

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Technologická řešení antén pro pásmo 2,4GHz – 2,5GHz

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Karel HŮLA**

Osobní číslo: **E17B0113P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Technologická řešení antén pro pásmo 2.4GHz - 2.5GHz**

Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vyhledejte technologické možnosti vytváření antén v pásmu 2.4GHz - 2.5GHz.
2. Zhodnoťte výhody a nevýhody jednotlivých přístupů z 1. bodu zadání, možnosti ladění antén a jejich vlastnosti.
3. Otestujte teoretické předpoklady měření reálných vzorků antén.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

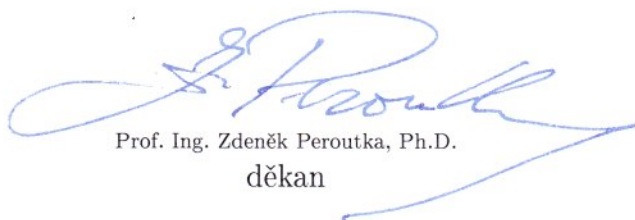
1. Edward E. Altshuler; Electrically small self-resonant wire antennas optimized using a genetic algorithm

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Justa

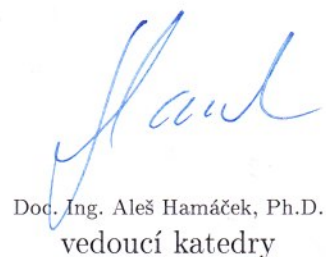
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 5. října 2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 13. června 2019



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá technologickým řešením antén v pásmu 2,4 – 2,5 GHz. V teoretické části je uveden základní rozbor pásma 2,4 – 2,5 GHz, parametry antén a druhy antén. Další část práce popisuje návrh vybraných druhů antén integrovaných na desce plošného spoje, včetně vlivu použití odlišné tloušťky substrátu. Praktická část se zabývá porovnáním teoretických předpokladů ze simulací a měřených vzorků antén.

Klíčová slova

Integrovaná anténa na DPS, pásmo 2,4 – 2,5 GHz, flíčková anténa

Abstract

This bachelor thesis describes the technological solutions of antennas in frequency band 2,4 – 2,5 GHz. In the theoretical part is basic analysis of the band 2,4 – 2,5 GHz, the antennas parameters and types of antennas. The next part describes the design of selected types of antennas integrated on the printed circuit board, including using different substrate thicknesses. The practical part deals with comparison of theoretical assumptions from the simulations and measured antennas.

Key words

Integrated antenna on the PCB, band 2,4 – 2,5 GHz, patch antenna

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 13.6.2019

Karel Hůla

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Josefu Justovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce a Ing. Martinu Pavcovi za pomoc při měření vzorků antén.

Obsah

1	Úvod.....	3
2	Obecný rozbor.....	4
2.1	Rozdělení rádiového spektra.....	4
2.2	Rozměr elektromagnetické vlny.....	5
2.3	Technologie pracující ve frekvenčním pásmu 2,4 - 2,5 GHz.....	6
2.3.1	WIFI.....	6
2.3.2	Bluetooth.....	7
2.3.3	ZigBee.....	7
3	Parametry antén.....	9
3.1	Základní parametry antén.....	10
3.2	Druhy antén.....	13
4	Návrh antény integrované na DPS.....	14
4.1	Povrchový jev (Skin efekt).....	14
4.2	Parametry materiálu substrátu.....	14
4.3	Délka čtvrtvlnného monopólu umístěném na DPS.....	16
4.4	Impedanční přizpůsobení na 50 Ω	17
4.5	Návrh antén.....	19
4.5.1	Flíčková anténa.....	19
4.5.2	Monopólová anténa ve tvaru L.....	22
4.5.3	IFA anténa.....	23
4.5.4	Meandrovitá anténa.....	24
4.5.5	Monopólová anténa - jednovrstvá.....	25
5	Simulační program CST Studio.....	26
5.1	Nastavení simulace / optimalizace v programu CST Studio.....	26
5.2	Export a úprava výsledného motivu antény.....	28
6	Simulace antén.....	29
6.1	Flíčková anténa.....	29
6.2	Monopólová anténa ve tvaru L.....	31
6.3	IFA anténa.....	32
6.4	Meandrová anténa.....	33

6.5 Monopólová anténa na jednovrstvé DPS.....	34
7 Změření a porovnání vzorků antén.....	35
7.1 Vyhodnocení změřených vzorků antén.....	43
8 Závěr.....	44
9 Seznam literatury a informačních zdrojů.....	45
Seznam použitého software.....	49
Seznam symbolů.....	50

1 Úvod

Tématem bakalářské práce jsou technologická řešení antén pro pásmo 2,4 - 2,5 GHz. V úvodu práce je uveden obecně technický rozbor definovaného frekvenčního spektra a nejrozšířenějších technologií používaných v pásmu 2,4 GHz, jmenovitě například: WIFI, Bluetooth a Zigbee spadajících frekvenčně do vymezené části ISM pásma (Industrial, Scientific and Medical Radio Band). V současné době, díky neustálému vývoji představují tyto technologie do budoucna veliký potenciál, z důvodu masového rozvoje IoT (Internet of Things) a průmyslu 4. generace.

Ve 3. kapitole jsou definované základní parametry a typy integrovatelných antén na desku plošného spoje (DPS). V další části (4. kapitola) jsou uvedené teoretické předpoklady pro návrh vysokofrekvenční antény – vliv povrchového jevu, vliv materiálu substrátu a jeho tloušťky. V závěru kapitoly jsou popsány jednotlivé návrhy pro modely: flíčkové antény, monopólové antény, IFA antény a meandrové antény. Tyto vybrané modely antén byly namodelované a optimalizované v programu CST Studio, dle potřeb návrhu tak, aby jejich rezonanční frekvence odpovídala ideálně střednímu kmitočtu pásma 2,4 – 2,5 GHz, tedy 2,45 GHz.

Praktická část se zabývá změřením navrhnutých vzorků antén s proměnlivými parametry substrátu (tloušťkou) a jejich vlivu na výsledné parametry antény. V poslední části práce je uvedeno porovnání nasimulovaných a změřených vzorků antén.

2 Obecný rozbor

2.1 Rozdělení rádiového spektra

Obecné dělení rádiového spektra v České republice je upraveno zákonem č. 127/2005 Sb.: *Zákon o elektronických komunikacích a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o elektronických komunikacích)* od 9 kHz do 3000 GHz, avšak obecně přejímané členění je od 3 kHz do 3000 GHz [1]. V Tab.1 je uvedeno rozdělení frekvenčního spektra dle Českého telekomunikačního úřadu, dále jen ČTÚ.

Číslo pásma *N	Symboly	Rozsah kmitočtů (dolní mez mimo, horní mez včetně)	Názvy pásem	Metrické zkratky pásem
4	VLF	3 až 30 kHz	myriametrové	Mam
5	LF	30 až 300 kHz	kilometrové	km
6	MF	300 až 3000 kHz	hektometrové	hm
7	HF	3 až 30 MHz	dekametrové	Dm
8	VHF	30 až 300 MHz	metrové	m
9	UHF	300 až 3000 MHz	decimetrové	dm
10	SHF	3 až 30 GHz	centimetrové	cm
11	EHF	30 až 300 GHz	milimetrové	mm
12	-	300 až 3000 GHz	decimilimetrové	-

Tab.1: Rozdělení rádiového spektra na jednotlivá pásma dle ČTÚ [2]

Rádiové spektrum pro 2,4 - 2,5 GHz spadá do pásma UHF (Ultra high frequency), tedy do pásma, které je ohraničeno elektromagnetickými vlnami o hodnotě 300 MHz - 3000 MHz, šířené volným prostorem bez zvláštního vedení [1].

* Pozn.: Číslo pásma N platí od $0,3 \cdot 10^N$ Hz do $3 \cdot 10^N$ Hz

2.2 Rozměr elektromagnetické vlny

Rozměr elektromagnetické vlny λ je definován jako poměr c a f , kde c reprezentuje rychlost šíření elektromagnetického signálu ve vakuu a f reprezentuje jeho frekvenci. Rychlost šíření elektromagnetického signálu ve vakuu c je přibližně $3 \cdot 10^8$ [m/s].

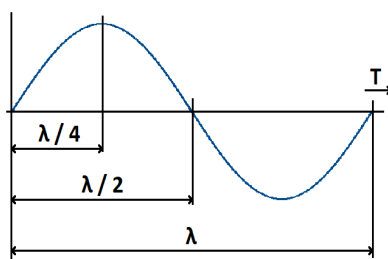
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [m, m/s, Hz] \quad (2.1)$$

V Tab.2 jsou uvedeny velikosti λ , $\lambda/2$ a $\lambda/4$ odpovídající frekvenci 2400, 2450 a 2500 MHz. Jak je z tabulky patrné, tak změna frekvence z 2400 MHz na 2500 MHz znamená změnu velikosti λ o 5 mm.

f [MHz]	2400	2450	2500
λ [cm]	12,5	12,25	12
$\lambda/2$ [cm]	6,25	6,12	6
$\lambda/4$ [cm]	3,12	3,06	3

Tab.2: Velikost λ , $\lambda/2$ a $\lambda/4$ pro frekvence 2400, 2450 a 2500 MHz

Na Obr.1 je vidět obecný průběh elektromagnetické vlny. Pro návrh antény je důležité znát konkrétní velikost λ , $\lambda/2$ nebo $\lambda/4$ odpovídající příslušné frekvenci.



Obr.1: Obecný průběh elektromagnetické vlny

2.3 Technologie pracující ve frekvenčním pásmu 2,4 - 2,5 GHz

Dle [3] jsou technologie pracující v části 2,4 - 2,5 GHz pásma ISM (Industrial, Scientific and Medical Radio Band), dále jen ISM pásmo například: WIFI, Bluetooth a ZigBee [3]. ISM pásmo je pásmo, v němž je umožněn volný rádiový provoz, bez nutnosti hrazení licenčních poplatků za využívání pásma, jehož platnost upravuje na území České republiky ČTÚ [4]. Frekvenčně je vymezena část ISM pásma od 2400 do 2483,5 MHz [4].

Bezdrátová komunikace v pásmu 2,4 – 2,5 GHz je založena na standardech definovaných IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) [5]. WIFI (Wireless LAN) je založena na skupině standardů IEEE 802.11, které zahrnují bezdrátovou komunikaci v lokálních sítích WLAN (Wireless Local Area Network) [5]. Bluetooth a Zigbee jsou založeny na standardech spadajících do skupiny IEEE 802.15, které zahrnují bezdrátovou komunikaci v osobních sítích WPAN (Wireless Personal Area Network) [5].

2.3.1 WIFI

WIFI (Wireless LAN) je soubor standardů pro bezdrátovou komunikaci v počítačových sítích, pracující nejčastěji v pásmu 2,4 a 5 GHz. Tento soubor standardů IEEE 802.11 obsahuje ještě doplňující písmeno b, g, n, ac, aj., kde toto písmeno označuje konkrétní typ standardu. Nejnovější verzí standardu uvedenou v roce 2018 je IEEE 802.11ax, která je také označována jako 6. generace WIFI (WIFI 6) [6].

Standartizace WIFI pásma je členěna na celkem 14 kanálů, z nichž se v Evropě používá jen 13 v 5 MHz rozestupech (vyjma 14. kanálu, kde jeho rozestup od 13. kanálu činí 12 MHz a využívá se pouze v Japonsku) [7]. Využívaná šířka pásma pro jednu síť je *22 MHz v okolí použitého kanálu [3]. Z důvodu vzájemného rušení by tedy nemohly být současně provozovány více než 3 sítě, za předpokladu šířky pásma 22 MHz pro jednu síť [6]. V Tab.3 jsou uvedeny frekvence jednotlivých kanálů v pásmu 2,4 GHz.

* 22 MHz je šířka pásma odpovídající IEEE 802.11b, pro jiné typy standardu 802.11x se šířka pásma liší

Kanál [-]	Kmitočet [GHz]	Kanál [-]	Kmitočet [GHz]
1	2,412	8	2,447
2	2,417	9	2,452
3	2,422	10	2,457
4	2,427	11	2,462
5	2,432	12	2,467
6	2,437	13	2,472
7	2,442	14	2,484

Tab.3: Přehled frekvencí kanálů WIFI dle IEEE 802.11 (převzato z [8])

2.3.2 Bluetooth

Bluetooth je bezdrátová komunikační technologie definovaná standardem IEEE 802.15.1, která je určena pro komunikaci na krátké vzdálenosti [9]. Stejně jako WIFI, se Bluetooth provozuje v ISM pásmu od 2400 do 2483,5 MHz [9]. Počet používaných kanálů je 79 v 1 MHz rozestupech [9]. Pásmo pro Bluetooth je ohraničeno dolním a horním ochranným pásmem, kde dolní ochranné pásmo je široké 2 MHz a horní ochranné pásmo 3,5 MHz [9]. Z důvodu možnosti vzájemného rušení s ostatními technologiemi používá Bluetooth metodu frekvenčních přeskoků nosného kmitočtu (FHSS), kde počet přeskoků je 1600 za sekundu v pseudonáhodném vzoru v kombinaci s nízkými vysílacími výkony [3][9]. Předpis pro výpočet nosného kmitočtu kanálu je uveden ve vzorci 2.2 [9].

$$f = 2402 + k, \text{ kde } k \in \langle 0 \div 78 \rangle \text{ [MHz]} \quad (2.2)$$

2.3.3 ZigBee

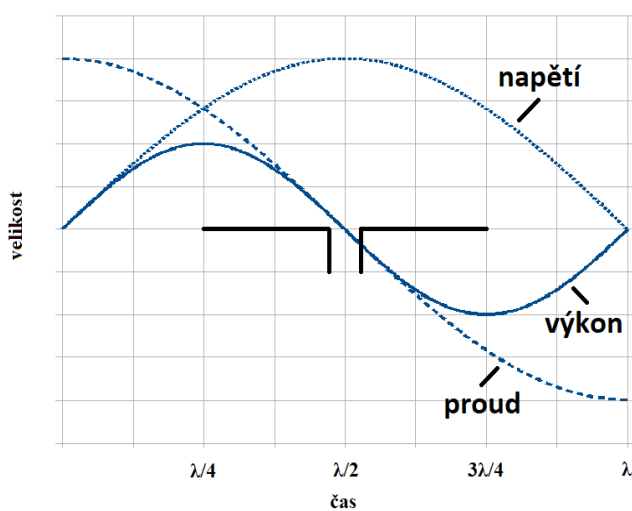
Architektura popisující Zigbee je definována standardem IEEE 802.15.4 [10]. Zigbee je stejně jako Bluetooth určen na komunikaci na krátké vzdálenosti – například pro komunikaci senzorů, s ohledem na nízkou spotřebu energie. V pásmu 2,4 GHz může využívat 16 kanálů s rozestupem 5 MHz, šířkou pásma 2 MHz a maximální přenosovou rychlostí až 250 kb/s [3][10]. V Tab.4 je uveden přehled jednotlivých frekvencí kanálů Zigbee v pásmu 2,4 GHz.

Kanál [-]	Kmitočet [MHz]	Kanál [-]	Kmitočet [MHz]
11	2405	19	2445
12	2410	20	2450
13	2415	21	2455
14	2420	22	2460
15	2425	23	2465
16	2430	24	2470
17	2435	25	2475
18	2440	26	2480

Tab.4: Přehled frekvencí Zigbee odpovídající standardu IEEE 802.15.4 (převzato z [11])

3 Parametry antén

Anténa je základní součástka v bezdrátovém telekomunikačním řetězci, kde přeměňuje elektromagnetické záření rádiového spektra na elektrický signál. Tento případ popisuje princip přijímací antény. Vysílací anténa pracuje na opačném principu – přeměňuje elektrický signál na elektromagnetické záření.



Obr.2: Průběh elektromagnetické vlny na půlvlnném dipólu [12] (volně upraveno)

Anténa o délce rovné polovině vlnové délky je nazývána půlvlnným dipól. Obr.2 zobrazuje časový průběh napětí, proudu a výkonu na půlvlnném dipólu. Maximální hodnota výkonu na půlvlnném dipólu je soustředěna na jeho koncích, tedy ve vzdálenosti $\lambda/4$ [12].

Nejrozšířenějším typem antény užívaném na DPS je anténa o velikosti $\lambda/4$, tedy čtvrtvlnný monopól, který je umístěn nad vodivou zemní plochou (GND) [13][14]. Vlivem principu zrcadlení se vytvoří na vodivé zemní ploše zrcadlový obraz prvku o stejné délce $\lambda/4$ [13]. Díky kombinaci prvku o čtvrtinové vlnové délce a jejím zrcadlovém obrazu o stejné vlnové délce vznikne výsledná anténa o délce $\lambda/2$ [13]. Čtvrtvlnný monopól je napájen na jeho dolním konci a vodivá zemní plocha působí jako druhý konec napájení [13]. Zisk čtvrtvlnného monopólu bude totožný s půlvlnným dipólem, tedy 2,14 dBi a impedance čtvrtvlnného monopólu bude poloviční ($36+j21 \Omega$) [13].

3.1 Základní parametry antén

Před uvedením nejdůležitějších parametrů antén je nutné zmínit, že veškeré parametry antén jsou vzájemně provázané. Dle [12] a [14] jsou zde uvedeny základní parametry antén:

Maximální přenesený výkon (Maximum Power Transfer)

K maximálnímu přenosu energie dochází, když je anténa řádně impedančně přizpůsobena, proto platí, že komplexní hodnota impedance připojeného přenosového vedení Z_0 je v ideálním případě totožná se vstupní impedancí antény Z_a , tak aby při přenosu nedocházelo ke ztrátám [12].

Komplexní koeficient odrazu Γ

Komplexní koeficient odrazu Γ je určen jako poměr amplitudy odražené a postupující vlny [12]. Jeho hodnotu lze spočítat ze vzorce 3.1 uvedeného níže, kde Z_a reprezentuje impedanci antény a Z_0 impedanci přenosového vedení (transmission line) :

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_0}{Z_a + Z_0} \quad (3.1)$$

Při impedančním přizpůsobení antény se pracuje s pojmy VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) a Return Loss [12]. VSWR je zkratka označující poměr napětí stojatých vln, pro které platí vzorec 3.2 [12]:

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{input} + V_{reflected}}{V_{input} - V_{reflected}} \quad VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.2)$$

$V_{max} [V]$ – napětíové maximum stojaté vlny

$V_{min} [V]$ – napětíové minimum stojaté vlny

Return Loss (RL) je označení poměru výkonu odražené a postupné vlny, udává se v dB [12]. Ideální anténa by měla mít hodnotu RL rovnu nekonečnu \rightarrow anténa by byla ideálně impedančně přizpůsobena. S_{11} (vstupní činitel odrazu) je záporná hodnota RL vyjádřena v dB [12].

$$S_{11} [dB] = 20 \cdot \log(\Gamma) = 20 \cdot \log\left(\frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}\right) \quad (3.3)$$

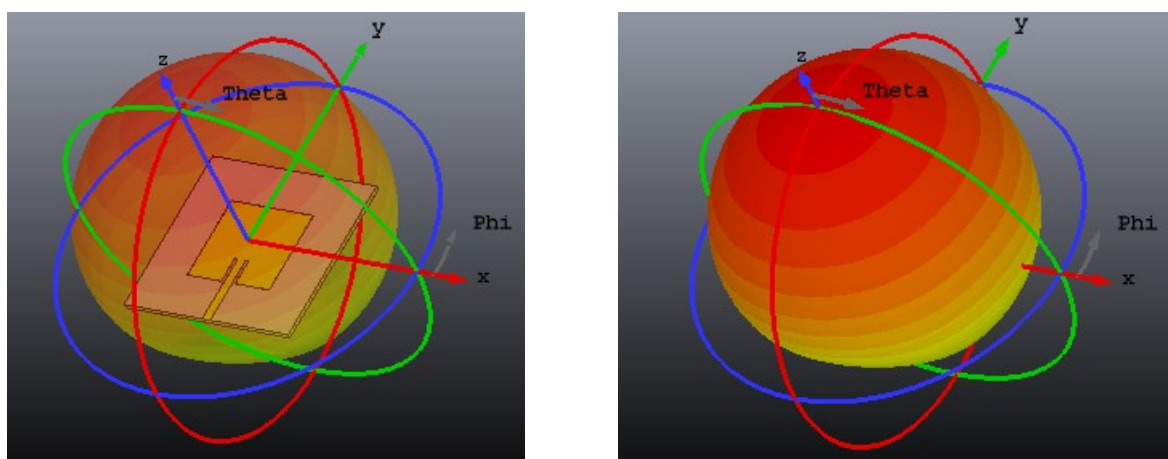
V Tab.5 níže je uveden přepočítání VSWR v závislosti na Return Loss (RL), procentuálního úbytku výkonových a napěťových ztrát. Pokud je hodnota Return Loss ≥ 10 dB, tak lze považovat anténní přizpůsobení za dostačující, tedy při hodnotě RL = 10 dB budou výkonové ztráty činit 9,6 % a 90,4 % energie bude dodáno do antény [12]. Napěťové ztráty budou činit 31,6 %.

VSWR [-]	S11 [dB]	RL [dB]	Udávané [%] Výkonové / Napěťové ztráty	Komplexní koeficient odrazu [-]
1,15	-23,1	23,1	0,49 / 7	0,07
1,9	-10	10	9,6 / 31,6	0,32
3	-6	6	25,1 / 50	0,5
10	-1,7	1,7	67,6 / 81,8	0,82

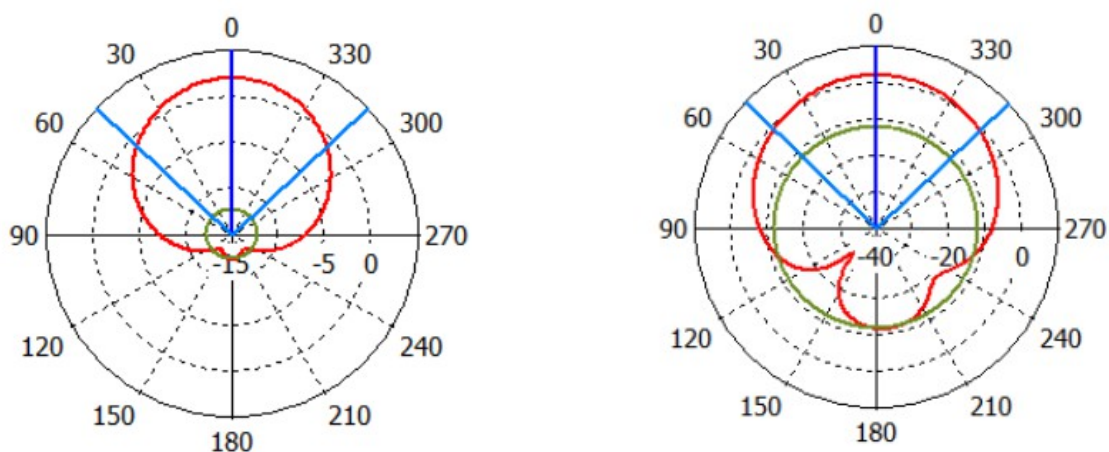
Tab.5: Tabulka přepočítaného VSWR na RL (převzato z [12], volně upraveno)

Vyzařovací charakteristika antény

Vyzařovací charakteristika antény graficky znázorňuje její vyzařovací vlastnosti [12]. Udává se pro řez v horizontální a vertikální rovině antény. Řez horizontální rovinou může být také definován, jako řez v ose XY a řez vertikální rovinou, jako řez v ose YZ ($\varphi = 90^\circ$) [12]. Vyzařovací charakteristiky jsou nejčastěji vyobrazeny v polárních souřadnicích [12]. Na Obr.3 je zobrazena vyzařovací charakteristika flíčkové antény ve 3D.



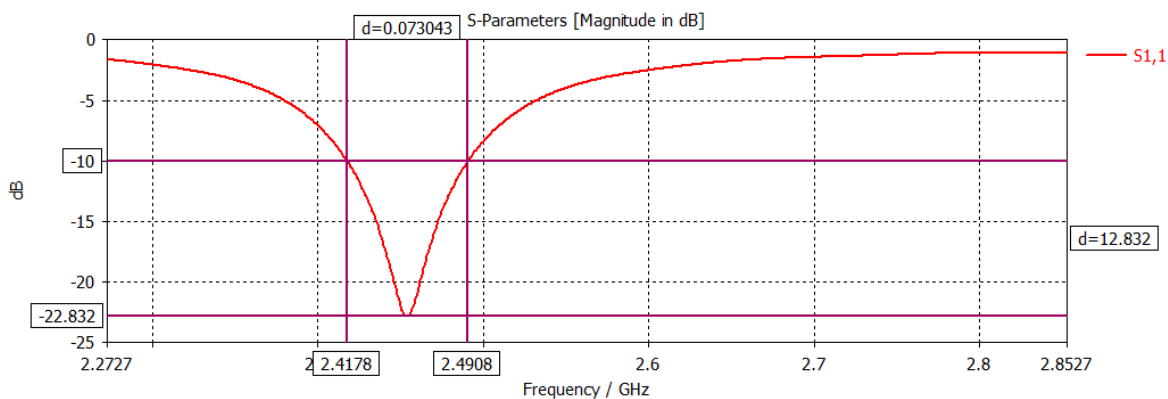
Obr.3: Příklad vyzařovací charakteristiky flíčkové antény ve 3D



Obr.4: Příklad vyzařovací charakteristiky v rovině E a H (vlevo rovina E, vpravo rovina H)

Šířka pásma

Šířka pásma udává frekvenční odezvu antény, pro hodnotu Return Loss (RL): $RL \geq 10 \text{ dB}$ [14]. Na Obr.5 je zobrazena závislost S_{11} na frekvenci, ze které lze určit šířku pásma B jako rozdíl kmitočtů. Pro případ uvedený na Obr.5 je $B = 73 \text{ MHz}$ (2490 – 2417 MHz).



Obr.5: Určení šířky pásma B u flíčkové antény

3.2 Druhy antén

Dle [12] a [14] lze mezi základní druhy antén vhodných pro pásmo 2,4 – 2,5 GHz zařadit:

- 1) Drátové antény (Wire antennas),
- 2) Čipové antény (Chip antennas),
- 3) Antény integrované na DPS (PCB antennas).

Drátové antény

Drátovou anténu najdeme nejčastěji například ve formě externí antény u WIFI routeru. Drátová anténa může být také integrována přímo na desce plošného spoje, kdy je drát o délce rovné čtvrtině vlnové délky umístěn nad vodivou zemní plochou [14]. Drátová anténa může prostorově odpovídat tvaru šroubovice, smyčky nebo rovného drátu, díky tomu také dosahuje optimálního zisku a šířky pásma [14]. Velkou výhodou jsou také minimální finanční náklady [14]. Mezi nevýhody patří velká velikost antény a obtížná integrace na DPS [14].

Čipové antény

Čipové antény jsou vhodné pro použití v aplikacích, kde velikost antény hraje hlavní roli. Díky svým malým rozměrům je lze snadno integrovat na DPS. Nevýhodou je však jejich vyšší pořizovací cena. Při navrhování obvodu je nutné brát v úvahu, že tyto antény jsou velice citlivé na velikost zemní plochy (GND) a nelze u nich měnit dodatečně jejich rezonanční frekvenci, jako u antén integrovaných na DPS, kde lze změnou délky anténu vyladit na požadovaný kmitočet [14]. Úprava rezonanční frekvence u čipové antény by byla možná přidáním dalších ladících prvků k návrhu, což však ale mnohonásobně zvyšuje cenu [14].

Antény integrované na DPS

Anténa integrovatelná na DPS může být nejčastěji ve formě (tvaru): IFA antény (Inverted F antenna), meandrové antény (Meandered antenna), nebo například kruhového tvaru, v závislosti na typu antény dostupné volné plochy pro motiv antény [14]. Integrované antény zabírají větší plochu na DPS, dosahují menší účinnosti než drátové antény, ale jsou levné a snadno vyrobitelné [14].

4 Návrh antény integrované na DPS

4.1 Povrchový jev (Skin efekt)

Povrchový jev se uplatňuje při vysokých frekvencích, kdy se elektrický proud šíří pouze v blízkosti povrchu vodiče. Při návrhu antény je proto nutné určit hodnotu hloubky vniku, která se určí dle následujícího vzorce 4.1 [15]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \gamma}} \quad [m], \quad (4.1)$$

kde γ je měrná elektrická vodivost [S/m], $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] je permeabilita vakua, μ_r je relativní permeabilita materiálu [-] a f je frekvence [Hz] [15].

Po dosazení typických hodnot pro měď $\gamma = 5,96 \cdot 10^7$ [S/m], $\mu_r = 1$ [-] a $f = 2,45$ [GHz] vychází hloubka vniku 1,317 μm .

Pro správnou funkci antény se proto doporučuje, aby svrchní vrstva mědi byla nejméně o tloušťce 3x větší, než je vypočítaná hodnota hloubky vniku.

Pro standardně využívanou tloušťku mědi na DPS o tloušťce 35 μm , lze tedy vliv skin efektu zanedbat.

4.2 Parametry materiálu substrátu

Mezi parametry substrátu ovlivňující výsledné vlastnosti antény (zisk, šířku pásma, aj.) integrované na DPS patří zejména tloušťka substrátu, relativní permitivita materiálu substrátu ϵ_r a ztrátový činitel (ztrátový tangent) $\tan \delta$, kde relativní permitivita a ztrátový tangent jsou frekvenčně závislé parametry [16].

Pro *vysokofrekvenční použití je vhodný materiál, který je cenově dostupný a má optimální materiálové vlastnosti, tímto nepoužívanějším materiálem je FR4 (Fiber Glass

* Vysokofrekvenční použití materiálu FR4 je omezeno (doporučováno) maximálně v řádech stovek MHz

Epoxy Laminate). Avšak je důležité zmínit, že parametry materiálu FR4 nejsou vždy zcela stabilní (stálé), z hlediska různých typů výrobních tolerancí, postupů výroby či kvality, nebo teplotních faktorů [16]. Hodnota relativní permitivity ϵ_r se může dle [16] pohybovat v relativně širokém rozsahu hodnot od *3,9 do 4,6 [16].

Pro vysokofrekvenční aplikace (řádově desítky GHz) se doporučuje používat materiály s odpovídajícími vlastnostmi pro vysokofrekvenční použití, vhodným materiálem je například Rogers 4003 nebo Rogers RO4350B od firmy Rogers Corporation [17].

FR4

FR4 je označení pro laminát ze skelných vláken s nalaminovanou měděnou fólií v jednovrstvém nebo vícevrstevném provedení, kde FR znamená “Flame Retardent“. FR4 je nejpoužívanějším materiálem z důvodu své snadné dostupnosti a především nízké ceny. Typická hodnota relativní permitivity je $\epsilon_r = 4,3$, avšak rozptyl této hodnoty může být velice široký, v závislosti na provedení, výrobcí a relativně vysokých tolerancích. Typická hodnota ztrátového tangentu je $\tan \delta = **0,2-0,3$ [16]. Konkrétní hodnoty relativní permitivity a ztrátového tangentu by měly být dostupné v průvodní dokumentaci od jejího výrobce.

Rogers 4003

Řada Rogers RO4000 je založena na vyztuženém hydrokarbonovém/keramickém laminátu s nízkou dielektrickou tolerancí a nízkými ztrátami [17]. Tento materiál je tedy ideální pro vysokofrekvenční použití (řádově desítky GHz). Typická hodnota relativní permitivity ϵ_r je dle [16] pro RO4003 ***3,4 a ztrátový tangens $\tan \delta = ****0,0027$ [16]. Rogers 4003 je díky větší stabilitě (stálosti) materiálových parametrů substrátu také několikanásobně dražší, než je cena FR4.

* Hodnota ϵ_r pro FR4 je 3,9 – 4,6 [-] je udávána pro 1 MHz – převzato z [16]
** Hodnota $\tan \delta$ pro FR4 je 0,02-0,03 – převzato z [16]
*** Hodnota ϵ_r pro Rogers 4003 je 3,4 a je uvedena pro 10 GHz – převzato z [16]
**** Hodnota $\tan \delta$ pro Rogers 4003 je 0,0027 – převzato z [16]

Další materiály

V Tab.6 jsou uvedeny další příklady materiálů s rozdílnou relativní permitivitou. Větší hodnota relativní permitivity ϵ_r totiž umožňuje redukci rozměrů (velikosti) desky plošného spoje.

Materiál	ϵ_r [-]	$\tan \delta$ [-]
Rogers 5880	2,2	0,0009
Rogers 6006	6,15	0,0019
Rogers 3010	10,2	0,0035

Tab.6: Vybrané materiály pro DPS a jejich vlastnosti (převzato z [16])

4.3 Délka čtvrtvlnného monopólu umístěném na DPS

Z důvodu snadné výroby a cenového hlediska se musí s integrací antény na DPS počítat již v samotném navrhovaném motivu (layoutu). Důležitou roli hraje také umístění antény a velikost vodivé zemní plochy na DPS tak, aby byly splněny základní předpoklady pro správnou funkci antény - například neumisťovat měď pod samotný funkční motiv antény.

Jak již bylo uvedeno v předchozí části BP, vlnová délka λ pro frekvenci 2450 MHz je přibližně 122,5 mm, tato hodnota však odpovídá velikosti vlnové délky ve volném prostoru (vzduchu). Vlnová délka λ_g (Guided wavelength) pro element umístěný na motivu substrátu FR4 se však bude lišit [18]. Dle [18] bude velikost λ_g pro substrát FR4 s relativní permitivitou $\epsilon_r = 4,4$ a tloušťkou substrátu 1,6 mm následující [18]:

$$\lambda_g = 0,75 \cdot \lambda = 0,75 \cdot 122,5 \approx 92 \text{ mm} , \quad (4.2)$$

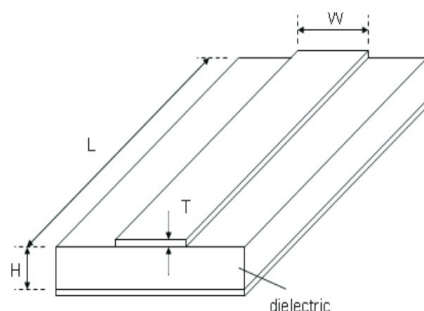
aproximovaná délka čtvrtvlnného monopólu na substrátu FR4 pak bude:

$$L = \frac{\lambda_g}{4} = 23 \text{ mm} , \quad (4.3)$$

za předpokladu, že velikost dostupné vodivé zemní plochy (GND) se blíží k ideálu [18].

4.4 Impedanční přizpůsobení na 50 Ω

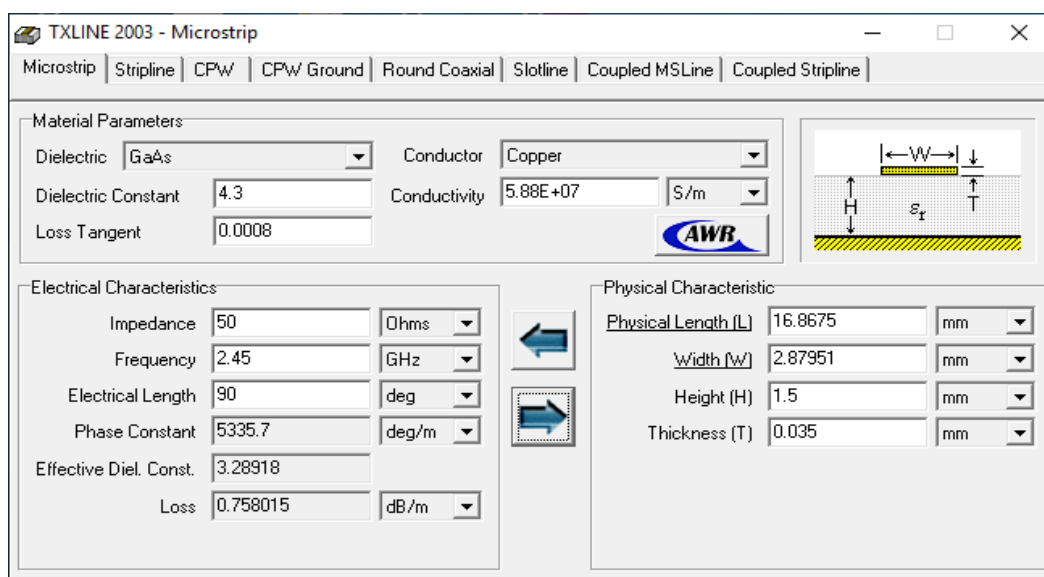
Přizpůsobení antény pro nejtýpější hodnotu charakteristické impedance 50 Ω lze řešit mnoha způsoby, nejjednodušší metoda je pomocí mikropáskového vedení.



Obr.6: Příklad mikropáskového vedení (převzato z [19])

Na Obr.6 je příklad mikropáskového vedení, kde H je výška substrátu, T tloušťka vrstvy mědi, L délka mikropásku a W šířka mikropásku [19].

Pro výpočet rozměrů mikropásku je možné využít počítačový program, jmenovitě například AppCAD nebo TXLINE 2003. Níže je uvedena tabulka Tab.7 přepočtů šířky mikropásku W_v v závislosti na tloušťce substrátu $H = 1,5$ a $1,6$ mm a vybraných hodnotách relativní permitivity při uvažované rezonanční frekvenci 2,45 GHz a charakteristické impedanci 50 Ω .



Obr.7: Výpočet rozměrů mikropásku v programu TXLINE 2003

ϵ_r [-]	4	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8
H = 1,5 [mm]	3,03	2,97	2,92	2,87	2,82	2,77	2,73	2,69	2,64
H = 1,6 [mm]	3,23	3,17	3,12	3,06	3,01	2,96	2,91	2,87	2,82

Tab.7: Šířka mikropásku W_v v závislosti na tloušťce a relativní permitivitě substrátu

Jak je z Tab.7 patrné, tak pro substrát FR4 s tloušťkou 1,5 mm a relativní permitivitou 4,3 vychází šířka mikropáskového vedení 2,87 mm.

4.5 Návrh antén

Návrhy antén a jejich simulace byly realizované pro rezonanční frekvenci v rozsahu 2,4 – 2,5 GHz, ideálně v blízkosti $f_0 = 2,45$ GHz na nejběžněji dostupnou DPS s fotocitlivou vrstvou z materiálu FR4 s následujícími nominálními hodnotami:

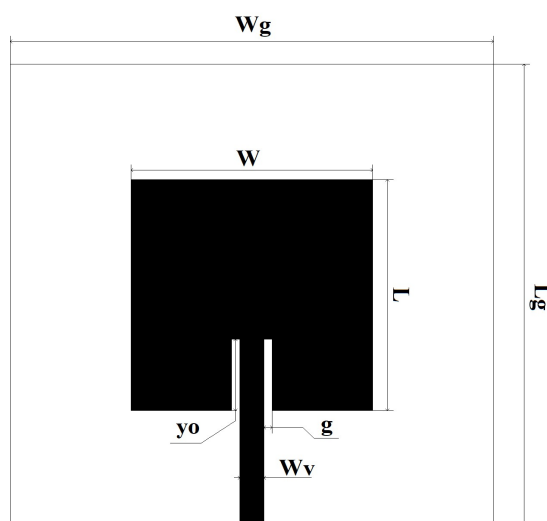
$\epsilon_r = 4,3$ [-] - relativní permitivita substrátu FR4

$H = 1,5$ mm – tloušťka substrátu FR4

$T = 35$ μm – tloušťka měděné vrstvy

4.5.1 Flíčková anténa

Dle [20] byly převzaty vzorce pro výpočet rozměrů obdélníkové flíčkové antény s vnořeným mikropáskovým vedením (Rectangular microstrip patch antenna with inset feed). Na Obr.8 je uveden model flíčkové antény (horní strana), spodní strana je celá pokryta měděnou vrstvou.



Obr.8: Model flíčkové antény s vnořeným mikropáskem

Výpočet šířky flíčku W , kde $c = 3 \cdot 10^8$ [m/s]:

$$W = \frac{c}{2 \cdot f_0 \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} = 37,61 \text{ mm} \quad (4.4)$$

Výpočet efektivní hodnoty relativní permitivity ϵ_{eff} :

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \left(1 + \frac{12 \cdot H}{W}\right)^{(-1/2)} = 4,007 \quad (4.5)$$

Výpočet efektivní délky flíčku L_{eff} :

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2 \cdot f_0 \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} = 30,58 \text{ mm} \quad (4.6)$$

Efektivní zkrácení délky flíčku ΔL :

$$\Delta L = 0,412 \cdot H \cdot \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0,3) \cdot \left(\frac{W}{H} + 0,264\right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0,258) \cdot \left(\frac{W}{H} + 0,8\right)} = 0,69 \text{ mm} \quad (4.7)$$

Finální délka flíčku L :

$$L = L_{\text{eff}} - 2 \cdot \Delta L = 29,2 \text{ mm} \quad (4.8)$$

Výpočet délky vnoření mikropásku y_0 do motivu antény dle [21] a [22]:

$$y_0 = 10^{-4} \cdot (0,001699 \cdot \epsilon_r^7 + 0,13761 \cdot \epsilon_r^6 - 6,1783 \cdot \epsilon_r^5 + 93,187 \cdot \epsilon_r^4 - 682,69 \cdot \epsilon_r^3 + 2561,9 \cdot \epsilon_r^2 - 4043 \cdot \epsilon_r + 6697) \cdot \frac{L}{2} = 8,9 \text{ mm} \quad (4.9)$$

Velikost g byla ponechána o velikosti 1 mm dle [21].

Rozměr šířky mikropáskového vedení je:

$$W_v = 2,87 \text{ mm}$$

Finální rozměry DPS a zemní plochy (GND) pak jsou dle [21]:

$$W_g = 2 * W = 75,22 \text{ mm} \quad (4.10)$$

$$L_g = 2 * L = 58,4 \text{ mm} \quad (4.11)$$

W [mm]	37,61
L [mm]	29,2
yo [mm]	8,9
g [mm]	1
Wv [mm]	2,87
Wg [mm]	75,22
Lg [mm]	58,4

Tab.8: Vypočítané rozměry obdélníkové flíčkové antény

V kapitole 6.1 je uvedena simulace obdélníkové flíčkové antény, kde v simulačním SW bylo dosaženo rezonanční frekvence 2,396 GHz při $S_{11} = -20,54$ dB a šířce pásma 62 MHz. V kapitole 6.1 je dále uveden výsledek optimalizace obdélníkové antény, kde byla anténa upravena změnou rozměrů flíčku (šířky W a délky L) na rezonanční frekvenci v blízkosti 2,45 GHz.

Optimalizací obdélníkové flíčkové antény na čtvercovou flíčkovou anténu o rozměrech flíčku W a L = 29 mm lze dosáhnout kompaktnějších rozměrů antény. V tomto případě bude rezonanční frekvence 2,454 GHz při $S_{11} = -22,87$ dB a šířce pásma přibližně 72 MHz. V Tab.9 jsou uvedeny rozměry čtvercové flíčkové antény.

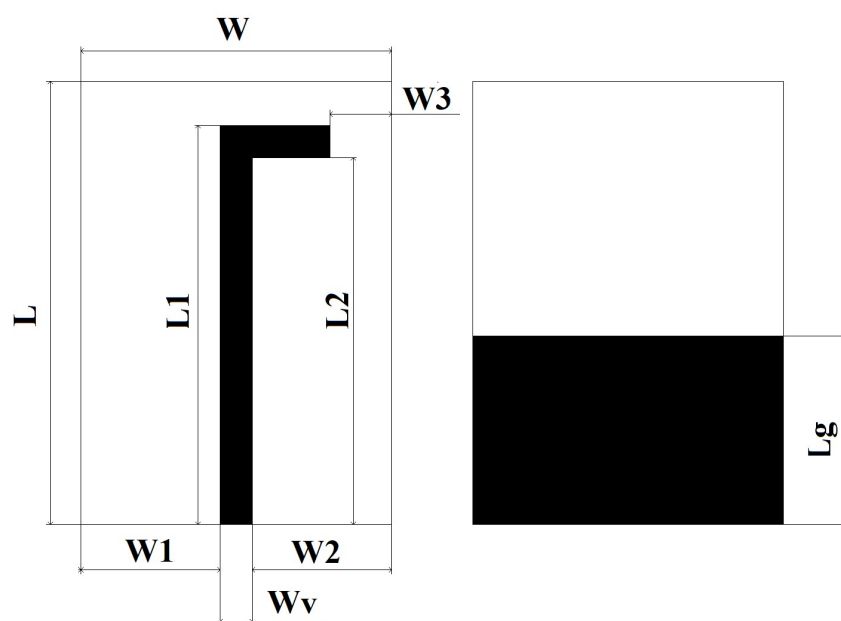
W [mm]	29
L [mm]	29
yo [mm]	8,9
g [mm]	1
Wv [mm]	2,87
Wg [mm]	58
Lg [mm]	58

Tab.9: Rozměry čtvercové flíčkové antény

Z důvodu omylu byla namísto čtvercové flíčkové antény vyrobena a odměřena původně navrhnutá flíčková anténa s rozměry uvedenými v Tab.8 výše. Simulace a měření vzorků antén v kapitolách 6.1 a 7 byly proto doplněny o variantu původní obdélníkové flíčkové antény na DPS o tloušťce 1 mm.

4.5.2 Monopólová anténa ve tvaru L

Anténa byla navržena na dvouvrstvou DPS o rozměrech $W = 30$ mm a $L = 38$ mm, vycházející z rozměrů DPS uvedených ve [23]. Motiv antény byl nejdříve navrhnout jako rovný monopól o šířce $W_v = 2,87$ mm, který byl ale následně za pomoci simulace upraven (zahnut) do nynější podoby. Další úpravou bylo dosaženo finálních rozměrů $W = 28$ mm, $L = 40$ mm a $L_g = 17$ mm. Díky optimalizaci bylo docíleno rezonanční frekvence 2,45 GHz úpravou délky L_1 a délky zahnutí motivu na horní straně antény. Finální rozměry jsou uvedeny v Tab.10.



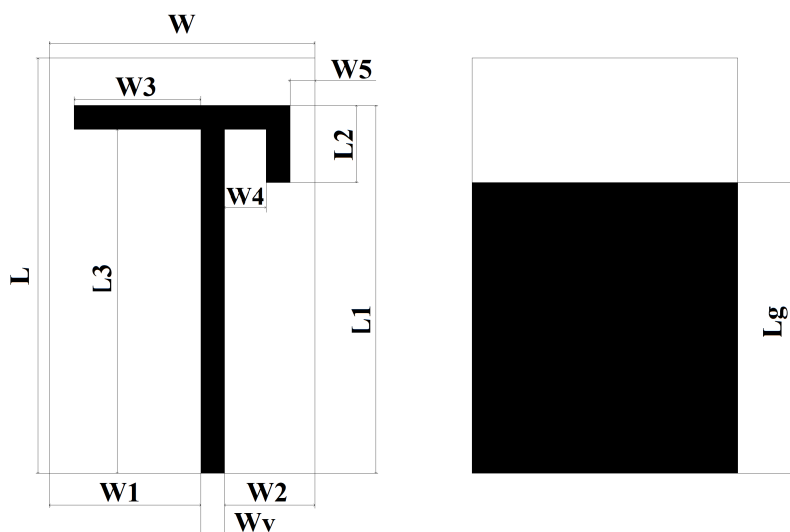
Obr.9: Model antény ve tvaru L, vlevo horní strana, vpravo spodní strana

W [mm]	28
L [mm]	40
L1 [mm]	36
L2 [mm]	33,13
Lg [mm]	17
W1 [mm]	12,56
W2 [mm]	12,56
W3 [mm]	5,57
Wv [mm]	2,87

Tab.10: Rozměry antény ve tvaru L

4.5.3 IFA anténa

Základní model IFA antény vychází z modelu antény uveřejněném ve [24], kde byly převzaty rozměry DPS ($W = 32$ mm a $L = 50$ mm) a rozměry vodivé zemní plochy ($L_g = 35$ mm). Základní šířka měděného motivu byla určena na $W_v = 2,87$ mm. Postupnou úpravou bylo docíleno rezonanční frekvence 2,44 GHz, při $S_{11} = -13,16$ dB. Finální rozměry jsou uvedeny v Tab.11.



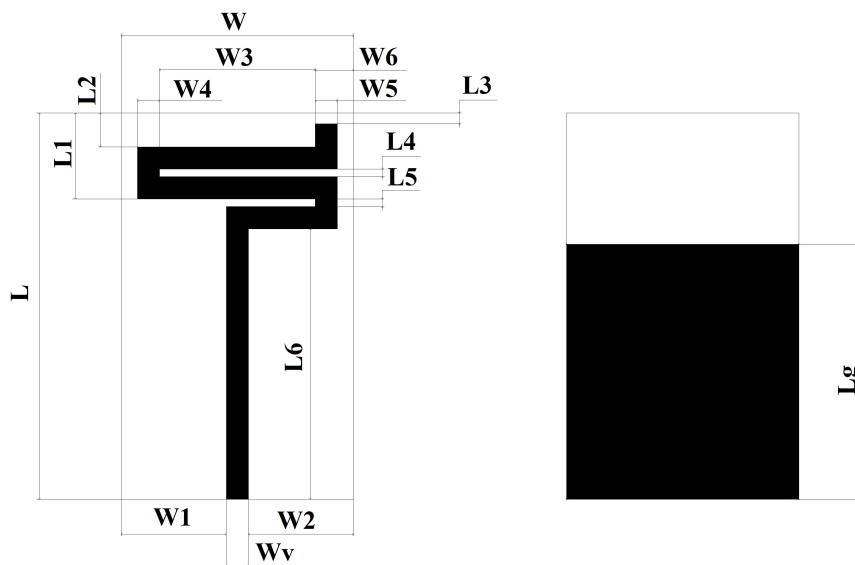
Obr.10: Model IFA antény, vlevo horní strana, vpravo spodní strana

W [mm]	32
L [mm]	50
L1 [mm]	44,27
L2 [mm]	9,27
L3 [mm]	41,4
Lg [mm]	35
W1 [mm]	18,26
W2 [mm]	10,87
W3 [mm]	15,26
W4 [mm]	5
W5 [mm]	3
Wv [mm]	2,87

Tab.11: Rozměry IFA antény

4.5.4 Meandrovitá anténa

Pro model meandrovité antény byly použity rozměry DPS $W = 30$ mm, $L = 50$ mm. Meandrovitá anténa byla namodelována o šířce měděného motivu na horní straně $W_v = 2,87$ mm. Postupnou úpravou a optimalizací bylo docíleno rezonanční frekvence 2,43 GHz, při hodnotě $S_{11} = -14,4$ dB. Výsledné rozměry jsou uvedeny v Tab.12.



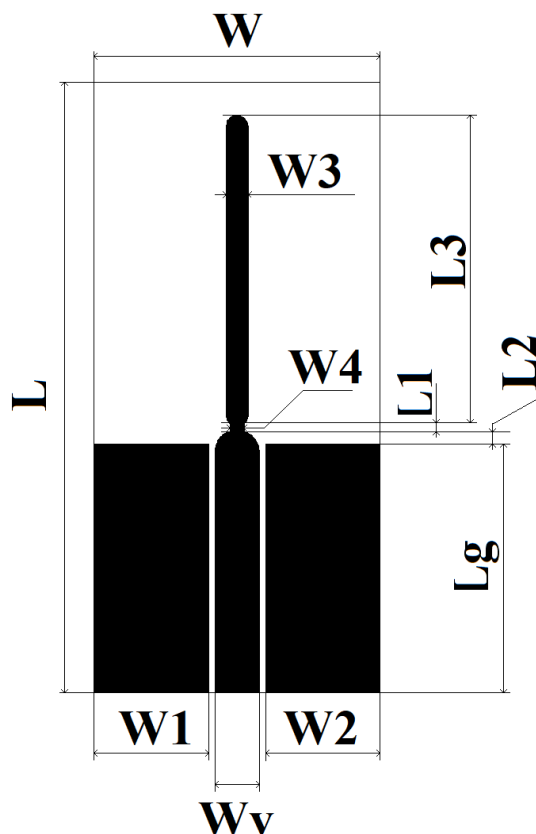
Obr.11: Model meandrovité antény, vlevo horní strana, vpravo spodní strana

W [mm]	30	Lg [mm]	33
L [mm]	50	W1 [mm]	13,57
L1 [mm]	11,13	W2 [mm]	13,57
L2 [mm]	4,39	W3 [mm]	20,09
L3 [mm]	1,39	W4 [mm]	2,87
L4 [mm]	1	W5 [mm]	2,87
L5 [mm]	1	W6 [mm]	2,09
L6 [mm]	35	Wv [mm]	2,87

Tab.12: Rozměry meandrové antény

4.5.5 Monopólová anténa - jednovrstvá

Návrh vychází z modelu antény čtvrtvlnného monopólu uveřejněné v [18], realizovaném na jednovrstvou desku plošného spoje. Rozměry DPS byly stanovené na $W = 20$ mm a $L = 45$ mm. Motiv antény byl namodelován a optimalizován s výslednou frekvencí určenou na 2,503 GHz s $S_{11} = -38,02$ dB. Rozměry DPS jsou uvedené v Tab.13.



Obr.12: Model monopólové antény na jednovrstvé DPS

W [mm]	20	W1 [mm]	8,1
L [mm]	45	W2 [mm]	8,1
L1 [mm]	0,6	W3 [mm]	1,5
L2 [mm]	0,9	W4 [mm]	1
L3 [mm]	21,9	Wv [mm]	2,87
Lg [mm]	18		

Tab.13: Rozměry monopólové antény na jednovrstvé DPS

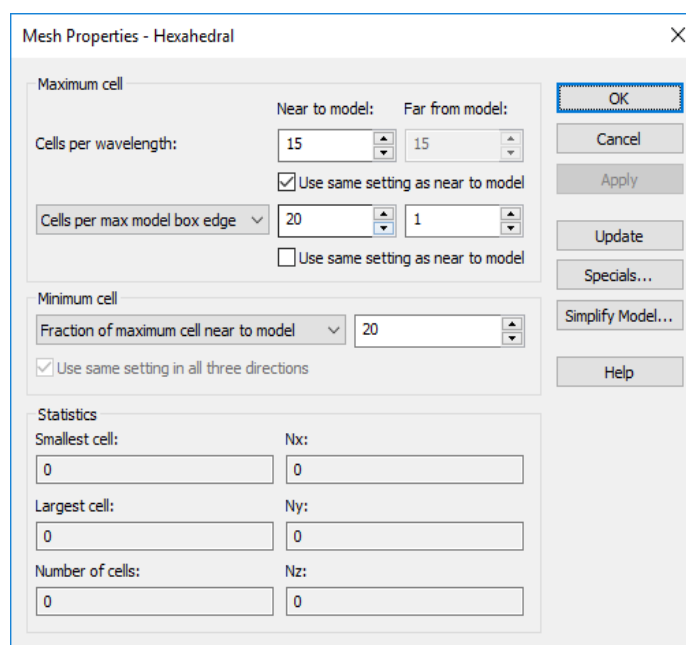
5 Simulační program CST Studio

Pro simulaci antén byl použit simulační program CST Studio, který slouží pro návrh, simulaci a optimalizaci vysokofrekvenčních obvodů.

5.1 Nastavení simulace / optimalizace v programu CST Studio

Jednotlivé motivy antén byly překresleny do programu CST Studio, s odpovídajícími velikostmi. Antény byly simulovány metodou analýzy časové domény. Přesnost simulace byla u prvotních simulací nastavena na výchozí hodnoty v CST Studiu, u dalších simulací byla pak přenastavena na větší přesnost. Doba trvání simulace byla dána nastavením přesnosti a výpočetním výkonem počítače.

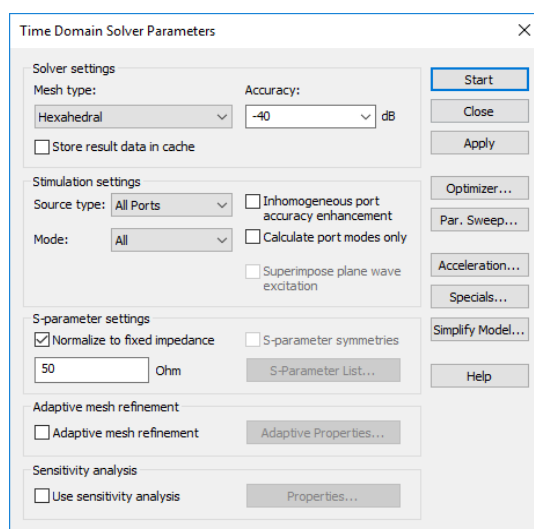
→ Home – Mesh – Mesh Properties: Hexadecimal



Obr.13: Výchozí nastavení přesnosti sítě simulace v CST Studiu

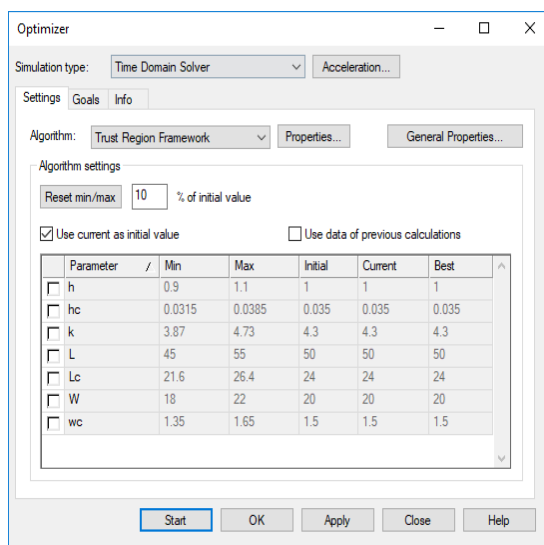
Před spuštěním simulace bylo nastaveno buzení antény 50 Ω impedancí, případně ještě *Adaptive mesh refinement* (Adaptivní zjemnění sítě) k docílení větší přesnosti simulace antény.

→ Home – Simulation – Setup Solver – Time Domain Solver



Obr.14: Finální nastavení před spuštěním simulace

CST Studio nabízí i možnost využití integrovaného SW pro optimalizaci, kde se dále určí zvolené parametry k optimalizaci, jejich rozsahy hodnot a definované podmínky (*Goals*) řešené pomocí analýzy časové domény. V optimalizačním SW jsem používal změnu rozměrů k maximalizaci hodnoty S11, při zachování rezonanční frekvence a charakteristické impedance 50 Ω .

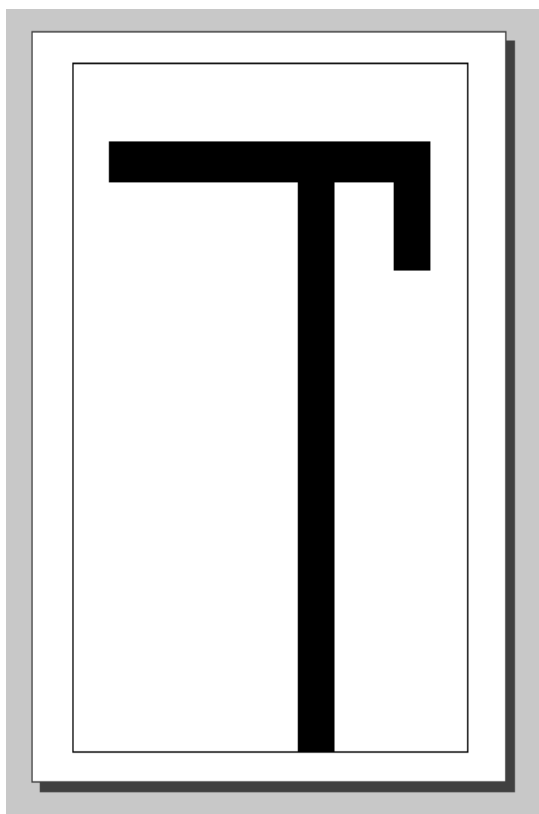


Obr.15: Nabídka parametrů v integrovaném SW optimalizeru CST Studia

5.2 Export a úprava výsledného motivu antény

Po dokončení návrhu a simulace byly výsledné motivy antén vyexportovány přímo ve formátu .dxf a .gbr (Gerber soubor) po jednotlivých vrstvách pro další úpravu motivu nutných k finální výrobě antén.

Finální úprava motivu probíhala v programu LibreCAD pod freeware licenci. Následně byl z programu LibreCAD vygenerován finální motiv antény, který byl zaslán k její výrobě.

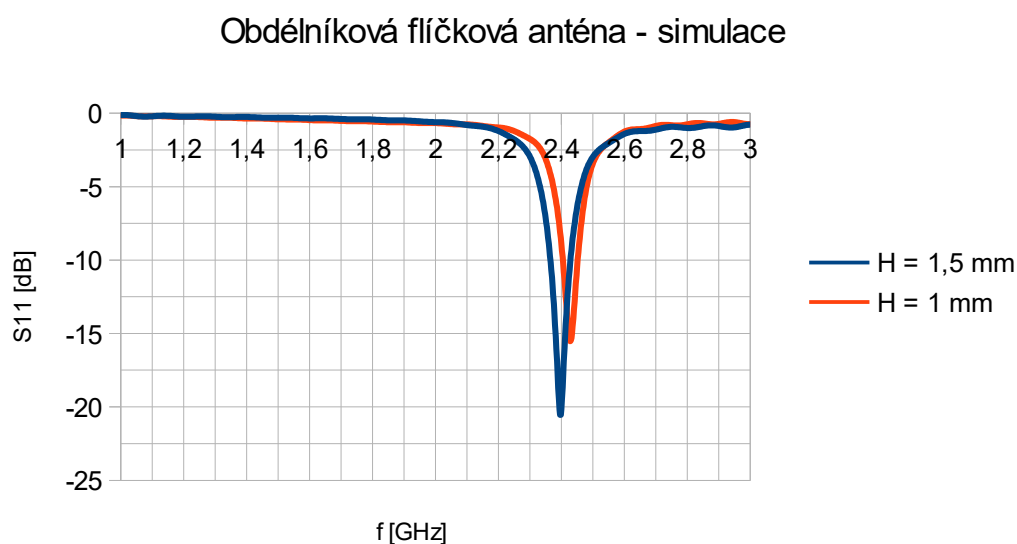


Obr.16: Upravený motiv antény v programu LibreCAD

6 Simulace antén

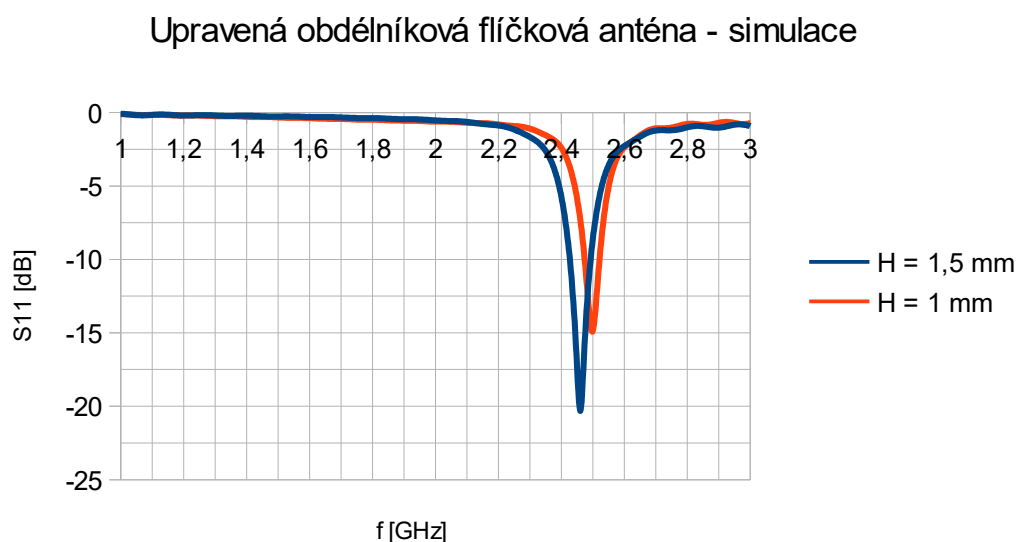
6.1 Flíčková anténa

Obdélníková flíčková anténa byla namodelována a nasimulována s vypočítanými hodnotami uvedenými v Tab.8. Ve výsledné simulaci byla hodnota parametru vstupního činitele odrazu (S11) -20,54 dB, při frekvenci 2,396 GHz, pro tento případ by byla šířka pásma 62 MHz (2,428-2,366 GHz). Ve společném grafu na Obr.17 je uvedena závislost S11 na frekvenci pro tloušťku substrátu 1,5 a 1 mm, pro $H = 1,5$ mm: $f_0 = 2,396$ GHz a $S_{11} = -20,54$ dB, $H = 1$ mm: $f_0 = 2,428$ GHz a $S_{11} = -15,52$ dB $\rightarrow B = 44$ MHz (2,45 – 2,406 GHz).



Obr.17: Graf závislosti S11 na frekvenci – obdélníková flíčková anténa

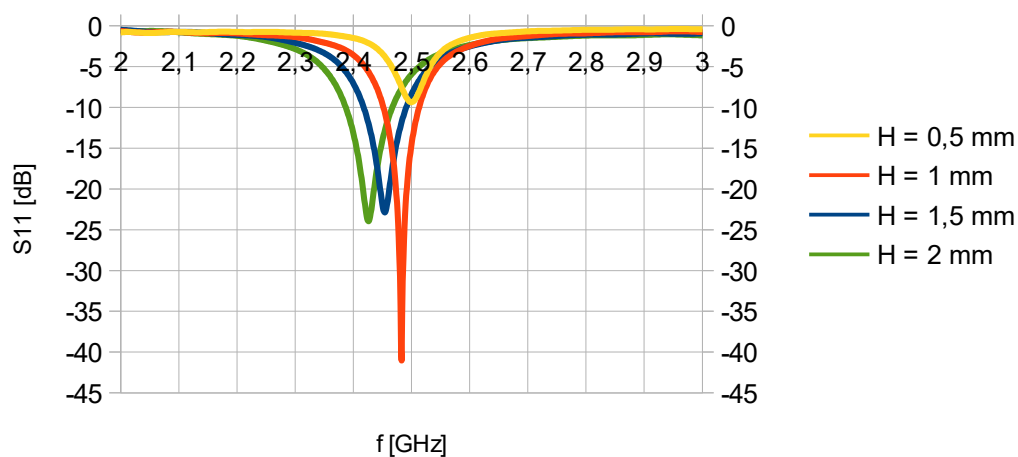
Obdélníková anténa byla následně upravena tak, aby rezonanční frekvence byla co možná nejpřesněji k požadované frekvenci 2,45 GHz. Toho bylo docíleno změnou rozměrů flíčku z $W = 37,61$ mm na 37 mm a $L = 29,2$ mm na 28,2 mm (a tedy i finálních rozměrů DPS na $W_g = 74$ mm a $L_g = 56,4$ mm). Výsledná frekvenční závislost na parametru S11 je zobrazena na Obr.18 pro tloušťku substrátu 1,5 mm a 1 mm. Pro $H = 1,5$ mm: $f_o = 2,46$ GHz a $S_{11} = -20,32$ dB $\rightarrow B = 64$ MHz (2,492 – 2,428 GHz), pro $H = 1$ mm: $f_o = 2,498$ GHz a $S_{11} = -14,93$ dB $\rightarrow B = 46$ MHz (2,52 – 2,474 GHz).



Obr.18: Graf závislosti S11 na frekvenci – upravená obdélníková flíčková anténa

V rámci další simulace byla obdélníková flíčková anténa upravena do podoby kompaktnější čtvercové flíčkové antény o straně $W = L = 29$ mm. Na Obr.19 je uvedena grafická závislost S11 na frekvenci pro tloušťku substrátu 2, 1,5, 1 a 0,5 mm. Pro $H = 2$ mm: $f_o = 2,426$ GHz a $S_{11} = -23,94$ dB $\rightarrow B = 80$ MHz (2,467 – 2,387 GHz), pro $H = 1,5$ mm: $f_o = 2,454$ GHz a $S_{11} = -22,87$ dB $\rightarrow B = 72$ MHz (2,49 – 2,418 GHz), pro $H = 1$ mm: $f_o = 2,486$ GHz a $S_{11} = -41,03$ dB $\rightarrow B = 60$ MHz (2,512 – 2,452 GHz), pro $H = 0,5$ mm: $f_o = 2,5$ GHz a $S_{11} = -9,37$ dB, jelikož zde není pokles větší, než -10 dB, tak šířku pásma nelze určit.

Čtvercová flíčková anténa - simulace

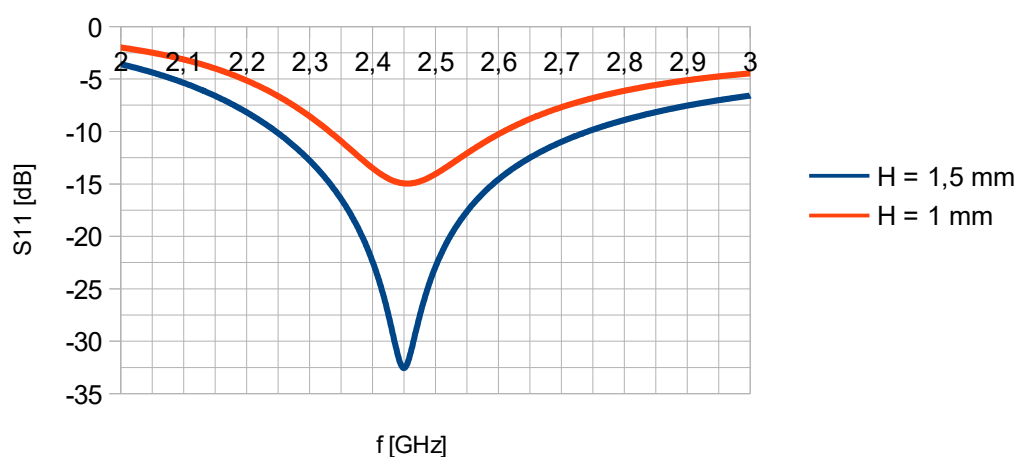


Obr.19: Graf závislosti S11 na frekvenci – čtvercová flíčková anténa

6.2 Monopólová anténa ve tvaru L

Na Obr.20 je vynesena závislost S11 na frekvenci pro tloušťku substrátu 1,5 a 1 mm. Pro $H = 1,5$ mm platí: $f_0 = 2,45$ GHz a $S_{11} = -32,56$ dB $\rightarrow B = 495$ MHz (2,742 - 2,247 GHz), pro $H = 1$ mm: $f_0 = 2,455$ GHz a $S_{11} = -14,96$ dB $\rightarrow B = 276$ MHz (2,608 – 2,332 GHz).

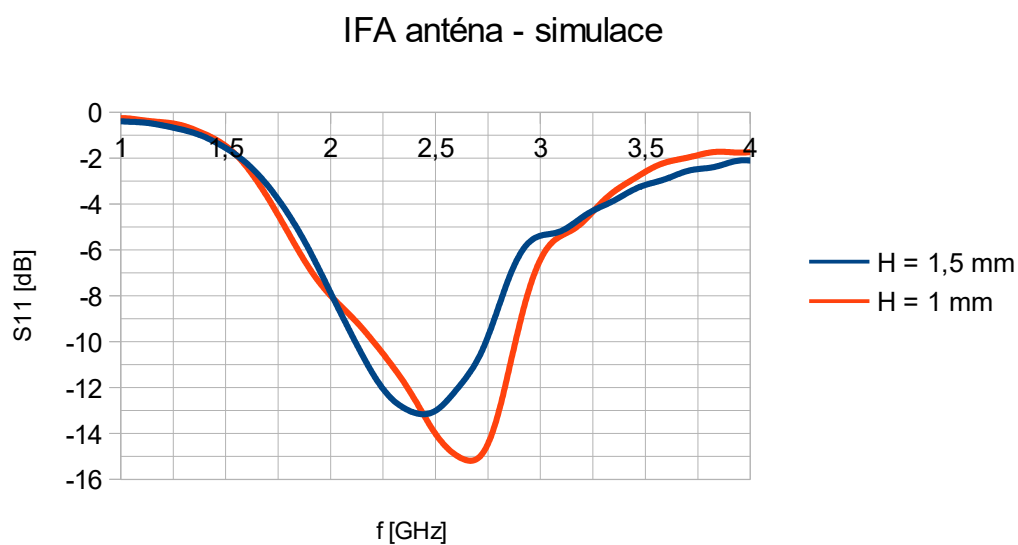
Monopólová anténa ve tvaru L - simulace



Obr.20: Graf závislosti S11 na frekvenci – monopólová anténa ve tvaru L

6.3 IFA anténa

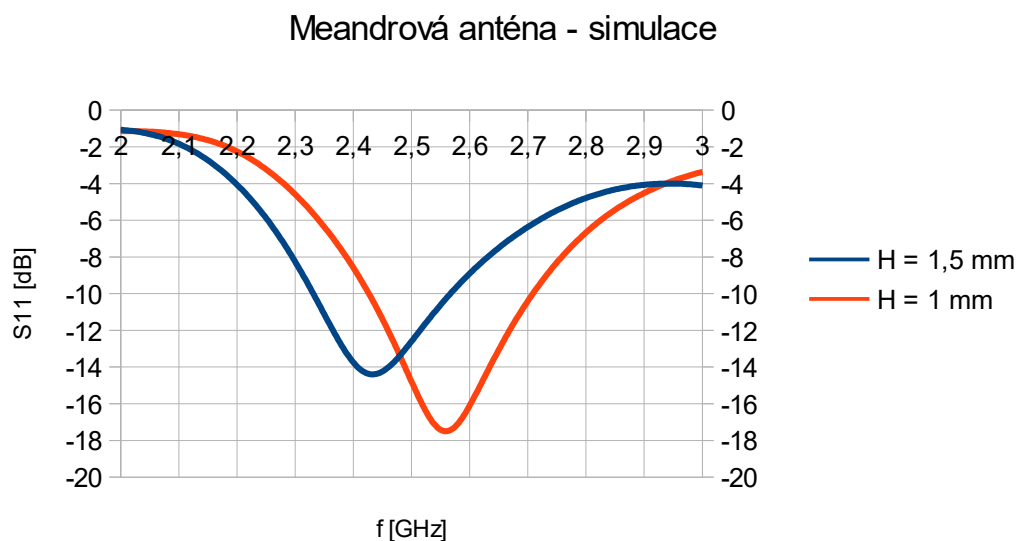
Na Obr.21 je vynesena závislost S_{11} na frekvenci pro tloušťku substrátu 1,5 a 1 mm. Pro $H = 1,5$ mm platí: $f_0 = 2,443$ GHz a $S_{11} = -13,16$ dB $\rightarrow B = 621$ MHz (2,74 – 2,119 GHz), pro $H = 1$ mm: $f_0 = 2,668$ GHz a $S_{11} = -15,19$ dB $\rightarrow B = 675$ MHz (2,881 – 2,206 GHz). IFA anténa dosahuje řádově desetinásobně větší šířky pásma, než má flíčková anténa.



Obr.21: Graf závislosti S_{11} na frekvenci – IFA anténa

6.4 Meandrová anténa

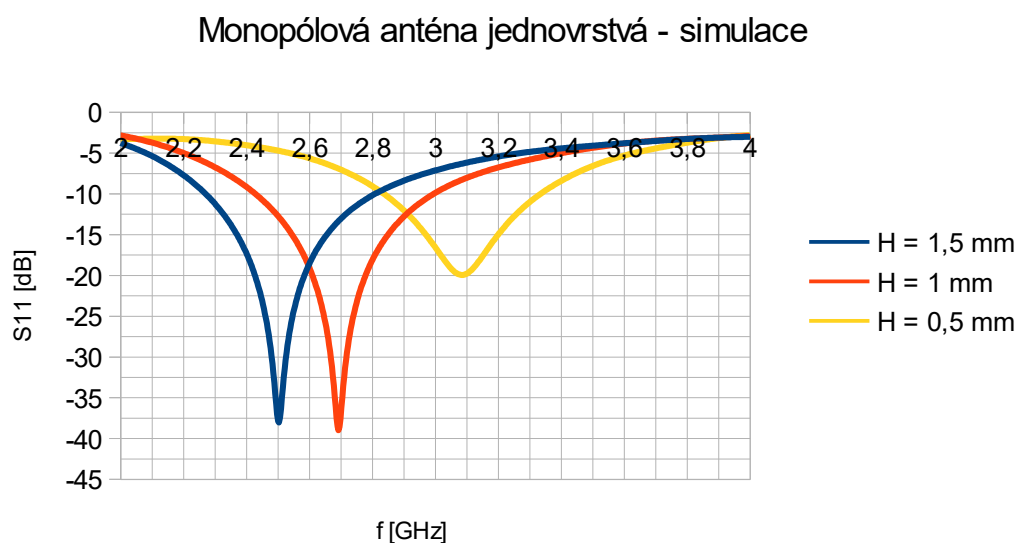
Na Obr.22 je vynesena závislost S11 na frekvenci pro tloušťku substrátu 1,5 a 1 mm. Pro $H = 1,5$ mm platí: $f_0 = 2,434$ GHz a $S_{11} = -14,4$ dB $\rightarrow B = 234$ MHz (2,566 – 2,332 GHz), pro $H = 1$ mm: $f_0 = 2,56$ GHz a $S_{11} = -17,49$ dB $\rightarrow B = 279$ MHz (2,707 – 2,428 GHz).



Obr.22: Graf závislosti S11 na frekvenci – Meandrová anténa

6.5 Monopólová anténa na jednovrstvé DPS

Na Obr.23 je vynesena závislost S11 na frekvenci pro tloušťku substrátu 1,5 a 1 a 0,5 mm. Pro $H = 1,5$ mm: $f_0 = 2,503$ GHz a $S_{11} = -38,02$ dB $\rightarrow B = 536$ MHz (2,806 – 2,27 GHz), pro $H = 1$ mm: $f_0 = 2,692$ GHz a $S_{11} = -38,96$ dB $\rightarrow B = 564$ MHz (2,992 – 2,428 GHz), pro $H = 0,5$ mm: $f_0 = 3,085$ GHz a $S_{11} = -19,94$ dB $\rightarrow B = 492$ MHz (3,331 – 2,839 GHz).



Obr.23: Graf závislosti S11 na frekvenci – Monopólová, jednovrstvá anténa

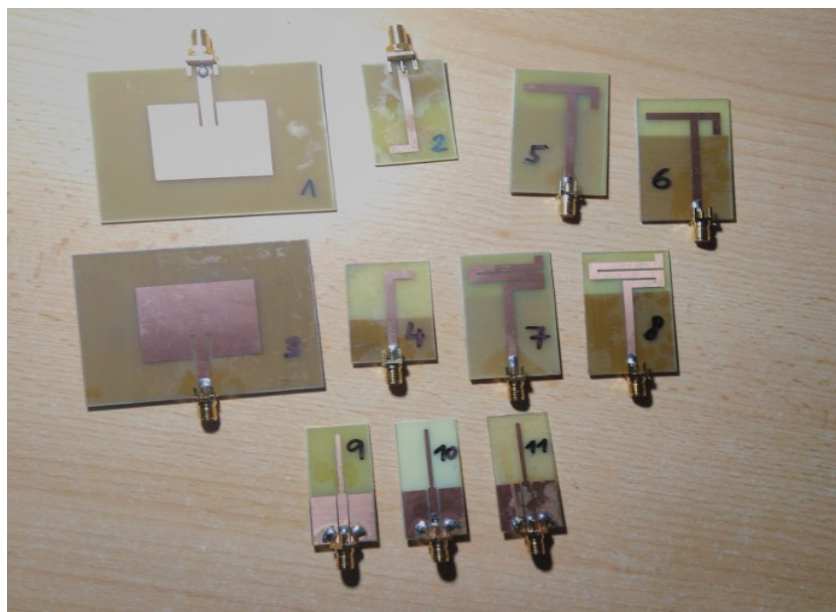
7 Změření a porovnání vzorků antén

Jednotlivé antény byly vyhotoveny externí firmou metodou fotocesty na DPS z materiálu FR4 s nominálními tloušťkami 1,5 mm a 1 mm pro dvouvrstvé DPS. Pro jednovrstvou DPS byly vyhotoveny vzorky antén v nominálních tloušťkách 1,5 mm, 1 mm a 0,5 mm. Vzorky antén byly osazeny SMA konektorem s hodnotou 50 Ω a následně změřeny pomocí měřicího přístroje LeCroy SPARQ, který byl připojen k notebooku s měřícím SW.

Měřicí přístroj LeCroy SPARQ byl zkalibrován pomocí referenční antény a následně nastaven pro měření ve frekvenčním pásmu do 3000/4000 MHz, s rozestupy 1,33 MHz. U vzorků antén byl měřen parametr S11 v závislosti na frekvenci, kde tato závislost byla zobrazena ve formě grafu v měřícím SW. Při měření vzorků antén byla také v měřícím SW vyobrazena Smithova charakteristika.

Číslo antény na fotce	Provedení DPS oboustranná / jednostranná	Vzorek antény	Tloušťka substrátu [mm]
1	oboustranná	Fličková anténa	1,5
2	oboustranná	Monopólová anténa ve tvaru L	1,5
3	oboustranná	Fličková anténa	1
4	oboustranná	Monopólová anténa ve tvaru L	1
5	oboustranná	IFA anténa	1,5
6	oboustranná	IFA anténa	1
7	oboustranná	Meandrová anténa	1,5
8	oboustranná	Meandrová anténa	1
9	jednostranná	Monopólová anténa	1,5
10	jednostranná	Monopólová anténa	1
11	jednostranná	Monopólová anténa	0,5

Tab.14: Seznam vyrobených vzorků antén na fotografii níže



Obr.24: Fotografie vyrobených vzorků antén

Smithův diagram

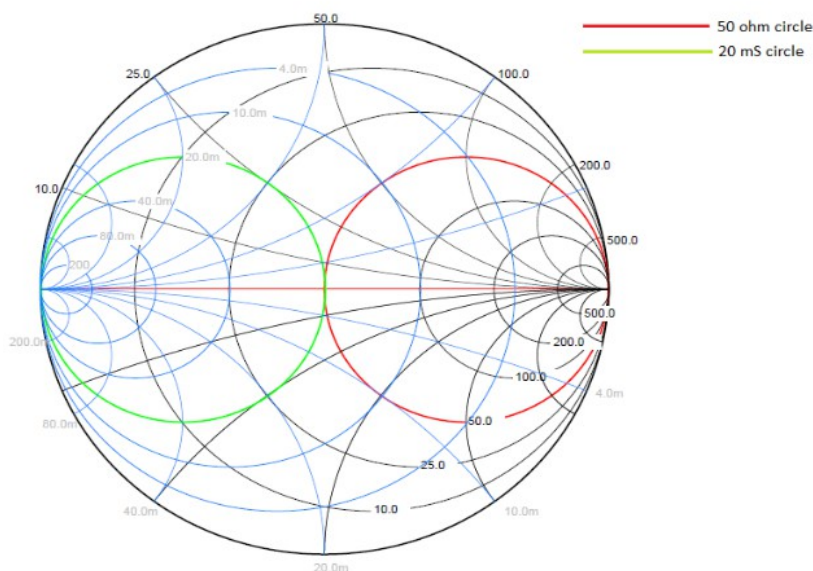
V procesu návrhu vysokofrekvenčních obvodů (antén) a jejich úprav, měření a přizpůsobování se používá speciální graf – Smithův diagram, na kterém je vyobrazena závislost komplexní impedance [14]. Díky Smithově diagramu lze snadno určit základní parametry: admitanci, Return Loss, Vložný útlum (Insertion Loss), koeficient odrazu, poměr napětí stojatých vln (VSWR), koeficient přenosu z komplexní impedance, ale také vypočítat impedanci změnou vzdálenosti od zátěže [14]. Smithova charakteristika se také použije v případě přizpůsobování (matching network) vř. obvodu (antény) pomocí ladících prvků (například pasivních součástek) [14].

Poznámky ke Smithově diagramu dle [14]:

1. Levá část (okraj) diagramu zobrazuje nulovou impedanci (obvod nakrátko), pravá část (okraj) diagramu nekonečnou impedanci (obvod naprázdno).
2. Kružnice, které se dotýkají pravé části (okraje) Smithova diagramu jsou kružnice s konstantní hodnotou rezistance (constant resistance circle).
3. Reálná část impedance je konstantní ve všech bodech kružnice s konstantní hodnotou rezistance (constant resistance circle).

4. Křivky mezi pravým okrajem a obvodem Smithova diagramu jsou kružnice s konstantními hodnotami reaktancí (constant reactance curve)
5. Imaginární část impedance je konstantní ve všech bodech podél křivky s konstantní hodnotou reaktance (constant reactance curve).
6. Kružnice, které se dotýkají levé části (okraje) jsou kružnice s konstantní hodnotou konduktance (constant conductance circles).
7. Reálná část admitance je konstantní podél kružnice s konstantní hodnotou konduktance (constant conductance circle).
8. Křivky mezi levým okrajem a obvodem Smithova diagramu jsou křivky s konstantními hodnotami susceptancí (constant susceptance curves).
9. Imaginární část admitance je konstantní podél křivky s konstantní hodnotou susceptance (constant susceptance curve).
10. Střed Smithova diagramu je bod, ve kterém $Z_0 = 50 \Omega$, nebo 20 mS – tedy jeho převrácené hodnotě.

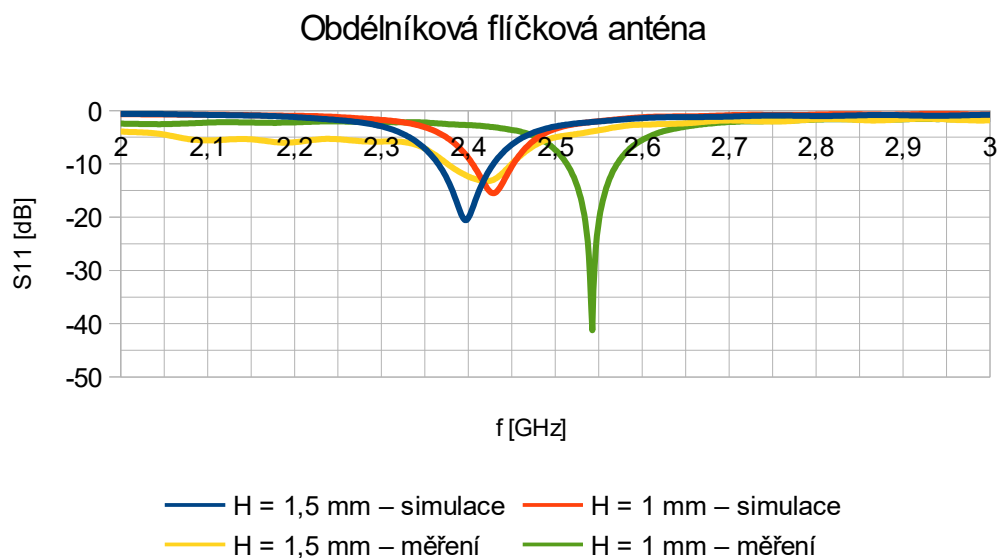
Na Obr.25 je vynesena kružnice pro $Z = 50 \Omega$, respektive pro 20 mS.



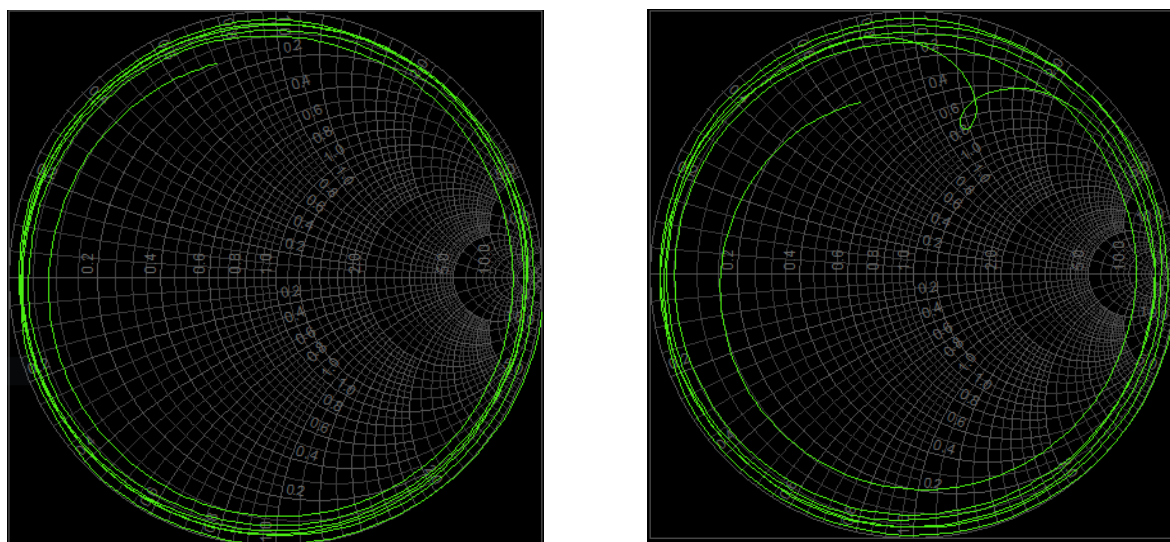
Obr.25: Smithův diagram (převzato z [14])

Flíčková anténa – obdélníková

Na Obr.26 je vynesena závislost nasimulované a změřené antény. Pro naměřené vzorky antén platí - pro $H = 1,5$ mm: $f_o = 2,418$ GHz a $S_{11} = -13,25$ dB $\rightarrow B = 73$ MHz (2,448 – 2,375 GHz). Pro $H = 1$ mm: $f_o = 2,543$ GHz a $S_{11} = -41,23$ dB $\rightarrow B = 57$ MHz (2,57 – 2,513 GHz).



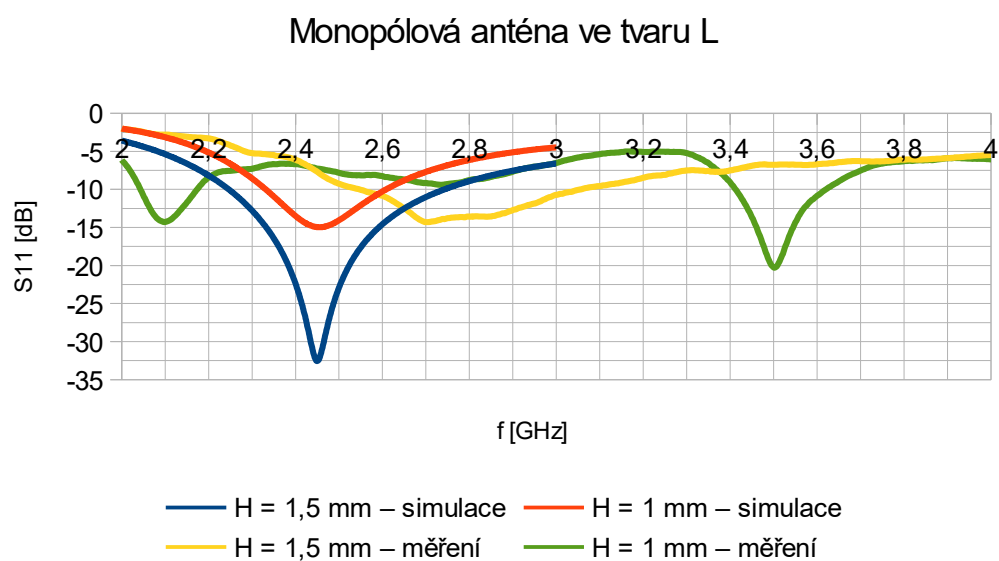
Obr.26: Graf závislosti S_{11} na frekvenci pro obdélníkovou flíčkovou anténu



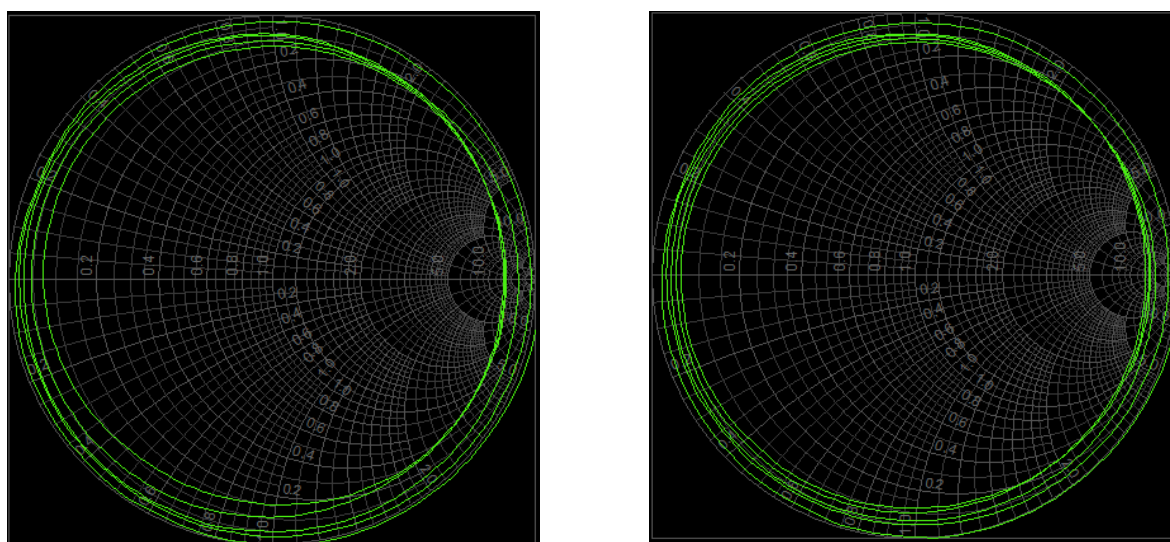
Obr.27: Měření - Smithovy grafy - vlevo pro $H = 1,5$ mm, vpravo pro $H = 1$ mm

Monopólová anténa ve tvaru L

Pro naměřené vzorky platí – pro $H = 1,5$ mm: $f_0 = 2,702$ GHz a $S_{11} = -14,31$ dB \rightarrow $B = 508$ MHz (3,056 - 2,548 GHz). Pro $H = 1$ mm platí: $f_0 = 3,501$ GHz a $S_{11} = -20,29$ dB \rightarrow $B = 207$ MHz (3,620 – 3,413 GHz).



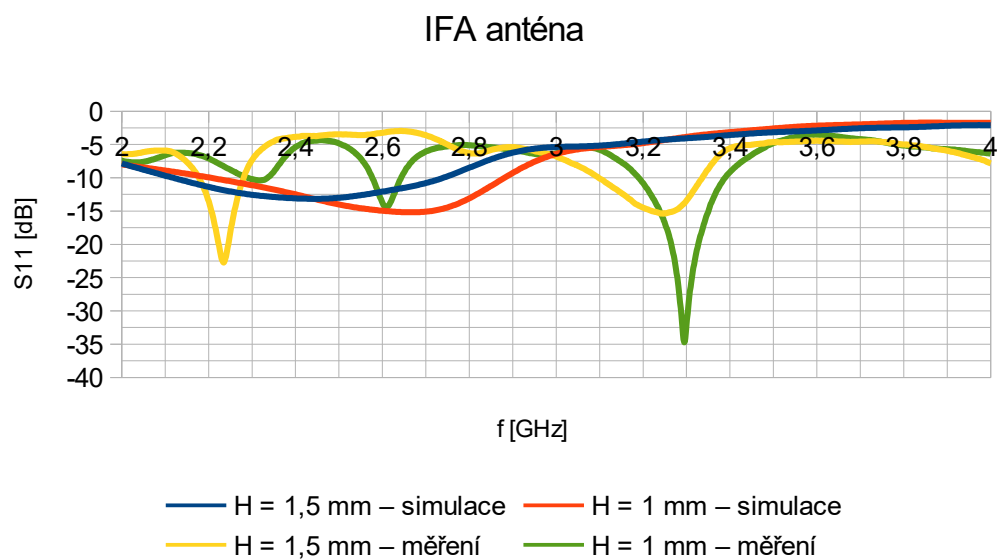
Obr.28: Graf závislosti S_{11} na frekvenci pro anténu ve tvaru L



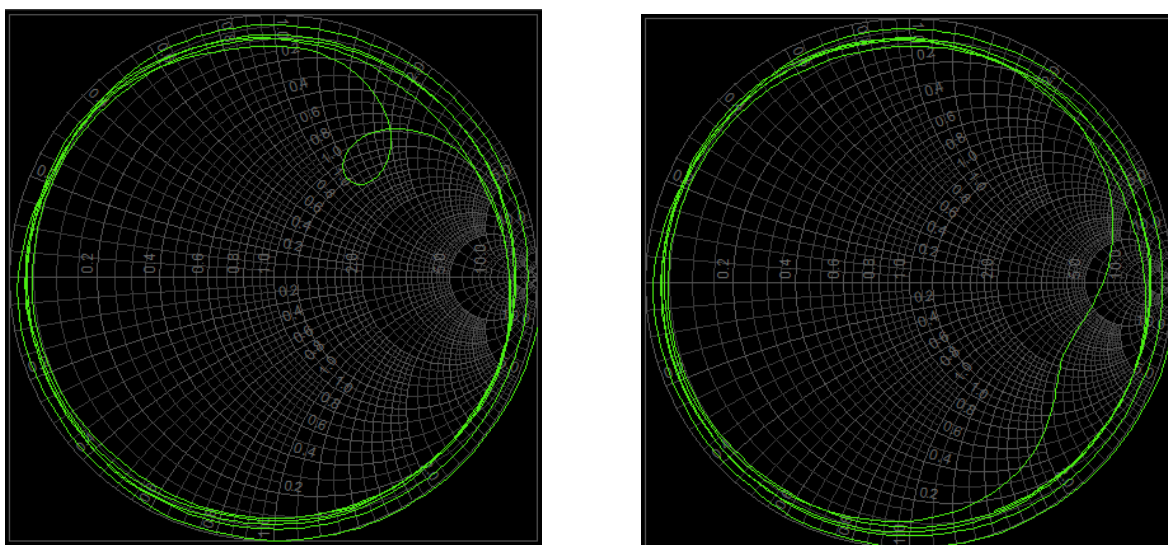
Obr.29: Měření - Smithovy grafy - vlevo pro $H = 1,5$ mm, vpravo pro $H = 1$ mm

IFA anténa

Pro naměřené vzorky platí – pro $H = 1,5$ mm: minimum v okolí 2,2 GHz je $f_0 = 2,234$ a $S_{11} = -22,72$ dB $\rightarrow B = 102$ MHz (2,28 – 2,178 GHz), pro minimum v okolí 3,3 GHz je $f_0 = 3,25$ GHz a $S_{11} = -15,36$ dB $\rightarrow B = 238$ MHz (3,336 – 3,098 GHz). Pro $H = 1$ mm platí: minimum v okolí 2,6 GHz je $f_0 = 2,608$ GHz pro $S_{11} = -14,43$ dB $\rightarrow B = 65$ MHz (2,642 – 2,577 GHz). Pro minimum v okolí 3,3 GHz platí: $f_0 = 3,294$ GHz pro $S_{11} = -34,74$ dB $\rightarrow B = 198$ MHz (3,388 – 3,190 GHz).



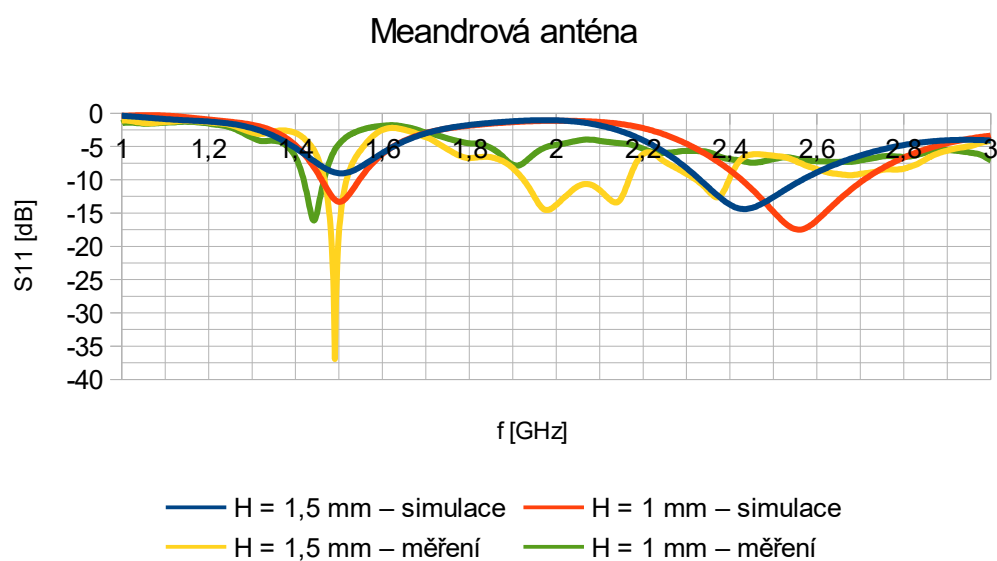
Obr.30: Graf závislosti S_{11} na frekvenci pro IFA anténu



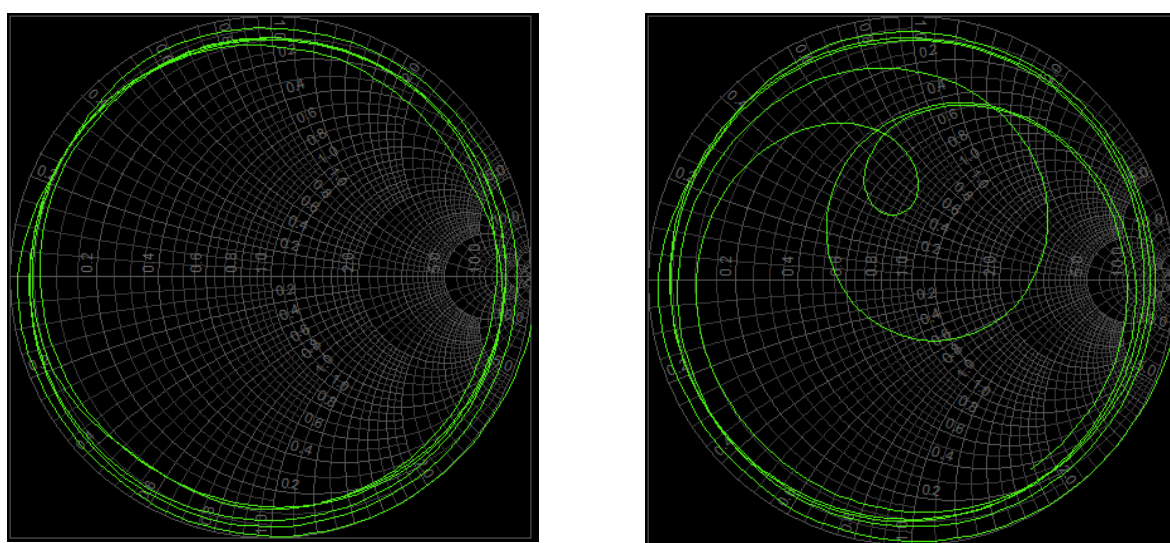
Obr.31: Měření - Smithovy grafy - vlevo pro $H = 1,5$ mm, vpravo pro $H = 1$ mm

Meandrová anténa

Pro naměřené vzorky platí – pro $H = 1,5$ mm: minimum v okolí 1,5 GHz je $f_0 = 1,49$ GHz a $S_{11} = -36,93$ dB $\rightarrow B = 51$ MHz (1,517 – 1,466 GHz), pro minimum v okolí 2 GHz je $f_0 = 1,980$ GHz a $S_{11} = -14,54$ dB $\rightarrow B = 240$ MHz (2,166 – 1,925 GHz). Pro $H = 1$ mm: minimum v okolí 1,5 GHz je $f_0 = 1,442$ GHz a $S_{11} = -16,13$ dB $\rightarrow B = 45$ MHz (1,465 – 1,420 GHz).



Obr.32: Graf závislosti S_{11} na frekvenci pro meandrovou anténu

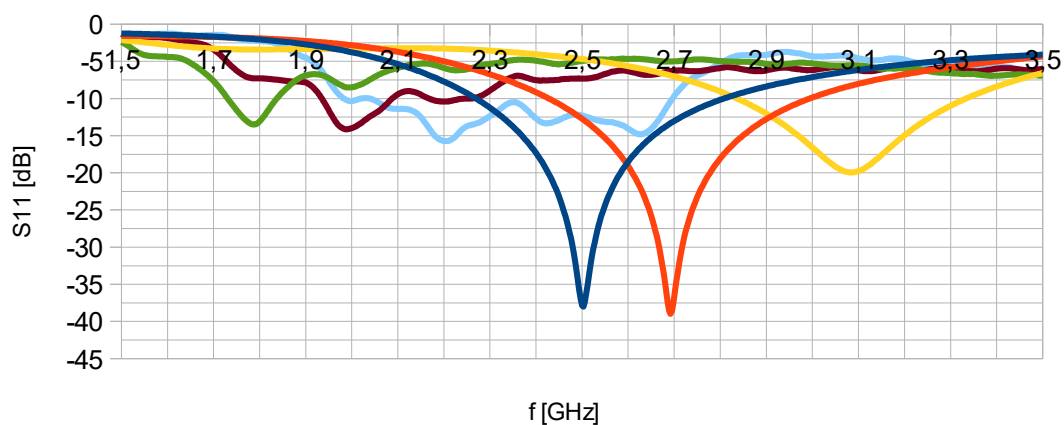


Obr.33: Měření - Smithovy grafy - vlevo pro $H = 1,5$ mm, vpravo pro $H = 1$ mm

Monopólová anténa – jednovrstvá

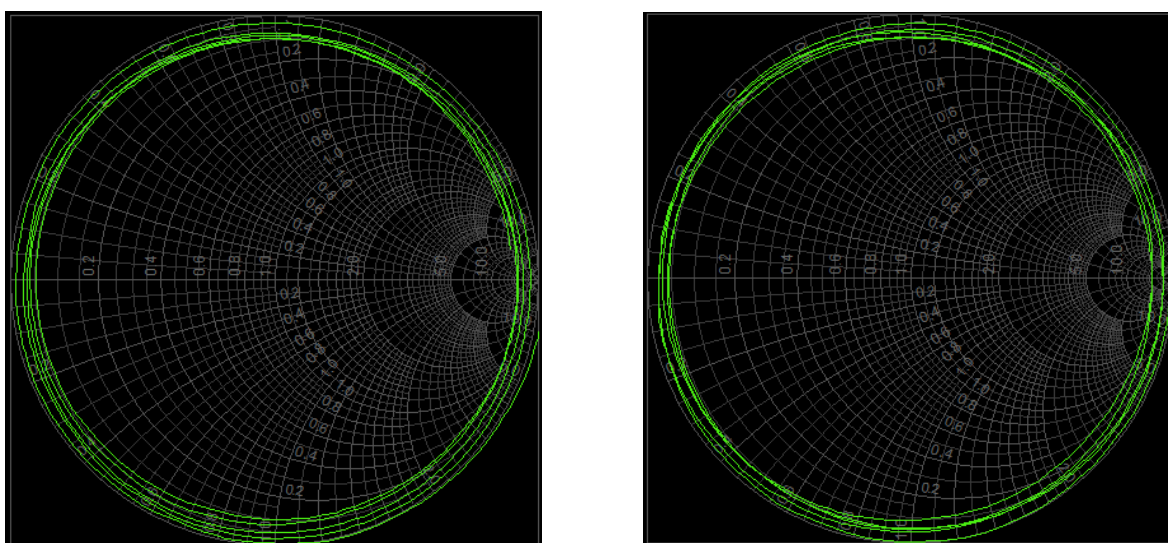
Pro naměřené vzorky platí – pro $H = 1,5$ mm: $f_0 = 1,788$ GHz a $S_{11} = -13,49$ dB → $B = 106$ MHz (1,836 – 1,730 GHz). Pro $H = 1$ mm: $f_0 = 1,988$ GHz a $S_{11} = -14,13$ dB → $B = (2,086 - 1,936$ GHz). Pro $H = 0,5$ mm: $f_0 = 2,202$ GHz a $S_{11} = -15,73$ dB → $B = 313$ MHz (2,353 – 2,040 GHz).

Monopólová anténa jednovrstvá

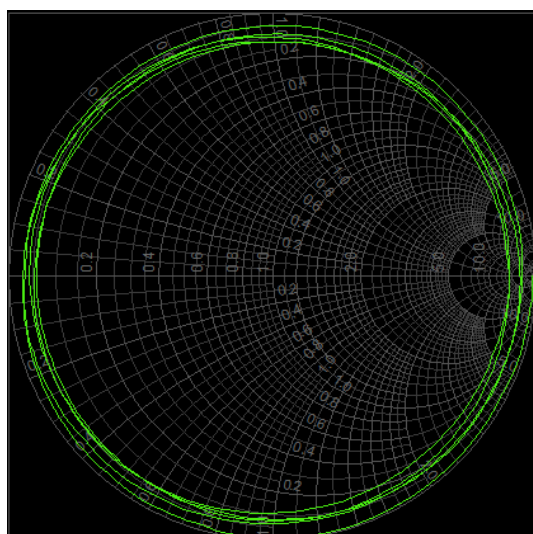


— H = 1,5 mm – simulace — H = 1 mm – simulace — H = 0,5 mm – simulace
 - - - H = 1,5 mm – měření - - - H = 1 mm – měření - - - H = 0,5 mm – měření

Obr.34: Graf závislosti S_{11} na frekvenci pro anténu monopólovou jednovrstvou



Obr.35: Smithův diagram – vlevo pro $H = 1,5$ mm, vpravo pro $H = 1$ mm



Obr.36: Smithův diagram – pro H = 0,5 mm

7.1 Vyhodnocení změřených vzorků antén

Jak je z výsledných charakteristik patrné, tak naměřené a nasimulované charakteristiky se s výjimkou flíčkové antény vůbec neshodují. U flíčkové antény pro $H = 1,5$ mm je rozdíl naměřené rezonanční frekvence oproti simulaci o 22 MHz, pro $H = 1$ mm je rozdíl nasimulované a změřené rezonanční frekvence 115 MHz.

	H [mm]	f_0 [GHz]	S11 [dB]	B [MHz]
simulace	1,5	2,396	-20,54	62
měření	1,5	2,418	-13,25	73
simulace	1	2,428	-15,52	44
měření	1	2,543	-41,23	57

Tab.15: Porovnání změřené a nasimulované flíčkové antény

Tyto rozdíly nelze na základě jednoho odměření vzorků určit zcela přesně, ale obecně mohou být způsobeny řadou chyb a nepřesností: vysoké tolerance materiálu FR4, nepřesnosti samotné výroby motivu (přesnost rozměrů), vliv připájeného konektoru (vliv rozlité mědi). Chyba také mohla nastat při samotném měření vzorků antén, kde antény byly měřené ve vzdálenosti cca 50 cm od zdi.

8 Závěr

Cílem práce bylo prakticky demonstrovat teoretické předpoklady získané ze simulací v programu CST Studio na vliv různých tloušťek substrátů a odlišných hodnot relativní permitivity ϵ_r . Vybrané motivy antén byly nasimulovány a optimalizovány pro nejběžněji dostupnou DPS s fotocitlivou vrstvou z materiálu FR4 s následujícími parametry: $H = 1,5$ mm (nominální tloušťka DPS), $T = 35$ μm (tloušťka měděné vrstvy) a $\epsilon_r = 4,3$ [-]. Jednotlivé motivy byly následně vyrobené na odpovídající substrát FR4 o tloušťce 1,5 a 1 mm u dvouvrstvých motivů antén, a na substrát o tloušťce 1,5, 1 a 0,5 mm u jednovrstvého motivu. Z důvodu nedostupnosti dvouvrstvé DPS o jiných nominálních tloušťkách nebylo možné demonstrovat tento vliv prakticky, jak bylo původně zamýšleno. Jak je popsáno v kapitole návrhu flíčkové antény 4.5.1, tak namísto původně optimalizované čtvercové flíčkové antény s $f_0 = 2,454$ GHz, byla omylem vyrobena prvotně navrhnutá obdélníková flíčková anténa dle rozměrů v Tab.8 s rezonanční frekvencí 2,396 GHz.

Obdélníková flíčková anténa: Pro substrát o tloušťce 1,5 mm bylo simulací docíleno rezonanční frekvence $f_0 = 2,396$ GHz a $S_{11} = -20,54$ dB. Odměřený vzorek antény dosáhl rezonanční frekvence $f_0 = 2,418$ GHz a $S_{11} = -13,25$ dB. Odstup rezonančního kmitočtu u porovnávaných antén je tedy 22 MHz. Pro $H = 1$ mm se liší hodnota rezonančního kmitočtu o 115 MHz oproti simulaci. Pro $H = 1,5$ mm je odstup rezonančních kmitočtů pravděpodobně zapříčiněn relativně vysokými tolerancemi parametrů substrátu FR4, případně nepřesností výroby.

Jak je patrné z nasimulovaných a částečně naměřených grafů, tak při použití slabší tloušťky substrátu se rezonanční frekvence posouvá směrem nahoru. Při použití destičky s vyšší permitivitou lze rozměry antény zmenšit.

9 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Rádiové spektrum* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.ctu.cz/radiove-spektrum>
- [2] *Plán přidělení kmitočtových pásem* [online]. Praha: ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD, 2004 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.crk.cz/FILES/NKT.PDF>
- [3] WOODINGS, Ryan a Mark GERRIOR. *Avoiding Interference in the 2.4-GHz ISM Band* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1273359#
- [4] ZUSKA, Jiří. *Bezdrátové datové spoje ve volném ISM pásmu 2,4 GHz*. *Hw.cz* [online]. 2002 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/bezdratove-datove-spoje-ve-volnem-ism-pasmu-24-ghz.html>
- [5] PUŽMANOVÁ, Rita. *Bezdrátové lokální síť WLAN podle IEEE* [online]. 9.4.2002 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/bezdratove-lokalni-site-wlan-podle-ieee/>
- [6] SLÍŽEK, David. *Wi-Fi Alliance mění pojmenování Wi-Fi standardů, místo 802.11ax bude Wi-Fi 6* [online]. 9.4.2002 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/aktuality/wi-fi-alliance-meni-pojmenovani-wi-fi-standardu-misto-802-11ax-bude-wi-fi-6/>
- [7] TRČÁLEK, Antonín. *Všechno, co byste měli vědět o Wi-Fi* [online]. 14.3.2012 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.zive.cz/clanky/vsechno-co-byste-meli-vedet-o-wi-fi/sc-3-a-162796/default.aspx>

- [8] KUCHAR, Martin. *Bezdrátová technologie Wi-Fi zbavená roušky tajemství* [online]. 24.3.2005 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://pctuning.tyden.cz/hardware/site-a-internet/4444-bezdratova_technologie_wi-fi_zbavena_rousky_tajemstvi
- [9] MIKÉSKA, Zdeněk. *Specifikace rádiové části systému Bluetooth* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04003/index.html>
- [10] *802.15.4 & ZigBee* [online]. 2007 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: http://noel.feld.cvut.cz/vyu/scs/prezentace2007/MC1321x_ZigBee/802.15.4.htm
- [11] *Zigbee channels in 2.4GHz, 868MHz, 915MHz bands* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/zigbee-channels.html>
- [12] WALLACE, Richard. *Antenna Selection Guide* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/swra161b/swra161b.pdf>
- [13] *Čtvrtvlňný monopól se zemí* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=10-4-A>
- [14] PATTNAYAK, Tapan a Guhapriyan THANIKACHALAM. *Antenna Design and RF Layout Guidelines. Cypress* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.cypress.com/file/136236/download>
- [15] *Skin Depth Calculator* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/tools/skin-depth-calculator/>
- [16] HARTLEY, Rick. *Base Materials for High Speed, High Frequency PC Boards* [online]. March 2002 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: https://speedingedge.com/PDF-Files/Materials_RickH2.pdf

- [17] *RO4000®Series High Frequency Circuit Materials* [online]. 2018 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://www.rogerscorp.com/documents/726/acs/RO4000-Laminates-RO4003C-and-RO4350BData-Sheet.pdf>
- [18] *λ/4 printed monopole antenna for 2.45GHz* [online]. Nordic Semiconductor, 21.1.2005 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nwp_008.pdf
- [19] WEILER, Alexander, Alexander PAKOSTA a Ankur VERMA. *High-Speed Layout Guidelines* [online]. Texas Instruments, SCAA082A–November2006–RevisedAugust2017 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/scaa082a/scaa082a.pdf>
- [20] B. TANDEL, Tejal a Nikunj SHINGALA. *Design and Simulation of Microstrip Rectangular Patch Antenna for Bluetooth Application* [online]. August 2015 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://www.ijltemas.in/DigitalLibrary/Vol.4Issue8/23-27.pdf>
- [21] DHEYAA KHALEEL, Aymen. *Design and Simulation Microstrip patch Antenna using CST Microwave Studio* [online]. March 2019 [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333292532_Design_and_Simulation_Microstrip_patch_Antenna_using_CST_Microwave_Studio
- [22] RAMESH, M. *Design Formula for Inset Fed Microstrip Patch Antenna* [online]. December 2003 [cit. 2019-06-10]. Dostupné z: <http://jmoe.org/index.php/jmoe/article/viewFile/87/78>
- [23] PANDA, Jyoti Ranjan, Aditya Sri Ram SALADI a Rakhesh Singh KSHETRIMAYUM. *A compact printed monopole antenna for dual-band RFID and WLAN applications* [online]. June 2011 [cit. 2019-06-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/236983006_A_compact_printed_monopole_antenna_for_dual-band_RFID_and_WLAN_applications

[24] *BLE Antenna Design Guide* [online]. NXP Semiconductors, May 2018 [cit. 2019-06-10]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10992.pdf>

Seznam použitého software

LibreCAD	pod freeware licencí
CST Studio	pod licencí FEL ZČU

Seznam symbolů

c	[m/s]	rychlost šíření elektromagnetického záření ve vakuu
f, f_0	[Hz]	kmitočet elektromagnetického signálu
λ	[m]	základní velikost vlnové délky
λ_g	[m]	vlnová délka (provázaná) – guided wavelength
Z, Z_0	[Ω]	impedance
Z_a	[Ω]	vstupní impedance antény
Γ	[-]	komplexní koeficient odrazu
S_{11}, S_{11}	[dB]	vstupní činitel odrazu
δ	[mm]	hloubka vniku
ω	[rad/s]	úhlová rychlost
γ	[S/m]	měrná elektrická vodivost
μ_0	[H/m]	permeabilita vakua
μ_r	[-]	relativní permeabilita
ϵ_r	[-]	relativní permitivita
ϵ_{eff}	[-]	efektivní hodnota relativní permitivity
$\tan \delta$	[-]	ztrátový tangent
H	[mm]	tloušťka substrátu DPS
T	[mm]	tloušťka měděné vrstvy
W_v, W_v	[mm]	šířka mikropáskového vedení
W	[mm]	obecně definována šířka antény (DPS) / flíčku
W_g, W_g	[mm]	šířka zemní plochy (GND)
L_g, L_g	[mm]	délka zemní plochy (GND)
L	[mm]	obecně definována délka antény (DPS) / flíčku
B	[MHz]	šířka pásma, s poklesem větší než -10 dB (S_{11})