

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2022

Samuel Košík



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

KRUHOVĚ POLARIZOVANÁ KNOFLÍKOVÁ ANTÉNA NA FREKVENČNĚ SELEKTIVNÍM POVRCHU

CIRCULARLY POLARIZED BUTTON ANTENNA ON FREQUENCY SELECTIVE SURFACE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Samuel Košík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Kuřátko

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Samuel Košík

ID: 221056

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Kruhově polarizovaná knoflíková anténa na frekvenčně selektivním povrchu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s koncepcí kruhově polarizované knoflíkové antény na frekvenčně selektivním povrchu, které byly v [1] navrženy pro Wi-Fi a WLAN aplikace. V simulačním programu CST Microwave Studio vytvořte numerický model antény a ověřte, že parametry publikované v [1] jsou korektní. Parametrickou analýzou ověřte realizovatelnost antény a případně navrhněte úpravy.

Strukturu optimalizujte a realizujte. V simulačním programu demonstруйте vliv modelu lidské tkáně v blízkosti struktury. Následně vyrobte fantom, který bude emulovat lidskou tkáň pro odpovídající frekvenční pásmo. Parametry antény ověřte měřeními ve volném prostoru a v blízkosti fantomu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MANDAL BAPPADITYA; CHATTERJEE AYAN; RANGAIAH PRAMOD; et. al.; A Low Profile Button Antenna with Back Radiation Reduced by FSS. 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2020. DOI: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135328

[2] BALANIS A. CONSTANTINE; Antenna theory: Analysis and Design, 3rd edition, John Wiley and Sons, New Jersey, 2005. ISBN: 978-0471667827

Termín zadání: 11.2.2022

Termín odevzdání: 1.6.2022

Vedoucí práce: Ing. David Kuřátko

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá kruhovo polarizovanou gombíkovou anténou na frekvenčne selektívnom povrchu s rezonančnou frekvenciou 5,5 GHz. Koncept tejto práce je prevzatý z [1]. Publikované rozmery boli v práci simulované, aby bola overená správnosť výsledkov, ktoré neboli úplne korektné. Následne boli prezentované úpravy a optimalizácie s cieľom dosiahnuť požadované vlastnosti. Posledným krokom bola výroba fantómu a antény a overenie jej funkčnosti v blízkosti tohto fantómu. Takáto anténa štruktúra s pracovnou frekvenciou 5,5 GHz a malými rozmermi je primárne zameraná na komunikáciu na ľudskom tele. Obzor jej využitia je ale nepochybne väčší.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Gombíková anténa, mikropásková anténa, kruhová polarizácia, frekvenčne selektívny povrch, komunikácia telom, WLAN, fantóm.

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on circularly polarized button antenna on frequency selective surface for resonant frequency 5.5 GHz. The concept for this thesis is adopted from article [1]. This published version of the antenna was simulated to verify the validity of the antenna structure behaviour. Several optimizations have been presented to achieve the best possible results. After all, phantom has been made, as well as the antenna, and used to demonstrate functionality of the antenna near a human body tissue model. The whole structure with the resonant frequency 5.5 GHz and compact dimensions is primary designed for on-body communication. However, its potentiality is much wider.

KEYWORDS

Button antenna, microstrip antenna, circular polarization, frequency selective surface, on-body communication, WLAN, phantom.

KOŠÍK, Samuel. *Kruhově polarizovaná knoflíková anténa na frekvenčně selektivním povrchu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2022, 64 s. Bakalárska práca. Vedúci práce: Ing. David Kuřátko

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Samuel Košík
VUT ID autora: 221056
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2021/22
Téma záverečnej práce: Kruhově polarizovaná knoflíková anténa
na frekvenčně selektivním povrchu

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

* Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing. Davidovi Kuřátko za odborné vedenie, konzultácie vo dne v noci, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci. Poďakovanie tiež patrí doc. Ing. Jaroslavovi Láčíkovi, Ph.D. za pomoc pri meraní v bezodrazovej komore.

Rovnako ďakujem Michaele za energiu a psychickú pomoc a podporu.

Obsah

Úvod	13
1 Plošné antény	14
1.1 Časti plošných antén	14
1.2 Fyzikálne pojmy	17
1.3 Komunikácia telom	18
1.4 Model ľudského tkaniva - Fantóm	18
1.5 Frekvenčne selektívne povrchy	19
2 Modelovanie a simulovanie	20
2.1 Nastavenie simulácie	20
2.2 Architektúra antény	21
2.2.1 Overenie výpočtov	22
2.2.2 Zemniaca plocha	24
2.2.3 Substrát	24
2.2.4 Anténny prvok	25
2.2.5 Napájacia sonda	27
2.2.6 Poškodenie zemniacej plochy	27
2.3 Architektúra a simulácia FSS	28
2.4 Výsledky simulácií pôvodnej antény	30
2.5 Optimalizácia	32
2.6 Výsledky dosiahnuté optimalizáciou	35
3 Výroba a merania s fantómom	41
3.1 Simulácia fantómu	41
3.2 Výroba fantómu	42
3.3 Výroba FSS	43
3.4 Materiály na výrobu	44
3.5 Merania a výroba antén	45
3.5.1 Corkfill	45
3.5.2 XT co-polyester	47
3.5.3 AD300D	49
3.6 Meranie v bezodrazovej komore	52
3.7 Diskusia o získaných výsledkoch	54
Záver	57
Literatúra	58

Zoznam obrázkov

1.1	Príklad mikropáskovej antény	14
1.2	Typy napájania antén	16
1.3	Typy frekvenčne selektívnych povrchov	19
2.1	Pôvodný nákres antény	21
2.2	Antény s a bez zárezu	23
2.3	Použitie parametrov	24
2.4	Pôvodný substrát	25
2.5	Pôvodná GP	27
2.6	Porovnanie simulácie FSS	29
2.7	Hotový FSS	29
2.8	Rozloženie prúdu FSS	30
2.9	Graf s_{11} pôvodnej antény	30
2.10	Graf Z pôvodnej antény	31
2.11	Graf AR pôvodnej antény	32
2.12	Simulácia bez zrezania	34
2.13	Graf s_{11} optimalizovanej antény	36
2.14	Graf Z optimalizovanej antény	36
2.15	Graf AR optimalizovanej antény	37
2.16	Vyžarovacia char. pre $\phi = 0^\circ$ optimalizovanej antény	37
2.17	Vyžarovacia char. pre $\phi = 90^\circ$ optimalizovanej antény	38
2.18	Graf G optimalizovanej antény	38
2.19	Prúd v anténe	39
2.20	Optimalizovaná anténa	40
3.1	Simulácia SAR pre fantóm	41
3.2	Fotografia varenia agaru	43
3.3	Fotografia hotového fantómu	43
3.4	Fotografia vyrobeného FSS	44
3.5	Fotografie antén z Corkfillu	45
3.6	Grafy s_{11} antény z Corkfillu	46
3.7	Graf Z antény z Corkfillu	47
3.8	Graf Z antény z XT	48
3.9	Grafy s_{11} antény z XT	48
3.10	Fotografie antén z XT	49
3.11	Výroba antén z AD300D	50
3.12	Simulácie citlivosti zmeny napájania antény z AD300D	51
3.13	Fotografie antény z AD300D	51
3.14	Grafy s_{11} a Z antény z AD300D	52

3.15 Graf AR antény z AD300D	53
3.16 Vyžarovacie charakteristiky antény z AD300D	53
3.17 Fotografie z bezodrazovej komory	54

Zoznam tabuliek

2.1	Základné jednotky	20
2.2	Pôvodné rozmery antény	22
2.3	Súradnice substrátu	25
2.4	Súradnice antény	26
2.5	Definícia zárezu	26
2.6	Definícia FSS	28
2.7	Výsledky pôvodnej antény	32
2.8	Optimalizácia 1: Zmena dĺžky zárezu	33
2.9	Optimalizácia 2: Zmena dĺžky zárezu novej antény	33
2.10	Optimalizácia 3: Zmena veľkosti zrezania novej antény	34
2.11	Výsledky optimalizovanej antény	35
3.1	Použité materiály	44
3.2	Výsledky antény z Corkfillu	47
3.3	Výsledky antény z XT	49
3.4	Porovnanie najlepších antén	56

Úvod

V poslednom desaťročí sme svedkami masívneho rozvoja nositeľnej elektroniky, ktorá v dnešnej dobe nachádza veľmi široké využitie nielen v osobnom živote. Jedným z hlavných odvetví je nepochybne medicína, ktorá túto elektroniku pravidelne používa k snímaniu životných funkcií pacientov. Tieto namerané dáta je potrebné bezdrôtovo prenášať, preto sú neodmysliteľnou súčasťou komunikácie antény, ktoré dokážu korektne pracovať v blízkosti ľudského tela. Jednou z možných je aj gombíková, kruhovo polarizovaná anténa umiestnená na frekvenčne selektívnom povrchu, ktorej je táto práca venovaná. Vďaka frekvenčne selektívnemu povrchu odráža nežiadúce žiarenie smerom k telu a disponuje prijateľným ziskom. Ďalším významným potenciálnym odvetvím pre použitie gombíkových plošných antén je takzvaný internet vecí - IoT.

V tejto práci skúmame anténu publikovanú v [1]. Zoznámime sa s mikropáskovou anténou a jej základnými parametrami. Ďalej ukážeme ako a načo slúži frekvenčne selektívny povrch a čo jeho použitím získame. Pomocou simulačného programu CST Microwave Studio anténu namodelujeme a simulujeme. Overíme parametre a výsledky, ktoré sú prezentované v článku. Na základe simulácií rozhodneme, či je potrebné anténu doladiť alebo dodatočne upraviť a optimalizovať, aby spĺňala očakávania. Správanie hotovej antény je nutné otestovať v blízkosti ľudského tela, na čo nám posluži fantóm.

Prvá kapitola popisuje základné poznatky a možné využitie plošných antén. Vysvetľuje teoretické podklady a jednoduché fyzikálne pojmy. Tiež sa venuje frekvenčne selektívnemu povrchu, on-body komunikácii i fantómu. Druhá časť práce sa venuje simuláciám antény z článku [1]. Na začiatku je ukázané nastavenie programu CST Microwave Studio pre simuláciu plošnej, mikropáskovej antény, ktorá je ďalej overená výpočtami v programe MATLAB. Rovnako tu nájdeme popis hlavných častí gombíkovej antény a tiež postupy, ako ich v simulátore modelovať. Ďalej uvádzame výsledné parametre frekvenčne selektívneho povrchu a antény z článku, ktoré sú porovnané s našimi simuláciami. Vzhľadom k tomu, že anténna štruktúra nedisponovala požadovanými vlastnosťami, musela byť následne optimalizovaná, čomu je venovaný záver kapitoly. Posledná kapitola ukazuje postup výroby fantómu, FSS a antén z jednotlivých materiálov. Overili sme správanie vyrobených antén v blízkosti fantómu, ktorý modeluje situáciu komunikácie ľudského tela. Vlastnosti najlepšej z nich sme zmerali v bezodrazovej komore. Záverom je diskusia a prehľadné zhrnutie dosiahnutých výsledkov.

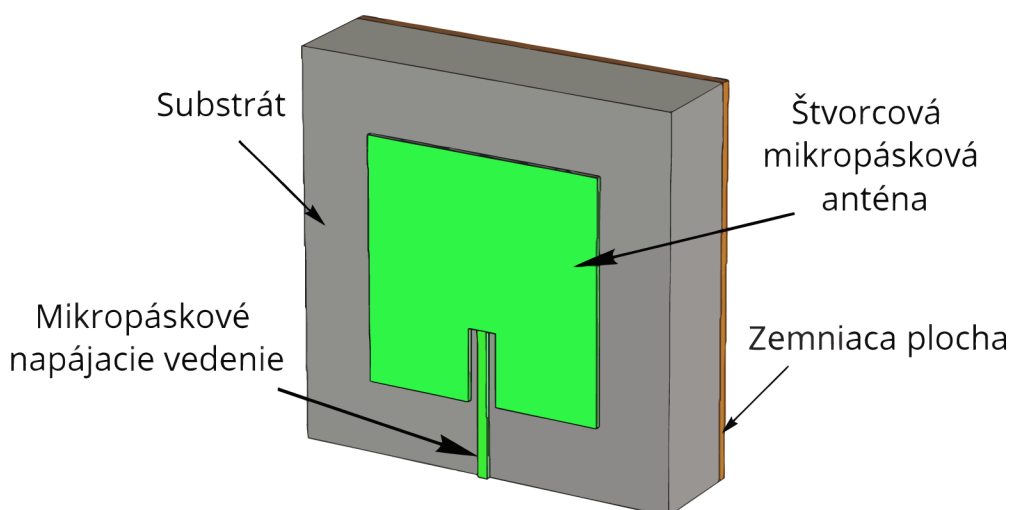
1 Plošné antény

V posledných rokoch sa často hovorí o malých kompaktných riešeniach. Výnimkou nie sú ani plošné antény. Pre modernú dobu poskytujú neprehliadnuteľné výhody a variabilnosť v širokom použití. Disponujú vynikajúcimi vlastnosťami ako zisk, široké frekvenčné použitie, možnosť kruhovej polarizácie či pomerne malými nákladmi na výrobu [1], [5]. Ich kompaktnosť dovoľuje napr. skryté umiestnenie na odevoch, cestovných kufroch, spotrebičoch a ďalších materiálnych komoditách, ktoré musia komunikovať alebo byť touto komunikáciou sledované či strážené [1], [7]. Ďalším veľkým a nepochybne potencionálnym využitím je tzv. internet vecí (ang. *IoT - Internet of Things*). Jeho podstatou je komunikácia čo najviac vecí, napr. snímača teploty v pouličnej lampe, odpadkového koša, obuvi citlivej na chemikálie, dažďového senzora v chodníku a mnoho iného [8], [9]. V týchto odvetviach nájdeme plošné antény spoľahlivo svoje miesto [10]. Najbežnejším využitím bývajú štandardy Wi-Fi (2,4 GHz, 5 GHz), GPS, LTE a najnovšie 5G siete [24].

1.1 Časti plošných antén

Plošné (ang. *planar*) antény sú nízko profilové antény pozostávajúce typicky zo štyroch hlavných častí [2], [15], ktoré reprezentuje Obr. 1.1:

1. zemniacej plochy,
2. dielektrického substrátu,
3. vyžarovacieho prvku,
4. napájania.



Obr. 1.1: Príklad mikropáskovej antény s mikropáskovým napájacím vedením.

Spodná strana antény slúži ako zemniaca plocha (ang. *Ground Plane* - GP), tvorí polovicu dipólu. Obyčajne sa jedná o veľmi tenkú vrstvu vodivého materiálu (najčastejšie medi) naneseného na spodnej časti substrátu. Prevedení antén je mnoho. Článok [13] popisuje anténu, ktorá GP dokonca nemá. Naša aplikácia sa bez nej nezaobíde. Tvorí potrebnú referenciu, od ktorej sa vybudená vlna šíri. Tiež je miestom, ku ktorému je pripojený vonkajší vodič koaxiálneho alebo iného napájacieho vysokofrekvenčného vedenia [2].

Dielektrický substrát (médiu) je elektricky izolačný nevodivý materiál. Oddeľuje zemniacu plochu od vyžarovacieho anténneho prvku. Na spodnej časti je nanosená GP, na hornej zase mikropásková anténa. Existujú tiež prevedenia, kedy sú obe vodivé vrstvy nanesené na hornej strane [2]. Výhodou je relatívna variabilita v použití materiálu, preto sa veľmi často môžeme stretnúť s anténou, ktorej dve kovové časti sú priamo vyleptané na doske plošných spojov [14]. Každý dielektrický materiál je popísaný viacerými vzťahmi. Najväčší vplyv pri návrhu antény má dielektrická konštanta - typicky používaná značka ϵ_r . Ako uvádza kapitola 2.2.1, je potrebné vytvoriť elektrické a magnetické pole v blízkosti antény. Vlastnosti tohoto pola sú priamo späté s materiálom substrátu, teda s jeho ϵ_r . Typické hodnoty uvádza [2] ako $2,2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Väčšie číslo spôsobí, že elektrické a magnetické siločiarly pola budú viac stiahnuté, čo má za následok horšiu efektívnosť žiarenia do priestoru a menšiu šírku pásma [2], [6]. Takéto použitie je dôležité v aplikáciách, kedy nechceme (nesmieme) vysielaním rušiť celé frekvenčné pásmo alebo iné osoby a aplikácie [1], [6].

Druhou a hlavnou vodivou časťou antény je vyžarovacia plocha, tiež nazývaná mikropásik (ang. *microstrip*, ale aj *patch*). Znova je tvorená veľmi tenkou fóliou (obyč. medi) nanesenou na substráte. Zvyčajne sú obe vrstvy rovnako hrubé, pričom by mala byť dodržaná podmienka [16] vzorca

$$h[\text{mm}] > \frac{1}{40} \cdot \lambda, \quad (1.1)$$

kde λ

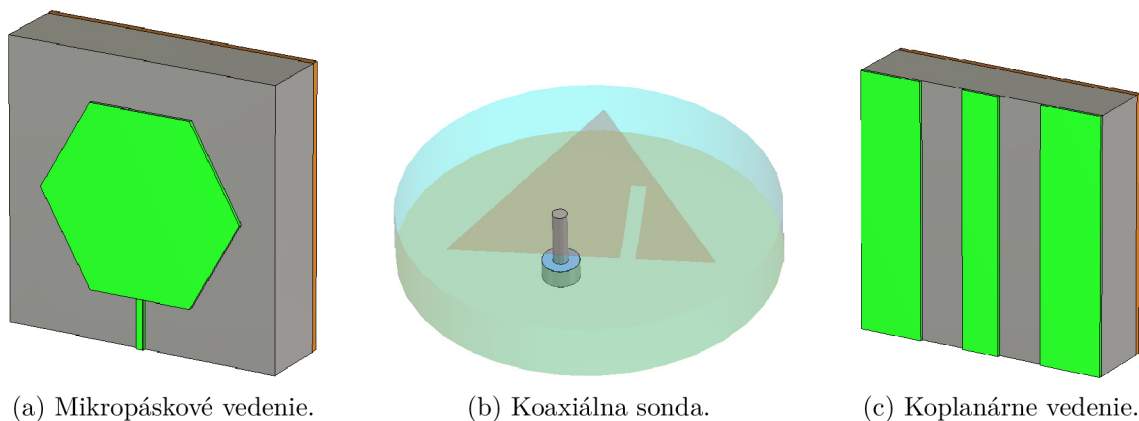
$$\lambda = \frac{c}{f} [\text{m}], \quad (1.2)$$

kde c je rýchlosť svetla a f je frekvencia. Na túto plochu sa pripája vnútorný vodič koaxiálneho kábla alebo mikropáskového vedenia [1], [2], [17]. Existuje veľké množstvo tvarov antén, pričom každá disponuje inými vlastnosťami [2], [15]. Ich použitie sa preto líši. Za zmienku stoja napríklad štvorcové, trojuholníkové, eliptické či ich rôzne úpravy.

Budiť mikropáskovú anténu znamená napájať vodivé časti vysokofrekvenčným signálom. Poznáme viaceré spôsoby realizácií napájania, pre nás však budú najzaujímavejšie tieto [2]:

1. mikropáskové vedenie,
2. koaxiálna sonda,
3. koplanárne vedenie.

Mikropáskové vedenie využíva mikropásik vyrobený spravidla z rovnakého materiálu ako vyžarovací prvok (Obr. 1.2 (a)). Obvykle spolu tvoria jeden celok umiestnený na substráte alebo vyleptaný na doske plošných spojov (typicky keramický substrát alebo FR-4) [14]. Medzi špecifické vlastnosti patrí jednoduchá výroba alebo prosté prispôbenie [2]. Ladenie rezonančnej frekvencie f_{rez} a impedancie Z je závislé ako na šírke pásiku, tak na šírke zárezov [17].



Obr. 1.2: Vybrané typy napájania antén.

Ďalším zo spôsobov napájania je využitie koaxiálnej sondy (Obr. 1.2 (b)), ktorá vzniká z koaxiálneho kábla. Ten pozostáva zo štyroch častí: obalu, vonkajšieho vodiča, dielektrika a vnútorného vodiča [20]. Kábel je odolný voči vonkajšiemu rušeniu, no tiež voči únikom signálu z neho. Môžeme tvrdiť, že sa správa ako Faradayova klieťka, nakoľko signál je „uzamknutý“ v energii v dielektriku medzi vonkajším a vnútorným vodičom [20], [21]. Spôsobí zúženie frekvenčného pásma podobne ako mikropáskové napájacie vedenie. Vonkajší vodič sa pripája na zemniacu plochu antény, vnútorný sa vedie touto plochou skrz dielektrikum do vyžarovacieho prvku antény. Preto už počas návrhu a simulácií musíme rátať s tým, že do antény bude potrebné vyvrtáť otvor pre tento vnútorný vodič. To môže priniesť isté komplikácie. Impedancia antény, a teda jej impedančné prispôbenie, sa realizuje polohou sondy na mikropáske antény. Približovaním sondy ku kraju antény sa impedancia zvyšuje; v strede antény je nulová [22]. Majorita antén je ladená na impedanciu $Z = 50 \Omega$, kedy sa snažíme imaginárnu zložku potlačiť čo najbližšie k nule.

Štruktúra koplanárneho vedenia (Obr. 1.2 (c)) spočíva v nanosení oboch vrstiev, vyžarovacej aj zemniacej, na rovnakú stranu dielektrického substrátu [18]. Na spodnej strane teda nie je žiadna vodivá plocha. Na hornej sú tri - dve zemniacie plochy po

stranách a medzi nimi tenká vodivá vrstva pripojená na vodič vysokofrekvenčného signálu [19].

1.2 Fyzikálne pojmy

S parametre sú komplexné čísla. Popisujú závislosť medzi vstupnými a výstupnými portami antény. Uvažujme dva porty, port 1 a port 2. Parameter s_{21} , činiteľ prenosu, hovorí koľko energie sa z portu 1 preniesie na port 2. Ak 1 je port vstupný a 2 je port výstupný, hovoríme o prenose zo vstupu na výstup [25]. Ďalším významným je s_{11} , tiež nazývaný činiteľ odrazu alebo koeficient odrazu. Ak sa $|s_{11}|$ rovná 0 dB, všetok signál privedený na vstup je odrazený a nič nie je vyžiarené do priestoru. Energia dodávaná sa premieňa na teplo, účinnosť $\eta \rightarrow 0$ %. Ak sa $|s_{11}|$ rovná -10 dB a na vstup privádzame signál s výkonom 2 W (3 dB), potom 0,1 W (-7 dB) výkonu bude vyžiarených do priestoru [25].

Z parameter alebo impedančný parameter je obecné komplexné číslo. Udáva reálnu a imaginárnu zložku impedancie antény. Y parameter súvisí so Z parameterom, nakoľko je jeho prevrátenou hodnotou [26]. Udáva admitanciu antény.

Zisk (ang. *gain* - G) antény súvisí s jej smerovosťou a efektívnosťou. Udáva ako dobre anténa premieňa vstupný signál s určitou energiou na elektromagnetické žiarenie v podobe vln, ktoré žiari do určitého smeru [2], [27]. Často sa udáva v dBi (izotropný zisk) či dBd (polovlnový dipólový zisk). Prepočet je možný podľa vzorca:

$$G[\text{dBi}] = G[\text{dBd}] + 2,15. \quad (1.3)$$

Šírka pásma (ang. *bandwidth* - B) hovorí o rozsahu frekvencií, v ktorých anténa spoľahlivo pracuje [28] so žiadanými vlastnosťami. Určiť ju môžeme napr. z činiteľa odrazu s_{11} . Ak je veľkosť činiteľa odrazu $|s_{11}|$ menšia ako -10 dB na danom rozsahu frekvencií, potom podiel nižšej a vyššej frekvencie zodpovedá šírke B .

Polarizácia udáva rovinu, v ktorej kmitá elektrická zložka elektromagnetického žiarenia. Popisuje smer vektora elektrickej intenzity. Rozlišujeme tri základné pojmy - eliptická, kruhová a lineárna [2]. Pri lineárnej polarizácii sa vektor elektrickej (alebo magnetickej) vlny pohybuje po priamke. Na základe jej smeru poznáme horizontálnu a vertikálnu polarizáciu [29]. Kruhová polarizácia vzniká vtedy, ak vektor vlny popisuje kružnicu ako funkciu v čase [2]. Aby táto polarizácia vznikla, musia byť splnené nasledujúce podmienky [2], [29]:

1. v poli musia vzniknúť dve lineárne ortogonálne zložky,
2. obe zložky musia mať rovnakú amplitúdu,
3. medzi zložkami musí byť fázový časový rozdiel nepárnych násobkov 90° ($\pi/2$).

Na základne smeru otáčania vektorov môžeme hovoriť o pravostrannej a ľavostrannej kruhovej polarizácii [29]. V našej aplikácii je žiadaná, nakoľko poskytuje veľkú mobilitu. Pri použití na ľudskom odevu či iných pohybujúcich sa objektoch by lineárna polarizácia pôsobila obmedzujúco [30]. Eliptická polarizácia vzniká ak vektor (elektrický alebo magnetický) popisuje elipsu. Pre lepšiu reprezentáciu sa používa osový pomer (ang. *Axial Ratio* - AR), bezrozmerná veličina. Ak osový pomer elipticky polarizovanej antény $AR = 1$, potom hovoríme o (úplnej) kruhovej polarizácii. Ak $AR \rightarrow \infty$, potom je anténa lineárne polarizovaná. Z toho vyplýva, že oba typy polarizácie, kruhová aj lineárna, sú špeciálnym typom eliptickej [29]. Súčasne je možné použiť aj decibelové vyjadrenie, teda anténa s osovým pomerom $AR < 3$ dB už je považovaná za kruhovo polarizovanú [29], [31].

1.3 Komunikácia telom

HBC (ang. *Human Body Communication*) je komunikácia medzi ľudským telom a zariadeniami v jeho okolí. V spojení s IoT (Internet of Things) predstavuje neobmedzené možnosti synchronizácie veľkého množstva informácií, ktorými ľudia môžu disponovať. Tým sú myslené dáta, ktoré odosielajú rôzne senzory umiestnené napr. v odevu [7], [8]. Sústava senzorov a antén vytvára sieť nazývanú BAN - Body Area Network [11]. V tejto oblasti nachádzajú plošné gombíkové antény svoje miesto. Víziou v budúcnosti sú napríklad inteligentné pohybové senzory, ktoré dokážu zbierať informácie nielen o polohe človeka, ale aj o jeho životných funkciách, ako tep alebo krvný tlak [12]. Možností je naozaj neobmedzené množstvo. Plošné, kruhovo polarizované antény sú vynikajúcim riešením ako túto komunikáciu zabezpečiť. V závislosti na aplikácii sa optimalizujú na požadované vlastnosti. Väčšina HBC antén je ladená pre použitie v GPS, WLAN a Bluetooth frekvenciách [1].

1.4 Model ľudského tkaniva - Fantóm

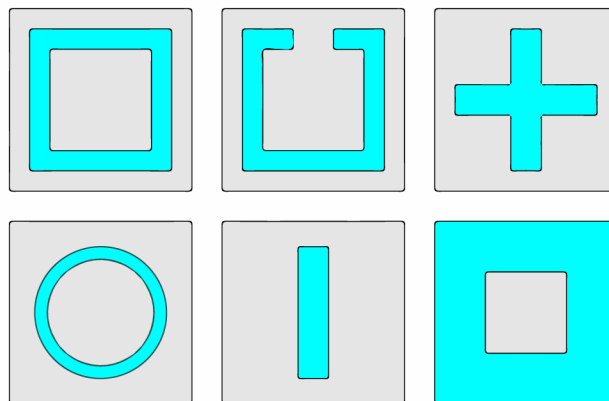
Funkčnosť antény vo voľnom priestore nie je ničím zvlášť ovplyvnená. Opačný prípad nastáva, keď sa dostáva do blízkosti materiálov, ktoré na elektromagnetické pole reagujú. Medzi ne patrí aj ľudské tkanivo. Aby sme nemuseli používať tkanivo živé, existujú jeho rovnocenné modely - fantómy. Rozlišujeme tekuté, pevné a gélové [41]. Každý sa skladá z iných pomerov použitých materiálov, ich vlastnosti a použitie je často frekvenčne závislé.

V našej práci používame fantóm vyrobený z presného pomeru želatíny - agaru a destilovanej vody. Výroba takéhoto fantómu je pomerne jednoduchá, je ale dôležité dodržiavať určité postupy. Pri varení je nutné sledovať teplotu agaru, príliš vysoká

má za následok vytváranie bubliniek. Po pridaní destilovanej vody zmes opatrne nalejeme do pripravenej formy, snažíme sa eliminovať vznikanie bubliniek. Počas tuhnutia a aj po ňom fantóm skladujeme v chlade. Pri izbovej teplote sa vyparuje určité množstvo vody, ktoré spôsobuje zmenu relatívnej permitivity fantómu.

1.5 Frekvenčne selektívne povrchy

Frekvenčne selektívny povrch (ang. *Frequency Selective Surface* - FSS) je sústava periodicky sa opakujúcich modulov určitého tvaru. Takéto povrchy sa správajú ako filter. Môžu pohlcovať alebo úplne odrážať určité frekvenčné žiarenie [17], [32]. V prípade integrovania do oblečenia je táto skutočnosť veľmi pozitívna, nakoľko redukuje množstvo žiarenie smerom k ľudskému telu. Príkladom takéhoto povrchu môže byť napr. výplň dverí mikrovlnnej rúry. Žiarenie je ňou pohltené alebo odrazené späť k zohrievanému jedlu. Tieto periodicky sa opakujúce moduly sú zvyčajne vyrobené z vodivého materiálu. Umiestnené sú na dielektrickom materiáli [33], [34]. Rozmery modulov priamo súvisia s frekvenciou, ktorú budú odrážať alebo pohlcovať. Existuje značné množstvo týchto povrchov. Na obrázku Obr. 1.3 sú zobrazené niektoré často používané tvary [32] - [34]. Zaujímať nás bude napr. činiteľ odrazu s_{11} , činiteľ prenosu s_{21} či o koľko dB FSS redukuje spätné žiarenie z antény. Simulácie FSS je možné nájsť v sekcii 2.3.



Obr. 1.3: Príklady niektorých často používaných tvarov FSS.

2 Modelovanie a simulovanie

Táto kapitola je venovaná simuláciám gombíkovej antény a FSS v programe CST Studio Suite (CST Microwave Studio, ďalej len CST). Popíšeme architektúru antény, rozmery overíme výpočtom. Ukážeme postup ako anténu modelovať a simulovať. Podobne popíšeme FSS. Výsledky simulácií uvidíme v grafoch. Navrhujeme potrebné optimalizácie antény a vysvetlíme správnosť návrhu.

2.1 Nastavenie simulácie

Začali sme základnými nastaveniami programu CST - Microwaves & RF/Optical -> Antennas. Keďže vyžarovacou plochou našej antény je tzv. patch (tenká vrstva vodivého materiálu), vyberieme možnosť Planar. Algoritmus počítania, tzv. Solver, sme zvolili Time Domain Solver. Na výber je ešte Frequency Domain Solver, ktorý sa líši v použitej numerickej metóde. V ďalšom okne volíme jednotky, s ktorými bude simulačný program pracovať. Pre nás ideálne sú zhrnuté v Tab. 2.1:

Tab. 2.1: Prehľad základných jednotiek.

Veličina	Jednotka
Rozmery	mm
Frekvencia	GHz
Čas	ns
Teplota	Kelvin

Nasleduje frekvenčný interval, v ktorom budeme anténu skúmať. Naša (z článku [1]) musí byť použiteľná v pásme ISM (Industrial, Scientific, Medical), napr. pre Wi-Fi aplikácie, konkrétne štandard nazývaný Wi-Fi 5 (IEEE 802.11ac). Tento protokol je schopný prenášať veľmi veľký počet bitov za sekundu. Pri dokonalých podmienkach sa čísla pohybujú až okolo 1 Gbps (ang. [*gigabites pear second*]) [35]. Anténa z [1] pracuje na rezonančnej frekvencii $f_{rez} = 5,51$ GHz s šírkou pásma $B = 160$ MHz. Aj vďaka veľkej šírke pásma je možné použiť lepšie modulácie (napr. 256QAM) na tak veľký prenos dát. Aby sme si boli istí parametrami antény, nemôžeme zvoliť rozsah frekvencií len na šírku pásma B (5,35 - 5,67 GHz). Dôvodom je skutočnosť napríklad objavenia sa parazitných rezonancií mimo tento rozsah; tie by mohli značne ovplyvniť výsledné použitie. Preto na začiatok volíme $f_{min} = 5$ GHz, $f_{max} = 6$ GHz. Posledným dôležitým nastavením je definovanie takzvaných Monitorov (karta SIMULATION -> Field Monitor). Tie sú významným pomocníkom pri

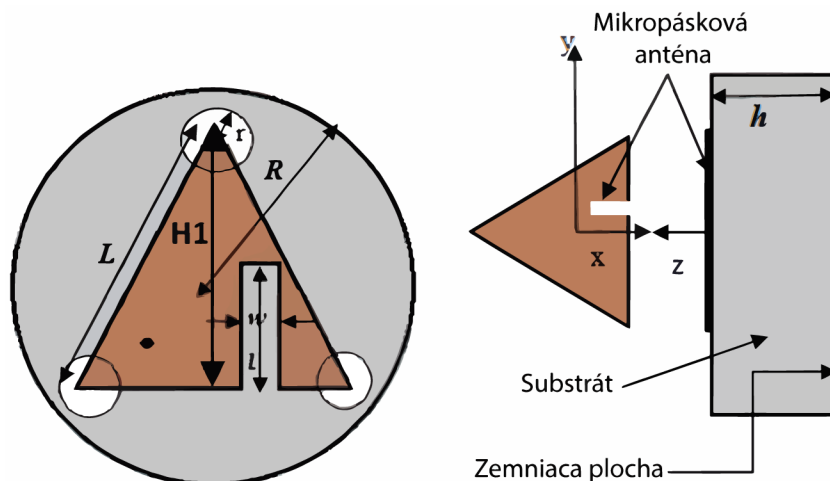
skúmaní a ďalšej optimalizácii. Spadajú do sekcie Post-Processing, čiže dodatočné spracovanie výsledkov.

Podľa zadania [1] máme overiť, či vyrobená anténa skutočne bude kruhovo polarizovaná. Na to potrebujeme použiť Farfield Monitor. Ten nám, zatiaľ, stačí definovať pre tri frekvencie, a to $f_1 = 5$ GHz, $f_2 = 5,5$ GHz, $f_3 = 6$ GHz. Ak by nás zaujímali aj ďalšie výsledky simulácie, máme možnosť použiť aj iné monitory, napr. E-field, H-field či Surface current.

Týmto sme program CST správne nastavili. Solver, jednotky, monitory a sledované frekvencie môžeme meniť aj počas modelovania a testovania. Nás najviac zaujímali parametre v pracovnej šírke pásma, preto boli Farfield monitory nastavené na frekvencie 5 až 6 GHz s krokom 0,1 GHz. Pri výbere a definovaní monitorov a frekvencií treba dbať na výpočtový výkon. Počítanie Maxwellových rovníc (simulovanie elektromagnetických polí) je veľmi náročné, preto by sme mali myslieť na fakt, že čím väčší rozsah bude musieť procesor počítať, tým dlhšie bude simulácia trvať. Dĺžku je možné tiež ovplyvniť nastavením mesh (sietovania) a bounding boxu (počítaného priestoru), tým ale ovplyvníme presnosť a veľkosť počítaného priestoru.

2.2 Architektúra antény

Keď už poznáme základné fyzikálne princípy antén, môžeme sa pustiť do samotného modelovania. Základom modelovania je poznanie výsledného tvaru a rozmerov. Samotný proces je subjektívny. Každý jedinec vidí iné súvislosti, na základe ktorých sa rozhoduje ako anténu modelovať. Článok [1] poskytuje údaje, ktoré zobrazuje Obr. 2.1 a Tab. 2.2. Použitím týchto údajov sme započali samotné modelovanie.



Obr. 2.1: Nákres antény prebratý a preložený z [1].

Tab. 2.2: Prehľad pôvodných rozmerov antény.

Názov parametra	Hodnota [mm]	Popis
L	13,86	Dĺžka hrany antény
R	12	Polomer substrátu
H1	12	Výška antény
l	6	Výška zárezu
w	0,8	Šírka zárezu
r	2	Polomer DGS cylindrov

2.2.1 Overenie výpočtov

Po zadenovaní rezonančnej frekvencie, na ktorej potrebujeme, aby anténa pracovala, i jej vstupnej impedancie, je potrebné vypočítať (overiť), či dĺžka strany trojuholníka stačí na vybudenie vln, ktoré vytvoria stojaté vlnenie (ang. *standing wave*). Elektrické a magnetické polia v okolí antény začnú oscilovať, sú nositeľmi energie, ktorá sa začne vyžarovať do priestoru [2], [3]. Toto oscilovanie je spôsobené napätím a prúdom, ktoré kmitajú medzi koncami antény [4]. Je preto logické, že na rozmeroch antény záleží aj rezonančná frekvencia. Polovlnovú rezonanciu $f_{\lambda/2}$ pre trojuholník spočítame podľa vzťahu [1]

$$f_{rez} = \frac{2c}{3L_e\sqrt{\epsilon_r}} \text{ [Hz]}, \quad (2.1)$$

kde c je rýchlosť svetla ($c = 299\,792,458$ km/s), L_e je efektívna strana trojuholníka a ϵ_r značí relatívnu permitivitu substrátu, ktorý oddeľuje zemniacu časť antény od vyžarovacieho prvku. L_e spočítame podľa vzťahu z [1], ktorý ho uvádza ako výpočet pre anténu v tvare rovnostranného trojuholníka:

$$L_e = L \left[1 + 2,199 \frac{h}{L} - 12,835 \frac{h}{L\sqrt{\epsilon_r}} + 16,436 \frac{h}{L\sqrt{\epsilon_r}} + 6,182 \left(\frac{h}{L} \right)^2 - 9,802 \left(\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \left(\frac{h}{L} \right)^2 \right] \text{ [m]}. \quad (2.2)$$

Dosadením hodnôt z Tab. 2.2 do vzorca 2.2 dostaneme výsledok $L_e = 13,97$ mm. Následným dosadením do vzorca 2.1 dostaneme $f_{rez} = 8,55$ GHz. Z toho vyplýva, že rovnostranný trojuholník s dĺžkou strany $L = 13,86$ mm bude rezonovať na tejto frekvencii.

Naša aplikácia vyžaduje pracovať na frekvencii $f_{rez} = 5,5$ GHz. Preto máme viac možností ako sa na požadovanú frekvenciu dostať:

1. Menej kompaktným riešením je zväčšenie dĺžky strany trojuholníka [2].
2. Prívetivejším je vytvorenie zárezu do antény, ktorý pomôže pri ladení na potrebnú frekvenciu [1]. Vytvorí sa parazitná rezonancia [36], [37] alebo môže byť použitý na impedančné prispôsobenie antény [37].

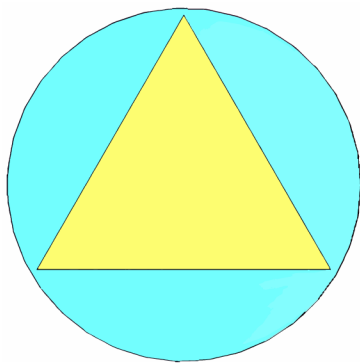
Ak by sme predsa len chceli zväčšiť stranu trojuholníka, článok [1] uvádza stranu $L = 22,31$ mm, no dosadením do vzťahu 2.2 dostávame¹

$$L_e = 22,31 \cdot 10^{-3} \left[1 + 2,199 \frac{0,025 \cdot 10^{-3}}{22,31 \cdot 10^{-3}} - 12,835 \frac{0,025 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2,8}} + 16,436 \cdot \frac{0,025 \cdot 10^{-3}}{22,31 \cdot 10^{-3} \sqrt{2,8}} + 6,182 \left(\frac{0,025 \cdot 10^{-3}}{22,31 \cdot 10^{-3}} \right)^2 - 9,802 \left(\frac{1}{\sqrt{2,8}} \right) \cdot \left(\frac{0,025 \cdot 10^{-3}}{22,31 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \right] = 22,42 \text{ [mm]} .$$

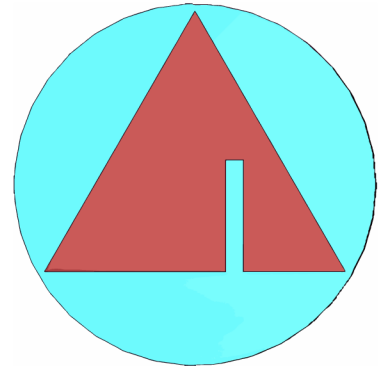
Dodatočným dosadením do 2.1 dostávame frekvenciu

$$f_{rez} = \frac{2 \cdot 299792458}{3 \cdot 0,0224 \sqrt{2,8}} = 5,33 \text{ [GHz]} ,$$

čo nezodpovedá uvádzanej frekvencii. Aby čísla sedeli, museli by sme použiť substrát s relatívnou permitivitou $\epsilon_r = 2,6$ [-] alebo trojuholník s dĺžkou strany $L = 21,6$ mm. Stále treba mať na mysli, že výpočty vyššie sú určené rovnostrannej trojuholníkovej anténe bez ladiaceho zárezu. Na Obr. 2.2 sa nachádza príklad použitia zárezu.



(a) Bez zárezu.



(b) S ladiacim zárezom

Obr. 2.2: Rovnostranné trojuholníkové antény na substráte s $R = 13$ mm a $L = 21,6$ mm.

¹Na výpočet bol použitý program MATLAB

2.2.2 Zemniaca plocha

Hrúbka tejto vrstvy (GP) sa obyčajne pohybuje v rozmedzí 0,0175 - 0,07 mm [3]. Výsledné správanie antény nie je priamo ovplyvnené touto hrúbkou, no musíme dodržať zásady šírenia vysokofrekvenčnej vlny v materiáli. Preto hrúbka nanesej vrstvy nemá byť menšia ako $\frac{1}{40}$ vlnovej dĺžky [2], [4], [6]. Preto dbáme na vzorce 1.1 a 1.2.

V CST klikneme na kartu Modeling, v skupine Shapes vyberieme Cylinder, stlačením klávesy ESC môžeme zadávať súradnice modelu. Na výber máme dve možnosti ako tvar definovať:

1. priamo používať hodnoty: Outer Radius = 12,
2. používať parametre: Outer Radius = oR.

Druhá možnosť poskytuje isté výhody. Definovanie tvarov pomocou parametrov vytvára vzťahy medzi komponentami samotnými. Objekty sú definované jednoduchými matematickými výrazmi - parametrami, napr. $\text{antZ}=0+\text{gT}+\text{H}$. Zmena parametra nespôsobí kolíziu objektov, nakoľko ich poloha nie je stanovená pevným číslom. Preto je veľmi dobrou praxou parametre používať. Použitie parametrov približuje Obr. 2.3. Dodatočnú úpravu GP budeme rozoberať v kapitole 2.2.6 s Obr. 2.5.

Name:	
Ground_Plane	
Orientation: <input type="radio"/> X <input type="radio"/> Y <input checked="" type="radio"/> Z	
Outer radius:	Inner radius:
R	0,0
Xcenter:	Ycenter:
GP_x	GP_y
Zmin:	Zmax:
GP_z	GP_z+gT

Obr. 2.3: Príklad použitia parametrov v CST pri modelovaní zemniacej plochy.

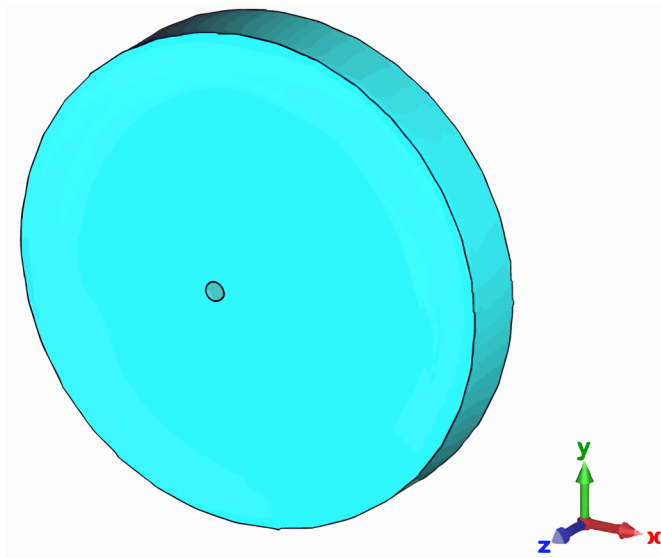
2.2.3 Substrát

Modelovanie je totožné s GP. Vytvoríme valec, stlačením klávesy A a dvojitým kliknutím na GP nastavíme spoločný počiatok. Zadáme parametrické hodnoty. V sekcii Material vyberieme [New Material...], nastavíme ϵ_r a činiteľ strát δ . Použitým materiálom substrátu v [1] je akryl. Na vyrezanie otvoru pre napájajúcu sondu bol použitý

Modeling -> Tools -> Boolean Operations -> Subtract. V Tab. 2.3 ukazujeme premenné substrátu a jeho podobu na Obr. 2.4.

Tab. 2.3: Premenné použité pri definovaní tvaru a vlastností substrátu

Parameter	Hodnota/výraz
Outer radius	R
Inner radius	0
Xcenter	xp(1)
Ycenter	yp(1)
Zmin	gT
Zmax	gT+H
ϵ_r	2,8
δ	0,02



Obr. 2.4: Substrát definovaný podľa Tab. 2.3 s výrezom pre sondu.

2.2.4 Anténny prvok

Tenká fólia v tvare trojuholníka nachádzajúca sa na hornej strane substrátu je kovová mikropáska. Trojuholníkový tvar sme vytvorili použitím funkcie Modeling -> Shapes -> Extrude Face. Aby anténa mala správne parametre, je potrebné, aby sa mikropáska nachádzala presne v strede substrátu [2]. Použitím hodnôt z Tab. 2.4

sme sa vyhli funkcii Align, ktorá stredy plôch spojí a zarovná. Môžeme ju však použiť ako kontrolu, či nami zadané parametrické súradnice boli správne.

Tab. 2.4: Súradnice a premenné použité pri definovaní tvaru a vlastností antény.

		Parameter	Výraz	Hodnota
X súradnice	Y súradnice	ant_x1_pos	0	0,000
ant_x1_pos	ant_y1_pos	ant_y1_pos	$\text{antL}/\sqrt{3}$	8,002
-ant_x23_pos	-ant_y23_pos	ant_x23_pos	$\text{antL}/2$	6,930
ant_x23_pos	-ant_y23_pos	ant_y23_pos	$\text{antL}/2\sqrt{3}$	4,002
		Zmin	gT+H	3,025
		Height	antH	0,025

Ako už bolo spomenuté v sekcii 2.2.1, anténa týchto pomerne malých rozmerov (Tab. 2.2) musí byť použiteľná na frekvencií $f = 5,5$ GHz. Preto bol aplikovaný zárez, ktorým je rezonančná frekvencia doladená na požadovanú hodnotu [1].

Definovanie prebieha pomocou funkcie z karty Modeling -> Shapes -> Brick. Pomocou Subtract vyrežeme definovaný tvar do antény (len do mikropásky žiariaceho prvku). Potrebu vytvorenia zárezu sa dostávame do momentu, z ktorého by sme sa bezpečne nedostali v prípade, ak by sme všetky veľkosti tvarov zadávali číselne a nie použitím parametrov. Vzdialenosť zárezu, napr. od stredu alebo steny antény nie je v [1] definovaná. Jeho pozícia jednoznačne ovplyvní vlastnosti antény, preto je žiadúce meniť šírku, výšku a posunutie zárezu [36], [37]. Parametrom posun (Tab. 2.5) zárez posúvame po mikropáske, a tým môžeme jednoducho meniť jeho pozíciu.

Tab. 2.5: Údaje potrebné na vytvorenie zárezu, ktorého rozmery je možné kedykoľvek počas práce zmeniť.

Parameter	Výraz
Xmin	posun
Xmax	posun-w
Ymin	-ant_y23_pos
Ymax	1-and_y23
Zmin	gT+H
Zmax	gT+H+antH

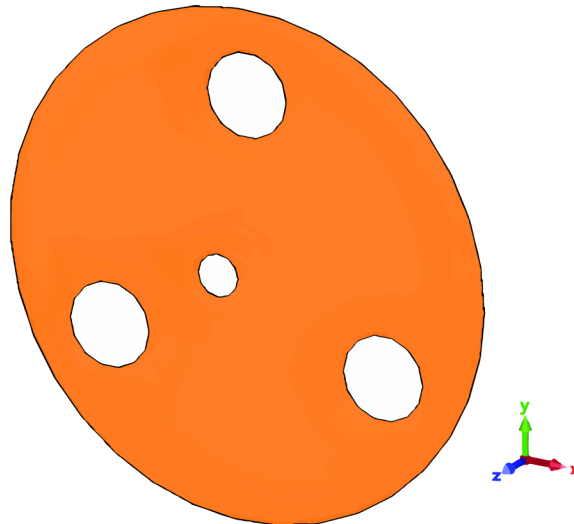
2.2.5 Napájacia sonda

Anténu budeme napájať použitím koaxiálnej sondy, ako je v článku [1] prezentované. Tá sa v programe CST tvorí ako tri valce predstavujúce vnútorný a vonkajší vodič a dielektrikum. Materiálom vodičov býva PEC (dokonalý elektrický vodič - len v simuláciách) či bežne meď [23]. Pre dielektrikum je často vybraný materiál Teflón (PTFE - *tetrafluoroethylene*) alebo PE, či PVC [23]. Postupujeme ako v prechádzajúcich krokoch, použijeme napr. funkciu Subtract. Znova zadávame parametre tak, aby sme boli schopní meniť rozmery a polohu sondy.

Posledným krokom je definovanie vstupného portu. Sondy označíme (vonkajší a vnútorný vodič musia byť zarovnané na rovnakej úrovni), postupujeme Simulation -> Sources and Loads -> Waveguide Port.

2.2.6 Poškodenie zemniacej plochy

Článok [1] hovorí o jej „poškodení“ troma kruhovými výrezmi s $r = 2$ mm (ang. *Defected Ground Structure* - DGS) pre dosiahnutie kruhovej polarizácie (sekcia 1.2) a lepších parametrov [1], [38]. DGS vytvoríme znova použitím funkcií z karty Modeling -> Shapes -> Cylinder. Postupujeme rovnako ako pri vytváraní GP. Pred definovaním stredov DGS musíme poznať súradnice vrcholov trojuholníka mikropáskovej antény. Použitím parametrov z Tab. 2.4 vyššie zaručíme zviazanie vrcholov a počiatkov, čo nám zaručí invariantnosť tvarov, napr. pri zmene R , r či antL . Vyrezanie DGS do spodnej vrstvy antény umožňuje funkcia Subtract.



Obr. 2.5: Hotová zemniaca plocha, ktorá obsahuje otvor pre napájaciu sondu (sekcia 2.2.5) a poškodenia (sekcia 2.2.6).

Tým sme dokončili model antény popísanej v [1]. Výsledky simulácií sa nachádzajú v sekcii 2.4. Ďalším krokom je modelovanie frekvenčne selektívneho povrchu.

2.3 Architektúra a simulácia FSS

Frekvenčne selektívny povrch z [1] sa skladá celkom z deviatich elementov štvorcového tvaru (ďalšie príklady sú na Obr. 1.3). Použité rozmery sa nachádzajú v Tab. 2.6.

Tab. 2.6: Hodnoty premenných použité pri modelovaní FSS.

Parameter	Hodnota [mm]	Popis
<code>fss_height</code>	0,5	Výška rifloviny FSS
<code>fss_p_h</code>	0,1	Hrúbka FSS prvkov
<code>fss_p_x_y</code>	8	Šírka a výška FSS prvkov
<code>fss_s</code>	1,4	Šírka zárezu v FSS prvkoch
<code>fss_w</code>	1	Šírka kovovej časti FSS prvku
<code>fss_x_y</code>	30	Šírka a výška rifloviny FSS
<code>fss_z</code>	-2	Vzdialenosť FSS od antény

Pri návrhu bol použitý vzorec [1]

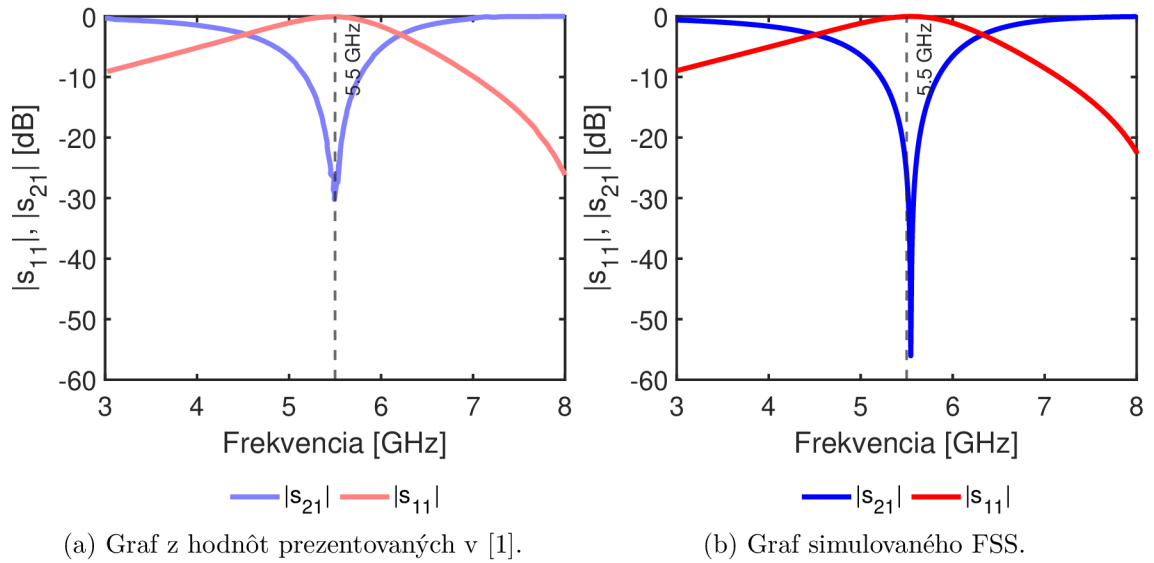
$$l_{ef}[2(L1 + W1) - g1] = \frac{c_0}{2 \times f_{rez} \times \sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}} \quad [m], \quad (2.3)$$

do ktorého boli dosadené hodnoty $L1 = 8$ mm, $W1 = 8$ mm, $g1 = 1,4$ mm, $c_0 = 299792458$ m/s, $f_{rez} = 5,5$ GHz a $\epsilon_r = 1,6$ [-]. Dostávame efektívnu dĺžku vodiacieho prvku $l_{ef} = 23,9$ mm². Aby sedela rezonančná frekvencia $f_{rez} = 5,5$ GHz a šírka pásma $B = 580$ MHz, efektívna dĺžka prvku bola zvolená ako $l_{ef} = 29,2$ mm [1]. Rovnako bol prezentovaný zárez so šírkou $g1 = 1,4$ mm, ktorý pomáha pri ladení rezonančnej frekvencie povrchu [1].

Z grafov na Obr. 2.6³ je zrejmé, že naša simulácia činiteľa odrazu s_{11} a činiteľa prenosu s_{21} relatívne zodpovedá tej, ktorá bola publikovaná v [1]. Z veľkosti $|s_{11}| = 0$ dB na frekvencii $f = 5,5$ GHz vidíme, že vlna na tejto frekvencii cez FSS spoľahlivo neprejde, pretože bude pomerne dobre tlmená.

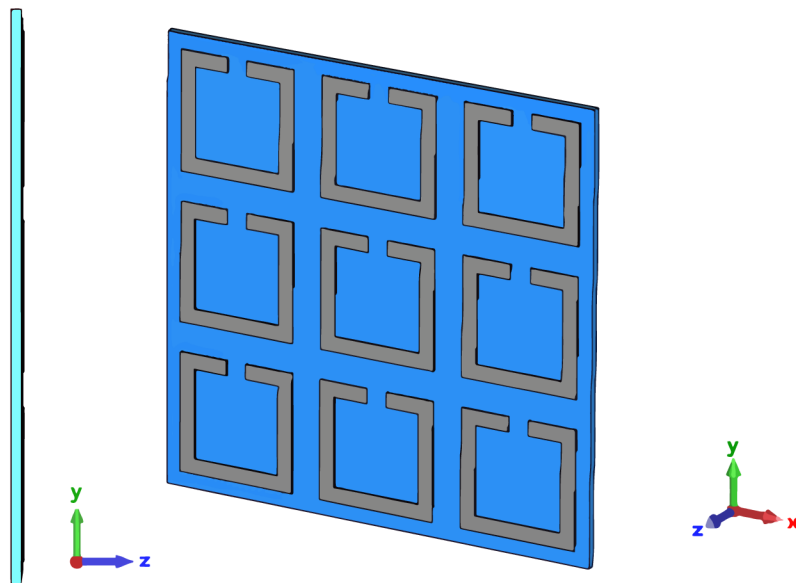
²Na výpočet bol použitý program MATLAB

³Na získanie údajov z PDF bol použitý WebPlotDigitizer, <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>



Obr. 2.6: Porovnanie výsledkov simulácie FSS s hodnotami z článku.

Na Obr. 2.7 je možné vidieť konečnú štruktúru povrchu FSS, ktorá bola modelovaná a simulovaná v CST. Na Obr. 2.8 môžeme vidieť štyri elementy FSS s odpovedajúcim rozložením prúdu v rôznych fázach.



Obr. 2.7: Vytvorený funkčný frekvenčne selektívny povrch.

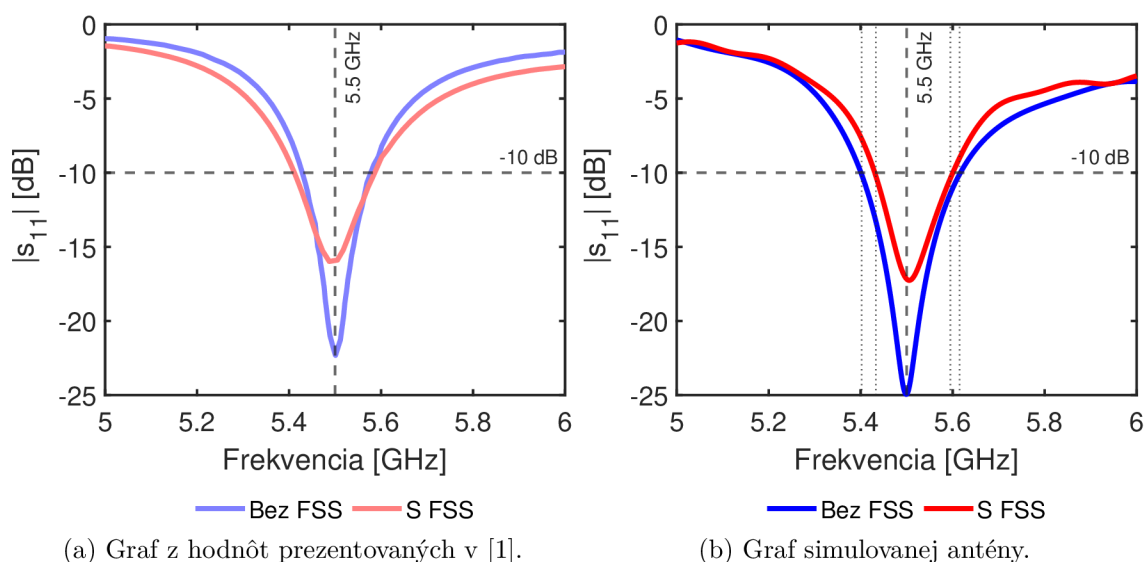


Obr. 2.8: Rozloženie prúdu na moduloch FSS.

2.4 Výsledky simulácií pôvodnej antény

Táto sekcia je venovaná získaným výsledkom simulácií antény, ktorú sme namodelovali použitím rozmerov popísaných v [1]. Článok [1] neobsahuje informácie o polohe zárezu (sekcia 2.2.4) a polohe sondy (sekcia 2.2.5). Preto boli prvé simulácie zamerané na nájdenie týchto správnych polôh. Očakávali sme rezonanciu na frekvencii $f_{rez} = 5,5$ GHz a kruhovú polarizáciu. Aby bola anténa kruhovo polarizovaná, bolo potrebné dosiahnuť osový pomer $AR < 3$ dB (sekcia 1.2). Rovnako sme sa snažili so vstupnou impedanciou Z dostať čo najbližšie k $Z = (50 + j0) \Omega$.

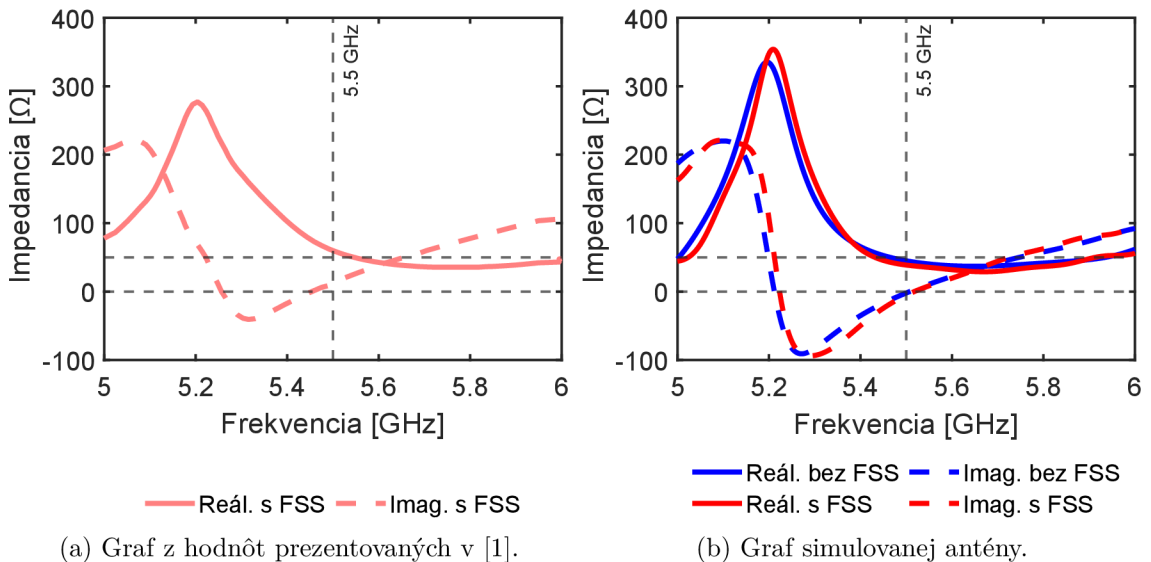
Podľa Obr. 2.9 môžeme tvrdiť, že pôvodná anténa rezonuje na $f_{rez} = 5,5$ GHz, ako uvádzajú autori z [1].



Obr. 2.9: Graf činiteľa odrazu s_{11} .

Rovnako môžeme určiť šírku pásma, ktorá je $B = 210$ MHz bez použitia FSS a $B = 160$ MHz s použitím FSS. Článok uvádza $B = 130$ MHz bez a $B = 180$ MHz s FSS. Nami simulovaná anténa má teda o niečo väčšiu šírku pásma.

Impedanciu Z vyčítame z Obr. 2.10. Jej reálna zložka sa na $f_{rez} = 5,5$ GHz blíži hodnote $Z_{real} = 50 \Omega$ a imaginárna zložka, reaktancia, je blízko hodnoty $Z_{imag} = j0 \Omega$. Z Tab. 2.7 vyčítame, že pri použití FSS impedancia na rezonančnej frekvencii mierne klesne. Zdroj [1] o tejto zmene impedancie s FSS neinformuje.

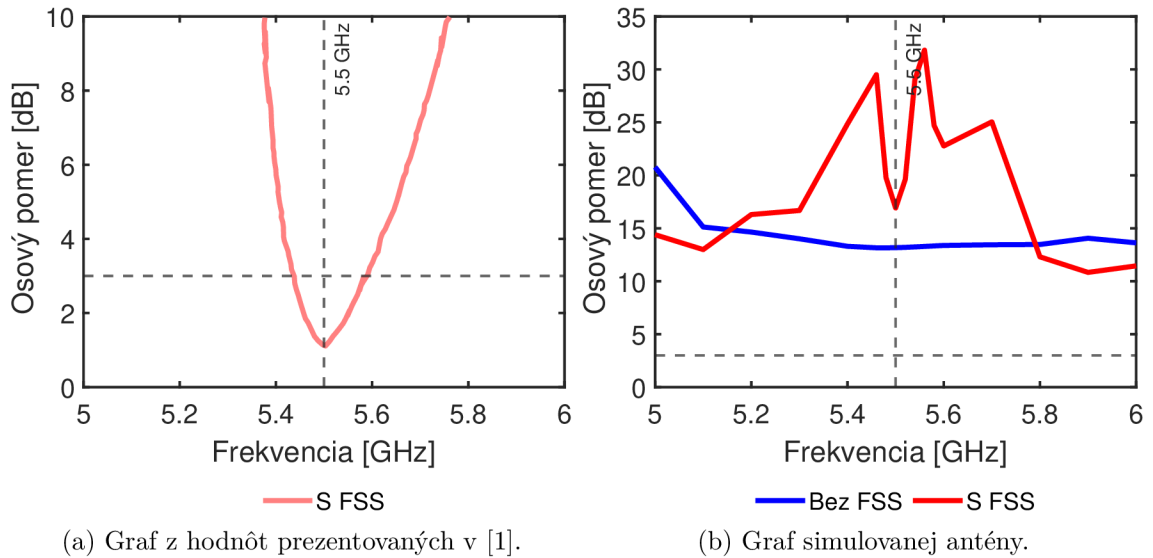


Obr. 2.10: Graf impedancie Z pôvodnej antény.

Dôležitým parametrom je osový pomer antény, ktorý je zobrazený v grafoch Obr. 2.11. Simulovaním bez FSS sme dosiahli najlepší výsledok $AR = 13$ dB. FSS na osový pomer vplyv malo a hodnota vystúpila až na $AR = 17$ dB, čo vôbec nezodpovedá podmienke kruhovej polarizácie (kapitola 1.2). Zadanie [1] tvrdí o kruhovej polarizácii s $AR \rightarrow 1$ dB. Simuláciami sme túto skutočnosť vyvrátili, a tým dokázali, že prezentovanú anténu v [1] nie je možné naladiť na frekvenciu $f_{rez} = 5,5$ GHz so zodpovedajúcou impedanciou $Z = (50+j0) \Omega$ a osovým pomerom $AR < 3$ dB.

Anténa teda nemôže byť kruhovo polarizovaná. V nasledujúcej kapitole 2.5 sa budeme venovať potrebným optimalizáciám a úpravám antény.

Najlepšie dosiahnuté výsledky ukazuje Tab. 2.7, ktorá ich porovnáva s tými, ktoré dosiahli autori v článku [1].



Obr. 2.11: Graf osového pomeru pôvodnej antény (osi y majú rôzny rozsah!).

Tab. 2.7: Porovnanie dosiahnutých výsledkov s výsledkami z článku [1] pre rezonančnú frekvenciu $f_{rez} = 5,5$ GHz.

Výsledky prezentované v článku			
Veličina	Hodnota bez FSS	Hodnota s FSS	Jednotka
$ s_{11} $	-23	-17	dB
Z	$55+j5$	$55+j5$	Ω
AR	1	1	dB

Výsledky dosiahnuté simuláciou			
Veličina	Hodnota bez FSS	Hodnota s FSS	Jednotka
$ s_{11} $	-25	-17	dB
Z	$45-j2$	$39-j5$	Ω
AR	13	17	dB

2.5 Optimalizácia

S pôvodnými rozmermi antény z Tab. 2.2 sme nedosiahli vlastnosti popisované v [1]. Potrebnú rezonanciu a vstupnú impedanciu sa nám naladiť podarilo, avšak anténa skutočne nie je kruhovo polarizovaná. Na uľahčenie optimalizácie sme využili integrované optimalizačné metódy v programe CST. Parametrická simulácia (ang.

Parametric Sweep) s algoritmom Time Domain Solver umožnila simulovať správanie pri zmene parametrov v definovanom kroku. Nástroj Optimier s algoritmom Trust Region Framework hľadal prienik hodnôt rôznych parametrov, ktorého snahou bolo priblížiť napr. Z alebo AR prezentovaným výsledkom.

Využitím parametrickej simulácie sme menili dĺžku zárezu v anténe (z pôvodných 6 mm) od 5,5 mm po 6,5 mm s krokom 0,1 mm. Dostali sme dáta, ktorých významné hodnoty prezentuje Tab. 2.8. Môžeme si všimnúť, že zmena dĺžky zárezu potvrdzuje správanie popisované v sekcii 2.2.4. Z uvedených vyplýva skutočnosť, že kruhovú polarizáciu na pôvodnej anténe bez väčších optimalizácií nedosiahneme.

Tab. 2.8: Pár významných bodov jednej z parametrických simulácií dĺžky zárezu.

Dĺžka zárezu [mm]	f_{rez} [GHz]	Z [Ω]	AR [dB]
5,5	5,70	286-j9	8
5,9	5,57	59-j22	16
6,0	5,51	46-j7	17
6,3	5,4	29+j22	40
6,5	5,3	24+j34	33

Pre pôvodnú anténu sa nám nepodarilo nájsť kombináciu zárezu a dostatočne dobrého AR na rezonančnej frekvencii $f_{rez} = 5,5$ GHz, teda druhým postupom optimalizácie popísaného v kapitole 2.2.1. Preto sme zvolili prvú možnosť, a to zväčšenie hrany trojuholníka z $L = 13,86$ mm na $L = 19$ mm. Súčasne aj polomer celej antény z $R = 12$ mm na $R = 14$ mm. Zväčšením hrany sme dostali rezonančnú frekvenciu f_{rez} blízko potrebných 5,5 GHz. Ďalej sme museli optimalizovať veľkosť a polohu nového zárezu, aby sme dosiahli impedančné prispôsobenie. Významné výsledky týchto operácií podáva Tab. 2.9.

Tab. 2.9: Pár bodov parametrickej simulácie výšky zárezu pre zväčšenú anténu.

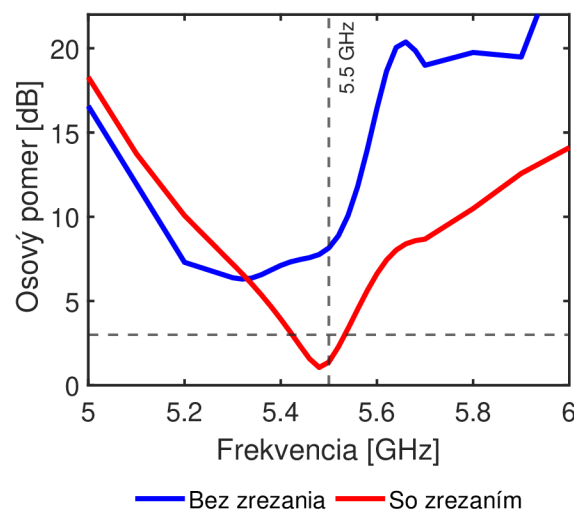
Dĺžka zárezu [mm]	f_{rez} [GHz]	Z [Ω]	AR [dB]
3,0	5,60	47-j24	16
3,8	5,57	44-j20	13
4,5	5,20	42-j15	12
5,0	5,15	42-j12	13
6,0	5,40	42-j7	15

Je zrejme, že vyššie popisované zmeny architektúry antény mali vplyv aj na polohu sondy, ktorá následne tiež musela byť optimalizovaná. Pre dosiahnutie potrebného osového pomeru musia byť vybudené dva ortogonálne módy, o ktorých hovoríme v kapitole 1.2. Preto musí sonda ležať na priamke od stredu trojuholníkovej antény po jej ľavý spodný roh. Všimnime si, že anténa stále nie je kruhovo polarizovaná, nebolo možné dosiahnuť osový pomer $AR < 3$ dB. Preto bolo ako ďalšia optimalizácia prezentované zrezanie horného rohu trojuholníka, čím vzniká anténa s anglickým názvom *truncated triangular antenna* [39]. Tab. 2.10 ukazuje niektoré významné body parametrickej simulácie zrezávania rohu, a tým zlepšovanie osového pomeru, ktorý mal za následok vytvorenie požadovanej kruhovej polarizácie [39], [40].

Tab. 2.10: Pár významných bodov parametrickej simulácie veľkosti zrezania vrchola zväčšenej antény.

Veľkosť zrezania [mm]	f_{rez} [GHz]	Z [Ω]	AR [dB]
0,0	5,55	35-j20	12
0,5	5,54	39-j20	10
1,5	5,53	48-j11	2
1,9	5,51	49-j3	1
2,5	5,40	42-j7	6

Obr. 2.12 načrtáva vplyv zrezania na osový pomer optimalizovanej antény.



Obr. 2.12: Vplyv zrezania vrcholu optimalizovanej antény na osový pomer.

Je dôležité si všimnúť, že až s popisovaným zrezaním a dodatočnou optimalizáciou nástrojom Optimizer sme tento potrebný osový pomer $AR \rightarrow 1$ dB dosiahli.

2.6 Výsledky dosiahnuté optimalizáciou

Pomerne zložitým optimalizačným procesom z kapitoly 2.5 sme dospeli k uspokojivým výsledkom, ktoré porovnáva Tab. 2.11 s tými, ktoré boli prezentované v článku [1]. Anténa bola zväčšená a jej roh bol zrezaný.

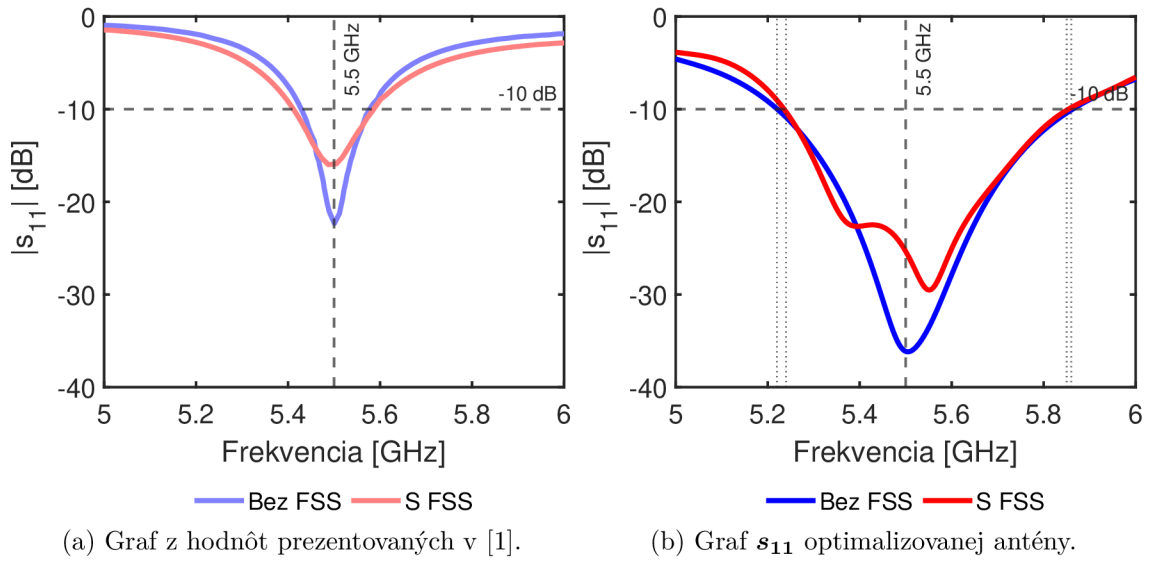
Tab. 2.11: Porovnanie optimalizáciami dosiahnutých výsledkov s výsledkami z článku [1] pre rezonančnú frekvenciu $f_{rez} = 5,5$ GHz.

Výsledky prezentované v článku			
Veličina	Hodnota bez FSS	Hodnota s FSS	Jednotka
$ s_{11} $	-23	-17	dB
Z	$55+j5$	$55+j5$	Ω
AR	1	1	dB
G	2,4	3,6	dBi

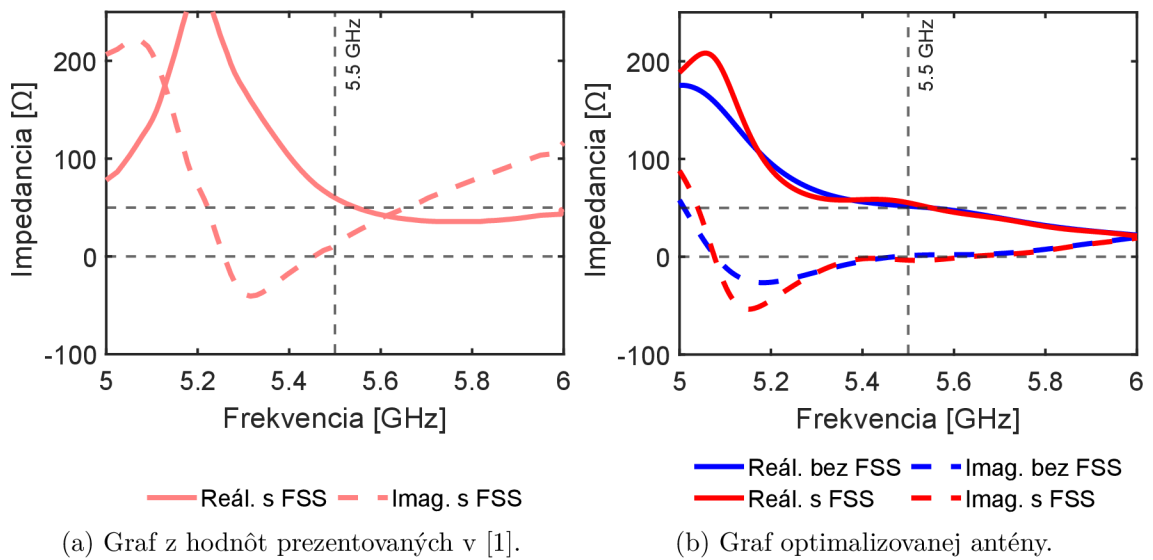
Výsledky dosiahnuté optimalizáciou			
Veličina	Hodnota bez FSS	Hodnota s FSS	Jednotka
$ s_{11} $	-36	-25	dB
Z	$51+j1$	$55-j3$	Ω
AR	1	1	dB
G	5,8	5,8	dBi

Optimalizovaním antény sme dosiahli rezonančnú frekvenciu $f_{rez} = 5,50$ GHz bez použitia FSS a $f_{rez} = 5,55$ GHz s jeho použitím. Zväčšená anténa oproti tej z článku [1] nie je tak úzkopásmová, čo potvrdzuje šírka pásma odčítaná z s_{11} z grafu Obr. 2.13, ktorá sa rovná $B = 640$ MHz. Rozhodujúca B ale bude vyplývať z grafov pre AR . Zisk antény G je pochopiteľne tiež väčší, pretože bola celá štruktúra zväčšená.

Optimalizovanú impedanciu na $f_{rez} = 5,5$ GHz vidíme na Obr. 2.14. Použitím FSS sa príliš nezmenila a zostala blízko žiadanej hodnoty $Z = (50+j0) \Omega$. Článok [1] neuvádza, či prezentovaná hodnota je s použitím FSS alebo nie. Nami simulované rozdiely vo výsledkoch zato nie sú príliš markantné.

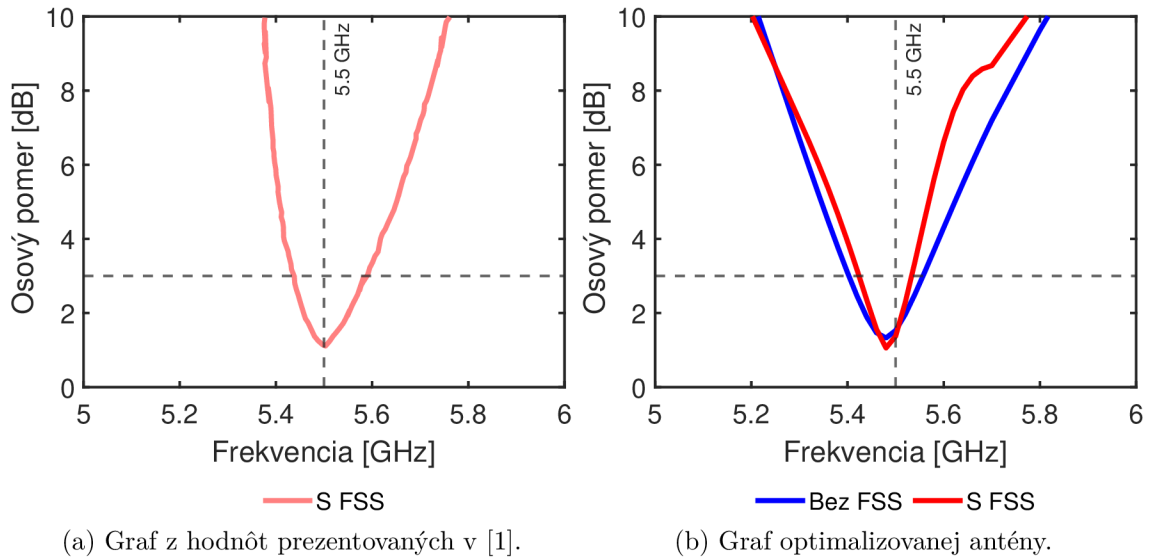


Obr. 2.13: Graf s_{11} optimalizovanej antény.



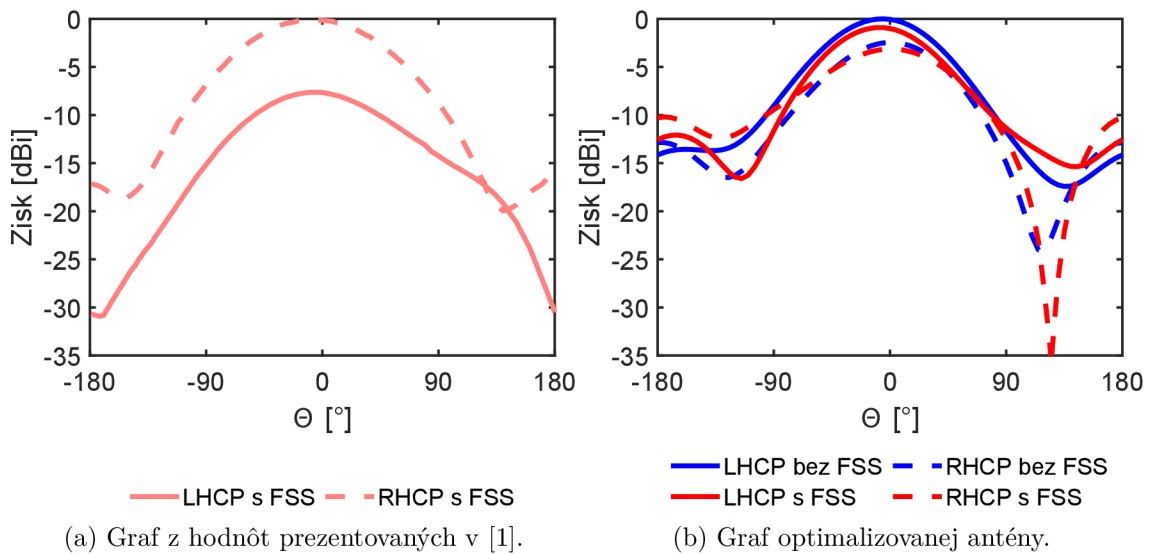
Obr. 2.14: Graf Z optimalizovanej antény.

Ladením sa podarilo osový pomer dostať na hodnotu 1 dB, anténa teda disponuje kruhovou polarizáciou. Šírku pásma, v ktorom sa tak deje, je možné vyčítať z Obr. 2.15. Pre anténu na FSS je teda $B = 130$ MHz a bez neho $B = 170$ MHz. Takýto osový pomer nebolo možné dosiahnuť s pôvodnou anténou prezentovanou v [1].



Obr. 2.15: Graf AR optimalizovanej antény.

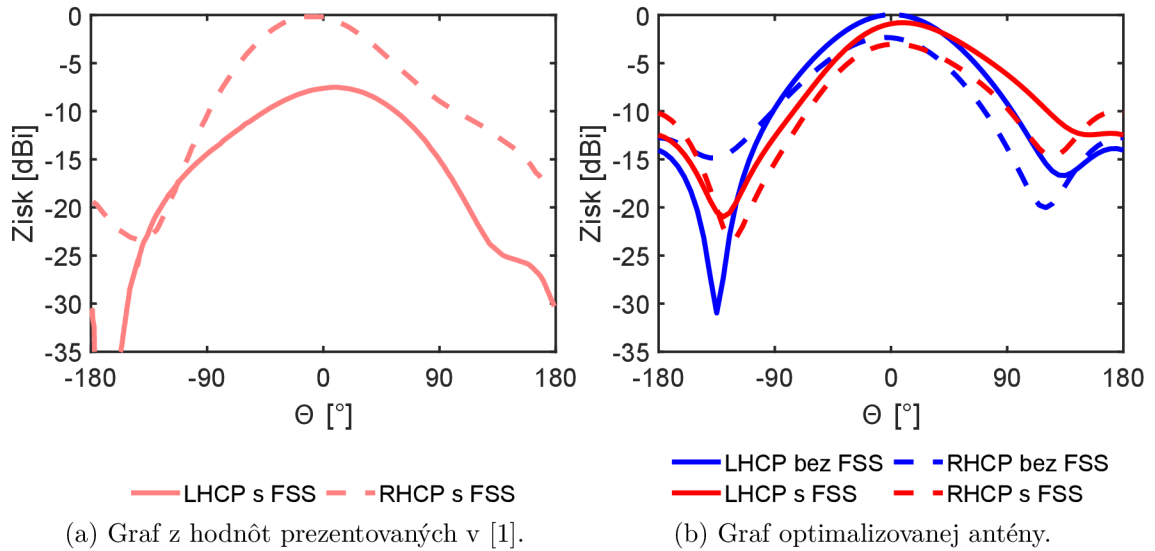
Obr. 2.16 a Obr. 2.17 prezentujú vyžarovacie charakteristiky pre roviny $\phi = 0^\circ$ a $\phi = 90^\circ$, kde LHCP a RHCP znamenajú ľavostrannú, resp. pravostrannú kruhovú polarizáciu (ang. *Left/Right-hand Circular Polarized*).



Obr. 2.16: Vyžarovacia charakteristika pre $\phi = 0^\circ$ optimalizovanej antény.

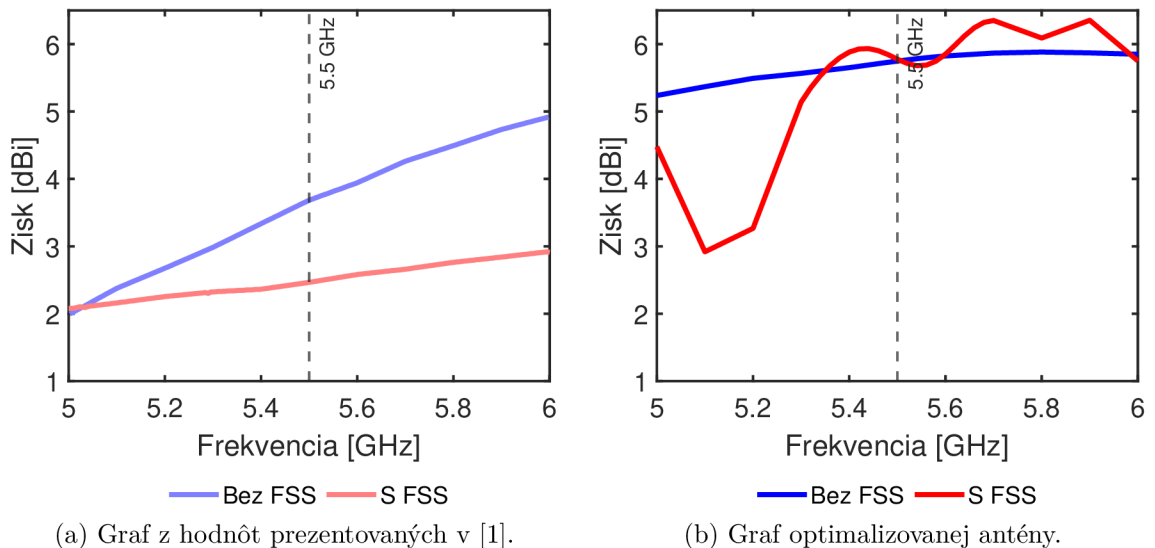
Pre $\theta = 0^\circ$ anténa žiari priamo dohora, teda v smere kolmom na jej plochu. Hovoríme o hlavnom laloku [2]. Z grafov Obr. 2.16 (a) a Obr. 2.17 (a) vidíme, že prezentovaná anténa v [1] disponuje pravostrannou kruhovou polarizáciou (zložka

RHCP je približne o 9 dB väčšia ako LHCP). Nami simulovaná anténa (Obr. 2.16 (b) a Obr. 2.17 (b)) ale má väčšiu zložku LHCP, z čoho vyplýva, že bude ľavostranne kruhovo polarizovaná.



Obr. 2.17: Vyžarovacia charakteristika pre $\phi = 90^\circ$ optimalizovanej antény.

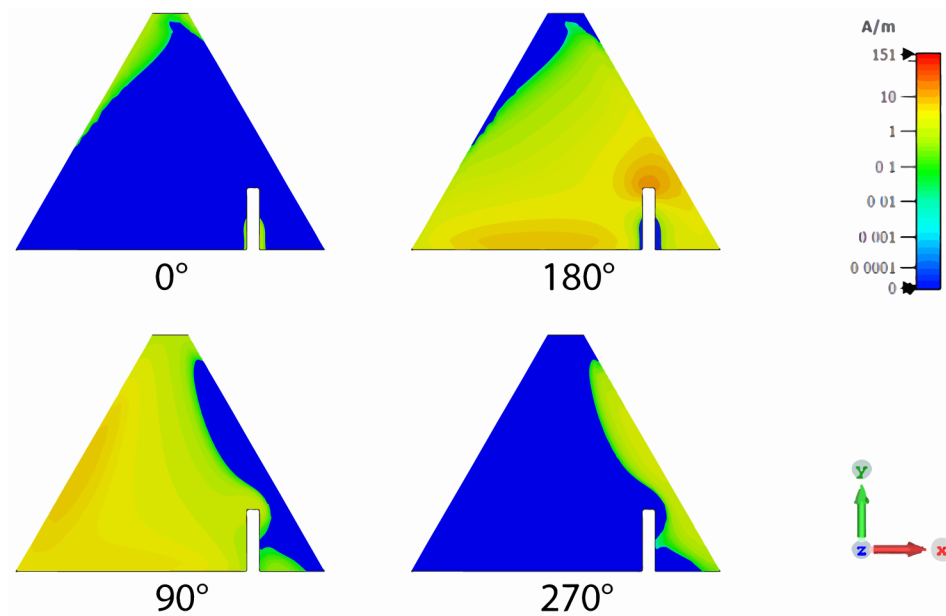
Zisk antény G prezentovaný s FSS a bez FSS v porovnaní so ziskom z článku [1] je na Obr. 2.18. V hlavnom smere žiarenia má simulovaná anténa zisk $G = 5,64$ dBi na frekvencii $f_{rez} = 5,5$ GHz.



Obr. 2.18: Graf zisku G optimalizovanej antény.

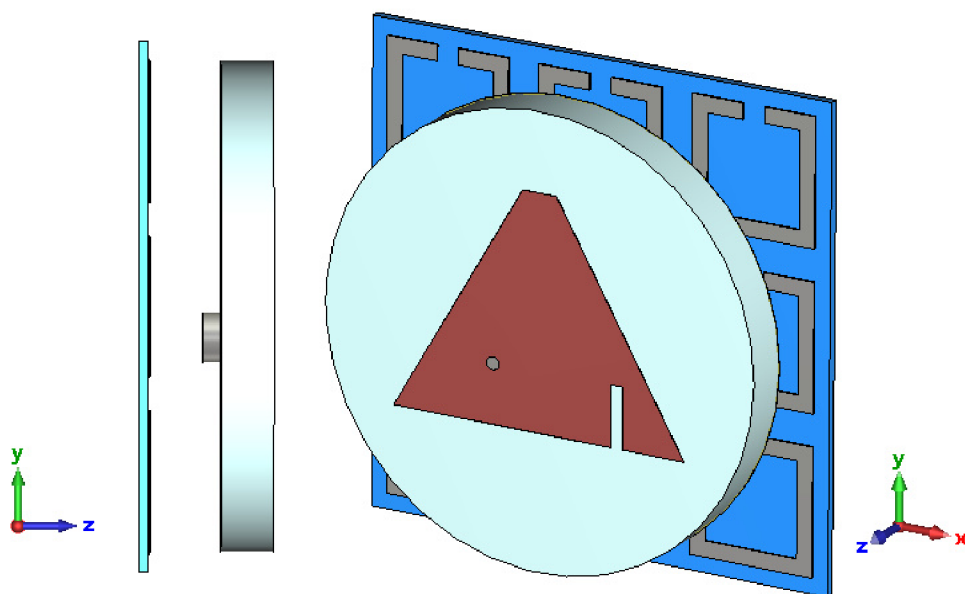
Náš zisk je pochopiteľne väčší, pretože boli vykonané určité zmeny architektúry anténnej štruktúry. FSS v blízkosti antény (v simuláciách 4 mm) jej parametre mierne rozladí. Čím bude FSS bližšie, tým väčšmi bude ovplyvnená jej impedancia. Všetko z vodivého materiálu nachádzajúce sa v blízkosti vplýva na jej parametre. Preto sa môže zdať, že FSS pôsobí kontraproduktívne. Tieto javy sú ale normálne, vrátane zväčšeného zadného laloku. Určité žiarenie dozadu predstavuje aj napájacia koaxiálna sonda. Skutočné správanie bude pozorované s použitím fantómu a počítačím *SAR* - špecifickej miery absorpcie (ang. *Specific Absorption Rate*).

Na Obr. 2.19 vidíme štyri stavy rozloženia tečenia prúdu po povrchu trojuholníka antény.



Obr. 2.19: Ukážka tečenia prúdu po povrchu trojuholníkovej antény.

Konečnú optimalizovanú a funkčnú anténnu štruktúru vidíme na Obr. 2.20. FSS sa nachádza 4 mm pod anténou.



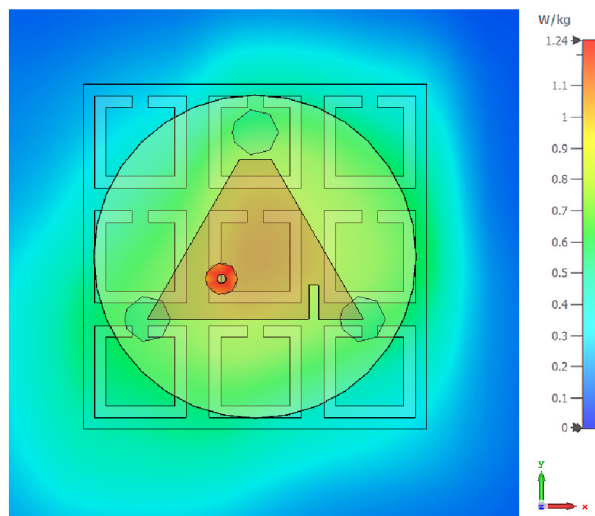
Obr. 2.20: Optimalizovaná anténa štruktúra s použitím FSS.

3 Výroba a merania s fantómom

Úlohou tejto kapitoly je prezentovať funkčnosť a správanie viacerých vyrobených antén v blízkosti ľudského tkaniva. Ako ekvivalentný model tkaniva je použitý gélový fantóm vyrobený zo želatíny - agaru. Antény sa líšia použitým substrátom a malými zmenami rozmerov, vďaka čomu sme dosiahli potrebnú optimalizáciu.

3.1 Simulácia fantómu

Pre jednoduchosť sme sa rozhodli vyrobiť jednovrstvový gélový fantóm z agaru a destilovanej vody. Prvým krokom bolo jeho modelovanie v programe CST a následné simulácie. Pred samotnou výrobou fantómu sme v simulačnom programe CST navyše spočítali fyzikálnu veličinu SAR (špecifická miera absorpcie). Tá popisuje absorpciu elektromagnetického žiarenia, v našom prípade fantómom. Do CST bolo potrebné zadať parametre ako relatívna permitivita ϵ_r , elektrická vodivosť σ a hustota ρ . Na frekvencii $f_{rez} = 5,5$ GHz sme teda simuláciou dostali hodnotu $SAR = 1,25$ W/kg. Podľa normy [43] nesmie SAR level prekročiť hranicu 1,60 W/kg. Naša anténa teda normu bezproblémovo spĺňa. Náhľad na simuláciu a výslednú škálu absorpcie výkonu celej štruktúry poskytuje Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Anténa štruktúra so simuláciou SAR na jednovrstvovom fantóme v programe CST.

Vďaka FSS anténa nežiari neprimeraným výkonom do fantómu. Koaxiálna sonda ale poskytuje elektromagnetickým vlnám možnosť istého úniku (červené miesto pod

anténou). Uvážením tohto dôvodu, a tiež horšej implementácie napr. do odevu, použitie koaxiálnej sondy nie je najpraktickejšie. Lepšou možnosťou by bolo mikropáskové napájacie vedenie či tzv. *SIW* (ang. *substrate-integrated waveguide* - vlnovod integrovaný v substráte).

3.2 Výroba fantómu

Uvažovali sme fantóm s rozmermi $150 \times 150 \times 50$ mm. Z jednoduchého vzťahu sme dostali potrebný objem. Zvolili sme približne 500 g agaru. Z práce [41] môžeme prebrať konštantu 1,333. Jej použitím v nasledujúcom vzorci dostaneme fantóm s relatívnou permitivitou $\epsilon_r = 50$ [-] a elektrickou vodivosťou $\sigma = 7,5$ S/m. Vo vzorci

$$V_{fantom} = 1,333 \cdot agar + agar = 1,333 \cdot 500 + 500 = 1166,5 \text{ ml}, \quad (3.1)$$

kde **agar** znamená hmotnosť agaru v gramoch; sme použitím konštanty **1,333** dostali množstvo potrebnej destilovanej vody v mililitroch, ktorú budeme potrebovať na výrobu fantómu do našej formy. Použili sme teda približne 670 ml destilovanej vody. Tento pomer bolo dôležité zachovať, aby sme dostali fantóm s požadovanými vlastnosťami.

Pri výrobe sme postupovali nasledovne:

1. Použili sme dva hrnce, v spodnom sme varili vodu približne na 90 °C, v hornom najemno nastrúhaný agar (Obr. 3.2 (a)).
2. Po dôkladnom rozpustení celého agaru sme v ďalšom hrnci zohriali odmerané množstvo destilovanej vody. Dôležitým bolo vodu zohriať na teplotu blízku agaru (Obr. 3.2 (b)).
3. Naberačkou sme pomaly prilievali destilovanú vodu do agaru, snažili sme sa vyhnúť tvorbe bubliniek.
4. Zmiešaný horúci fantóm sme do formy nalievali znova naberačkou, absencia bubliniek v tomto kroku je dôležitá, nakoľko ich prítomnosť znehodnocuje výsledné vlastnosti fantómu (Obr. 3.3 (a)).
5. Formu sme ihneď vložili do chladničky a nechali stuhnúť. Tuhnutím pri izbovej teplote sa vyparuje voda a mení pomer agar/voda.
6. Stuhnutý fantóm sme najprv nožom oddelili od formy, čím sme predišli vzniku prasklín.
7. Hotový fantóm s rozmermi $150 \times 150 \times 50$ mm sme zabalili do potravinárskej fólie (Obr. 3.3 (b)) a skladovali v chladničke. Ponechaním v priestore s izbovou teplotou po dlhšiu dobu má za následok vyparovanie vody, a tým zmenu pomeru agar/destilovaná voda. Následkom toho sa mení ϵ_r a σ . Ďalším problémom môže byť vznik húb vo fantóme [41].



(a) Najemno nastrúhaný agar.

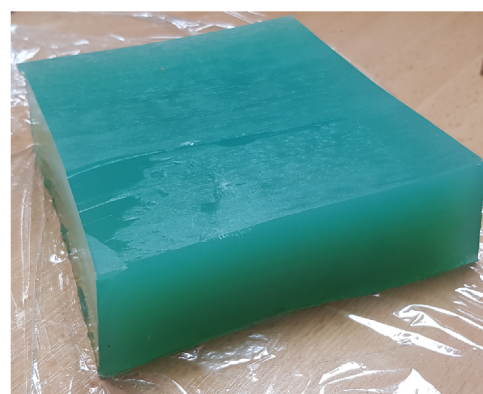


(b) Kontrolovanie teploty agaru.

Obr. 3.2: Varenie agaru.



(a) Horúci fantóm vo forme.

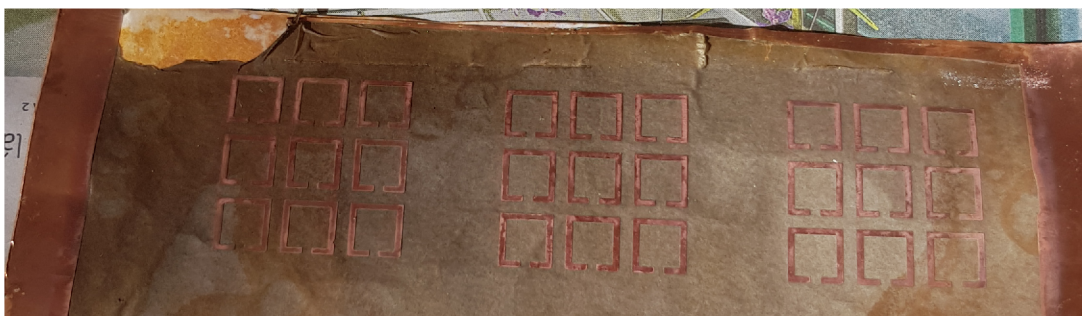


(b) Stuhnutý fantóm.

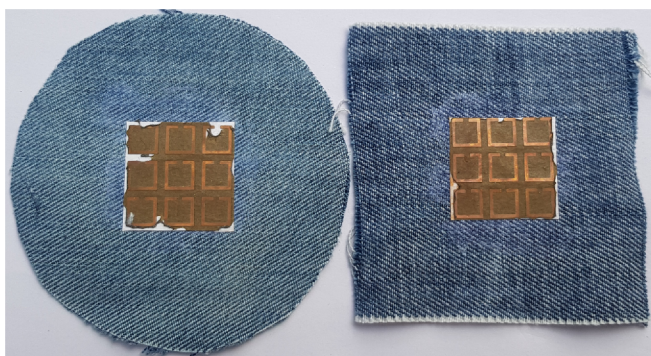
Obr. 3.3: Hotový fantóm.

3.3 Výroba FSS

Frekvenčne selektívny povrch, popísaný v časti 1.5 a jeho simulácie v sekcii 2.3, bol v článku [1] vyrobený na riflovinu. Modelovaný tvar štruktúry bol jednoducho vyleptaný na medenú fóliu (Obr. 3.4 (a)). Následne bol odstrihnutý kus riflovinu, na ktorý bola medená fólia nalepená (Obr. 3.4 (b)). Lepením každého segmentu zvlášť sme neboli schopní zabezpečiť presnosť celej štruktúry, niektoré kusy boli takouto manipuláciou poškodené. Preto bol na riflovinu odstrihnutý a nalepený celý kus papiera s medenými fóliami. Výsledné vlastnosti FSS tým nijak netrpia.



(a) Vyleptaná štruktúra v medenej fólii.



(b) Fólia nalepená na riflovine.

Obr. 3.4: Vyrobený frekvenčne selektívny povrch (FSS) z medenej fólie a rifloviny.

3.4 Materiály na výrobu

Po úspešných simuláciách popísaných v kapitole 2.5 prichádza na rad fyzická realizácia. Článok [1] popisuje anténu na substráte s $\epsilon_r = 2,8$ [-]. Takýto materiál sa nám nepodarilo získať, preto sme skúsili viaceré podobné varianty. Materiály a ich vlastnosti zhŕňa Tab. 3.1. Síce Corkfill má ϵ_r skoro rovnaký ako potrebujeme, výroba substrátu na 3D tlačiarňi bola veľmi obtiažna. Ďalšou nevýhodou sú pomerne vysoké straty. Na druhej strane, materiál XT bol na výrobu bezproblémový. Jeho straty sú omnoho menšie ako pri Corkfille.

Tab. 3.1: Materiály použité na výrobu antén. Hodnoty prebraté z [42].

Názov materiálu	ϵ_r [-]	Hrúbka [mm]	Výroba
Corkfill	2,79	3	3D tlač
XT co-polyester	2,91	3	3D tlač
AD300D	2,94	0,76	Rogers corp.

Najslubnejším bol AD300D, ktorý poskytla spoločnosť Rogers Corporation. Bolo potrebné zlepíť 4 vrstvy tohto materiálu. Na lepenie sme použili špeciálnu obojstrannú 3M lepidlovú fóliu. Dostali sme substrát s hrúbkou $\approx 3,04$ mm. Anténu s najlepšími nameranými parametrami sme zmerali v bezodrazovej komore. Nie všetky javy reálneho sveta je možné simulovať v počítačovom programe, preto nebolo možné použiť hneď prvú vyrobenú anténu. Po skúmaní vlastností prvej nasledovali ďalšie simulácie a pokusy o odstránenie jej nedostatkov. Navrhli sme úpravy, podľa ktorých sme vyhotovili ďalšie kusy antén.

3.5 Merania a výroba antén

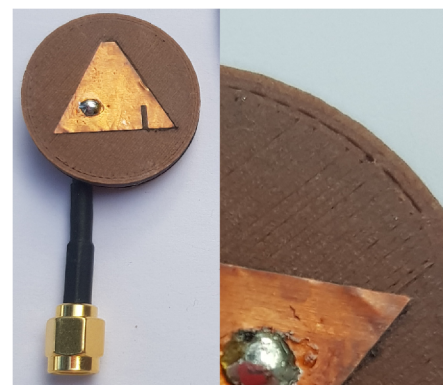
Používali sme vektorový obvodový analyzátor Rohde & Schwarz. Vyrobených bolo niekoľko antén z rôznych materiálov. Použité boli N-konektory aj pozlátené SMA konektory s rôznymi dĺžkami. Uvádzame porovnanie hodnôt, ktoré sme dostali simuláciou, s hodnotami, ktoré sme zmerali na vyrobených anténach. Všetky antény boli ladené a optimalizované s rezonanciou na $f_{rez} = 5,5$ GHz a impedanciou $Z = 50 \Omega$. Impedancia sa v simuláciách nemenila, preto grafy impedancie ďalej neuvádzame.

3.5.1 Corkfill

Bolo potrebné vyrobenie trojuholníka antény a spodnej vrstvy z medených fólií (Obr. 3.5 (a)). Tie boli nalepené na vytlačené substráty. Hlavným problémom tohto materiálu je jeho nekonzistentnosť. Pri 3D tlači vznikali v materiáli malé dierky, ktoré substrát znehodnocujú a elektromagnetické pole deformujú (detail na Obr. 3.5 (b)).



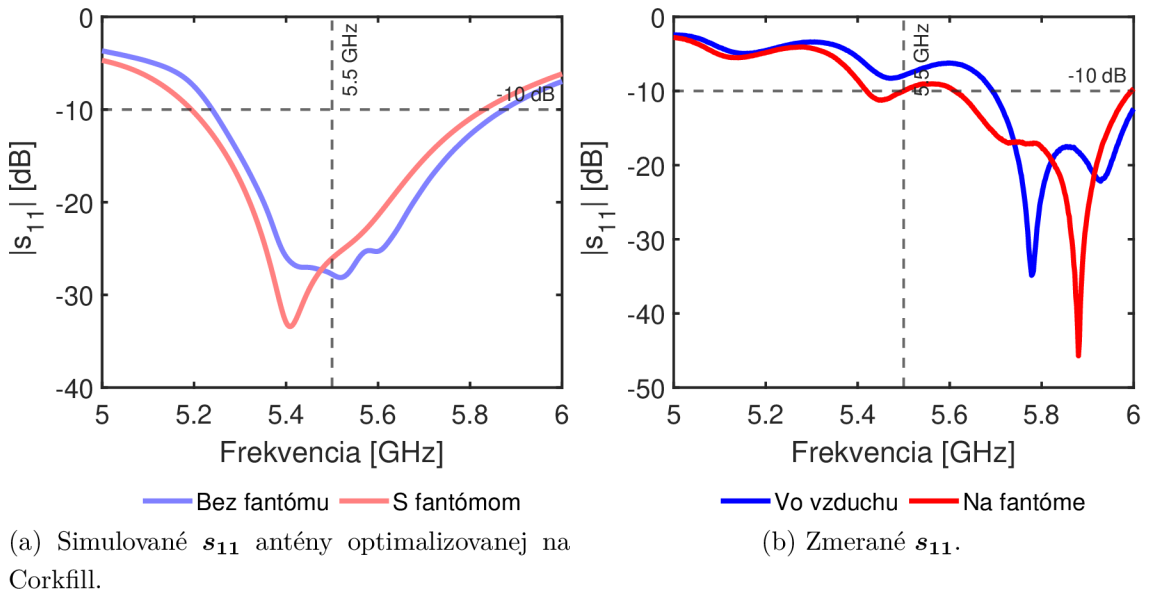
(a) Leptané medené fólie.



(b) Anténa s detailným pohľadom na vzniknuté dierky.

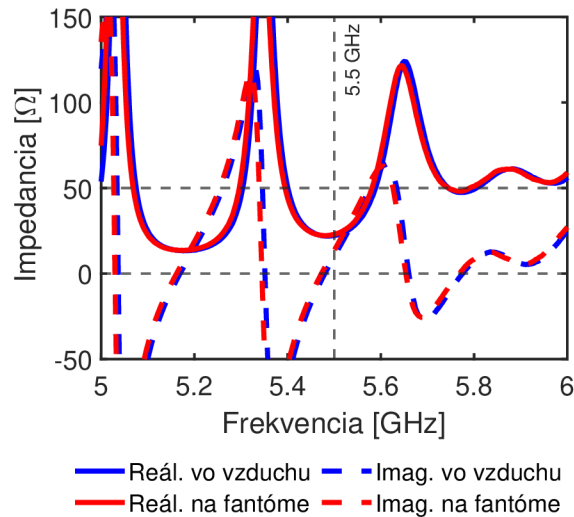
Obr. 3.5: Fotografie výroby antén na substráte z materiálu Corkfill.

Pri lepení fólií vznikali ďalšie problémy, a to presnosť lepenia a prípadné nežiadúce vzájomné pootočenie fólií. Tým sa menila poloha sondy voči vodivým páskam a anténa sa rozlaďovala. Následne sme do substrátu vyvrtali otvor, ktorým sa prestrčil vnútorný vodič koaxiálneho kábla. Tým vzniklo napájanie koaxiálnou sondou (kap. 2.2.5). Najlepšie dosiahnuté výsledky modulu odrazu vyrobenej antény z Corkfillu sa nachádzajú na Obr. 3.6 (b).



Obr. 3.6: Grafy najlepších hodnôt s_{11} pre materiál corkfill.

Dostali sme dve minimá činiteľa odrazu s_{11} , a to na $f_{rez1} = 5,78$ GHz a $f_{rez2} = 5,88$ GHz. Tieto minimá vznikajú vtedy, keď sa dve vybudené vlny nestretnú v jednom mieste [29]. Rezonancia vyrobenej antény bola posunutá o približne 300 MHz. Tento posun je spôsobený nepresným vrtaním dierky a následným umiestnením koaxiálnej sondy. Všimnime si tiež veľké zvlhnenie na Obr. 3.7, ktoré bolo dané dlhým napájacím koaxiálnym káblom. Celkom boli vyrobené tri antény z tohto materiálu, ktorý sa na naše potreby neosvedčil. Kvôli veľkým stratám nie je príliš vhodný ako substrát na výrobu antén. Najlepšie zmerané dáta zhŕňa Tab. 3.2. Farebné rozlíšenie rezonancií v tabulke referuje na grafy s_{11} zmeraných hodnôt.



Obr. 3.7: Impedancia Z zmeraná pre najlepšiu anténu z materiálu Corkfill.

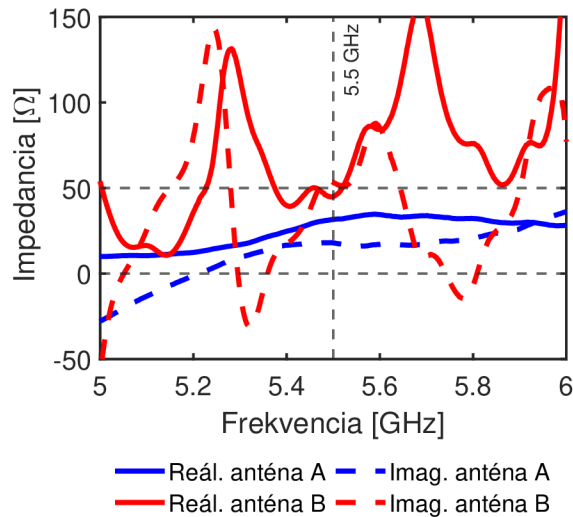
Tab. 3.2: Namerané výsledky pre najlepšiu anténu vyrobenú z Corkfillu.

Rezonancia	$f_{rez1} = 5,78$	$f_{rez2} = 5,88$	GHz
$ s_{11} $	-34	-45	dB
Z	$47-j10$	$60+j12$	Ω

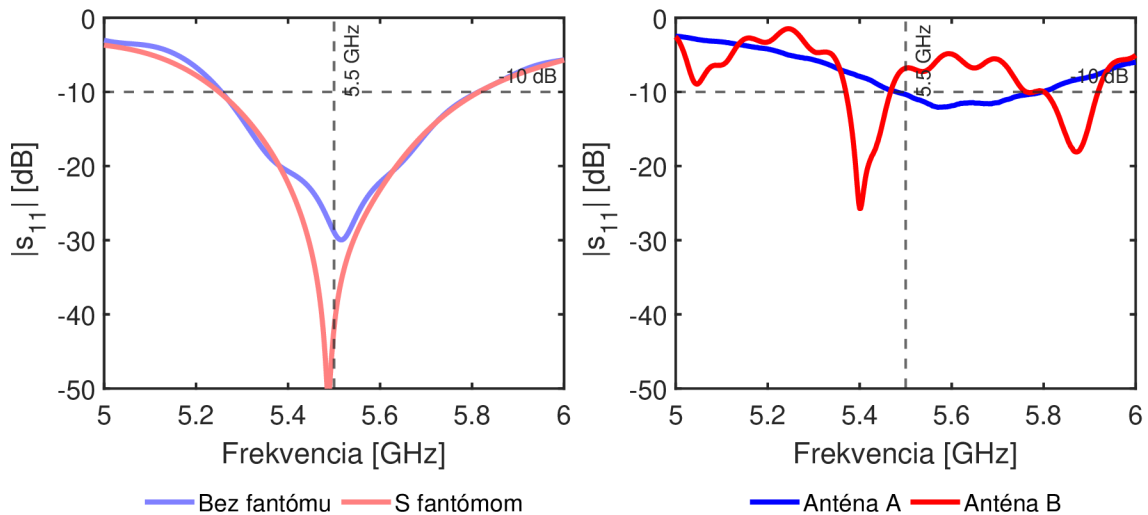
3.5.2 XT co-polyester

Ďalej len XT, je materiál popísaný v [42], ktorý bol použitý na 3D tlač substrátu. ϵ_r každého materiálu má vplyv na vytvorené elektromagnetické pole v okolí antény, preto bola potrebná dodatočná optimalizácia aj pre materiál XT. Postup výroby a lepenia bol zhodný ako pri Corkfille. Jednako problém s presnosťou lepenia vodivých fólií pretrvával. Celkom sme vyrobili päť antén z tohto materiálu. Výroba každého ďalšieho kusu bola podmienená skúmaním výsledkov predošlej vyrobenej antény. Následne boli tieto javy simulované. Na základne výsledkov simulácií boli vyrobené ďalšie, upravené antény.

Zmeraná impedančná charakteristika je na Obr. 3.8. Keďže použitie fantómu nemalo na výsledné charakteristiky významný vplyv, v nasledujúcich grafoch uvádzame len hodnoty s fantómom. Obr. 3.9 (b) zobrazuje zmeraný činiteľ odrazu dvoch antén, ktorých substrát bol XT. Anténa A bola napájaná veľmi krátkym kusom koaxiálneho kábla, ktorý bol zakončený konektorom SMA (Obr. 3.10 (b)).



Obr. 3.8: Impedancie Z zmeraná pre najlepšie antény z materiálu XT.



(a) Simulované s_{11} antény optimalizovanej na XT.

(b) Zmerané s_{11} s fantómom.

Obr. 3.9: Grafy najlepších hodnôt s_{11} pre materiál XT.

Anténa B mala ako koaxiálnu sondu použitý ≈ 15 cm dlhý koaxiálny kábel osadený N-konektorom. Dĺžka kábla mala jednoznačne vplyv na činiteľ odrazu a celkovú funkčnosť antény, ako je možné dedukovať z Obr. 3.9 (b). To malo za následok vzniknuté rezonancie. Kábel sa správal ako samostatný monopól a anténa ako jeho kapacitné zakončenie. Namerané hodnoty prezentovali správanie tohto kábla, nie antény. Zvlnenie činiteľa odrazu s_{11} je teda výsledkom zlého napájacieho koaxiálneho kábla (fotografia Obr. 3.10 (a)).

Výsledné hodnoty najlepších antén uvádzame v Tab. 3.3.



(a) Dlhé napájanie s N-konektorom.



(b) Napájanie veľmi krátkym SMA koax. káblom.

Obr. 3.10: Fotografie antén na substráte XT.

Tab. 3.3: Namerané výsledky pre anténu vyrobenú z XT.

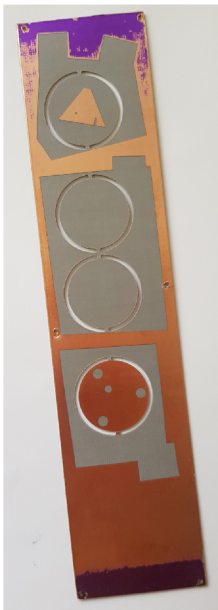
Anténa A	$f_{rez} = 5,65$		GHz
$ s_{11} $	-11,5		dB
Z	$33+j16$		Ω
Anténa B	$f_{rez1} = 5,35$	$f_{rez2} = 5,82$	GHz
$ s_{11} $	-21	-14	dB
Z	$65-j2$	$73+j3$	Ω

3.5.3 AD300D

Substrát Rogers AD300D bol najslubnejším, nakoľko bolo možné, narozdiel od Corkfillu a XT, štruktúru antény vyleptať priamo naň. Tým sme odstránili problém s nepresným lepením a pootočením, ale hlavne problém s nepresným umiestnením sondy. Tieto nedokonalosti výroby mali na výsledné vlastnosti antény najväčší vplyv. AD300D disponuje malými stratami a stabilným ϵ_r . V CST sme anténu museli najprv optimalizovať, aby rezonovala na požadovanej frekvencii. Substrát má

hrúbku 0,76 mm, je potiahnutý meďou z oboch strán. Pri výrobe sme postupovali nasledovne:

1. Najskôr bolo potrebné meď na dvoch kusoch odleptať z oboch strán, na ďalších dvoch vytvoriť simulovaný model.
2. Tieto štyri kusy, dva bez medi (holý substrát na oboch stranách) a dva s navrhnutou anténou (trojuholník a zemniaca plocha) bolo potrebné z materiálu frézou vyrezať (Obr. 3.11 (a)).
3. Tieto štyri kusy sme zlepili obojstrannou lepiacou fóliou (Obr. 3.11 (b)).
4. Nakoniec sme vyvrtali otvor pre koaxiálnu sondu.



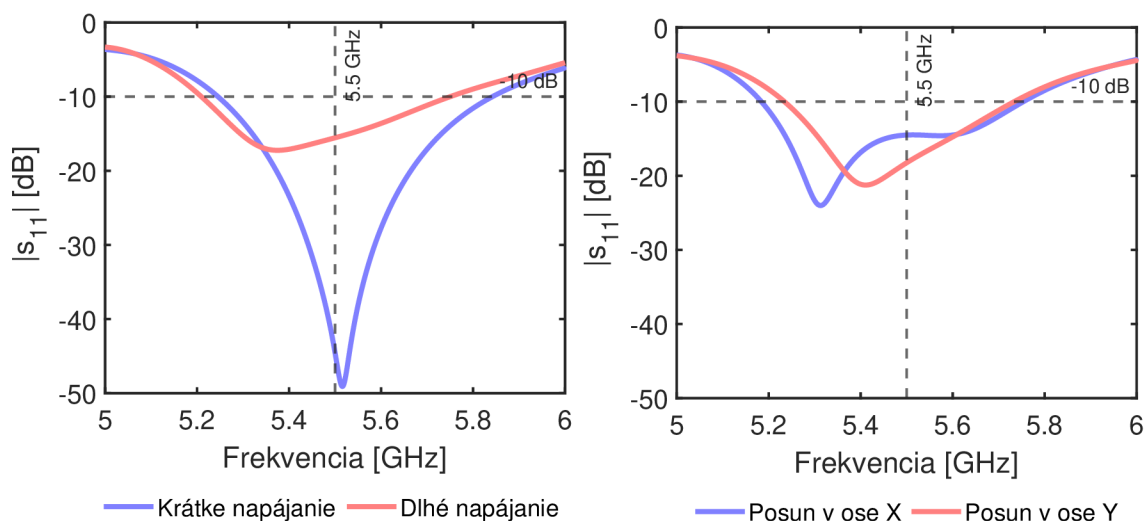
(a) Štyri odleptané a frézované kusy materiálu.



(b) Lepenie štyroch kusov materiálu obojstrannou fóliou 3M.

Obr. 3.11: Ukážka výroby a postupu pri pracovaní so substrátom Rogers AD300D.

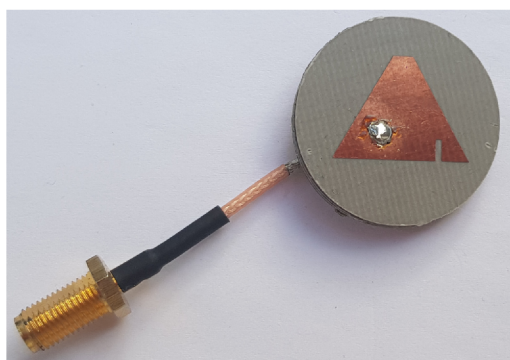
Problém s natočením hornej a spodnej vrstvy bol omnoho lepšie kontrolovateľný, no nebolo možné na túto skutočnosť úplne zabudnúť. Isté ťažko predvídateľné vplyvy mal aj spôsob prispájkovania sondy k vodivým častiam antény. Na presnej polohe sondy v simuláciách závisela ako rezonančná frekvencia (Obr. 3.12 (b)), tak impedancia či osový pomer. Vychýlenie už o 0,5 mm malo za následok rozladenie antény. Týmto vplyvom sa pri výrobe na našej úrovni, žiaľ, vyhnúť nedá. Koaxiálne sondy s dlhým vedením sa správali ako monopól, preto sme použili už iba veľmi krátke (≈ 2 cm) koaxiálne vedenia s SMA konektormi. Obr. 3.12 (a) ešte raz simuláciou zobrazuje anténnu štruktúru v blízkosti fantómu pre modely dlhého aj krátkeho napájania.



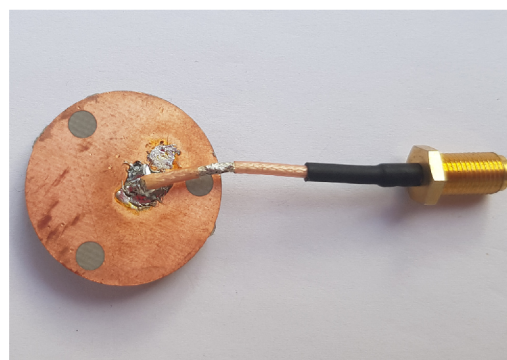
(a) Vplyv dĺžky kábla na modul s_{11} antény optimalizovanej na AD300D. (b) Vplyv posunu sondy o 0,5 mm na modul s_{11} .

Obr. 3.12: Vplyv zmeny dĺžky napájania a posunu polohy sondy na modul s_{11} antény na substrátu Rogers AD300D.

Impedančné charakteristiky znova nie je potrebné uvádzať, antény boli optimalizované na $Z = 50 \Omega$. Fotografie hotovej funkčnej antény sa nachádzajú na Obr. 3.13.



(a) Horná strana.

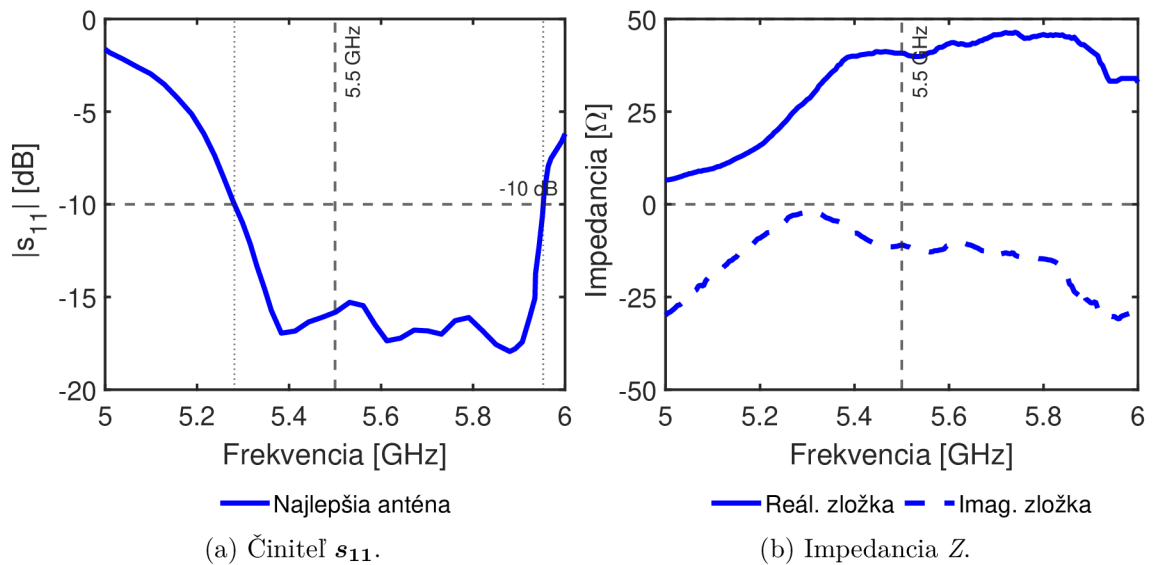


(b) Spodná strana s SMA konektorom.

Obr. 3.13: Fotografie hotovej antény z Rogers AD300D, ktorá bola meraná v komore.

Zo substrátu AD300D sme vyrobili celkom tri antény. Skúšali sme rôzne úpravy, napríklad iné spôsoby spájkovanie sondy alebo úplné vynechanie DGS (sekcia 2.2.6) z antény - sledovali sme dopady týchto zmien na výsledné vlastnosti. Činiteľ odrazu s_{11} a impedancia Z najlepšej z nich sú vynesené v grafoch na Obr. 3.14. Vplyv

fantómu bol minimálny, preto sú prezentované len výsledky s jeho použitím. Táto anténa bola neskôr použitá pre merania v bezodrazovej komore.



Obr. 3.14: Grafy modulu s_{11} a impdenacie Z pre najlepšiu vyrobenú anténu na Rogers AD300D.

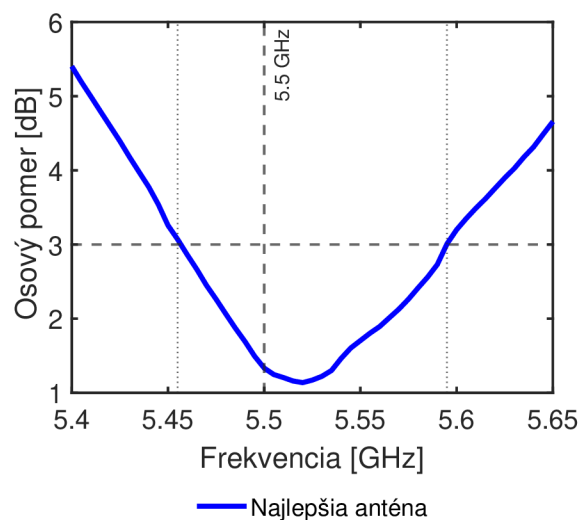
3.6 Meranie v bezodrazovej komore

Anténa, ktorej vlastnosti zmerané na vektorom analyzátoe boli najlepšie, bola umiestnená v bezodrazovej komore, kde bol zmeraný osový pomer a vyžarovacie charakteristiky a spočítaný zisk. Graf osového pomeru ukazuje Obr. 3.15. V pásme ≈ 150 MHz AR dosahoval hodnoty menšie ako 3 dB, to znamená, že v tomto pásme je anténa kruhovo polarizovaná.

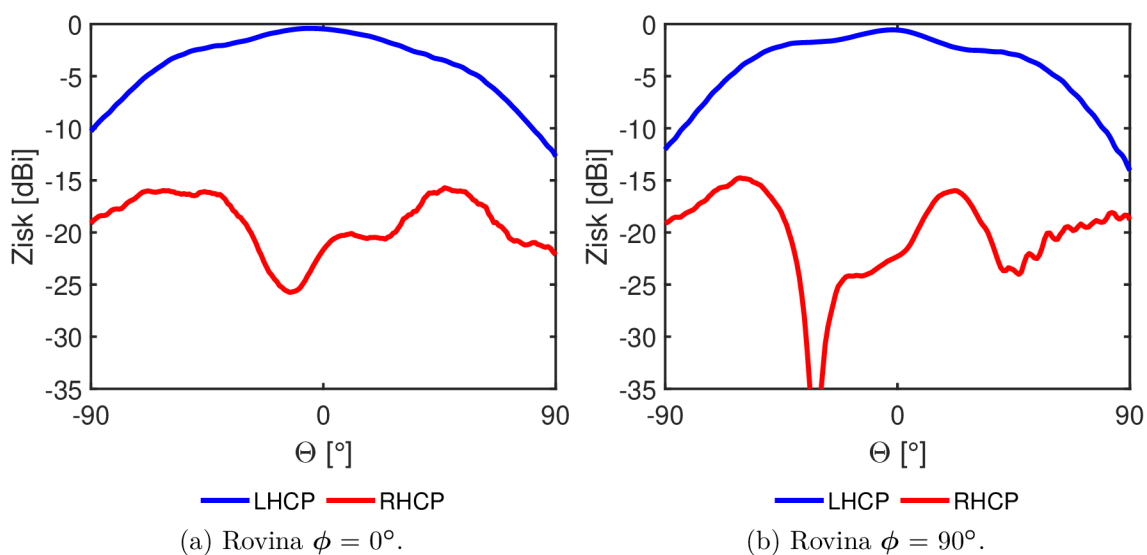
Ďalej sme merali vyžarovacie charakteristiky tejto antény. Tie nám poskytnú informáciu o smerovosti. Z Obr. 3.16 vidíme, že vyrobená anténa je lavostranne polarizovaná. Zložka LHCP v oboch rovinách prevyšuje zložku RHCP o približne 8 dB. To svedčí o celkovej pozitívnej kvalite polarizácie tejto antény.

Zisk G v hlavnom laloku sme boli schopní spočítať vďaka meraniam v komore na $G = 5,60$ dBi na rezonančnej frekvencii $f_{rez} = 5,50$ GHz.

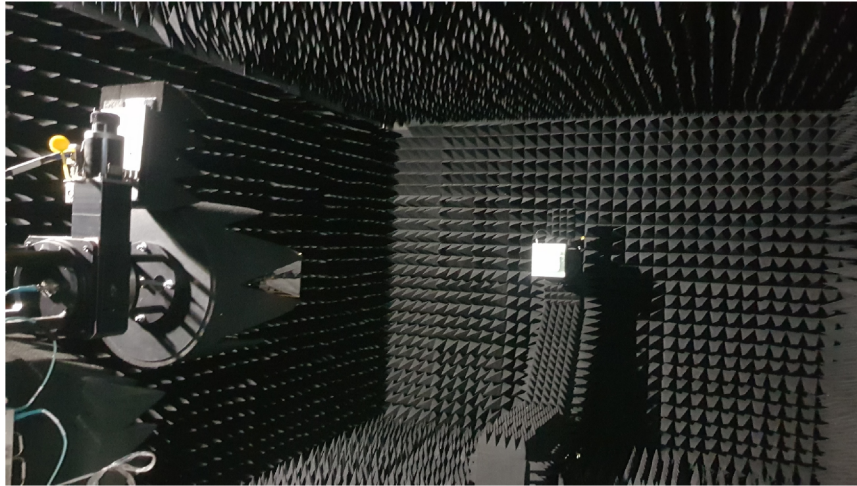
Na Obr. 3.17 je možné vidieť ako meranie v komore prebiehalo. Anténa bola položená na FSS a fantóme, celý tento model bol následne upevnený na držiak v komore.



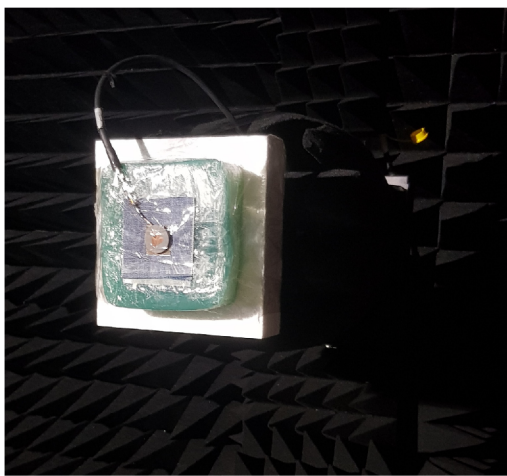
Obr. 3.15: Graf nameraných hodnôt osového pomeru pre najlepšiu anténu na Rogers AD300D.



Obr. 3.16: Vyžarovacie charakteristiky v dvoch rovinách pre najlepšiu anténu na Rogers AD300D.



(a) Umiestnenie v bezodrazovej komore.



(b) Prichytenie antény na držiaku.



(c) Anténa s FSS umiestnená na fantóme.

Obr. 3.17: Fotografie z merania v bezodrazovej komore v budove FEKT VUT T12 (UREL, 6. poschodie).

3.7 Diskusia o získaných výsledkoch

Článok [1] tvrdí, že použitým materiálom na výrobu substrátu pre anténu bol akryl s $\epsilon_r = 2,8$. Tento materiál pre nás dostupným nebol, preto sme vybrali 3 dostupné s podobnými vlastnosťami. Materiály sa líšili hlavne v relatívnej primitivite a stratách. Pre každý jeden materiál bolo preto nutné simuláciami každú antén zvlášť optimalizovať, aby disponovala požadovanými vlastnosťami. V reálnom prostredí vždy pôsobí množstvo nežiadúcich aspektov, preto nemôžeme očakávať, že zmerané výsledky budú vždy rovnaké ako simulované.

Prvým materiálom bol Corkfill, ide o mix plastu PLA (Poly Lactic Acid) a korku [42]. Substrát bol vytvorený použitím 3D tlačiarne. Príčinou tejto výrobnéj technológie bol vznik malých dierok v substráte. Hlavným problémom bolo presné nalepenie vodivých fólií a ich vzájomné nežiadúce pootočené. Tým vznikol ďalší problém, a to vŕtanie dierky na napájaciu koaxiálnu sondu. Simulácie posunu naznačujú veľkú citlivosť na presnú polohu. Posunutie rezonančnej frekvencie voči simuláciám bolo spôsobené týmto posunutím sondy a následným rozladením vzniknutých elektromagnetických vln. Materiál disponuje pomerne veľkými stratami [42], a preto nie je optimálny na výrobu substrátov antén. Veľké straty majú za následok pohlcovanie energie, čo vedie k zlej efektívnosti antény.

Druhým použitým bol materiál XT co-polyester. Jeho straty boli výrazne menšie ako straty Corkfillu [42]. Pri výrobe nevznikali žiadne veľké ťažkosti. Nakoľko bol spôsob lepenia a vŕtania totožný s materiálom Corkfill, problém s presnosťou pretrvával. Porovnaním simulovaných a nameraných výsledkov sme dospeli k záveru, že napájacie vedenie musí byť čo najkratšie. Preto sme už nepoužívali dlhšie koaxiálne vedenia s N-konektormi, ale nahradili sme ich veľmi krátkymi kusmi s SMA konektormi.

Hlavné problémy s predošlými dvoma materiálmi minimalizoval AD300D od spoločnosti Rogers. Navrhnutý a optimalizovaný model vodivých častí antén bolo možné priamo vyleptať na substrát. Aby sme dosiahli požadovanú hrúbku substrátu 3 mm, bolo potrebné zlepíť štyri vrstvy tohto materiálu. Vŕtanie dierky pre sondu už zďaleka nebolo také problematické, ako pri predošlých dvoch materiáloch.

Celkom sme vyrobili jedenásť antén, z toho len tri boli plne funkčné a zodpovedali simulovaným a navrhnutým proporciám. Výsledky všetkých najlepších antén, ktoré sme v práci vyrobili, prezentovali a simulovali, sumarizuje a porovnáva Tab. 3.4.

Tab. 3.4: Porovnanie všetkých najlepších vyrobených antén s anténou z článku [1].

Výsledky prezentované článkom			
Veličina	Simulované	Zmerané	Jednotka
f_{rez}	5,51	5,48	GHz
$ s_{11} $	-16	-16	dB
Z	55+j5	-	Ω
AR	1,1	1,1	dB
G	2,4	3,6	dB <i>i</i>
B_{kruh}	150	140	MHz
Polarizácia	pravostranná	pravostranná	-

Najlepšie nami dosiahnuté výsledky			
Materiál	Simulované	Zmerané	Jednotka
Corkfill			
f_{rez}	5,41	5,88	GHz
$ s_{11} $	-33	-45	dB
Z	48-j1	61+j7	Ω
AR	2,1	-	dB
G	5,9	-	dB <i>i</i>
B_{kruh}	180	-	MHz
XT			
f_{rez}	5,49	5,57	GHz
$ s_{11} $	-51	-12	dB
Z	50+j0	55-j3	Ω
AR	2,1	-	dB
G	5,8	-	dB <i>i</i>
B_{kruh}	105	-	MHz
AD300D			
f_{rez}	5,51	5,51	GHz
$ s_{11} $	-36	-16	dB
Z	51-j1	41-j11	Ω
AR	1,2	1,3	dB
G	6,8	5,6	dB <i>i</i>
B_{kruh}	161	145	MHz
Polarizácia	ľavostranná	ľavostranná	-

Záver

Táto práca bola zameraná na kruhovo polarizovanú gombíkovú anténu umiestnenú na frekvenčne selektívnom povrchu. Koncept anténnej sústavy bol spolu s dosiahnutými výsledkami publikovanými v článku [1]. Štruktúru sme namodelovali v simulačnom programe CST Studio Suite a vytvorili sme jej numerický model. Každú časť antény sme modelovali dôkladne použitím parametrov. Správanie antény sme simulovali a pozorovali získané výsledky, ktoré sme porovnali s výsledkami z [1] a s tými, ktoré sme dostali našimi meraniami. Podľa známych teórií sme navrhli postupy optimalizácie a úpravy, ktorými sme dosiahli požadované výsledky. Analýzou sme realizovateľnosť antény potvrdili.

Simuláciami sme dokázali, že pôvodná anténna sústava s rezonančnou frekvenciou 5,51 GHz bude mať vstupnú impedanciu $Z \approx (50+j0) \Omega$, avšak podmienka kruhovej polarizácie na tejto frekvencii splnená nebude. Preto boli navrhnuté optimalizácie ako zväčšenie hrany trojuholníka antény, zmena veľkostí zárezu a zrezanie rohu. Tým sme splnili požiadavky, ktoré boli v [1] na celú anténnu štruktúru kladené. Na rezonančnej frekvencii sme simuláciou dosiahli požadovanú impedanciu, rovnako sme splnili podmienku kruhovej polarizácie, dosiahli zisk G lepší o 2,2 dBi a tiež zaistili potrebnú smerovosť. Výsledky sú prezentované grafmi a tabuľkami, ktoré ich porovnávajú s publikovanými v [1]. Výslednú celú optimalizovanú simulovanú anténnu štruktúru s FSS zobrazuje Obr. 2.20.

Druhou časťou práce bola fyzická výroba antény, FSS a fantómu. Po výrobe sme previedli merania na overenie správnosti simulovaných výsledkov. Štruktúra FSS bola vyleptaná na medenej fólii a nalepená na kus rifloviny. Pri výrobe fantómu bolo dôležité kontrolovať teplotu, aby jeho výsledné vlastnosti neboli degradované. Pre nedostupnosť materiálu z [1] na výrobu substrátu sme použili iné tri nám dostupné materiály. Po výrobe prvých kusov antén a zmeraní ich vlastností boli našej kroky smerované k ďalším potrebným úpravám a optimalizáciám. Až na fyzických modeloch antén sa prejavili parazitné, sotva modelovateľné javy, ktoré bolo potrebné dodatočnými úpravami eliminovať. Jedným z problémov je práca implementácia napájania koaxiálnou sondou. Bolo by preto vhodné nahradiť napájanie antény iným typom, napríklad použitím mikropáskového vedenia alebo vytvorením vlnovodu priamo do substrátu antény - SIW. Finálna anténa bola spolu s FSS a fantómom umiestnená v bezodrazovej komore. Takýmto meraním sme dostali zisk, osový pomer a vyžarovacie charakteristiky. Vyrobili sme funkčnú anténu s rezonančnou frekvenciou $f_{rez} = 5,51$ GHz, činiteľom odrazu $|s_{11}| = -16$ dB, impedanciou $Z = 41-j11 \Omega$, osovým pomerom $AR = 1,3$ dB, ziskom $G = 5,6$ dBi a so šírkou pásma $B = 145$ MHz, v ktorej je ľavostranne kruhovo polarizovaná.

Literatúra

- [1] B. Mandal, A. Chatterjee, P. Rangaiah, M. D. Perez, a R. Augustine, “A Low Profile Button Antenna with Back Radiation Reduced By FSS”, v 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), mar. 2020, s. 1–5. doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135328.
- [2] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3. vyd. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2005.
- [3] K. Yang, G. David, J.-G. Yook, I. Papapolymerou, L. P. B. Katehi, a J. F. Whitaker, “Electrooptic mapping and finite-element modeling of the near-field pattern of a microstrip patch antenna”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, roč. 48, č. 2, s. 288–294, feb. 2000, doi: 10.1109/22.821779.
- [4] P. Bevelacqua, “Antenna Arrays”, *Antenna-Theory.com*. <<https://www.antenna-theory.com/arrays/main.php>> (cit. 16. máj 2022).
- [5] Y.-H. Suh a K. Chang, “Low cost microstrip-fed dual frequency printed dipole antenna for wireless communications”, *Electronics Letters*, roč. 36, č. 14, s. 1177–1179, júl. 2000, doi: 10.1049/el:20000880.
- [6] P. Bevelacqua, “Microstrip Antennas: The Patch Antenna”, *Antenna-Theory.com*. <<https://www.antenna-theory.com/antennas/patches/antenna.php>> (cit. 16. máj 2022).
- [7] C. Hertleer, L. Van Langenhove, a H. Rogier, “Textile-based Antennas for Off-Body Communication”, *Research Journal of Textile and Apparel*, roč. 14, č. 4, s. 38–47, jan. 2010, doi: 10.1108/RJTA-14-04-2010-B004.
- [8] P. A. Laplante, M. Kassab, N. L. Laplante, a J. M. Voas, “Building Caring Healthcare Systems in the Internet of Things”, *IEEE Systems Journal*, roč. 12, č. 3, s. 3030–3037, sep. 2018, doi: 10.1109/JSYST.2017.2662602.
- [9] D. Hendricks, “The Trouble with the Internet of Things – London Datastore”. <<https://data.london.gov.uk/blog/the-trouble-with-the-internet-of-things/>> (cit. 16. máj 2022).
- [10] M. H. Tsoi a S. W. Y. Mung, *Planar Antenna Design for Internet of Things Applications*. IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.92456.
- [11] S. Maity, M. Nath, G. Bhattacharya, B. Chatterjee, a S. Sen, “On the Safety of Human Body Communication”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, roč. 67, č. 12, s. 3392–3402, dec. 2020, doi: 10.1109/TBME.2020.2986464.

- [12] E. Jovanov, A. Milenkovic, C. Otto, a P. C. de Groen, “A wireless body area network of intelligent motion sensors for computer assisted physical rehabilitation”, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, roč. 2, č. 1, s. 6, mar. 2005, doi: 10.1186/1743-0003-2-6.
- [13] S. H. Zainud-Deen, K. R. Mahmoud, A. A. M. Shaalan, a S. M. M. Ibrahim, “Analysis of multifilar-curl antenna without ground plane”, v 2002 9th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics, júl. 2002, s. 1–4.
- [14] M. Kanesan, D. V. Thiel, A. Galehdar, a S. G. O’Keefe, “Rapid analysis and optimization of planar Yagi-Uda dipole arrays printed on a dielectric substrate”, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, roč. 24, č. 2, s. 184–190, 2014, doi: 10.1002/mmce.20747.
- [15] Z. N. Chen, M. J. Ammann, Q. Xianming, X. Wu, T. See, a A. Cat, “Planar antennas”, *Microwave Magazine, IEEE*, roč. 7, s. 63–73, jan. 2007, doi: 10.1109/MW-M.2006.250315.
- [16] N. Kumprasert a W. Kiranon, “Simple and accurate formula for the resonant frequency of the equilateral triangular microstrip patch antenna”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, roč. 42, č. 8, s. 1178–1179, aug. 1994, doi: 10.1109/8.310011.
- [17] Z. Raida a spol., “Multimediální učebnice: Elektromagnetické vlny, Mikrovlnná technika”. <<https://www.radio.feec.vutbr.cz/raida/multimedia/index.php>> (cit. 16. máj 2022).
- [18] W. Menzel a W. Grabherr, “A microstrip patch antenna with coplanar feed line”, *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, roč. 1, č. 11, s. 340–342, nov. 1991, doi: 10.1109/75.93905.
- [19] S. Peng a H. Zheng, “Design of Coplanar-Waveguide-Feed Antenna”, *International Journal of Engineering Research & Technology*, roč. 4, č. 7, júl. 2015. <<https://www.ijert.org/design-of-coplanar-waveguide-feed-antenna>> (cit. 16. máj 2022).
- [20] J. D. Kraus, *Electromagnetics*, 4. vyd. USA: McGraw-Hill Education, 1992.
- [21] O. Beierl, R. Brocke, a M. Hannig, “Effectiveness of low-impedance down-conductors”, v 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), okt. 2017, s. 103–109. doi: 10.1109/SIPDA.2017.8116907.

- [22] D. Su, S. Xie, F. Dai, Y. Liu, a Y. Jia, Theory and methods of quantification design on system-level electromagnetic compatibility. Singapore: Springer, 2019.
- [23] Z. Konečná a P. Žák, “Changes of Electrical Properties of Coaxial Cables Exposed to Gamma-irradiation”, v 2018 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics), sep. 2018, s. 1–4. doi: 10.1109/DIAGNOSTIKA.2018.8526027.
- [24] M. Lauridsen, L. C. Gimenez, I. Rodriguez, T. B. Sorensen, a P. Mogensen, “From LTE to 5G for Connected Mobility”, IEEE Communications Magazine, roč. 55, č. 3, s. 156–162, mar. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600778CM.
- [25] P. Bevelacqua, “S-Parameters for Antennas (S11, S12, ...)”, Antenna-Theory.com. <<https://www.antenna-theory.com/definitions/sparameters.php>> (cit. 16. máj 2022).
- [26] P. Bevelacqua, “Antenna Definitions - Intrinsic Impedance”, Antenna-Theory.com. <<https://www.antenna-theory.com/definitions/intrinsicimpedance.php>> (cit. 16. máj 2022).
- [27] “IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas”, IEEE No 145-1973, s. 1–18, aug. 1973, doi: 10.1109/IEEESTD.1973.7366738.
- [28] P. Bevelacqua, “Antenna-Theory.com - Fractional Bandwidth”, Antenna-Theory.com. <<https://www.antenna-theory.com/definitions/fractionalBW.php>> (cit. 16. máj 2022).
- [29] P. Bevelacqua, “Wave Polarization and Antenna Polarization”, Antenna-Theory.com. <<https://www.antenna-theory.com/basics/polarization.php>> (cit. 16. máj 2022).
- [30] Y. Fan, X. Liu, J. Li, a T. Chang, “A Miniaturized Circularly-Polarized Antenna for In-Body Wireless Communications”, Micromachines, roč. 10, č. 1, Art. č. 1, jan. 2019, doi: 10.3390/mi10010070.
- [31] P. Bevelacqua, “Antenna-Theory.com - Axial Ratio”, Antenna-Theory.com. <<https://www.antenna-theory.com/definitions/axial.php>> (cit. 16. máj 2022).
- [32] R. F. Harrington, Time-harmonic electromagnetic fields. NY: IEEE Press, 2001.
- [33] R. S. Anwar, L. Mao, a H. Ning, “Frequency Selective Surfaces: A Review”, Applied Sciences, roč. 8, č. 9, Art. č. 9, sep. 2018, doi: 10.3390/app8091689.

- [34] T.-K. Wu, “Frequency Selective Surfaces”, v Encyclopedia of RF and Microwave Engineering, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005. doi: 10.1002/0471654507.emel133.
- [35] R. V. Nee, “Breaking the Gigabit-per-second barrier with 802.11AC”, IEEE Wireless Communications, roč. 18, č. 2, s. 4–4, apr. 2011, doi: 10.1109/MWC.2011.5751287.
- [36] J. Singh, T. Singh, a B. S. Sohi, “Design of slit loaded rectangular microstrip patch antenna”, v 2015 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering Computational Sciences (RAECS), dec. 2015, s. 1–5. doi: 10.1109/RAECS.2015.7453359.
- [37] W. Deal, V. Radisic, Y. Qian, a T. Itoh, “Microwave Active Circuits and Integrated Antennas”, v The Electrical Engineering Handbook, 2005, s. 691–706. doi: 10.1016/B978-012170960-0/50048-7.
- [38] M. K. Khandelwal, B. K. Kanaujia, a S. Kumar, “Defected Ground Structure: Fundamentals, Analysis, and Applications in Modern Wireless Trends”, International Journal of Antennas and Propagation, roč. 2017, s. e2018527, feb. 2017, doi: 10.1155/2017/2018527.
- [39] S. Verma, J. A. Ansari, a A. Singh, “Truncated Equilateral Triangular Microstrip Antenna With and Without Superstrate”, Wireless Pers Commun, roč. 95, č. 2, s. 873–889, júl. 2017, doi: 10.1007/s11277-016-3803-x.
- [40] A. V. Doshi, A. A. Deshmukh, S. B. Deshmukh, a K. P. Ray, “Slot Cut Modified Triangular Shape Microstrip Antenna for Circular Polarization”, v 2019 National Conference on Communications (NCC), feb. 2019, s. 1–6. doi: 10.1109/NCC.2019.8732180.
- [41] J. Láčik, “Fantomy”, v Elektromagnetické struktury v blízkosti živých tkání, Brno, CZ: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Technická 10, 616 00, 2016.
- [42] J. Zechmeister a J. Lacik, “Complex Relative Permittivity Measurement of Selected 3D-Printed Materials up to 10 GHz”, v 2019 Conference on Microwave Techniques (COMITE), apr. 2019, s. 1–4. doi: 10.1109/COMITE.2019.8733590.
- [43] “Specific Absorption Rate (SAR) for Cellular Telephones”, Federal Communications Commission, 19. júl 2011. <<https://www.fcc.gov/general/specific-absorption-rate-sar-cellular-telephones> (cit. 27. máj 2022).

Zoznam symbolov a skratiek

FSS	frekvenčne selektívny povrch
IoT	internet vecí - Internet of Things
GP	zemniaca plocha - ground plane
ϵ_r	dielektrická konštanta
λ	vlnová dĺžka
c	rýchlosť svetla
f	frekvencia
f_{rez}	rezonančná frekvencia
f_{min}	minimálna frekvencia
f_{max}	maximálna frekvencia
f_i	poradové číslo frekvencie
$f_{\lambda/2}$	polovlnová frekvencia
Z	impedancia
Z_{real}	reálna zložka impedancie
Z_{imag}	imaginárna zložka impedancie
Y	admitancia
s_{11}	činiteľ odrazu
$ s_{11} $	modul činiteľa odrazu
s_{21}	činiteľ prenosu
$ s_{21} $	modul činiteľa prenosu
η	účinnosť
G	zisk
B	šírka pásma
B_{kruh}	šírka pásma kruhovej polarizácie

AR	osový pomer - axial ratio
SAR	špecifická miera absorpcie - Specific Absorption Rate
HBC	komunikácia ľudským telom - Human Body Communication
BAN	sieť vytvorená v rámci tela - Body Area Network
CST	CST Studio Suite (Microwave Studio)
DGS	poškodenie zemniacej plochy - Defected Ground Structure
L	dĺžka hrany trojuholníka
R	polomer substrátu antény
H1	výška substrátu
l	dĺžka zárezu
w	šírka zárezu
r	polomer DGS cylindrov
L_e	efektívna strana trojuholníka
h	hrúbka zemniacej plochy
δ	činiteľ strát
PEC	dokonalý elektrický vodič
PTFE	Teflón
l_{ef}	efektívna dĺžka prvku
g1	šírka zárezu v FSS
ϕ	uhol
dB	decibel
dB_i	energetický zisk izotropnej antény
dB_d	energetický zisk polovlnového dipólu
θ	uhol v danej rovine
LHCP	ľavostranná kruhová polarizácia - Left-hand Circular Polarized

RHCP	pravostranná kruhová polarizácia - Right-hand Circular Polarized
ρ	hustota
σ	elektrická vodivosť