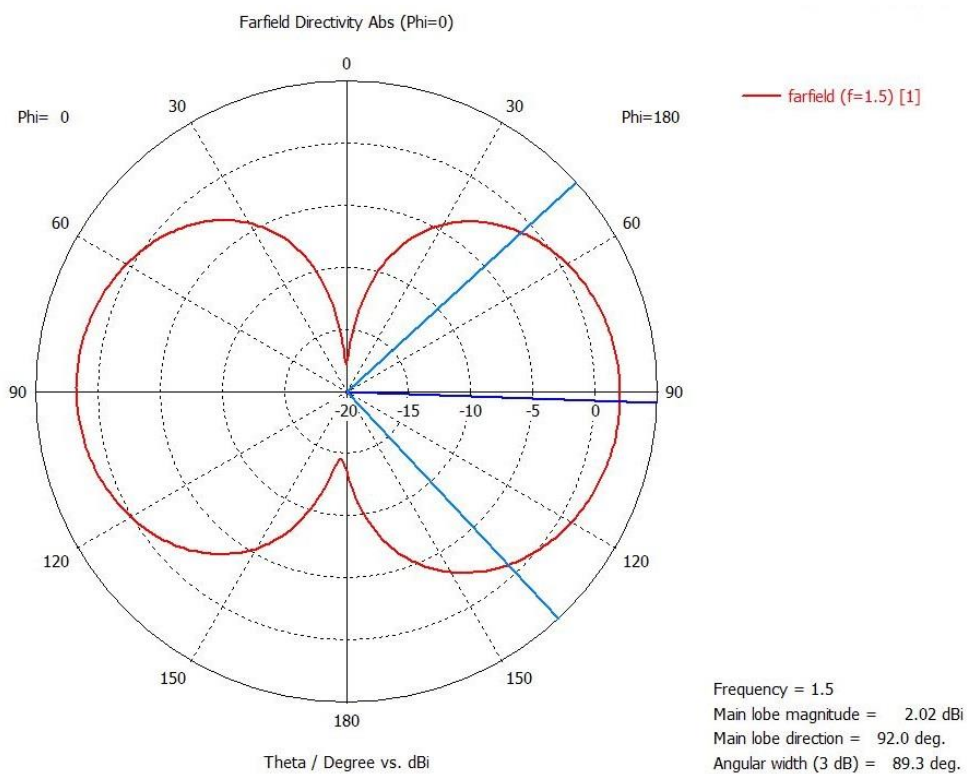
Obr. 28.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě (1,5 GHz).



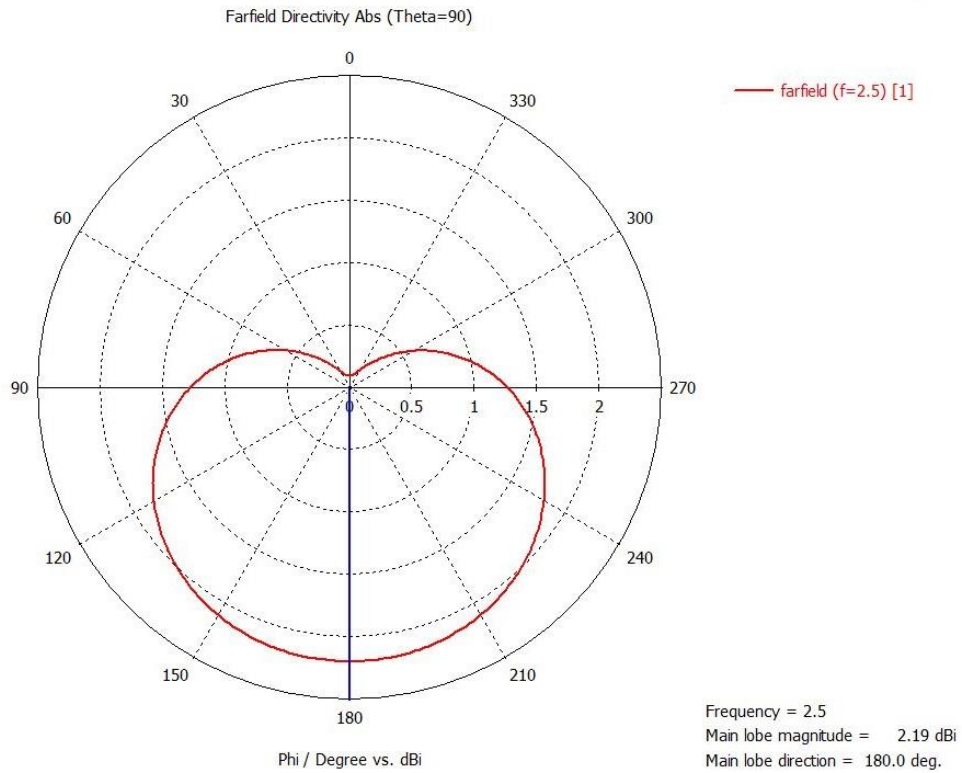
Obr. 29.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě (2,5 GHz).



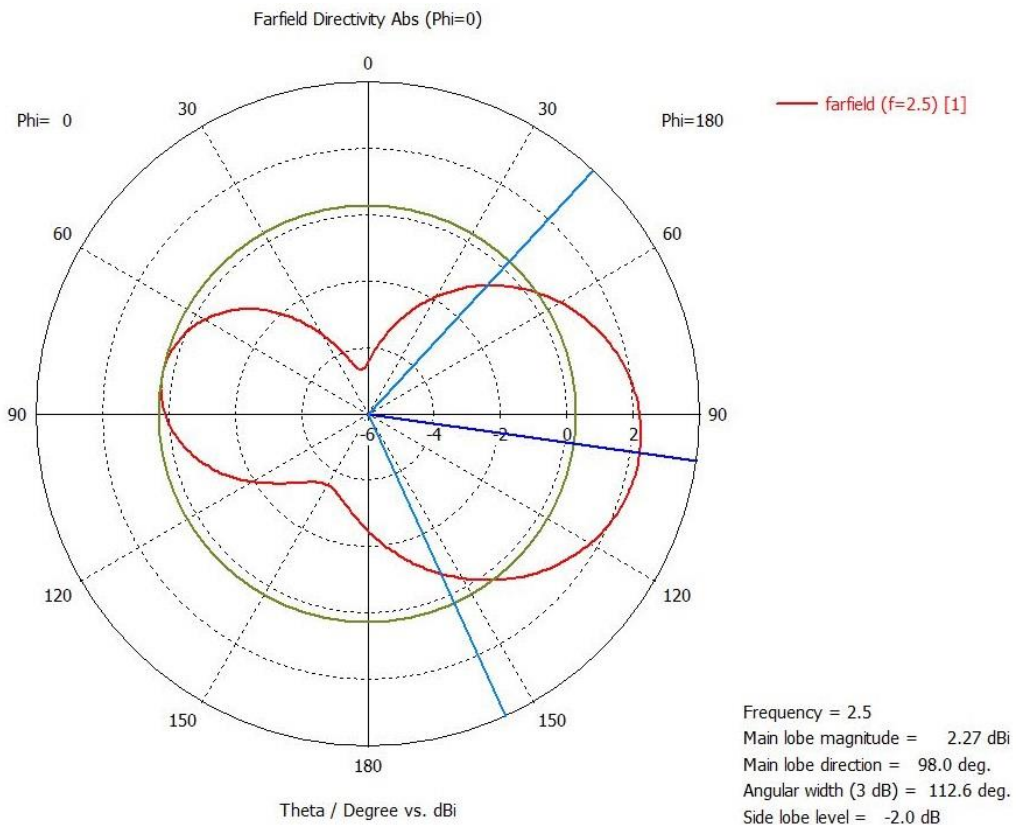
Obr. 30.: Směrová charakteristika antény rovina XY (1,5 GHz).



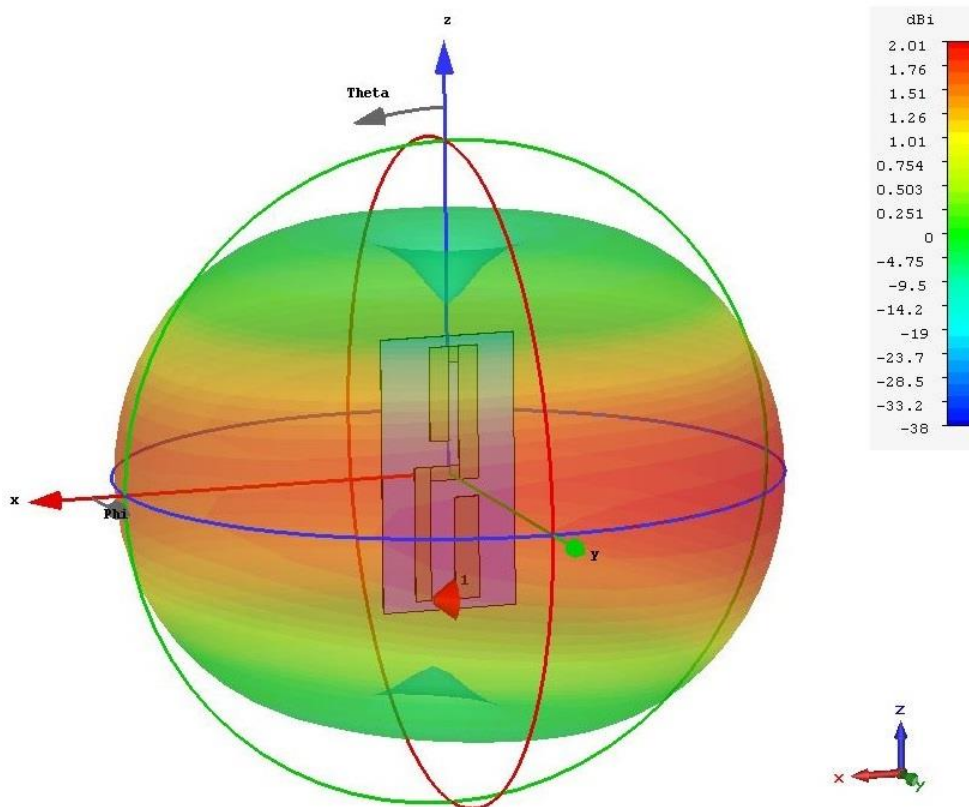
Obr. 31.: Směrová charakteristika antény rovina XZ (1,5 GHz).



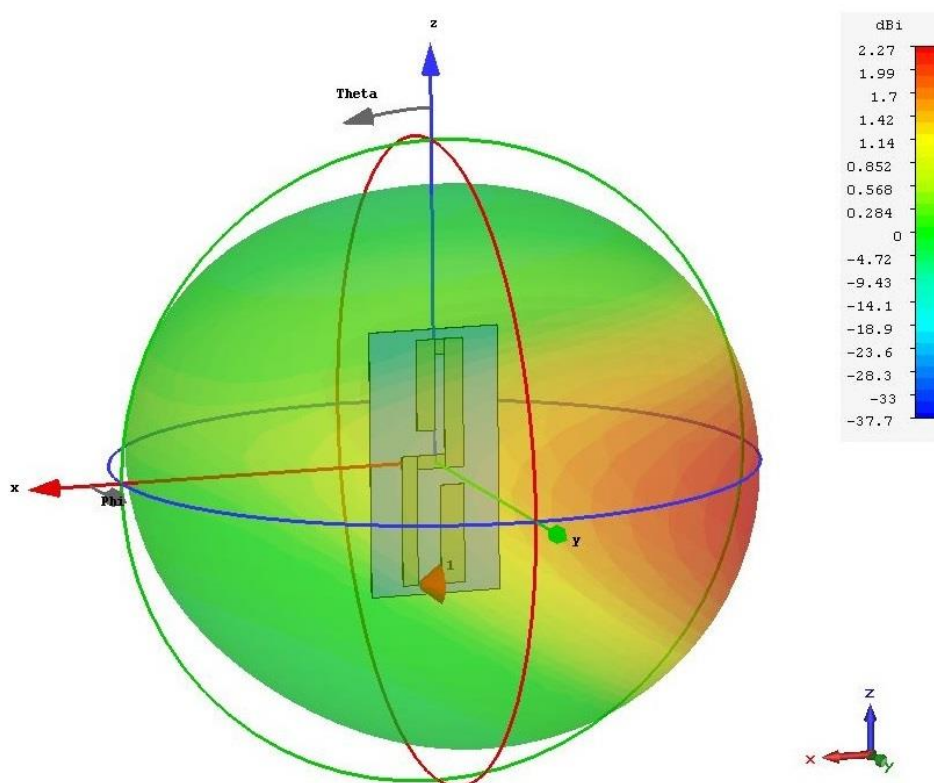
Obr. 32.: Směrová charakteristika antény rovina XY (2,5 GHz).



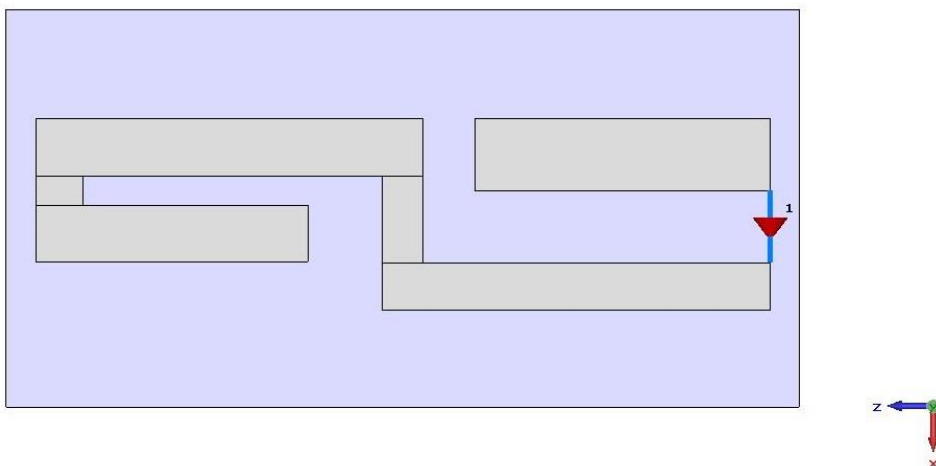
Obr. 33.: Směrová charakteristika antény rovina XZ (2,5 GHz).



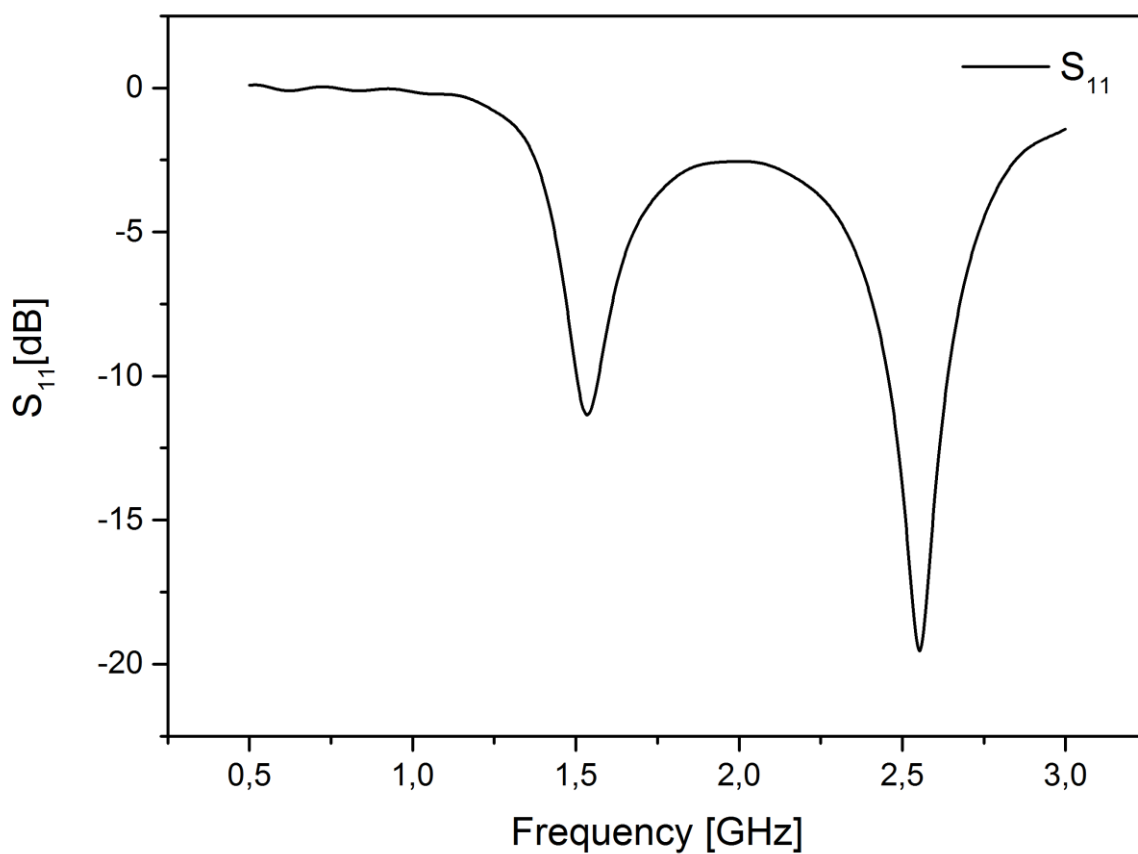
Obr. 34.: Směrová charakteristika v 3D zobrazení (1,5 GHz).



Obr. 35.: Směrová charakteristika v 3D zobrazení (2,5 GHz).



Obr. 36.: Model Ag antény vložené do CST Microwave Studia.

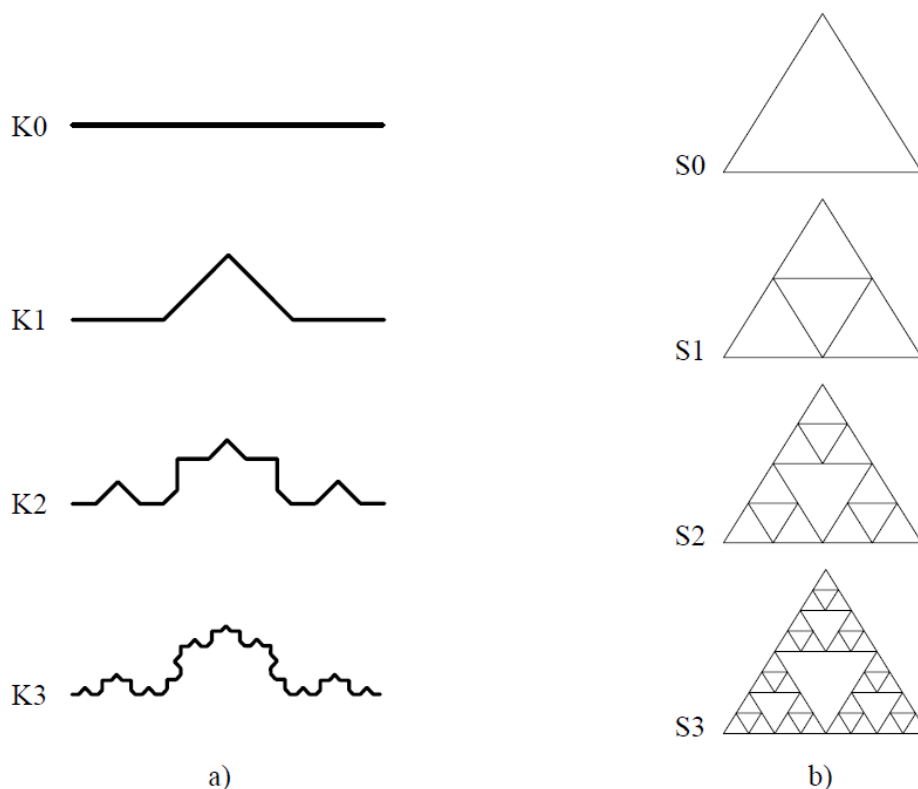


Obr. 37.: Simulace parametru S_{11} .

5.6 Použití fraktální geometrie ke konstrukci antény

Fraktální geometrie je pro konstrukci antén zajímavá z více hledisek. První v řadě je možnost efektivně využít velmi malý prostor pro konstrukci antény například aplikace nazývané odborně z anglického slovního spojení „system on a chip“. Což lze popsat tak, že je anténa součástí pouzdra určité součástky např. integrovaného BGA obvodu. Dalším zajímavým parametrem mnoha fraktálních antén je jejich aplikace v systémech, kde je třeba využívat více pásem.

Nabízí se možnost vytvoření velkého množství geometrických struktur, které lze popsat matematicky a velké množství struktur, které nemají jednoduchý matematický základ a často vycházejí ze stochastického chování [57, 58]. U fraktálů vytvořených stochasticky se hledají struktury složitější, protože předem nelze přesně říci, jak moc budou perspektivní na rozdíl od těch struktur, pro které máme jednoznačný matematický zápis a to bez vnášení stochastického chování. Následující obrázek (Obr. 38.) reprezentuje základní princip vycházející z opakování stejného obrazce a) Kochova křivka, b) Sierpinského monopól.

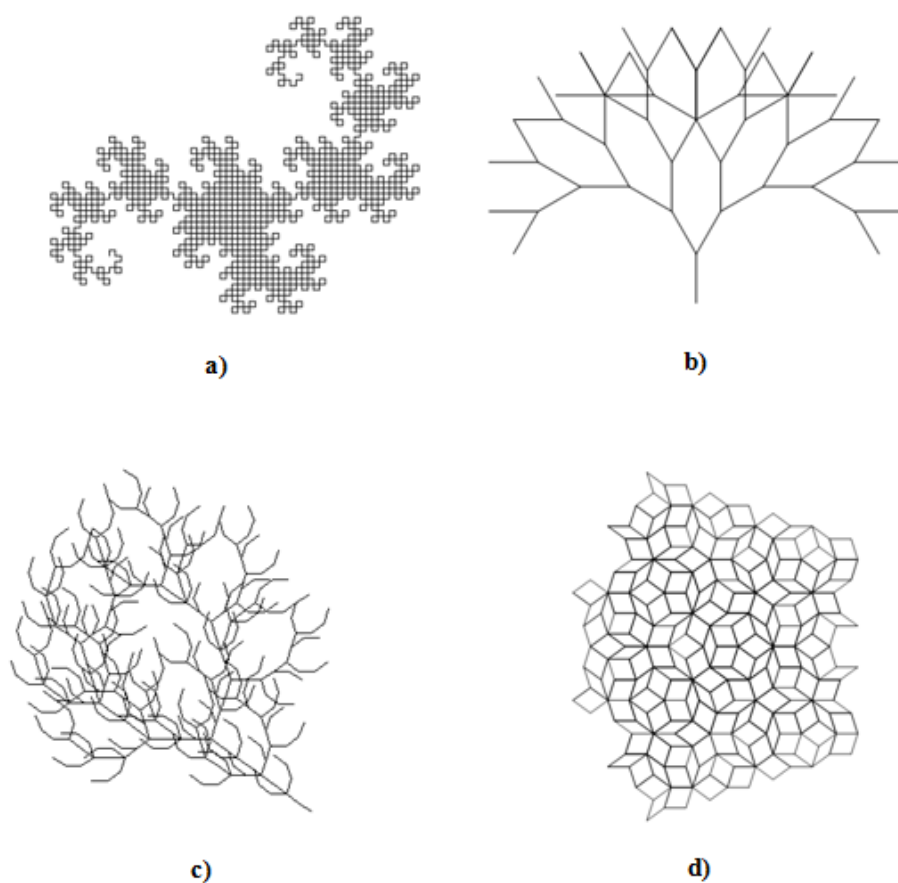


Obr. 38.: Ukázka základních iterací u často používaných fraktálů pro konstrukci fraktální antény a) Kochova křivka, b) Sierpinského monopól [57, 58].

5.6.1 Výběr vhodného fraktálu

Na začátku je dobré zmínit, že výběr vhodného fraktálu pro konstrukci pasivní antény ovlivní finální výsledek v podobě ziskovosti antény. Před samotnou konstrukcí lze zvolit velké množství matematických zadání pro vykreslení základního fraktálu. Obecně můžeme fraktály rozdělit do několika základních skupin a to na L-Systemy, Iterační funkční systémy (IFS), Polynomické fraktály a Náhodné fraktály. Každá z těchto jmenovaných skupin se dá popsat na velké množství stran [57, 58]. U fraktálních antén si vystačíme jen s některými fraktály. A proto nebudu zde každou skupinu rozvádět podrobně a budu se zde věnovat vybraným konkrétním příkladům.

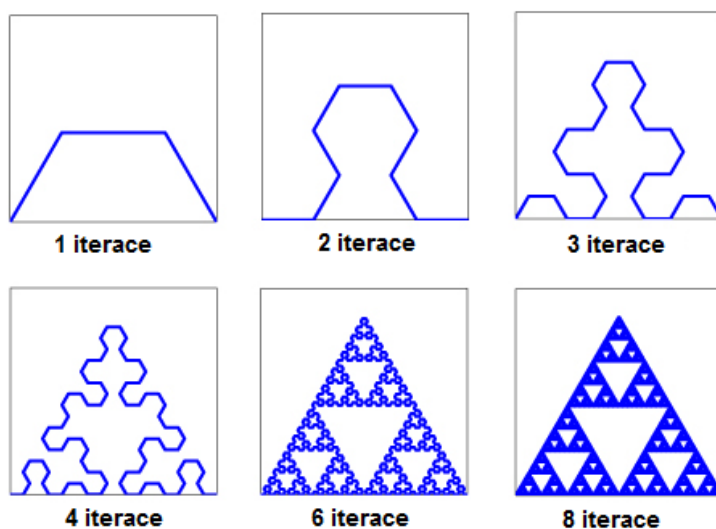
Matematický zápis vedoucí k určité konkrétní struktuře fraktálu je téměř vždy nutné modifikovat, tak aby byl fraktál co možná nejvhodnější pro danou šířku pásma i velikost antény. Což jsou dva nejzákladnější parametry pro konstrukci. Velké množství fraktálních antén je patentově chráněno. Následující obrázky (Obr. 39. a,b,c) reprezentují vhodné fraktály k výrobě antén vycházejících z fraktálů.



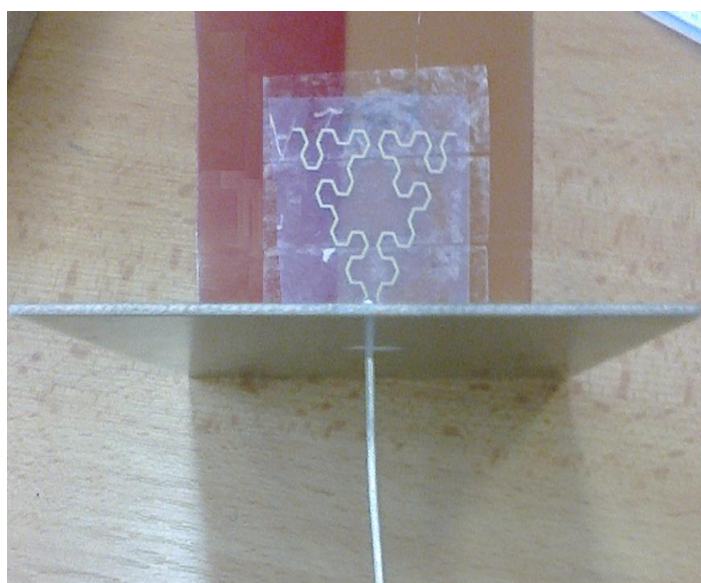
Obr. 39.: Fraktály, a) Dračí křivka, b) Binární strom, c) L-systém, d) Želví grafika [57, 58].

5.6.2 Fraktální anténa na bázi nanočástic stříbra s motivem „Sierpinského Arrowhead“ křivky

„Sierpinski arrowhead“ křivka vytváří rovnostranný trojúhelník s několika trojúhelníkovými otvory. Lze ji popsat dvěma konstrukčními pravidly: (A \rightarrow B-A-B) a (B \rightarrow A + B + A). A a B se opakují a vykreslují čáru. Plus a minus (+, -) má význam změny směru o 60 stupňů doleva či doprava. Koncový bod „Sierpinski arrowhead“ křivky je vždy stejný jako výchozí pokud je počet opakování sudý a délka čáry se zkrátí při každém opakování na polovinu. Při dosažení lichého počtu opakování (řád je lichý) skončí s otočením 60° (od výchozího směru) v jiném bodě trojúhelníku než výchozím. Následující obrázek (Obr. 40.) znázorňuje šest iterací „Sierpinského Arrowhead“ křivky [58].



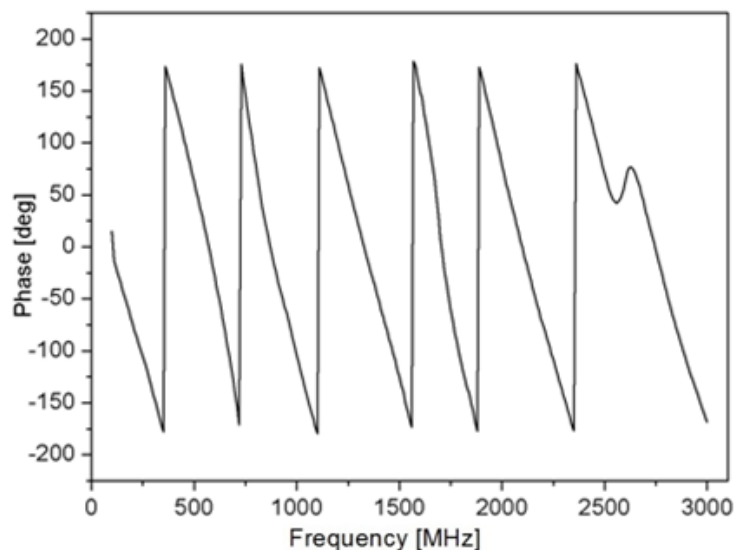
Obr. 40.: Ukázka šesti různých iterací „Sierpinského Arrowhead“ křivky [58].



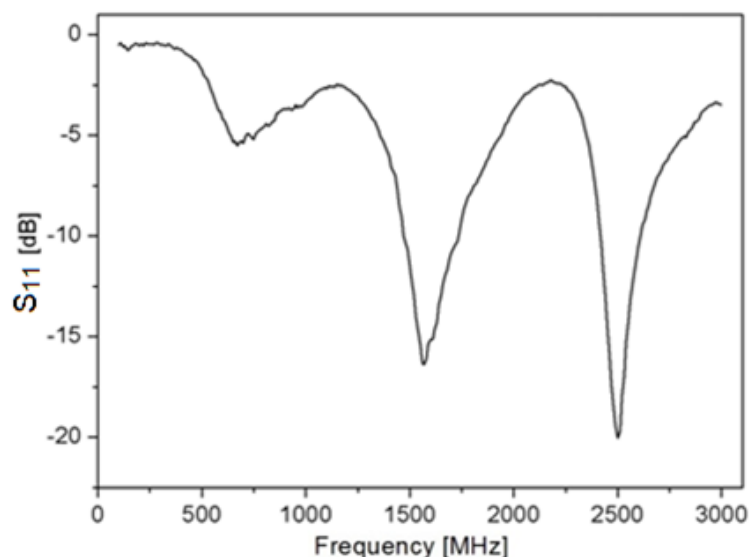
Obr. 41.: Fotografie experimentální třípásmové antény s fraktálním motivem využívající čtvrtou iteraci „Sierpinského Arrowhead“ křivky.

Vytištěná anténa (Obr. 41.) byla podrobena měření v bezodrazové komoře. Nejlépe je přizpůsobena na frekvencích 650 MHz, 1,57 GHz a 2,5 GHz, (Obr. 42., Obr. 43.). Měření antény bylo provedeno spektrálním analyzátoru FSH3 (model se sledovacím generátorem bez předzesilovače) s měřícím můstkem FSH-Z2, který je schopen měřit v šířce pásma od 100 kHz do 3 GHz.

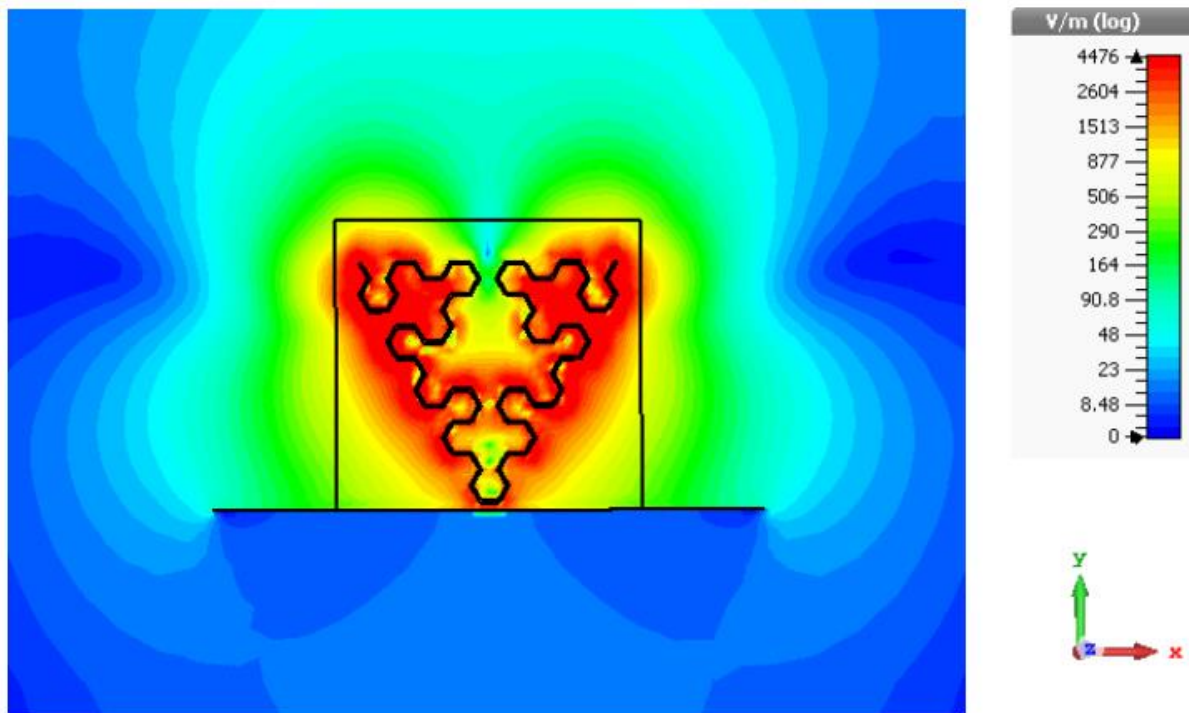
5.6.3 Výsledky měření a simulací antény na bázi nanočástic stříbra s fraktálním motivem využívající čtvrtou iteraci „Sierpinského Arrowhead“ křivky



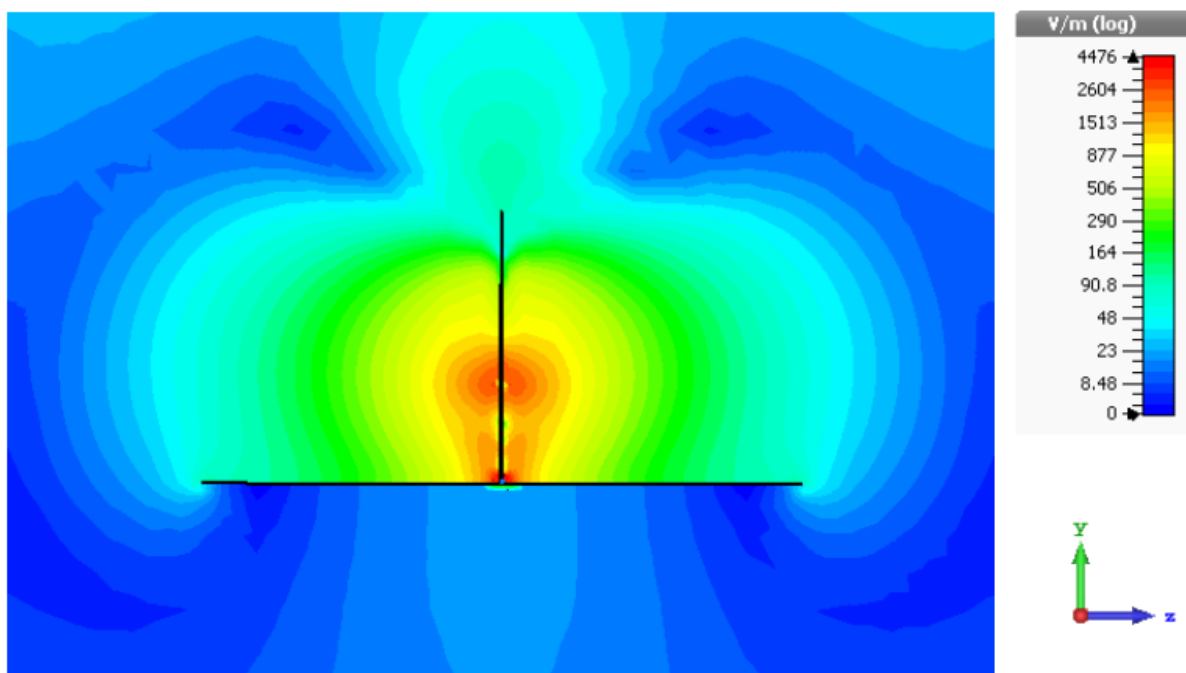
Obr. 42.: Tento graf znázorňuje průběh fáze komplexní impedance na frekvenci.



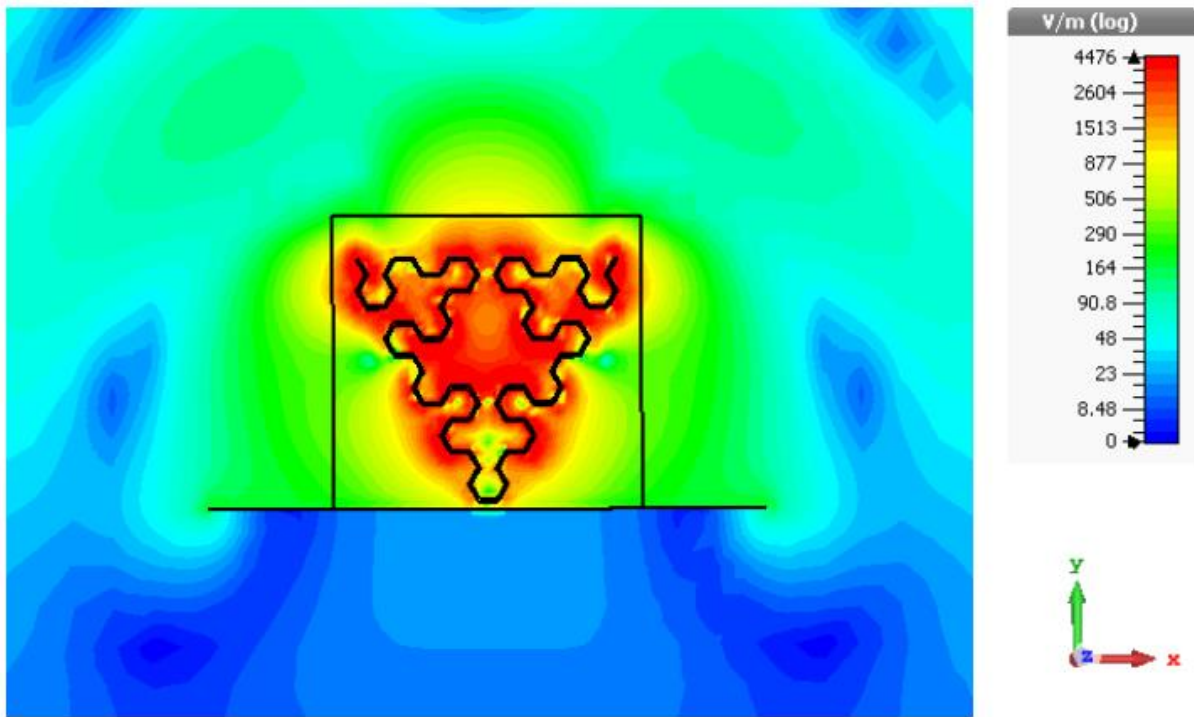
Obr. 43.: Tento graf reprezentuje činitel odrazu S_{11} , (vyjádřen v dB) v závislosti na frekvenci s přizpůsobeními na 650 MHz, 1,57 GHz a 2,5 GHz.



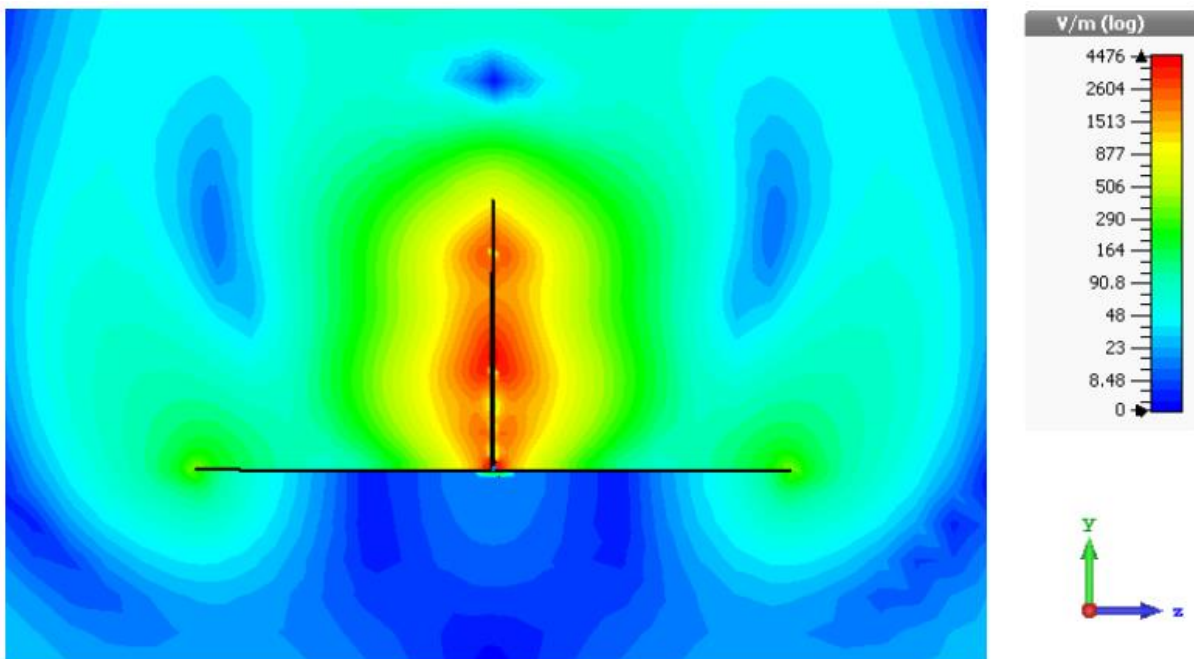
Obr. 44.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě YX rovina (3 GHz).



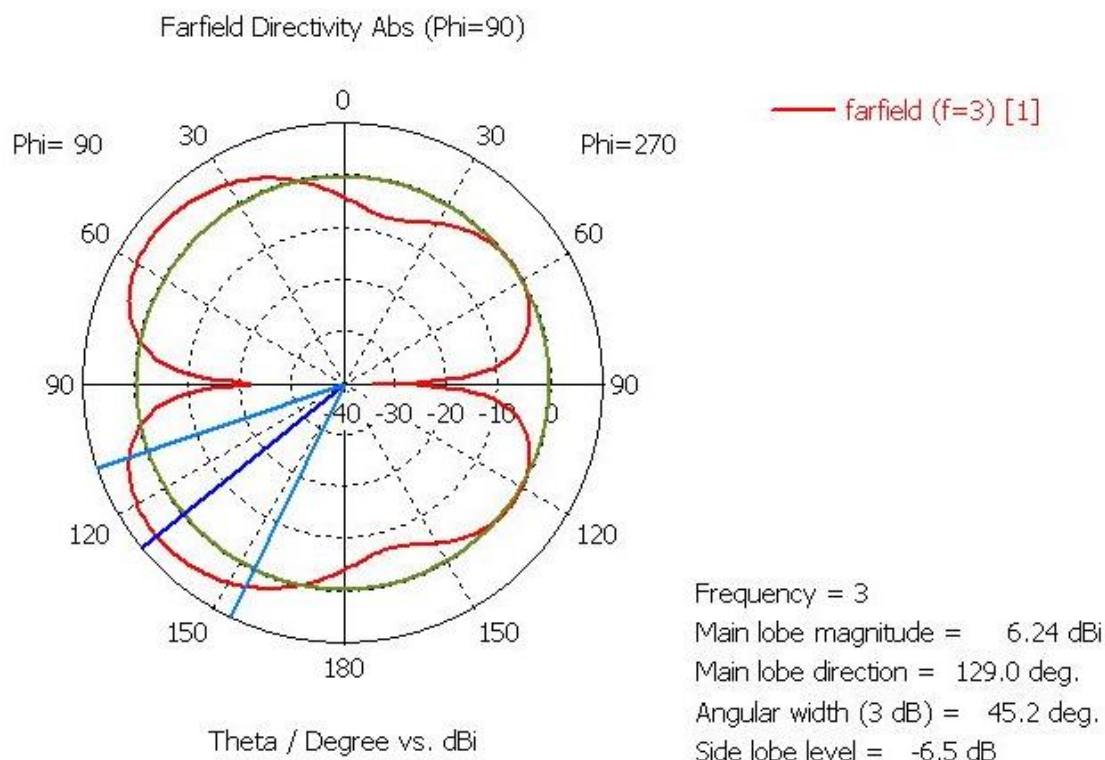
Obr. 45.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě YZ rovina (3 GHz).



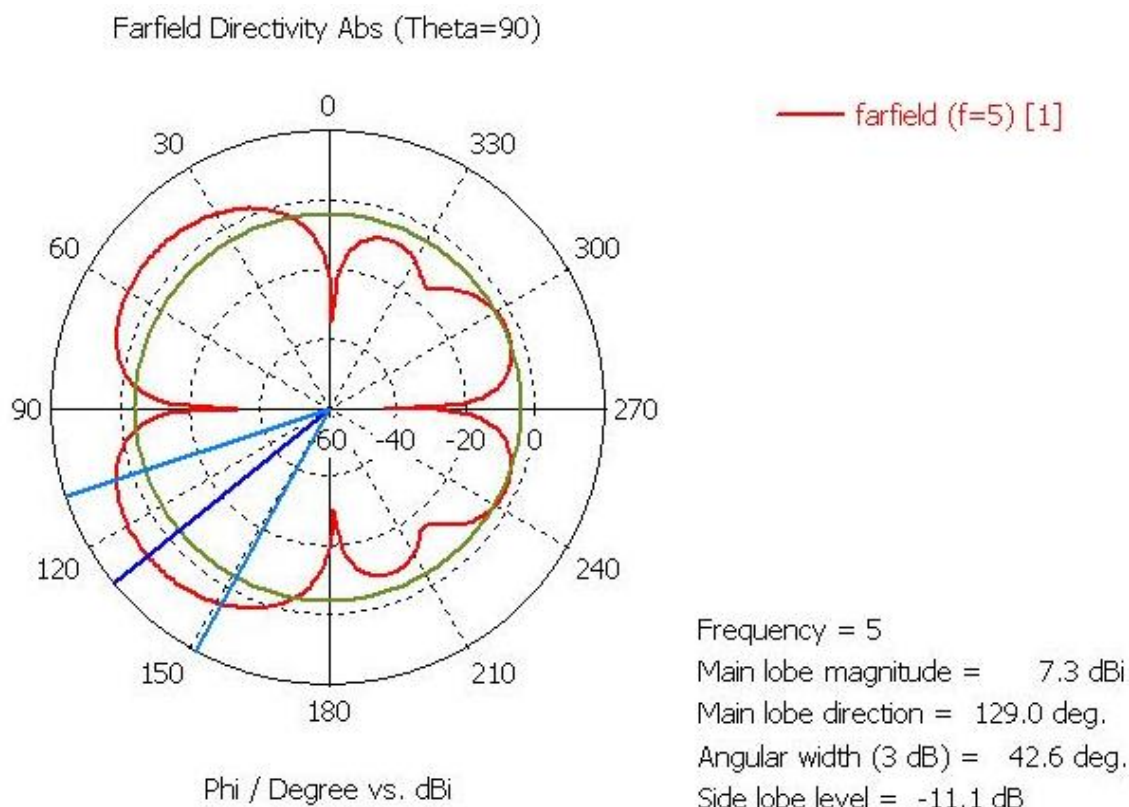
Obr. 46.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě YX rovina (5 GHz).



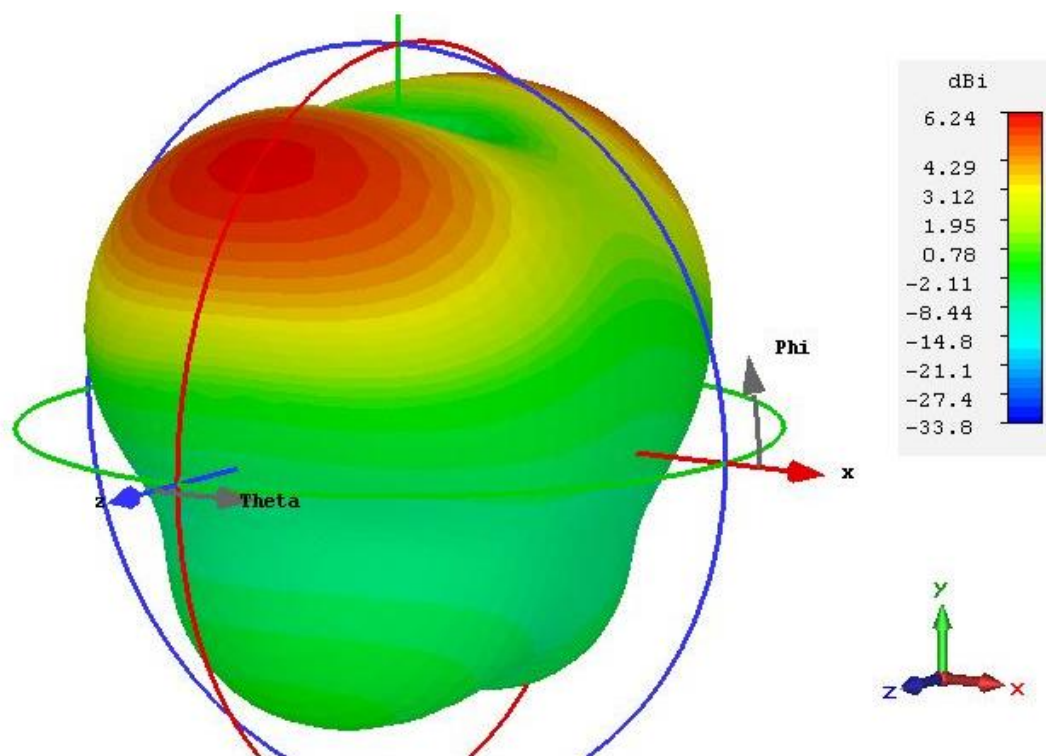
Obr. 47.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě YZ rovina (5 GHz).



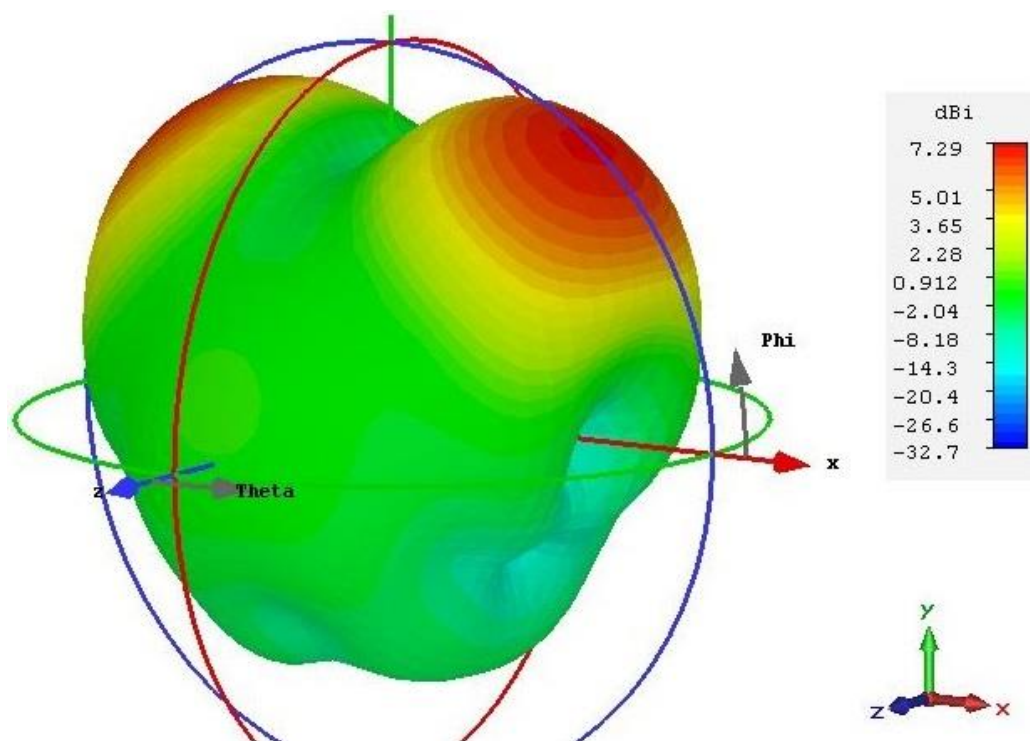
Obr. 48.: Směrová charakteristika antény rovina YZ (3 GHz).



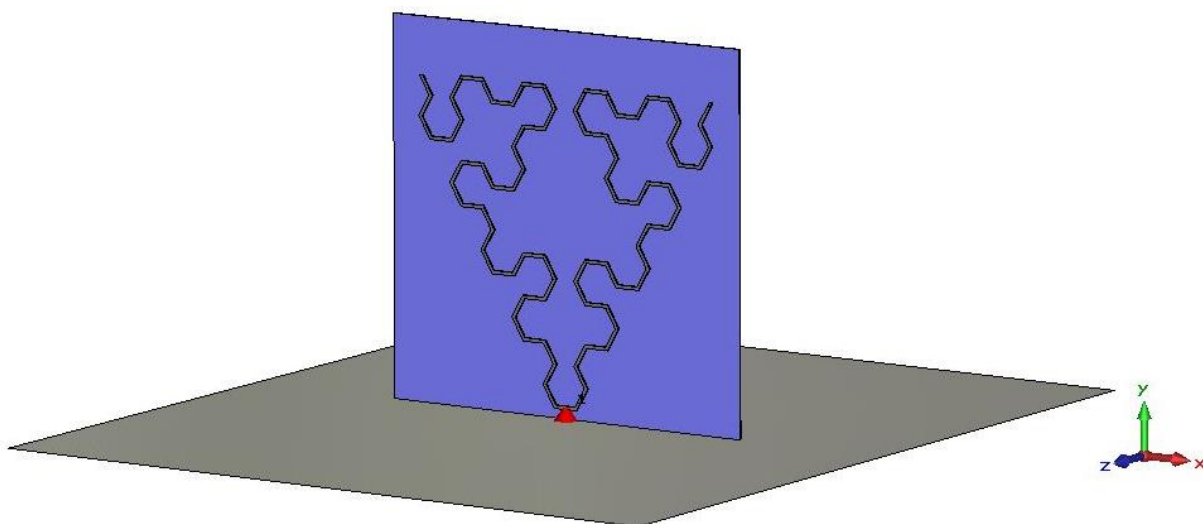
Obr. 49.: Směrová charakteristika antény rovina YX (5 GHz).



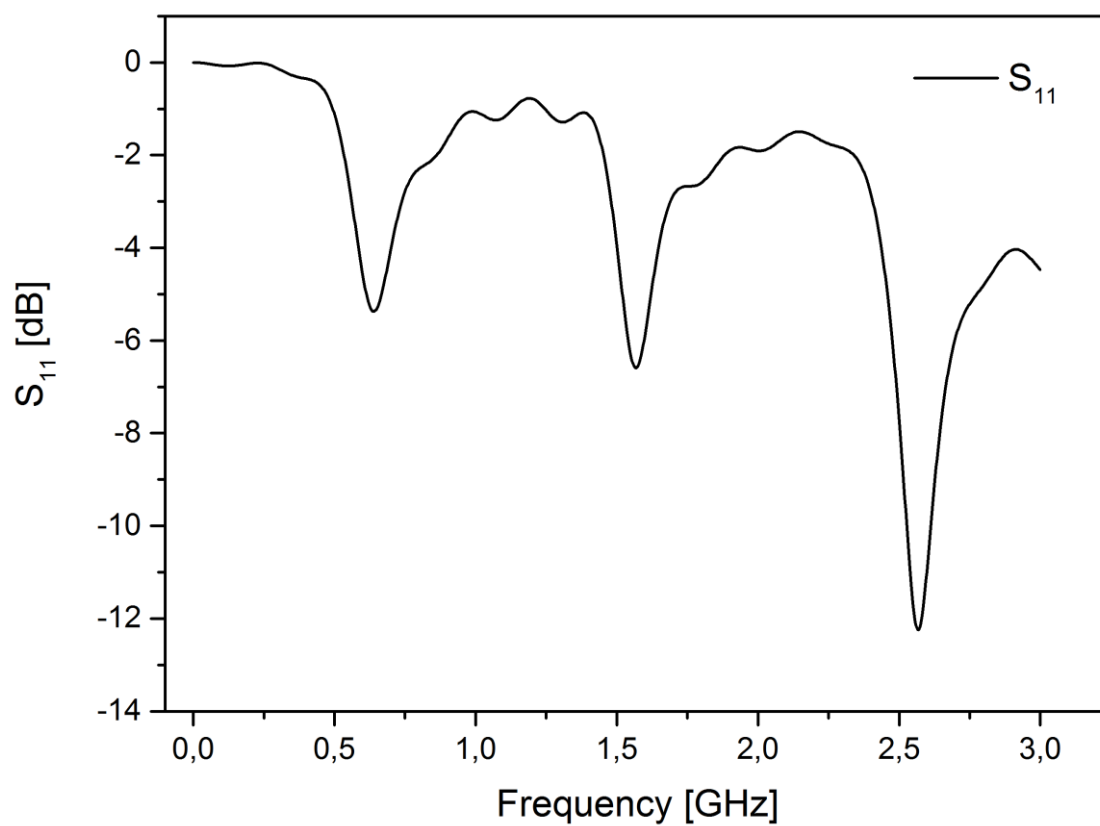
Obr. 50.: Směrová charakteristika v 3D zobrazení (3 GHz).



Obr. 51.: Směrová charakteristika v 3D zobrazení (5 GHz).



Obr. 52.: Model Ag/fraktální antény vložené do CST Microwave Studia.



Obr. 53.: Simulace parametru S_{11} .

5.6.4 Další příklad mikropáskové geometrie antény na bázi nanočástic stříbra natištěné na PET substrátu

Následující experimentální anténa (Obr. 54.) je vytvořena pomocí inkoustového tisku s využitím již popsaných nanočástic stříbra (viz strana 38). Rozměr natištěného mikropásku je 9 x 26 mm. Celková hmotnost mikropásku je 0,208g. Rozměr PET substrátu je 18 x 36 mm. Zemní rovina je tvořena substrátem FR-4 o rozměru 65 x 75 mm. Tato anténa je nejlépe přizpůsobena pro frekvence 2,02 GHz, (-16.02 dB) a 2,3 GHz, (-19.33 dB), (Obr. 56.).

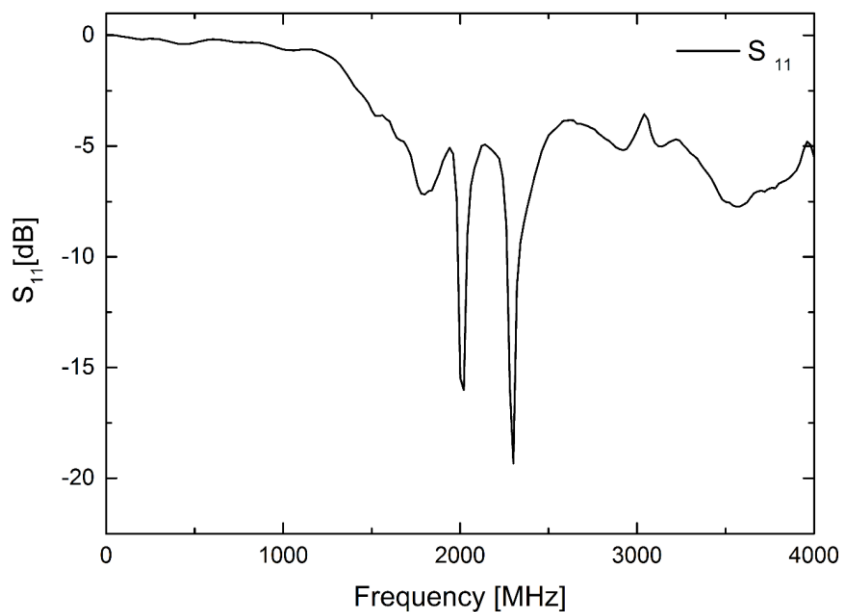


Obr. 54.: Fotografie experimentální antény na bázi nanočástic stříbra.

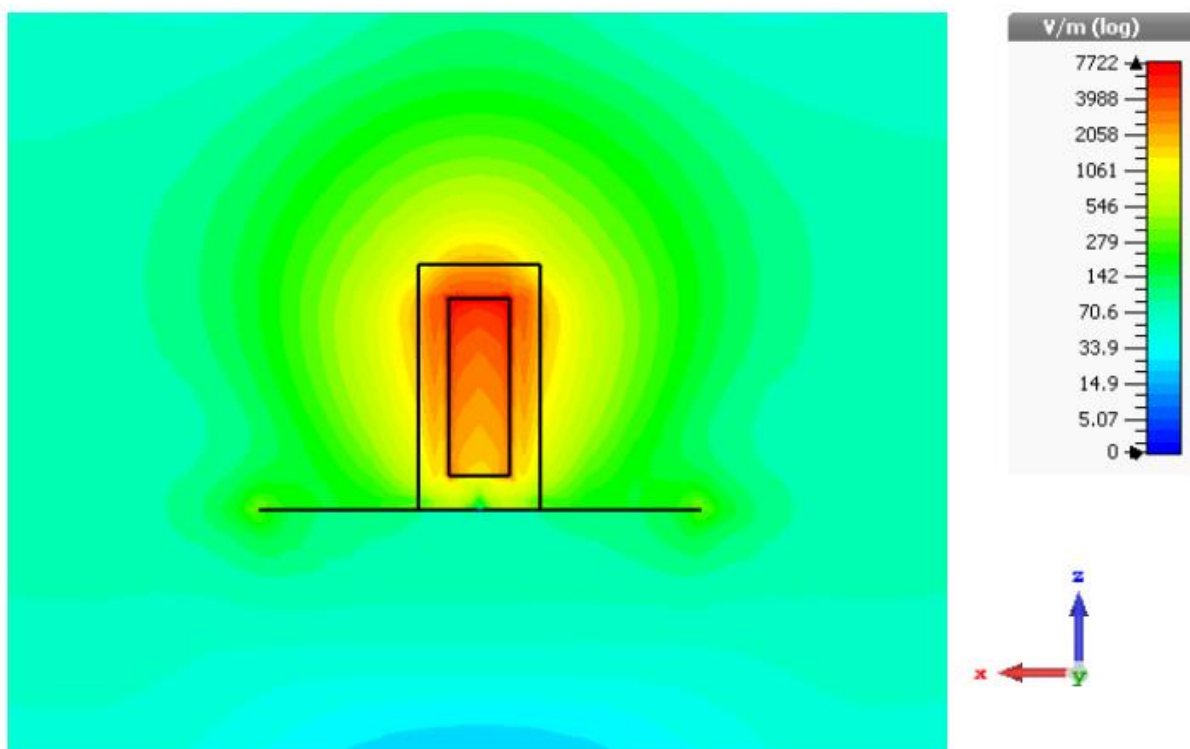


Obr. 55.: Demonstrace flexibility potištěného PET substrátu.

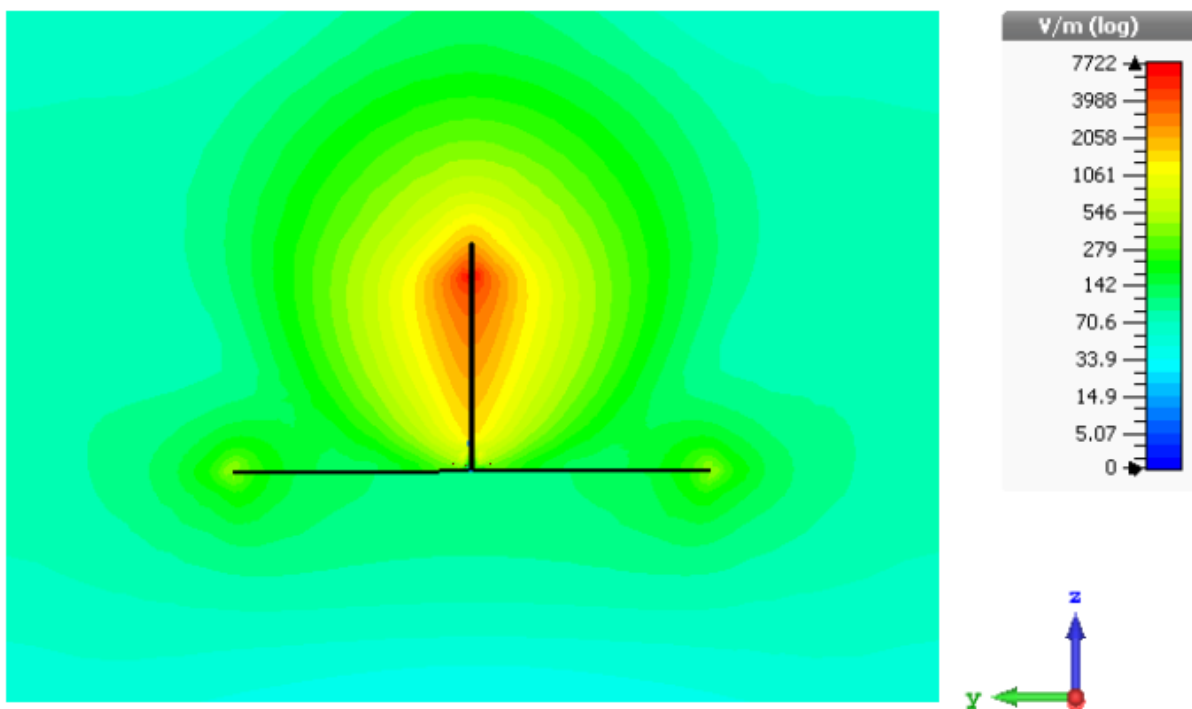
5.6.5 Výsledky měření a simulací mikropáskové geometrie antény na bázi nanočástic stříbra natištěné na PET substrátu



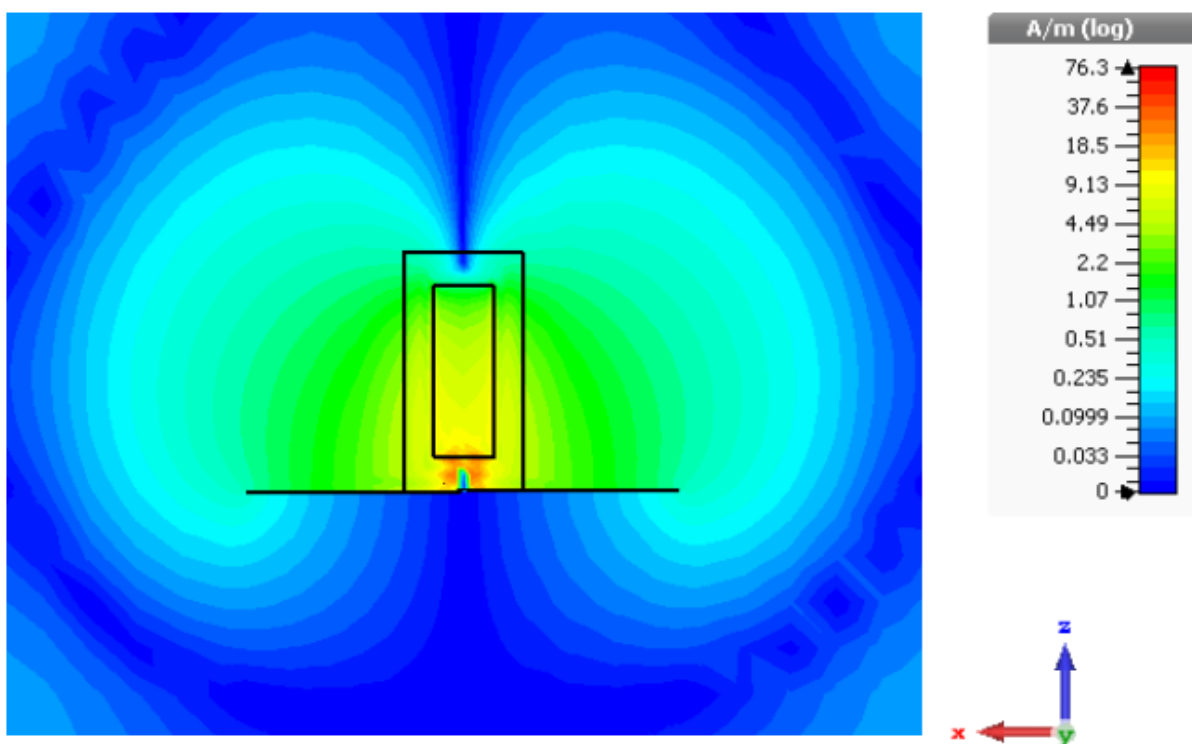
Obr. 56.: Tento graf reprezentuje činitel odrazu S_{11} , (vyjádřen v dB) v závislosti na frekvenci s přízpusobenými na 2,02 GHz a 2,3 GHz.



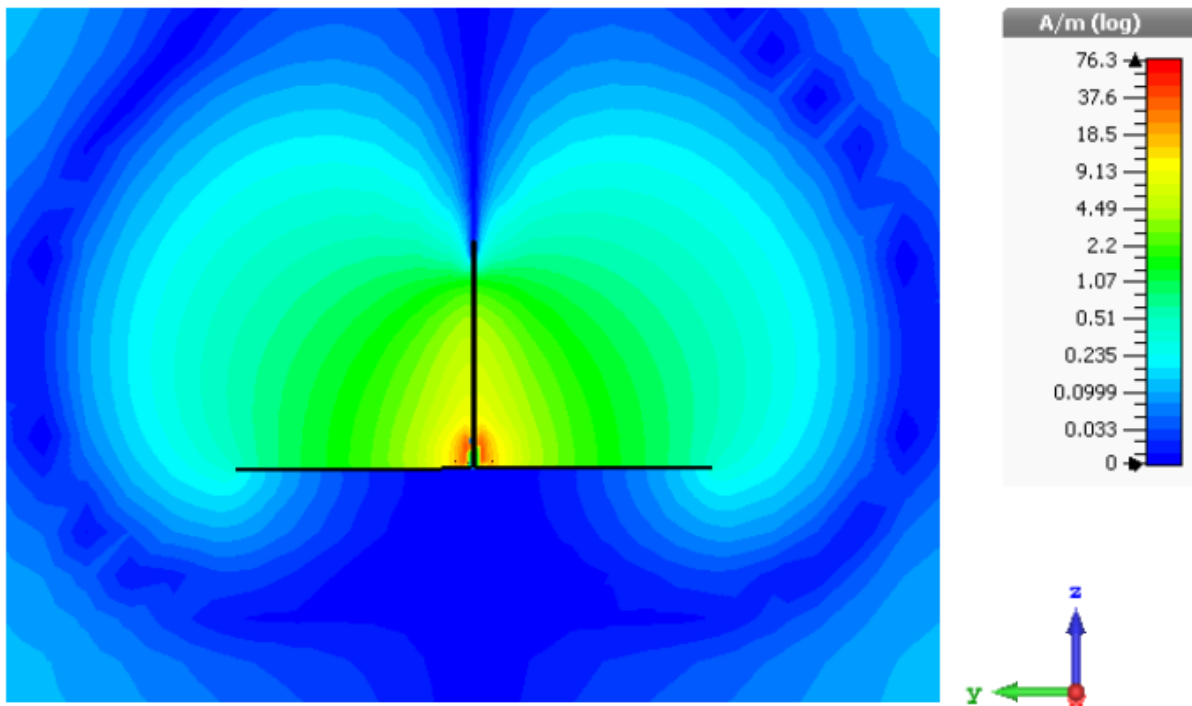
Obr. 57.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě (1,85 GHz).



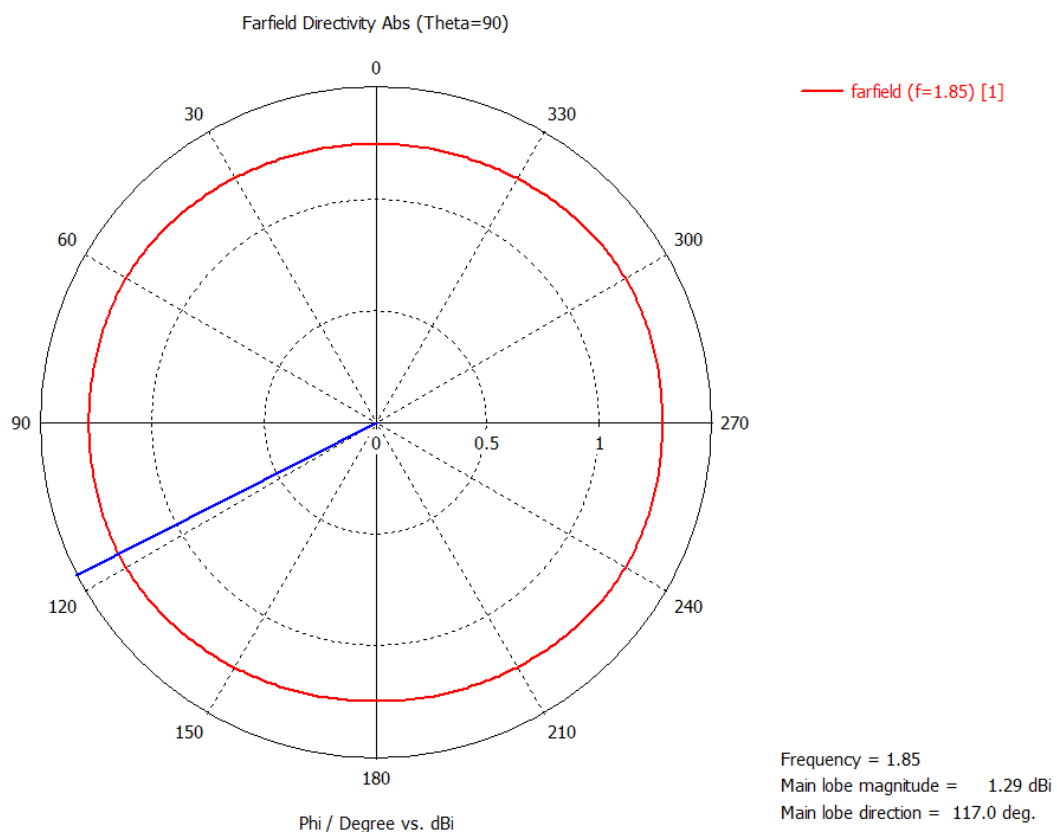
Obr. 58.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě (1,85 GHz).



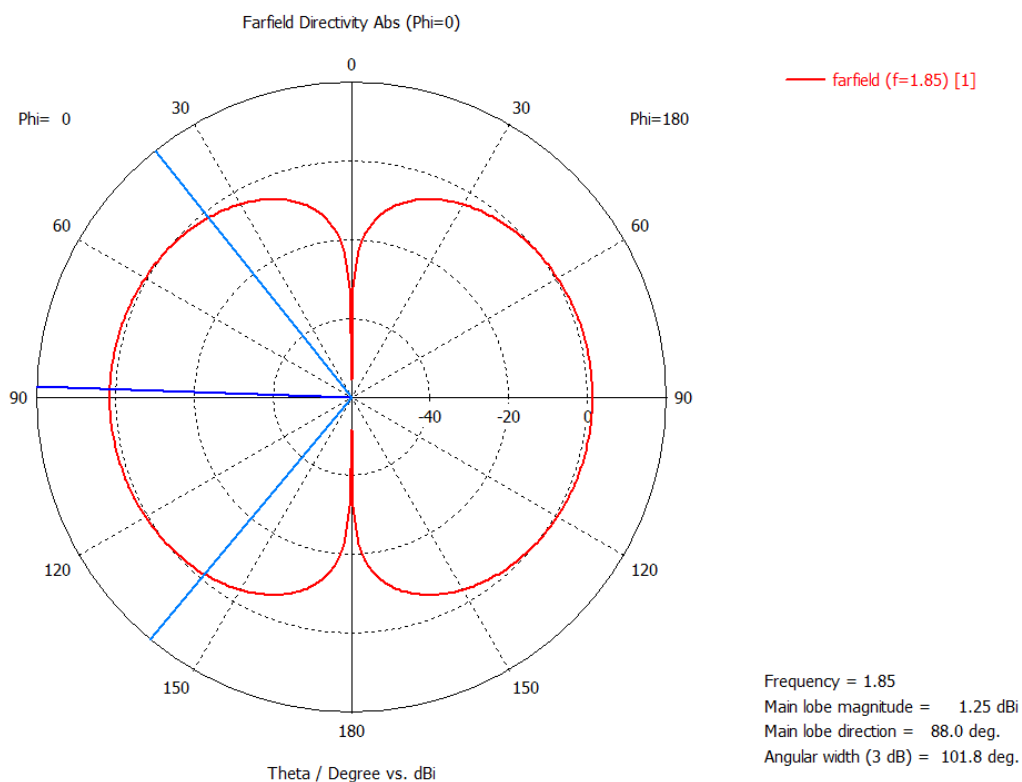
Obr. 59.: Rozložení intenzity magnetické pole H na anténě (1,85 GHz).



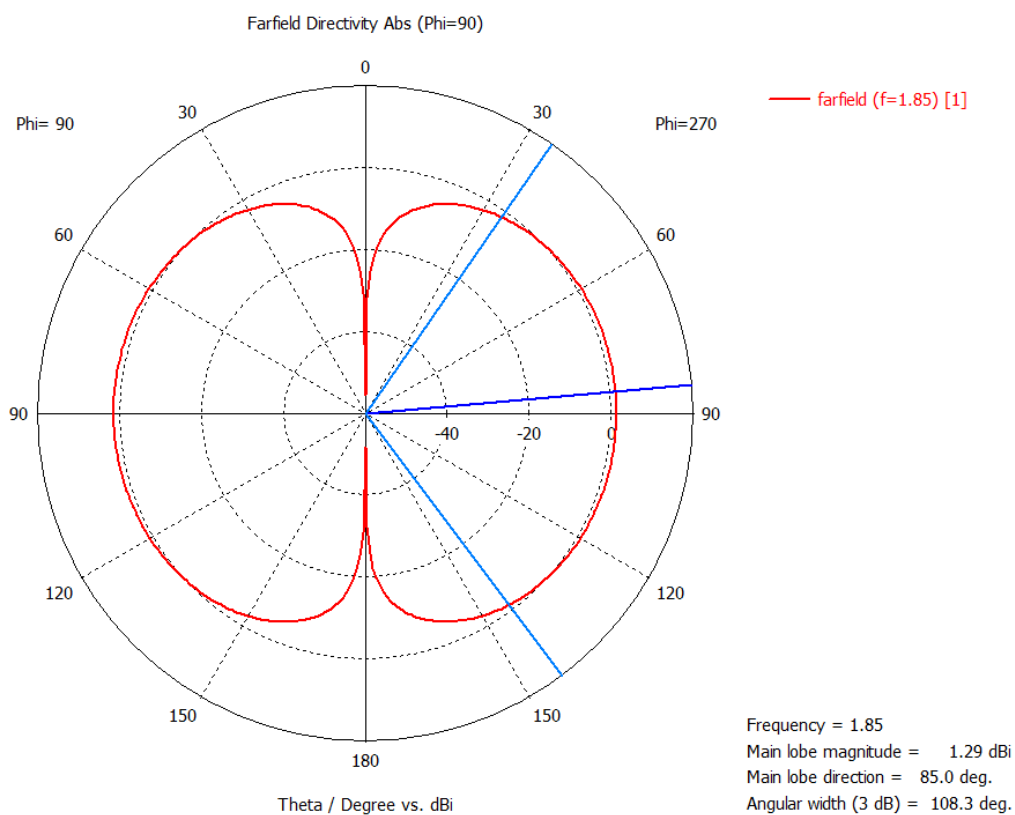
Obr. 60.: Rozložení intenzity magnetické pole H na anténě (1,85 GHz).



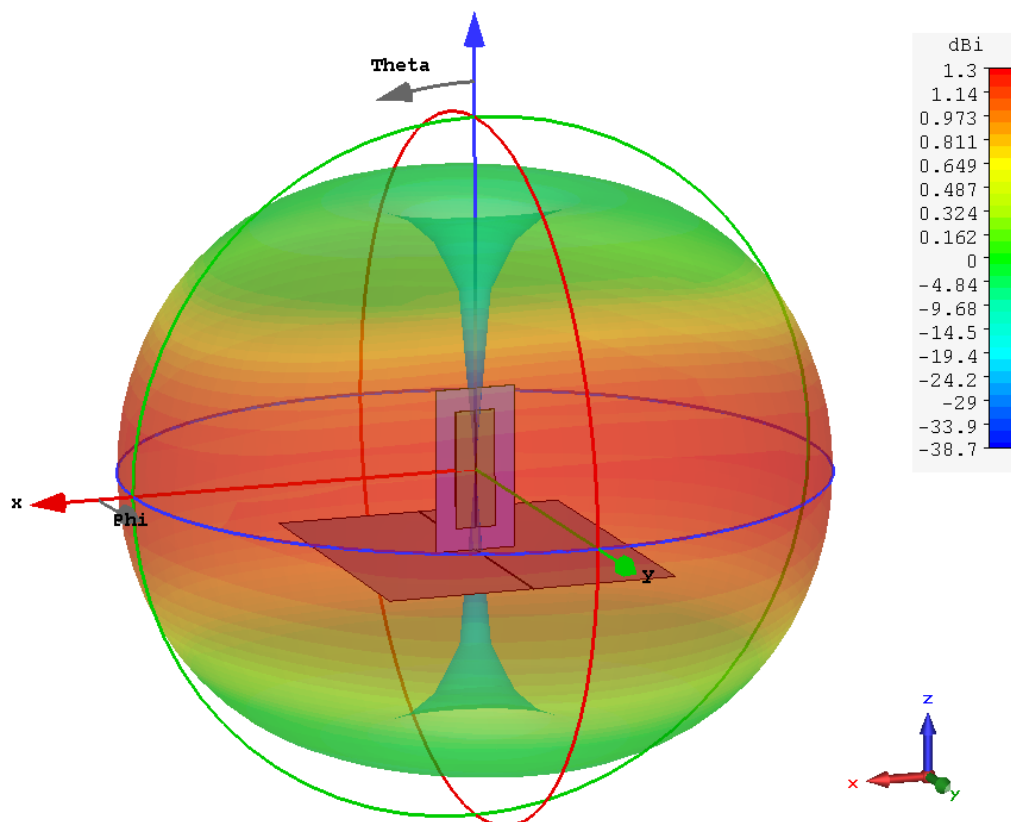
Obr. 61.: Směrová charakteristika antény rovina XY (1,85 GHz).



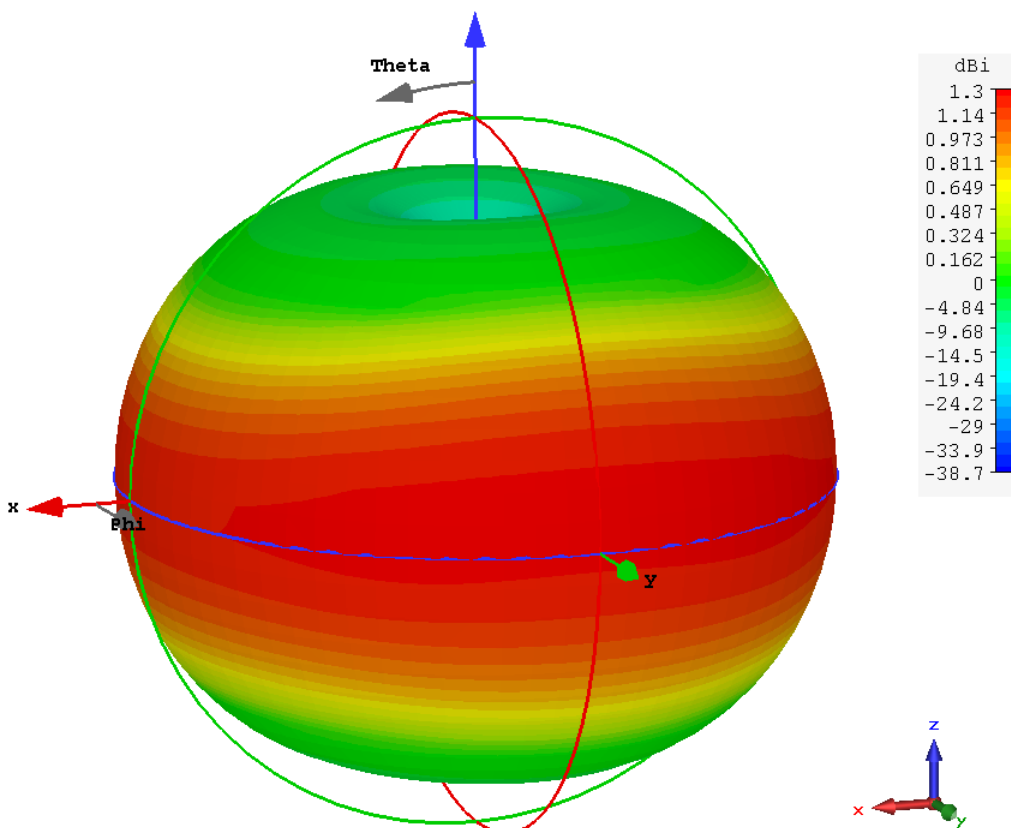
Obr. 62.: Směrová charakteristika antény rovina XZ (1,85 GHz).



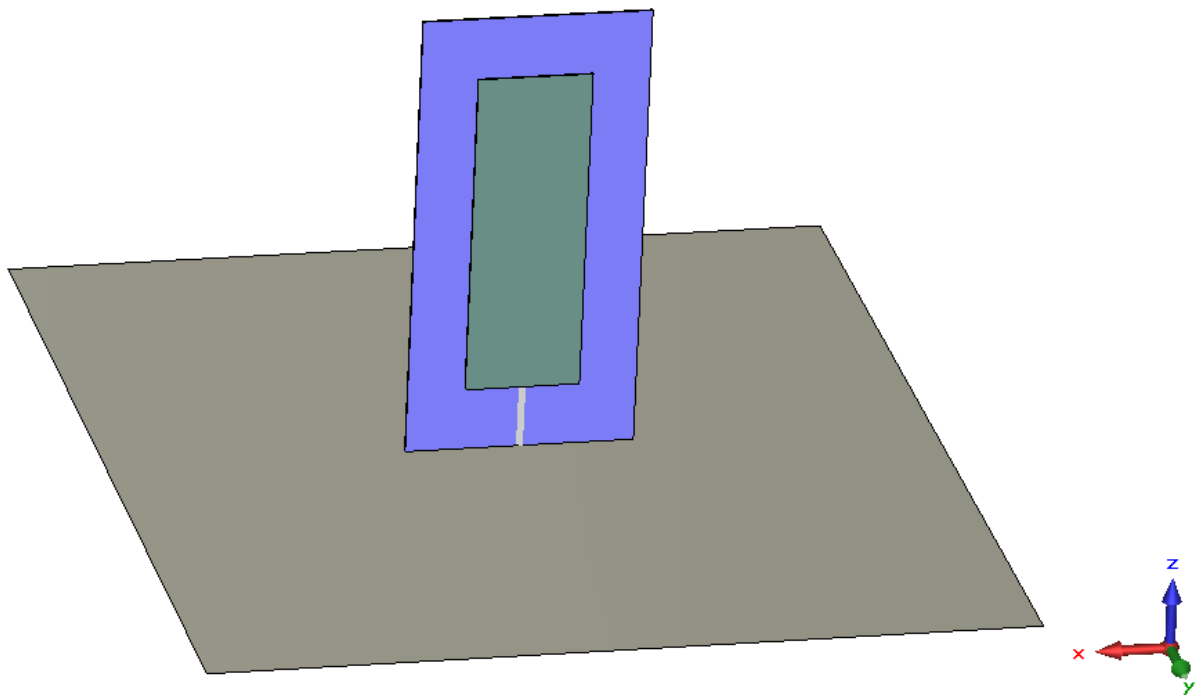
Obr. 63.: Směrová charakteristika antény rovina YZ (1,85 GHz).



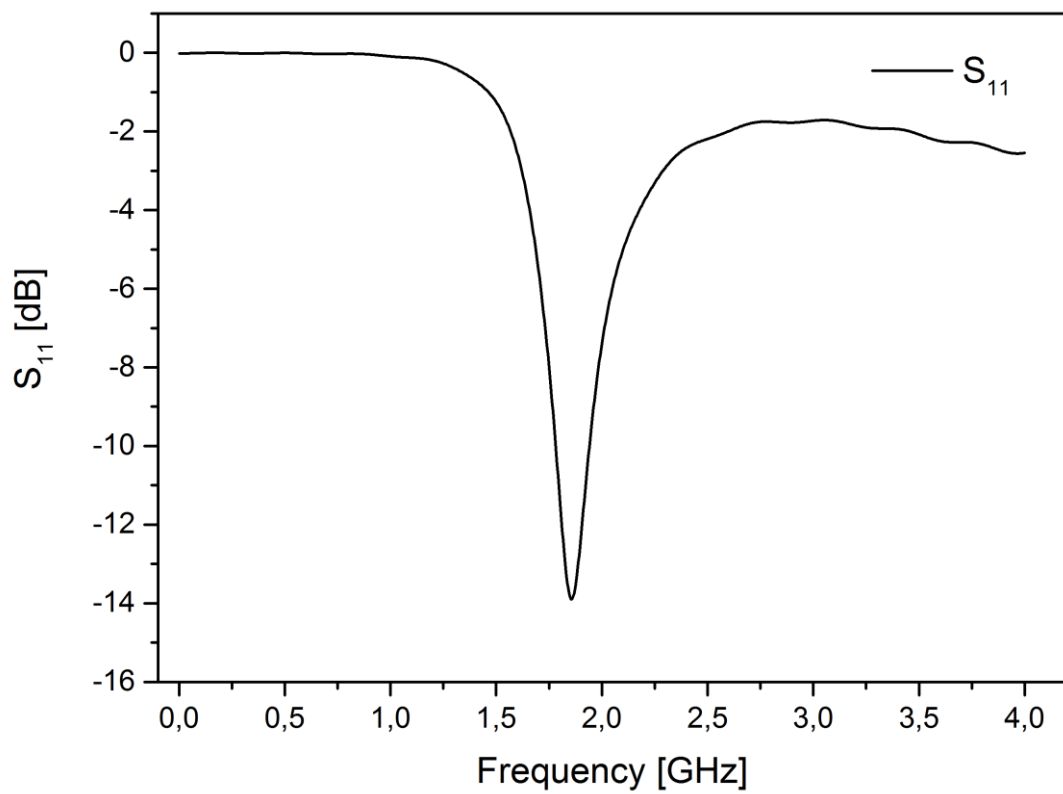
Obr. 64.: Směrová charakteristika v 3D zobrazení (1,85 GHz).



Obr. 65.: Směrová charakteristika v 3D zobrazení (1,85 GHz).



Obr. 66.: Model Ag/mikropáskové antény vložené do CST Microwave Studia.



Obr. 67.: Simulace parametru S_{11} .

6 ZAČLENĚNÍ VYHOTOVENÝCH ANTÉN Z POHLEDU SOUČASNÝCH KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

V současnosti se můžeme setkat s různými standardy bezdrátových sítí, provozovaných operátory v daném státě. Každý bezdrátový standard využívá odlišná frekvenční pásma. Pro každé z jednotlivých pásem musí být použita odpovídající anténa a to jak na straně vysílací, tak i na straně koncového mobilního zařízení. Právě u koncových mobilních elektronických zařízení je velmi složité navrhovat anténu, tak aby plně odpovídala požadavkům na konkrétní rádiová pásma sítě a zároveň byla co nejmenší s velmi nízkou hmotností nepřesahující v extrémních případech jeden gram.

Vyhotovené antény, které jsou popsány v této disertační práci, jsou použitelné především na straně koncových uživatelských mobilních zařízení, jako jsou mobilní telefony, tablety a z důvodů materiálového zpracování v neposlední řadě také nositelná elektronika. Popisované experimentální antény nebyly vyvíjeny za účelem použití pro konkrétní frekvence bezdrátových sítí, ale s úmyslem otestovat metodiku návrhu a možnosti méně používaných materiálů. Z pohledu začlenění do stávajících řešení je hlavní výhodou aplikace těchto antén do nositelné elektroniky a internetu věcí.

Hlavním důvodem výzkumu materiálově netradičních antén je neustálá potřeba miniaturizace a s tím spojené i nároky na snižování hmotnosti, především u elektronických zařízení patřících do nositelné elektroniky případně internetu věcí [59–62].

Mezi nejčastěji se vyskytující standardy pro mobilní sítě můžeme zařadit GSM, UMTS, LTE a jeho novější revizi LTE-C. Další populární bezdrátovou technologií je Wi-Fi a její revize IEEE 802.11a, b, g, n, y, ac, ad. V České republice vzniká síť pro internet věcí, která podporuje radiovou komunikaci v nelicencovaném frekvenčním pásmu 868 MHz s bezdrátovým protokolem dle standardu LoRaWan 1.0. Z tohoto pohledu se jeví jako velmi perspektivní použít po optimalizacích pro frekvenci 868 MHz natištěné antény na bázi nanočástic stříbra nanosené na PET substrátu.

7 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Každá disertační práce by měla být svým obsahem a cíly přínosná pro využití na poli vědy i praxe. I tato disertační práce popisuje možnosti využití výsledků výzkumu v následujících odstavcích.

7.1 Přínos vědě

Tato disertační práce by měla být přínosná vědecké komunitě především z hlediska využití elektricky vodivých nanočástic uhlíku z pohledu konstrukce hybridních senzorů organických par tak, jak je popsáno na straně 37. Kde je poukázáno na to, že použitá uhlíková vrstva může být zároveň anténou i senzorem organických par. Tuto unikátní vlastnost antény potvrzuje udělený český patent (304850) a podaná evropská patentová přihláška (EP3069410A1) u evropského patentového úřadu.

Na základě dosažených výsledků ve zkoumané oblasti bylo sepsáno několik odborných příspěvků, které byly publikovány na mezinárodních konferencích a v mezinárodních recenzovaných časopisech evidovaných v databázích Scopus a Web of Science (ISI Thomson Reuters). Některé z publikací autora, byly již citovány zahraničními vědci, což dokládá zájem o toto téma a potvrzuje jeho vědeckou aktuálnost.

7.2 Přínos praxi

Z praktických aplikací tohoto výzkumu lze poukázat na velmi nízkou hmotnost a flexibilitu vyrobených experimentálních antén, která je v současnosti velmi žádanou vlastností zejména pro aplikace nositelné elektroniky a internetu věcí. Od samého počátku myšlenky tisku pomocí elektricky vodivých nanočástic bylo počítáno s možností využití potenciálu antén s nízkými hmotnostmi pro aplikace vyžadující MIMO zapojení, jež jsou zejména u nových revizí LTE-C velmi žádané.

Se vzrůstajícím počtem antén v podobě MIMO anténního systému je tato přednost velmi užitečná. Vzhledem k nutnosti zachovat co nejmenší hmotnost zařízení bez snížení jeho výkonu na všech úrovních. Právě antény jsou jedním z klíčových faktorů ovlivňující rychlost přenosu dat u většiny mobilních zařízení.

S pomocí Centra transferu technologií byla zahájena jednání s českými i zahraničními firmami, které projevíly zájem o odkoupení licence pro aplikaci patentu (304850) do svých produktů.

8 ZÁVĚR

Všechny dosud provedené experimenty, rešerše i měření v oblasti konstrukce antén na bázi elektricky vodivých nanočástic poukazují na to, že se jedná do blízké budoucnosti o uplatnitelné a aktuální téma. Mezi hlavní přednosti těchto konstrukcí lze zmínit multifunkčnost vrstev a to zejména u uhlíkových vrstev, připravených pomocí vakuové filtrace na porézní polymerní membráně. Velkou předností antén na bázi stříbrných nanočástic vytištěných pomocí metody inkoustového tisku je jejich flexibilita a nízká hmotnost. Flexibilní elektronika nachází v poslední době velké uplatnění v nových konstrukcích přenosných zařízení a také zejména v oblasti nositelné elektroniky, kde lze očekávat růst trhu.

Mezi další přednosti tohoto výzkumu lze zmínit možnost implementace antén do krytů zařízení, která používají ochranné kryty na polymerních bázích. Tímto by se dalo ušetřit místo při konstrukci zařízení. Rovněž by došlo k dodržení podmínek o zachování potřebné vzdálenosti mezi jednotlivými anténami například u multi-antenních MIMO systémů, kdy u koncových uživatelských komunikačních zařízení musíme respektovat vzdálenost $\lambda/2$. Dodržení parametru $\lambda/2$, který určuje vzdálenost mezi jednotlivými anténami, klade vysoké nároky na anténní konstrukce a jejich miniaturizaci z důvodů lepší optimalizace využití omezeného fyzického prostoru zařízení, do něhož mají být antény implementovány. Z těchto důvodů považuji mnou vyhotovené experimentální antény za přínosné a originální.

Nově zaváděné standardy mobilních sítí, jako je například standard LTE-C, počítají s možností využití více antén, a to i v poměru MIMO 4×4 antény. Což bude zejména u standardu LTE-C vyžadovat optimalizaci rozložení jednotlivých antén v mobilním koncovém zařízení tak, aby nedocházelo mezi nimi k nežádoucím interferencím.

Dalším krokem mého budoucího výzkumu je použití nanočástic grafenu ke konstrukci antén. Čemuž by měly předcházet patřičné simulace v prostředí CST Microwave Studio. Nabízí se zde i možnost využití 3D tisku pomocí vodivých polymerů na bázi nanočástic grafenu.

POUŽITÁ LITERATURA A ZDROJE

- [1] BALANIS, C. A.: *Antenna Theory – Analysis and Design*, 3rd edition. John Wiley and Sons, Inc., 2005.
- [2] PROCHÁZKA, Miroslav. *Antény: encyklopedická příručka*. 3., rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-166-7.
- [3] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z. *Antény a šíření rádiových vln*. Skripta FEKT VUT, Brno 2003, ISBN 80-86056-47-3.
- [4] SAINATI, R. A. *CAD of microstrip antennas for wireless applications*. Boston: Artech House, c1996. ISBN 0890065624.
- [5] GARG, R.. *Microstrip antenna design handbook*. Boston, MA: Artech House, 2001. ISBN 0890065136.
- [6] GUSTRAU, F. *Rf and microwave engineering fundamentals of wireless communications*. Hoboken, N.J: Wiley, 2013. ISBN 9781118349571.
- [7] VLK, J. *Návrh a realizace elektricky malé antény*. Praha, 2012. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [8] MAZÁNEK M, PECHAČ P: *Šíření elektromagnetických vln a antény, dotisk 2. vydání*, ČVUT, Praha, 1998. Nakladatelství ČVUT, 10931. publikace. ISBN 978-80-01-03032-5
- [9] HOFFMANN K., HUDEC P., SOKOL V.: *Aktivní mikrovlnné obvody*, vysokoškolské skriptum, nakladatelství ČVUT, Praha, 2004. ISBN 978-80-01-04226-7.
- [10] BANCROFT R.: *Fundamental Dimension Limits of Antennas*, Centurion Wireless Technologies Westminster, Colorado.
- [11] NILSSON, James William. *Electric circuits*. 3rd ed. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, c1990. Addison-Wesley series in electrical and computer engineering. ISBN 0-201-17288-7.
- [12] SKRIVERVIK Anja K., Zürcher Jean-François: *Electrically Small Antenna Design*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland, June 2008.
- [13] KAMO, Bexhet, Shkelzen CAKAJ, Vladi KOLIČI a Erida MULLA. Simulation and Measurements of VSWR for Microwave Communication Systems. *International Journal of Communications, Network and System Sciences* [online]. 2012, **05**(11), 767-773 [cit. 2016-10-29]. DOI: 10.4236/ijcns.2012.511080. ISSN 1913-3715. Dostupné z: <http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/ijcns.2012.511080>.
- [14] EVJEN P.M.: *SRD antennas, Chipcon AS*, březen 2001.
- [15] YAGHJIAN, A.D. a S.R. BEST. Impedance, bandwidth, and Q of antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [online]. 2005,

- 53(4), 1298-1324 [cit. 2016-10-29]. DOI: 10.1109/TAP.2005.844443. ISSN 0018-926x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1417209/>.
- [16] Chu, J.: *Physical limitations of omni-directional antennas*, J. Appl. Phys, vol. 10, pp. 1163 – 1175, Dec. 1948.
- [17] McLean, J. S.: *A Re-examination of the Fundamental Limits on the Radiation Q of Electrically Small Antennas*, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 44, No. 5, 1996.
- [18] THAL, H. L.: *New radiation Q limits for spherical wire antennas*, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. AP-54, October 2006, pp. 2757-2763.
- [19] DOHNALOVÁ, L., DOHNAL, V.: *Nanočástice a jejich toxicita*. Chemické listy 109(6), (2015) 444-450.
- [20] ISO Standard 80004-4: *Nanotechnologies–Vocabulary–Part 4: Nanostructured materials*. International Organisation for Standardisation, Geneva, Švýcarsko (2011).
- [21] Doporučení komise ze dne 18. října 2011 o definici nanomateriálu 2011/696/EU, 2011. Dostupné z <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:275:0038:0040:CS:PDF>, staženo 4. března 2016.
- [22] Technical fact sheet – nanomaterials (EPA - United States Environmental Protection Agency, 2014. Dostupné z https://www.epa.gov/sites/production/files/2014_03/documents/ffrrofactsheet_emergingcontaminant_nanomaterials_jan2014_final.pdf, staženo 4. března 2016.
- [23] IJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon, *Nature*. 354 (1991) 56–58. ISSN 0028-0836, DOI: 10.1038/354056a0.
- [24] REILLY, R. M. Carbon Nanotubes: Potential Benefits and Risks of Nanotechnology in Nuclear Medicine. *Journal of Nuclear Medicine* [online]. 2007, 48(7): 1039-1042 [cit. 2016-03-11]. DOI: 10.2967/jnumed.107.041723. ISSN 0161-5505. Dostupné z: <http://jnm.snmjournals.org/cgi/doi/10.2967/jnumed.107.041723>.
- [25] VERMA, R., K. SAID, J. SALIM, E. KIMATHI, M. RIZKALLA, S. SHRESTHA, M. AGARWAL a K. VARAHRAMYAN. Carbon nanotube-based microstrip antenna gas sensor. In: 2013 IEEE 56th *International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)* [online]. IEEE, 2013, s. 724-727 [cit. 2016-03-10]. DOI: 10.1109/MWSCAS.2013.6674751. ISBN 978-1-4799-0066-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6674751>.
- [26] MEHDIPOUR, Aidin, Iosif D. ROSCA, Abdel-Razik SEBAK, Christopher W. TRUEMAN a Suong V. HOA. Carbon Nanotube Composites for

- Wideband Millimeter-Wave Antenna Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [online]. 2011, 59(10), 3572-3578 [cit. 2016-03-15]. DOI: 10.1109/TAP.2011.2163755. ISSN 0018-926x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5976397>.
- [27] LEE, Hoseon, George SHAKER, Krishna NAISHADHAM, Xiaojuan SONG, Michael MCKINLEY, Brent WAGNER a Manos TENTZERIS. Carbon-Nanotube Loaded Antenna-Based Ammonia Gas Sensor. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* [online]. 2011, 59(10), 2665-2673 [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1109/TMTT.2011.2164093. ISSN 0018-9480. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6016223/>.
- [28] WANG, Xiaodong, Oscar LARSSON, Duncan PLATT, Staffan NORDLINDER, Isak ENGQUIST, Magnus BERGGREN a Xavier CRISPIN. An all-printed wireless humidity sensor label. *Sensors and Actuators B: Chemical* [online]. 2012, 166-167, 556-561 [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1016/j.snb.2012.03.009. ISSN 09254005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925400512002602>.
- [29] BRUN, Christophe, Chin Chong YAP, Dunlin TAN, Stephane BILA, Sebastien PACCHINI, Dominique BAILLARGEAT a Beng Kang TAY. Flip Chip Based on Carbon Nanotube–Carbon Nanotube Interconnected Bumps for High-Frequency Applications. *IEEE Transactions on Nanotechnology* [online]. 2013, 12(4), 609-615 [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1109/TNANO.2013.2264534. ISSN 1536-125x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6517913/>.
- [30] ADAMS, Jacob J., Eric B. DUOSS, Thomas F. MALKOWSKI, Michael J. MOTALA, Bok Yeop AHN, Ralph G. NUZZO, Jennifer T. BERNHARD a Jennifer A. LEWIS. Conformal Printing of Electrically Small Antennas on Three-Dimensional Surfaces. *Advanced Materials* [online]. 2011, 23(11), 1335-1340 [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1002/adma.201003734. ISSN 09359648. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.201003734>.
- [31] DE PAOLIS, Rosa, Sebastien PACCHINI, Fabio COCCETTI, Giuseppina MONTI, Luciano TARRICONE, Manos M. TENTZERIS a Robert PLANA. Circuit model of carbon-nanotube inks for microelectronic and microwave tunable devices. In: *2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium* [online]. IEEE, 2011, s. 1-4 [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1109/MWSYM.2011.5972853. ISBN 978-1-61284-754-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5972853/>.
- [32] PACCHINI, Sébastien, David DUBUC, Emmanuel FLAHAUT a Katia GRENIER. Double-walled carbon nanotube-based polymer composites for electromagnetic protection. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies* [online]. 2010, 2(05), 487-495 [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1017/S1759078710000668. ISSN 1759-0787. Dostupné z: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S1759078710000668.

- [33] PACCHINI, Sébastien, Emmanuel FLAHAUT, Norbert FABRE, Véronique CONÉDÉRA, Fabien MESNILGRETE, Fabio COCCETTI, Mircea DRAGOMAN a Robert PLANA. DC and radio-frequency transmission characteristics of double-walled carbon nanotubes-based ink. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies* [online]. 2010, **2**(05), 471-477 [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1017/S175907871000067X. ISSN 1759-0787. Dostupné z: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S175907871000067X.
- [34] PACCHINI, Sebastien, Kamel FRIGUI, Carlos-Alberto PARAGUA, Emmanuel FLAHAUT, Stephane BILA, Tay BENG KANG a Dominique BAILLARGEAT. CNTs effects on RF resonators printed on paper. In: *2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)* [online]. IEEE, 2013, s. 1-4 [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1109/MWSYM.2013.6697794. ISBN 978-1-4673-6176-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6697794/>.
- [35] DRAGOMAN, M., D. NECULOIU, A. CISMARU, D. DRAGOMAN, K. GRENIER, S. PACCHINI, L. MAZENQ a R. PLANA. High quality nanoelectromechanical microwave resonator based on a carbon nanotube array. *Applied Physics Letters* [online]. 2008, **92**(6), 063118- [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1063/1.2857541. ISSN 00036951. Dostupné z: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/92/6/10.1063/1.2857541>.
- [36] KIMMER, D., SLOBODIAN, P., PETRÁŠ, D., ZATLOUKAL, M. OLEJNÍK, R. a SÁHA, P. Polyurethane/multiwalled carbon nanotube nanowebbs prepared by an electrospinning process. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2009, **111**(6), 2711-2714 [cit. 2016-03-15]. DOI: 10.1002/app.29238. ISSN 00218995. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.29238>.
- [37] XIE, X, Y MAI a X ZHOU. Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review. *Materials Science and Engineering: R: Reports* [online]. 2005, **49**(4), 89-112 [cit. 2016-03-15]. DOI: 10.1016/j.mser.2005.04.002. ISSN 0927796x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927796X05000641>.
- [38] SHAKER, George, Sarleddin SAFAVI-NAEINI, Nagula SANGARY a Manos M. TENTZERIS. Inkjet Printing of Ultrawideband (UWB) Antennas on Paper-Based Substrates. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* [online]. 2011, **10**, 111-114 [cit. 2016-04-03]. DOI: 10.1109/LAWP.2011.2106754. ISSN 1536-1225. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5688435>.
- [39] SIDEN, J., FEIN, M. K., A. Koptuyg, and H-E. Nilson, "Printed Antennas with Variable Conductive Ink Layers," *IET Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation*, 1, 2, April 2007, pp. 401-407.

- [40] HASSAN, Arshad, Shawkat ALI, Jinho BAE a Chong Hyun LEE. All printed antenna based on silver nanoparticles for 1.8 GHz applications. *Applied Physics A* [online]. 2016, 122(8), - [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1007/s00339-016-0286-2. ISSN 0947-8396. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00339-016-0286-2>.
- [41] PARK, Hyejin, Hwiwon KANG, Yonggil LEE, Yongsu PARK, Jinsoo NOH a Gyoujin CHO. Fully roll-to-roll gravure printed rectenna on plastic foils for wireless power transmission at 13.56 MHz. *Nanotechnology* [online]. 2012, 23(34), 344006- [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1088/0957-4484/23/34/344006. ISSN 0957-4484. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/09574484/23/i=34/a=344006?key=crossref.5db79350872ded1f717bc9d73b260245>.
- [42] NOH, Jinsoo, Junseok KIM, Namsoo LIM, Jaeyoung KIM, Vivek SUBRAMANIAN a Gyoujin CHO. AM Radio Circuit Using Printed Electronic Components. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* [online]. 2011, 11(5), 4384-4388 [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1166/jnn.2011.3714. ISSN 15334880. Dostupné z: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=1533-4880&volume=11&issue=5&spage=4384>.
- [43] ALLEN, Mark, Changwoo LEE, Byungjoon AHN, Terho KOLOLUOMA, Keehyun SHIN a Sunglim KO. R2R gravure and inkjet printed RF resonant tag. *Microelectronic Engineering* [online]. 2011, 88(11), 3293-3299 [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1016/j.mee.2011.08.010. ISSN 01679317. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167931711006526>.
- [44] PACCHINI, Sebastien, Mathieu COMETTO, Jian Jie CHOK, Gaetan DUFOUR, Nicolas TIERCELIN, Philippe PERNOD, Tay Beng KANG a Philippe COQUET. Inkjet-printing of hybrid Ag/conductive polymer towards stretchable microwave devices. In: *2015 European Microwave Conference (EuMC)* [online]. IEEE, 2015, s. 865-868 [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1109/EuMC.2015.7345901. ISBN 978-2-8748-7039-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7345901/>.
- [45] HAGE-ALI, Sami, Nicolas TIERCELIN, Philippe COQUET, Ronan SAULEAU, Vladimir PREOBRAZHENSKY a Philippe PERNOD. A Millimeter-Wave Inflatable Frequency-Agile Elastomeric Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* [online]. 2010, 9, 1131-1134 [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1109/LAWP.2010.2096405. ISSN 1536-1225. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5654639/>.
- [46] TARAPATA, Grzegorz, Daniel PACZESNY, Krzysztof KAWECKI a Ryszard S. ROMANIUK. *Characterization of inkjet-printing HF and UHF antennas for RFID applications* [online]. In: . 89032I- [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1117/12.2041792. Dostupné z:

<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2041792>.

- [47] NIE, Xiaolei, Hong WANG a Jing ZOU. Inkjet printing of silver citrate conductive ink on PET substrate. *Applied Surface Science* [online]. 2012, **261**, 554-560 [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1016/j.apsusc.2012.08.054. ISSN 01694332. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433212014328>.
- [48] DANCILA, Dragos, Reza MOOSSAVI, Johan SIDEN, Zhibin ZHANG a Anders RYDBERG. Antennas on paper using ink-jet printing of nano-silver particles for wireless sensor networks in train environment. *Microwave and Optical Technology Letters* [online]. 2016, **58**(4), 754-759 [cit. 2016-11-19]. DOI: 10.1002/mop.29665. ISSN 08952477. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/mop.29665>.
- [49] KOGA, Hirotaka, Tetsuji INUI, Itaru MIYAMOTO, Takuya SEKIGUCHI, Masaya NOGI a Katsuaki SUGANUMA. A high-sensitivity printed antenna prepared by rapid low-temperature sintering of silver ink. *RSC Adv* [online]. 2016, **6**(87), 84363-84368 [cit. 2016-11-19]. DOI: 10.1039/C6RA19687J. ISSN 2046-2069. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C6RA19687J>.
- [50] BJORNINEN, T., J. VIRKKI, L. SYDANHEIMO a L. UKKONEN. Manufacturing of antennas for passive UHF RFID tags by direct write dispensing of copper and silver inks on textiles. In: *2015 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)* [online]. IEEE, 2015, s. 589-592 [cit. 2016-11-19]. DOI: 10.1109/ICEAA.2015.7297183. ISBN 978-1-4799-7806-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7297183/>.
- [51] HOLMGAARD, T., S. Caporal DEL BARRIO, A. MORRIS, M. CHRISTENSEN a G.F. PEDERSEN. Screen-printed silver-ink antennas for frequency-reconfigurable architectures in LTE phones. *Electronics Letters* [online]. 2014, **50**(23), 1665-1667 [cit. 2016-11-19]. DOI: 10.1049/el.2014.3237. ISSN 0013-5194. Dostupné z: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el.2014.3237>.
- [52] REDINGER, D., S. MOLESA, S. YIN, R. FARSCHI a V. SUBRAMANIAN. An Ink-Jet-Deposited Passive Component Process for RFID. *IEEE Transactions on Electron Devices* [online]. 2004, **51**(12), 1978-1983 [cit. 2016-11-19]. DOI: 10.1109/TED.2004.838451. ISSN 0018-9383. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1362956/>.
- [53] SANGOI, R., C. G. SMITH, M. D. SEYMOUR, Jayanti N. VENKATARAMAN, Daniel M. CLARK, Michael L. KLEPER a Bruce E. KAHN. Printing Radio Frequency Identification (RFID) Tag Antennas Using Inks Containing Silver Dispersions. *Journal of Dispersion Science and Technology* [online]. 2005, **25**(4), 513-521 [cit. 2016-11-19]. DOI:

10.1081/DIS-200025721. ISSN 0193-2691. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/DIS-200025721>.

- [54] WANG, Po-Chiang, Yan-Yu NIAN, Zhi-Yu LUO, Chang-Pin CHANG, Yih-Ming LIU a Ming-Der GER. The inkjet printing of catalyst Pd ink for selective metallization apply to product antenna on PC/ABS substrate. In: *2013 8th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)* [online]. IEEE, 2013, s. 263-266 [cit. 2016-11-19]. DOI: 10.1109/IMPACT.2013.6706682. ISBN 978-1-4799-0667-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6706682/>.
- [55] PERELAER, J., B.-J. DE GANS a U. S. SCHUBERT. Ink-jet Printing and Microwave Sintering of Conductive Silver Tracks. *Advanced Materials* [online]. 2006, **18**(16), 2101-2104 [cit. 2016-12-10]. DOI: 10.1002/adma.200502422. ISSN 0935-9648. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.200502422>.
- [56] PACCHINI, Sebastien, Sami HAGE-ALI, Alienor TOGONAL, Nicolas TIERCELIN, Philippe PERNOD a Philippe COQUET. Inkjet-printed elastomeric millimeter-wave devices. In: *2014 44th European Microwave Conference* [online]. IEEE, 2014, s. 13-16 [cit. 2016-11-18]. DOI: 10.1109/EuMC.2014.6986357. ISBN 978-2-8748-7035-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6986357/>.
- [57] FALCONER, K. *Fractal geometry: mathematical foundations and applications*. 2nd ed. Chichester, England: Wiley, c2003. ISBN 0470848626.
- [58] PEITGEN et al., Chaos and Fractals [online]. New York, NY: Springer New York, 2004 [cit. 2016-03-18]. ISBN 978-1-4684-9396-2.
- [59] REN, Jessie a Yu-Jiun REN. A very small chip antenna supporting multiple radio protocols. In: *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting* [online]. IEEE, 2015, s. 932-933 [cit. 2016-10-29]. DOI: 10.1109/APS.2015.7304853. ISBN 978-1-4799-7815-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7304853/>.
- [60] EMADIAN, Seyed Ramin a Javad AHMADI-SHOKOUH. Very Small Dual Band-Notched Rectangular Slot Antenna With Enhanced Impedance Bandwidth. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* [online]. 2015, **63**(10), 4529-4534 [cit. 2016-10-29]. DOI: 10.1109/TAP.2015.2456905. ISSN 0018-926x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7159058/>.
- [61] GALEHDAR, Amir a David V. THIEL. Flexible, light-weight antenna at 2.4GHz for athlete clothing. In: *2007 IEEE Antennas and Propagation International Symposium* [online]. IEEE, 2007, s. 4160-4163 [cit. 2016-10-

- 29]. DOI: 10.1109/APS.2007.4396457. ISBN 978-1-4244-0877-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4396457/>.
- [62] TANAKA, M. a JAE-HYEUK JANG. Wearable microstrip antenna. In: *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Digest. Held in conjunction with: USNC/CNC/URSI North American Radio Sci. Meeting (Cat. No.03CH37450)* [online]. IEEE, 2003, s. 704-707 [cit. 2016-10-29]. DOI: 10.1109/APS.2003.1219333. ISBN 0-7803-7846-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1219333/>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.: Mikropásková anténa, sestávající z jediného obdélníkového mikropáskového anténního prvku, a) napájení mikropáskovým vedením, b) napájení koaxiálním vedením, c) průřez anténou, d) v rovině středního vodiče koaxiálního napáječe [4, 5].</i>	14
<i>Obr. 2.: Typy mikropáskových antén: a) ploškové, b) štěrbinové, c) s postupnou vlnou [2, 5].</i>	15
<i>Obr. 3.: Základní typy antén: (a) dipól, (b) složený dipól, (c) bikonický dipól, (d) logaritmicko periodická dipólová anténa (LPDA), (e) Yagi-Uda anténa, (f) monopól, (g) anténa invertované -F, (h) mikropásková anténa, (i) trychtýřová anténa, (j) parabolická anténa, (k) parabolická anténa se sub-reflektorem (Cassegrain) a (l) parabolická anténa s ofsetovým napáječem [6].</i>	15
<i>Obr. 4.: Vyzařovací oblast antény [7].</i>	16
<i>Obr. 5.: Dopadající a odražené napěťové vlny na jednobran (anténu) [7].</i>	19
<i>Obr. 6.: Náhradní obvod obecné antény [7].</i>	20
<i>Obr. 7.: Určení Q_z grafu S_{11} [7].</i>	24
<i>Obr. 8.: a) Jednostěnná uhlíková nanotrubička, označována jako SWCNT, b) Mnohostěnná uhlíková nanotrubička, označována jako MWCNT [24].</i>	28
<i>Obr. 9.: a) TEM analýza mnohostěnných uhlíkových nanotrubic,</i>	29
<i>Obr. 10.: Fotografie experimentální antény na bázi mnohostěnných uhlíkových nanotrubic.</i>	30
<i>Obr. 11.: a) volně postavená síť z náhodně zapletených uhlíkových nanotrubic (MWCNTs) (kruh o průměru 75 mm a tloušťce 0.15 mm),</i>	31
<i>Obr. 12.: Tento graf reprezentuje činitel odrazu S_{11}, (vyjádřen v dB) v závislosti na frekvenci s přizpůsobením na 1,28 GHz, kde plná křivka znázorňuje reálný vzorek a přerušovaná simulaci.</i>	32
<i>Obr. 13.: Tento graf reprezentuje vyzařování antény v porovnání se simulací.</i>	32
<i>Obr. 14.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě (1,26 GHz).</i>	33
<i>Obr. 15.: Rozložení intenzity magnetického pole H na anténě (1,26 GHz).</i>	33
<i>Obr. 16.: Směrová charakteristika antény rovina XY (1,26 GHz).</i>	34
<i>Obr. 17.: Směrová charakteristika antény rovina ZX (1,26 GHz).</i>	34
<i>Obr. 18.: Směrová charakteristika antény rovina ZY (1,26 GHz).</i>	35
<i>Obr. 19.: Směrová charakteristika v 3D zobrazení (1,26 GHz).</i>	35
<i>Obr. 20.: Model CNTs antény vložené do CST Microwave Studia.</i>	36
<i>Obr. 21.: Simulace parametru S_{11}.</i>	36
<i>Obr. 22.: Tento graf reprezentuje odezvu na páry dvou organických rozpouštědel (etanol, heptan) v závislosti na čase.</i>	37
<i>Obr. 23.: Proces inkoustového tisku flexibilní antény na PET substrát.</i>	39
<i>Obr. 24.: a) SEM mikroskopie struktury stříbrného inkoustu na PET substrátu o rozlišení 5 μm, b) detail nanočástic stříbra, zde je vidět jak jsou nanočástice stříbra vzájemně propojeny, tento snímek dokazuje vysokou vodivost tištěné vrstvy, rozlišení snímku je 1 μm.</i>	39

Obr. 25.: a) Fotografie vyrobené antény pomocí inkoustového tisku, b) rozměry vyrobené antény v jednotkách mm.	39
Obr. 26.: Tento graf reprezentuje průběh fáze komplexní impedance na frekvenci.	40
Obr. 27.: Tento graf reprezentuje činitel odrazu S_{11} , (vyjádřen v dB) v závislosti na frekvenci s přízpusobenými na 1,07 GHz, 1,5 GHz a 2,49 GHz.	40
Obr. 28.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě (1,5 GHz).	41
Obr. 29.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě (2,5 GHz).	41
Obr. 30.: Směrová charakteristika antény rovina XY (1,5 GHz).	42
Obr. 31.: Směrová charakteristika antény rovina XZ (1,5 GHz).	42
Obr. 32.: Směrová charakteristika antény rovina XY (2,5 GHz).	43
Obr. 33.: Směrová charakteristika antény rovina XZ (2,5 GHz).	43
Obr. 34.: Směrová charakteristika v 3D zobrazení (1,5 GHz).	44
Obr. 35.: Směrová charakteristika v 3D zobrazení (2,5 GHz).	44
Obr. 36.: Model Ag antény vložené do CST Microwave Studia.	45
Obr. 37.: Simulace parametru S_{11}	45
Obr. 38.: Ukázka základních iterací u často používaných fraktálů pro konstrukci fraktální antény a) Kochova křivka, b) Sierpinského monopól [57, 58].	46
Obr. 39.: Fraktály, a) Dračí křivka, b) Binární strom, c) L-systém, d) Želví grafika [57, 58].	47
Obr. 40.: Ukázka šesti různých iterací „Sierpinského Arrowhead“ křivky [58].	48
Obr. 41.: Fotografie experimentální třípásmové antény s fraktálním motivem využívající čtvrtou iteraci „Sierpinského Arrowhead“ křivky.	48
Obr. 42.: Tento graf znázorňuje průběh fáze komplexní impedance na frekvenci.	49
Obr. 43.: Tento graf reprezentuje činitel odrazu S_{11} , (vyjádřen v dB) v závislosti na frekvenci s přízpusobenými na 650 MHz, 1,57 GHz a 2,5 GHz.	49
Obr. 44.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě YX rovina (3 GHz).	50
Obr. 45.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě YZ rovina (3 GHz).	50
Obr. 46.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě YX rovina (5 GHz).	51
Obr. 47.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě YZ rovina (5 GHz).	51
Obr. 48.: Směrová charakteristika antény rovina YZ (3 GHz).	52
Obr. 49.: Směrová charakteristika antény rovina YX (5 GHz).	52
Obr. 50.: Směrová charakteristika v 3D zobrazení (3 GHz).	53
Obr. 51.: Směrová charakteristika v 3D zobrazení (5 GHz).	53
Obr. 52.: Model Ag/fraktální antény vložené do CST Microwave Studia.	54
Obr. 53.: Simulace parametru S_{11}	54
Obr. 54.: Fotografie experimentální antény na bázi nanočástic stříbra.	55

<i>Obr. 55.: Demonstrace flexibility potištěného PET substrátu.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 56.: Tento graf reprezentuje činitel odrazu S_{11}, (vyjádřen v dB) v závislosti na frekvenci s přízpusobeními na 2,02 GHz a 2,3 GHz.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 57.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě (1,85 GHz).....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 58.: Rozložení intenzity elektrického pole E na anténě (1,85 GHz).....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 59.: Rozložení intenzity magnetické pole H na anténě (1,85 GHz).....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 60.: Rozložení intenzity magnetické pole H na anténě (1,85 GHz).....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 61.: Směrová charakteristika antény rovina XY (1,85 GHz).....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 62.: Směrová charakteristika antény rovina XZ (1,85 GHz).....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 63.: Směrová charakteristika antény rovina YZ (1,85 GHz).....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 64.: Směrová charakteristika v 3D zobrazení (1,85 GHz).</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 65.: Směrová charakteristika v 3D zobrazení (1,85 GHz).</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 66.: Model Ag/mikropáskové antény vložené do CST Microwave Studia..</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 67.: Simulace parametru S_{11}.....</i>	<i>61</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

°C	Stupeň Celsia
μm	Mikrometr
3D	Trojrozměrný
A/D	Analogově digitální (převodník)
Ag	Argentum = stříbro
BGA	Ball Grid Array
BW	Bandwidth, (šířka pásma)
CNTs	Carbon nanotubes
Co.Ltd.	A closed corporation
cP	Centipoise = jednotka pro dynamickou viskozitu
CST	Computer Simulation Technology
CVD	Chemical Vapor Deposition
dB	Decibel
DMP-2800	Typové označení tiskárny, Dimatix Materials Printer -2800
E	Intenzita elektrického pole
FBW	Poměrné pásmo (tzv. fractional bandwidth)
FR-4	Flame Retardant - 4
FSH3	Typové označení pro použitý spektrální analyzátor
FSH-Z2	Typové označení pro použitý můstek
g	Gram
G	Zisk antény [dB]
GHz	Gigahertz
GSM	(Globální Systém pro Mobilní komunikaci, původně však francouzsky „Groupe Spécial Mobile“)
H	Intenzita magnetického pole
hm%	Hmotnostní procenta
HRTEM	High-resolution transmission electron microscopy
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFS	Iterační Funkční Systémy
ISI	Institute for Scientific Information
ISO	International Organization for Standardization

kHz	Kilohertz
LPDA	Logaritmicko Periodická Dipólová Anténa
LTE	Long Term Evolution
LTE-C	Long Term Evolution – Advanced, vývojová verze C
M2M	Machine to Machine
MHz	Megahertz
MIMO	Multiple-input multiple-output
ml	Mililitr
MWCNTs	Multi-walled carbon nanotubes
nm	Nanometr
Nova NanoSEM 450	Typové označení pro použitý mikroskop
Novele IJ-220	Typové označení pro použitý, PET substrát
PET	Polyethylentereftalát
PIFA	Planar Inverted F Antenna
PMMA	Polymethylmethakrylát
PPM	Parts per million
PSV	Poměr Stojatých Vln
Q	Činitel jakosti
S_{11}	Činitel odrazu [dB]
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
SWCNTs	Single-walled carbon nanotubes
TE	Transverzálně elektrický mód
TEM	Transmisní elektronový mikroskop
TM	Transverzálně magnetický mód
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
US EPA	United States Environmental Protection Agency
UZ SONOPULS HD 2070	Typové označení pro použitý ultrazvukový homogenizátor
VSWR	Voltage standing wave ratio
Wi-Fi	Wireless fidelity (označení pro několik standardů IEEE 802.11)
λ	Lambda = vlnová délka

PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA

1. MATYÁŠ, Jiří, VLČEK, Karel. Experimental antenna design based on natural constructions. In *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity"*. Vienna: DAAAM International Vienna, 2011, s. 1435-1436. ISSN 1726-9679. ISBN 978-3-901509-83-4.
2. MATYÁŠ, J.; Vlček, K.: The Use of Conductive Threads in the Production of Experimental Textile Antennas. Posterus.sk, portál pre odborné publikovanie. Bratislava: Systémy priemyselnej informatiky s.r.o., 2012, ISSN 1338-0087.
3. MATYÁŠ, Jiří, PROKOPOVÁ, Zdenka. Nároky multimediálních aplikací na datové přenosy v mobilních sítích. In *Conference Proceedings XIV. Annual International Conference, Internet, Competitiveness and Organizational Security*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2012, s. 98-100. ISBN 978-80-7454-142-1.
4. MATYÁŠ, Jiří, OLEJNÍK, Robert, SLOBODIAN, Petr, VLČEK, Karel. Mikropásková anténa na bázi sítě z uhlíkových nanotrubic jako aktivní vrstva nanosená na skleněném substrátu. Funkční vzorek, 2012.
5. MATYÁŠ, Jiří, OLEJNÍK, Robert, SLOBODIAN, Petr. Gelová anténa na bázi PVAL/CNT. Funkční vzorek, 2013.
6. OLEJNÍK, Robert, MATYÁŠ, Jiří, SLOBODIAN, Petr, VLČEK, Karel. Mikrovlnná anténa s integrovanou funkcí senzoru organických par. Užité vzor, 26489. 2014.
7. OLEJNÍK, Robert, Jiří MATYÁŠ, Petr SLOBODIAN a Karel VLČEK. UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ. Mikrovlnná anténa s integrovanou funkcí senzoru organických par. Česká republika. **Patent, 304850**. Uděleno 22.10.2014.
8. SLOBODIAN, Petr, OLEJNÍK, Robert, MATYÁŠ, Jiří, DOLEČEK, Josef. Poloprovodní příprava CNT polymerního koncentrátu: Výroba elektrovodivé struny pro 3d prototyping na bázi ABS/uhlíkových nanotrubic nanokompozitního materiálu. Poloprovod, 2014.
9. SLOBODIAN, Petr, OLEJNÍK, Robert, MATYÁŠ, Jiří, DOLEČEK, Josef. Elektrostatický polymerní kompozit na bázi ABS/uhlíkové nanotrubic připravený technologií vstříkávání. Funkční vzorek, 2014.
10. MATYÁŠ, Jiří, CHLACHULA, Jiří. Insect monitoring using the RFID technology: potential for the Altai biodiversity protection. In *Современные Направления Теоретических и Прикладных Исследований 2014*. Odessa: National Marine University, 2014, s. 14-17. ISSN 2224-0187.

11. OLEJNÍK, Robert, MATYÁŠ, Jiří, SLOBODIAN, Petr, VLČEK, Karel. The multifunctional composite on the base of carbon nanotubes network and its use as a passive antenna and gas sensing element. In *Key Engineering Materials*. Zurich: Trans Tech Publications Ltd., 2014, s. 322-325. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03835-051-4.
12. MATYAS, Jiri, Robert OLEJNIK, Karel VLCEK a Petr SLOBODIAN. The use of carbon nanotubes applied to plastic substrates for the construction of a passive antenna. In: *Latest Trends in Circuits, Systems, Signal Processing and Automatic Control: Proceedings of the 5th International Conference on Circuits, Systems, Control, Signals (CSCS'14)*. Salerno: WSEAS Press, 2014, s. 297-300. ISBN 978-960-474-374-2 ISSN 1790-5117.
13. MATYAS, Jiri, Robert OLEJNIK, Karel VLCEK, Petr SLOBODIAN, Pavel URBANEK, Petr KRČMAR a Lukas MUNSTER. The Multiband Fractal Antenna on Polymer Substrate Prepared by Using Inkjet Print Technology Based on Silver Nanoparticles. In: *Advanced Materials Research*. 2015, s. 245-248. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1101.245. ISSN 1662-8985.
14. SLOBODIAN, P., U. CVELBAR, RIHA, P., OLEJNIK, R., MATYAS, J., FILIPIC, G., WATANABE, H., TAJIMA, S., KONDO, H., SEKINE, M., HORI, M. High sensitivity of a carbon nanowall-based sensor for detection of organic vapours. *RSC Advances*. 2015, 5(110), 90515-90520. DOI: 10.1039/C5RA12000D. ISSN 2046-2069.
15. MATYAS, J., OLEJNIK, R., SLOBODIAN, P., MUNSTER, L., KRČMAR, P., STEININGER, A. Multiband Antenna made of a Flexible Polymer Substrate printed with Silver Nanoparticles using Inkjet Print Technology - a Feasibility Study. *NANOCON 2015, 7. ročník mezinárodní konference nanomateriálů - výzkum & aplikace, 14. - 16. října 2015*, Brno, Česká republika, ISBN 978-80-87294-59-8.
16. OLEJNIK, R., SLOBODIAN, P., SPITALSKY, Z., MATYAS, J. The Sensing Element for Organic Vapors Detection on the base of Styrene-isoprene-styrene (SIS) Block Copolymer / Carbon Nanotubes on the Interdigitate Electrode. *NANOCON 2015, 7. ročník mezinárodní konference nanomateriálů - výzkum & aplikace, 14. - 16. října 2015*, Brno, Česká republika, ISBN 978-80-87294-59-8.
17. SLOBODIAN, P., MATYAS, J., OLEJNIK, R. Electro-mechanical Transducer based on Carbon Nanotube Network/Polystyrene Laminate for Deformation Detection. *NANOCON 2015, 7. ročník mezinárodní konference nanomateriálů - výzkum & aplikace, 14. - 16. října 2015*, Brno, Česká republika, ISBN 978-80-87294-59-8.

18. SLOBODIAN, Petr, Michal KOVAR, Robert OLEJNIK a Jiri MATYAS. Pressure sensitive polyurethane/carbon nanotube laminate pasted to a shoe sole. *Posterus: portál pre odborné publikovanie*. 2015-11-12, 8(10): 6. ISSN 1338-0087.
19. MATYÁŠ, Jiří, Robert OLEJNÍK, Karel VLČEK a Petr SLOBODIAN. Nonmetallic-carbon nanotube "buckypaper" networks applied on plastic substrates as a passive antenna construction and gas sensor. In: *Počítačové architektury a diagnostika PAD 2015*. První. Zlín: UTB ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2015, s. 101-106. ISBN 978-80-7454-522-1.
20. MATYAS, Jiri, Lukas MUNSTER, Robert OLEJNIK, Karel VLCEK, Petr SLOBODIAN, Petr KRCMAR, Pavel URBANEK a Ivo KURITKA. Antenna of silver nanoparticles mounted on a flexible polymer substrate constructed using inkjet print technology. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2016, 55(2S), 02BB13. DOI: 10.7567/JJAP.55.02BB13. ISSN 0021-4922.
21. OLEJNIK, Robert, Petr SLOBODIAN, Jiri MATYAS a Dipak Gorakh BABAR. High elastic polyurethane/carbon nanotube composite laminate for structure health monitoring by gain shifting of antenna sensing element. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, **108**, 012024. DOI: 10.1088/1757-899X/108/1/012024. ISSN 1757-8981.
22. SLOBODIAN, Petr, Robert OLEJNIK, Jiri MATYAS a Dipak Gorakh BABAR. Improving sensitivity of the polyurethane/CNT laminate strain sensor by controlled mechanical preload. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, **108**, 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/108/1/012022. ISSN 1757-8981.
23. OLEJNIK, Robert, Dipak Gorakh BABAR, Petr SLOBODIAN a Jiri MATYAS. Sensing element for detection of polar organic vapours on the base of polyaniline-composite - Effect of substrate surface area. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, **108**, 012006. DOI: 10.1088/1757-899X/108/1/012006. ISSN 1757-8981.

Publikace a patenty v recenzním řízení:

24. Byla podána přihláška **Evropského patentu** (cestou tzv. EURO-PCT) o názvu MICROWAVE ANTENNA WITH INTEGRATED FUNCTION OF ORGANIC VAPOR SENSOR, která byla zveřejněna pod číslem EP 3069410 A1.

25. Microstrip antenna from silver nanoparticles printed on a flexible polymer substrate. In: MATYAS, Jiri, Petr SLOBODIAN, Lukas MUNSTER, Robert OLEJNIK a Pavel URBANEK. 9th International Symposium on Flexible Organic Electronics. Thessaloniki: Stergios Logothetidis, 2016, s. 141. (Pravděpodobně bude přijato k publikaci v časopise **Materials Today: Proceedings** ISSN: 2214-7853).

PROFESNÍ ŽIVOTOPIS

Osobní údaje

Jméno: Jiří
Příjmení: Matyáš
Titul: Ing.
E-mail: matyas@fai.utb.cz
Datum narození: 30.11.1985

Vzdělání

2010 - dosud Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Ústav počítačových a komunikačních systémů, doktorské studium, obor: Informační technologie.

2008 - 2010 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Ústav počítačových a komunikačních systémů, magisterské studium - dosažený titul Ing., obor: Počítačové a komunikační systémy.

2005 - 2008 Evropský polytechnický institut, bakalářské studium – dosažený titul Bc., obor: Elektronické počítače.

Zaměstnání

2014 - dosud Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Centrum polymerních systémů, junior researcher

Řešené projekty

Řešitel výzkumného projektu interní grantové agentury UTB, IGA/FAI/2015/007 - Elektricky vodivé nanomateriály a jejich použití ke konstrukci mikropáskových antén.

Řešitel výzkumného projektu interní grantové agentury UTB, IGA/FAI/2014/004 - Multifunkční antény pro komunikační zařízení na bázi uhlíkových nanotrubic.

Řešitel výzkumného projektu interní grantové agentury UTB, IGA/FAI/2013/028 - Uhlíkové nanotrubice, jejich vlastnosti a použití z pohledu konstrukce pasivních antén.

Řešitel výzkumného projektu interní grantové agentury UTB, IGA/FAI/2012/031 - Využití neobvyklých materiálů pro konstrukci antén.

Řešitel výzkumného projektu interní grantové agentury UTB, IGA/42/FAI/11/D - Multi-anténní systémy.

Pedagogická činnost – vyučované předměty na FAI UTB

Standardizace v komunikacích
Telekomunikační systémy
Základy výpočetní techniky a informatiky

Vedení odborné stáže ve spolupráci s SSČ AV ČR, v.v.i. – Praha 1, Lektor odborné stáže pro studenta gymnázia. V rámci projektu: „Otevřená věda“ reg. č. CZ.1.07/2.3.00/35.0023.

Zahraniční stáže

2015 - zahraniční mobilita na Montanuniversität Leoben – Leoben, Rakousko - (4 týdny)

2015 - zahraniční mobilita na Vienna University of Technology – Vídeň, Rakousko - (4 týdny)

Významné zahraniční konference s aktivní účastí

The 5th International Conference on Circuits, Systems, Control, Signals (CSCS 2014) Salerno, Italy.

The 3rd International Conference on Material Science and Engineering Technology (ICMSET 2014) Peking, China.

The 5th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2015) Niigata, Japan.

The 9th International Symposium on Flexible Organic Electronics (ISFOE 2016). Thessaloniki, Greece.

Jazykové znalosti

Aktivně: angličtina

Pasivně: němčina

Další schopnosti a dovednosti

MS Windows, MS Office, AutoCAD, GIS, IS systémy, jiné nástroje a utility.

Řidičská oprávnění skupiny A1, B.