

České vysoké učení technické
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Bezčipové RFID transpondéry pro senzorové aplikace

Bakalářská práce

Kateřina Masopustová

Praha, květen 2019

Bakalářský studijní program: Elektronika a komunikace

Vedoucí práce: Ing. Milan Švanda, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Masopustová** Jméno: **Kateřina** Osobní číslo: **459163**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Bezčipové RFID transpondéry pro senzorové aplikace

Název bakalářské práce anglicky:

Chipless RFID Transponders for Sensing Applications

Pokyny pro vypracování:

Analýzujte vlastnosti několika variant bezčipových odražečů dipólového typu z hlediska efektivní odrazné plochy (RCS), výšky rezonanční špičky resp. hloubky rezonančního propadu, činitele jakosti, elektrické velikosti a citlivosti na změnu permitivity popř. vodivosti citlivé vrstvy. Jako buzení uvažujte ozařování lineárně polarizovanou rovinnou vlnou. Navrhněte vhodné úpravy zvyšující citlivost na změnu permitivity popř. vodivosti citlivé vrstvy umístěné v jejich blízkosti (přítomnost chemické látky). Vhodnou strukturu odražeče vybranou na základě předchozího rozboru realizujte a ověřte měřením pomocí vlnovodové měřicí linky nebo anténním měřením RCS ve volném prostoru.

Seznam doporučené literatury:

- [1] N. Ch. Karmakar, E. M. Amin, J. K. Saha: Chipless RFID Sensors, John Wiley & Sons, 2016.
- [2] S. Dey, J. K. Saha, N. Ch. Karmakar: Smart Sensing: Chipless RFID Solutions for the Internet of Everything, IEEE Microwave mag., vol. 16, issue 10, 2015, pp. 26 – 39.
- [3] Y. Feng, L. Xie, Q. Chen, L-R. Zheng: Low-Cost Printed Chipless RFID Humidity Sensor Tag for Intelligent Packaging, IEEE Sensors journal, vol. 15, issue 6, 2015, pp. 3201 – 3208.
- [4] J. Havlicek, M. Svanda, J. Machac, M. Polivka: Improvement of Reading Performance of Frequency Domain Chipless RFID Transponders, Radioengineering, vol. 24, no. 1, 2016.
- [5] M. Svanda, M. Polivka, J. Havlicek, J. Machac: Platform Tolerant, High Encoding Capacity Dipole Array-Plate Chipless RFID Tag, IEEE Access, 2019, v recenzním řízení.
- [6] A. Rydosz, E. Maciak, K. Wincza, S. Gruszczynski: Microwave-Based Sensors with Phthalocyanine Films for Acetone, Ethanol and Methanol Detection, Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 237, 2016, pp. 876-886.
- [7] S. Yang, C. Jiang, and S.-h. Wei: Gas Sensing in 2D Materials, Appl. Phys. Rev., vol. 4, no. 2, 2017, art. no. 021304.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Milan Švanda, Ph.D., katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Milan Švanda, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

Prohlášení

Jméno a příjmení: Kateřina Masopustová

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu. Nemám závažný důvod proti užití tohoto díla ve smyslu § 60 zákona č 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o znění některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 24. 5. 2019

Kateřina Masopustová

Tato práce analyzuje vlastnosti několika variant bezčipových odražečů dipólového typu z hlediska efektivní odrazné plochy (RCS), šířky pásma, činitele jakosti, výšky rezonanční špičky resp. hloubky rezonančního propadu, elektrické velikosti a citlivosti na změnu permitivity, popř. vodivosti citlivé vrstvy umístěné v jejich blízkosti (přítomnost chemické látky). Navrženy byly úpravy vybraných struktur (umístění odražeče nad zemní rovinu, umístění odražeče do středu čtvercové smyčky) vhodné pro zvýšení úrovně RCS, zvýšení výšky rezonanční špičky resp. hloubky rezonančního propadu a zvýšení citlivosti na změnu permitivity. Cílem práce bylo nalézt strukturu odražeče, která má dostatečnou výšku rezonanční špičky resp. hloubku rezonančního propadu, aby při měření byla bezpečně detekovatelná, a která projevuje nejvýraznější citlivost na změnu permitivity, popř. vodivosti citlivé vrstvy umístěné v jejich blízkosti. U odražeče splňujícího tyto podmínky byla udělána parametrická studie, na jejímž základě byl výsledný návrh vyroben a ověřen měřením ve vlnovodu.

Klíčová slova: bezčipová radiofrekvenční identifikace, efektivní odrazná plocha, odražeč, dipólové struktury

This work analyzes the properties of several varieties of chipless scatterer of the dipole type in terms of the radar cross section level, respectively depth of resonance process, electrical sizes and sensitivity to change of permittivity or conductivity of a sensitive layer located near them (presence of chemicals). Modifications of selected structures were proposed (the method of the reflector above the ground plane, suitable for increasing the RCS level, increasing the height of the resonant peak) the depth of the resonance process and increase the sensitivity to change of permittivity. The aim of this work was to find the structure of the scatterer, which has a sufficient resonance peak height and / or the resonance peak the depth of the resonance sink to make it safely detectable during the measurement, and which exhibits the most pronounced sensitivity to change in permittivity and / or resistance conductivity of the sensitive layer placed in their vicinity. A parametric study was performed on a reflector meeting these conditions, on the basis of which the resulting design was manufactured and verified by measurement in the waveguide.

Keywords: *chipless radiofrequency identification, radar cross section, scatterer, dipole structures*

Poděkování

Chtěla bych poděkovat především svému vedoucímu Ing. Milanu Švandovi, Ph.D. za velmi vstřícný přístup, časté konzultace, cenné připomínky a průběžné čtení tohoto textu. Děkuji všem přednášejícím a cvičícím, kteří mě na FEL ČVUT učili a předali mi většinu mých znalostí. Děkuji svým spolužákům na vytvoření příjemné atmosféry při studiu.

V Praze dne 24.5.2019

Kateřina Masopustová

Obsah

Úvod	2
1 Přehled bezčipových RFID senzorů	3
1.1 Teplotní senzory	4
1.2 Vlhkostní senzory	5
1.3 Senzory změny polohy a rychlosti (spojené s enkodery)	6
1.4 Senzory detekce vlastností materiálu	7
1.5 Detekce tekutin	8
1.6 Senzory na monitorování plynů	8
2 Citlivé materiály a nanostruktury	9
2.1 Teplotní senzory	9
2.1.1 Fenanthren	9
2.1.2 Plastové krystaly	9
2.1.3 Film ZnO	9
2.2 Vlhkostní senzory	10
2.2.1 Kapton	10
2.2.2 Polyvinyl alkohol (PVA)	10
2.3 Snímání pH	10
2.4 Senzory plynů	10
2.5 Senzory deformace	10
2.6 Senzory světla	11
2.7 Grafen	11
2.8 Nanovlákná	11
2.9 Nanočástice	12
2.10 Nanokompozitní filmy	12
3 Vlastnosti bezčipových odražečů dipólového typu	13
3.1 Jednovrstvé odražeče	14
3.1.1 Půlvlnný dipól	14
3.1.2 Čtvercový přerušovaný prstenec	15
3.1.3 Meandrový dipól	15
3.1.4 Ohnutý dipól (Varianta 1)	16
3.1.5 Ohnutý dipól (Varianta 2)	16
3.1.6 Ohnutý dipól (Varianta 3)	17
3.1.7 Ohnutý dipól (Varianta 4)	18

3.1.8	Ohnutý dipól s kapacitním zakončením	18
3.1.9	Kapacitně zatížený dipól (Varianta 1)	19
3.1.10	Kapacitně zatížený dipól (Varianta 2)	20
3.1.11	Kapacitně zatížený dipól (Varianta 3)	21
3.1.12	Porovnání parametrů	22
3.2	Dvouvrstvé odražeče se zemní rovinou	25
3.3	Jednovrstvé odražeče se zvýšeným RCS	28
4	Ohnutý dipól s kapacitním zakončením jako senzor	33
4.1	Parametrická studie	33
4.2	Optimalizovaný návrh	39
4.3	Měření ve vlnovodu	40
5	Kapacitně zatížený dipól (Varianta 3) jako senzor	45
5.1	Parametrická studie	45
5.2	Optimalizovaný návrh	48
	Závěr	50
	Seznam literatury	51

Seznam symbolů

a	Největší poloměr struktury
λ	Vlnová délka
BW	Šířka pásma
c	Rychlost elektromagnetické vlny
d	Šířka čtvercové smyčky
f_H	Vyšší frekvence
f_L	Nižší frekvence
f_r	Rezonanční frekvence
h	Výška rezonanční špičky, resp. hloubka rezonančního propadu
Δh	Posun výšky rezonanční špičky, resp. hloubky rezonančního propadu
k	Vlnové číslo
ka	Elektrická velikost
Q	Činitel jakosti
s_{21}	Koeficient přenosu

Seznam zkratek

CMPA	Kruhová mikropásková anténa (Circular Microstrip Patch Antenna)
CO ₂	Oxid uhličitý
MEMS	Mikroelektromechanický systém (Microelectromechanical System)
PILS	Polymerní iontové kapaliny
PMMA	Polymethylmethakrylát
PPM	Pulzní polohová modulace (Pulse Position Modulation)
RCS	Efektivní odrazná plocha (Radar Cross Section)
RF	Radiofrekvenční
RFID	Radiofrekvenční identifikace (Radio Frequency Identification)
SAW	Povrchová akustická vlna (Surface Acoustic Wave)
TDR	Detekce v časové oblasti (Time-Domain Reflectometry)
UBW	Ultra širokopásmové (Ultra-Wideband)

Seznam obrázků

3.1	Schéma naměřené <i>RCS</i> s rezonančním propadem (a) s rezonanční špičkou (b).	14
3.2	Dipól, struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).	14
3.3	Čtvercový přerušovaný prstenec, struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).	15
3.4	Meandrový dipól, struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).	16
3.5	Ohnutý dipól (Varianta 1), struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).	16
3.6	Ohnutý dipól (Varianta 2), struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).	17
3.7	Ohnutý dipól (Varianta 3), struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).	18
3.8	Ohnutý dipól (Varianta 4), struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).	18
3.9	Ohnutý dipól s kapacitním zakončením, struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).	19
3.10	Kapacitně zatížený dipól (Varianta 1), struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).	20
3.11	Kapacitně zatížený dipól (Varianta 2), struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).	21
3.12	Kapacitně zatížený dipól (Varianta 3), struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).	22
3.13	Srovnání odražečů, <i>RCS</i> v závislosti na šířce pásma <i>BW</i> .	23
3.14	Srovnání odražečů, <i>RCS</i> v závislosti na činiteli jakosti <i>Q</i> .	23
3.15	Srovnání odražečů, <i>RCS</i> v závislosti na výšce rezonanční špičky <i>h</i> .	24
3.16	Srovnání odražečů, <i>RCS</i> v závislosti na posunu rezonanční špičky Δf .	24
3.17	Srovnání odražečů, <i>RCS</i> v závislosti na elektrické velikosti <i>ka</i> .	25
3.18	Půlvlnný dipól nad zemní rovinou, struktura.	26
3.19	Srovnání odražečů, <i>RCS</i> v závislosti na hloubce rezonanční špičky <i>h</i> .	27
3.20	Srovnání odražečů, <i>RCS</i> v závislosti na posunu rezonanční špičky Δf .	27
3.21	Srovnání odražečů, <i>RCS</i> v závislosti na elektrické velikosti <i>ka</i> .	28
3.22	Půlvlnný dipól uprostřed vodivé smyčky, struktura.	29
3.23	Závislost <i>RCS</i> na šířce smyčky <i>d</i> .	29
3.24	Srovnání odražečů, <i>RCS</i> v závislosti na šířce pásma <i>BW</i> .	30
3.25	Srovnání odražečů, <i>RCS</i> v závislosti na činiteli jakosti <i>Q</i> .	31
3.26	Srovnání odražečů, <i>RCS</i> v závislosti na hloubce rezonanční špičky <i>h</i> .	31
3.27	Srovnání odražečů, <i>RCS</i> v závislosti na posunu rezonanční špičky Δf .	32
4.1	Změna šířky smyčky.	34
4.2	Poloha dipólu uvnitř smyčky.	34
4.3	Změna délky a šířky dipólu při zachování celkové délky.	35
4.4	Změna šířky vnějšího vodiče.	35
4.5	Změna permitivity substrátu.	36
4.6	Změna šířky ID prstů kapacitního zakončení.	36
4.7	Počet ID prstů kapacitního zakončení.	37

4.8	Citlivost na vodivou vrstvu, změna permitivity substrátu.	37
4.9	Citlivost na vodivou vrstvu, změna šířky kapacitních zakončení.	38
4.10	Citlivost na vodivou vrstvu, změna počtu kapacitních zakončení.	38
4.11	Optimalizovaný návrh ohnutého dipólu s kapacitním zakončením.	39
4.12	Průběh <i>RCS</i> optimalizovaného návrhu ohnutého dipólu s kapacitním zakončením. . . .	40
4.13	Schéma měření.	41
4.14	Graf měření ohnutého dipólu s kapacitním zakončením (U-ID 01) bez vrstvy, s tenkou PILS, v reakci na plyn CO ₂ a) přiblížené b).	42
4.15	Graf měření ohnutého dipólu s kapacitním zakončením (U-ID 02) bez vrstvy, s tenkou PMMA, v reakci na plyny toluen a aceton a) přiblížené b).	43
4.16	Graf referenčního měření ohnutého dipólu (U-ID 01) bez smyčky PMMA, ukázka neprů- kazných výsledků a) přiblížené b).	44
5.1	Změna délky kapacitních ramen dipólu.	45
5.2	Změna vzdálenosti kapacitních ramen dipólu.	46
5.3	Změna vzdálenosti a délky kapacitních ramen dipólu při zachování celkové délky dipólu.	46
5.4	Změna šířky vnitřního dipólu.	47
5.5	Citlivost na vodivou vrstvu, změna vzdálenosti a délky kapacitních ramen dipólu při zachování celkové délky dipólu.	47
5.6	Optimalizovaný návrh kapacitně zatíženého dipólu.	48
5.7	Průběh <i>RCS</i> optimalizovaného návrhu dipólu s kapacitním zatížením.	49

Seznam tabulek

1	Srovnání parametrů prvního a optimalizovaného návrhu ohnutého dipólu s kapacitním zakončením.	40
2	Specifikace chemických látek.	41
3	Srovnání parametrů prvního a optimalizovaného návrhu dipólu s kapacitním zatížením.	49

Úvod

Technologie radiofrekvenční identifikace (RFID) je založená na bezdrátovém přenosu dat (binární informace - unikátního identifikačního čísla) mezi identifikačním štítkem (RFID tagem) a příslušnou čtečkou. Identifikovat lze libovolné objekty, a proto se tato technologie rozšiřuje na širokou škálu aplikací pro získávání identity, sledování a snímání, včetně provozu štítků připojených ke ztrátovým dielektrickým a kovovým předmětům, lidskému tělu nebo integraci RFID štítků do snímačů. V průmyslovém odvětví se využívá pro zefektivnění procesů, například pro automatickou identifikaci a sledování objektů, baleného zboží při skladování, manipulaci a přepravě v dodavatelském řetězci. V oblasti logistiky se jedná především o zrychlení skladovacích postupů. Dále mohou sloužit jako ochrana zboží proti krádeži nebo při inventarizaci knih v knihovnách. Technologie RFID se dále uplatňuje ve zdravotnictví k jednoznačné identifikaci pacientů a léků. V budoucnu se očekává, že bude mít velké uplatnění v technologii internetu věcí [1],[2].

Bezčipová RFID využívající různé metody ukládání informací v pasivních strukturách bez použití polovodičového čipu představuje jednu z perspektivních technologických koncepcí uvedené technologie. V bezčipových RFID štítcích jsou použity materiály, které odrážejí část vysílacích rádiových vln. Nejčastěji jsou zkoumány štítky založené na zpětném rozptylu, který je frekvenčně závislý. Přítomnost nebo nepřítomnost jednotlivých rezonančních vrcholů ve značeném spektrálním podpisu představuje logickou jedničkovou nebo nulovou hodnotu. RFID technologie má potenciál nahradit čárový kód. Její výhodou oproti čárovému kódu je větší čtecí vzdálenost a možnost číst více štítků zároveň. Díky těmto výhodám je snaha v budoucnosti nahradit čárové kódy bezčipovými RFID, které jsou stále ještě nákladnější na výrobu než čárový kód. V současné době je kladen důraz na zvýšení bitové kapacity štítku nebo využití štítků jako senzorů [3], [4], [5].

1 Přehled bezčipových RFID senzorů

Radiofrekvenční identifikace nabízí mnoho variant konceptu a velké množství přístupů, které se snaží o její realizaci. Obecně mohou být kategorizovány typy RFID senzorů podle detekce v časové oblasti TDR (time-domain reflectometry), detekce ve frekvenční oblasti (frequency modulation-based) a fázově kódované bezčipové (phase-encoded) RFID senzory. Bezčipové RFID senzory založené na detekci v časové oblasti fungují jako aktivní radar. Čtečka nejprve vyšle krátký dotazovací pulz a poté čeká na odezvu senzoru. Dále lze tento typ senzorů dělit na ty, jejichž tagy je a není možné tisknout. Zástupcem tištěných RFID senzorů detekující signál v časové oblasti jsou mikropáskové bezčipové senzory se zpožďovací přenosovou linkou. RFID tagy využívají samostatnou linku k vytvoření pulzní polohové modulace PPM. Fázovým změnám odraženého impulzu jsou přiřazena označení definovaného ID kódu.

Senzory založené na bázi kmitočtové modulace kódují data za použití rezonančních struktur do kmitočtového spektra nebo odrazu RCS (efektivní odrazná plocha). Jejich výhody oproti senzorům založených na TDR jsou jejich kompaktní velikosti, vysoká hustota dat, nižší náklady a čtení tagů je méně náchylné k okolnímu šumu. Senzory založené na frekvenční modifikaci je dále možné dělit na planární bezčipové senzory a na neplanární tagy vyrobené z magnetických materiálů.

Senzory RFID se sadou rezonátorů snímaných na odraz tvoří řada kaskádových vysoce jakostních rezonátorů kódující data a UWB anténa pro přenos a příjem dat. Oproti tomu tagy založené na rozptylu RCS využívají své rozptylové struktury na přenos signálu i dat. Bezdotykové čtečky RFID tagů založené na spektrálním podpisu jsou uvedeny v Ref. [6]. Podle svého rezonančního chování mikropáskové rezonátory nebo RCS rozptylovače modifikují frekvenční spektra dotazovaných UWB signálů. Tyto změny ve zpětně odraženém signálu se používají pro kódování dat. Kromě toho mohou být rezonátory navrženy tak, aby se podobaly specifickým parametrům snímání. Bezdrátový senzor má potenciál integrovat kódování dat a snímací mechanismus.

Neplanární bezčipové senzory využívají k vytvoření kapacitních senzorů více vrstev dielektrických materiálů. Příkladem mohou být teplotní senzory navržené pro Fletcher a Gershenfeld [12].

Mahmood [7] uvedl, že senzor založený na MEMS využívá kapacitní zátěž rezonátoru v dutém režimu evanescentního režimu. Snímací mechanismus je dosažen prostřednictvím pravoúhlého pole aktivovaných mikro-vrstevnatých nosníků na křemíkovém substrátu. Teplotní změna způsobí, že se mikrokanálky ohnou, změní parazitní kapacitu dutiny, čímž způsobí posun rezonanční frekvence.

Bezčipové RFID senzory s fázovým kódováním vyžadují méně pásma než předchozí TDR a senzory založené na frekvenční modulaci. Kódování dat se zde provádí změnou fáze zpětně rozptýleného signálu. Snímací prvek je připojen jako RF zátěž s anténní strukturou. Modifikuje tak odezvu odraženého signálu "režimem antény".

Levotočivé (LH - Left-hand) zpožďovací linky na bezčipovém tagu jsou využity k fázové modulaci a pomocí pomalého efektu zpožďovacích linek i ke zvýšení doby odezvy RCS tagu. Současně

tento jev přispívá ke snížení velikosti tagu. Bezčipový tag je napájen pásmově omezeným pulzem vysílaným čtečkou. Dotazovací impuls je přijímán anténou a je určen počtem vysílacích kaskádových LH zpožďovacích linek. Přijatý dotazovací signál se odráží, jakmile dosáhne diskontinuity. Informace je kódována diferenční fází odraženého signálu s ohledem na zpožďovací linku s odrazovými čidly. Na každém reflektoru se mění fáze φ_1 , φ_2 a φ_3 . Nakonec je nosná fáze součtem každé referenční fáze signálu [8].

1.1 Teplotní senzory

Teplotní senzory realizované v časové oblasti fungují na bázi výše popsaného SAW tagu, jehož teplota je vypočtena z časového zpoždění nebo zkrácení odezvy. Relativní časové zpoždění odezvy a teplotu tagu lze charakterizovat teplotním součinitelem zpoždění t_{cd} . Dosah čtecích hodnot SAW teplotních senzorů je až 10 m, čtecí přesnost je $\pm 0,5^\circ\text{C}$. V článku [9] byly provedeny simulace tří různých velikostí a konfigurací senzorů zjišťující závislosti časového zpoždění na aktuální teplotě v rozsahu $0 - 40^\circ\text{C}$ a vzdálenosti v rozsahu 3 – 6 m. Se zvyšující se vzdáleností klesá přesnost naměřených hodnot a klesá rychlost čtení. Také byly porovnány skutečné teploty s naměřenými.

Pro realizaci teplotních senzorů jsou využívány také SAW tagy se zpožďovací linkou. Odezva na čtecí pulz nevzniká odrazem od reflektorů na piezoelektrickém materiálu, ale odrazem na diskontinuitách mikropáskového vedení. Senzor se skládá z UWB antény připojené ke zpožďovací lince vybavené odporovým teplotním senzorem. Tento snímač moduluje amplitudu zpětně rozptýlených signálů jako funkci teploty, která je identifikována změnou délky zpožďovací linky. Tyto teplotní senzory jsou plně pasivní, nízkonákladové a fungují bezdrátově. V článku [10] jsou modelovány dvě metody měření. První je založena na frekvenčním snímání (zaznamenávání) a používá vektorový analyzátor. Druhý je založen na nízkonákladovém UWB radaru. První metoda vykazuje lepší výkon než druhá. Měřená teplota se pohybovala v rozsahu $30^\circ\text{C} - 130^\circ\text{C}$ a měření byla spolehlivá do vzdálenosti 1 m. Zvýšení rozsahu měření by bylo možné docílit zvýšením kapacity přenosu.

Na bázi SAW tagu se zpožďovací linkou pracují pasivní detektory teplotního prahu. Princip činnosti spočívá v detekci změny impedance biomorfního tepelného spínače. Tato změna nastane, když teplota překročí prahovou hodnotu. Jako čtečka se používá radar UWB. Rozdíl mezi vzorkem skutečného času a referenčním signálem získaným z průměrování předchozích vzorků, je použit k určení přechodu přepínače a ke zmírnění interferencí odvozených od odrazů rušení. Funkce kompenzace zesílení je použita pro vyrovnání útlumu v důsledku ztráty šířením. Vylepšený způsob založený na kontinuální vlnové transformaci je použit k překonání problémů s detekcí spojených s nízkým poměrem signálu k šumu v přijímači. Průměrná úroveň zpoždění je použita k detekci zpoždění tagu a získána je experimentálním měřením do vzdálenosti 5 m [11].

Pro Fletcher a Gershenfeld [12] byly navrženy bezdotykové RFID teplotní senzory na bázi magnetického materiálu. Tyto senzory mají tři různé vrstvy magnetických materiálů, které mění mag-

netické spektrum s teplotou. Navrženy byly tři typy teplotních senzorů: nevratné prahové senzory, reverzibilní teplotní prahové snímače a kontinuální snímače teploty s použitím 30% nebo 70% vrstvy jako modulačního prvku a pásů amorfni slitiny jako prvků signálu a předpětí. Kontinuální čidlo teploty může být použito pro monitorování teploty v reálném čase sledováním posunu rezonanční frekvence. Rozsah provozních teplot je $20 - 70^{\circ}\text{C}$ a tento rozsah lze nastavit změnou teploty Curie magnetických materiálů.

K měření teploty lze využít senzory založené na MEMS (microelectromechanical system - mikroelektromechanický systém). Teplotní změna způsobí, že se mikrokanálky ohnou, změní parazitní kapacitu dutiny, čímž způsobí posun rezonanční frekvence. Mikrofluidní snímací mechanismus se používá v Ref. [13] Pod mikropáskovou strukturou je zde vedena teplotně závislá dielektrická kapalina. Modifikace planární kapacity se tedy dosahuje pomocí dielektrické expanze kapaliny. RF MEMs ani mikrofluidní senzor nebyly zkoumány pro kódování dat. Tyto struktury mají komplexní výrobní metody, které zvyšují náklady na senzor.

V článku [14] je znázorněn bezdotykový RFID teplotní senzor s použitím kondenzátoru s tlustým filmem s bariérovou vrstvou titaničitanu barnatého (BST). Čip má obvod citlivý na teplotu, který je integrován s fázově kódovanou čipovou značkou pro snímání teploty a identifikaci dat. Nevýhodou tohoto senzoru je jeho objemnost a nízká datová kapacita ve srovnání s čidly tagů založenými na frekvenčních modulacích.

1.2 Vlhkostní senzory

Bezčipové pasivní senzory měřící vlhkost v časové oblasti jsou složeny z kaskádovité skupiny přenosových částí (C-úseků) spojených na určitých koncích, které jsou schopné vytvářet skupinové zpoždovací špičky s určitou frekvencí. Vodivé sekce ve tvaru písmene C pokryté vrstvičkou křemíkových nanočástic umožňují vytvářet jedinečné ID pro jeden tag. Křemíkové nanočástice jsou velmi citlivé na změnu vlhkosti prostředí, což vytváří změny v rezonančních propadech efektivní odrazné plochy (RCS - radar cross section) a ve fázovém a skupinovém zpoždění tagu. Při relativní změně vlhkosti $60,2\% - 88\%$ byl pozorován pokles RCS o 30 dB, pokles skupinového zpoždění téměř 22,3 ns a šířka pásma 40 MHz. Měření byla provedena v reálném prostředí [15].

Vysokou citlivost a rychlou odezvu při vystavení vlhkosti vykazují také uhlíkové nanotrubičky upravené kyselinou. Snímací mechanismus je dán přítomností karboxylových skupin, které jsou připojeny na povrch nanotrubiček působením kyseliny. Kvůli silné interakci karboxylových skupin a molekul vody prostřednictvím vodíkových vazeb trvá dlouhou dobu, než nanotrubičky vodu deabsorbují. U aplikací, které vyžadují kratší dobu obnovy, může být na zadní straně integrován ohřívač. S nárůstem vlhkosti v okolí se zvyšuje rezistence uhlíkových nanotrubiček. Rozsah provozních kmitočtů snímače je výrazně rozšířen z rozsahu 600 MHz na 2 GHz změnou konfigurace elektrod. Toto významné zvýšení je přičítáno změně parazitní kapacity mezi odporovými elektrodami. V závislosti na frekvenci

bylo simulováno 3D rozptylové pole a změna zpětného rozptylu S_{11} [16].

Další možností návrhu vlhlostního senzoru je tag se dvěma rovinnými LC rezonátory pracující bezdrátově prostřednictvím induktivního spojování. Jeden rezonátor se používá pro kódování ID dat, které kóduje ve frekvenčním spektru, a proto by se jeho rezonanční frekvence neměla měnit s okolní vlhkostí. Druhý funguje jako snímač vlhkosti s využitím papírového substrátu jako snímacího materiálu. Vyšetřovány jsou snímací výkony tří papírových substrátů, včetně komerčního obalového papíru. Rezonátory založené na papíře vykazují vynikající citlivost při vystavení vlhkosti s rozumnou dobou odezvy. Použití papíru zajišťuje vynikající citlivost a přiměřenou dobu odezvy na vlhkost. Dlouho však trvá, než papírový substrát desorbuje všechny zbytkové molekuly vody. Použití tenčího papírového substrátu nebo vyšší pracovní teploty by mohlo pomoci k efektivnější desorbci vodní páry, které vyžadují určité aplikace. Levný a robustní obalový papír vykazuje největší citlivost v rozmezí relativní vlhkosti od 20 % do 70 %. Nabízí se tedy možnost přímého tisku tagu na tradičních obalech, díky němuž se balík stává inteligentním za velmi nízké ceny [17].

Také polymerní materiály jsou citlivé na vlhkost. Senzory relativní vlhkosti vyrobené z polymerních látek využívají techniku frekvenčního posunu, díky níž mají vysokou datovou kapacitu. Celková velikost navrhovaného snímače je 15 mm x 6,8 mm a má 6-ti bitovou datovou kapacitu pro generování ID a jeden bit pro snímání vlhkosti. Výsledky uvedené zde ukazují frekvenční odchylku 607 MHz při 50% zvýšení relativní vlhkosti. Pro dosažení velmi nízkých nákladů může být struktura tagu vytištěna na flexibilních laminátech, jako je plast a papír. Jediný rezonátor ELC může přispět k významnému rezonančnímu posunu frekvence pro realizaci vysoce citlivého snímače relativní vlhkosti. Parametry snímání mohou být kalibrovány pro bezdrátové sledování vlhkosti produktu nebo prostředí v reálném čase [18].

Na bázi frekvenčního posunu rezonančních špiček jsou kódovány informace o relativní vlhkosti snímače RFID. Změnou úrovně relativní vlhkosti z 50 % na 90 % došlo k frekvenčnímu posunu až 270 MHz. V článku [19] byl uskutečněn vysoký počet měření v klimatické komoře, na jejichž základě bylo vyhodnoceno, že poloha rezonančních špiček byla v korelaci s relativní vlhkostí prostředí. Měření také prokázalo velmi nízkou pravděpodobnost chyby senzoru, pokud je senzor používán s 10% chybovostí na úrovni relativní vlhkosti. Struktura tagu je vytištěna vodivým inkoustem na kartonový substrát a tenkou vrstvou papíru Mitsubishi s rezonátory komerční piezoelektrickou tiskárnou bez jakéhokoli vytvrzování nebo slinování inkoustu, čímž je dosaženo velmi rychlého a cenově výhodného tisku.

1.3 Senzory změny polohy a rychlosti (spojené s enkodery)

Měření lineárního posunu a rychlosti s milimetrovou přesností umožňují bezčipové RFID s vysokou datovou kapacitou implementované do nového mikrovlnného systému. Systém tvoří čtecí zařízení, které je tvořeno rezonátorem s poloviční vlnovou délkou ve srovnání s vlnovou délkou čtecího zařízení. Rezo-

nátor je spojen (přes kapacitní mezery) s dvojicí přístupových linek a mikrovlnným enkodérem. Poloha pohybujícího enkodéru je relativní k poloze čtečky. Enkodér se sestává z lineárního řetězce pásů ortogonálně orientovaných k ose řetězu. Amplituda pohybu enkodéru moduluje napájecí harmonický signál na výstupním portu a pozice i rychlost jsou měřeny od špiček nebo poklesů výsledné funkce obálky. Díky malé periodě kodéru (0,6 mm) je dosažena vysoká hustota dat na jednotku délky v těchto bezčipových RFID (tj. 16,66 bitů/cm). V návrhu byly použity 100-bitové bezčipové RFID značky s různými ID kódy [20].

Další možností měření milimetrových posunů objektů je vyhodnocení změny signálů zpětně rozptýlených v křížové polarizaci z tagů v různých časech. Vysílací anténa vysílá signál ve vertikální polarizaci, zatímco přijímací anténa pracuje v horizontální polarizaci. Zpětně rozptýlená vlna z objektu udržuje stejnou orientaci než dopadající vlna (vertikální polarizace). Depolarizující značka vytváří zpětně rozptýlenou vlnu s významným příspěvkem kolmým k dopadající vlně. Toto přímé vyhodnocení posunu nevyžaduje složité a specifické kalibrační postupy založené na vyhledávací tabulce pro kompenzaci změn v důsledku přítomnosti okolních neznámých objektů. Jeho funkcionalitu lze přidat do již navrženého bezčipového RFID tagu pracujícího v křížové polarizaci, aniž by se snížila jeho kódovací kapacita. Experimenty uvnitř a vně bezodrazové komory dosahovaly velmi dobré shody se simulacemi. Pomocí tohoto přístupu bylo prokázáno, že lze sledovat posuny menší než milimetr. V reálném prostředí lze detekovat posun beztržiskového štítku o 0,5 mm s chybou menší než $\pm 45 \mu\text{m}$, a to v rozsahu až 4 cm [21].

1.4 Senzory detekce vlastností materiálu

K detekci a charakterizaci kovových trhlin byl navržen pasivní bezčipový RFID tag, který integruje čtyři špičkové dvojpólové rezonátory jako 4-bitový ID kódovač a rezonátor kruhové mikropáskové antény (CMPA). Radiové spektrum průřezu bezčipového RFID tagu generuje čtyři rezonanční frekvence z dipólových rezonátorů a rezonanční frekvenci z rezonátoru CMPA. Simulační a experimentální výsledky ukazují, že rezonanční frekvenční posun CMPA je užitečným znakem pro označení orientace trhlin a šířky trhliny na kovové konstrukci. Směr ozvučení kmitočtu představuje orientaci trhliny, zatímco velikost rezonančního frekvenčního posuvu je úměrná šířce trhliny. Navíc experimentování s přírodním vzorkem únavové trhliny dokazuje, že navrhovaná značka senzoru je schopna detekovat trhliny o velikosti desetin milimetru [22].

Pro určení změny dielektrických vlastností materiálů je používán depolarizující RFID tag obsahující dva nakloněné dipóly (o 45°) natištěné na tenkém substrátu, který je nanesen na vybraném materiálu. Signál o rádiovém kmitočtu je vysílán bezdrátově. Jakmile je tag dotazován, vyzářuje zpětnou selektivně frekvenční odezvu v křížové polarizaci. Depolarizační vlastnost tagu umožňuje jeho použití na materiálech charakterizovaných libovolnou velikostí. Vlastnosti zkoumaného materiálu jsou odhadnuty z frekvenčního posuvu detekovaného na zpětně rozptýleném signálu. Princip činnosti štítku

je zpočátku ilustrován pomocí simulací a poté jsou prováděna měření na různých materiálech (vzduch, teflon, polyethylen, PVC, Rogers 4003, dřevo,..), aby se prokázala spolehlivost navrhovaného postupu. Měření bylo prováděno do vzdálenosti 60 cm [23], [24].

1.5 Detekce tekutin

Moderní senzor RFID navržený pro detekci širokého spektra kapalin pracuje s pasivním štítkem a ztrátově kompenzujícím obvodem v uzlu přijímače [25]. Navržený snímač pracuje na frekvenci 120 MHz s počátečním činitelem jakosti 135, který se zvýší na 20000. Tento vysoký činitel jakosti dále zlepšuje signálový profil a umožňuje snímání efektivní permitivity s vysokým rozlišením. Výhodami navrhovaného snímače jsou jednoduchost, možnost měření vzdálenosti a ultra vysoké rozlišení při snímání permitivity.

1.6 Senzory na monitorování plynů

K monitorování plynného ethylenu byl vyvinut RFID senzor složený ze čtečky a obvodu z mikropáskových přenosových vedení generujícího identifikační značky ID. Navrženy byly dvě konfigurace. První konfigurace se skládá z antény a integrovaného snímače. Druhá konfigurace se skládá z antény, obvodu generování ID a snímače. Informace jsou vyhodnoceny ze zpětně rozptýleného signálu v závislosti na zatížení v nosném signálu 915 MHz. Při použití první konfigurace se na čtecím zařízení zaznamená demodulovaná změna napětí 3,05 mV, kdy se změní koncentrace ethylenu z 0 na 100 ppm. Druhá konfigurace tagu umožňuje generovat osm různých ID kódů a průměrnou změnu fáze $26,51^\circ/\text{pF}$ ve zpětně rozptýleném signálu, když kapacitní zátěž (snímač) tagu se mění mezi 1 – 5 pF [26].

Uhlíkové nanotrubičky velmi citlivě reagují na výskyt plynů, proto jsou implementovány do kompozitů RFID bezčipových senzorů plynů, například amoniaku [27] nebo CO_2 [28]. Jako substrát je zvolen nízkonákladový "green" papír nebo tenký film z nanotrubiček tzv. buckypaper. Uhlíkové nanotrubičkové kompozity mění v přítomnosti plynu své elektrické vlastnosti, například odolnost a dielektrické vlastnosti, již za velmi malých množství toxických plynů. Pokud je toxický plyn přítomen, poklesne odpor filmu z nanotrubiček, což vede k poklesu zpětně rozptýleného výkonu, který snímač RFID detekuje. V článku [29] byla také prozkoumána proveditelnost piezoelektrického snímače, která by mohla být integrována do štítku a posunula by dál vývoj senzoru.

2 Citlivé materiály a nanostruktury

Klíčovým prvkem pro navrhování RFID senzoru jsou "inteligentní materiály". Tyto materiály mají široký rozsah použití včetně výroby senzorů. Na základě změn vnějších podmínek, jako je změna vlhkosti, tlaku, teploty, výskytu plynu a elektrického pole vykazují tyto materiály změnu určitých parametrů. Obrovský potenciál mají inteligentní materiály v radiofrekvenčních zařízeních pro snímání prostředí. Nicméně použití těchto materiálů v mikrovlnných frekvencích je relativně nové. K dispozici není mnoho literatury, která se zabývá vlastnostmi, fyzickým a chemickým složením, simulacemi a prezentuje experimentální data. V této kapitole jsou uvedeny inteligentní snímací materiály pro aplikace pracující v mikrovlnné oblasti [8].

2.1 Teplotní senzory

2.1.1 Fenanthren

Fenanthren je sublimační látka z polycyklické uhlovodíkové skupiny, která přechází přímo z pevného skupenství do plynného bez průchodu kapalnou fází. Teplota změny skupenství je kolem 72°C. Při teplotě změny skupenství dochází ke zvýšení dielektrické konstanty. Změna trvá, pokud pára nevyprchá [30]. Spíše než pro monitorování teploty v reálném čase je tento materiál vhodný pro snímání teploty v aplikacích s pamětí pro uložení události, která narušila teplotní stabilitu. Dalšími materiály, které mohou být použity pro získání konkrétní přechodové teploty, jsou naftalen, benzen, antracen [31].

2.1.2 Plastové krystaly

Plastové krystaly (např: N-methyl-N-alkylpyrrolidiniový kation a plastické krystaly na bázi PF6 aniontů) jsou zvláštním druhem krystalů se slabými interagujícími molekulami zachovávající si konformační stupně volnosti. Plastové krystaly jsou považovány za mezistupeň mezi skutečnými pevnými látkami a kapalinami, a proto mohou být považovány za takzvané měkké hmoty [32]. Metodou EIS (elektrochemická impedanční spektroskopie) lze určit odporové a reaktivní chování impedance buňky pro konkrétní frekvenční pásmo [33],[34]. Odpor testovací buňky EIS se pohybuje od 616,900 až 2699 Ω pro celkové teplotní rozpětí -10 až +80°C. Vodivost je vypočtena z naměřeného odporu buňky a buněčné konstanty. Změna vodivosti je však do značné míry ovlivněna fázovým přechodem při 70°C (pevné až kapalné)[35].

2.1.3 Film ZnO

Tenký film ZnO je dalším vynikajícím materiálem na snímání teploty a je dostatečně odolný, aby přežil v reálném inženýrském prostředí. Obecně polovodičové oxidy kovů jsou slibnou skupinou pro výrobu senzorů. Například ZnO a ITO jsou velmi citlivé na vnější změny prostředí, jako je tlak, teplota a elektrické pole. ZnO má také vysokou teplotu tání (2248 K) a dobrou tepelnou stabilitu [36], [37].

2.2 Vlhkostní senzory

2.2.1 Kapton

Kapton polyamid je hydrofobní organický materiál, který funguje jako kapacitní čidlo vlhkosti. Jeho dielektrická odezva je lineární, při absorpci vody je jeho hmotnost úměrná relativní vlhkosti. Kaptonový film má relativní permitivitu lineárně se měnící s relativní vlhkostí (v procentech). Kapton je navíc schopen vydržet vysoké teploty, což je velmi užitečné při slinování jako součást inkoustové tiskárny pro tiskový proces čipového bezdotykového snímače RFID [38], [39].

2.2.2 Polyvinyl alkohol (PVA)

PVA je hygroskopický polymerní materiál, který absorbuje vodu. Obsahuje OH skupinu vázající se na každý uhlík v hlavním řetězci. PVA má hydrofilní povahu, a proto může být použita jako polyelektrolytový odporový senzor. Při změně vlhkosti vykazuje PVA dielektrickou i vodivou citlivost, které jsou užitečné pro lepší detekovatelnost [40] - [43].

2.3 Snímání pH

Snímání pH lze použít k monitorování zkaženosti potravin. Obecně platí, že kažení potravin podporuje růst mikrobů a kvasinek, které mění složení potravin, proto jsou v závislosti na potravině více kyselé nebo zásadité [44],[45]. Řada vodivých polymerů vykazuje znatelné změny vodivosti v závislosti na změně pH. Výhodou organických polovodičů (vodivý polymer) je jejich schopnost zpracování. Příkladem vodivých polymerů používaných v praktických aplikacích je PEDOT, který je známý jako mechanicky odolný a dobře vodivý materiál [46].

2.4 Senzory plynů

Řada nanostruktur a organických materiálů vykazuje citlivost na určité plyny. Příkladem jsou jednovrstvé a vícevrstvé filmy z uhlíkových nanotrubiček, jimž se v přítomnosti plynu mění elektrická odezva. Senzory založené na bázi uhlíkových nanotrubiček fungují bezdrátově, a je tedy vhodné využít je k detekci škodlivých plynů jako je amoniak [47]. Na bázi nanočástic oxidu zinečnatého byl vyroben a testován senzor plynného vodíku. Papírové senzory vyrobené z nanotrubiček mohou být integrovány do běžného elektrického obvodu [48].

2.5 Senzory deformace

Různé materiály jako je polytetrafluorethylen vyztužený skleněnými mikrovlákný (PTFE) kompozitní, elastická tkanina na bázi polyesteru, slitina Nickel-Titanium (Nitinol) mohou být použity jako snímače deformace, namáhání materiálu a prasklin v materiálech. PTFE senzor má relativně velkou změnu

rezonanční frekvence v důsledku své velké dielektricky konstantní odchylky při kolísání teploty [49]-[52].

2.6 Senzory světla

Senzory pro detekci světla v podstatě používají mikrokontrolér nebo nezávislý světelný senzor a jsou integrovány do platformy CMOS [53],[54]. Fotosenzitivní materiály vykazují znatelné změny vodivosti při osvětlení. Například sulfid olovnatý, selenid olovnatý, indium antimonid a nejčastěji sulfid kadmia a selenid kadmia se používají v komerčních fotorezistorech pracujících při nízké frekvenci [55]. Negativní fotorezistentní materiály, jako je SU-8 a polymethylmethakrylát (PMMA), trvale mění své dielektrické vlastnosti při určitých ultrafialových (UV) osvětlováních. Tyto materiály mohou být použity jako senzory světelného prahu. Jeden z nejběžněji používaných fotorezistů je Sulfid kademnatý (CdS). Odpor CdS klesá s intenzitou dopadajícího světla. Využití má CdS především v odporech v nízkofrekvenčních zařízeních [56].

2.7 Grafen

Grafen je čistý uhlík ve formě velmi tenké téměř průhledné fólie o tloušťce jednoho atomu. Je to plochá monovrstva atomů uhlíku (o průměru 0,34 nm) tvořící dvourozměrnou mřížku. Grafen je základním stavebním kamenem grafitu, kvantových teček a uhlíkových nanotrubiček. Přestože je velmi lehký, je grafen pozoruhodně pevný (100krát silnější než ocel), efektivně vede teplo a proud. V současné době existuje několik metod výroby grafenu. Jedním ze způsobů je mechanické štěpení vrstev vícevrstvého grafitu nebo depozicí jedné vrstvy uhlíku na jiný materiál. Tímto způsobem je vytvořena adhezivní vrstva s menšími defekty. Grafenové destičky mohou být také vytvořeny chemicky rozřezáním uhlíkových nanotrubiček. Dalšími metodami jsou plazmová depozice, redukce oxidů grafenu (RGO), a další syntetické metody. Elektrické senzory založené na grafenu mají dobré elektrické i mechanické vlastnosti. Senzory jsou složeny z grafenových filmů nanosených na nosných kovových fóliích (například z niklu nebo mědi) použitím chemických metod depozice par a poté nanosení kombinovaného s postetchingem na podkladový kov. Grafenem je možné potisknout biologicky vstřebatelné hedvábní [57],[58].

2.8 Nanovláknna

Nanovláknna jsou definována jako tenké vodiče s alespoň jedním prostorovým rozměrem v rozsahu 1 – 100 nm. Tento nový typ materiálu vykazuje řadu zajímavých a užitečných vlastností. Nanovláknna mají elektrickou vodivost stejně vysokou jako má měď, jejich tepelná vodivost je stejná jako u diamantu, jejich pevnost je 100 krát větší než pevnost oceli při jedné šestině váhy. Nanovláknna mohou snímat prvky chemického nebo biologického typu. Manipulace s jednotlivými nanovláknny a také kontrola, zda jsou jednotlivé části polovodivé nebo kovové, je velmi obtížná [59]-[62].

2.9 Nanočástice

Nanočástice mají průměr od 10 do 100 nm. Existuje hned několik důvodů, proč je využití nanočástic na výrobu moderních senzorů velmi slibné. První důvod se týká předpokládané schopnosti syntetizovat téměř jakýkoli typ nanočástic. Mezi materiály, z nichž jsou nanočástice vyrobeny patří čisté kovy (např. Au, Ag, Ni, Co, Pt, Pd, Cu, Al, kovové slitiny (např. Au / Ag, Au / Cu, Au / Ag / Cu, Au / Pt, Au / Pd, Au / Ag / Cu / Pd, PtRh, NiCo, PtNiFe), oxidy kovů a polovodičové materiály (např. Si, Ge). Druhým důvodem je schopnost uzavřít nanočásticemi širokou škálu molekulárních ligandů (alkylthioly, alkanethioláty, arethiolát, alkyltrimethyloxysilan, dialkyldisulfidy, xantháty, oligonukleotidy, DNA, proteiny, cukry, fosfolipidy a enzymy). Tato schopnost znamená, že je možné získat nanočástice s hybridní kombinací chemické a fyzikální funkce, které mají velký vliv na citlivost a selektivitu senzorů. Třetím důvodem je schopnost měnit velikost a tvar nanočástic a poměr povrchu ku objemu. Tato vlastnost by umožnila kontrolu nad vlastnostmi povrchu a fyzikálními parametry, jako je tlak, teplota a rezonance plazmonů. Čtvrtým důvodem je možnost výroby nanočástic s regulovatelnými porézními vlastnostmi. Tento atribut umožňuje kontrolu nad mezičásticovou vzdáleností, stejně jako regulovatelnou hladinu signálu a šumu. Pátým důvodem je snadnější, rychlejší a více cenově výhodná výroba flexibilních senzorů ve srovnání s těmi, které jsou v současné době používány [63]-[66].

2.10 Nanokompozitní filmy

Nanokompozitní filmy kombinují různé materiály, aby byly docíleny určité fyzické, chemické, optické, mechanické, magnetické a elektrické vlastnosti, kterými nedisponují jednotlivé materiály. V aktivních čidlech se nanokompozitní filmy skládají z oxidů kovu a kovů, smíšených oxidů kovu, polymerů smíšených s kovy nebo s oxidy kovů nebo uhlíkových nanotrubiček v kombinaci s polymery, kovy nebo oxidy kovů. V závislosti na povaze složek materiálů, mikro až nanostruktura a povrchové a mezifázové charakteristiky mohou být senzory například využity ke snímání velmi specifických vlastností plynů. U různých nanokompozitních filmů bylo prokázáno zlepšení citlivosti, selektivita, stabilita, zkrácená doba odezvy [67].

3 Vlastnosti bezčipových odražečů dipólového typu

V této kapitole jsou analyzovány vlastnosti a parametry vybraných odražečů dipólového typu. Vybrané struktury pasivních odražečů byly umístěny do roviny tvořené osami x a y . Buzení bylo uskutečněno lineárně polarizovanou rovinnou vlnou, jejíž vektor \vec{E} byl vždy rovnoběžný s osou y . Analýza odražečů byla provedena v simulátoru pole IE3D na substrátu tloušťky 0,2 mm, nekonečné plochy o relativní permitivitě 3,35 a ztrátovém činiteli 0,002 (Rogers RO4003). Rozměry odražečů byly nastaveny tak, aby se rezonanční frekvence daných struktur odražečů co nejvíce přiblížily frekvenci 3 GHz. Důvodem je předpokládané měření ve struktuře vlnovodu R32, jehož pracovní pásmo je 2,6 – 3,95 GHz. Z grafu byla odečtena efektivní odrazná plocha RCS . V prostředí MATLAB byla vypočtena šířka pásma BW , činitel jakosti Q , výška nebo hloubka rezonanční špičky h a elektrická velikost ka .

Procentuální šířka pásma signálu je definována vztahem

$$BW = \frac{f_H - f_L}{f_r}, \quad (3.1)$$

kde v případě rezonanční špičky f_H je vyšší frekvence při zvýšení úrovně RCS o 3 dB a f_L je nižší frekvence při zvýšení úrovně RCS o 3 dB. V případě rezonančního propadu se od úrovně RCS 3 dBsm odečítají. f_r je rezonanční frekvence dané struktury. Zvolená šířka pásma, tedy pokles nebo nárůst RCS o 3 dB, je potřebná k přenesení 10 bitů, viz Obrázek 3.1.

Činitel jakosti Q udává převrácenou hodnotu šířky pásma BW

$$Q = \frac{1}{BW}. \quad (3.2)$$

Elektrická velikost ka je definována vztahem

$$ka = k \cdot a, \quad (3.3)$$

kde k je vlnové číslo dané vztahem 3.4 a a je největší poloměr dané struktury od jejího středu k jejímu kraji.

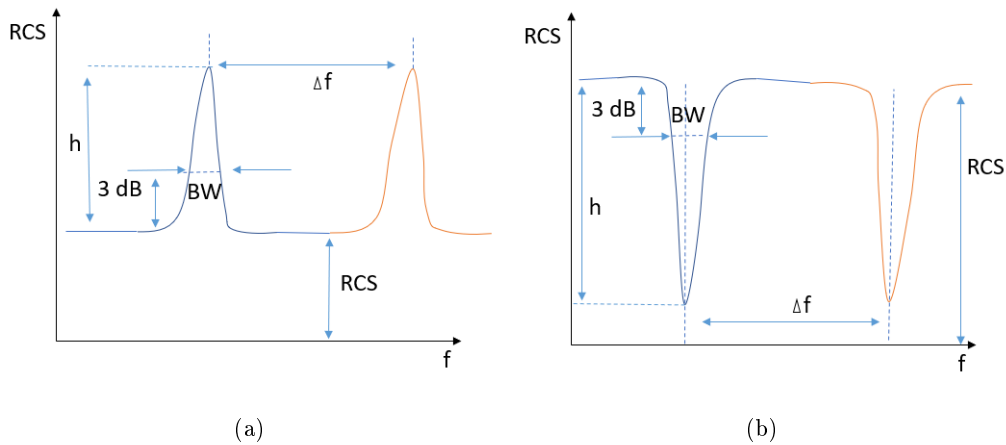
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f_r}{c}, \quad (3.4)$$

kde f_r je rezonanční frekvence struktury a $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je rychlost světla.

Celá struktura byla překryta dielektrickou vrstvou o tloušťce 0,1 mm, o relativní permitivitě 3 a nekonečné ploše. Simulace ukázala, že při překrytí odražeče dielektrickou vrstvou, dojde k posunu rezonanční špičky Δf , viz Obrázek 3.1. Posun Δf byl vypočten v programu MATLAB a je relativní vůči rezonanční frekvenci

$$\Delta f = \frac{f_{r1} - f_{r2}}{f_{r1}}, \quad (3.5)$$

kde f_{r1} je rezonanční frekvence struktury bez překrytí dielektrickou vrstvou, f_{r2} je rezonanční frekvence struktury překryté dielektrickou vrstvou.

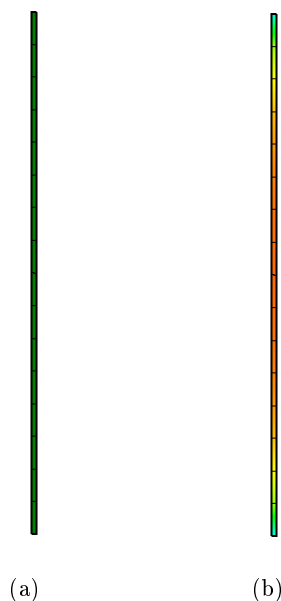


Obrázek 3.1: Schéma naměřené RCS s rezonančním propadem (a) s rezonanční špičkou (b).

3.1 Jednovrstvé odražeče

3.1.1 Půlvlnný dipól

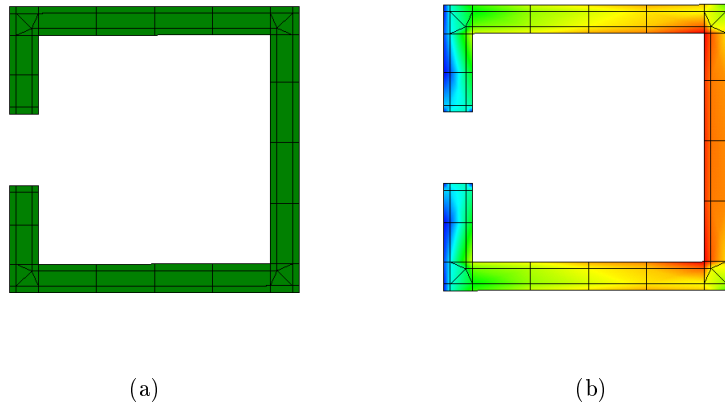
Nejjednodušší analyzovanou strukturou je půlvlnný dipól, který je tvořen vodičem o délce 42 mm a šířce 1 mm. V simulačním programu IE3D za použití okrajových buněk byl rozdělen do 54 segmentů, viz Obrázek 3.2 a. Proudové rozložení je zobrazeno na Obrázku 3.2 b, kde ve středu dipólu je proudová hustota maximální (tmavě červená barva) a na koncích minimální (tmavě modrá barva). Při rezonanční frekvenci $f_r = 3,00$ GHz je efektivní odrazná plocha $RCS = -29,68$ dBsm, šířka pásma je $BW = 304,0$ MHz, činitel jakosti $Q = 8,58$, výška rezonanční špičky $h = 5,91$ dB, elektrická velikost $ka = 1,32$ a posun rezonanční špičky po překrytí vodivou vrstvou $\Delta f = 2,76$ %.



Obrázek 3.2: Dipól, struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).

3.1.2 Čtvercový přerušovaný prstenec

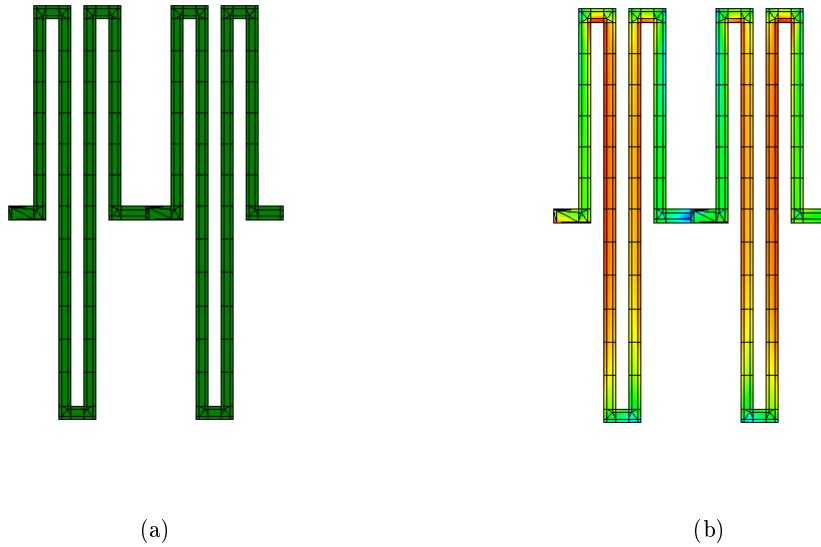
Čtvercový přerušovaný prstenec není dipólový typ rezonátoru (jako jsou ostatní vybrané struktury), ale pro srovnání je také zařazen. Čtvercový přerušovaný prstenec má délku strany 10 mm, délka přerušování je 2,4 mm. V simulačním programu IE3D za použití okrajových buněk byl rozdělen do 86 segmentů, viz Obrázek 3.3a. Proudové rozložení je zobrazeno na Obrázku 3.3b, kde vinou konkrétní podoby segmentace nejsou maxima proudové hustoty (tmavě červená barva) příliš patrná, nacházejí se ve dvou rozích a na vnitřní straně pravé stany čtverce. Minima se nacházejí na koncích přerušování prstence (tmavě modrá barva). Při rezonanční frekvenci 3,00 GHz je efektivní odrazná plocha $RCS = -65,04$ dBsm, šířka pásma je $BW = 371,1$ MHz, činitel jakosti $Q = 2,69$ výška rezonanční špičky $h = 20,75$ dB, elektrická velikost $ka = 0,31$ a posun rezonanční špičky po překrytí vodivou vrstvou $\Delta f = 2,92$ %.



Obrázek 3.3: Čtvercový přerušovaný prstenec, struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).

3.1.3 Meandrový dipól

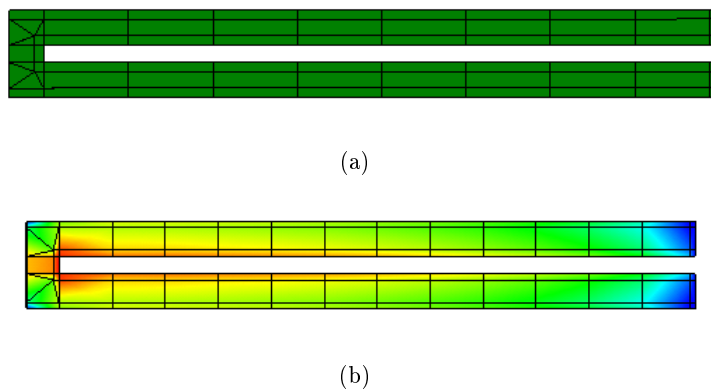
Meandrový dipól se skládá ze šesti meandrů o délce 15 mm (počítáno od středu k okraji meandru), mezera mezi rameny je mezera o šířce 1 mm. Vodič tvořící meandrovou strukturu je celkem dlouhý 194 mm a široký 1 mm. V simulačním programu IE3D za použití okrajových buněk byl rozdělen do 389 segmentů, viz Obrázek 3.4a. Proudové rozložení je zobrazeno na Obrázku 3.4b, kde maximální proudová hustota (tmavě červená barva) je ve svislých vnitřních částech meandru, minimální hodnoty (tmavě modrá barva) se nacházejí na spodním okraji meandru a na vnitřní straně symetrické struktury. Při rezonanční frekvenci 3,04 GHz je efektivní odrazná plocha $RCS = -43,92$ dBsm, šířka pásma je $BW = 574,9$ MHz, činitel jakosti $Q = 1,74$, výška rezonanční špičky $h = 22,57$ dB, elektrická velikost $ka = 0,96$ a posun rezonanční špičky po překrytí vodivou vrstvou $\Delta f = 3,63$ %.



Obrázek 3.4: Meandrový dipól, struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).

3.1.4 Ohnutý dipól (Varianta 1)

Ohnutý dipól se skládá ze dvou ramen o délce 20,45 mm, šířce 1 mm a mezerou mezi rameny 0,5 mm. V simulačním programu IE3D za použití okrajových buněk byl rozdělen do 83 segmentů, viz Obrázek 3.5a. Proudové rozložení je zobrazeno na Obrázku 3.5b, kde ve dvou vnitřních rozích ramen je proudová hustota maximální (tmavě červená barva) a na nespojených koncích ramen je minimální (tmavě modrá barva). Při rezonanční frekvenci 2,98 GHz je efektivní odrazná plocha $RCS = -76,10$ dBsm, šířka pásma je $BW = 315,8$ MHz, činitel jakosti $Q = 3,17$, hloubka rezonanční špičky $h = 40,34$ dB, elektrická velikost $ka = 0,64$ a posun rezonanční špičky po překrytí vodivou vrstvou $\Delta f = 6,60$ %.

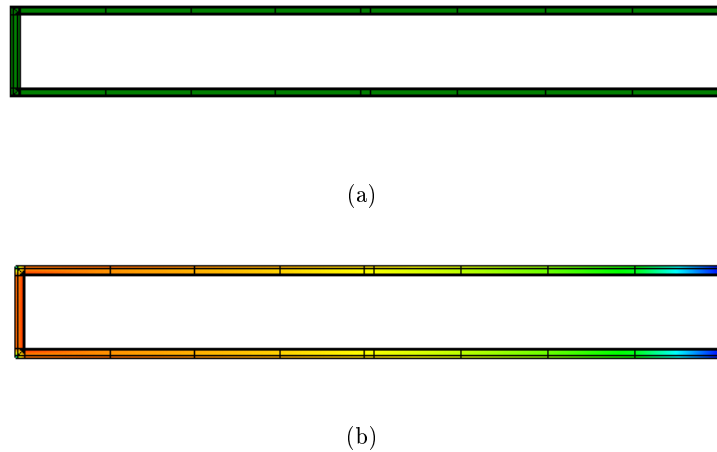


Obrázek 3.5: Ohnutý dipól (Varianta 1), struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).

3.1.5 Ohnutý dipól (Varianta 2)

Druhá varianta ohnutého dipólu se skládá ze dvou ramen o délce 19,45 mm, šířce 1 mm a mezerou mezi rameny 2 mm. V simulačním programu IE3D za použití okrajových buněk byl rozdělen do 79

segmentů, viz Obrázek 3.6a. Proudové rozložení je zobrazeno na Obrázku 3.6b, kde uprostřed spojky ramen je proudová hustota maximální (tmavě červená barva) a na nespojených koncích ramen je minimální (tmavě modrá barva). Při rezonanční frekvenci 2,98 GHz je efektivní odrazná plocha $RCS = -75,23$ dBsm, šířka pásma je $BW = 153,3$ MHz, činitel jakosti $Q = 6,52$ hloubka rezonanční špičky $h = 39,59$ dB, elektrická velikost $ka = 0,61$ a posun rezonanční špičky po překrytí vodivou vrstvou $\Delta f = 6,74$ %.



Obrázek 3.6: Ohnutý dipól (Varianta 2), struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).

3.1.6 Ohnutý dipól (Varianta 3)

Třetí varianta ohnutého dipólu se skládá ze dvou ramen o délce 17,5 mm a šířce 1 mm. Ramena se k sobě postupně přibližují, mezera mezi rameny na začátku je 2 mm, na konci je 0,5 mm. V simulačním programu IE3D za použití okrajových buněk byl rozdělen do 157 segmentů, viz Obrázek 3.7a. Proudové rozložení je zobrazeno na Obrázku 3.7b, kde je proudová hustota maximální (tmavě červená barva) a na koncích minimální (tmavě modrá barva). Při rezonanční frekvenci 2,95 GHz je efektivní odrazná plocha $RCS = -82,34$ dBsm, šířka pásma je $BW = 350,0$ MHz, činitel jakosti $Q = 2,86$ hloubka rezonanční špičky $h = 37,16$ dB, elektrická velikost $ka = 0,54$ a posun rezonanční špičky po překrytí vodivou vrstvou $\Delta f = 11,17$ %.



(a)

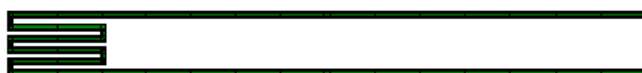


(b)

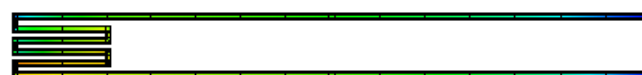
Obrázek 3.7: Ohnutý dipól (Varianta 3), struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).

3.1.7 Ohnutý dipól (Varianta 4)

Čtvrtá varianta ohnutého dipólu se skládá ze dvou ramen o délce 32,4 mm a jejich meandrovitým spojením o délce 5 mm, mezera mezi meandry je 2 mm. Všechny vodiče jsou 0,25 mm široké. V simulačním programu IE3D za použití okrajových buněk byl rozdělen do 273 segmentů, viz Obrázek 3.8a. Proudové rozložení je zobrazeno na Obrázku 3.8b, kde na povrchu meandrů je proudová hustota maximální (oranžová barva) a na koncích nespojených ramen je minimální (tmavě modrá barva). Při rezonanční frekvenci 3,23 GHz je efektivní odrazná plocha $RCS = -89,44$ dBsm, šířka pásma je $BW = 186,0$ MHz, činitel jakosti $Q = 5,38$, hloubka rezonanční špičky $h = 24,01$ dB, elektrická velikost $ka = 1,10$ a posun rezonanční špičky po překrytí vodivou vrstvou $\Delta h = 7,44$ %.



(a)



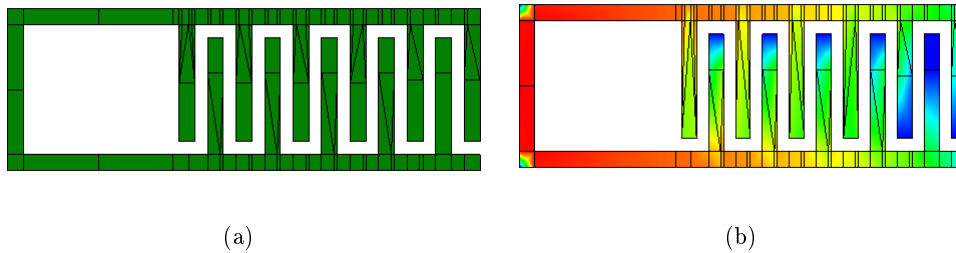
(b)

Obrázek 3.8: Ohnutý dipól (Varianta 4), struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).

3.1.8 Ohnutý dipól s kapacitním zakončením

Varianta ohnutého dipólu s kapacitním zakončením se skládá ze dvou ramen o délce 7,5 mm a devíti ID kapacitními prsty o šířce 0,25 mm a délce 1,8 mm, mezera mezi rameny je 2 mm. Všechny vodiče jsou 0,25 mm široké. V simulačním programu IE3D za použití okrajových buněk byl rozdělen do 126

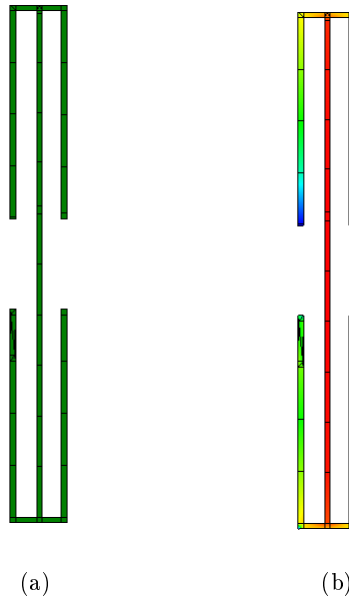
segmentů, viz Obrázek 4.11a. Proudové rozložení je zobrazeno na Obrázku 4.11b, kde na povrchu na spojnici ramen je proudová hustota maximální (tmavě červená barva) a na koncích nespojených ramen a kapacitních ID prstů je minimální (tmavě modrá barva). Při rezonanční frekvenci 2,86 GHz je efektivní odrazná plocha $RCS = -84,93$ dBsm, šířka pásma je $BW = 97,3$ MHz, činitel jakosti $Q = 10,28$ hloubka rezonanční špičky $h = 26,76$ dB, elektrická velikost $ka = 0,22$ a posun rezonanční špičky po překrytí vodivou vrstvou $\Delta f = 11,96$ %.



Obrázek 3.9: Ohnutý dipól s kapacitním zakončením, struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).

3.1.9 Kapacitně zatížený dipól (Varianta 1)

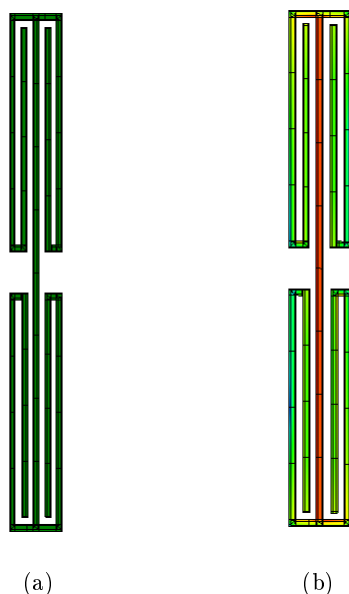
Kapacitně zatížený dipól je 23 mm dlouhý a 2,5 mm široký. Ramena kapacitního zatížení jsou dlouhá 9,5 mm a od dipólu jsou 0,875 mm vzdálená. Všechny vodiče jsou 0,25 mm široké. V simulačním programu IE3D za použití okrajových buněk byl rozdělen do 573 segmentů, viz Obrázek 3.10a. Proudové rozložení je zobrazeno na Obrázku 3.10b, kde na povrchu dipólu je proudová hustota maximální (tmavě červená barva) a na koncích zkracujících ramen je minimální (tmavě modrá barva). Při rezonanční frekvenci 3,04 GHz je efektivní odrazná plocha $RCS = -54,57$ dBsm, šířka pásma je $BW = 792,3$ MHz, činitel jakosti $Q = 1,26$ hloubka rezonanční špičky $h = 32,20$ dB, elektrická velikost $ka = 0,73$ a posun rezonanční špičky po překrytí vodivou vrstvou $\Delta f = 4,70$ %.



Obrázek 3.10: Kapacitně zatížený dipól (Varianta 1), struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).

3.1.10 Kapacitně zatížený dipól (Varianta 2)

Druhá varianta kapacitně zatíženého dipólu je 18,95 mm dlouhá a 2,3 mm široká. Ramena kapacitního zatížení jsou dlouhá 8,75 mm, mezera mezi nimi je 0,25 mm a od dipólu jsou 0,275 mm vzdálená. Všechny vodiče jsou 0,25 mm široké. V simulačním programu IE3D za použití okrajových buněk byl rozdělen do 276 segmentů, viz Obrázek 3.11a. Proudové rozložení je zobrazeno na Obrázku 3.11b, kde na povrchu dipólu je proudová hustota maximální (tmavě červená barva) a na vnějších okrajích zkracujících ramen je minimální (tmavě modrá barva). Při rezonanční frekvenci 2,88 GHz je efektivní odrazná plocha $RCS = -53,47$ dBsm, šířka pásma je $BW = 283,2$ MHz, činitel jakosti $Q = 3,53$ hloubka rezonanční špičky $h = 27,87$ dB, elektrická velikost $ka = 0,57$ a posun rezonanční špičky po překrytí vodivou vrstvou $\Delta f = 4,23$ %.



Obrázek 3.11: Kapacitně zatížený dipól (Varianta 2), struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).

3.1.11 Kapacitně zatížený dipól (Varianta 3)

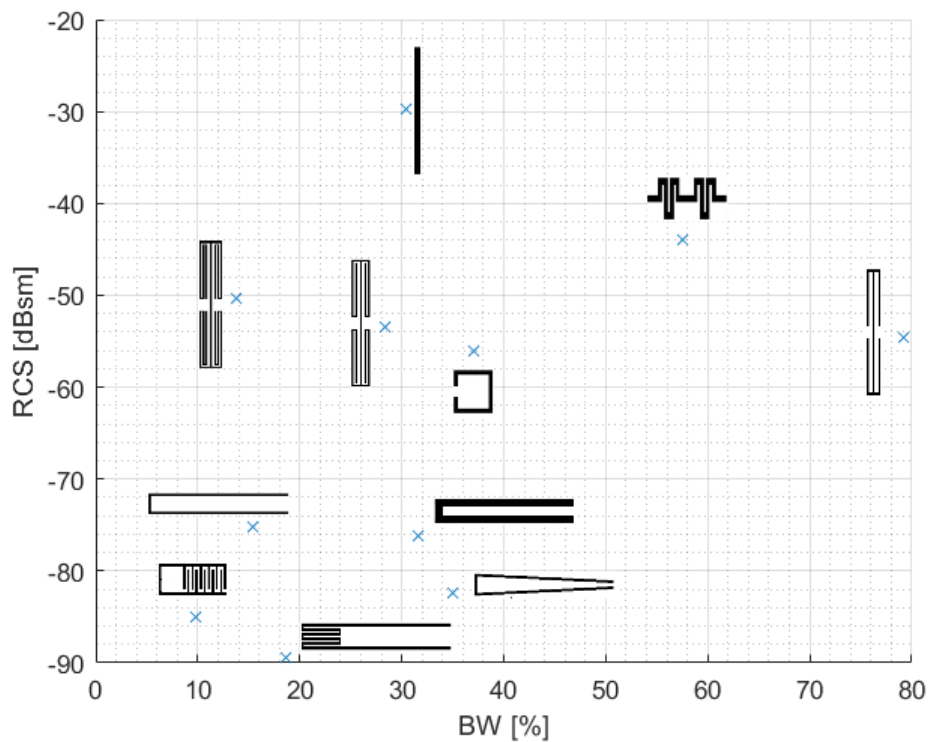
Třetí varianta kapacitně zatíženého dipólu je 19,5 mm dlouhá a 2,35 mm široká. Ramena kapacitního zatížení jsou dlouhá 8,725 mm, mezera mezi nimi je 0,175 mm a od dipólu jsou 0,175 mm vzdálená. Dipól a vnější ramena jsou 0,275 mm široká, vnitřní ramena jsou 0,2 mm široká. V simulačním programu IE3D za použití okrajových buněk byl rozdělen do 812 segmentů, viz Obrázek 3.12a. Proudové rozložení je zobrazeno na Obrázku 3.12b, kde maximální proudová hustota není vůbec patrná (žlutozelená barva) a minimální (tmavě modrá barva) se nachází na spodním okraji spojení zkracujících ramen. Při rezonanční frekvenci 2,94 GHz je efektivní odrazná plocha $RCS = -50,4 \text{ dBsm}$, šířka pásma je $BW = 137,1 \text{ MHz}$, činitel jakosti $Q = 7,30$ hloubka rezonanční špičky $h = 20,14 \text{ dB}$, elektrická velikost $ka = 0,61$ a posun rezonanční špičky po překrytí vodivou vrstvou $\Delta f = 11,06 \%$.



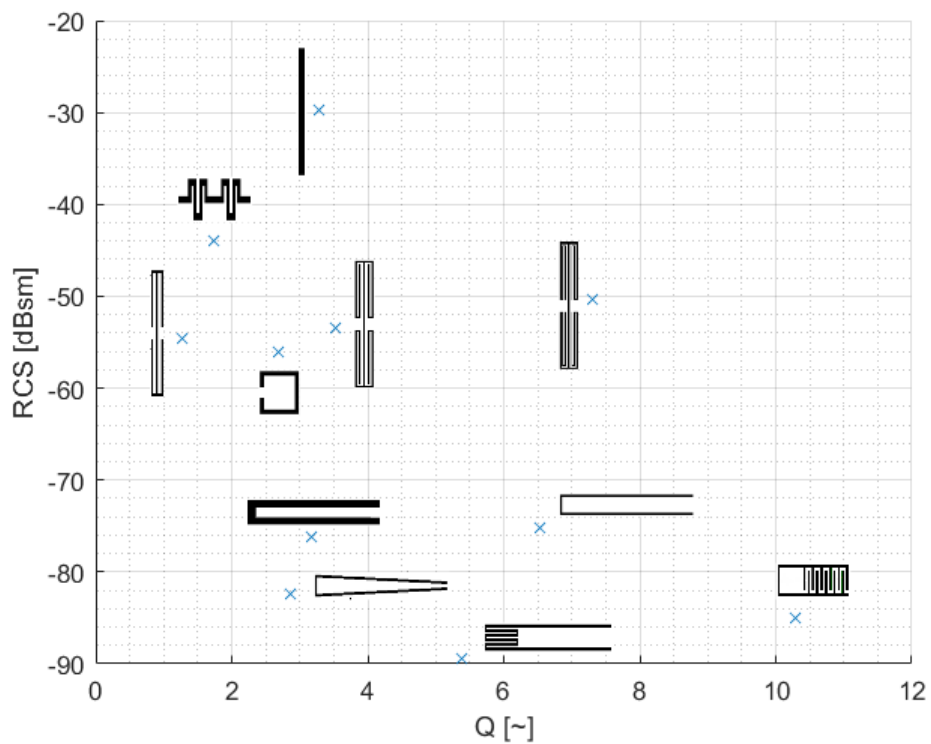
Obrázek 3.12: Kapacitně zatížený dipól (Varianta 3), struktura (a) proudové rozložení v rezonanci (b).

3.1.12 Porovnání parametrů

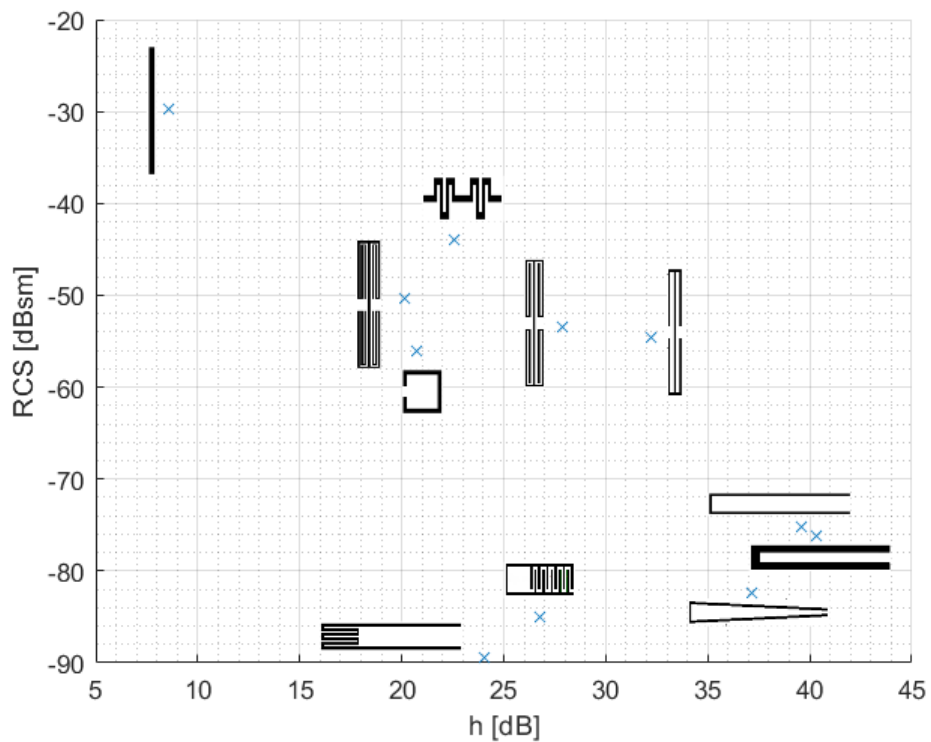
V grafech na obrázcích 3.13-3.17 jsou porovnány šířky pásem BW , činitel jakosti Q , výšky rezonančních špiček h , posun rezonančních špiček při překrytí dielektrickou vrstvou Δf a elektrické velikosti ka pro jednotlivé struktury. Jelikož je cílem této práce nalézt vhodnou strukturu odražeče, která bude citlivá na umístění dielektrické vrstvy v jeho blízkosti, budou klíčovými parametry výška rezonanční špičky, její posun při překrytí odražeče dielektrickou vrstvou a bude snaha tyto parametry maximalizovat. Zajímavým parametrem bude také elektrická velikost, protože není vhodné, aby byl odražeč příliš objemný. Méně důležitými parametry jsou šířka pásma a činitel jakosti. Z grafu na obrázku 3.17 je patrné, že ohnutý dipól s kapacitním zakončením má přiměřenou výšku rezonanční špičky, která by mohla být spolehlivě detekována. Zároveň je tato dipólová struktura nejcitlivější na překrytí vodivou vrstvou. Zmíněným požadavkům dále poměrně dobře vyhovuje třetí varianta kapacitně zatíženého dipólu, která má ovšem výrazně nižší úroveň RCS . Z teorie elektricky malých antén vyplývá, že se snižujícími se fyzickými rozměry rezonanční struktury (při zachování její rezonanční frekvence) dochází ke zvyšování jejího činitele jakosti Q a tedy ke snižování šířky pásma rezonance BW . Takovéto malé struktury však zpravidla méně vyzařují (nižší RCS). Tento teoretický poznatek nejlépe potvrzuje struktura ohnutého dipólu s kapacitním zakončením.



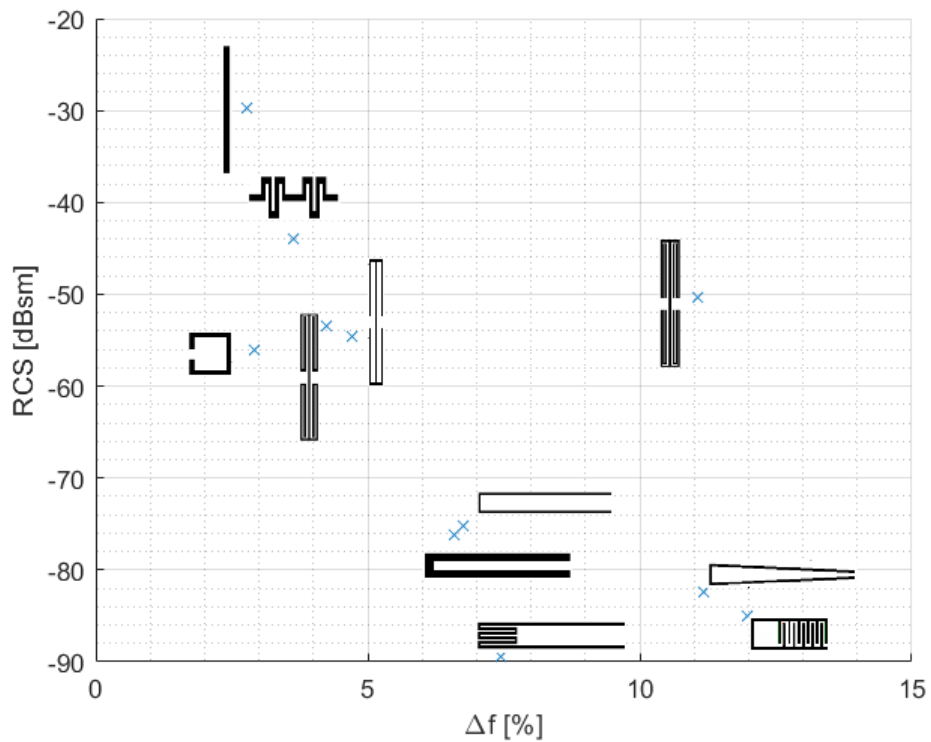
Obrázek 3.13: Srovnání odražečů, RCS v závislosti na šířce pásma BW .



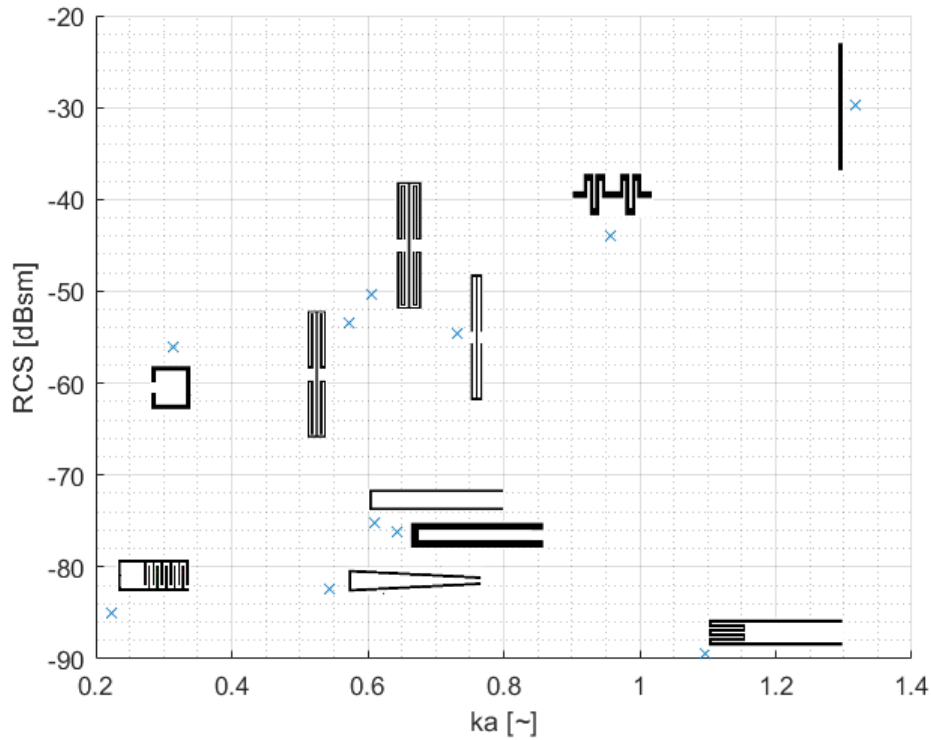
Obrázek 3.14: Srovnání odražečů, RCS v závislosti na činiteli jakosti Q .



Obrázek 3.15: Srovnání odražečů, RCS v závislosti na výšce rezonanční špičky h .



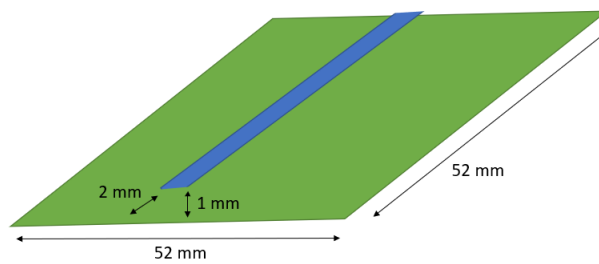
Obrázek 3.16: Srovnání odražečů, RCS v závislosti na posunu rezonanční špičky Δf .



Obrázek 3.17: Srovnání odražečů, RCS v závislosti na elektrické velikosti ka .

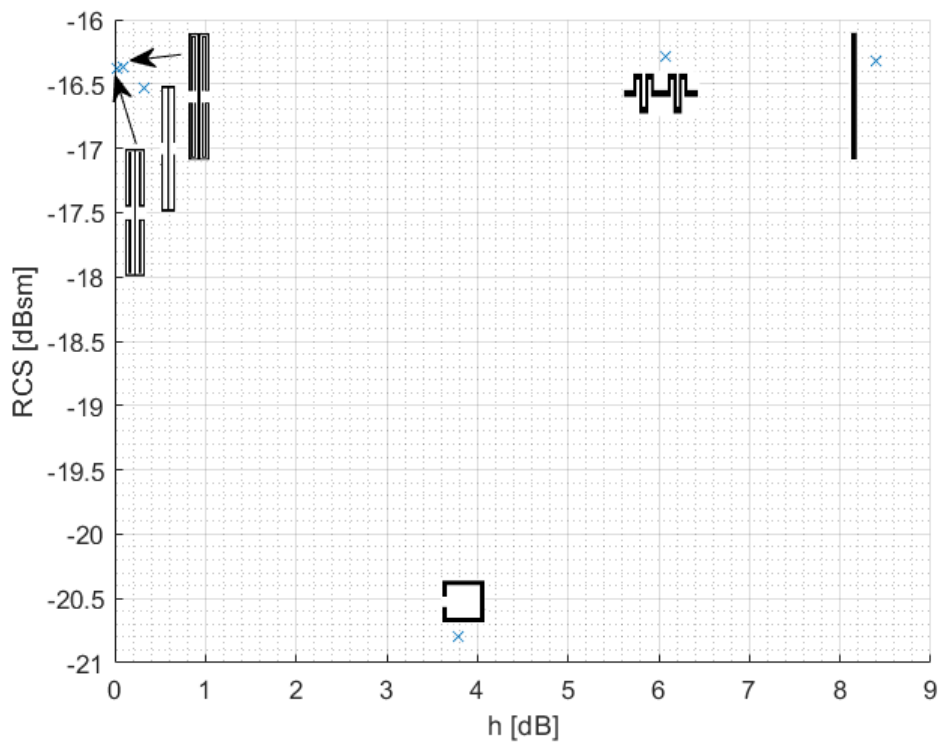
3.2 Dvouvrstvé odražeče se zemní rovinou

Všechny vybrané struktury se stejnými parametry popsané v předchozí kapitole byly umístěny 1 mm nad zemní rovinu ve tvaru čtverce o délce strany 52 mm. Vzdálenost 1 mm mezi zemní rovinou a strukturou odražeče je optimální pro praktické použití. Není vhodné, aby byl tag moc tlustý a objemný. Naopak u extrémně nízkých výšek lze ze znalosti principu zrcadlení předpokládat pokles vyzařování nebo odrazu vlivem destruktivních interferencí [68]. Rozměry zemní roviny byly nastaveny tak, aby se nad ní vešly všechny popsané struktury a byly tak zachovány jejich rozměry. Nad zemní rovinu byly postupně umísťovány všechny již popsané struktury, jejichž rozměry nebyly změněny. Jako příklad je na Obrázku 3.18 půlvlnný dipól nad zemní rovinou. Jeho horní a dolní kraj je 2 mm vzdálený od vnitřního okraje smyčky.

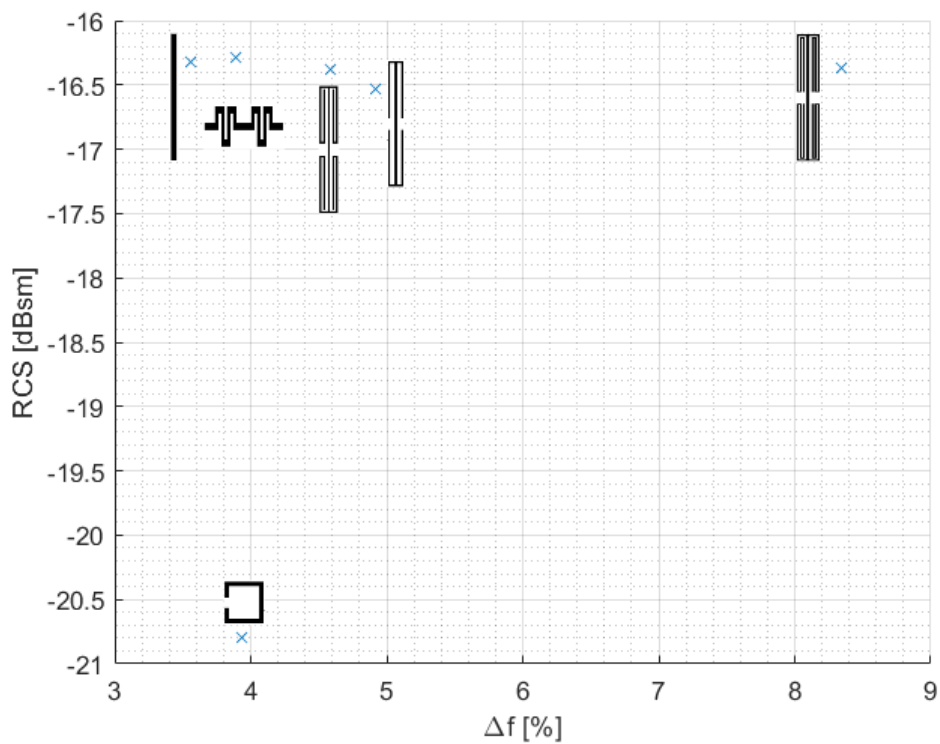


Obrázek 3.18: Půlvlnný dipól nad zemní rovinou, struktura.

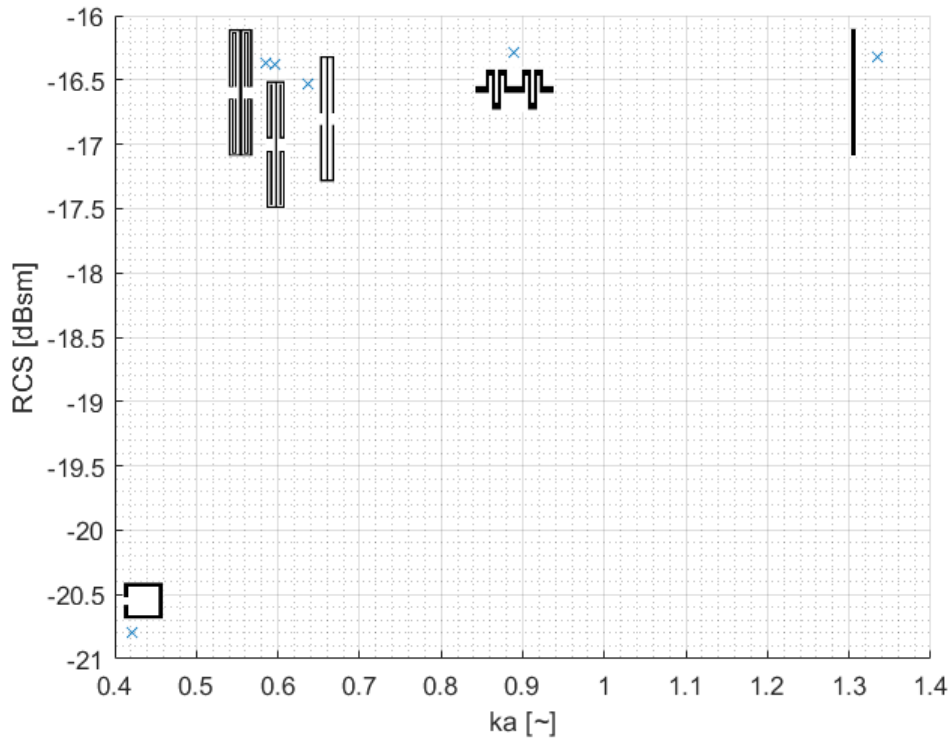
V simulátoru IED3 byla provedena frekvenční analýza efektivní odrazné plochy RCS daných struktur nad zemní rovinou. Při překrytí struktur vodivou vrstvou, došlo k posunu rezonančního propadu. Rovněž byla vypočtena v prostředí MATLAB hloubka rezonanční špičky h , posun rezonanční špičky Δf a elektrická velikost ka . V případě ohnutých dipólů (všechny varianty) nebyly patrné žádné rezonanční propady, které byly pravděpodobně utlumeny zemní rovinou. Grafy závislosti šířky pásma BW a tedy i činitele jakosti Q na efektivní odrazné ploše RCS nemá smysl vykreslovat, protože hloubky rezonančních propadů (hloubka rezonanční špičky) u všech variant kapacitně zakončených dipólů jsou menší než 3 dB a tedy by v grafu byly zobrazeny pouze tři struktury půlvlnný dipól čtvercový přerušovaný prsteneček a meandrový dipól. Výsledky jsou zobrazeny v grafech na Obrázcích 3.19-3.21. Umístěním struktur nad zemní rovinou došlo ke zvýšení úrovně RCS i o více než 30 dB. Nejvyšší citlivost na vodivou vrstvu vykazuje třetí varianta kapacitně zatíženého dipólu, přestože výška jeho rezonanční špičky je malá a mohl by být problém s její detekcí. Překvapivé je, že struktura čtvercového přerušovaného prstencec posouvá efektivní odraznou plochu daleko níže než ostatní struktury, které přibližně drží jednu úroveň.



Obrázek 3.19: Srovnání odražečů, RCS v závislosti na hloubce rezonanční špičky h .



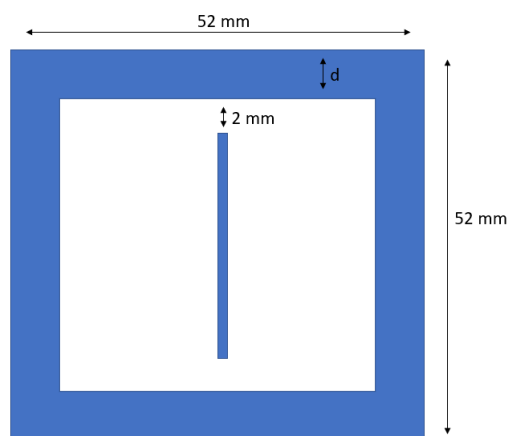
Obrázek 3.20: Srovnání odražečů, RCS v závislosti na posunu rezonanční špičky Δf .



Obrázek 3.21: Srovnání odražečů, RCS v závislosti na elektrické velikosti ka .

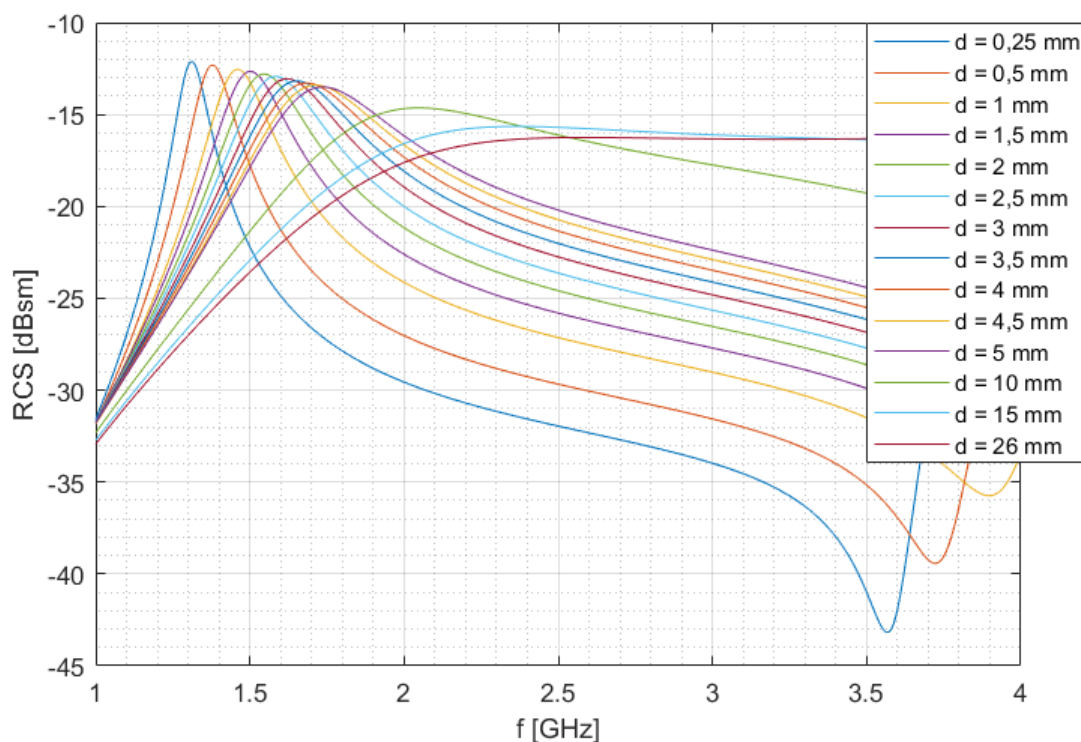
3.3 Jednovrstvé odražeče se zvýšeným RCS

Další možností, jak ovlivnit úroveň efektivní odrazné plochy vybraných struktur je umístění relativně velké vodivé plochy nebo struktury do roviny odražeče. Zvolena byla čtvercová smyčka, která rezonuje mimo rezonátor, který byl umístěn uprostřed smyčky. Do středu rezonanční smyčky byly postupně umísťovány všechny již popsané struktury, jejichž rozměry nebyly změněny. Jako příklad je na Obrázku 3.22 půlvlnný dipól uprostřed smyčky. Jeho horní a dolní kraj je 2 mm vzdálený od vnitřního okraje smyčky.



Obrázek 3.22: Půlvlnný dipól uprostřed vodivé smyčky, struktura.

Délka strany smyčky byla kvůli porovnání parametrů zvolena stejná jako délka strany zemní roviny 52 mm. Závislost odrazné plochy na šířce smyčky byla vykreslena na obrázku 3.23. Šířka smyčky byla postupně měněna od $d = 0,25$ mm až do úplného vyplnění ohraničené plochy (šířka smyčky $d = 26$ mm), přičemž vnější rozměr smyčky byl zachován.

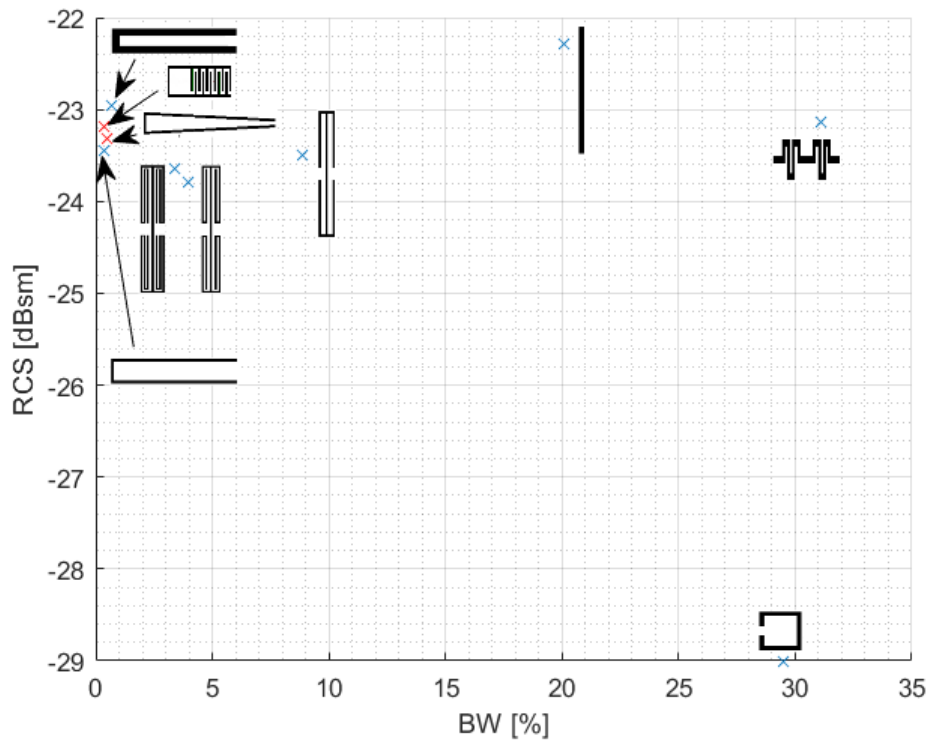


Obrázek 3.23: Závislost RCS na šířce smyčky d .

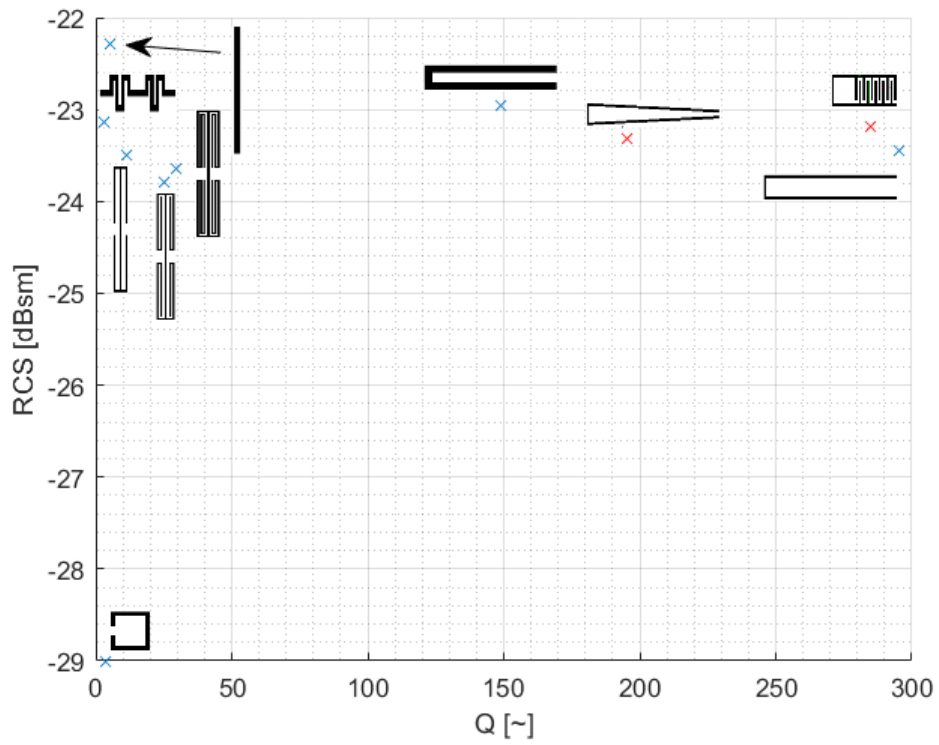
Optimální úroveň RCS byla nalezena při šířce smyčky 3 mm díky mírnému poklesu RCS v rozmezí frekvencí 2 GHz až 3 GHz. Příliš se neměnicí hodnoty RCS jsou dobré k tomu, aby si senzor

bez účinné látky stejně jako za její přítomnosti zachoval co největší RCS, a tedy neklesal poměr signálu ku šumu a nezhoršovala se tak možnost (vzdálenost) detekce.

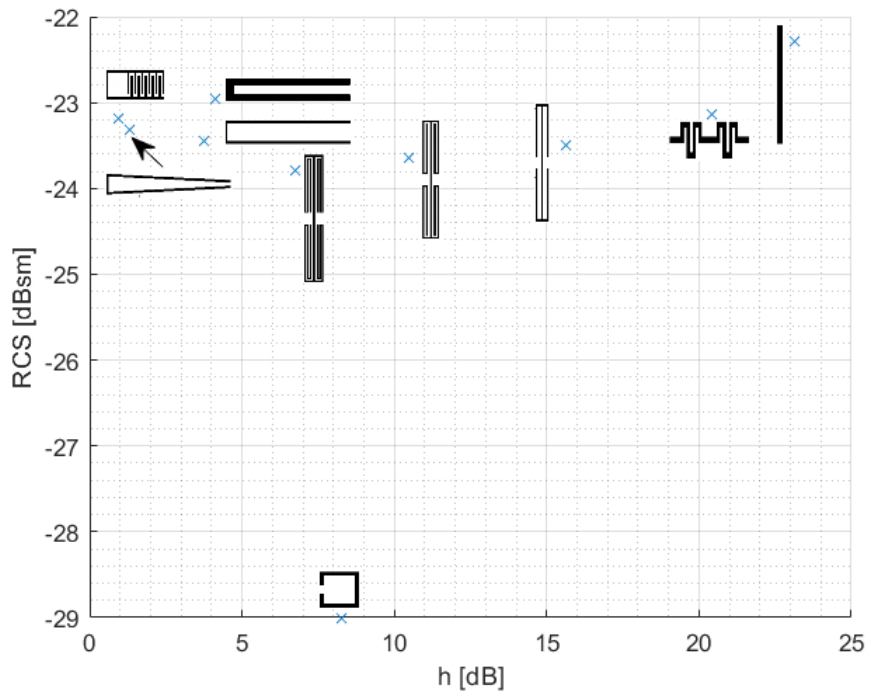
V simulátoru IED3 byla provedena frekvenční analýza efektivní odrazné plochy RCS daných struktur uvnitř smyčky. Při překrytí struktur vodivou vrstvou, došlo k posunu rezonančního propadu. Rovněž byla vypočtena v prostředí MATLAB šířka pásma BW , činitel jakosti Q , hloubka rezonanční špičky h a posun rezonanční špičky Δf . Graf závislosti efektivní odrazné plochy RCS na elektrické velikosti ka nemá smysl, protože všechny struktury jsou naladěny na rezonanční frekvenci blízké 3 GHz a největší rozměr je dán rozměrem smyčky, který se také nemění. To znamená, že by se elektrická velikost téměř nelišila. Výsledky jsou zobrazeny v grafech na Obrázcích 3.24-3.27. V případě čtvrté varianty ohnutého dipólu (meandrové spojení ramen) nebyl patrný žádný rezonanční propad, pravděpodobně byl utlumen smyčkou. V grafech závislosti šířky pásma 3.24 a činitele jakosti 3.25 jsou červenými křížky znázorněny hodnoty, které označují pokles o 1 dB, nikoli o 3 dB, protože třetí varianta ohnutého dipólu a ohnutý dipól s kapacitním zakončením nedosahují takové hloubky rezonančního propadu. Podobně jako v případě umístění struktur nad zemní rovinu dosahují dipólové struktury ve smyčce výrazně vyšší úrovně RCS než bez ní. Opět struktura čtvercového přerušového prstence posunuje úroveň RCS výrazně níže než ostatní dipólové struktury. Nejcitlivější na překrytí dielektrickou vrstvou je v tomto případě ohnutý dipól s kapacitním zakončením, i když má nejnižší výšku rezonanční špičky. Dobře citlivá je také třetí varianta kapacitně zatíženého dipólu, která má ovšem výrazně nižší úroveň RCS .



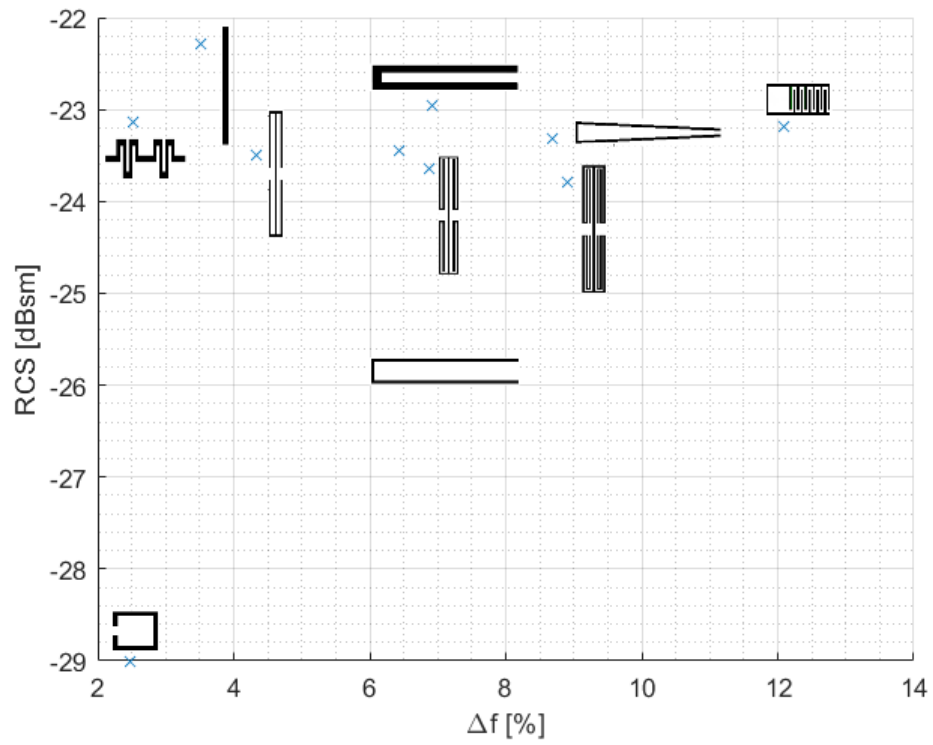
Obrázek 3.24: Srovnání odražečů, RCS v závislosti na šířce pásma BW .



Obrázek 3.25: Srovnání odražečů, RCS v závislosti na činiteli jakosti Q .



Obrázek 3.26: Srovnání odražečů, RCS v závislosti na hloubce rezonanční špičky h .



Obrázek 3.27: Srovnání odražečů, RCS v závislosti na posunu rezonanční špičky Δf .

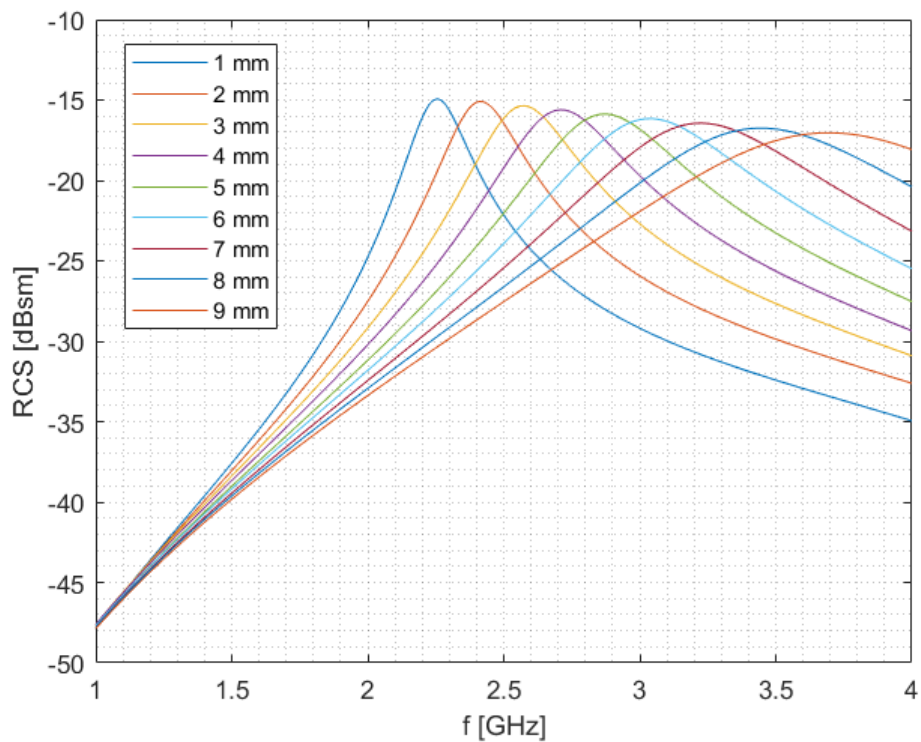
4 Ohnutý dipól s kapacitním zakončením jako senzor

Ohnutý dipól s kapacitním zakončením umístěný uvnitř smyčky byl na základě předchozího rozboru vybrán pro vytvoření senzoru citlivého na přítomnost chemické látky. Hloubka rezonanční špičky tohoto typu dipólu je ve srovnání s ostatními nejmenší, přesto ale struktura vykazovala nejlepší citlivost na vodivou vrstvu a optimální úroveň efektivní odrazné plochy. V následující parametrické studii je snaha nalézt optimální nastavení parametrů dipólu, tak aby došlo i ke zvýšení rezonanční špičky. Rozměry destičky 50 cm x 32 cm, na níž bude senzor vyroben, jsou uzpůsobeny pro měření ve vlnovodu R32. Vlastní vodivá smyčka musela být zvolena o 3 mm menší, aby nezkratovala vlnovod. Rozměry smyčky byly zvoleny 44 cm x 26 cm.

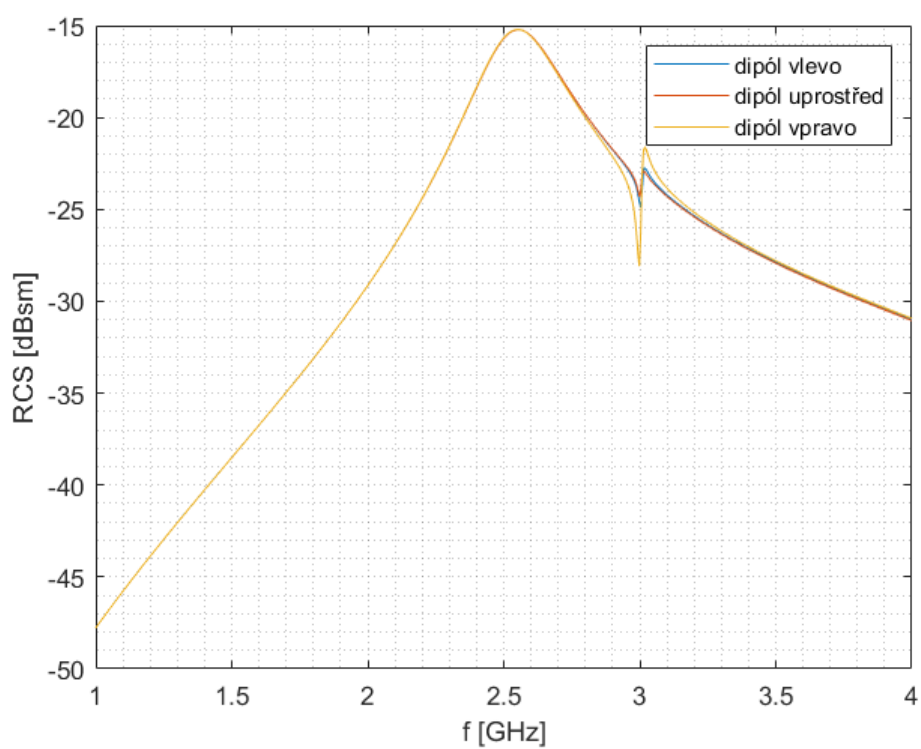
4.1 Parametrická studie

V grafech na obrázcích 4.1-4.10 jsou zobrazeny průběhy RCS v závislosti na různých parametrech - šířka smyčky, umístění ohnutého dipólu ve smyčce, poměr délky a šířky při zachování celkové délky ohnutého dipólu, počet ID kapacitních prstů, šířka pásku U, šířka kapacitních zakončení a mezer v ID struktuře, permitivita substrátu, reakce na citlivou vrstvu.

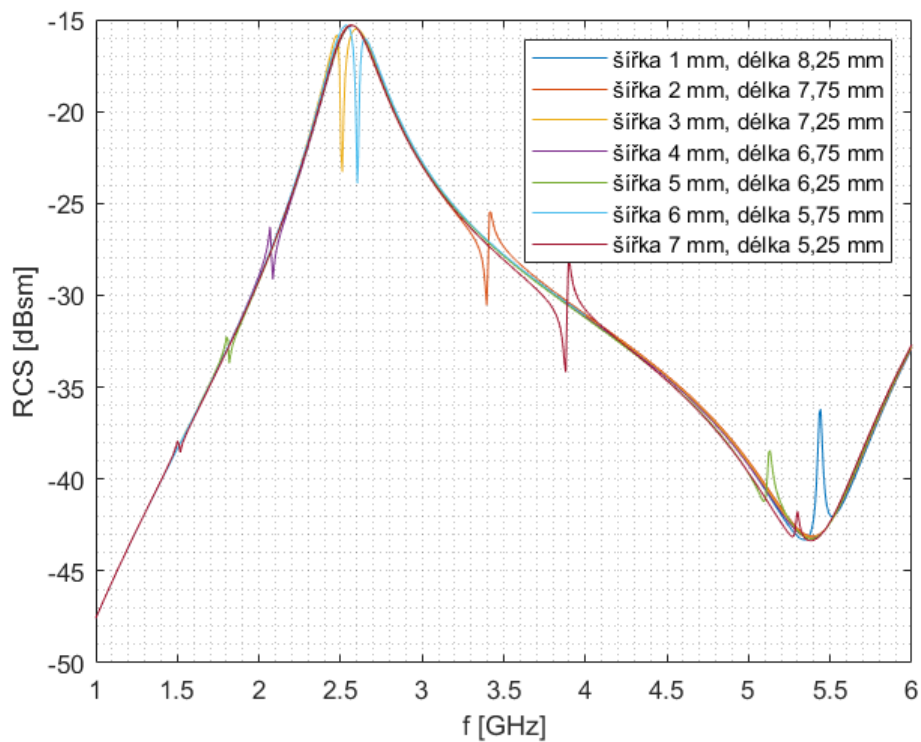
Z grafů je patrné, že při kombinaci určitých parametrů došlo k výraznému zvýšení rezonančního propadu Δf . Nejvíce hloubku rezonančního propadu ovlivňuje umístění dipólu s kapacitním zakončením ve smyčce, 2 mm od pravého okraje je hloubka rezonančního propadu h největší, viz Obrázek 4.2. Velmi podstatnými parametry jsou délka a šířka ohnutého dipólu, jejichž součet je stále konstantní, viz Obrázek 4.3. Ostatní parametry, jako jsou šířka vnějšího vodiče, změna permitivity substrátu, šířka ID prstů kapacitního zakončení, počet ID prstů kapacitního zakončení, spíše působí změnu rezonanční frekvence struktury, než že by výrazně měnily hloubku rezonančního propadu. Na přítomnost citlivé vrstvy lépe reaguje odražeč se substrátem s nižší permitivitou a s větší šířkou ID prstů kapacitního zakončení.



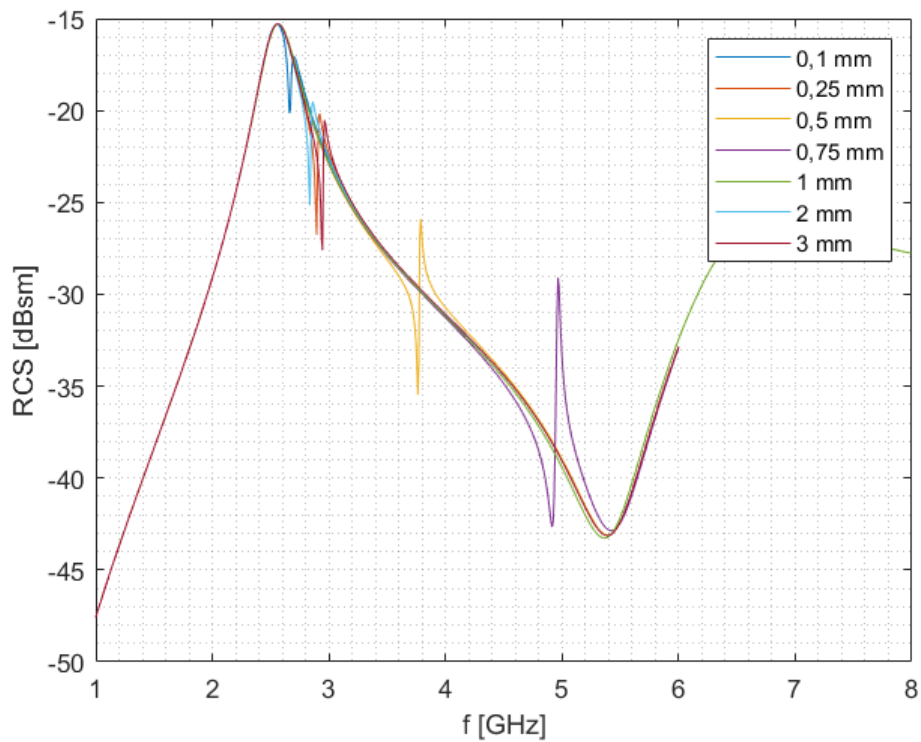
Obrázek 4.1: Změna šířky smyčky.



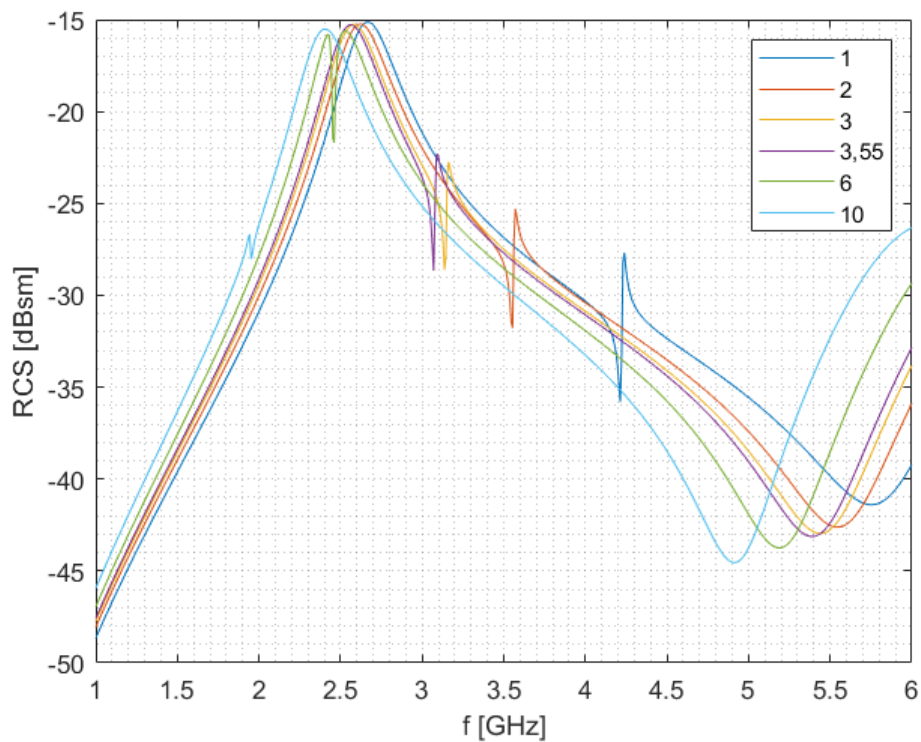
Obrázek 4.2: Poloha dipólu uvnitř smyčky.



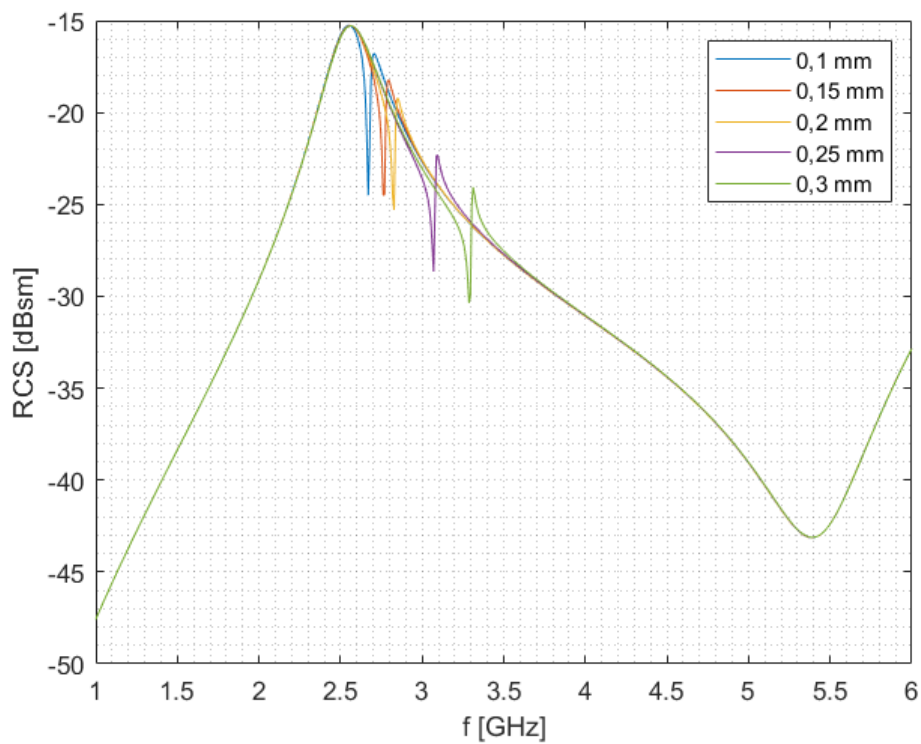
Obrázek 4.3: Změna délky a šířky dipólu při zachování celkové délky.



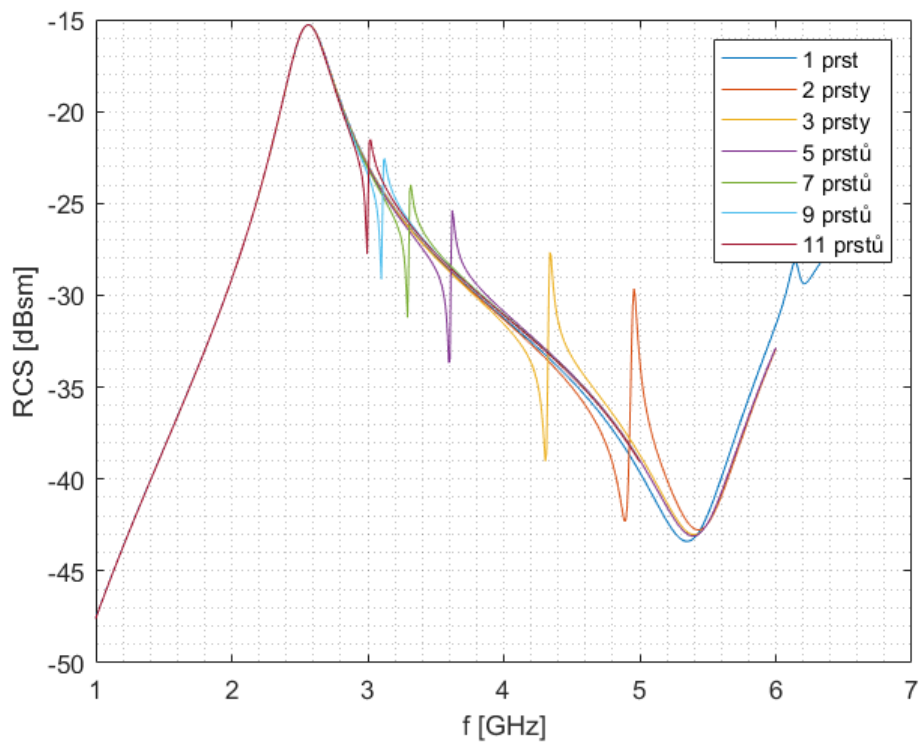
Obrázek 4.4: Změna šířky vnějšího vodiče.



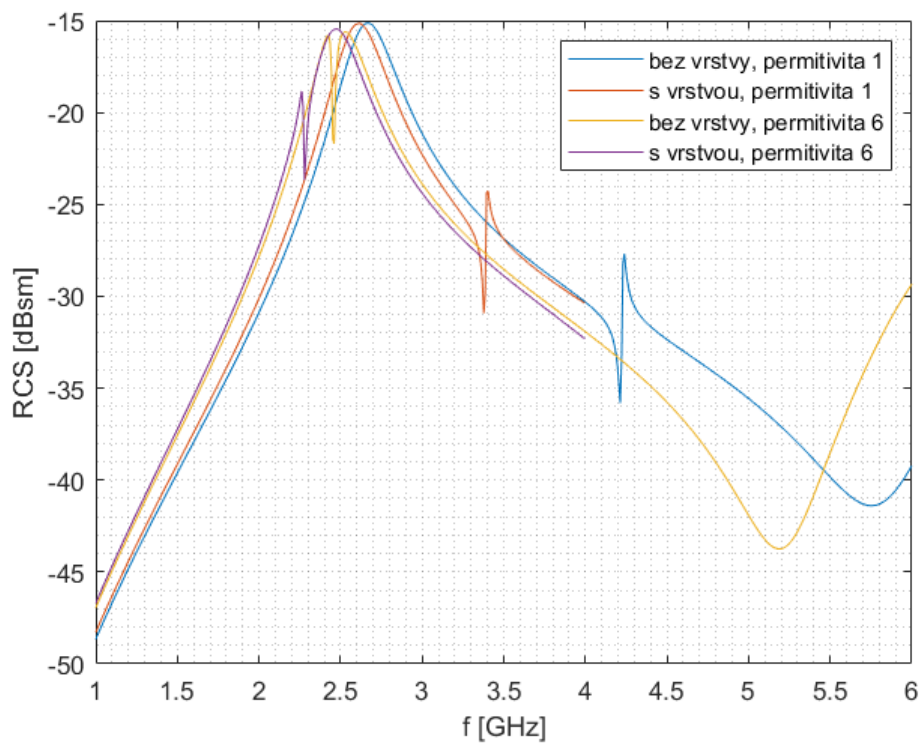
Obrázek 4.5: Změna permitivity substrátu.



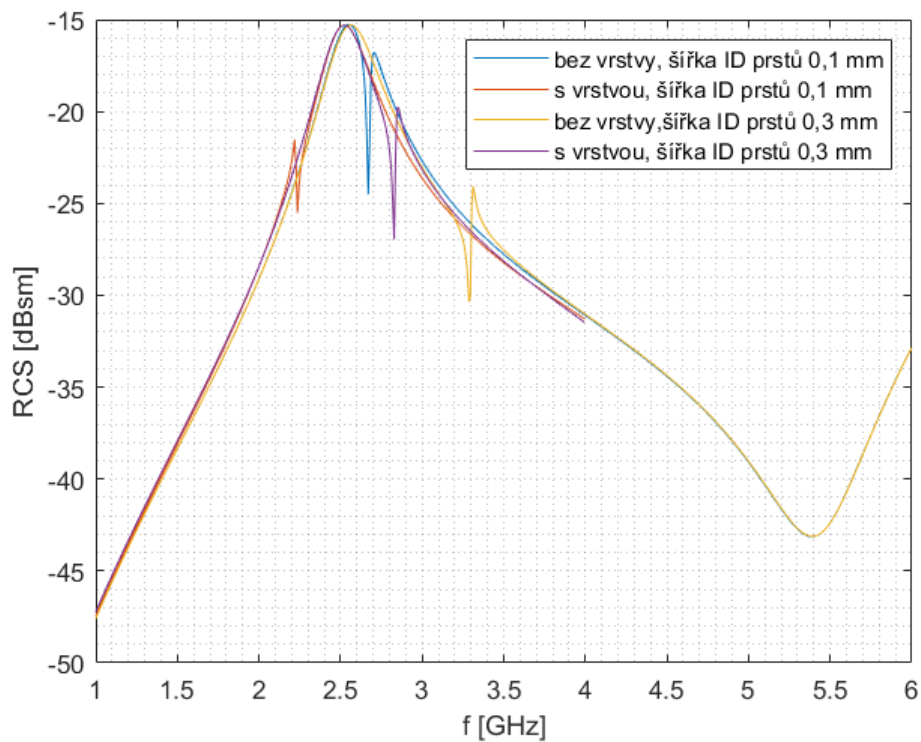
Obrázek 4.6: Změna šířky ID prstů kapacitního zakončení.



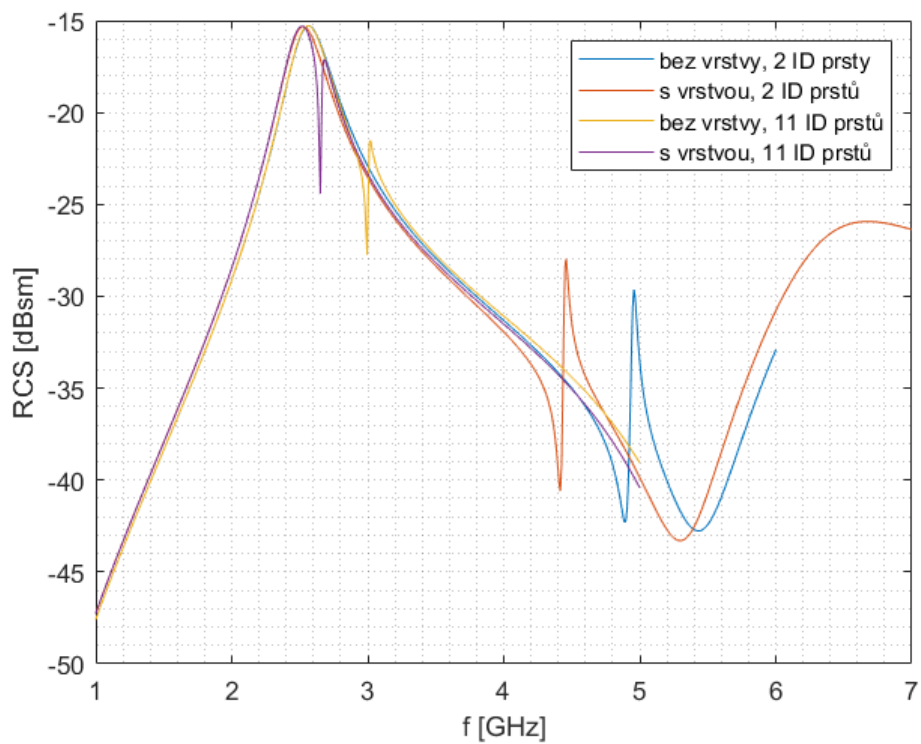
Obrázek 4.7: Počet ID prstů kapacitního zakončení.



Obrázek 4.8: Citlivost na vodivou vrstvu, změna permitivity substrátu.



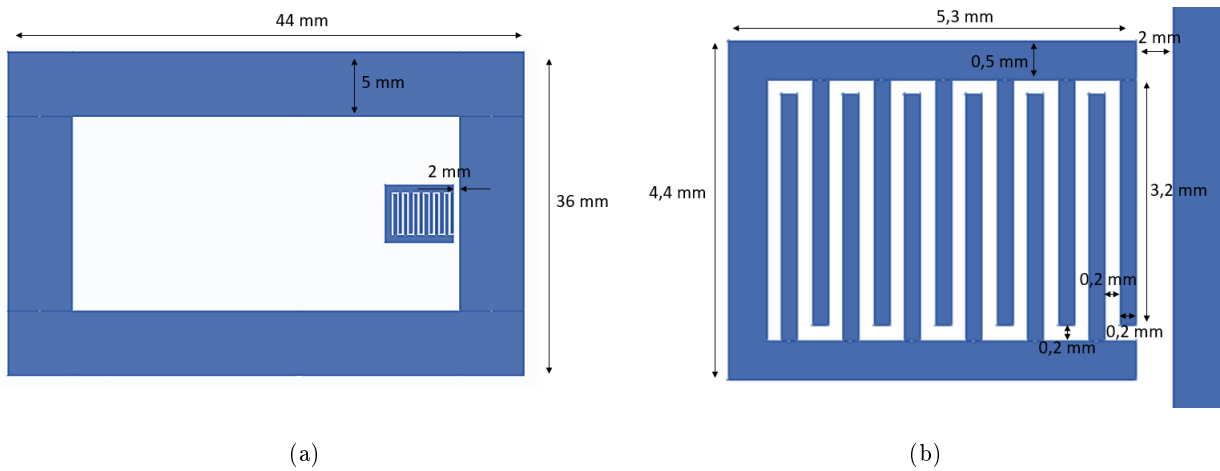
Obrázek 4.9: Citlivost na vodivou vrstvu, změna šířky kapacitních zakončení.



Obrázek 4.10: Citlivost na vodivou vrstvu, změna počtu kapacitních zakončení.

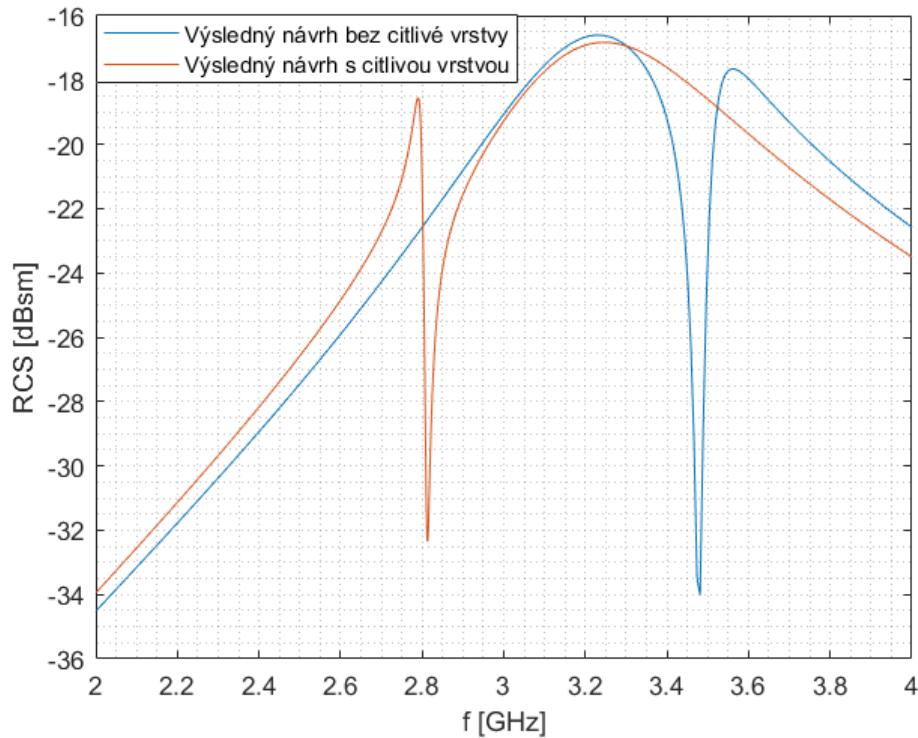
4.2 Optimalizovaný návrh

Hlavní úpravou návrhu je umístění kapacitně zatíženého dipólu na substrátu na bázi kaptonu (Dupont Pyralux AP 8515R) s permitivitou 3, která také přispívá ke zvýšení citlivosti, viz Obrázek 4.8. Podstatné zvýšení citlivosti bylo umožněno díky extrémně nízké tloušťce substrátu 0,025 mm, která výrazně snížila efektivní permitivitu v okolí rezonanční struktury. Optimalizovaný návrh odražeče se skládá z ohnutého dipólu s kapacitním zakončením umístěného 2 mm od pravého vnitřního okraje obdélníkové smyčky s délkami stran 44 mm a 36 mm a šířkou 5 mm, viz Obrázek 4.11a. Samotný ohnutý dipól s kapacitním zakončením má délku ramen 5,3 mm, ramena jsou od sebe 3,4 mm vzdálená a mají šířku 0,5 mm. Ohnutý dipól má dvanáct ID prstů kapacitního zakončení o šířce 0,2 mm, délce 3,2 mm a vzdálenosti od sebe navzájem 0,2 mm, viz Obrázek 4.11b.



Obrázek 4.11: Optimalizovaný návrh ohnutého dipólu s kapacitním zakončením.

V simulačním programu IE3D za použití okrajových buněk byl ohnutý dipól s kapacitním zakončením rozdělen do 126 segmentů. Při rezonanční frekvenci 3,48 GHz je jeho efektivní odrazná plocha $RC S = -17,5 \text{ dBsm}$, šířka pásma je $BW = 17,2 \text{ MHz}$, činitel jakosti $Q = 58,02$, hloubka rezonanční špičky $h = 16,52 \text{ dB}$, posun rezonanční špičky po překrytí vodivou vrstvou $\Delta f = 19,22 \%$ a elektrická vodivost $ka = 1,60$, která je daná rozměrem mřížky $a = 22 \text{ mm}$, viz Obrázek 4.12.



Obrázek 4.12: Průběh RCS optimalizovaného návrhu ohnutého dipólu s kapacitním zakončením.

V Tabulce 1 jsou srovnány parametry prvního návrhu ohnutého dipólu s kapacitním zakončením popsaného v kapitole 5.1 s optimalizovaným návrhem uvedeným v této kapitole. U optimalizovaného návrhu je patrné výrazné zvýšení úrovně RCS a mírné zvýšení citlivosti na dielektrickou vrstvu Δf . Naopak došlo k drobnému poklesu hloubky rezonančního propadu h , přesto by špička měla být spolehlivě detekovatelná.

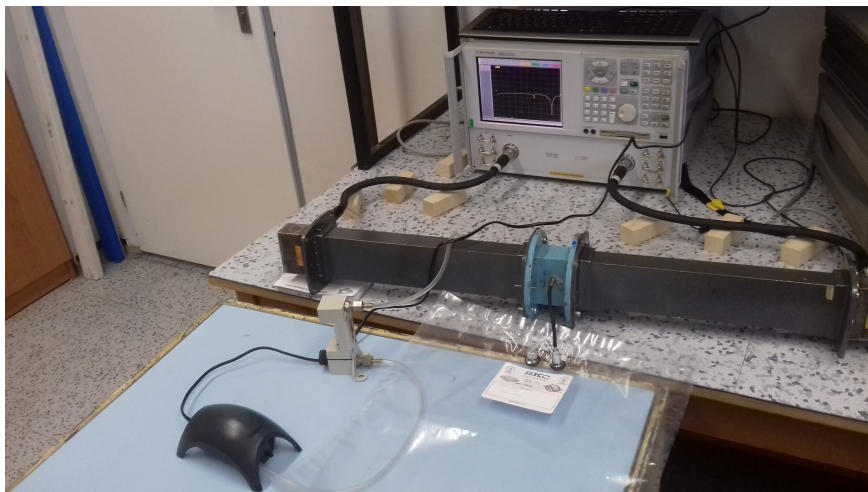
Tabulka 1: Srovnání parametrů prvního a optimalizovaného návrhu ohnutého dipólu s kapacitním zakončením.

Dipól s kap. zakončením	f_r [GHz]	RCS [dBsm]	BW [MHz]	Q [~]	h [dB]	Δf [%]	ka [~]
První návrh	2,86	-84,9	97,3	10,3	26,76	11,96	0,22
Optimalizovaný návrh	3,48	-17,5	17,2	58,02	16,52	19,22	1,60

4.3 Měření ve vlnovodu

Výsledný návrh ohnutého dipólu s kapacitním zakončením byl proměřen ve vlnovodu. Odražeč na substrátu AP 8515R byl umístěn vodorovně do středu měřicí komory tvořené 70 mm dlouhým úsekem vlnovodu R32 odděleným od zbytku trasy pomocí tedlarových membrán umístěných na obou jeho koncích. Obě delší strany tohoto úseku byly opatřeny olivkami pro přivedení a výstup měřeného plynu.

K oběma stranám úseku vlnovodu R32 byly připevněny dva dlouhé úseky vlnovodu R32. Koeficient přenosu s_{21} byl měřen vektorovým analyzátozem Agilent E8364A s maximálním frekvenčním rozsahem 45 MHz – 50 GHz. Do vlnovodu byl pouštěn výkon 5 dBm, měřeno bylo ve frekvenční oblasti 2,2 – 4,6 GHz, s rozlišením přístroje 16001 bodů. Na Obrázku 4.13 je vyfocena celá měřící aparatura včetně plynového čerpadla, tedlarového vaku na plyn a měřiče průtoku plynu.

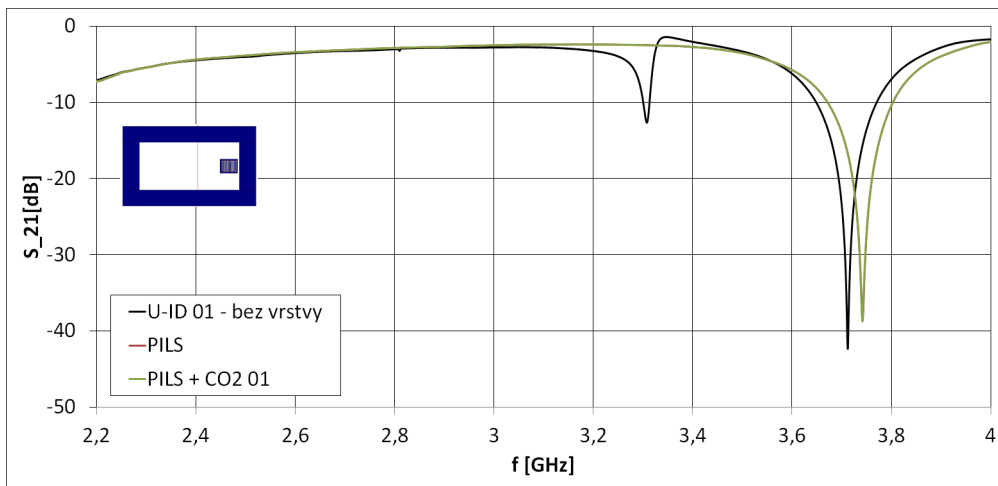


Obrázek 4.13: Schéma měření.

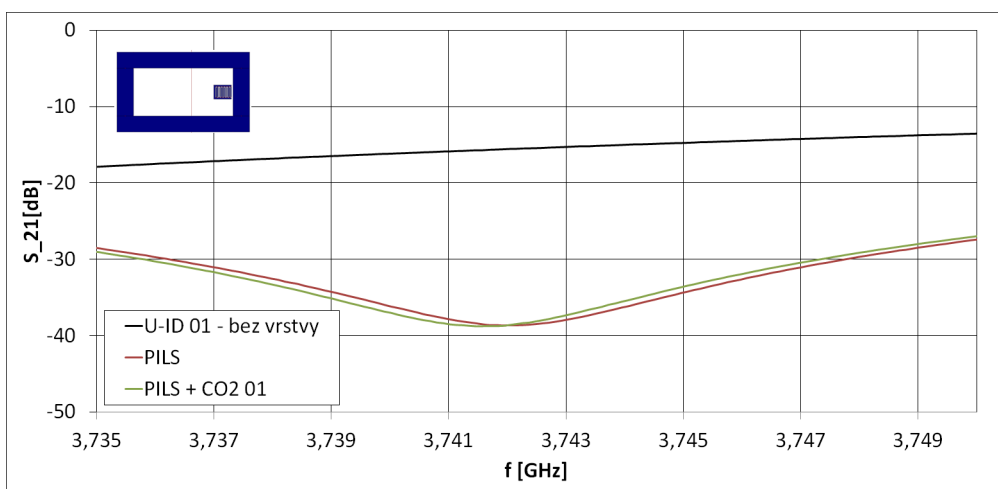
Měření bylo provedeno pro čtyři různé vrstvičky z iontové kapaliny PILS (tetrabutylfosfónium 3-sulfopropylakrylát) nebo PMMA (Polymethylmethakrylát) nanesené na strukturu odražeče. v Tabulce 2 jsou uvedené informace o použitých chemických látkách. Na strukturu nasáklé iontovou kapalinou byla měřena detekce na CO_2 . Na strukturách s PMMA byly měřeny detekce par toluenu a acetonu s koncentrací 1000 ppm. Jako ukázka jednoho typu citlivé vrstvy PILS je uveden graf na Obrázku 4.14. Nejprůkaznější výsledky ukazuje měření na Obrázku 4.15, kde je patrné znatelné vylepšení oproti dříve měřené struktuře tvořené samotným ohnutým dipólovým rezonátorem s kapacitním zakončením 4.16, citlivost je patrná především na páry toluenu.

Tabulka 2: Specifikace chemických látek.

Označení	Polymer	Objem [μl]	Rozpouštědlo	Koncentrace [wt. %]	Koncentrace (Ředění)
1	PILS	2 x 10	acetonitril a destilovaná voda	/	/
2	PMMA	2 x 10	chloroform	2,10	0,957 g /30 ml
3	PMMA	2 x 10	chloroform	1,41	2 : 1 (PMMA : chloroform)
4	PMMA	2 x 10	chloroform	1,06	2 : 1 (PMMA : chloroform)

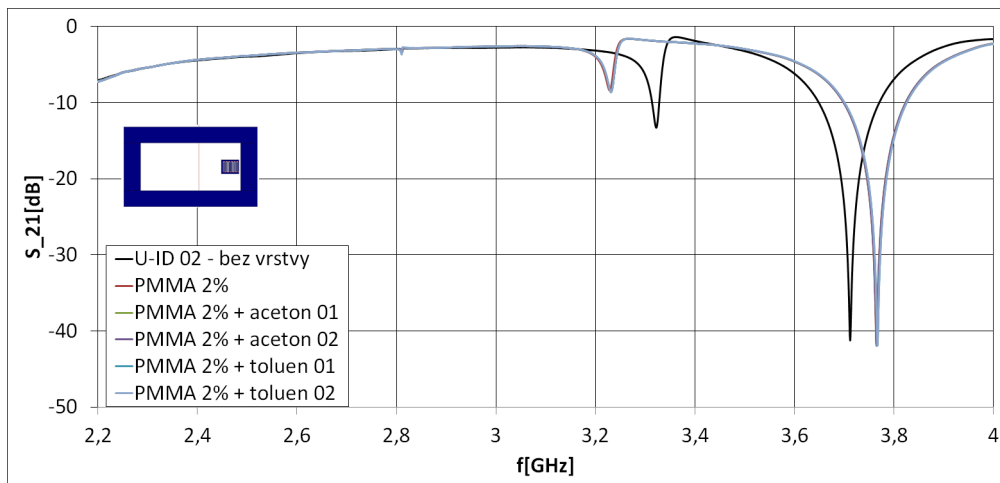


(a)

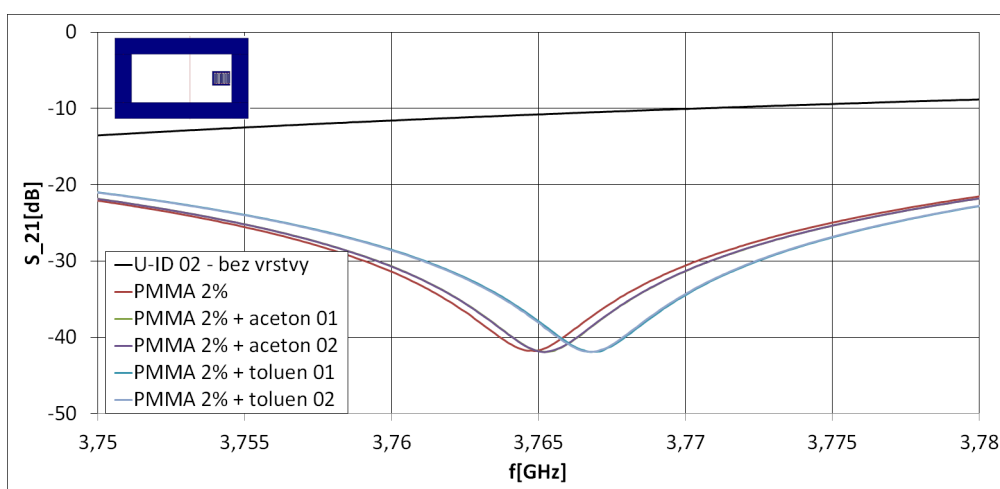


(b)

Obrázek 4.14: Graf měření ohnutého dipólu s kapacitním zakončením (U-ID 01) bez vrstvy, s tenkou PILS, v reakci na plyn CO₂ a) přibližné b).



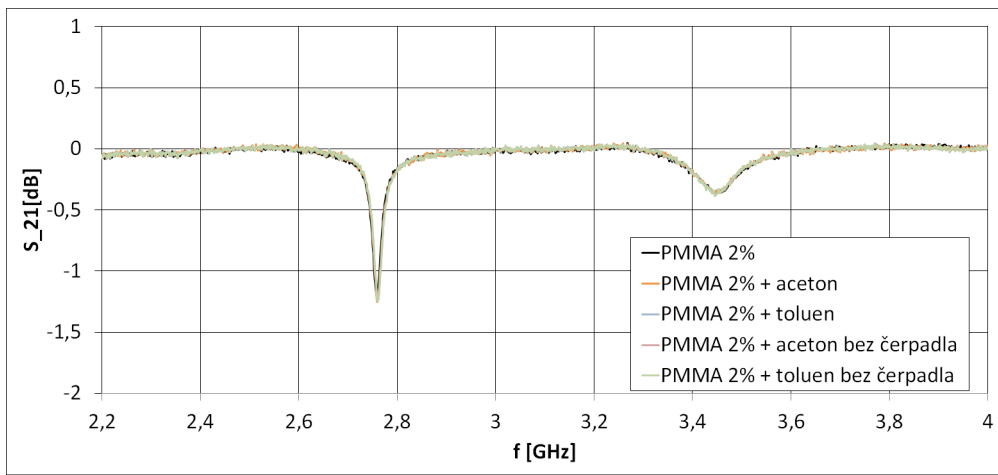
(a)



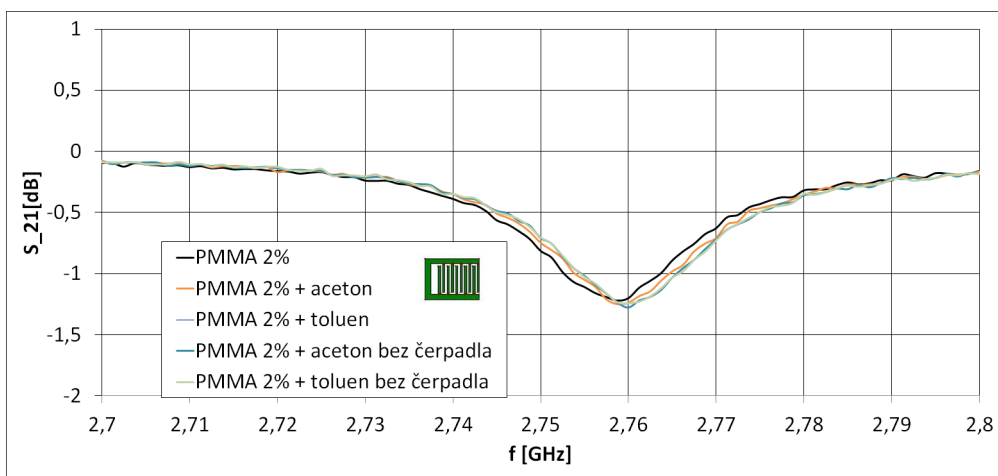
(b)

Obrázek 4.15: Graf měření ohnutého dipólu s kapacitním zakončením (U-ID 02) bez vrstvy, s tenkou PMMA, v reakci na plyny toluen a aceton a) přibližné b).

Jako ukázka neprůkazných výsledků jsou pro srovnání uvedeny grafy na Obrázku 4.16. Jedná se o dřívější měření, kde byl použit jako rezonátor samotný ohnutý dipól s ID zakončením bez smyčky s vrstvičkou PMMA a na substrátu Rogers RO4350B tloušťky 0,762 mm, permitivitě 3,66, ztrátovém činiteli 0,002. Znatelný je pouze drobný posun, který je poměrně neprůkazný, charakteristika je navlněná.



(a)



(b)

Obrázek 4.16: Graf referenčního měření ohnutého dipólu (U-ID 01) bez smyčky PMMA, ukázka neprůkazných výsledků a) přiblížené b).

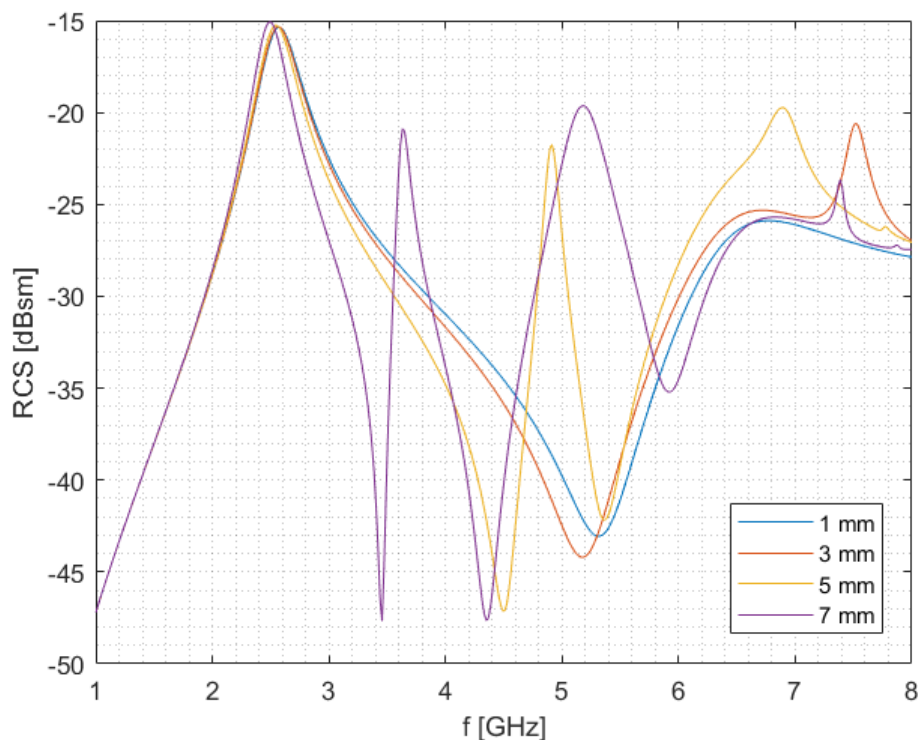
5 Kapacitně zatížený dipól (Varianta 3) jako senzor

Třetí varianta kapacitně zatíženého dipólu uvnitř smyčky byla na základě předchozího rozboru vybrána jako druhá nejlepší varianta pro vytvoření pasivního odražeče citlivého na přítomnost chemické látky. Výška rezonanční špičky tohoto typu dipólu je ve srovnání s ohnutým dipólem s kapacitním zakončením o poznání větší, bylo možné odečíst pokles o 3 dB. Dále struktura vykazovala dobrou citlivost na vodivou vrstvu a optimální úroveň efektivní odrazné plochy. V následující parametrické studii je snaha nalézt optimální nastavení parametrů dipólu. Rozměry destičky, na níž bude senzor vyroben, a rozměry vlastní vodivé smyčky byly ponechány stejné jako v případě ohnutého dipólu s kapacitním zakončením.

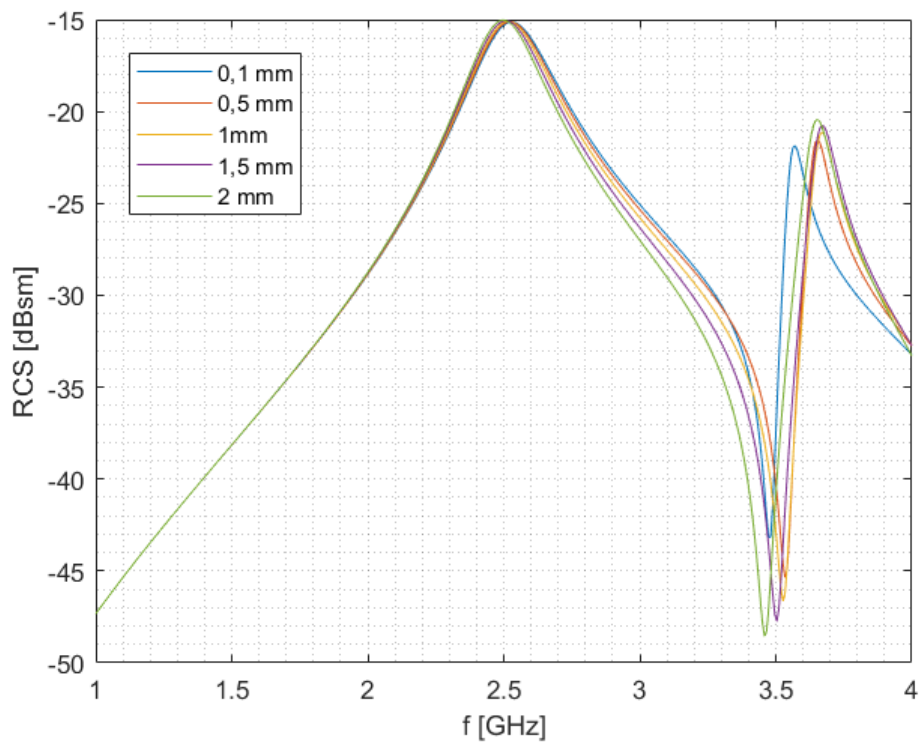
5.1 Parametrická studie

V grafech na obrázcích 5.1-5.5 jsou zobrazeny průběhy RCS v závislosti na různých parametrech - délka kapacitních ramen, vzdálenost kapacitních ramen, poměr délky a vzdálenosti při zachování celkové délky dipólu, šířka vnitřního dipólu, reakce na citlivou vrstvu.

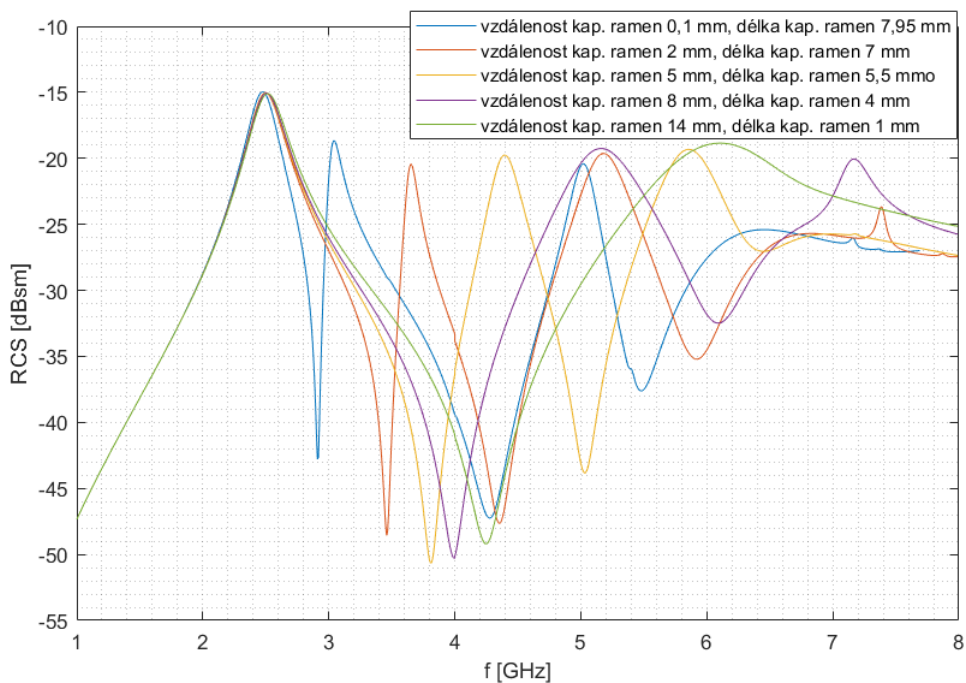
V grafech na Obrázcích 5.1 a 5.3 lze dobře identifikovat rezonanční propad až od délky ramen 5 mm. Hloubku rezonanční špičky nejvíce ovlivňuje vzdálenost a délka kapacitních ramen při zachování celkové délky dipólu, viz 5.3. Nejméně je hloubka rezonanční špičky ovlivněna vzdáleností kapacitních ramen 5.2.



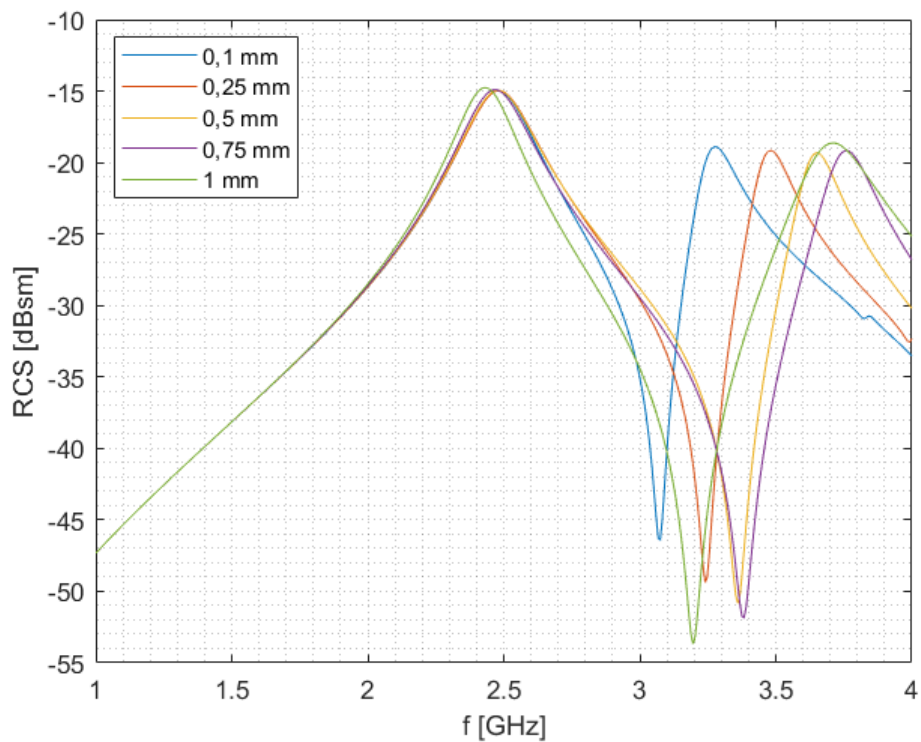
Obrázek 5.1: Změna délky kapacitních ramen dipólu.



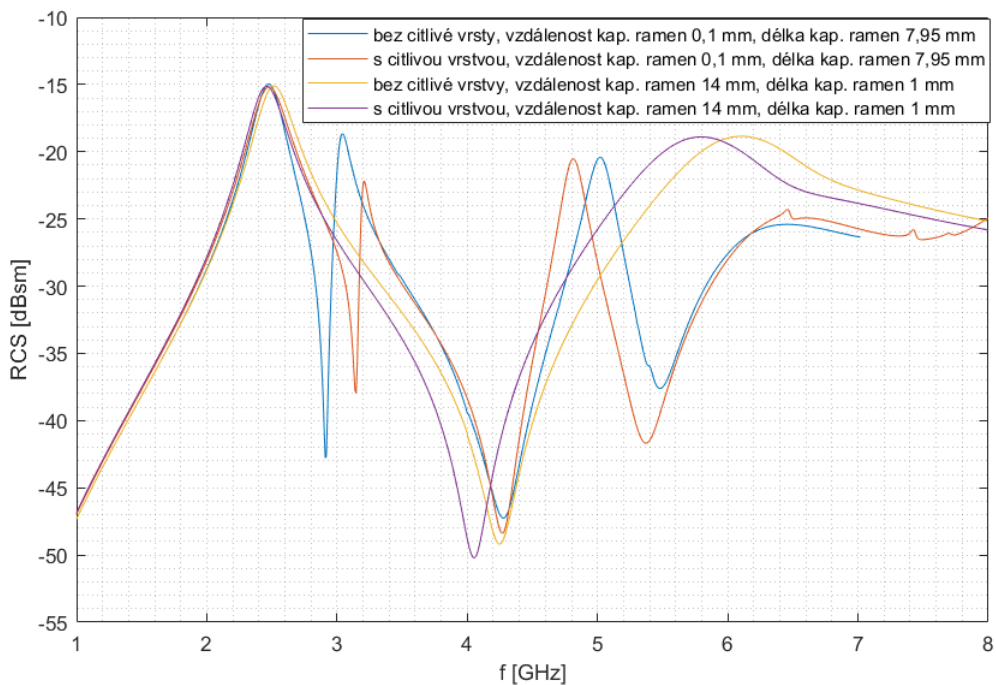
Obrázek 5.2: Změna vzdálenosti kapacitních ramen dipólu.



Obrázek 5.3: Změna vzdálenosti a délky kapacitních ramen dipólu při zachování celkové délky dipólu.



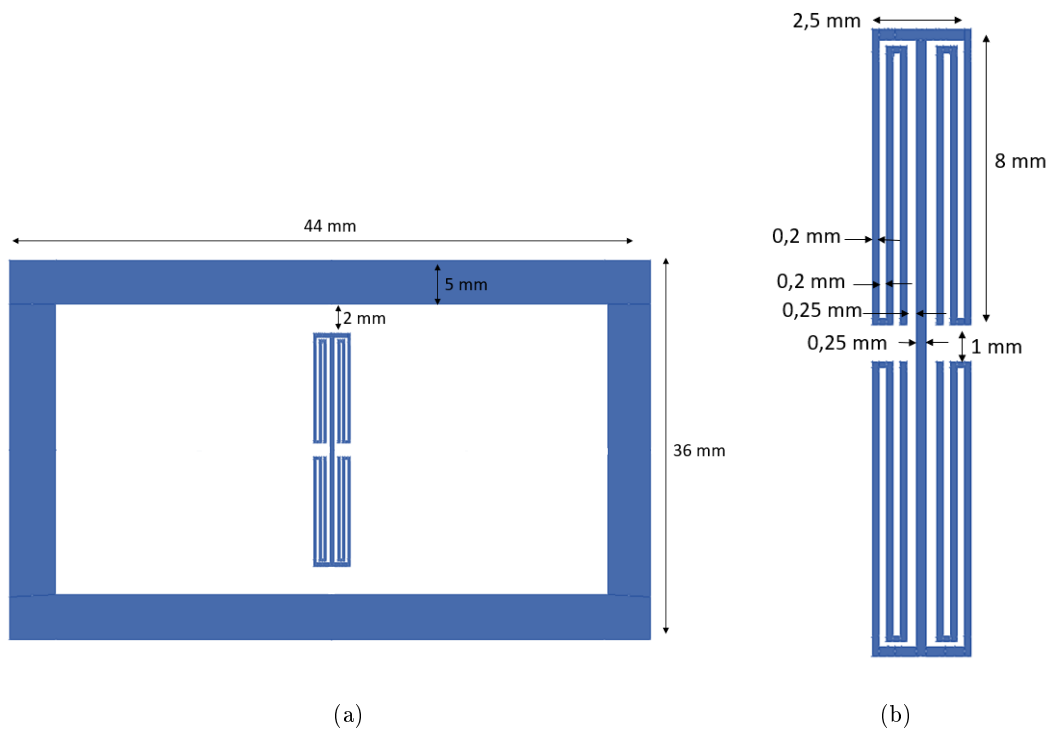
Obrázek 5.4: Změna šířky vnitřního dipólu.



Obrázek 5.5: Citlivost na vodivou vrstvu, změna vzdálenosti a délky kapacitních ramen dipólu při zachování celkové délky dipólu.

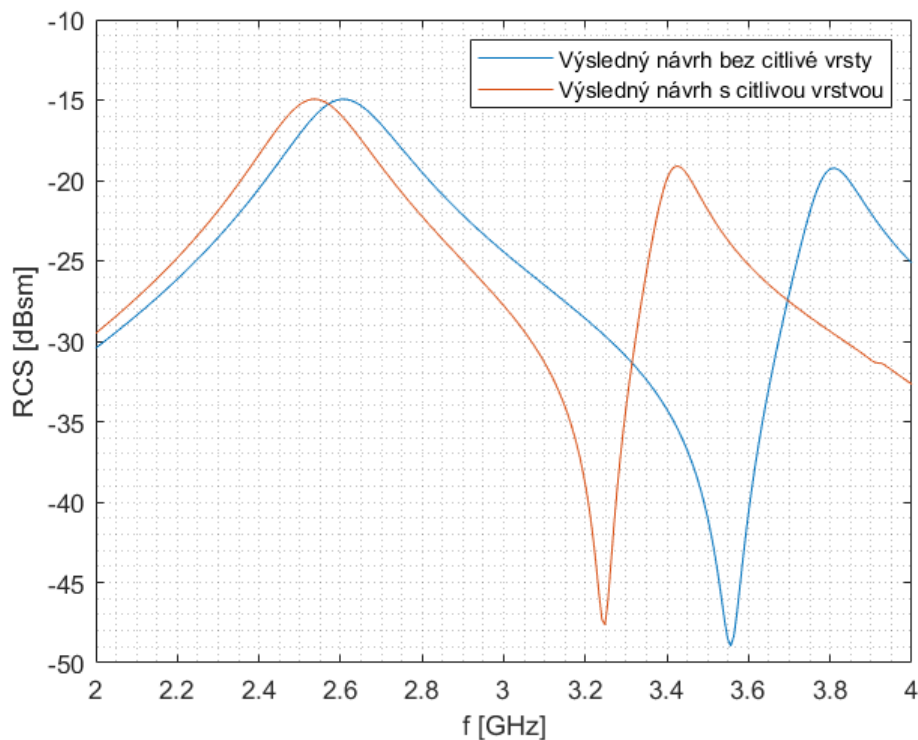
5.2 Optimalizovaný návrh

Optimální návrh kapacitně zatíženého dipólu je umístěn na substrátu na bázi kaptonu (Dupont Pyralux AP 8515R) s permitivitou 3 a tloušťkou 0,025 mm. Kapacitně zatížený dipól je 18 mm dlouhý a 2,35 mm široký. Ramena kapacitního zatížení jsou dlouhá 8 mm, vzdálená jsou od sebe 1 mm. Vnitřní ramena jsou široká 0,2 mm, vzdálenost mezi nimi je 0,2 mm. Vnitřní dipól je 0,25 mm široký a vnitřní ramena jsou od něj vzdálená 0,25 mm, viz Obrázek 5.6.



Obrázek 5.6: Optimalizovaný návrh kapacitně zatíženého dipólu.

V simulačním programu IE3D za použití okrajových buněk byl kapacitně zatížený dipól rozdělen do 906 segmentů. Při rezonanční frekvenci $f_r = 3,55$ GHz je jeho efektivní odrazná plocha $RCS = -25,0$ dBsm, šířka pásma je $BW = 143,8$ MHz, činitel jakosti $Q = 6,95$ hloubka rezonanční špičky $h = 23,95$ dB, posun rezonanční špičky po překrytí vodivou vrstvou $\Delta f = 8,67\%$ a elektrická vodivost $ka = 1,64$, která je daná rozměrem mřížky $a = 22$ mm, viz Obrázek 5.7.



Obrázek 5.7: Průběh RCS optimalizovaného návrhu dipólu s kapacitním zatížením.

V Tabulce 3 jsou srovnány parametry prvního návrhu dipólu s kapacitním zatížením popsaného v kapitole 5.1 s optimalizovaným návrhem uvedeným v této kapitole. U optimalizovaného návrhu je patrné výrazné zvýšení úrovně RCS a mírné zvýšení rezonančního propadu. Naopak došlo k drobnému poklesu citlivosti na dielektrickou vrstvu, což ovšem může být dáno zvýšením rezonanční frekvence, viz vztah 3.5.

Tabulka 3: Srovnání parametrů prvního a optimalizovaného návrhu dipólu s kapacitním zatížením.

Dipól s kap. zatížením	f_r [GHz]	RCS [dBsm]	BW [MHz]	Q [~]	h [dB]	Δf [%]	ka [~]
První návrh	2,94	-50,4	137,1	7,3	20,14	11,06	0,61
Optimalizovaný návrh	3,55	-25,0	143,8	6,95	23,95	8,67	1,64

Kapacitně zatížený dipól vyroben nebyl, důvodem je snaha použít rezonátor s maximální citlivostí, která je naprosto zásadním parametrem. Strukturou s maximální citlivostí je ohnutý dipól s kapacitním zakončením.

Závěr

Cílem této práce bylo analyzovat vlastnosti několika variant bezčipových odražečů dipólového typu z hlediska efektivní odrazné plochy (RCS), šířky pásma, činitele jakosti, výšky rezonanční špičky resp. hloubky rezonančního propadu, elektrické velikosti a citlivosti na změnu permitivity, popř. vodivosti citlivé vrstvy umístěné v jejich blízkosti (přítomnost chemické látky). V programu IE3D byly simulovány průběhy efektivní odrazné plochy *RCS* samostatných odražečů. V prostředí MATLAB byly vyhodnoceny jejich parametry a porovnány v grafech na Obrázcích 3.13-3.17. Dále byly jednotlivé struktury umístěny nad zemní rovinu a do středu čtvercové smyčky, provedeny byly simulace *RCS* a určení parametrů. Jejich porovnání je zobrazeno v grafech na Obrázcích 3.19-3.21 a 3.24-3.27. Těmito úpravami bylo dosaženo zvýšení úrovně *RCS*. Maximální důraz byl kladen na výšku rezonanční špičky resp. hloubku rezonančního propadu a na jejich posun při překrytí struktury dielektrickou vrstvou. Nejlépe dané podmínky splňuje struktura ohnutého kapacitního dipólu umístěná ve středu čtvercové smyčky, která vykazuje největší posun rezonančního propadu. Druhou nejlepšího strukturou je třetí varianta dipólu s kapacitním zatížením. U obou odražečů byla udělána parametrická studie, viz Obrázky 4.1-4.10 a 5.1-5.5, na základě které byl navržen výsledný model odražeče, viz Obrázky 4.12 a 5.7. Průběhy *RCS* výsledných optimalizovaných modelů jsou zobrazeny na Obrázcích 4.11 a 5.6. Z grafů byly odečteny parametry, které byly v tabulkách 1 a 3 porovnány s prvními návrhy struktur z kapitoly 5.1. Optimální návrh ohnutého dipólu s kapacitním zakončením vykazuje výrazné zvýšení úrovně *RCS* o 64,9 dB a zvýšení posunu rezonančního propadu v reakci na citlivou vrstvu o 7,26%. Přestože došlo ke snížení hloubky rezonančního propadu, její hodnota je stále dostačující ke spolehlivé detekci. U dipólu s kapacitním zatížením došlo ke zvýšení úrovně *RCS* o 25,4 dB a drobnému zvýšení rezonančního propadu o 3,81%. Naopak se nepodařilo nalézt takový optimální návrh, aby došlo ke zvýšení citlivosti (pokles o 2,39%). Rezonátorem s maximální citlivostí je tedy ohnutý dipól s kapacitním zakončením, který byl vyroben a proměřen ve vlnovodu. Měření bylo uskutečněno pro čtyři různé vrstvičky chemických látek PILS a PMMA, viz Tabulka 2, nanesené na strukturu odražeče. Měřena byla také citlivost detekce na plyny CO₂, toluen a aceton. Nejprůkaznější výsledky ukazuje měření na Obrázku 4.15, kde je patrná především citlivost na páry toluenu, posunutí rezonančního propadu o 2 MHz.

Další zlepšení výsledků by bylo možné dosáhnout lepším uzpůsobení měřicí komory, kde by bylo vhodné lépe uzpůsobit plnění komory plynem a zajistit lepší kontakt plynu se strukturou pomocí umístění přívodní a výstupní olivky napříč měřicí komory a zajistit tak přímý průchod plynu přes rezonátor s citlivou vrstvou. Z výsledků měření je také patrný pozitivní vliv vyšší koncentrace vrstvy PMMA na citlivost struktury. Vhodné by tedy bylo také ověření citlivých vrstev s ještě vyšší koncentrací popř. větší tloušťkou.

Seznam literatury

- [1] SVANDA Milan, POLIVKA Milan, HAVLICEK Jaroslav, MACHAC Jan, WERNER Douglas H.. Platform Tolerant, High Encoding Capacity Dipole Array-Plate Chipless RFID Tag, in review, DOI: 10.1109/ACCESS.2017.
- [2] FENG Yi, XIE Li, CHEN Qiang, ZHENG Li-Rong. Low-Cost Printed Chipless RFID Humidity Sensor Tag for Intelligent Packaging. IEEE SENSORS JOURNAL, Sweden, 2015, DOI: 10.1109/JSEN.2014.2385154.
- [3] HAVLICEK Jaroslav. Malé odražeče pro bezčipovou rádiovou identifikaci - Diplomová práce. ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2015.
- [4] DEY Shuvashis, SAHA Jhantu Kumar, KARMAKAR Nemai Chandra. Smart Sensing. IEE Microwave magazine, 2015, DOI:10.1109/MMM.2015.2465711.
- [5] HAVLICEK Jaroslav, SVANDA Milan, MACHAC Jan, POLIVKA Milan. Improvement of Reading Performance of Frequency-Domain Chipless RFID Transponders. Dept. of Electromagnetic Field, Czech Technical University in Prague, Prague, 2016, DOI: 10.13164/re.2016.0001.
- [6] BARTON R. J., KENNEDZ T.F., WILLIAMS R. M., FINK P. W., NGO P. H., INGLE R. R.. Detection, identification, locaton and remote sensing using SAW RFID sensors tags. Aerospace conference, 2010 IEEE, 2010, pp. 1-19.
- [7] MAHMOOD A., SIGMARSON H., JOSHI H., CHAPPELL W. J., PEROULIS D.. A evanescent-node cavity resonator based thermal sensor. Sensors, 2007 IEEE, 2007, pp. 950-953.
- [8] KARMAKAR Nemai Chandra, AMIN Emran Md, SAHA Jhuntu Mumar. Chipless FRID Sensors. Wiley, USA, 2016, pp. 16-21.
- [9] DOWLING Joe, TENTZERIS Manos M., BECKETT Nick. RFID-enabled Temperature Sensing Devices: A Major Step Forward for Energy Efficiency in Home and Industrial Applications? IEEE MTT-S International Microwave Workshop on Wireless Sensing, Local Positioning, and RFID, Croatia, 2009, DOI: 10.1109/IMWS2.2009.5307884.
- [10] GIRBAU David, RAMOS Ángel, LAZARO Antonio, RIMA Sergi, VILLARINO Ramón. Passive Wireless Temperature Sensor Based on Time-Coded UWB Chipless RFID Tags. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Spain, 2012, DOI: 10.1109/TMTT.2012.2213838.
- [11] LAZERO A., RAMOS A., GIRBAU D., VILLARINO R.. Signal Processing Techniques for Chi-
pless UWB RFID Thermal Threshold Detector Detection. IEEE Antennas and Wireless Propa-
gation Letters, Spain, 2015, DOI: 10.1109/LAWP.2015.2464680.

- [12] FLETCHER R.R., GERSHENFELD N. A.. Remotely Interrogated Temperature Sensors Based on Magnetic Materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.36,pp.2794-2795,2000.
- [13] BOUAZIZ S., CHEBILA F., TRAILLE A., PONS P., AUERT H., TENTSIRIS M. M.. A new millimeter-wave micro-fluidic temperature sensor for wireless passive radar interrogation. *Sensors*, 2012 IEEE, 2012, pp. 1-4.
- [14] MANDEL C.,MAUNE H., MAASCH M.,SAZEGAR M., SCHAU X.. Passive wireless temperature sensing with BST-based chipless transponder. *Microwave Conference (GeMIC)*, 2011, Garmen, 2011, pp.1-4.
- [15] NAIR Raji Sasidharan, PERRET Etienne, TEDJINI Smail, BARON Thierry. A Group-Delay-Based Chipless RFID Humidity Tag Sensor Using Silicon Nanowires. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, France, 2013, DOI: 10.1109/LAWP.2013.2270929.
- [16] FENG Yi, CABEZES Ana López, CHEN Qiang, ZHENG Li-Rong, ZHANG Zhi-Bin. Flexible UHF Resistive Humidity Sensors Based on Carbon Nanotubes. *IEEE Sensors Journal*, Sweden, 2012, DOI: 10.1109/JSEN.2012.2202390.
- [17] FENG Yi, XIE Li, CHEN Qiang, ZHENG Li-Rong. Low-Cost Printed Chipless RFID Humidity Sensor Tag for Intelligent Packagin. *IEEE Sensors Journal*, Sweden, 2013, DOI 10.1109/JSEN.2014.2385154.
- [18] AMIN Emran Md., BHUIYAN Md. Shakil, KARMAKAR Nemai C., WINTHER-JENSEN Bjørn. Development of a Low Cost Printable Chipless RFID Humidity Sensor. *IEEE Sensors Journal*, Australia, 2013, DOI: 10.1109/JSEN.2013.2278560.
- [19] BORGESSE Michele, DICANDIA Francesco Alessio, COSTA Filippo, GENOVESI Simone, MANARA Giuliano. An Inkjet Printed Chipless RFID Sensor for Wireless Humidity Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, Italy, 2017, DOI: 10.1109/JSEN.2017.2712190.
- [20] HERROJO Cristian, MUELA Francisco Javier, MATA-CONTRERAS Javier, PARADES Ferran, MARTÍN Ferran. High-Density Microwave Encoders for Motion Control and Near-Field Chipless-RFID. *IEEE Sensors Journal*, Spain, 2019, DOI: 10.1109/JSEN.2019.2895015.
- [21] PERRET Etienne. Displacement Sensor Based on Radar Cross-Polarization Measurements. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, France, 2017, DOI: 10.1109/TMTT.2016.2638842.
- [22] MARINDRA Adi Mahmud Jaya, TIAN Gui Yun. Chipless RFID Sensor Tag for Metal Crack Detection and Characterization. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, U.K., 2018, DOI: 10.1109/TMTT.2017.2786696.

- [23] COSTA Filippo, GENTILE Antonio, GENPVESI Simone, BUONCRISTIANI Luca, LAZARO Antonio, VILLARINO Ramon, GIRBAU David. A Depolarizing Chipless RF Label for Dielectric Permittivity Sensing. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Spain, 2018, DOI: 10.1109/LMWC.2018.2820604.
- [24] LÁZARO Antonio, VILLARINO Ramon, COSTA Filippo, GENOVESI Simone, GENTILE Antonio, BUONCRISTIANI Luca, GIRBAU David. Chipless Dielectric Constant Sensor for Structural Health Testing. *IEEE Sensors Journal*, Spain, 2018, DOI: 10.1109/JSEN.2018.2839689.
- [25] ZARIFI Mohammad Hossein, DANESHMAND Mojgan. High-Resolution RFID Liquid Sensing Using a Chipless Tag. *IEEE Microwave and Wireless Components Letter*, Canada, 2017, DOI: 10.1109/LMWC.2017.2662321.
- [26] SHRESTHA Sudhir, BALACHANDRAN Mercyma, AGARWAL Mangilal, PHOHA Vir V., VARAHRAMYAN Kody. A Chipless RFID Sensor System for Cyber Centric Monitoring Applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, USA, 2009, DOI: 10.1109/TMTT.2009.2017298.
- [27] OCCHUIZZI, Cecilia, RIDA, Amin, MARROCO, Gaetano, TENZERIS, Manos. RFID Passive Gas Sensor Integrating Carbon Nanotubes. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* (Volume: 59, Issue: 10, Oct. 2011), DOI: 10.1109/TMTT.2011.2163416.
- [28] KUTTY Ajith Adhur, BJÖRNINEN Toni, SYDÄNHEIMO Lauri, UKKONEN Leena. A Novel Carbon Nanotube Loaded Passive UHF RFID Sensor Tag with Built-in Reference for Wireless Gas Sensing. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, USA, 2016, DOI: 10.1109/MWSYM.2016.7540328.
- [29] YANG L., STAICULESCU D., ZHANG R., WONG C.P., TENTZERIS M. M.. A Novel "Green" Fully-integrated Ultrasensitive RFID-enabled Gas Sensor Utilizing Inkjet-printed Antennas and Carbon Nanotubes. Georgia Institute of Technology, USA, DOI:978-1-4244-3647-7/09/25.00.
- [30] KROUPA J., FOUSEK J., IVANOV N. R., BŘEZINA B., and LHOTSKÁ V.. Dielectric Study of the Phase Transition in Phenanthrene. *Ferroelectrics*, vol. 79, pp. 189–192, 1988.
- [31] DE KRUIF C. G.. Enthalpies of Sublimation and Vapour Pressure of 11 Polycyclic Hydrocarbons. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. 12, pp. 243–248, 1980.
- [32] GOLDING J., HAMID N., MACFARLANE D. R., FORSYTH M., FORSYTH C., COLLINS C., et al. .N-Methyl-N-alkylpyrrolidinium Hexafluorophosphate Salts: Novel Molten Salts and Plastic Crystal Phases. *Chemistry of Materials*, vol. 13, pp. 558–564, 2001.

- [33] STAVRINIDOU E., SESSOLO M., WINTHER-JENSEN B., SANAUER S., MALLIARAS G. G.. A Physical Interpretation of Impedance at Conducting Polymer/Electrolyte Junctions. *Journal of Applied Physics*, vol. 102, pp. 017127–0171276, 104111, 2007.
- [34] ORAZEMAND M.E, TRIBOLLET B.. Methods for representing impedance. *Electrochemical Impedance Spectroscopy*: John Wiley and Sons, Inc., 2008, pp. 307–331.
- [35] ORAZEM M. E., TRIBOLLET B.. Electrical circuits. *Electrochemical Impedance Spectroscopy*: John Wiley and Sons, Inc., 2008, pp. 61–72.
- [36] KUMAR P. MALIK, H. K., GHOSH A., THANGAVEL R., ASOKAN K.. Bandgap Tuning in Highly c-axis Oriented Zn_{1-x}Mg_xO Thin Films. *Applied Physics Letters*, vol. 102, pp. 2219031–2219035, 2013.
- [37] URBACH F.. The Long Wavelength Edge of Photographic Sensitivity and of the Electronic Absorption of Solids,” *Physical Review*, vol. 92, pp. 1324–1324, 1953.
- [38] CHEN Z., LU C.. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*, vol. 3, pp. 274–295, 2005.
- [39] Kapton HN Polyimide Film Datasheet. Available: http://www2.dupont.com/Kapton/en_US/.
- [40] CHEN Z., LU C.. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*, vol. 3, 2005
- [41] FINCH C. A.. Polyvinyl alcohol. Properties and Applications: Wiley-Interscience 1973.
- [42] SENGWA J., KAUR K.. Dielectric Dispersion Studies of Poly(vinyl alcohol) in Aqueous Solutions. *Polymer International*, vol. 49, pp. 1314–1320, 2000.
- [43] YEOW Y. K., ABBAS Z., KHALID K., RAHMAN M. Z. A.. Improved Dielectric Model for Polyvinyl Alcohol-Water Hydrogel at Microwave Frequencies. *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 7(2), pp. 270–276, 2010.
- [44] CLARK C. E.. Perfectly Good Food Is Thrown Away Daily While People Go Hungry In the U.S. Available: <http://aufait.hubpages.com/hub/Americans-throw-away-good-foodbecause-of-sell-by-dates>.
- [45] BHADRA S., BRIDGES G. E., THOMSON D. J., FREUND and M. S.. A Wireless Passive Sensor for Temperature Compensated Remote pH Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, pp. 2428–2436, 2014.
- [46] CAI K. Z. Qingyun, RUAN C., DESAI T. A., GRIMES C. A.. A Wireless, Remote Query Glucose Biosensor Based on a pH-Sensitive Polymer. *Analytical Chemistry*, vol. 76, pp. 4038–4043, 2004.

- [47] SIDEK R. M., YUSOF F. A. M., YASIN F. M., WARIRAN R., AHMADUN F.. Electrical response of multi-walled carbon nanotubes to ammonia and carbon dioxide. *Semiconductor Electronics (ICSE)*, 2010 IEEE International Conference on, 2010, pp. 263–266.
- [48] TENTZERIS M.M.. Inkjet-printed paper-based RFID and nanotechnology-based ultra sensitive sensors: The “Green” ultimate solution for an ever improving life quality and safety? *Radio and Wireless Symposium (RWS)*, 2010 IEEE, 2010, pp. 120–123.
- [49] YI X., VYAS R., CHO C., FANG C., COOPER J., WANG Y., LEON R. T., TENTZERIS M. M.. Thermal effects on a passive wireless antenna sensor for strain and crack sensing. *Proceedings of the SPIE, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 2012, p. 11.
- [50] VENA A., HASANI M., SYDÄNHEIMO L., UKKONEN L., TENTZERIS M. M.. Implementation of a Dual-Interrogation-Mode Embroidered RFID-Enabled Strain Sensor. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1272–1275, 2013.
- [51] OCCHIUZZI C., PAGGI C., MARROCCO G.. Passive RFID Strain-Sensor Based on Meander-Line Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, pp. 4836–4840, 2012.
- [52] CORPORATION R.. Properties of low dielectric constant laminates [Online]. Available: <https://www.rogerscorp.com/documents/1798/acm/articles/Properties-of-LowDielectric-Constant-Laminates.pdf+cd=1hl=enct=clnkg1=ca> (accessed on 07 October 2015).
- [53] NAMJUN C., SEONG-JUN S., SUNYOUNG K., SHINO K., HOI-JUN Y.. A5.1-WUHFRFID tag chip integrated with sensors for wireless environmental monitoring. *Solid-State Circuits Conference, 2005. ESSCIRC 2005. Proceedings of the 31st European*, 2005, pp. 279–282.
- [54] FOLEA S., GHERCIOIU M., Ultra-low power Wi-Fi tag for wireless sensing. *Automation, Quality and Testing, Robotics, 2008, AQTR2008, IEEE International Conference on*, 2008, pp. 247–252.
- [55] (2014). Light Sensors. Available: <http://www.electronics-tutorials.ws/io/io4.html>.
- [56] DEWDNEY J. M., JING W.. Characterization the microwave properties of SU-8 based on microstrip ring resonator. *Wireless and Microwave Technology Conference, 2009. WAMICON '09. IEEE 10th Annual*, 2009, pp. 1–5.
- [57] MANNOOR M.S., TAO H., CLAYTON J.D., SENGUPTA A., KAPLAN D.L., NAIK R.R., VERMA N., OMENETTO F. G., MC ALPINE M. C.. Graphene-based wireless bacteria detection on tooth enamel. *Nature Communications*, 2012.

- [58] TAORAN L., LAKAFOSIS V., ZIYIN L., WONG C. P., TENTZERIS M. M.. Inkjet-printed graphene-based wireless gas sensor modules. 62nd IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC), San Diego, CA, 2012, pp. 1003–1008.
- [59] PATOLSKY F., ZHENG G., LIEBER C. M.. Nanowire Sensors for Medicine and the Life Sciences. *Nanomedicine*, vol. 1, pp. 51–56, 2006.
- [60] RAHMAN S. F. A., ZUSOF N. A., HASHIM U., NOR M. N. M.. Design and Fabrication of Silicon Nanowire based Sensor. *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 8, pp. 10946–10960, 2013.
- [61] CHEN X., WONG C. K. Y., ZUAN C. A., ZHANG G.. Nanowire-based Gas Sensors. *Sensors and Actuators* vol. 177, pp. 178–195, 2013.
- [62] DAN Y., EVOY S., JOHNSON A. T. C.. Chemical gas sensors based on nanowires. *Nanowire Research Progress: Nova Science Publisher*, 2008.
- [63] MASALA O., SESHADRI R.. Synthesis Routes for Large Volumes of Nanoparticles. *Annual Review of Materials Research*, vol. 34, pp. 41–81, 2004.
- [64] CUSHING B. L., KOLESNICHENKO V. L., O’CONNOR C. J.. Recent Advances in the Liquid-Phase Syntheses of Inorganic Nanoparticles. *Chemical Reviews*, vol. 104, pp. 3893–3946, 2004.
- [65] MURPHY C. J.. Optical Sensing with Quantum Dots. *Analytical Chemistry*, vol. 74 issue 19, pp. 520A–526A, 2002.
- [66] BAR M. S., HAICK H.. Flexible Sensors Based on Nanoparticles. *ACS Nano*, vol. 7, pp. 8366–8378, 2013.
- [67] YANG D.. *Nanocomposite Films for Gas Sensing: InTech*, 2011.
- [68] ŠVANDA, M.. Nízko profilové antény v blízkosti lidského těla. Dizertační práce, ČVUT FEL Katedra elektromagnetického pole, 2011.