



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

ANTÉNY V PÁSMU S PRO DRUŽICE CUBESAT

S BAND ANTENNAS FOR CUBESAT SATELLITES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Alexander Bekeč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Urbanec, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Alexander Bekeč

ID: 221096

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Antény v pásmu S pro družice cubesat

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte přehled možných antén pro použití na družicích typu Cubesat na nízké oběžné dráze. Uvažujte různé stupně stabilizace orientace družice v prostoru. Určete vzájemnou orientaci družice a pozemní stanice při přeletu družice. Vytvořte model antény v HFSS včetně kostry družice a určete výsledné parametry.

Vytvořte modely jednotlivých antén v HFSS a určete především směrové charakteristiky. Modelujte využití antény při přeletu družice a jejím pohybu vůči pozemní stanici. Vyberte dvě antény s nejlepšími parametry a realizujte je včetně kostry družice. Měření v bezodrazové komoře ověřte výsledky simulací. Výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] CHAHAT, Nacer, ed. CubeSat Antenna Design. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley, 2021. ISBN 978-1-119-69258-4.

Termín zadání: 11.2.2022

Termín odevzdání: 1.6.2022

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Urbanec, Ph.D.

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

Bakalárska práca je venovaná anténam určeným pre miniaturizované družice typu CubeSat. Cieľom bolo preskúmať vhodné typy antén pracujúce v pásme S pre použitie na družiciach tohto typu, vytvoriť modely týchto antén a simulovať ich v programe ANSYS HFSS spolu s kostrou družice CubeSat pre zistenie jej vplyvu hlavne na vyžarovacie charakteristiky. Jedna z týchto antén bola spolu s kostrou satelitu CubeSat skonštruovaná a jej charakteristiky odmerané v bezodrazovej komore. Okrem toho boli preskúmané rôzne úrovne stabilizácie družíc a ich vplyv na komunikáciu s pozemnou stanicou. Zároveň boli skúmané minimálne potrebné vyžarovacie uhly antén pre oba riešené typy jednoosej stabilizácie pri uvážení komunikácie s pozemnou stanicou nachádzajúcou sa v meste Brno.

Kľúčové slová

družice CubeSat, pásmo S, priestorová stabilizácia, orientácia satelitu, polarizácia, zisk, smerovosť, vyžarovací uhol, mikropásková fliačková anténa, dipólová anténa, monopólová anténa, špirálová anténa, ANSYS HFSS, bezodrazová komora

Abstract

This bachelor's thesis is dedicated to antennas designed for use onboard miniaturized satellites CubeSat. The main goal of the thesis was to examine suitable antennas working in the S-band for use onboard this type of satellites, create their models and simulate them in the software ANSYS HFSS together with the CubeSat frame to find out its impact on the characteristics of antennas. One of these antennas was constructed together with CubeSat frame and measured in the RF anechoic chamber. Besides these, different types of satellite attitude stabilisation were examined, along with their influence on communication with ground station. Minimal half power beamwidths of antennas were analysed for both studied types of single axis stabilisation with consideration of communication with ground station located in the city of Brno.

Keywords

CubeSat satellites, S-Band, satellite position stabilisation, satellite attitude, polarisation, gain, directivity, half power beamwidth, microstrip patch antenna, dipole antenna, monopole antenna, helical antenna, quadrifilar helix antenna, ANSYS HFSS, RF anechoic chamber

Bibliografická citácia

BEKEČ, Alexander. *Antény v pásmu S pro družice cubesat*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141497>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Tomáš Urbanec.

Prohlášení autora o původnosti díla

| | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Jméno a příjmení studenta: | Alexander Bekeč |
| VUT ID studenta: | 221096 |
| Typ práce: | Bakalářská práce |
| Akademický rok: | 2021/22 |
| Téma závěrečné práce: | Antény v pásmu S pro družice cubesat |

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících 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.

V Brně dne: 30. května 2022

podpis autora

Pod'akovanie

V týchto úvodných riadkoch by som sa rád poďakoval vedúcemu bakalárskej práce Ing. Tomášovi Urbancovi, Ph.D. za odbornú pomoc a cenné rady pri vypracovaní tejto bakalárskej práce.

V Brne dňa: 30. mája 2022

podpis autora

Obsah

| | |
|--|-----------|
| ZOZNAM OBRÁZKOV A TABULIEK | 8 |
| ÚVOD | 11 |
| 1. SATELITY A SATELITNÁ KOMUNIKÁCIA | 12 |
| 1.1 PÁSMO S | 12 |
| 1.2 REDUKOVANÁ PLOCHA SATELITOV CUBESAT | 12 |
| 1.3 STABILIZÁCIA SATELITOV V PRIESTORE | 13 |
| 1.4 VZÁJOMNÁ POLOHA POZEMNEJ STANICE A SATELITU | 15 |
| 2. CHARAKTERISTIKY ANTÉN | 19 |
| 2.1 VÝZNAMNÉ SMEROVÉ PARAMETRE ANTÉN..... | 19 |
| 2.2 POLARIZÁCIA VLNENIA A ANTÉN..... | 20 |
| 2.2.1 <i>Lineárna polarizácia.....</i> | <i>20</i> |
| 2.2.2 <i>Eliptická a kruhová polarizácia.....</i> | <i>20</i> |
| 2.2.3 <i>Polarizačné straty.....</i> | <i>21</i> |
| 3. PREHĽAD ANTÉN PRE DRUŽICE CUBESAT | 23 |
| 3.1 MIKROPÁSKOVÉ FLIAČKOVÉ ANTÉNY | 23 |
| 3.2 DIPÓLOVÉ A MONOPÓLOVÉ ANTÉNY | 24 |
| 3.3 ŠPIRÁLOVÉ ANTÉNY | 24 |
| 4. MODELY ANTÉN V PROGRAME HFSS..... | 26 |
| 4.1 DIPÓLOVÁ ANTÉNA | 27 |
| 4.1.1 <i>Umiestnenie dipólovej antény nad stredom steny rovnobežne s povrchom.....</i> | <i>28</i> |
| 4.1.2 <i>Umiestnenie dipólovej antény rovnobežne s hranou kostry</i> | <i>30</i> |
| 4.1.3 <i>Umiestnenie dipólovej antény kolmo na hranu kostry</i> | <i>31</i> |
| 4.1.4 <i>Ďalšie skúmané umiestnenia dipólovej antény.....</i> | <i>33</i> |
| 4.2 FLIAČKOVÁ ANTÉNA SO SKOSENÝMI PROTILAHÝMI ROHMI | 33 |
| 4.2.1 <i>Umiestnenie fliačkovej antény v strede steny kostry satelitu.....</i> | <i>36</i> |
| 4.2.2 <i>Vyklopenie fliačkovej antény okolo jej hrany.....</i> | <i>38</i> |
| 4.2.3 <i>Vyklopenie fliačkovej antény okolo hrany kostry satelitu</i> | <i>40</i> |
| 4.3 ANTÉNA QFH..... | 42 |
| 4.3.1 <i>Umiestnenie antény QFH nad stredom steny kostry satelitu.....</i> | <i>44</i> |
| 4.3.2 <i>Umiestnenie antény QFH nad stredom hrany kostry satelitu</i> | <i>47</i> |
| 4.3.3 <i>Umiestnenie antény QFH nad rohom kostry satelitu</i> | <i>49</i> |
| 4.3.4 <i>Modifikovaný model antény QFH s uvažovaním vlastností reálnej antény.....</i> | <i>51</i> |
| 4.4 ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV SIMULÁCIÍ ANTÉN | 53 |
| 5. REALIZÁCIA A MERANIE ANTÉNY QFH | 56 |
| ZÁVER | 60 |
| LITERATÚRA..... | 61 |
| ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK | 63 |

ZOZNAM OBRÁZKOV A TABULIEK

Zoznam obrázkov

| | |
|--|----|
| Obr. 1: Orientácia satelitu voči pozemnej stanici a minimálne potrebné HPBW pri stabilizácii jednej osi gravitačným gradientom..... | 16 |
| Obr. 2: Orientácia satelitu voči pozemnej stanici a minimálne potrebné HPBW pri stabilizácii jednej osi magnetickým poľom | 18 |
| Obr. 3: Smerový diagram zisku dipólovej antény v rovine E (vľavo) a v rovine H (vpravo) s vyznačenými šírkami hlavného zväzku (HPBW) | 20 |
| Obr. 4: Spôsoby kruhovej polarizácie mikropáskových fliačkových antén [5] | 23 |
| Obr. 5: Ortogonálne napájaná, kruhovo polarizovaná fliačková anténa CubeSatu MarCO [5] | 23 |
| Obr. 6: Kvadrifilárna špirálová anténa [12] | 25 |
| Obr. 7: Model kostry satelitu CubeSat v programe HFSS | 26 |
| Obr. 8: Výsledná podoba modelu navrhnujej polvlnnej dipólovej antény | 27 |
| Obr. 9: Smerové charakteristiky zisku samotnej dipólovej antény | 27 |
| Obr. 10: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu samotnej dipólovej antény | 28 |
| Obr. 11: Umiestnenie dipólovej antény nad stredom steny rovnobežne s povrchom | 28 |
| Obr. 12: Smerové charakteristiky zisku dipólovej antény v umiestnení nad stredom steny rovnobežne s povrchom | 29 |
| Obr. 13: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu dipólovej antény v umiestnení nad stredom steny rovnobežne s povrchom | 29 |
| Obr. 14: Umiestnenie dipólovej antény rovnobežne s hranou kostry | 30 |
| Obr. 15: Smerové charakteristiky zisku dipólovej antény v umiestnení rovnobežnom s hranou kostry | 30 |
| Obr. 16: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu dipólovej antény v umiestnení rovnobežne s hranou kostry..... | 31 |
| Obr. 17: Umiestnenie dipólovej antény kolmo na hranu kostry | 31 |
| Obr. 18: Smerové charakteristiky zisku dipólovej antény v umiestnení kolmo na hranu kostry | 32 |
| Obr. 19: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu dipólovej antény v umiestnení kolmo na hranu kostry | 32 |
| Obr. 20: Výsledná podoba modelu navrhnujej fliačkovej antény v programe ANSYS HFSS | 34 |
| Obr. 21: Smerové charakteristiky zisku samotnej fliačkovej antény | 34 |
| Obr. 22: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu samotnej fliačkovej antény | 35 |
| Obr. 23: Smerové charakteristiky parametru AR samotnej fliačkovej antény | 35 |
| Obr. 24: Umiestnenie fliačkovej antény v strede steny kostry satelitu | 36 |
| Obr. 25: Smerové charakteristiky zisku fliačkovej antény v umiestnení v strede steny kostry satelitu | 36 |
| Obr. 26: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu fliačkovej antény v umiestnení v strede steny kostry satelitu | 37 |
| Obr. 27: Smerové charakteristiky parametru AR fliačkovej antény v umiestnení v strede steny kostry satelitu | 37 |
| Obr. 28: Vyklopenie fliačkovej antény okolo jej hrany | 38 |
| Obr. 29: Smerové charakteristiky zisku fliačkovej antény vyklopenej okolo jej hrany | 38 |
| Obr. 30: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu fliačkovej antény vyklopenej okolo jej hrany | 39 |
| Obr. 31: Smerové charakteristiky parametru AR fliačkovej antény vyklopenej okolo jej hrany | 39 |
| Obr. 32: Frekvenčná charakteristika parametru AR fliačkovej antény vyklopenej okolo jej hrany | 40 |
| Obr. 33: Vyklopenie fliačkovej antény okolo hrany kostry satelitu..... | 40 |
| Obr. 34: Smerové charakteristiky zisku fliačkovej antény vyklopenej okolo hrany kostry satelitu | 41 |

| | |
|---|----|
| Obr. 35: Frekvenčná charakteristika činiteľa odrazu fliačkovej antény vyklopenej okolo hrany kostry satelitu | 41 |
| Obr. 36: Smerové charakteristiky parametru AR fliačkovej antény vyklopenej okolo hrany kostry satelitu | 42 |
| Obr. 37: Výsledná podoba modelu navrhutej QFH antény v programe ANSYS HFSS | 43 |
| Obr. 38: Smerové charakteristiky zisku samotnej antény QFH | 43 |
| Obr. 39: Frekvenčná charakteristika činiteľa odrazu samotnej antény QFH | 44 |
| Obr. 40: Smerové charakteristiky parametru AR samotnej antény QFH | 44 |
| Obr. 41: Umiestnenie antény QFH nad stredom steny kostry satelitu | 45 |
| Obr. 42: Smerové charakteristiky zisku antény QFH v umiestnení nad stredom steny kostry satelitu | 45 |
| Obr. 43: Frekvenčná charakteristika činiteľa odrazu antény QFH v umiestnení nad stredom steny kostry satelitu | 46 |
| Obr. 44: Smerové charakteristiky parametru AR antény QFH v umiestnení nad stredom steny kostry satelitu | 46 |
| Obr. 45: Umiestnenie antény QFH nad stredom hrany kostry satelitu | 47 |
| Obr. 46: Smerové charakteristiky zisku antény QFH v umiestnení nad stredom hrany kostry satelitu | 47 |
| Obr. 47: Frekvenčná charakteristika činiteľa odrazu antény QFH v umiestnení nad stredom hrany kostry satelitu | 48 |
| Obr. 48: Smerové charakteristiky parametru AR antény QFH v umiestnení nad stredom hrany kostry satelitu | 48 |
| Obr. 49: Umiestnenie antény QFH nad rohom kostry satelitu | 49 |
| Obr. 50: Smerové charakteristiky zisku antény QFH v umiestnení nad rohom kostry satelitu | 49 |
| Obr. 51: Frekvenčná charakteristika činiteľa odrazu antény QFH v umiestnení nad rohom kostry satelitu | 50 |
| Obr. 52: Smerové charakteristiky parametru AR antény QFH v umiestnení nad rohom kostry satelitu | 50 |
| Obr. 53: Umiestnenie modifikovaného modelu antény QFH nad stredom steny kostry satelitu | 51 |
| Obr. 54: Smerové charakteristiky zisku modifikovaného modelu antény QFH v umiestnení nad stredom steny kostry satelitu | 52 |
| Obr. 55: Frekvenčná charakteristika činiteľa odrazu modifikovaného modelu antény QFH v umiestnení nad stredom steny kostry satelitu | 52 |
| Obr. 56: Smerové charakteristiky parametru AR modifikovaného modelu antény QFH v umiestnení nad stredom steny kostry satelitu | 53 |
| Obr. 57: Porovnanie smerových charakteristík všetkých simulovaných umiestnení v rovine $E / \phi = 0^\circ$ | 54 |
| Obr. 58: Porovnanie smerových charakteristík všetkých simulovaných umiestnení v rovine $H / \phi = 90^\circ$ | 55 |
| Obr. 59: Frekvenčná charakteristika činiteľa odrazu na vstupe antény pri samotnej anténe (nekalibrované meranie) a pri anténe s kostrou družice (kalibrované meranie) | 56 |
| Obr. 60: Smerové charakteristiky zisku realizovanej antény QFH spolu s kostrou satelitu pri frekvencii 2,2 GHz | 57 |
| Obr. 61: Smerové charakteristiky zisku simulovaného modifikovaného modelu antény QFH a jej realizácie | 57 |
| Obr. 62: Frekvenčná charakteristika parametru AR simulovaného modelu antény QFH a realizovanej antény v hlavnom smere vyžarovania | 58 |
| Obr. 63: Realizovaná anténa QFH | 58 |
| Obr. 64: Meranie činiteľa odrazu realizovanej antény QFH spolu s kostrou satelitu pomocou vektorového analyzátoru | 59 |

Zoznam tabuliek

| | |
|--|----|
| Tab. 1: Potrebný vyžarovací uhol HPBW v závislosti na elevačnom uhle satelitu pri stabilizácii gravitačným gradientom pri výške satelitu 500 km..... | 16 |
| Tab. 2: Potrebný vyžarovací uhol HPBW v závislosti na elevačnom uhle satelitu pri stabilizácii magnetickým poľom pri výške satelitu 500 km | 17 |
| Tab. 3: Výsledné rozmery modelu navrhutej fliačkovej antény so skosenými rohmi | 34 |
| Tab. 4: Výsledné rozmery modelu navrhutej QFH antény | 42 |
| Tab. 5: Výsledné rozmery modifikovaného modelu QFH antény | 51 |
| Tab. 6: Zhrnutie charakteristik antén v rôznych umiestneniach s kostrou satelitu..... | 53 |

ÚVOD

Družice typu CubeSat – miniatúrne satelity tvorené jedným alebo viacerými kubickými modulmi s dĺžkou hrany 10 centimetrov zaznamenali v posledných dvoch dekádach výrazný rozmach. Vďaka menším finančným nákladom na konštrukciu a skráteniu doby potrebnej na vývoj oproti konvenčným satelitom otvorili možnosti vesmírneho výskumu aj pre menšie firmy a rôzne vzdelávacie inštitúcie. Aj keď sa zatiaľ ich vedecký prínos neblíži úrovni veľkých družíc, ktoré sa zameriavajú hneď na niekoľko rôznych oblastí výskumu súčasne, vďaka postupnému znižovaniu vedeckého vybavenia sa stávajú čoraz perspektívnejšími nástrojmi vesmírneho bádania pre rýchly a cieleň výskum konkrétnych problematik. Aj keď malé rozmery predstavujú veľa výhod, vynára sa však aj niekoľko problémov, hlavne v konštrukčnej oblasti.

Antény sú elementárnym prvkom všetkých satelitov, nakoľko uskutočňujú komunikáciu s pozemnou stanicou, umožňujú tak prenos príkazov a inštrukcií v smere k satelitu a prenos získaných dát a informácií o stave satelitu a jeho polohe v smere k pozemnej stanici. Kvôli obmedzeným rozmerom satelitov CubeSat, vyplývajúcich z pravidiel pre ich dizajn, je návrh antén pre tieto satelity výzvou, nakoľko sa s komunikačným systémom o plochu satelitu bijú systémy napájania elektrickou energiou, tvorené najčastejšie solárnymi článkami rozloženými na ploche satelitu, prípadne systémy vedeckého bádania.

Cieľom tejto práce je preskúmať druhy antén pre použitie na týchto satelitoch, spracovať ich prehľad, vytvoriť ich modely a simulovať ich vlastnosti so zameraním na smerové charakteristiky v programe ANSYS HFSS. Okrem toho je cieľom zistiť možnosti stabilizácie orientácie satelitu na obežnej dráhe voči zemskému povrchu a preskúmať potrebné parametre antén pre správnu komunikáciu s pozemnou stanicou pri rôznych formách stabilizácie.

Prvá kapitola je venovaná problematike satelitnej komunikácie a satelitov so zameraním na satelity malých rozmerov – orientácia satelitu voči pozemnej stanici, stabilizácia polohy a orientácie satelitu v priestore a problémy spojené s malými rozmermi cubesatov pri návrhu antén. V druhej kapitole sú riešené smerové parametre antén, polarizácia a polarizačné straty. V tretej kapitole je prehľad druhov antén vhodných pre použitie na satelitoch malých rozmerov. Obsahom štvrtej kapitoly sú výsledky simulácií modelov troch antén – dipólovej, fliačkovej so skosenými rohmi a quadrifilar helixu v programe ANSYS HFSS v rôznych umiestneniach voči kostre satelitu CubeSat. Piata kapitola je venovaná konštrukcii antény quadrifilar helix, výsledkom meraní tejto antény v bezodrazovej komore a na vektorovom analyzátore a ich porovnaní s výsledkami simulovaného modelu.

1. SATELITY A SATELITNÁ KOMUNIKÁCIA

1.1 Pásmo S

Pásmo S je frekvenčné pásmo vyčlenené organizáciou IEEE pokrývajúce rozsah 2 až 4 GHz. V rámci satelitnej komunikácie sa pásmo S popri ďalších vyšších frekvenčných pásmach rádiových frekvencií, hlavne pásmach X a Ka, dostáva do popredia pred dlho používané pásma UHF a VHF [1]. Pre tieto účely boli Medzinárodnou telekomunikačnou úniou (ITU) v pásme S definované pásma Space Operation s rozsahmi 2,025 až 2,11 GHz pre komunikáciu v smere od pozemnej stanice k satelitu (angl. *uplink*), 2,22 až 2,29 GHz pre komunikáciu v opačnom smere (angl. *downlink*) a pásmo Amateur-Satellite Service s rozsahom 2,4 až 2,45 GHz. Pásma Space Operation sú prevažne využívané pre prenos telemetrie, informácií o polohe satelitu a príkazov (skr. TT&C) a pásmo Amateur-Satellite Service pre downlink väčších objemov dát zo satelitu [2].

Pásmo S je pre návrh antén v polvlnnej a štvrtvlnnej rezonancii z hľadiska rozmerov vlny výhodnejšie ako nižšie frekvenčné pásma. Dĺžka vlny pri najnižšej frekvencii pásma S 2 GHz je 15 cm, čo znamená, že tieto antény majú rozmery menšie ako stena 1U CubeSatov (10 x 10 cm).

Výhodou pásma S oproti vyšším frekvenčným pásmam používaných pri satelitnej komunikácii ako X a Ka je omnoho menšie potlačenie signálu atmosférickými vplyvmi, hlavne obsahom vody v atmosfére v podobe vodnej pary, prípadne v podobe zrážok (hlavne dážď a sneh) [1].

1.2 Redukovaná plocha satelitov CubeSat

Významným problémom spojeným s používaním satelitov CubeSat je výrazná limitácia ich rozmerov, čo sa prejavuje na veľkosti použiteľnej vonkajšej plochy cubesatov. Obmedzenia rozmerov cubesatov vyplývajú z pravidiel pre ich návrh, ktoré majú za cieľ ich štandardizáciu, hlavne pre účely zjednodušenia ich prepravy na obežnú dráhu. Dva najelementárnejšie systémy satelitu – komunikačný systém a systém napájania elektrickou energiou vyžadujú na svoje správne fungovanie značnú plochu. Pri komunikačnom systéme ide o umiestnenie antény, a pri napájaní sa jedná najčastejšie o fotovoltické články, ktoré pre dodávanie dostatočného výkonu ostatným systémom satelitu vyžadujú čo najväčšiu plochu. Problém nedostatočného miesta sa dá riešiť pomocou pridania komplexnejších mechanizmov, napr. pre vyklápanie solárnych panelov alebo samotnej antény.

Z hľadiska upevnenia k satelitu sa antény delia na pevné antény (angl. *fixed*) a antény s mechanizmom pre rozloženie alebo konečné umiestnenie (angl. *deployable*). Pevné antény sú na ploche satelitu pevne pripevnené od svojho namontovania a po vypustení satelitu na obežnú dráhu nemenia svoj tvar ani polohu. Antény s mechanizmom (napr.

vyklápacím, rozkladacím alebo nafukovacím) sú počas konštrukcie satelitu nainštalované v podobe zabezpečujúcej najefektívnejšie využitie priestoru a po umiestnení na obežnú dráhu je anténa umiestnená do najvhodnejšej polohy pre komunikáciu, prípadne rozložená do podoby, ktorá umožňuje nadviazanie komunikácie. Použitie týchto mechanizmov umožňuje použitie antén s lepšími charakteristikami ako väčšina pevných antén a v prípade rozkladacích mechanizmov aj väčšími rozmermi ako sú rozmery cubesatov, zároveň však ich zlyhaním môže dôjsť k znemožneniu komunikácie s pozemnou stanicou a tým pádom k zlyhaniu celej misie [1], [3].

Iným prístupom, jednoduchším z hľadiska mechanických komponentov, ale komplikovanejším z technologického hľadiska je použitie antén integrovaných na ploche solárnych panelov, čo umožňuje komunikáciu a zároveň nezaberá plochu pre solárne panely. Anténa je buď navrhnutá na priehľadnom substráte, umožňujúcim prechod svetla cez jeho objem, prípadne je solárny panel priamo súčasťou substrátu antény. Nevýhodou tejto metódy sú zhoršené vlastnosti antén oproti bežným návrhom [3].

1.3 Stabilizácia satelitov v priestore

Vhodná orientácia satelitu (angl. *attitude*) a jej stabilizácia vo vesmírnom priestore je dôležitá pre efektívnu činnosť komunikačného systému satelitu pri komunikácii s pozemnou stanicou, medzisatelitnej komunikácii, ako aj pre iné systémy vyžadujúce zacielenie, napríklad nástroje diaľkového prieskumu Zeme. Pri návrhu satelitov sa predpokladajú tri úrovne stabilizácie:

- *žiadna stabilizácia*: satelit letí vesmírnym priestorom bez akejkoľvek stabilizácie,
- *stabilizácia jednej osi*: dve strany satelitu majú stabilnú orientáciu, pri ostatných štyroch stranách sa predpokladá voľná rotácia okolo stabilnej osi,
- *stabilizácia troch osí*: všetky strany satelitu majú stabilnú orientáciu.

Samotné formy stabilizácie sa delia na pasívne formy – nevyužívajúce ďalšie zdroje na stabilizáciu, a aktívne formy, ktoré vyžadujú na stabilizáciu buď elektrickú energiu alebo pohonné hmoty. Pri satelitoch typu CubeSat by implementácia stabilizácie znamenala zabratie cenného miesta, zväčšenie celkovej hmotnosti satelitu a zvýšenie nárokov na elektrickú energiu, ktoré sú často postačujúce len pre elementárne systémy CubeSatu.

Pre zabezpečenie stabilného spojenia s pozemnou stanicou nezávisle na orientácii satelitu, napríklad pri satelitoch bez stabilizácie, prípadne pri manévrovaní satelitu, keď nie je možné zabezpečiť spojenie vysokoziskovej antény, sa využívajú všesmerové antény s nízkym ziskom. Tie poskytujú stabilné pripojenie, často však s nízkym objemom prenesených dát. Malý zisk antén satelitov na nízkej obežnej dráhe Zeme je kompenzovateľný ziskom antény pozemnej stanice. Antény so stredným a vysokým ziskom, charakteristické výraznou smerovosťou, sú nutné pre misie v „hlbokom vesmíre“

(angl. *Deep Space*) a misie s väčším nárokom na objem prenášaných dát. Pre použitie týchto antén je dôležité presné cielenie antény na pozemnú stanicu, na čo je potrebná stabilizácia satelitu. Použitie nadirovej stabilizácie jednej osi (napríklad gravitačným gradientom), teda pevného zacielenia kolmo na zemský povrch, je pri väčšine antén s úzkou vyžarovacou charakteristikou nedostačujúce (pozri 1.4), preto je potrebná stabilizácia troch osí pre ich správne cielenie.

Stabilizácia gravitačným gradientom predstavuje pasívnu formu stabilizácie jednej osi. Najvhodnejšia je pri satelitoch na nízkej obežnej dráhe Zeme, kde je gravitačný spád dostatočný na realizáciu takejto formy stabilizácie. Jej princíp spočíva v snahe predĺženého telesa zrovnať svoju os s lokálnou vertikálou Zeme vplyvom krútiaceho momentu gravitačného gradientu okolo ťažiska. Vďaka tomu je dosiahnuté priklonenie jednej strany satelitu smerom k zemskému povrchu. Pre dosiahnutie predĺženého tvaru a zároveň aj zmenu rozloženia hmoty satelitu môže k nemu byť pripevnená žrd' so závažím na jej konci (angl. *boom*) [4].

Stabilizácia pomocou magnetického poľa Zeme poskytuje pri použití permanentného magnetu pasívnu, resp. pri použití elektromagnetu aktívnu formu stabilizácie jednej osi. Jej princíp spočíva v orientovaní magnetického poľa magnetu zabudovaného v satelite v magnetickom poli Zeme. Táto forma stabilizácie neposkytuje stabilné priklonenie jednej strany k Zemi. Použitie na vyšších orbitách alebo pri väčších vzdialenostiach od Zeme ako je nízka obežná dráha môže byť oslabené zníženou intenzitou vonkajšieho geomagnetického poľa [1].

Stabilizácia s využitím reaktívneho pohonu tvoreného malými dýzami hnanými pohonnou hmotou predstavuje aktívnu formu stabilizácie jednej, prípadne troch osí. Pomocou pulzov reaktívneho pohonu je satelit udržiavaný v požadovanej orientácii. Nevýhodou je, že pohonné hmoty pre tento systém sú neobnoviteľné na obežnej dráhe a pohonné systémy nie sú z dôvodu svojich rozmerov a hmotnosti vhodné pre družice typu CubeSat. K tejto forme stabilizácie je taktiež vhodné spomenúť stabilizáciu rotáciou. Dosiahnutím rotácie celého satelitu, prevažne pomocou reaktívneho pohonu, je dosiahnutý gyroskopický efekt, ktorý zabezpečuje stabilizáciu jednej osi [5], [6].

Stabilizácia pomocou zotrvačiek (angl. *reaction / momentum wheels*) umožňuje aktívnu stabilizáciu jednej, prípadne troch osí s použitím elektrickej energie. Zotrvačníky dávajú možnosť rotácie satelitu s využitím výmeny zotrvačnosti medzi satelitom a zotrvačnikom samotným. Pre aktívnu stabilizáciu troch osí je nutné využitie minimálne troch zotrvačiek v ortogonálnej konfigurácii, často sa však používa aj štvrtý, redundantný zotrvačnik kvôli ich pomerne veľkej poruchovosti [1], [6]. Pri použití takejto stabilizácie je kvôli externým parazitickým krútiacim momentom nutná pravidelná desaturácia zotrvačiek pomocou iných externých krútiacich momentov, napríklad reaktívnym pohonom, prípadne pomocou magnetickej stabilizácie [1].

Informácia o orientácii satelitu pre systém riadenia orientácie je získavaná pomocou snímačov využívajúcich sledovanie polohy nebeských objektov (Slnka, iných hviezd

alebo zemského horizontu) alebo zotrvačných snímačov ako gyroskop, sledujúcich rotačné rýchlosti satelitu [1], [5], [6].

1.4 Vzájomná poloha pozemnej stanice a satelitu

Z hľadiska nutnej vzájomnej polohy satelitu a pozemnej stanice je dôležitým činiteľom úroveň stabilizácie satelitu. Pri satelitoch bez stabilizácie, ktoré majú najčastejšie inštalovanú všesmerovú anténu je zbytočné riešiť ich polohu vzhľadom k pozemnej stanici, nakoľko nie je možné ovplyvniť natočenie satelitu a anténa má spojenie s pozemnou stanicou v hocijakom bode nad horizontom (pri uvažovaní presného zacielenia pozemnej stanice na satelit). Pri satelitoch so stabilizáciou troch osí taktiež nie je nutné riešiť vzájomnú polohu pozemnej stanice a satelitu, nakoľko je možné satelit presne zacieliť na pozemnú stanicu v hocijakom bode nad horizontom. Pri satelitoch so stabilizáciou jednej osi, menovite so stabilizáciou gravitačným gradientom a stabilizáciou magnetickým poľom Zeme, je však dôležitá vzájomná orientácia satelitu a pozemnej stanice, a tým pádom aj dostatočný vyžarovací uhol antény satelitu pre správnu komunikáciu medzi oboma anténami.

Cieľom správneho zarovnania antén je minimalizácia strát, ktoré z nevhodného zarovnania vyplývajú (angl. *misalignment losses*). Za najvhodnejšie vzájomné zarovnanie sa považuje zarovnanie, keď osi hlavných lalokov oboch antén ležia na jednej priamke, vtedy sú straty nevhodným zarovnaním nulové.

Pre účely modelovania orientácie satelitu voči pozemnej stanici a výpočtu minimálneho potrebného vyžarovacieho uhlu HPBW uvažujeme pozemnú stanicu nachádzajúcu sa v meste Brno (49°12' s. š., 16°37' v. d.). Uvažovaná výška satelitu je 500 km, teda obieha Zem na nízkej obežnej dráhe (LEO). Z tohto údaju je možné vypočítať obežnú dobu satelitu t :

$$t = \frac{2\pi r}{\sqrt{\frac{GM_Z}{r}}} = \frac{2\pi \cdot 6878 \cdot 10^3}{\sqrt{\frac{6,67408 \cdot 10^{-11} \cdot 5,972 \cdot 10^{24}}{6878 \cdot 10^3}}} = 5677 \text{ s} = 94,6 \text{ min}, \quad (1)$$

kde t je obežná doba satelitu, r je vzdialenosť obežnej dráhy satelitu od stredu Zeme [m], G je univerzálna gravitačná konštanta [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$] a M_Z je hmotnosť Zeme [kg]. Maximálny čas, kedy môže satelit naviazať komunikáciu s pozemnou stanicou, teda čas jeho výskytu nad horizontom je:

$$t_{MAX} = t \cdot \frac{\alpha_{MAX}}{360^\circ} = 5677 \cdot \frac{2 \cdot \cos^{-1}\left(\frac{6378}{6378 + 500}\right)}{360^\circ} = 693 \text{ s}, \quad (2)$$

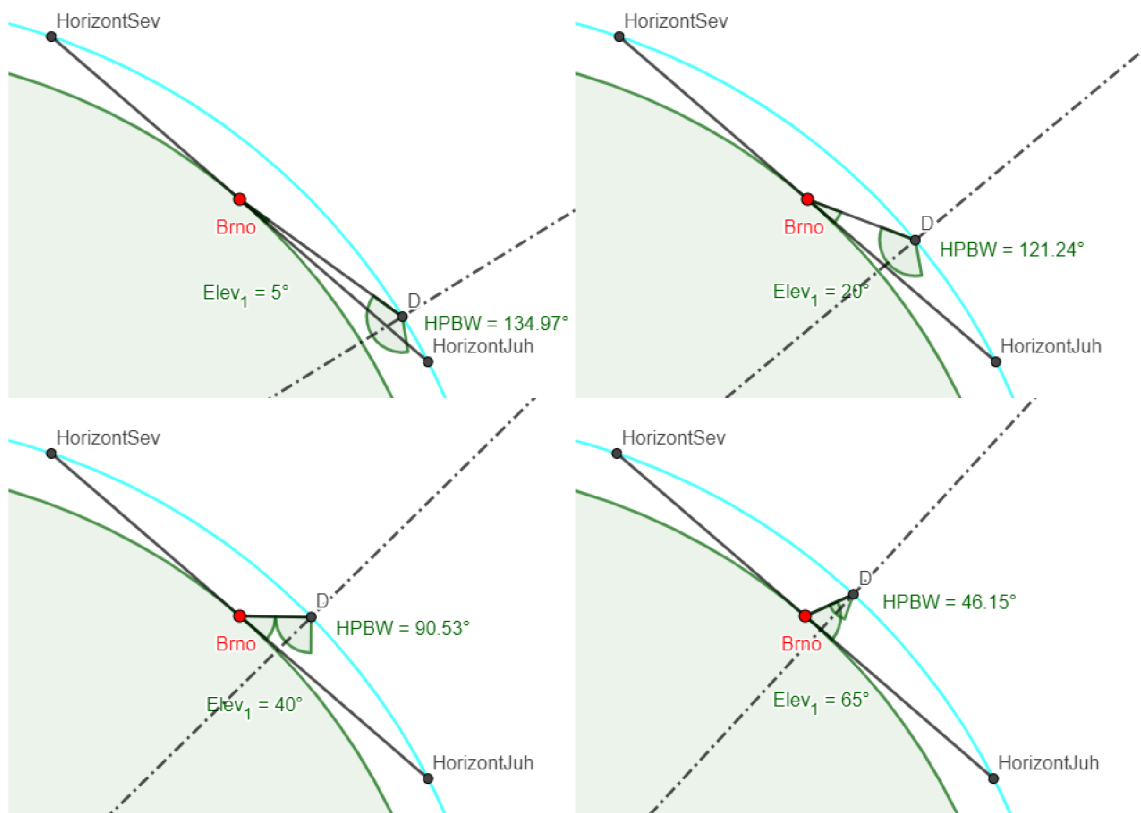
kde t_{MAX} je čas, kedy je satelit nad obzorom a α_{MAX} je uhol medzi bodmi horizontu s vrcholom v strede Zeme [°].

Pri stabilizácii satelitu gravitačným gradientom je jeho stabilná os smerovaná do nadiru. Na modelovej situácii zobrazenej na obr. 1 s prechodom satelitu cez zenit pozemnej stanice je možné vidieť znižovanie požadovaného vyžarovacieho uhlu antény pri pohybe od horizontu do zenitu, teda s rastom elevačného uhlu, s minimálnym potrebným uhlom v zenite (0°). Pre satelit vo výške 500 km nad zemským povrchom sú potrebné uhly vypísané v tab. 1. Vďaka orientácii osi satelitu do nadiru sú dané uhly platné pre akýkoľvek azimut satelitu, ako aj pre inde položenú pozemnú stanicu.

Tab. 1: Potrebný vyžarovací uhol HPBW v závislosti na elevačnom uhle satelitu pri stabilizácii gravitačným gradientom pri výške satelitu 500 km

| Elevačný uhol satelitu [$^\circ$] | Minimálny Half Power Beamwidth [$^\circ$] |
|-------------------------------------|---|
| 5 | 134,97 |
| 20 | 121,24 |
| 40 | 90,53 |
| 65 | 46,15 |
| 90 | 0 |

Z výsledkov modelovej situácie teda vyplýva to, že pre pokrytie pozemnej stanice pri satelite vo výške 500 km musí mať anténa vyžarovací uhol 135° (pre elevačný uhol $> 5^\circ$).



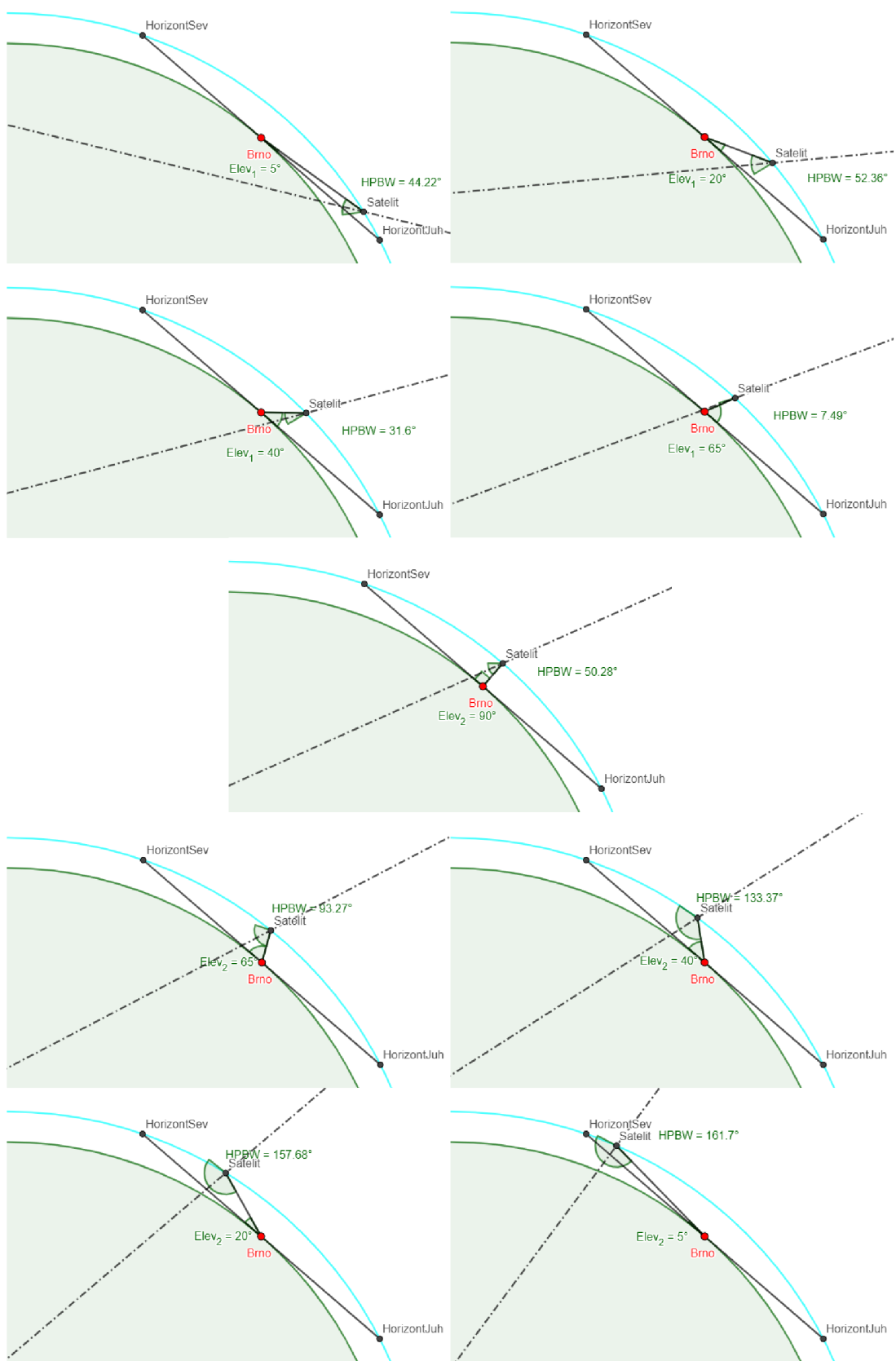
Obr. 1: Orientácia satelitu voči pozemnej stanici a minimálne potrebné HPBW pri stabilizácii jednej osi gravitačným gradientom

Pri stabilizácii satelitu magnetickým poľom Zeme je stabilná os satelitu orientovaná rovnobežne s vektorom lokálneho geomagnetického poľa v danom bode. Nakoľko je magnetické pole Zeme výrazne nerovnomerné, je táto forma stabilizácie závislá na polohe satelitu a pozemnej stanice. Na obr. 2 je modelová situácia satelitu vo výške 500 km nad zemským povrchom, stabilizovaného magnetickým poľom s polárnou obežnou dráhou s prechodom cez zenit pozemnej stanice. Pre modelovanie orientácie vektoru lokálneho geomagnetického poľa boli pomocou nástroja [7] zistené hodnoty magnetickej inklinácie pre danú dráhu satelitu. Práve kvôli rastúcej magnetickej inklinácii dochádza s postupným pohybom satelitu od južného k severnému horizontu k stáčaniu osi satelitu smerom k nadiru. Na obr. 2 je možné vidieť, že potrebný vyžarovací uhol pri prechode od južného horizontu k severnému najprv stúpa k maximálnej hodnote (južne od zenitu) $53,45^\circ$, následne klesá prechodom k hodnote 0° v okolí elevačného uhlu 60° (južne od zenitu). Od tohto bodu už potrebný HPBW výrazne stúpa až do dosiahnutia maximálnej hodnoty na severnom horizonte.

Tab. 2: Potrebný vyžarovací uhol HPBW v závislosti na elevačnom uhle satelitu pri stabilizácii magnetickým poľom pri výške satelitu 500 km

| Elevačný uhol satelitu [°] (smer od zenitu) | Minimálny Half Power Beamwidth [°] |
|---|------------------------------------|
| 5 (juh) | 44,22 |
| 20 (juh) | 52,36 |
| 40 (juh) | 31,60 |
| 65 (juh) | 7,49 |
| 90 | 50,28 |
| 65 (sever) | 93,27 |
| 40 (sever) | 133,37 |
| 20 (sever) | 157,68 |
| 5 (sever) | 161,7 |

Nakoľko má stabilná os satelitu pri nižších elevačných uhloch pomerne nízku hodnotu inklinácie, a nakoľko dochádza k veľkej relatívnej zmene vzdialenosti satelitu pri horizonte voči vzdialenosti v zenite (500 km v zenite, 2574 km na horizonte), dochádza pri zobrazenom priebehu pokrytia povrchu aj k rozšíreniu stopy satelitu v smere rovnobežiek.



Obr. 2: Orientácia satelitu voči pozemnej stanici a minimálne potrebné HPBW pri stabilizácii jednej osi magnetickým poľom

2. CHARAKTERISTIKY ANTÉN

2.1 Významné smerové parametre antén

Schopnosť antény prijímať alebo vysielať elektromagnetické vlnenie v rozdielnych intenzitách v závislosti na smere sa nazýva smerovosť antény. Z hľadiska smerov, z ktorých anténa prijíma, alebo do ktorých vysiela s väčšou intenzitou sa antény delia na smerové a všesmerové. Smerové antény sú charakteristické vyžarovaním svojho výkonu do jedného konkrétneho smeru – v smerovej charakteristike reprezentovanom hlavným lalokom. Všesmerová anténa je charakterizovaná ako anténa, ktorá vyžaruje do všetkých smerov priestoru rovnakou intenzitou, označuje sa aj ako izotropná anténa alebo žiarič [8].

Pre číselné vyjadrenie smerovosti antény sa používa parameter činiteľ smerovosti $D(\varphi, \vartheta)$. Ten vyjadruje smerovosť vyžarovania ako pomer intenzity vyžarovania v jednom smere ku intenzite vyžarovania do celého priestoru. To znamená, že čím viac sa bude vyžiarený výkon antény koncentrovať do jedného smeru, tým viac porastie samotný činiteľ smerovosti. Relatívny činiteľ smerovosti $D_i(\varphi, \vartheta)$ sa získa prepočtom absolútneho činiteľa odrazu vzhľadom k referenčnej izotropnej anténe. Pri relatívnom číteli smerovosti je činiteľ väčší ako jedna pre smery, do ktorých je žiarenie sústredené, a menší ako jedna pre smery, kde je žiarenie potlačené [9].

Zisk antény G je definovaný ako maximálna hodnota činiteľa smerovosti D_{MAX} v decibelovom vyjadrení podľa vzťahu:

$$G = 10 \cdot \log(D_{MAX}). \quad (3)$$

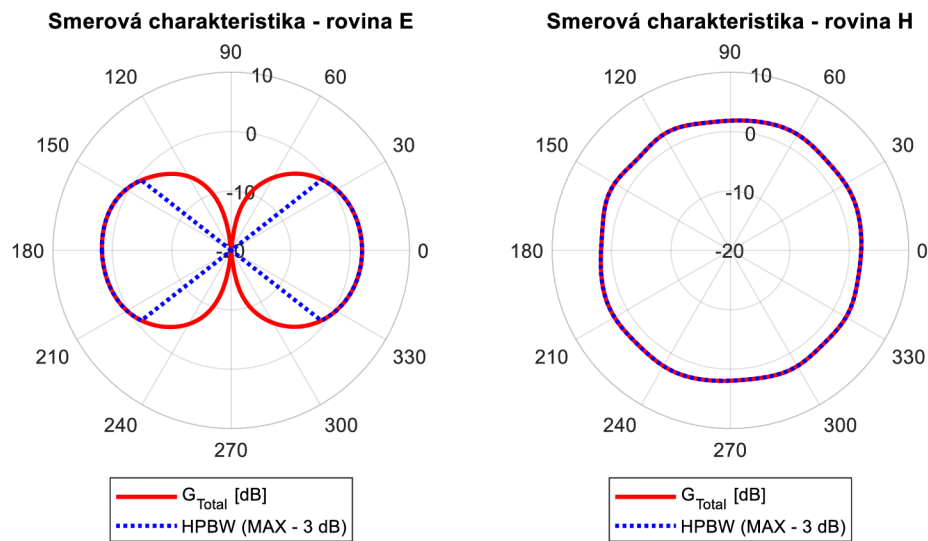
Relatívny zisk antény vzhľadom k referenčnej anténe (izotropná anténa, prípadne polvlnný dipól) sa vypočíta podľa vzťahu:

$$G_i = 10 \cdot \log\left(\frac{D_{MAX}}{D_{ref}}\right). \quad (4)$$

Ako jednotka miery pri relatívnom zisku sa používa dBi pri referenčnej izotropnej anténe, prípadne dBd pri referenčnej polvlnnej dipólovej anténe.

Vizuálne zobrazenie smerových vlastností antény pre konkrétnu rovinu poskytuje smerový alebo vyžarovací diagram antény. Ten je vykreslením závislosti podielu intenzity vyžarovania antény v danom smere a celkového maxima intenzity vyžarovania (Obr. 3). Roviny, v ktorých je smerový diagram skonštruovaný sú najčastejšie rovina E (angl. *elevation plane*) a/alebo rovina H (angl. *azimuth plane*). V prípade dipólovej antény je rovina E rovnobežná s osou dipólovej antény a rovina H je na ňu kolmá. Zo zobrazených smerových diagramov sa dá pomerne ľahko odčítať rozsah uhlov, v ktorých je intenzita žiarenia najviac 3 dB pod maximom. Tento rozsah sa nazýva uhol

polovičného výkonu alebo šírka hlavného laloku / zväzku (HPBW, angl. *half power beamwidth*) [8].



Obr. 3: Smerový diagram zisku dipólovej antény v rovine E (vľavo) a v rovine H (vpravo) s vyznačenými šírkami hlavného zväzku (HPBW)

2.2 Polarizácia vlnenia a antén

Polarizácia vlny popisuje priebeh a orientáciu vektoru intenzity elektrického poľa v priestore. Rozlišujú sa dve hlavné polarizácie vlnenia, a to lineárna a eliptická, ktoré budú v nasledujúcich pasážach popísané. V závislosti na polarizácii vysielaného vlnenia sa na rovnaké typy delia aj samotné antény.

2.2.1 Lineárna polarizácia

Lineárne polarizovaná vlna je tvorená jedným komponentom intenzity elektrického poľa. Vektor lineárne polarizovanej vlny intenzity elektrického poľa mení počas periódy svoju veľkosť, ale nemení svoj smer, koncový bod vektoru intenzity sa pohybuje po úsečke, ktorú opíše behom jednej periódy [9].

Podľa orientácie roviny, v ktorej sa vektor intenzity elektrického poľa pohybuje, sa dva najčastejšie prípady lineárne polarizovaného vlnenia označujú ako horizontálne a vertikálne. Tieto dva typy lineárnej polarizácie sú voči sebe z definície ortogonálne, teda horizontálne polarizovaná anténa nie je schopná prijať vertikálne polarizované vlnenie a naopak [10] (pozri 2.2.3).

2.2.2 Eliptická a kruhová polarizácia

Pri dvoch na seba kolmých komponentoch intenzity elektrického poľa a ich vzájomnom fázovom posune o 90° je dosiahnutá elipticky polarizovaná vlna. Tá je tvorená komponentmi s rozdielnou maximálnou hodnotou. V špeciálnom prípade

eliptickej polarizácie, keď je maximálna hodnota oboch komponentov intenzity elektrického poľa rovnaká, sa označuje táto polarizácia ako kruhová. Vektor elipticky polarizovanej vlny intenzity elektrického poľa mení počas periódy svoju veľkosť (v prípade kruhovej polarizácie veľkosť nemení) a zároveň svoj smer tak, že koncový bod vektoru intenzity sa pohybuje po elipse, resp. kružnici, ktorú opíše behom jednej periódy [9]. Podľa smeru, v ktorom elipticky polarizované vlnenie rotuje pri pohľade v smere šírenia žiarenia je táto polarizácia buď ľavotočivá alebo pravotočivá.

Výhodou použitia elipticky, resp. kruhovo polarizovaných antén je minimalizácia polarizačných strát vplyvom nevhodného vzájomného natočenia antén a zníženie škodlivých vplyvov zemskej atmosféry na signál (depolarizácia signálu, Faradayova rotácia, degradácia vplyvom atmosférických podmienok) [5]. Pravotočivo elipticky alebo kruhovo polarizovaná vlna sa pri odraze od povrchu stáva ľavotočivou a naopak, čím je docielená čiastočná odolnosť voči oslabovaniu signálu vplyvom interferencie priamej a odrazenej vlny [10].

2.2.3 Polarizačné straty

Pri dvoch lineárne polarizovaných anténach dochádza k polarizačným stratám vplyvom nesúlady polarizácií v prípade, ak sú voči sebe navzájom natočené o uhol ϕ . Hodnota koeficientu polarizačných strát (*PLF* – angl. *polarisation loss factor*) sa v tomto prípade vypočíta na základe vzťahu:

$$PLF = \cos^2 \phi. \quad (5)$$

V prípade, že sú antény rovnako natočené, teda uhol ϕ je 0° , nedochádza k žiadnym stratám. V prípade vzájomného natočenia antén o uhol $\phi = 90^\circ$, napríklad pri jednej vertikálne a jednej horizontálne polarizovanej anténe, nedochádza teoreticky na prijímacej anténe k príjmu signálu [10].

Okrem natočenia roviny lineárne polarizovaného vlnenia vplyvom vzájomného natočenia antén satelitu a pozemnej stanice dochádza k prídavnému natočeniu tejto roviny taktiež prechodom vlnenia cez zemskú ionosféru, kde vplyvom magnetického toku a vplyvom elektrónov v ionizovanom prostredí dochádza k Faradayovej rotácii roviny polarizovaného žiarenia. Táto rotácia má taktiež vplyv aj na elipticky, resp. kruhovo polarizované vlnenie, avšak pri takto polarizovanom vlnení nedochádza k stratám nevhodným natočením a prejavuje sa len v podobe fázových zmien.

V prípade použitia jednej lineárne polarizovanej a jednej kruhovo polarizovanej antény dochádza k stratám polarizáciou nezávisle na natočení lineárne polarizovanej antény. Nakoľko je kruhovo polarizované vlnenie tvorené dvomi, na seba kolmými zložkami s rovnakou veľkosťou a vzájomným fázovým posunom 90° , v prípade prijatia tohto žiarenia lineárne polarizovanou anténou dochádza k prijatiu iba tej zložky, ktorá je zhodná s touto anténou [10]. Rovnako to platí pri prijatí lineárne polarizovaného vlnenia kruhovo polarizovanou anténou. Pre oba tieto prípady platí:

(6)

$$PLF = -3 \text{ dB} = 0,5.$$

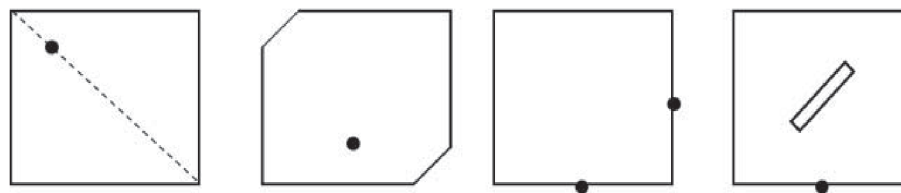
Obmedzenie strát polarizáciou sa dá docíliť voľbou rovnako polarizovaných antén pre vysielanie a príjem, ako aj správnym natočením lineárne polarizovaných antén voči sebe navzájom, čo je pri satelite na obežnej dráhe Zeme ťažko dosiahnutelné.

3. PREHLAD ANTÉN PRE DRUŽICE CUBESAT

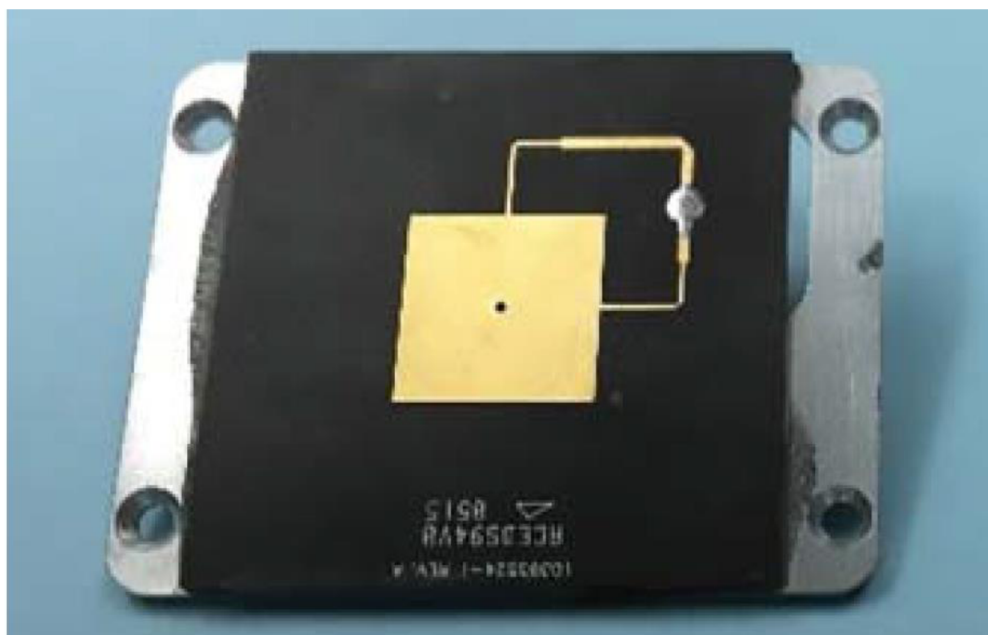
3.1 Mikropáskové fliačkové antény

Mikropáskové fliačkové antény (angl. *microstrip patch*) sú tvorené substrátom, na ktorého prednej strane sa nachádza anténny prvok a zadnej strane zemná plocha. Anténne prvky sú tvorené obdĺžnikovými, štvorcovými alebo kruhovými kusmi mikropásky – tenkej metalickej fólie. Výhodou mikropáskových fliačkových antén je ich nízky profil (Obr. 5) a ľahká reprodukovateľnosť daná technológiou výroby, ktorá je rovnaká ako pri výrobe dosiek plošných spojov. Často sú mikropáskové antény priamo integrované na doske plošného spoja.

Základný model fliačkových antén poskytuje lineárnu polarizáciu vyžiareného vlnenia. Kruhovú polarizáciu antény sa dá pomerne ľahko dosiahnuť úpravou základného modelu fliačkových antén a to viacerými spôsobmi (Obr. 4): diagonálnym napájaním fliačku, skosením dvoch protilahlých vrcholov fliačku, napájaním fliačku dvomi ortogonálnymi portmi s fázovým posunom 90° , prípadne tenkou štrbinou vo fliačku [5].



Obr. 4: Spôsoby kruhovej polarizácie mikropáskových fliačkových antén [5]



Obr. 5: Ortogonálne napájaná, kruhovo polarizovaná fliačková anténa CubeSatu MarCO [5]

Z hľadiska zisku a smerovosti sú fliačkové antény skôr nízkoziskové (okolo 5 až 7 dBi), s jednosmerným vyžarovaním v smere kolmom na povrch samotnej antény, ale s pomerne veľkou šírkou hlavného zväzku.

3.2 Dipólové a monopólové antény

Dipólové a monopólové antény patria z hľadiska návrhu medzi najjednoduchšie antény. Polvlnné dipólové antény sú tvorené rovným vodičom s dĺžkou približne polovice vlnovej dĺžky v strede rozdelenom napájacou štrbinou. Monopólové antény sú tvorené jedným pólom dipólovej antény, teda vodičom s dĺžkou štvrtiny vlnovej dĺžky umiestnenej nad zemnou plochou. Oba tieto typy sú lineárne polarizované. Skrížením dvoch dipólových antén a napájaním jedného z týchto dipólov signálom s fázovým posunom 90° je možné dosiahnuť kruhovú polarizáciu antény v smere kolmom na obe tieto antény. Pre použitie na satelitoch CubeSat sa stávajú populárne taktiež rovinné dipólové a monopólové antény, ktorých výhodou je nízky profil [3]. Okrem monopólových a polvlnných dipólových antén patria k tomuto druhu antén taktiež skladané dipólové antény tvorené uzavretou slučkou na rozdiel od otvoreného vodiča pri klasickom dipóle. Tie sú z hľadiska smerových charakteristík rovnaké ako klasický dipól, odlišujú sa len impedanciou antény [11].

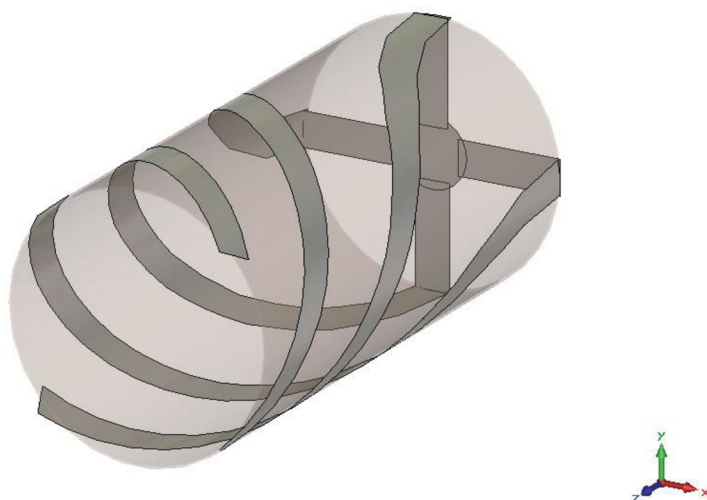
Z hľadiska vyžarovania sú dipólové antény v rovine H typicky všesmerové, v rovine E v smeroch osi dipólu anténa nevyžaruje. Zisk dipólových antén je nízky, pohybuje sa okolo 2 až 3 dBi.

3.3 Špirálové antény

Špirálové antény sú antény tvorené závitnicami z vodičov. Podľa dĺžky a princípu ich fungovania sa špirálové antény delia na krátke a dlhé. Krátke špirálové kvadrifilárne antény využívajú rezonančnú podstatu vyžarovania vlny a sú tvorené štyrmi štvrtinovými alebo polovičnými závitmi. Nakoľko sa pri tomto type využíva spätné vyžarovanie, sú napájané z prednej strany antény. Z hľadiska rozmerov sú kompaktné a vhodné pre malé satelity, v smere osi antény sú kruhovo polarizované, majú oveľa užšie pásmo a pomerne širokú vyžarovaciu charakteristiku oproti dlhým špirálovým anténam [12].

Dlhé špirálové antény naopak fungujú na podstate postupnej vlny. Monofilárne špirálové antény sú tvorené jednou závitnicou a potrebujú pre svoje fungovanie zemnú plochu, dlhé kvadrifilárne antény môžu byť navrhnuté aj bez nej. Z hľadiska rozmerov, ako už z názvu vyplýva sú väčšie a majú vysoký profil, teda sú menej vhodné pre použitie na malých satelitoch, nakoľko vyžadujú rozkladací mechanizmus. Vyznačujú sa širokým pásmom, ich zisk a smerovosť je závislá na počte závitov [5], zvyšovaním ich počtu dochádza k zužovaniu smerovej charakteristiky a potlačeniu bočných lalokov. Pre zlepšenie vlastností bez zmeny celkovej dĺžky antény sa často namiesto monofilárnej volí bifilárna alebo kvadrifilárna konfigurácia (Obr. 6).

Kvadrifilárne antény sú napájané s 90° fázovou postupnosťou pričom záleží na smere postupnosti. Pri pravotočivej špirálovej anténe a postupnosti v smere hodinových ručičiek má anténa predné vyžarovanie, pri postupnosti proti smeru hodinových ručičiek má spätné vyžarovanie, pri ľavotočivej anténe to platí naopak. Pri spätnom vyžarovaní antény sa uplatňuje zemná plocha, ktorá odráža vlnenie do predného smeru a rotácia kruhovej polarizácie je zhodná s rotáciou závitov antény, ktorá je za normálnych okolností opačná ako rotácia závitov nezávisle na smere postupného fázového posunu napájania [12].

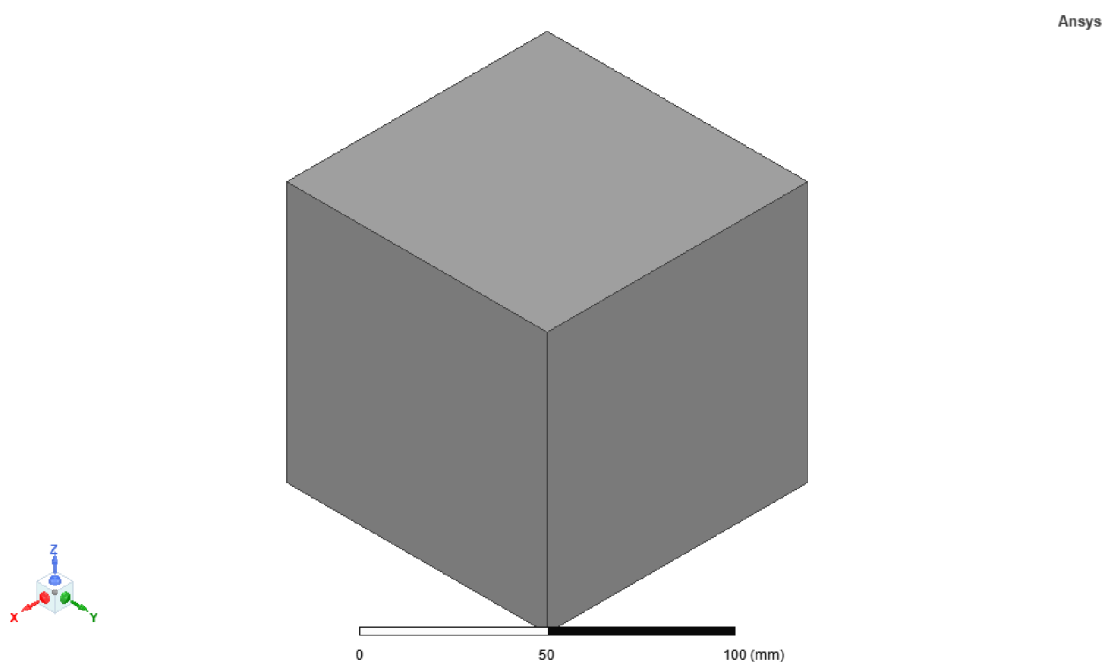


Obr. 6: Kvadrifilárna špirálová anténa [12]

4. MODELÝ ANTÉN V PROGRAME HFSS

V programe ANSYS HFSS boli vytvorené modely antén troch typov: polvlnná dipólová anténa, fľačková anténa so skosenými rohmi a anténa QFH (quadrifilar helix), ktorých výsledky simulácií budú prebrané v nasledujúcich podkapitolách. Všetky antény boli modelované pre dosiahnutie rezonančnej frekvencie 2,4 GHz, pre ktorú sú vytvorené aj smerové charakteristiky jednotlivých antén. Pri každej anténe boli preskúmané viaceré možnosti umiestnenia antény vzhľadom ku kostre družice a z nich zvolené tri najpoužiteľnejšie z hľadiska charakteristík antény, predovšetkým smerových charakteristík. Pri polvlnnej dipólovej anténe bola najoptimálnejšia vzdialenosť antény od kostry satelitu zistená parametrickým rozmetaním tejto vzdialenosti a hľadaním takej hodnoty, ktorá by poskytovala najlepšie výsledky v oboch sledovaných charakteristikách (činiteľ odrazu a vyžarovacie charakteristiky) pri danej orientácii a umiestnení. Pri fľačkovej anténe so skosenými rohmi bola východným umiestnením antény umiestnená na stene kostry satelitu a z nej vychádzajúce vyklopenia tejto antény (okolo hrany antény pri umiestnení v strede steny a okolo hrany kostry satelitu pri maximálnom posunutí k jednej z hrán steny kostry satelitu). Pri anténe QFH bola zvolená vzdialenosť zistená jej rozmetaním a hľadaním najmenej vzdialenosti, pri ktorej ešte nedošlo k výraznému zhoršeniu charakteristík antény.

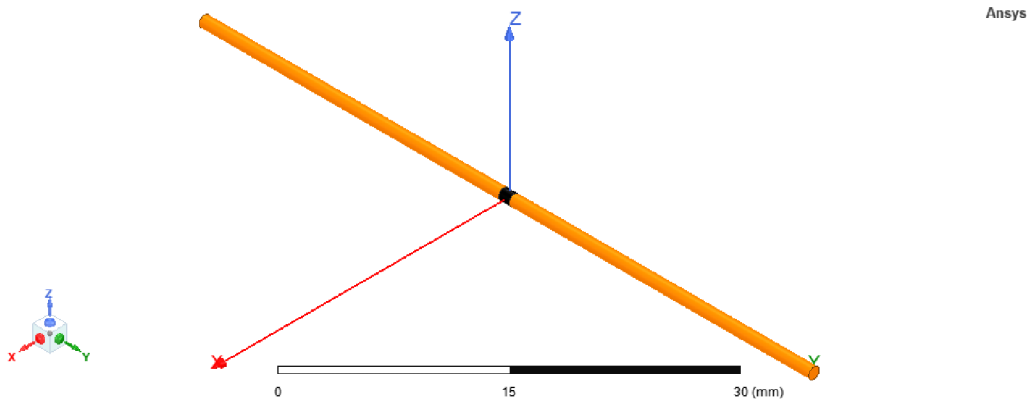
Pre simuláciu vplyvov kostry satelitu na charakteristiky antén bol vytvorený model dutej kocky s rozmermi 1U CubeSatu 10 x 10 x 10 cm (Obr. 7), tvorený materiálom s dokonalou elektrickou vodivosťou (v ANSYS HFSS: *pec* z knižnice *Materials*) s hrúbkou materiálu 5 mm.



Obr. 7: Model kostry satelitu CubeSat v programe HFSS

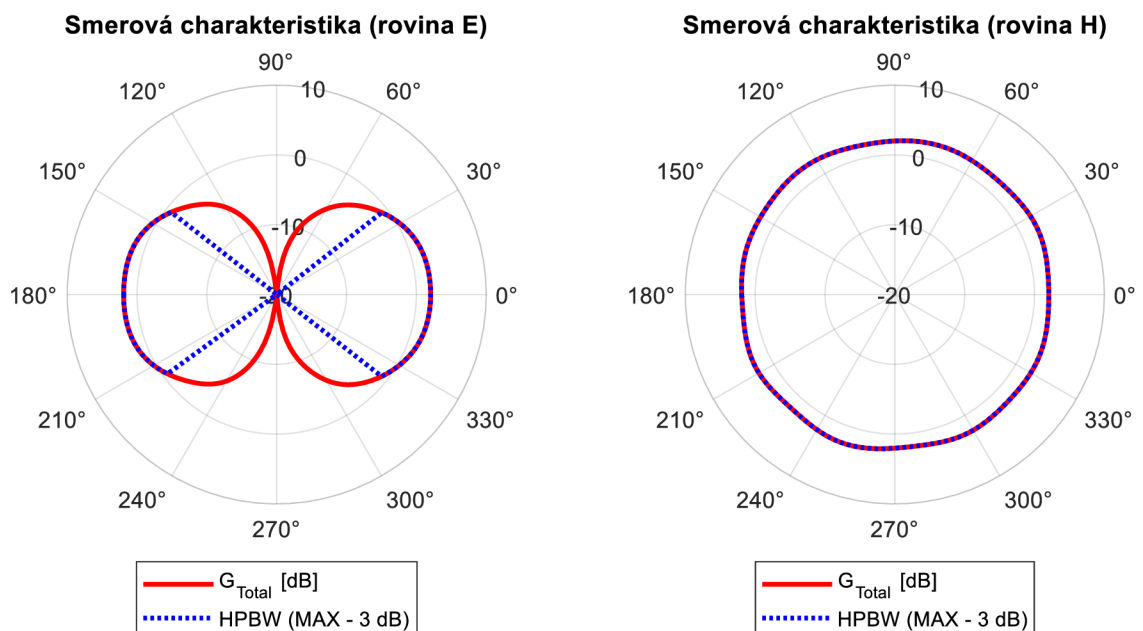
4.1 Dipólová anténa

Prvým modelovaným typom antény v programe ANSYS HFSS bola polvlnná dipólová anténa. Jej model bol tvorený dvoma ramenami (Obr. 8) tvorenými materiálom s dokonalou elektrickou vodivosťou (v ANSYS HFSS: *pec* z knižnice *Materials*), oddelenými napájacou medzerou so šírkou 1 mm. Celková dĺžka antény bola 57 mm a priemer použitého vodiča bol 1 mm. Nakoľko však dochádzalo pri zmene polohy antény voči kostre družice k výraznej (až 10%) zmene rezonančnej frekvencie, pre jednotlivé simulované umiestnenia antény boli použité rôzne dĺžky dipólu.



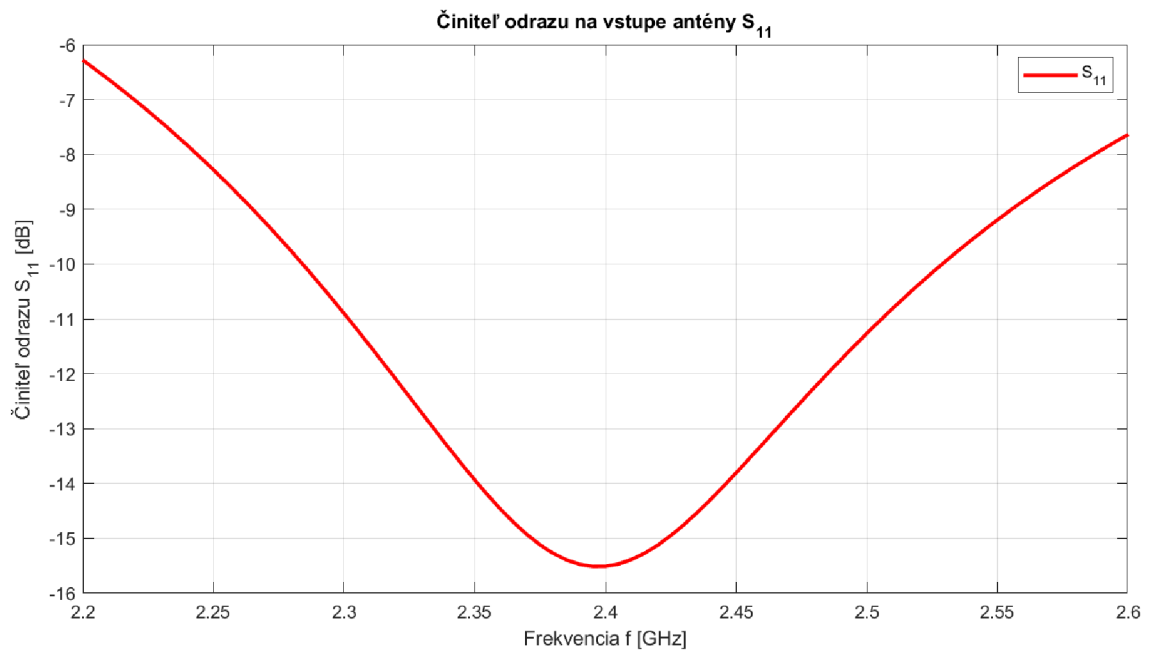
Obr. 8: Výsledná podoba modelu navrhnujej polvlnnej dipólovej antény

Na zobrazených smerových charakteristikách (Obr. 9) je pozorovateľné vyžarovanie zhodné s teoretickým vyžarovaním dipólu, teda v rovine H je vyžarovanie všesmerové, pri rovine E je potlačené vyžarovanie v smere osi dipólovej antény. Vyžarovací uhol v rovine E je 76° v jednom smere. Maximálny zisk je 2,55 dBi.



Obr. 9: Smerové charakteristiky zisku samotnej dipólovej antény

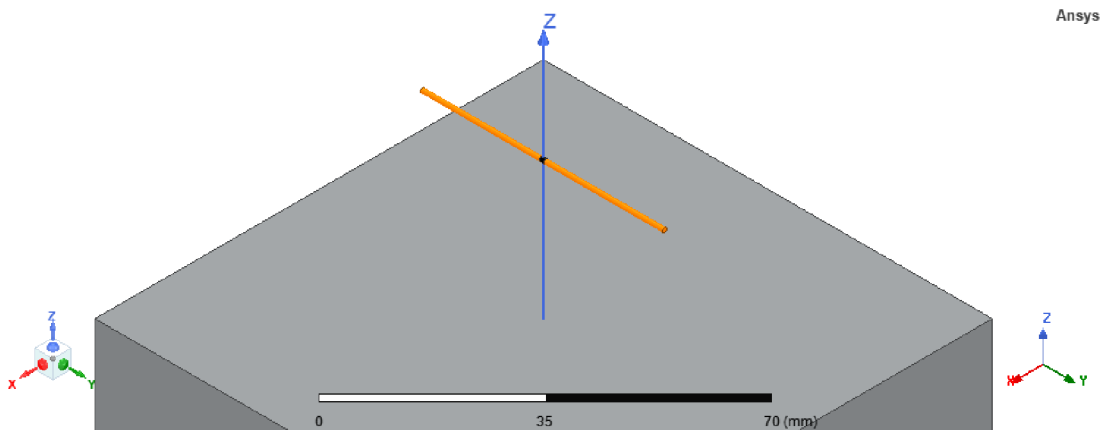
Na zobrazenej frekvenčnej charakteristike činiteľu odrazu (Obr. 10) je minimálna hodnota činiteľu odrazu -15,51 dB pri frekvencii 2,4 GHz.



Obr. 10: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu samotnej dipólovej antény

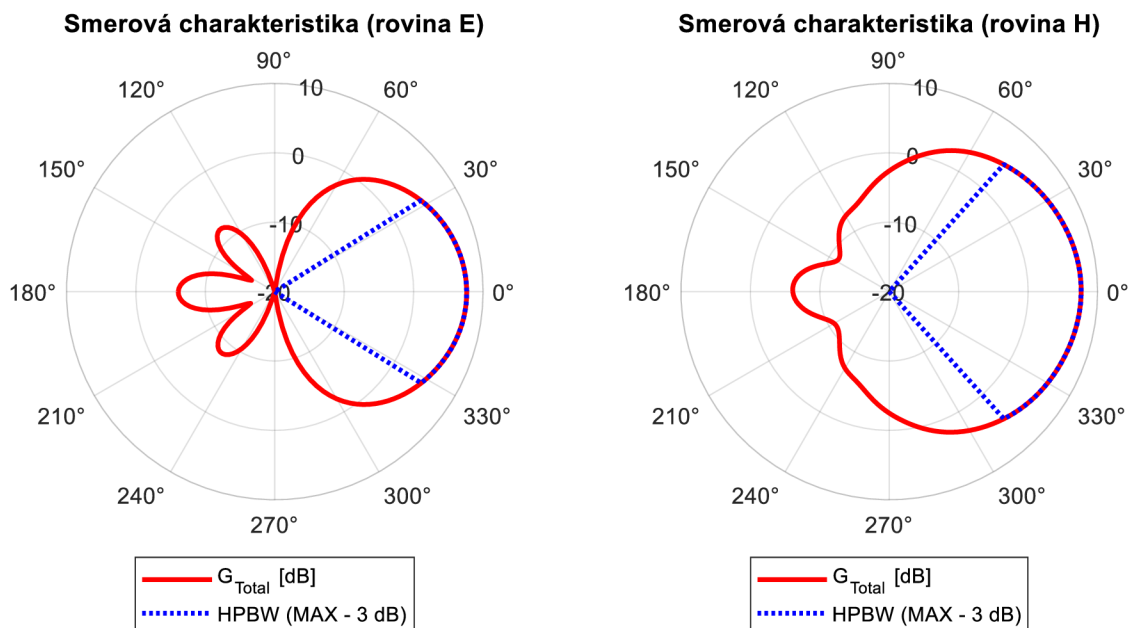
4.1.1 Umiestnenie dipólovej antény nad stredom steny rovnobežne s povrchom

V tomto umiestnení bola dĺžka dipólovej antény 54 mm. Anténa bola umiestnená centrálné vzhľadom k stene kostry družice (Obr. 11) vo vzdialenosti 30,6 mm (približne $\lambda/4$) nad jej povrchom. Os dipólu bola rovnobežná so stenou kostry.



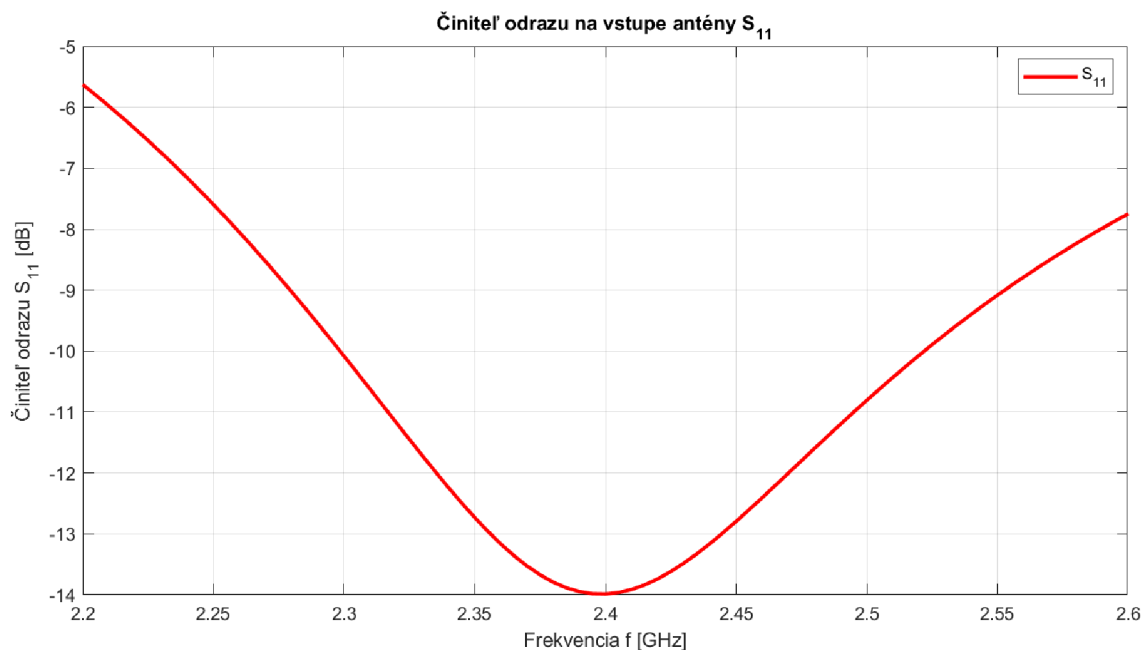
Obr. 11: Umiestnenie dipólovej antény nad stredom steny rovnobežne s povrchom

Zo zobrazenej smerovej charakteristiky (Obr. 12) vyplýva výrazná zmena vyžarovacej charakteristiky oproti samotnej dipólovej anténe, ktorá je v tomto prípade sústredená do jedného smeru. V rovine E je vyžarovací uhol 64° a v rovine H 96° . Maximálny zisk antény je 7,64 dBi.



Obr. 12: Smerové charakteristiky zisku dipólovej antény v umiestnení nad stredom steny rovnobežne s povrchom

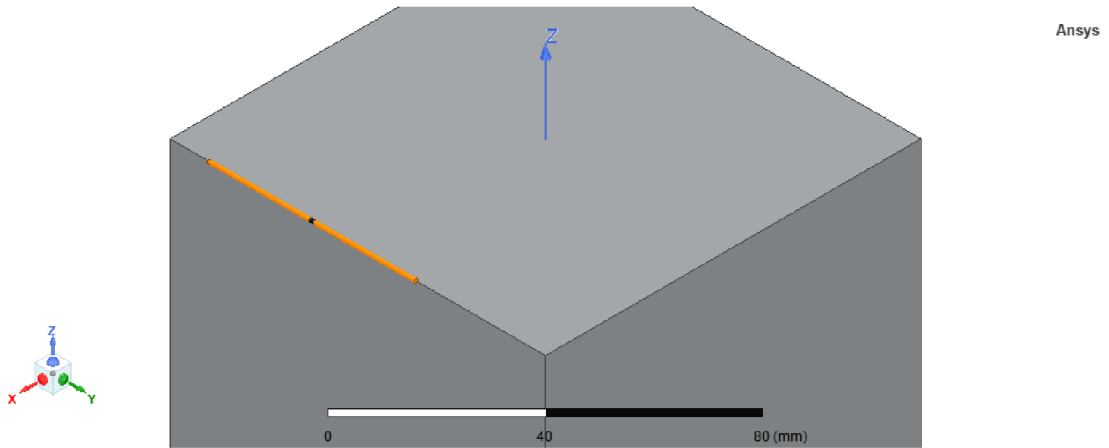
Zo zobrazenej frekvenčnej charakteristiky činiteľu odrazu (Obr. 13) vyplýva mierne zvýšenie minimálnej hodnoty činiteľu odrazu oproti samotnej anténe na $-13,98$ dB pri frekvencii $2,4$ GHz.



Obr. 13: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu dipólovej antény v umiestnení nad stredom steny rovnobežne s povrchom

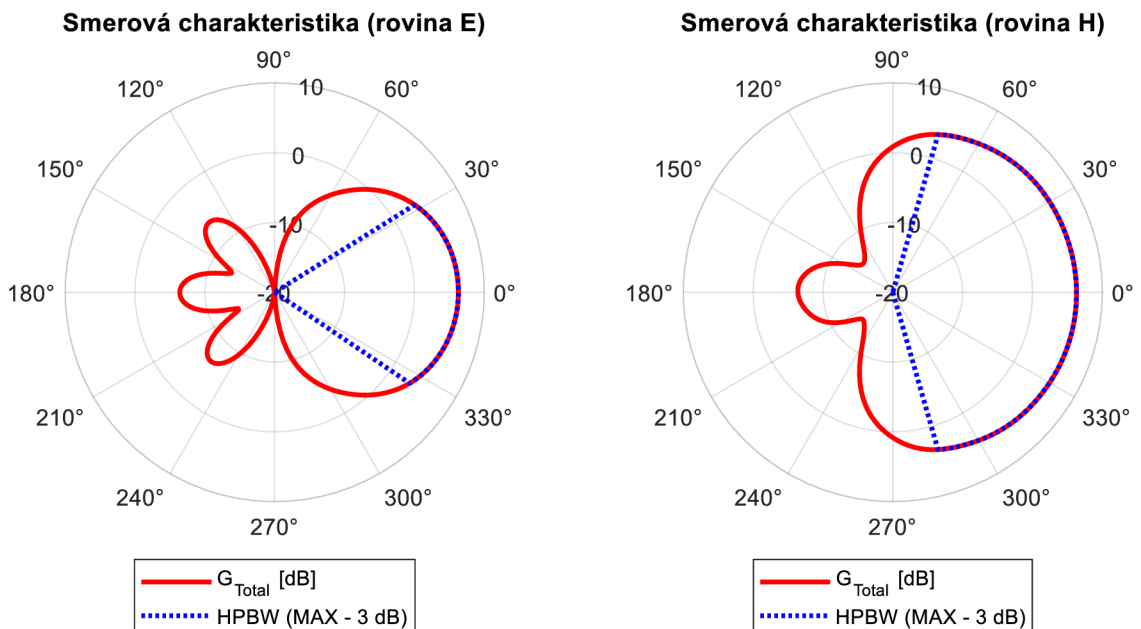
4.1.2 Umiestnenie dipólovej antény rovnobežne s hranou kostry

V tomto umiestnení bola dĺžka dipólovej antény 55 mm. Anténa bola umiestnená nad stredom hrany kostry satelitu (Obr. 14) vo vzdialenosti 17 mm nad jej povrchom, jej os bola rovnobežná s hranou kostry a kolmá na spojnicu stred kostry – stred hrany.



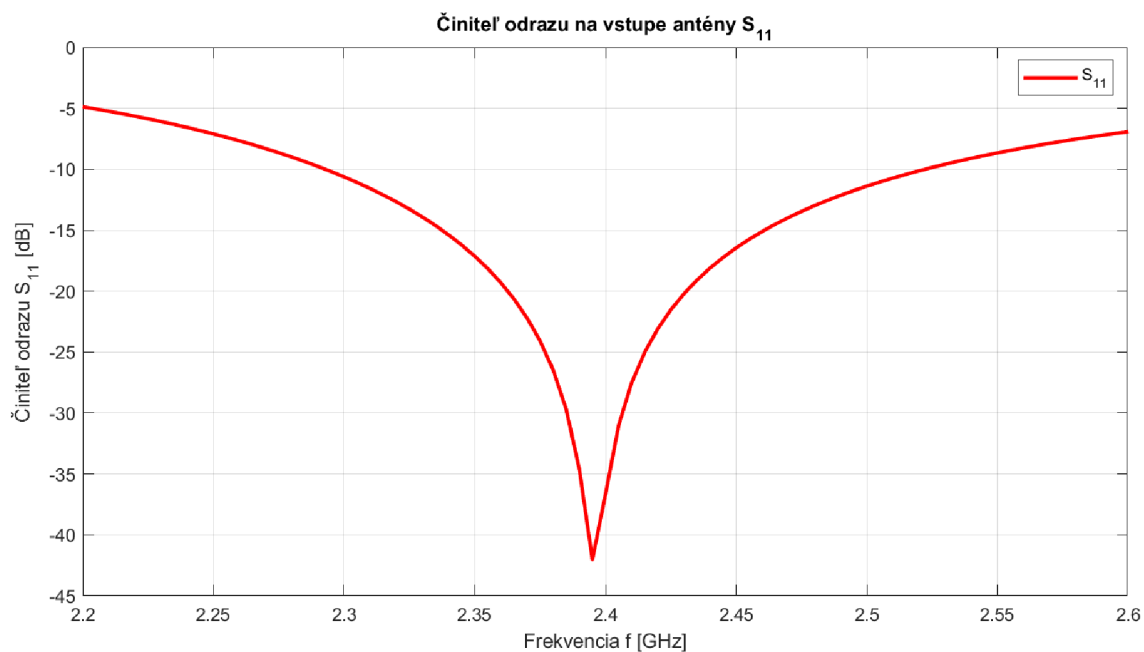
Obr. 14: Umiestnenie dipólovej antény rovnobežne s hranou kostry

Zo zobrazenej smerovej charakteristiky (Obr. 15) vyplýva opäť jednosmerné vyžarovanie antény s vyžarovacím uhlom 66° v rovine E a 148° v rovine H. Maximálny zisk antény je 6,30 dBi.



Obr. 15: Smerové charakteristiky zisku dipólovej antény v umiestnení rovnobežnom s hranou kostry

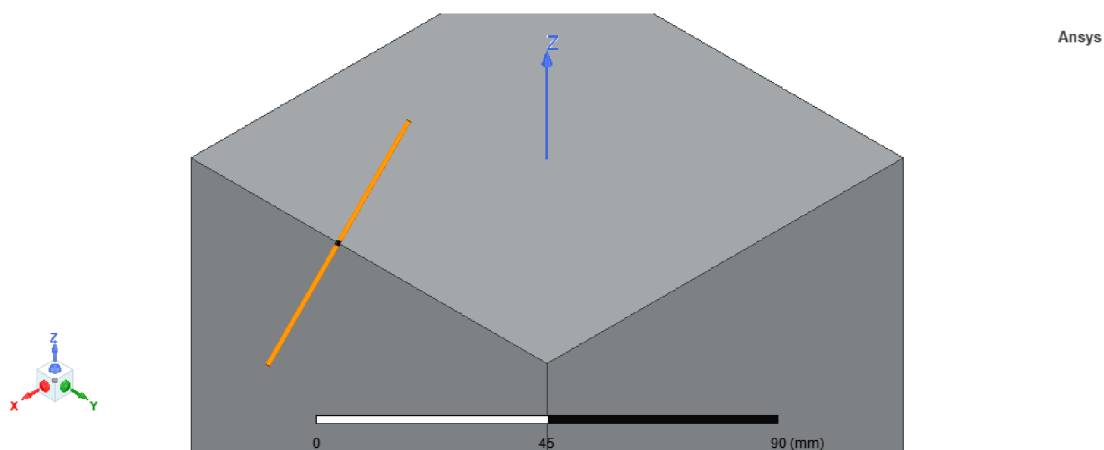
Na zobrazenej frekvenčnej charakteristike činiteľa odrazu (Obr. 16) je minimálna hodnota činiteľa odrazu -42 dB pri frekvencii 2,395 GHz.



Obr. 16: Frekvenčná charakteristika činiteľa odrazu dipólovej antény v umiestnení rovnobežne s hranou kostry

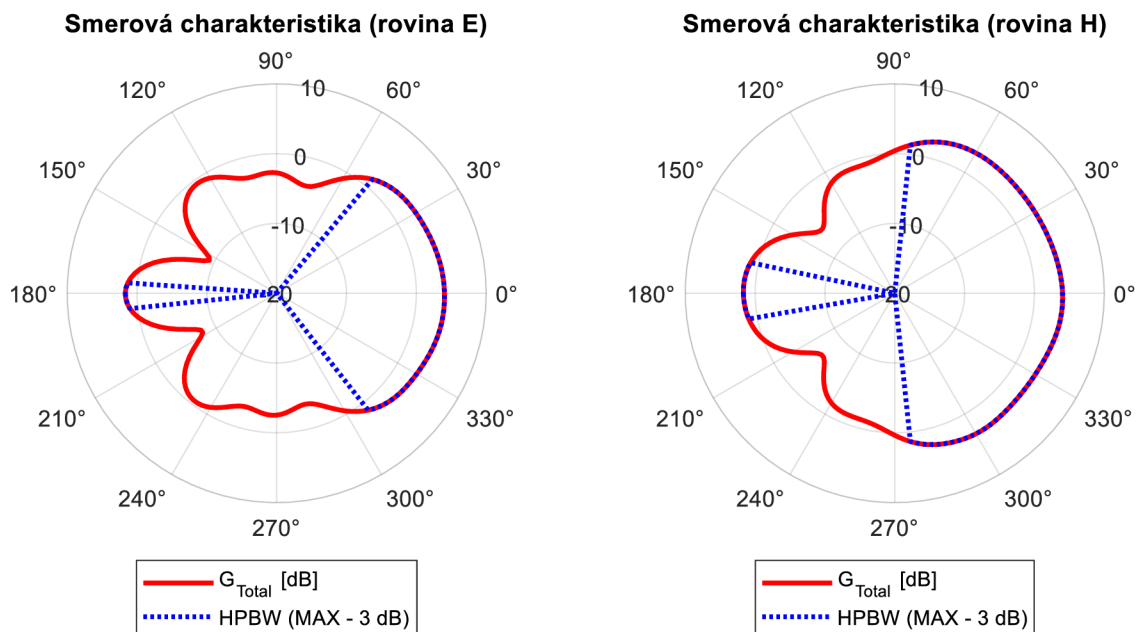
4.1.3 Umiestnenie dipólovej antény kolmo na hranu kostry

V tomto umiestnení bola dĺžka dipólovej antény 56 mm. Anténa bola umiestnená nad stredom hrany kostry satelitu (Obr. 17) vo vzdialenosti 12,2 mm nad jej povrchom, jej os bola kolmá na hranu kostry a na spojnicu stred kostry – stred hrany.



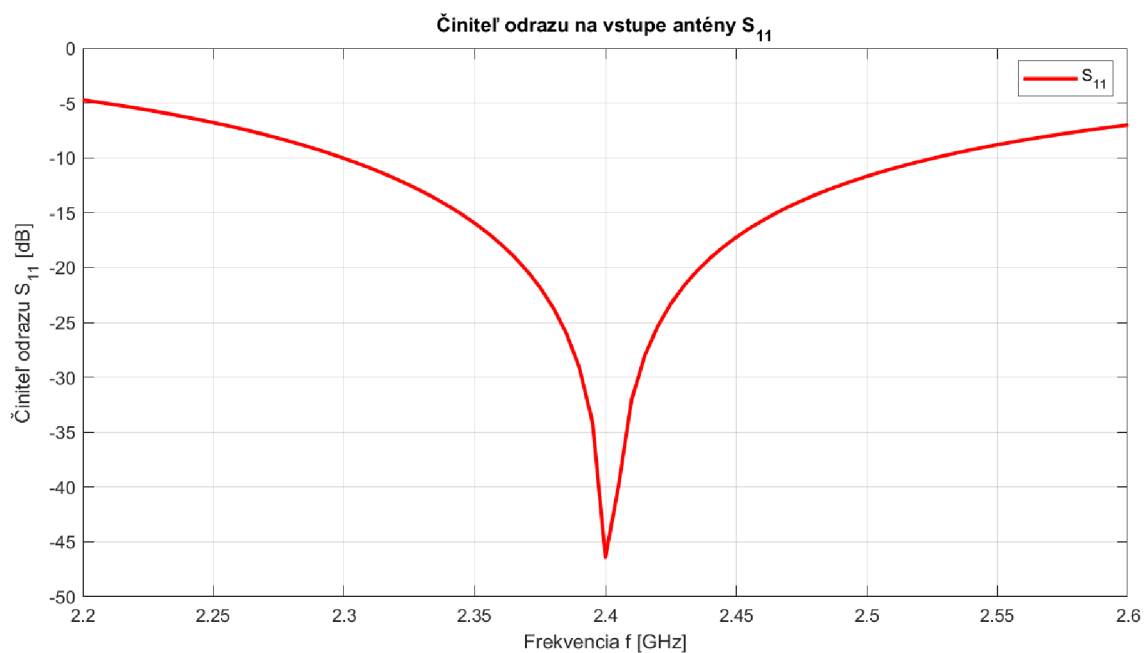
Obr. 17: Umiestnenie dipólovej antény kolmo na hranu kostry

Zo smerových charakteristík (Obr. 18) vyplýva pomerne veľký vyžarovací uhol antény v oboch rovinách, 102° v rovine E a 168° v rovine H v hlavnom smere, avšak v tejto konfigurácii anténa výrazne vyžaruje aj do zadného smeru. Maximálny zisk antény je 4,05 dBi.



Obr. 18: Smerové charakteristiky zisku dipólovej antény v umiestnení kolmo na hranu kostry

Na zobrazenej frekvenčnej charakteristike činiteľu odrazu (Obr. 19) je minimálna hodnota činiteľ odrazu -46,42 dB pri frekvencii 2,4 GHz.



Obr. 19: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu dipólovej antény v umiestnení kolmo na hranu kostry

4.1.4 Ďalšie skúmané umiestnenia dipólovej antény

Okrem troch vyššie zhodnotených umiestnení dipólovej antény bolo preskúmaných šesť ďalších umiestnení voči kostre satelitu: kolmo na stenu kostry v jej strede, rovnobežne so spojnicou stred hrany – stred kostry, kolmo na stenu kostry nad stredom jej hrany, kolmo na spojnicu stred kostry – vrchol kostry rovnobežne s hranou steny, rovnobežne so spojnicou vrchol kostry – stred kostry a kolmo na stenu nad rohom.

Pri týchto umiestneniach sa však jednalo len o klasické vyžarovacie charakteristiky dipólovej antény viac či menej deformované vplyvom kostry satelitu, s vyžarovaním rozptýleným do niekoľkých zväzkov, preto neboli podrobnejšie rozobrané. Zvláštnosťou niektorých umiestnení však bolo vyžarovanie antény aj v smere osi dipólu, táto vlastnosť je pozorovateľná aj v prípade umiestnenia dipólovej antény popísaného v časti 4.1.3.

4.2 Fliačková anténa so skosenými protiľahlými rohmi

Druhým typom antény modelovanej a simulovanej v programe ANSYS HFSS bola pravotočivo kruhovo polarizovaná (RHCP) fliačková anténa so skosenými protiľahlými rohmi (Obr. 20) napájaná jedným napájacím portom. Počiatočné rozmery fliačkovej antény boli vypočítané pomocou vzťahov [13]:

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r + 1}}, \quad (7)$$

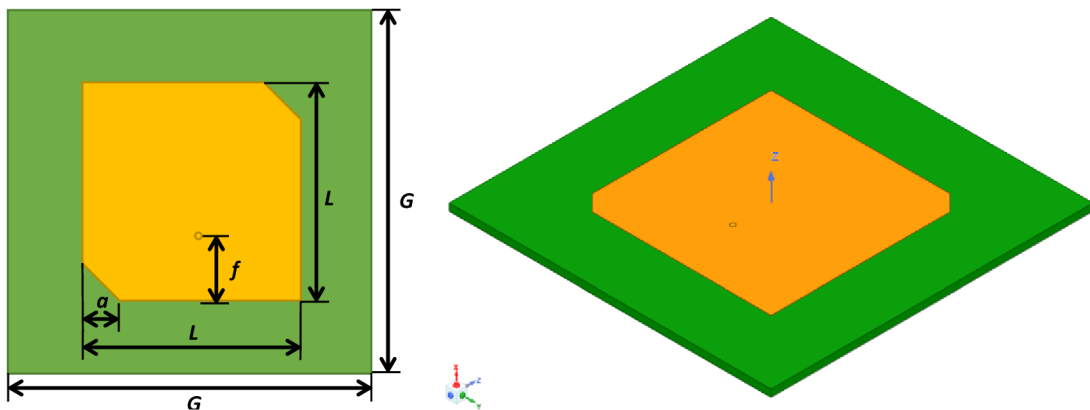
$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\varepsilon_{ef}}} - 2\Delta L, \quad (8)$$

kde W je šírka fliačku [m], L je dĺžka fliačku [m], c je rýchlosť svetla vo vákuu [m/s], f_r je rezonančná frekvencia [Hz], ε_r je relatívna permitivita materiálu substrátu [-], ε_{ef} je efektívna permitivita materiálu substrátu [-] a ΔL predĺženie fliačku [m] vypočítané pomocou vzťahov:

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{12h}{W}}}, \quad (9)$$

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\varepsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264\right)}{(\varepsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8\right)}, \quad (10)$$

kde h je hrúbka materiálu substrátu [m]. Výsledné rozmery sú uvedené v tab. 3. Model antény bol tvorený materiálom *Arlon CuClad 217* ($h = 1,524$ mm, $\varepsilon_r = 2,17$) ako substrátom a materiálom s dokonalou elektrickou vodivosťou (v ANSYS HFSS: *pec* z knižnice *Materials*) ako materiálom vodivého vzoru s hrúbkou 35 μm .



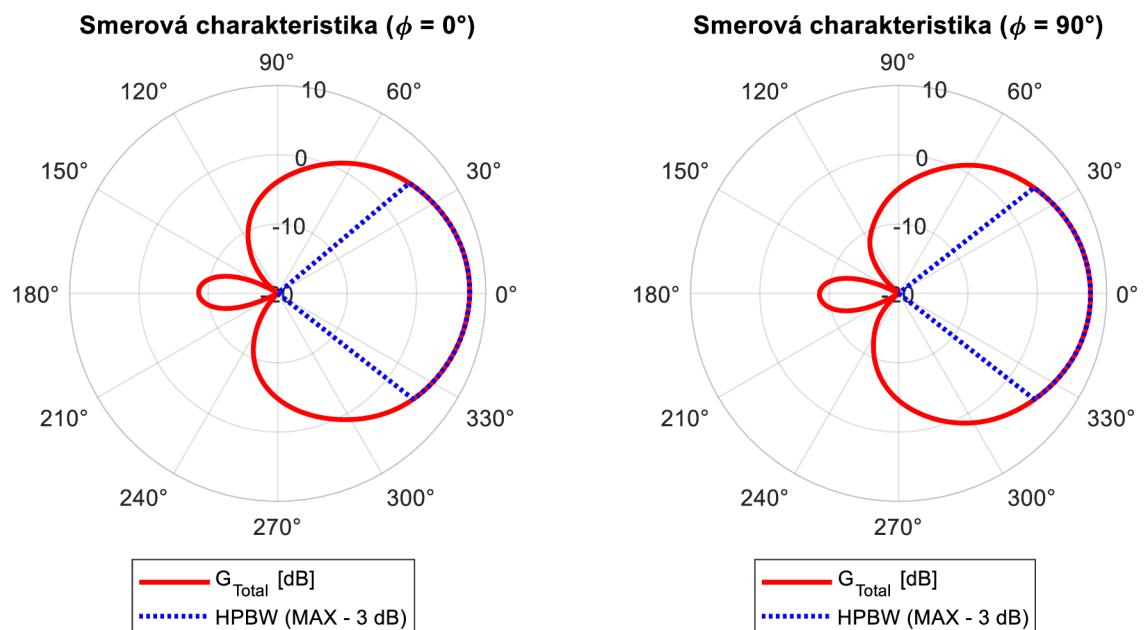
Obr. 20: Výsledná podoba modelu navrhnujetej fliačkovej antény v programe ANSYS HFSS

Rozmery modelu antény sú pre všetky simulované umiestnenia rovnaké.

Tab. 3: Výsledné rozmery modelu navrhnujetej fliačkovej antény so skosenými rohmi

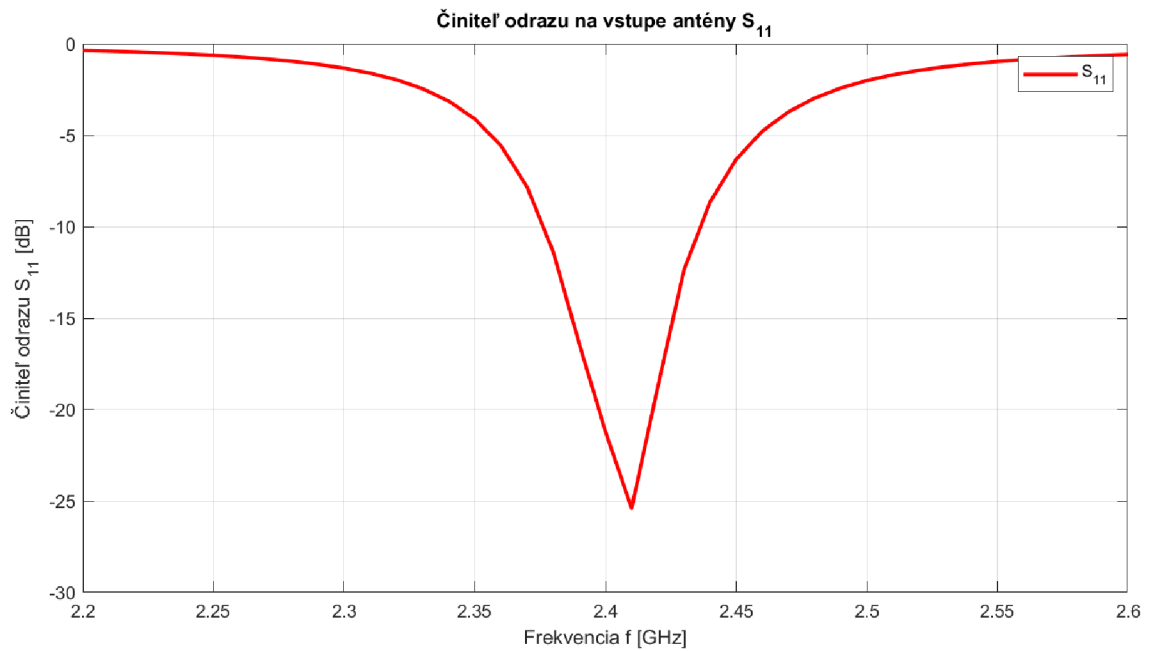
| | |
|--|----------|
| Dĺžka a šírka fliačka L | 40,53 mm |
| Rozmery substrátu a zemnej dosky G | 67,50 mm |
| Dĺžka odvesny skoseného rohu a | 3,38 mm |
| Vzdialenosť napájacieho portu od spodnej hrany fliačku f | 12,27 mm |

Na zobrazených smerových charakteristikách (Obr. 21) je pozorovateľný vyžarovací uhol 78° v rovine $\phi = 0^\circ$ a 76° v rovine $\phi = 90^\circ$. Vyžarovací uhol je centrováný okolo hlavného smeru vyžarovania. Maximálny zisk antény je 7,66 dBi.



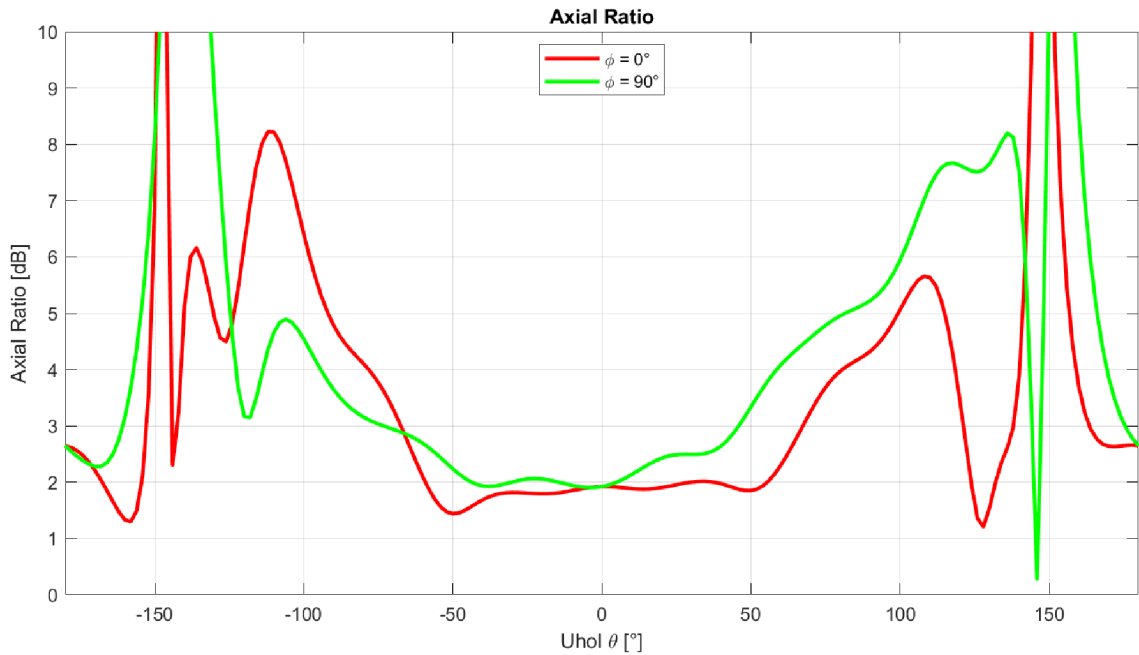
Obr. 21: Smerové charakteristiky zisku samotnej fliačkovej antény

Na zobrazenej frekvenčnej charakteristike činiteľu odrazu (Obr. 22) je pozorovateľná pomerne nízka hodnota minimálnej hodnoty činiteľu odrazu -25,4 dB na frekvencii 2,41 GHz.



Obr. 22: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu samotnej fliáčkovej antény

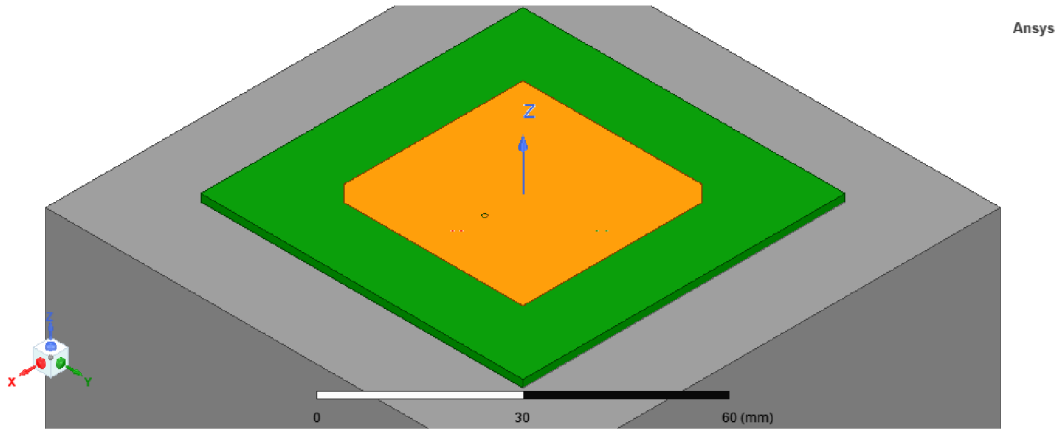
Na zobrazených smerových charakteristikách parametru AR (Obr. 23) je v hlavnom smere vyžarovania hodnota AR 1,92 dB. Minimálny rozsah, v ktorom je AR menšie ako 3 dB je 114° , avšak je značne narušené centrovanie tohto rozsahu okolo hlavného smeru.



Obr. 23: Smerové charakteristiky parametru AR samotnej fliáčkovej antény

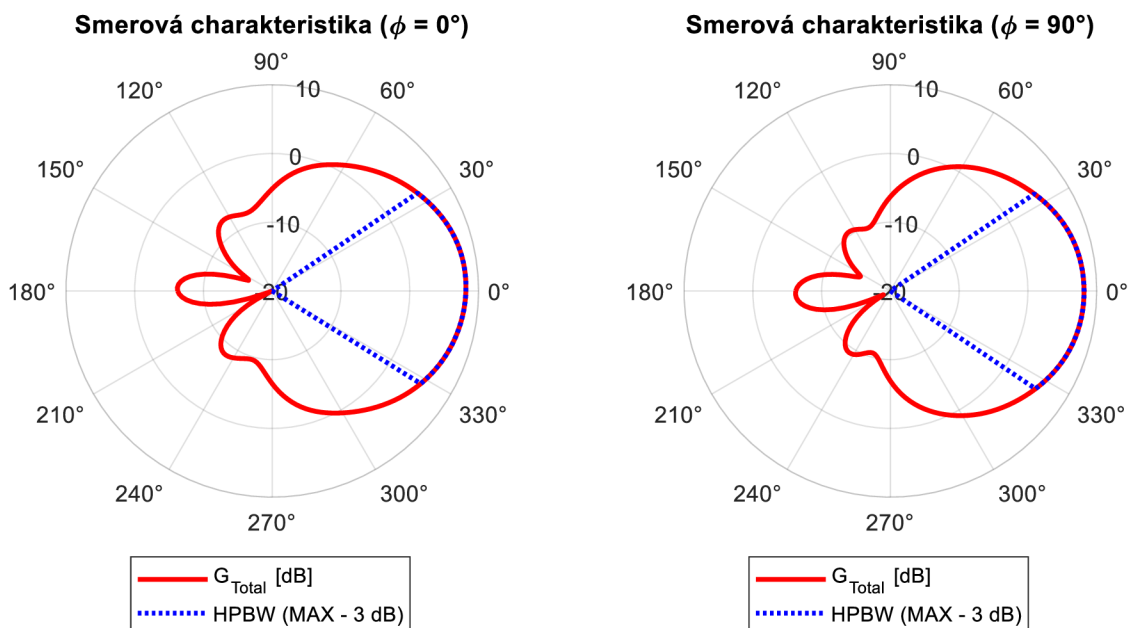
4.2.1 Umiestnenie fliáčkovej antény v strede steny kostry satelitu

V tomto umiestnení je fliáčková anténa so skosenými rohmi umiestená do stredu steny kostry satelitu (Obr. 24) vo vzdialenosti 1 mm od jej povrchu.



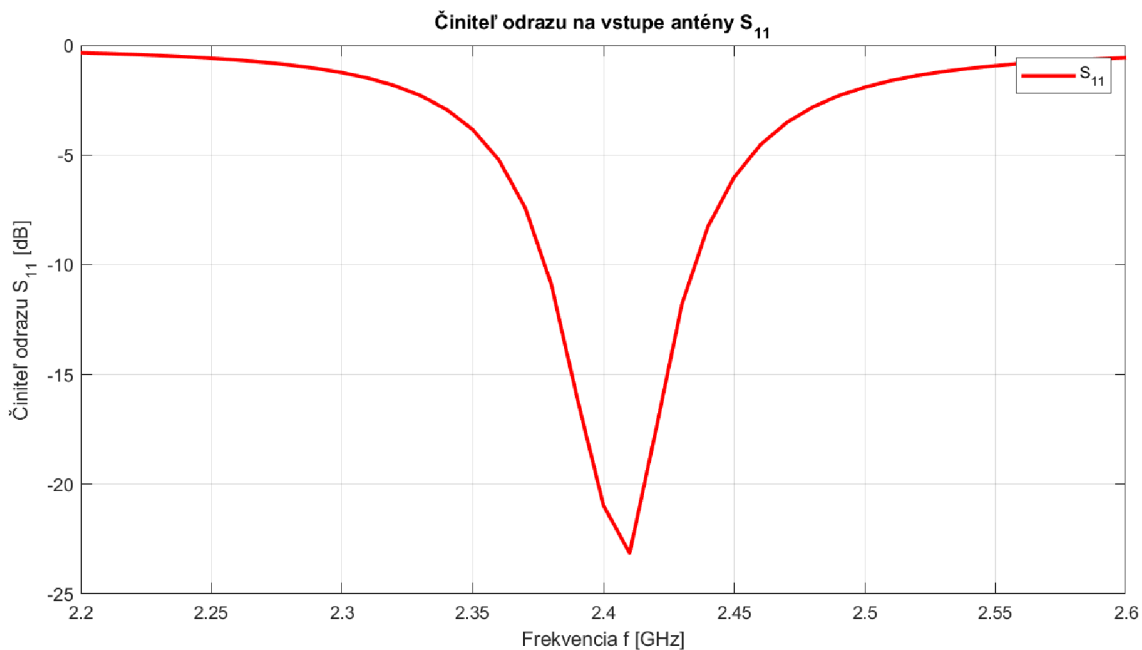
Obr. 24: Umiestnenie fliáčkovej antény v strede steny kostry satelitu

Zo zobrazených smerových charakteristík (Obr. 25) vyplýva výraznejšie zúženie vyžarovacieho uhlu oproti samotnej anténe na 66° v rovine $\phi = 0^\circ$ a 68° v rovine $\phi = 90^\circ$. Vyžarovací uhol si udržiava centrováný charakter okolo hlavného smeru. Maximálny zisk antény je 8,18 dBi.



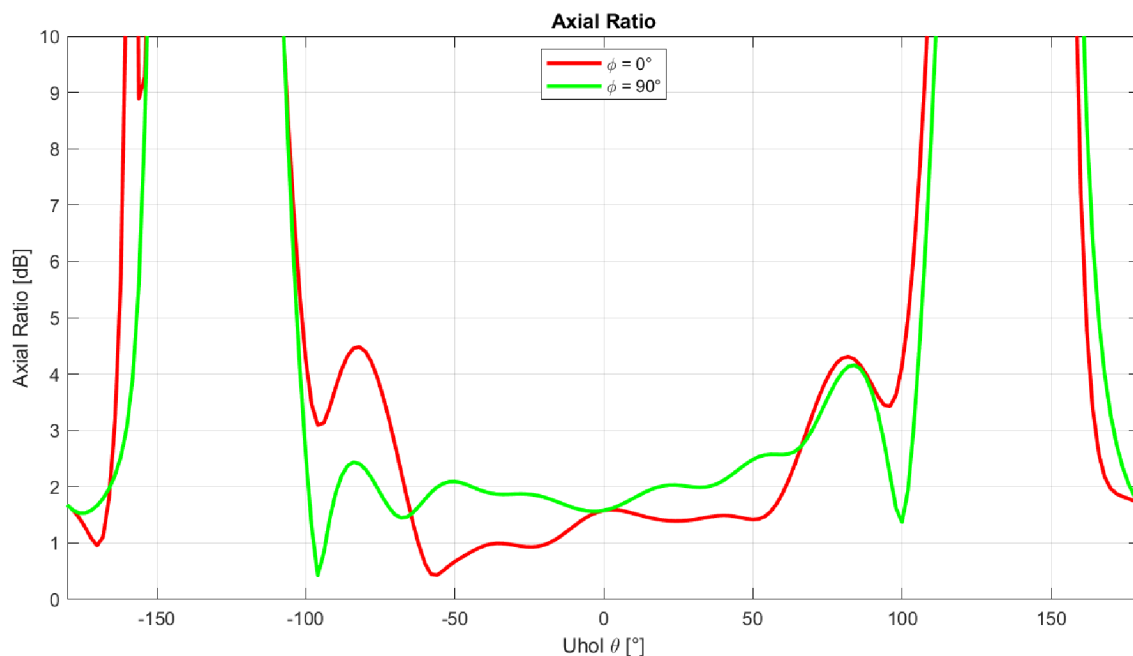
Obr. 25: Smerové charakteristiky zisku fliáčkovej antény v umiestnení v strede steny kostry satelitu

Zo zobrazenej frekvenčnej charakteristiky činiteľu odrazu (Obr. 26) vyplýva zvýšenie minimálnej hodnoty činiteľu odrazu oproti samotnej anténe na -23,14 dB pri frekvencii 2,41 GHz.



Obr. 26: Frekvenčná charakteristika činiteľa odrazu fľačkovej antény v umiestnení v strede steny kostry satelitu

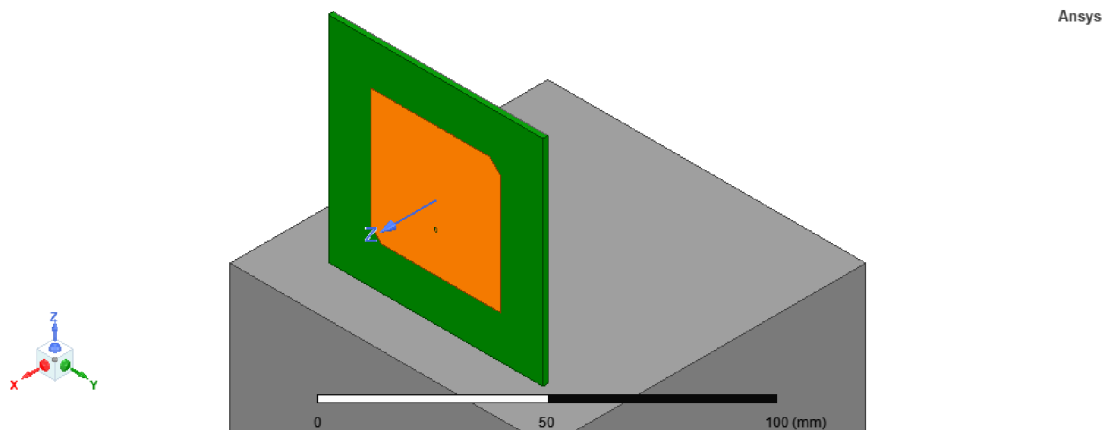
Zo zobrazených smerových charakteristík parametru AR (Obr. 27) vyplýva zlepšenie AR v hlavnom smere vyžarovania na 1,58 dB oproti samotnej anténe. Došlo taktiež k výraznému zväčšeniu rozsahu, v ktorom je AR menšie ako 3 dB na 138° . Tento rozsah je centrován okolo hlavného smeru.



Obr. 27: Smerové charakteristiky parametru AR fľačkovej antény v umiestnení v strede steny kostry satelitu

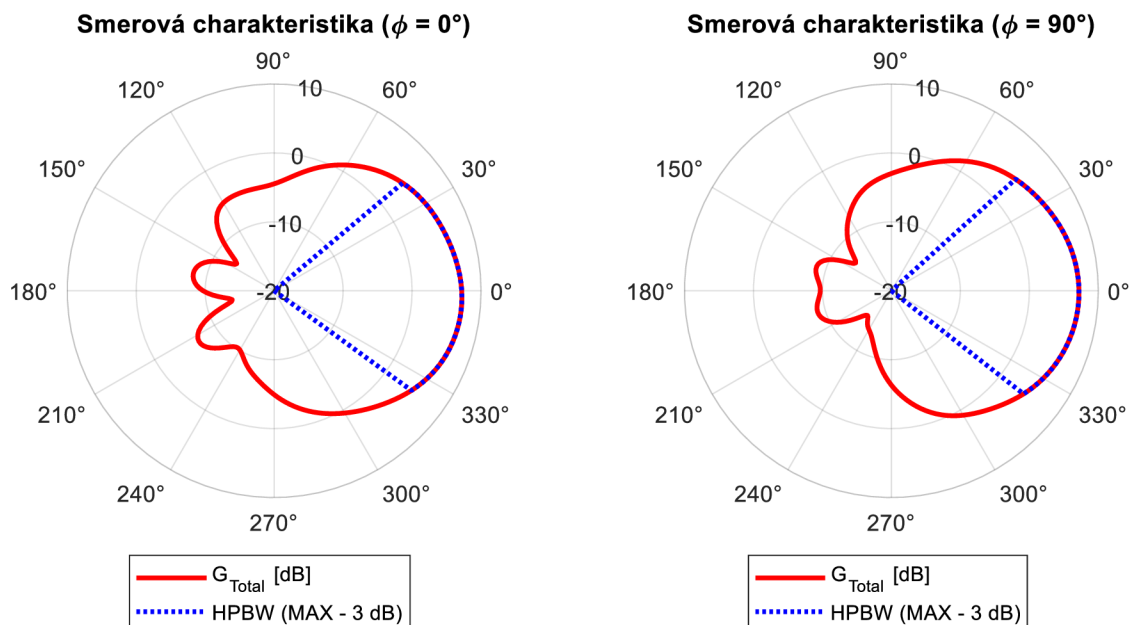
4.2.2 Vyklopenie fliáčkovej antény okolo jej hrany

V tomto umiestnení je fliáčková anténa vyklopená okolo svojej hrany kolmo na povrch steny kostry satelitu (Obr. 28). Vzďalenosť spodnej hrany antény od hrany kocky, nachádzajúcej sa pred rovinou antény, je 14,73 mm.



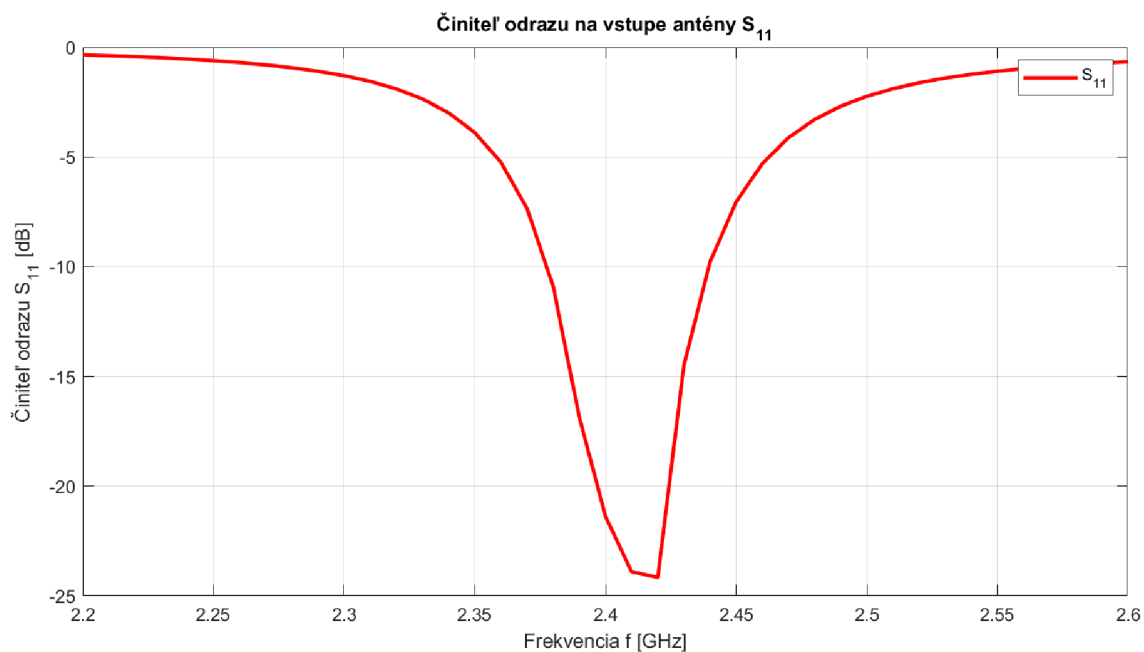
Obr. 28: Vyklopenie fliáčkovej antény okolo jej hrany

Zo zobrazených smerových charakteristík (Obr. 29) vyplýva minimálna zmena vyžarovacieho uhlu oproti samotnej anténe na 76° v rovine $\phi = 0^\circ$ a 78° v rovine $\phi = 90^\circ$. Mierne sa zhoršilo centrovanie vyžarovacieho uhlu okolo hlavného smeru. Maximálny zisk antény je 7,26 dBi.



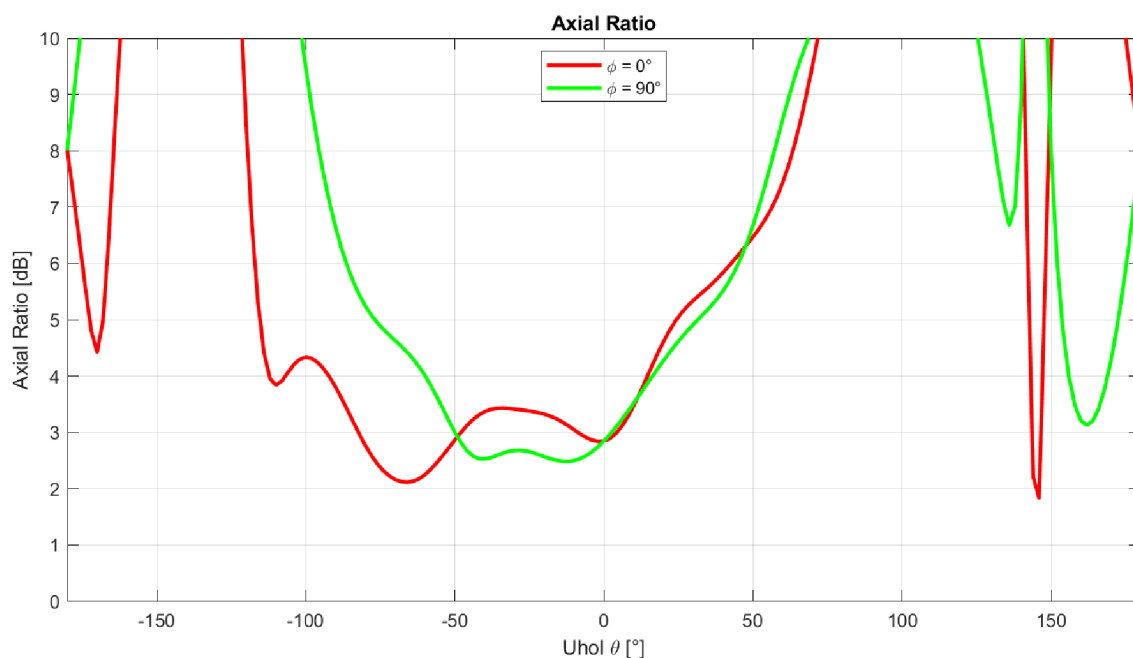
Obr. 29: Smerové charakteristiky zisku fliáčkovej antény vyklopenej okolo jej hrany

Zo zobrazenej frekvenčnej charakteristiky činiteľa odrazu (Obr. 30) vyplýva mierny posun rezonančnej frekvencie antény na 2,42 GHz s minimálnou hodnotou činiteľa odrazu -24,15 dB.



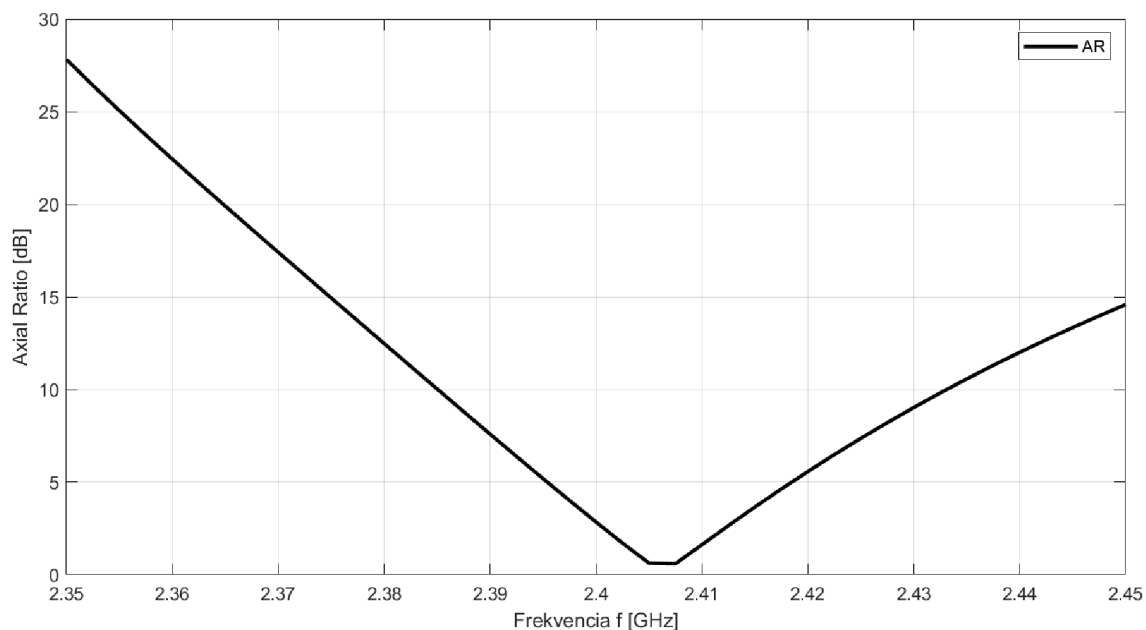
Obr. 30: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu fľačkovej antény vyklopenej okolo jej hrany

Zo smerových charakteristík parametru AR (Obr. 31) vyplýva výrazné zhoršenie tejto charakteristiky oproti samotnej anténe. Hodnota AR v hlavnom smere vyžarovania je 2,84 dB so šírkou rozsahu, v ktorom je AR menšie ako 3 dB 10° s výrazným narušením centrovania tohto rozsahu okolo hlavného smeru.



Obr. 31: Smerové charakteristiky parametru AR fľačkovej antény vyklopenej okolo jej hrany

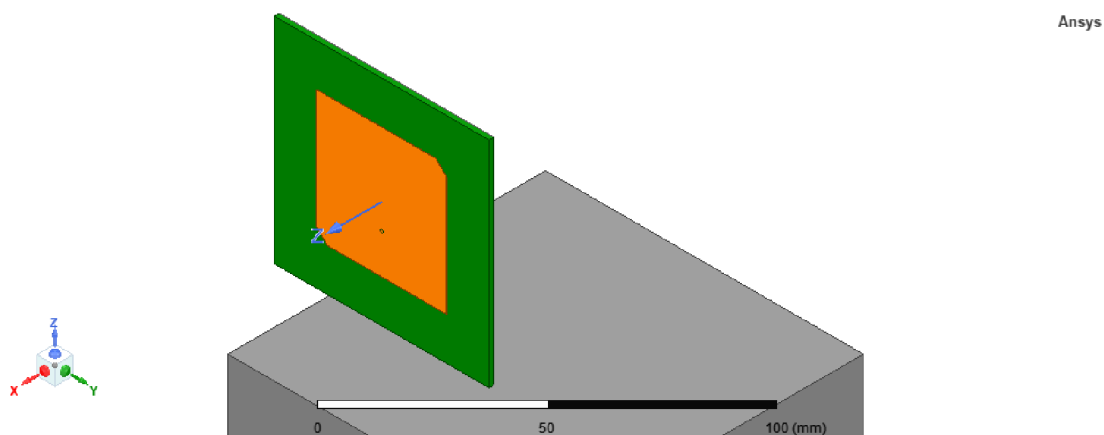
Nakoľko došlo k posunu rezonančnej frekvencie antény vo frekvenčnej charakteristike činiteľu odrazu, ako aj k zhoršeniu smerovej charakteristiky Axial Ratio, bola pre toto umiestnenie antény zobrazená aj frekvenčná charakteristika Axial Ratio (Obr. 32). Z nej vyplýva posun frekvencie, v ktorej je hodnota AR minimálna, na hodnotu 2,406 GHz. Nakoľko však má táto anténa pomerne úzke pásmo, v ktorom je AR menšie ako 3 dB, spôsobí aj takto malá zmena tejto frekvencie výraznú zmenu výslednej hodnoty AR v hlavnom smere vyžarovania.



Obr. 32: Frekvenčná charakteristika parametru AR fľačkovej antény vyklopenej okolo jej hrany

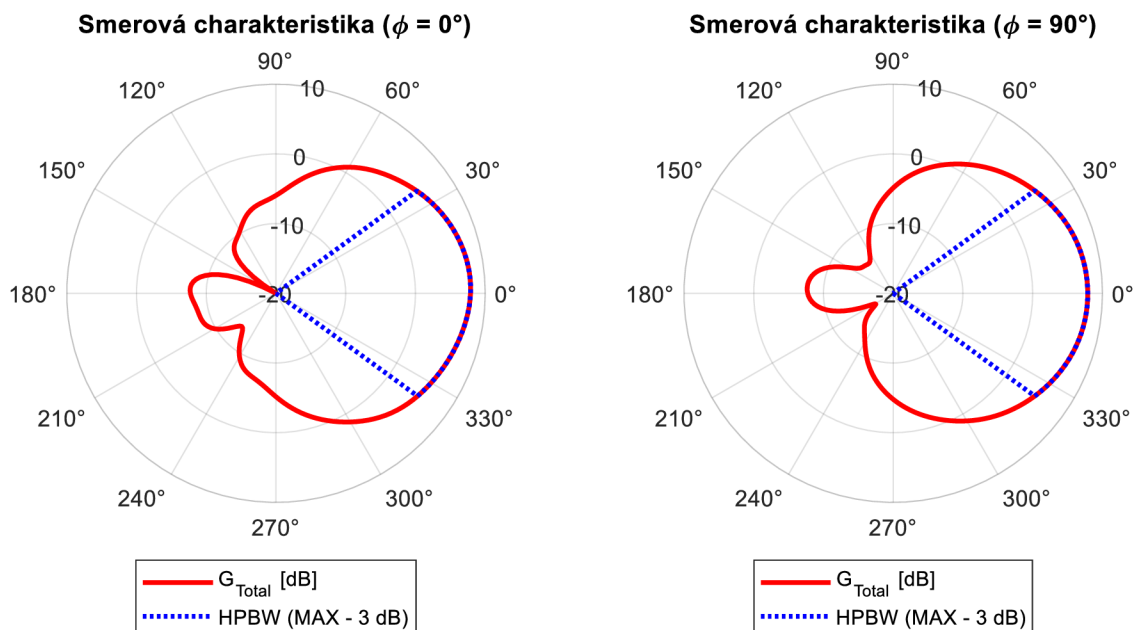
4.2.3 Vyklopenie fľačkovej antény okolo hrany kostry satelitu

V tomto umiestnení je fľačková anténa vyklopená okolo hrany kostry satelitu kolmo na povrch steny (Obr. 33). Vzdialenosť od povrchu satelitu je 32,5 mm.



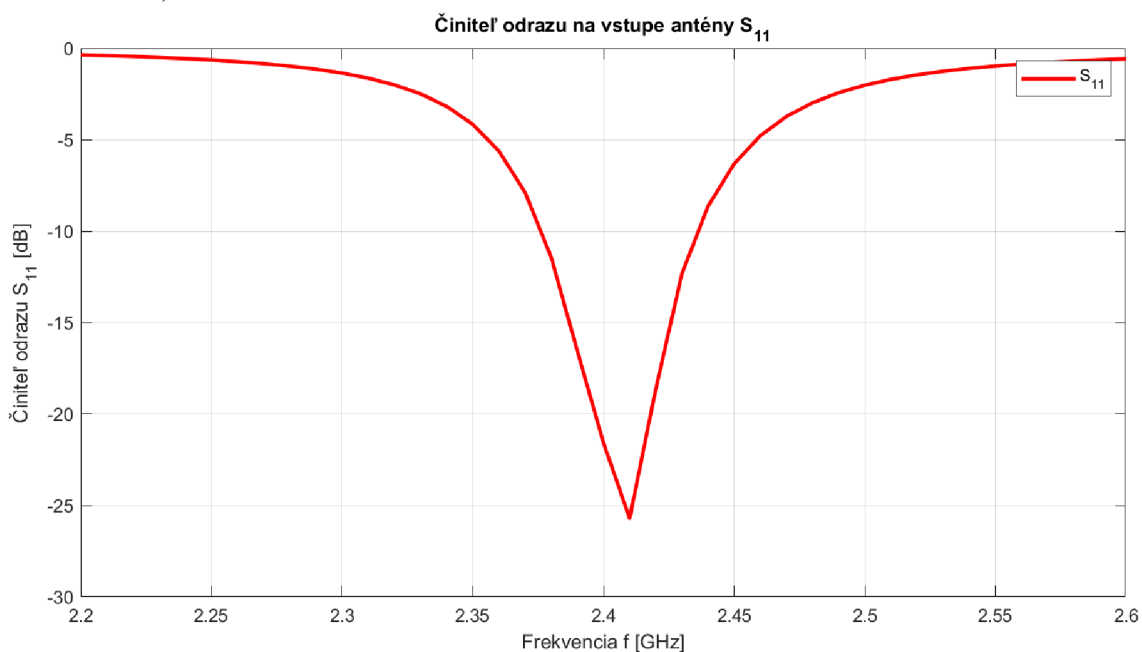
Obr. 33: Vyklopenie fľačkovej antény okolo hrany kostry satelitu

Zo zobrazených smerových charakteristík (Obr. 34) vyplýva mierne zúženie vyžarovacieho uhlu oproti samotnej anténe na 72° v oboch rovinách. Vyžarovací uhol si udržiava centrovany charakter okolo hlavného smeru. Maximálny zisk antény je 7,92 dBi.



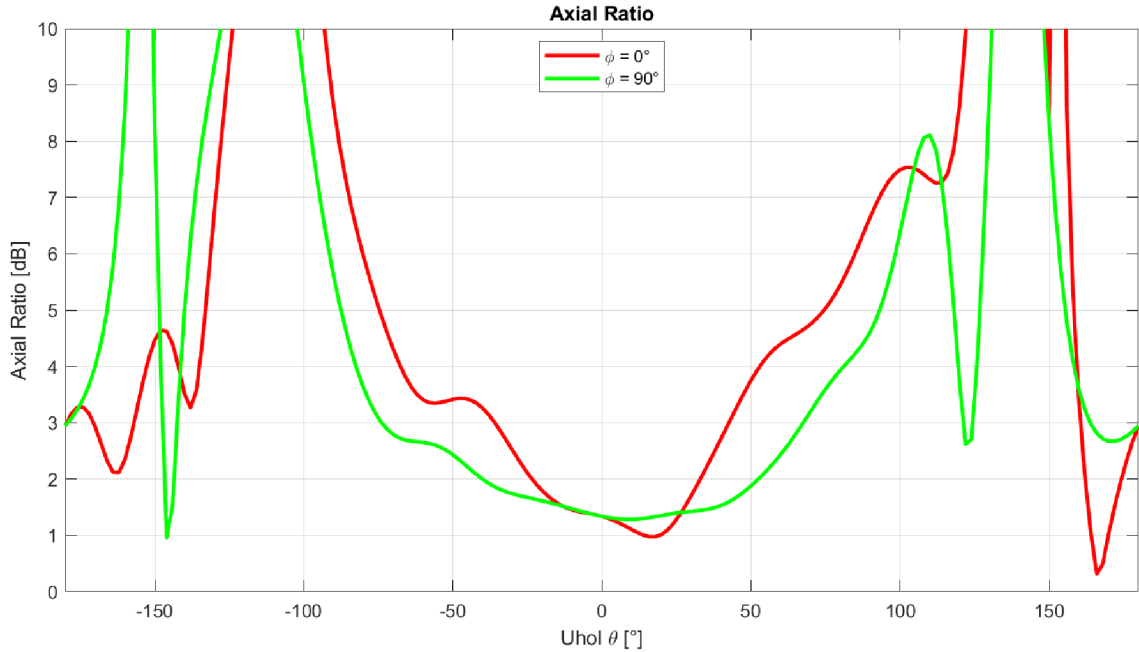
Obr. 34: Smerové charakteristiky zisku fľačkovej antény vyklopenej okolo hrany kostry satelitu

Zo zobrazenej frekvenčnej charakteristiky činiteľu odrazu (Obr. 35) vyplýva mierne zlepšenie minimálnej hodnoty činiteľu odrazu oproti samotnej anténe na -25,7 dB pri frekvencii 2,41 GHz.



Obr. 35: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu fľačkovej antény vyklopenej okolo hrany kostry satelitu

Zo zobrazených smerových charakteristík parametru AR (Obr. 36) je v hlavnom smere vyžarovania 1,34 dB s rozsahom, v ktorom je AR menšie ako 3 dB, 78° s mierne narušeným centrováním okolo hlavného smeru.



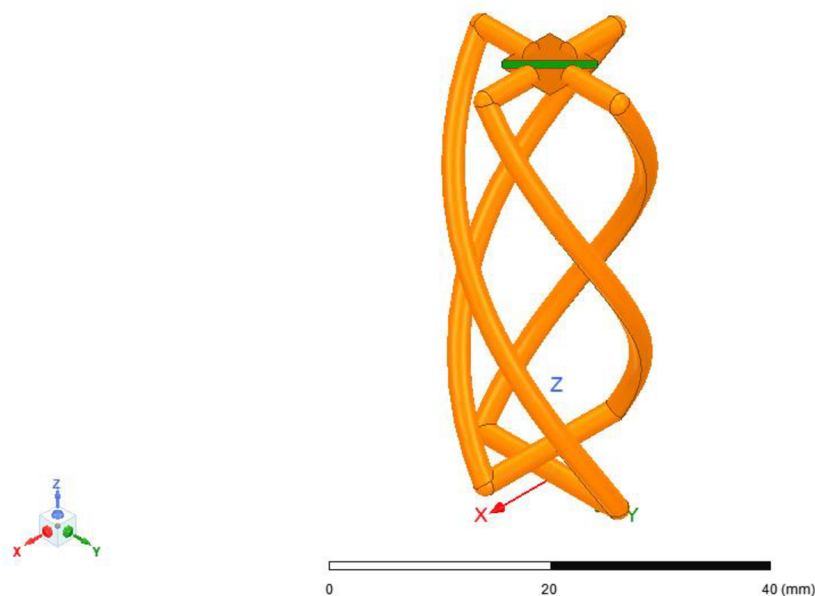
Obr. 36: Smerové charakteristiky parametru AR fliáčkovej antény vyklopenej okolo hrany kostry satelitu

4.3 Anténa QFH

Posledným typom antény modelovanej a simulovanej v ANSYS HFSS bola pravotočivo kruhovo polarizovaná (RHCP) anténa QFH napájaná jedným napájacím portom (Obr. 37). Výpočet rozmerov antény bol uskutočnený pomocou online kalkulatoru [14] a na základe výsledkov simulácii boli rozmery postupne vyladované do dosiahnutia požadovaných výsledkov simulácie antény. Výsledné rozmery sú uvedené v tab. 4. Rozmery modelu antény sú pre všetky simulované umiestnenia rovnaké. Model antény bol tvorený materiálom s dokonalou elektrickou vodivosťou (v ANSYS HFSS: *pec* z knižnice *Materials*) s hrúbkou vodičov 2,2 mm.

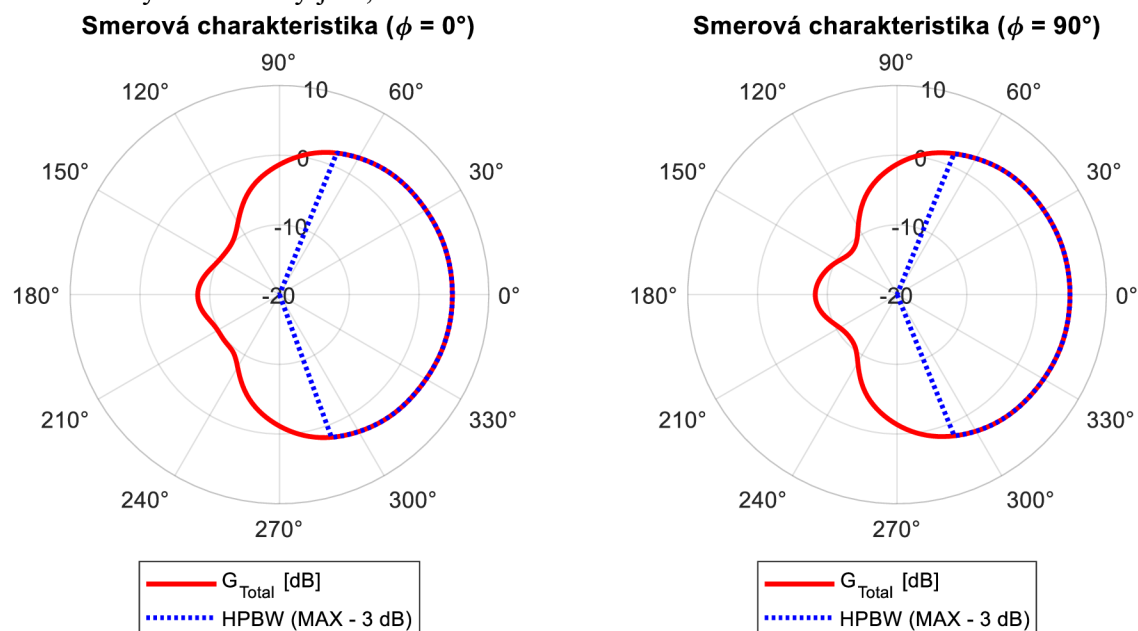
Tab. 4: Výsledné rozmery modelu navrhutej QFH antény

| | |
|--------------------------------|--------|
| Výška veľkej slučky | 45,9mm |
| Výška malej slučky | 43,4mm |
| Vnútorňý priemer veľkej slučky | 17,9mm |
| Vnútorňý priemer malej slučky | 16,9mm |



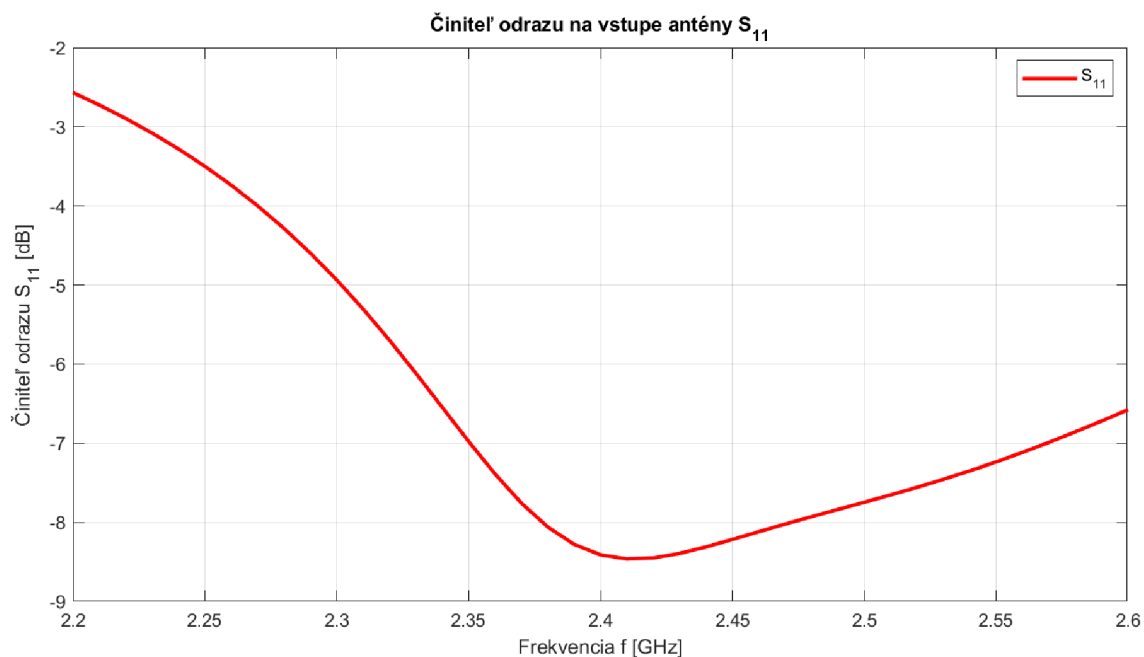
Obr. 37: Výsledná podoba modelu navrhutej QFH antény v programe ANSYS HFSS

Na zobrazených smerových charakteristikách (Obr. 38) je pozorovateľný veľký vyžarovací uhol HPBW samotnej antény QFH. V rovine $\phi = 0^\circ$ je HPBW 138° , v rovine $\phi = 90^\circ$ 136° . Vyžarovací uhol je centrován okolo hlavného smeru vyžarovania. Maximálny zisk antény je 4,77 dBi.



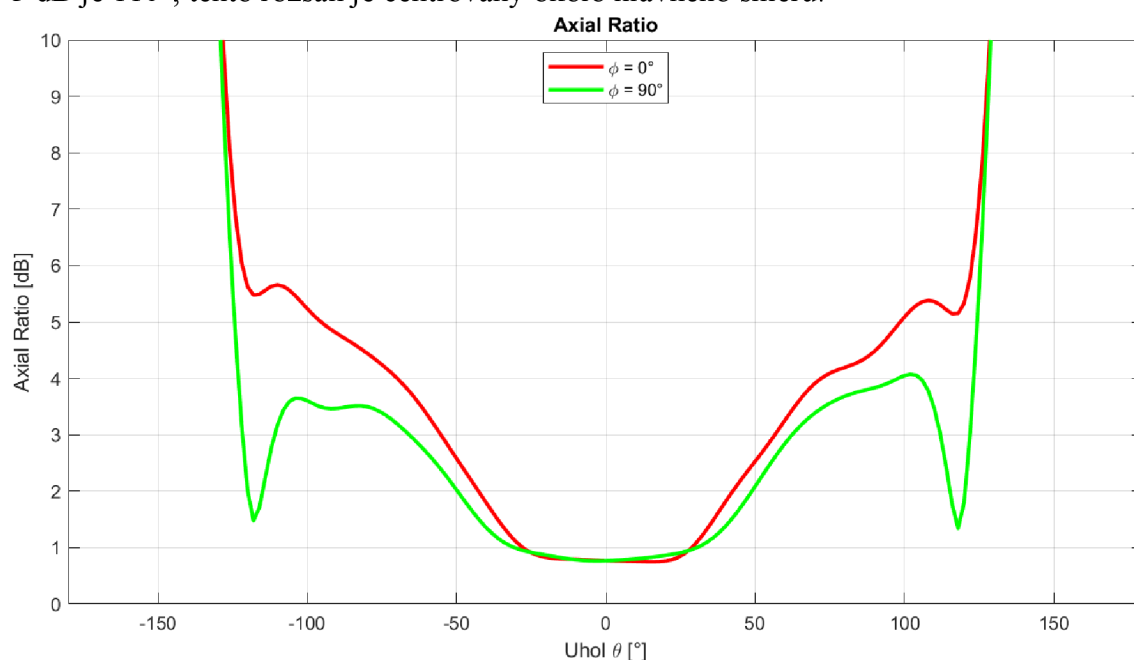
Obr. 38: Smerové charakteristiky zisku samotnej antény QFH

Na zobrazenej frekvenčnej charakteristike činiteľu odrazu (Obr. 39) je pozorovateľná vyššia hodnota činiteľu odrazu v rezonančnej frekvencii ako pri zvyšných dvoch typoch antén. Minimum bolo -8,46 dB pri frekvencii 2,41 GHz.



Obr. 39: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu samotnej antény QFH

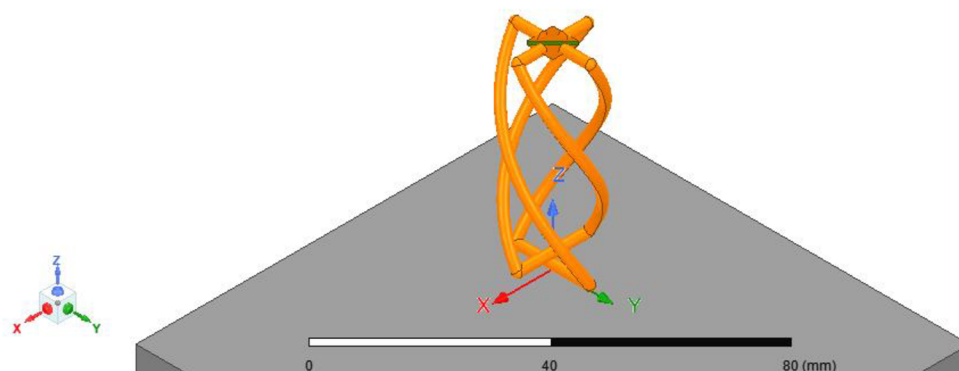
Na zobrazených smerových charakteristikách parametru AR (Obr. 40) je v hlavnom smere vyžarovania hodnota AR 0,77 dB. Minimálny rozsah, v ktorom je AR menšie ako 3 dB je 110° , tento rozsah je centrovaný okolo hlavného smeru.



Obr. 40: Smerové charakteristiky parametru AR samotnej antény QFH

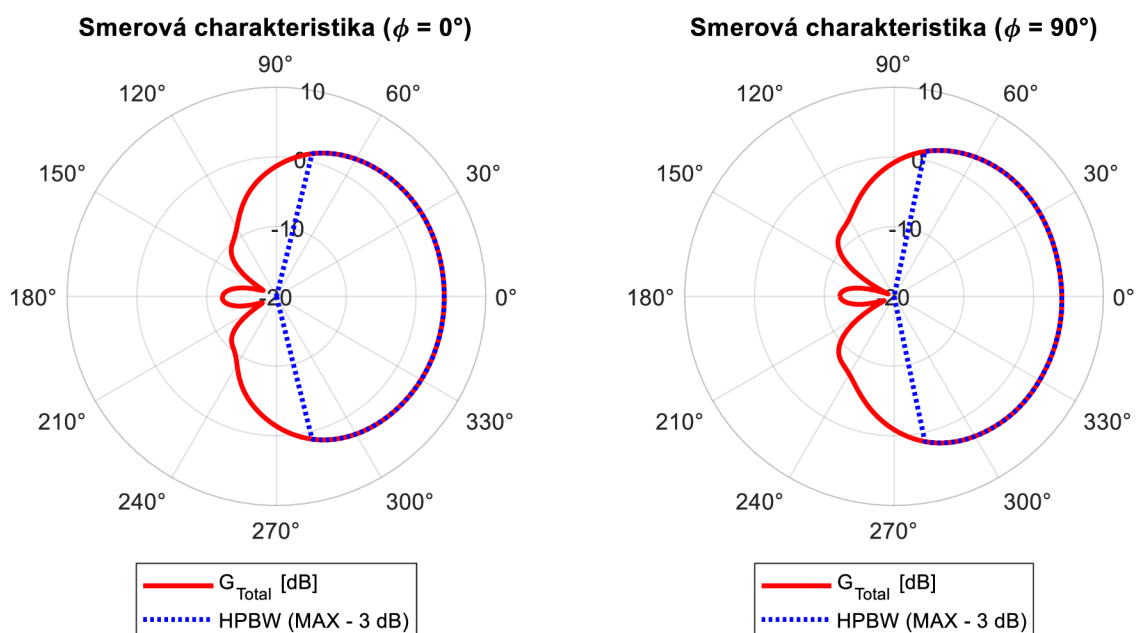
4.3.1 Umiestnenie antény QFH nad stredom steny kostry satelitu

V tomto umiestnení je anténa QFH umiestnená nad stredom steny kostry satelitu (Obr. 41) vo vzdialenosti 14,6 mm od jej povrchu (vzdialenosť medzi povrchom a najnižším bodom modelu antény QFH).



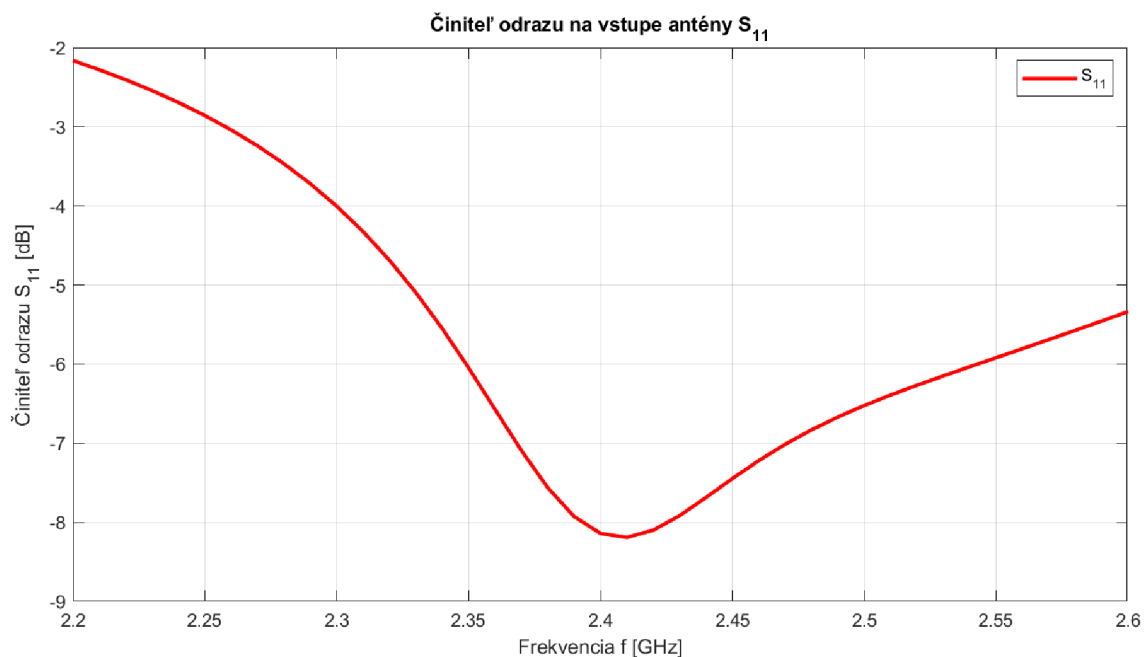
Obr. 41: Umiestnenie antény QFH nad stredom steny kostry satelitu

Zo zobrazených smerových charakteristík (Obr. 42) vyplýva nárast šírky vyžarovacieho uhlu antény oproti samotnej anténe na 152° v rovine $\phi = 0^\circ$ a na 156° v rovine $\phi = 90^\circ$. Vyžarovací uhol si aj v tomto umiestnení udržiava centrovany charakter voči hlavnému smeru vyžarovania. Maximálny zisk antény však oproti samotnej anténe poklesol na 4,12 dBi.



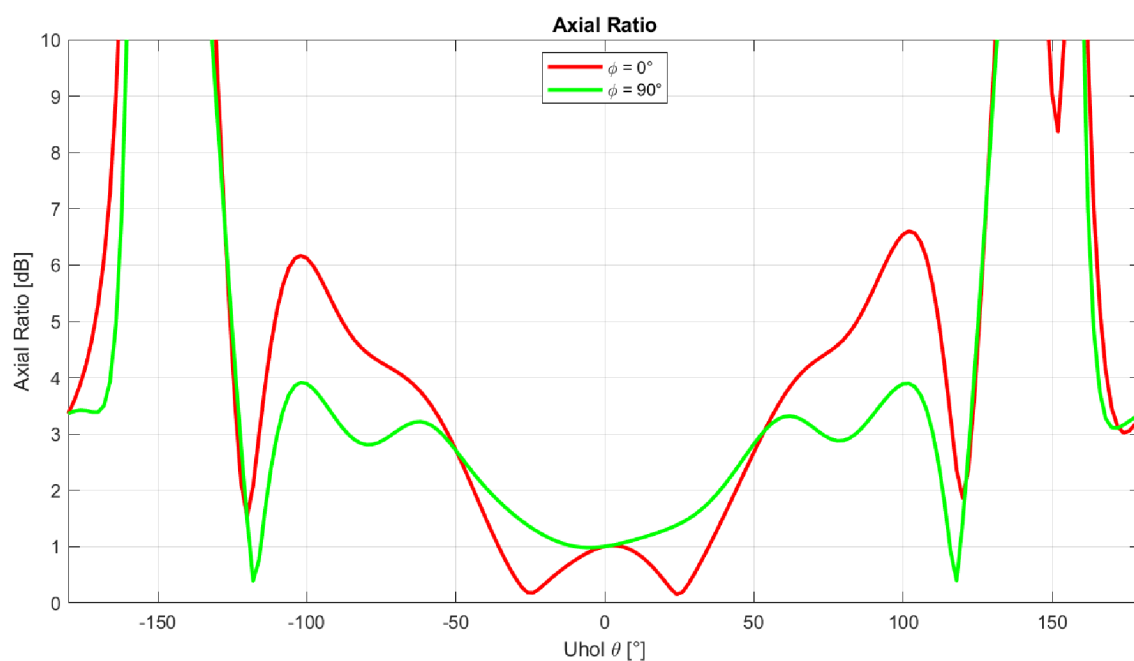
Obr. 42: Smerové charakteristiky zisku antény QFH v umiestnení nad stredom steny kostry satelitu

Zo zobrazenej frekvenčnej charakteristiky (Obr. 43) vyplýva mierny nárast minimálnej hodnoty činiteľa odrazu oproti samotnej anténe na -8,19 dB pri frekvencii 2,41 GHz.



Obr. 43: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu antény QFH v umiestnení nad stredom steny kostry satelitu

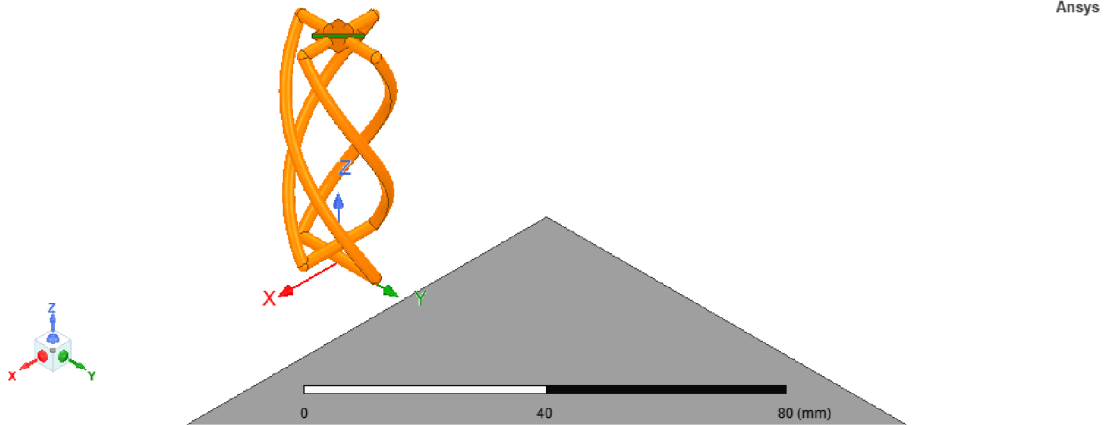
Zo zobrazených smerových charakteristík parametru AR (Obr. 44) vyplýva nárast hodnoty AR v hlavnom smere vyžarovania oproti samotnej anténe na 1 dB a mierne zúženie rozsahu, v ktorom je AR menšie ako 3 dB na 104° , aj v tomto umiestnení je tento rozsah centrován okolo hlavného smeru.



Obr. 44: Smerové charakteristiky parametru AR antény QFH v umiestnení nad stredom steny kostry satelitu

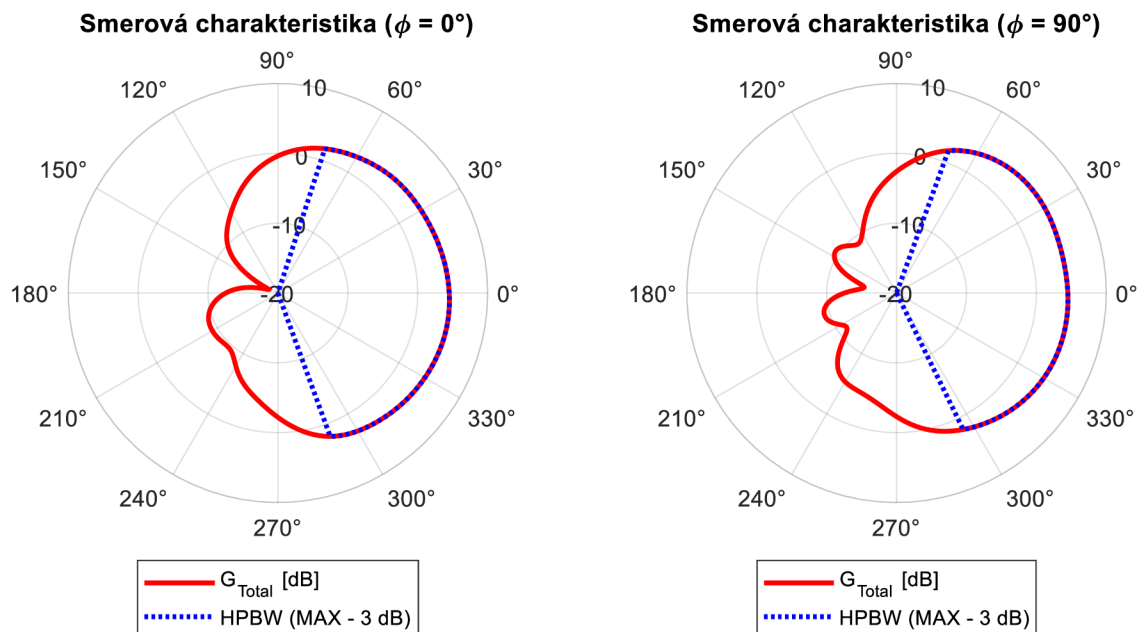
4.3.2 Umiestnenie antény QFH nad stredom hrany kostry satelitu

V tomto umiestnení je anténa QFH umiestnená kolmo nad stredom hrany kostry satelitu (Obr. 45) vo vzdialenosti 14,6 mm od tohto bodu.



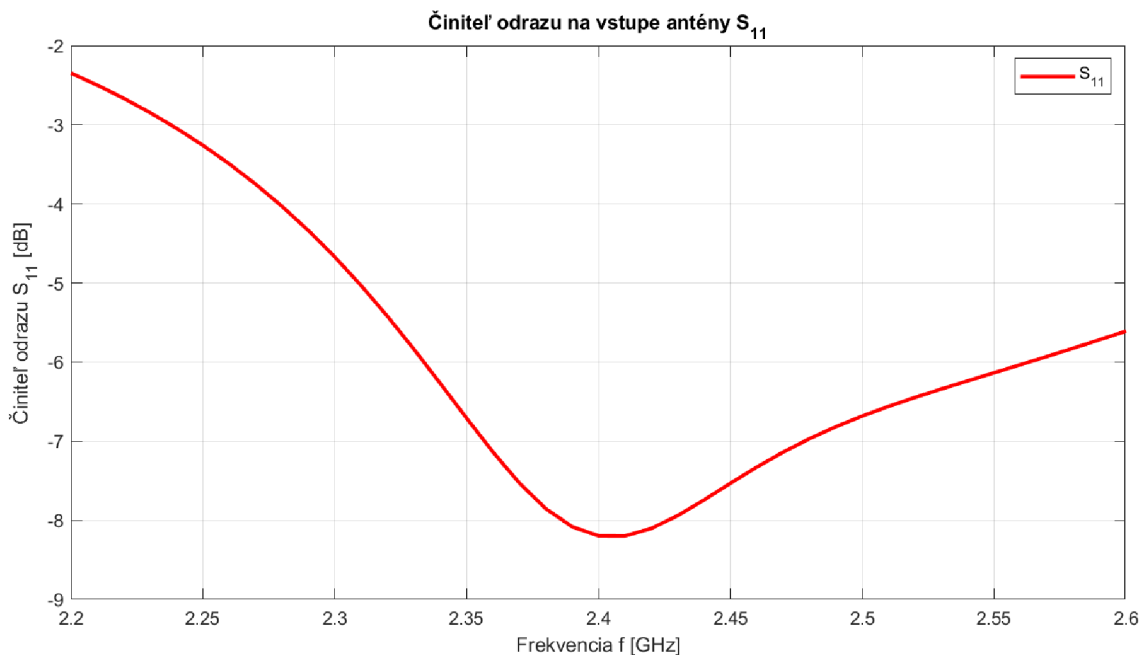
Obr. 45: Umiestnenie antény QFH nad stredom hrany kostry satelitu

Zo zobrazených smerových charakteristík (Obr. 46) vyplýva minimálna zmena vyžarovacieho uhlu antény oproti samotnej anténe na 142° v rovine $\phi = 0^\circ$ a na 134° v rovine $\phi = 90^\circ$. Mierne sa zhoršilo centrovanie vyžarovacieho uhlu okolo hlavného smeru v rovine $\phi = 90^\circ$. Maximálny zisk antény je 4,63 dBi.



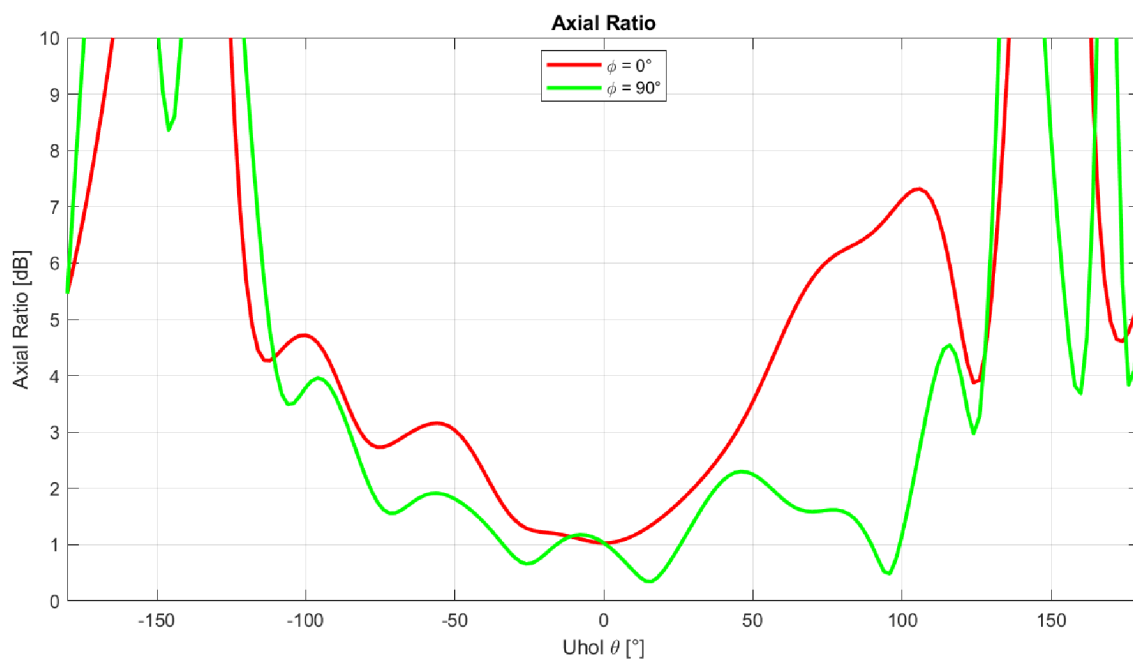
Obr. 46: Smerové charakteristiky zisku antény QFH v umiestnení nad stredom hrany kostry satelitu

Zo zobrazenej frekvenčnej charakteristiky (Obr. 47) vyplýva mierny nárast minimálnej hodnoty činiteľa odrazu oproti samotnej anténe na rovnakú úroveň ako v predošlom umiestnení, to je na -8,19 dB pri frekvencii 2,41 GHz.



Obr. 47: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu antény QFH v umiestnení nad stredom hrany kostry satelitu

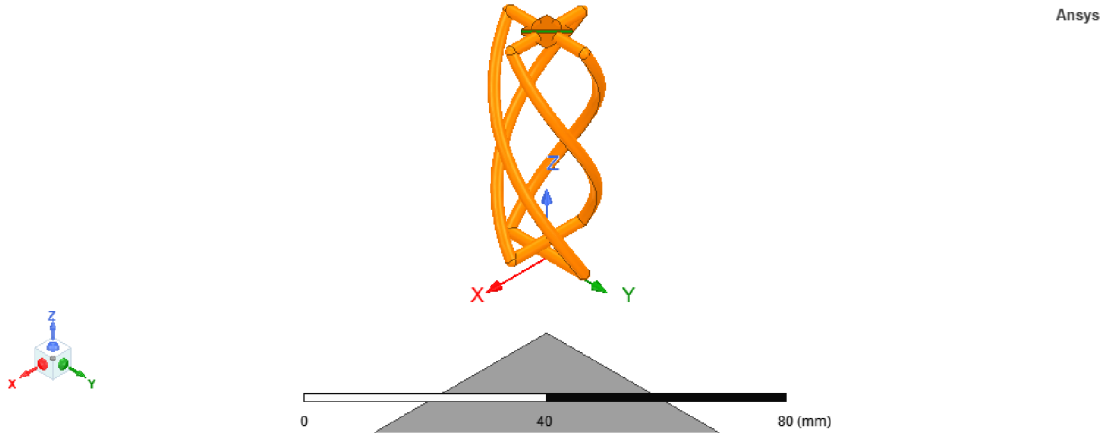
Zo zobrazených smerových charakteristík parametru AR (Obr. 48) vyplýva nárast hodnoty AR v hlavnom smere vyžarovania oproti samotnej anténe na 1,02 dB a výraznejšie zúženie rozsahu, v ktorom je AR menšie ako 3 dB na 92° , centrovanie rozsahu okolo hlavného smeru je mierne narušené.



Obr. 48: Smerové charakteristiky parametru AR antény QFH v umiestnení nad stredom hrany kostry satelitu

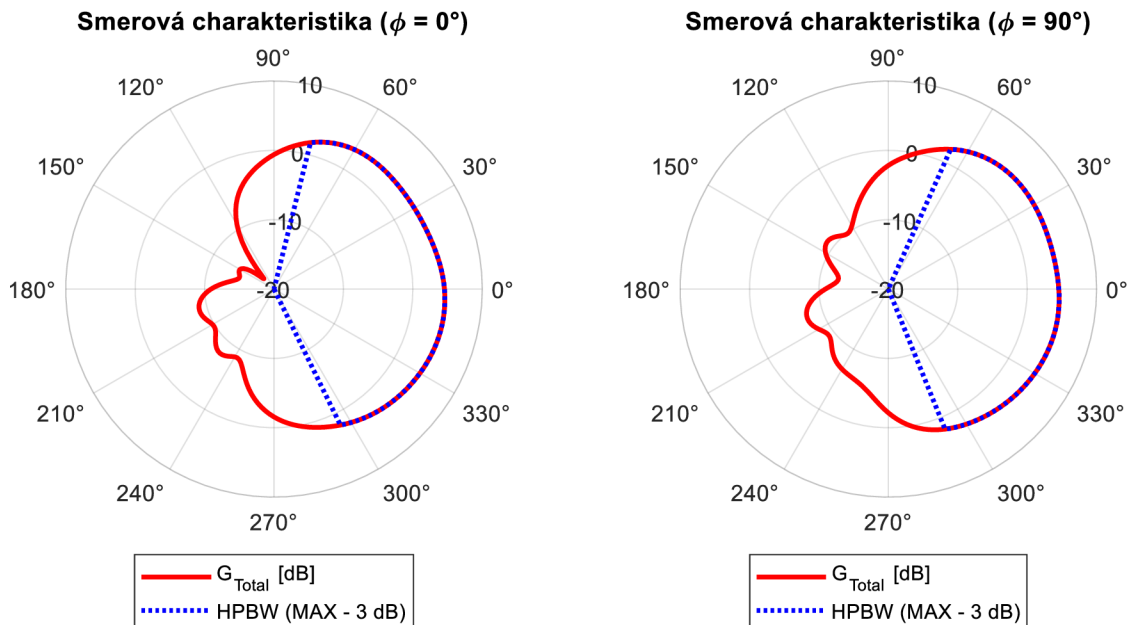
4.3.3 Umiestnenie antény QFH nad rohom kostry satelitu

V tomto umiestnení je anténa QFH umiestnená nad rohom kostry satelitu (Obr. 49) s osou antény rovnobežnou s hranou kostry vo vzdialenosti 14,6 mm nad jej povrchom.



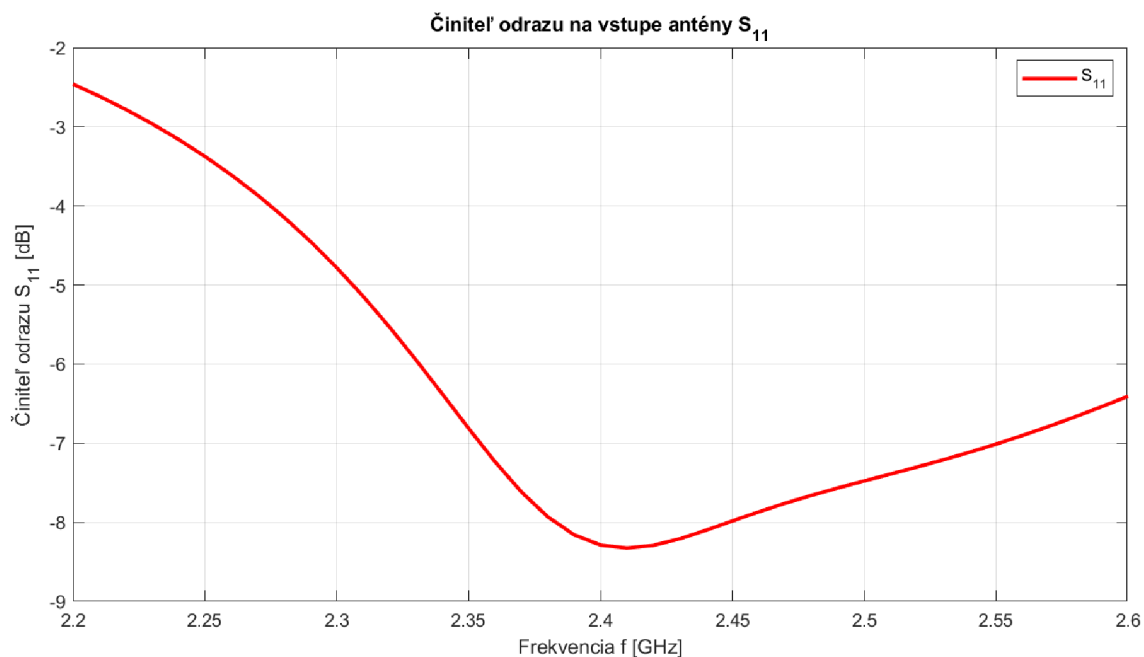
Obr. 49: Umiestnenie antény QFH nad rohom kostry satelitu

Zo zobrazených smerových charakteristík (Obr. 50) vyplýva minimálna zmena vyžarovacieho uhlu antény oproti samotnej anténe na 140° v rovine $\phi = 0^\circ$ a na 134° v rovine $\phi = 90^\circ$. Výraznejšie sa zhoršilo centrovanie vyžarovacieho uhlu okolo hlavného smeru v rovine $\phi = 0^\circ$. Maximálny zisk antény je 4,75 dBi.



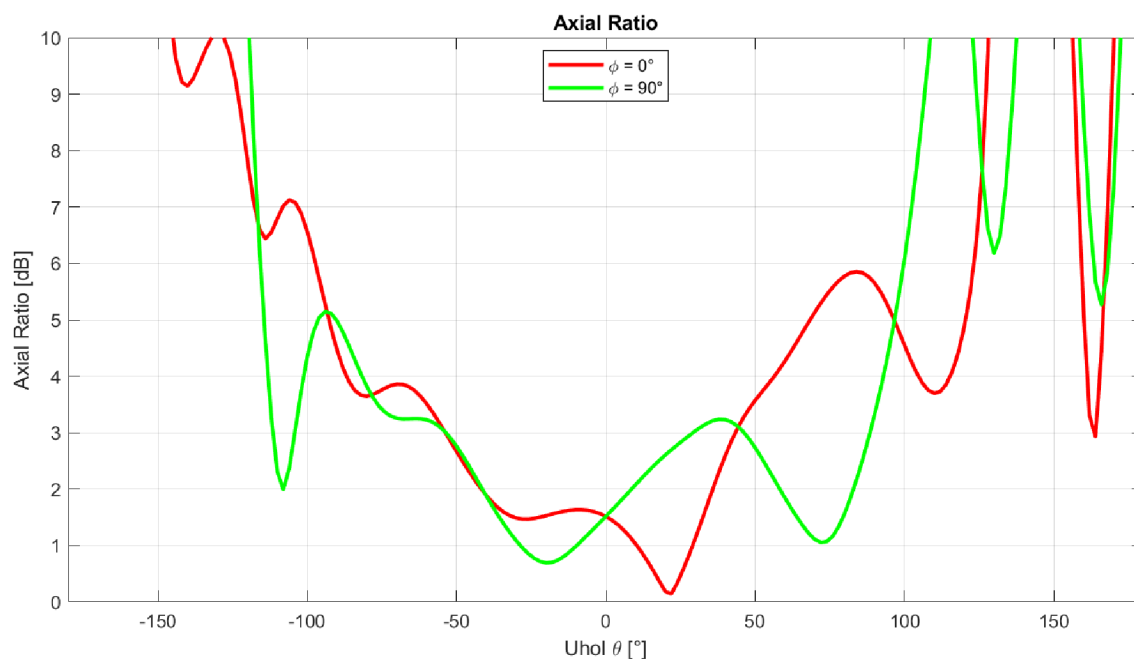
Obr. 50: Smerové charakteristiky zisku antény QFH v umiestnení nad rohom kostry satelitu

Zo zobrazenej frekvenčnej charakteristiky činiteľu odrazu (Obr. 51) vyplýva mierny nárast minimálnej hodnoty činiteľu odrazu na -8,32 dB pri frekvencii 2,41 GHz.



Obr. 51: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu antény QFH v umiestnení nad rohom kostry satelitu

Zo zobrazených smerových charakteristík parametru AR (Obr. 52) vyplýva zvýšenie hodnoty AR v hlavnom smere vyžarovania na 1,52 dB a výrazné zúženie rozsahu, v ktorom je AR menšie ako 3 dB na 82° , došlo však k výraznému zhoršeniu centrovania tohto rozsahu okolo hlavného smeru.



Obr. 52: Smerové charakteristiky parametru AR antény QFH v umiestnení nad rohom kostry satelitu

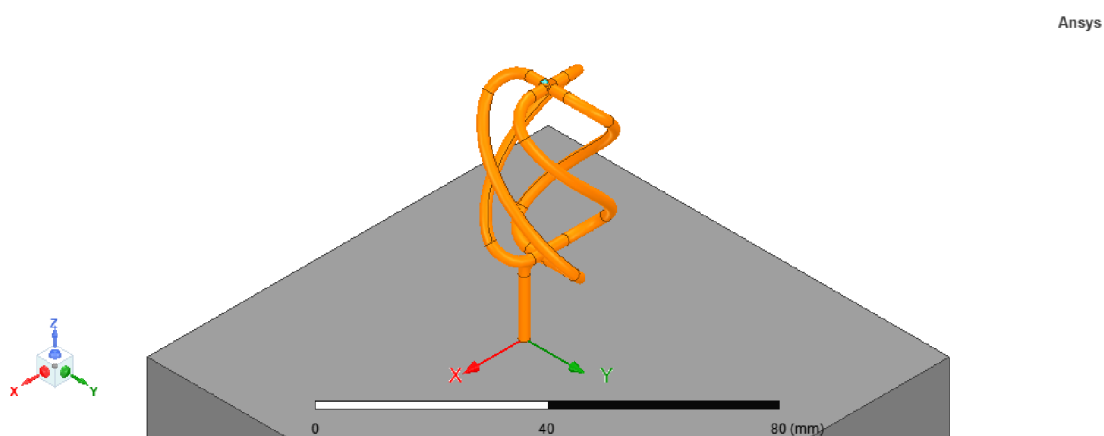
4.3.4 Modifikovaný model antény QFH s uvažovaním vlastností reálnej antény

Nakoľko bolo pri modelovaní antény potrebné uvažovať vlastností vodičov, z ktorých by bola realizovaná anténa skonštruovaná, hlavne minimálny povolený polomer ohybu vodičov použitých na konštrukciu antény, ako aj spôsob napájania antény zhora, bolo potrebné modifikovať model antény QFH. Hlavnou modifikáciou bola zámena jedného z ramien koaxiálnym vedením vedeným zo spodnej strany antény na jej vrch do napájacieho uzlu, slúžiacim k privedeniu signálu na jednotlivé ramená. Výsledné rozmery modifikovanej antény sú uvedené v tab. 5.

Tab. 5: Výsledné rozmery modifikovaného modelu QFH antény

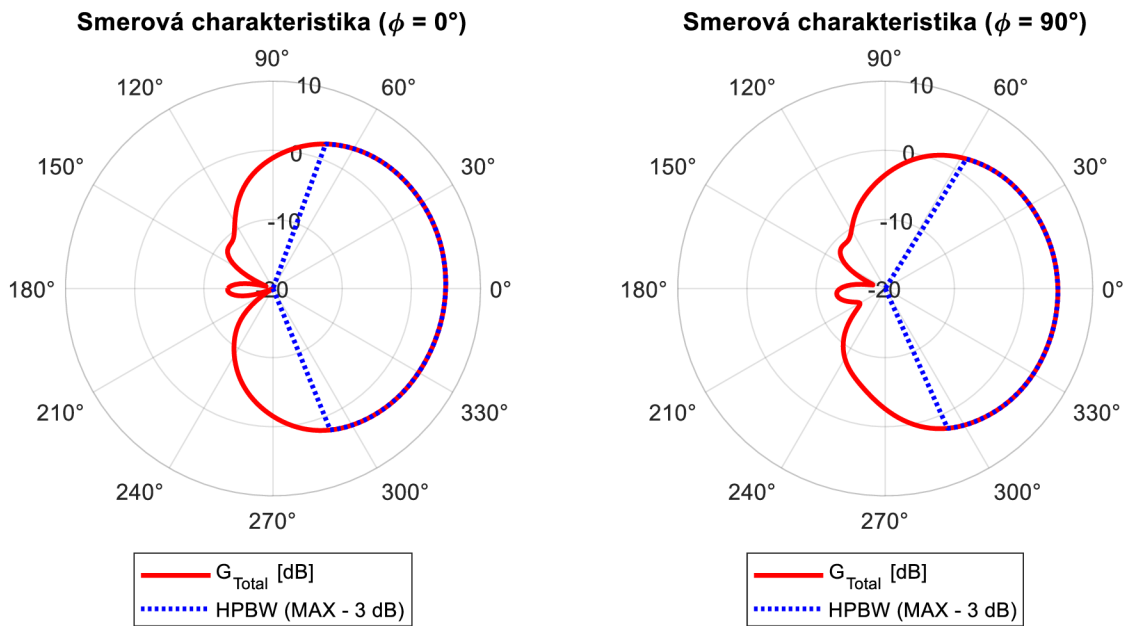
| | |
|--------------------------------|----------|
| Výška veľkej slučky | 37,35 mm |
| Výška malej slučky | 35,05 mm |
| Vnútorný priemer veľkej slučky | 21,45 mm |
| Vnútorný priemer malej slučky | 20,35 mm |
| Polomer ohybu vodičov | 5 mm |

Tento model antény QFH bol rovno simulovaný spolu s kostrou satelitu s umiestnením antény nad stredom steny kostry (Obr. 53) vo vzdialenosti 20 mm od jej povrchu.



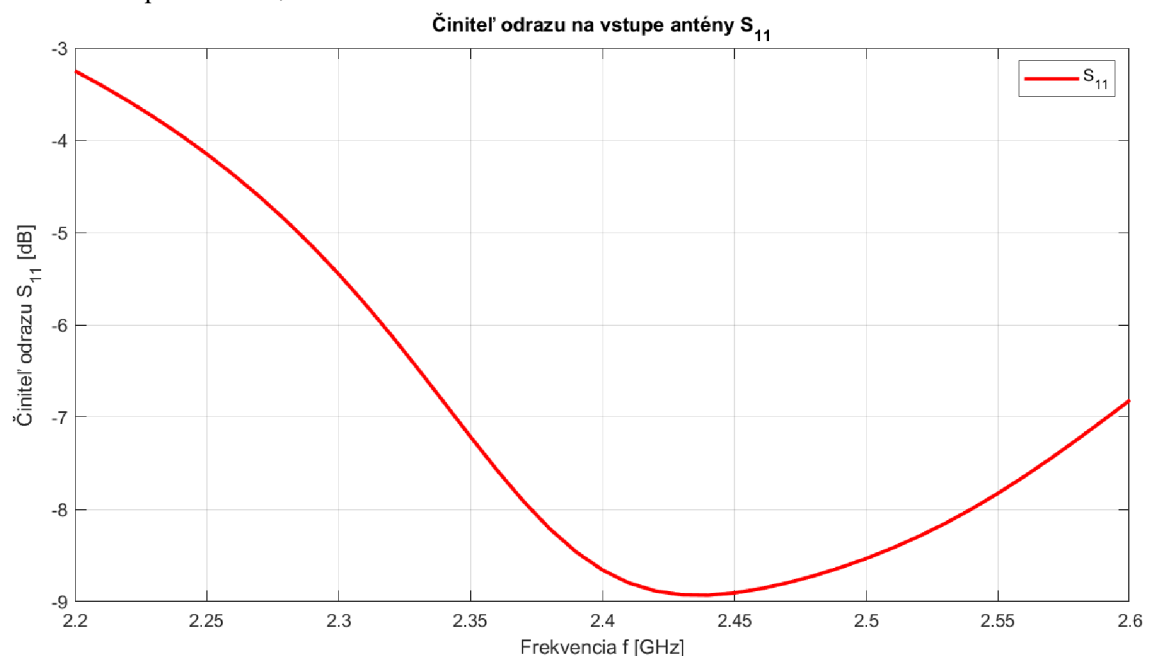
Obr. 53: Umiestnenie modifikovaného modelu antény QFH nad stredom steny kostry satelitu

Na zobrazených smerových charakteristikách (Obr. 54) sú pozorovateľné vyžarovacie uhly 138° v rovine $\phi = 0^\circ$ a 124° v rovine $\phi = 90^\circ$. V rovine $\phi = 90^\circ$ došlo k zhoršeniu centrovania vyžarovacieho uhlu okolo hlavného smeru. Vyžarovacie uhly modifikovaného modelu sú nižšie ako v prípade pôvodného modelu antény QFH v umiestnení nad stredom steny kostry satelitu. Maximálny zisk antény je 5,05 dBi.



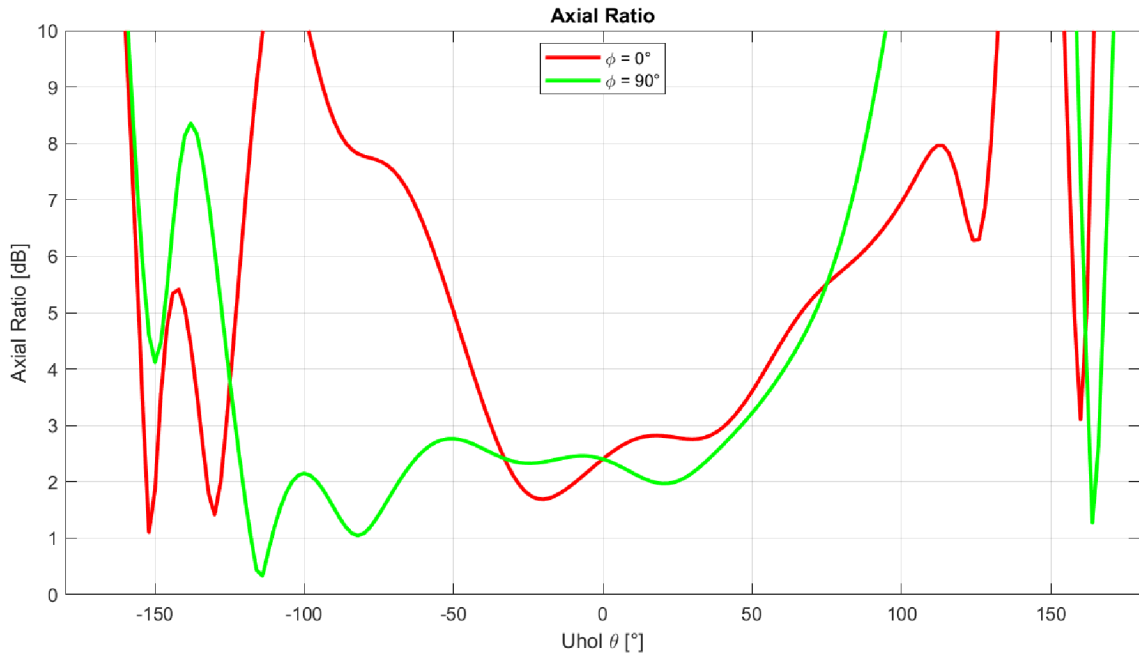
Obr. 54: Smerové charakteristiky zisku modifikovaného modelu antény QFH v umiestnení nad stredom steny kostry satelitu

Na zobrazenej frekvenčnej charakteristike činiteľu odrazu (Obr. 55) je pozorovateľné posunutie rezonančnej frekvencie o 40 MHz nahor oproti požadovanej frekvencii 2,4 GHz, to je však zapríčinené tým, že s týmito rozmermi je dosiahnuté minimálne AR v hlavnom smere. Minimálna hodnota činiteľu odrazu sa oproti predošlému modelu mierne zlepšila na -8,92 dB.



Obr. 55: Frekvenčná charakteristika činiteľu odrazu modifikovaného modelu antény QFH v umiestnení nad stredom steny kostry satelitu

Na zobrazených smerových charakteristikách parametru AR (Obr. 56) je v hlavnom smere vyžarovania hodnota AR 2,4 dB. Minimálny rozsah, v ktorom je AR menšie ako 3 dB je 80° a je centrovaný okolo hlavného smeru.



Obr. 56: Smerové charakteristiky parametru AR modifikovaného modelu antény QFH v umiestnení nad stredom steny kostry satelitu

4.4 Zhodnotenie výsledkov simulácií antén

Najdôležitejšie výsledky simulácií antén, teda vyžarovacie uhly v oboch rovinách, zisk antény a informácie o kruhovej polarizácii a jej rozsahu sú uvedené v tab. 6.

Tab. 6: Zhrnutie charakteristík antén v rôznych umiestneniach s kostrou satelitu

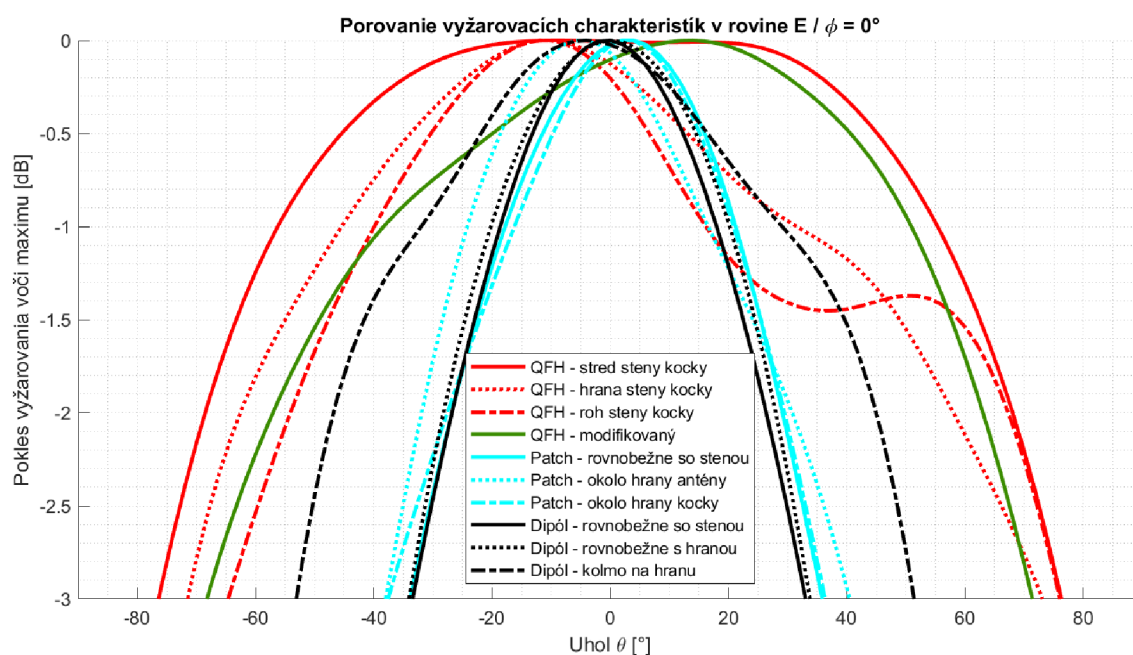
| Typ antény: | Umiestnenie / orientácia antény | HPBW [°] rov. E / $\varphi = 0^\circ$ | HPBW [°] rov. H / $\varphi = 90^\circ$ |
|------------------------------|---|--|---|
| Dipólová | Nad stredom steny rovnobežne s povrchom | 64 | 96 |
| | Ravnobežne s hranou kostry | 66 | 148 |
| | Kolmo na hranu kostry | 102 ^{*)} | 168 ^{*)} |
| Fliačková so skosenými rohmi | V strede steny kostry | 66 | 68 |
| | Vyklopenie okolo hrany antény | 76 | 78 |
| | Vyklopenie okolo hrany kostry | 72 | 72 |
| QFH | Nad stredom steny kostry | 152 | 156 |
| | Nad stredom hrany kostry | 142 | 134 |
| | Nad rohom kostry | 140 | 134 |
| | Modifikovaný model nad stredom | 138 | 124 |

| Typ antény: | Umiestnenie / orientácia antény | Max. zisk [dBi] | Kruhovo polarizovaná? AR < 3dB |
|------------------------------|---|-----------------|--------------------------------|
| Dipólová | Nad stredom steny rovnobežne s povrchom | 7,64 | Nie |
| | Ravnobežne s hranou kostry | 6,30 | Nie |
| | Kolmo na hranu kostry | 4,05 | Nie |
| Fliačková so skosenými rohmi | V strede steny kostry | 8,18 | Áno (v celom HPBW) |
| | Vyklopenie okolo hrany antény | 7,26 | Nie ^{**}) |
| | Vyklopenie okolo hrany kostry | 7,92 | Áno (v celom HPBW) |
| QFH | Nad stredom steny kostry | 4,12 | Áno (v rozsahu 104°) |
| | Nad stredom hrany kostry | 4,63 | Áno (v rozsahu 92°) |
| | Nad rohom kostry | 4,75 | Áno (v rozsahu 82°) |
| | Modifikovaný model nad stredom | 5,05 | Áno (v rozsahu 80°) |

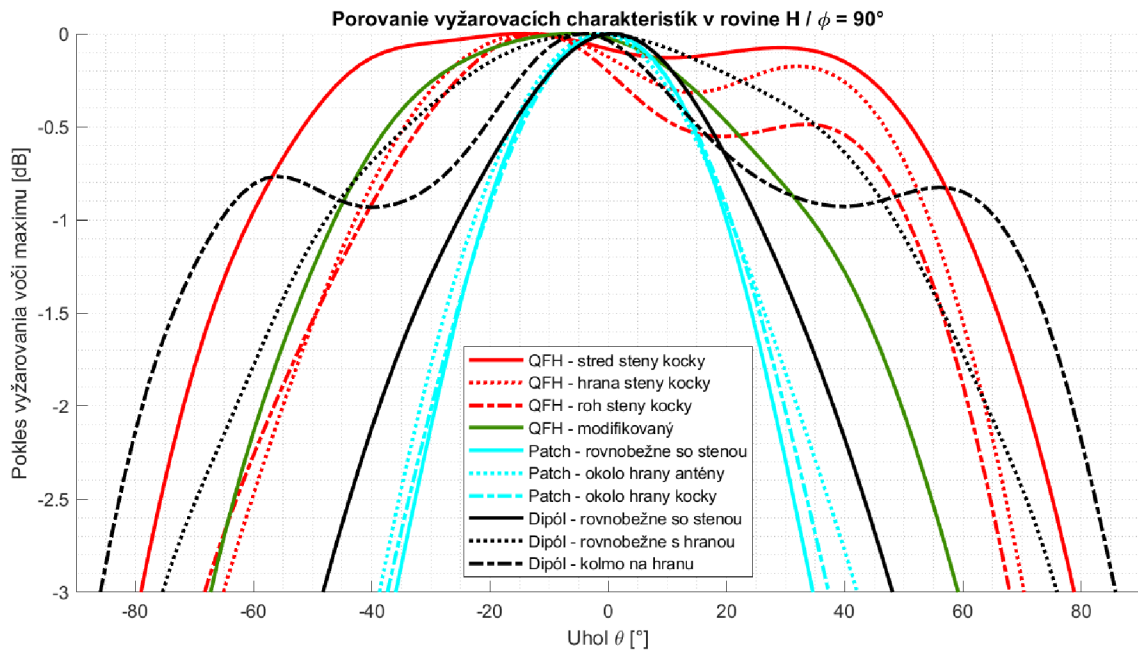
*) iba HPBW v hlavnom smere vyžarovania (anténa má aj výrazné zadné vyžarovanie)

***) v hlavnom smere vyžarovania AR = 2,84 dB, AR < 3 dB pre rozsah 10°

Najlepšie simulované výsledky s ohľadom na vyžarovaciu charakteristiku mala jednoznačne anténa QFH (Obr. 57 a Obr. 58). Vyžarovací uhol sa pri všetkých konfiguráciách a zároveň aj v oboch rovinách držal nad hodnotou 120°. Problémom tejto antény však bol rozsah, v ktorom má anténa AR menšie ako 3 dB, ktorý bol pri všetkých konfiguráciách menší ako vyžarovací uhol. Aj pri uvážení tohto uhlu ide o väčší rozsah ako pri fliačkovej anténe. Vplyv kostry na charakteristiky antény bol pozorovateľný zmenami šírky vyžarovacieho uhlu, ako aj zmenami charakteristiky AR, na charakteristiku činiteľa odrazu mala v simuláciách minimálny vplyv. Najvýhodnejším umiestnením je jednoznačne umiestnenie v strede steny kostry, kde dosahuje anténa najlepšiu šírku vyžarovacieho uhlu ako aj najširší rozsah AR.



Obr. 57: Porovnanie smerových charakteristík všetkých simulovaných umiestnení v rovine E / $\phi = 0^\circ$



Obr. 58: Porovnanie smerových charakteristík všetkých simulovaných umiestnení v rovine $H / \phi = 90^\circ$

Fliáčková anténa so skosenými rohmi mala vo všetkých troch umiestneniach a v oboch rovinách vyžarovací uhol v rozsahu 65° až 80° . Pre rovnobežné stredové umiestnenie a vyklopenie okolo hrany kostry satelitu mala anténa rozsah, v ktorom je AR menšie ako 3 dB, dostatočný pre pokrytie celého vyžarovacieho uhlu, pri vyklopení okolo hrany antény však bola charakteristika AR nevyhovujúca. Vplyv kostry na charakteristiky antény pri jej umiestnení za anténou nebol výrazný, avšak pri vyklopení antény okolo jej hrany bola časť kostry pred rovinou antény, čo sa viac či menej prejavilo na všetkých sledovaných charakteristikách. Najvýhodnejším umiestnením sa javí byť rovnobežné stredové umiestnenie, nakoľko by prídanie vyklápania antény pridalo slabinu celého návrhu s minimálnymi výhodami v charakteristikách antény.

Dipólová anténa mala zo skúmaných antén najpestrejšie charakteristiky v závislosti na polohe voči kostre satelitu. V jednom z umiestnení v rovine H mala dokonca najväčšiu šírku vyžarovacieho uhlu 168° , nakoľko je potrebné uvažovať aj rotáciu satelitu okolo stabilnej osi, je minimálnym zaručeným vyžarovacím uhlom 102° pre maximálny pokles o 3 dB. Pri zvyšných dvoch umiestneniach bol minimálny vyžarovací uhol 65° , teda približne na úrovni simulovaných fliáčkových antén. Dipólová anténa nebola kruhovo polarizovaná a problémom je taktiež možná závislosť smerových charakteristík na materiálovom zložení a geometrii stien satelitu, nakoľko spomedzi skúmaných antén boli jej charakteristiky na polohu voči kostre satelitu najviac citlivé.

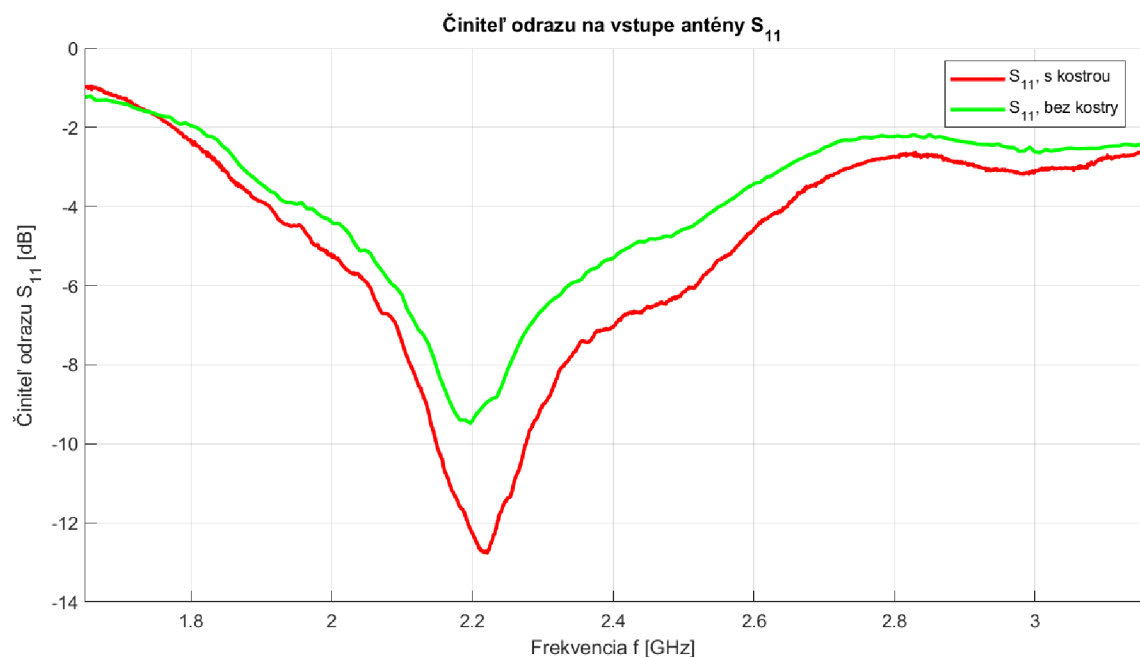
Pre realizáciu antény bola zvolená modifikovaná anténa QFH v umiestnení nad stredom steny kostry satelitu vďaka šírke svojej vyžarovacej charakteristiky. Popis realizácie a výsledkov meraní je v kapitole 5.

5. REALIZÁCIA A MERANIE ANTÉNY QFH

Na základe modifikovaného modelu QFH antény, popísaného v časti 4.3.4, bola skonštruovaná anténa (Obr. 63). Rozmery realizovanej antény sú obdobné tým uvedeným v tab. 5. Polovica veľkej slučky a celá malá slučka boli tvorené medeným vodičom s prierezom 4 mm^2 , druhá polovica veľkej slučky, ktorá bola vedená zo spodnej strany antény, bola tvorená tvarovateľným koaxiálnym vedením typu semi-rigid (Quickform 86), zakončeným na spodnom konci konektorom SMA (11 SMA-50-2-15), slúžiacim ako prívodné vedenie do horného napájacieho bodu antény QFH.

Realizovaná napodobenina kostry satelitu pre účely merania bola vytvorená z $0,6 \text{ mm}$ hrubého pozinkovaného oceľového plechu s rozmermi $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$. Pre účely jej upevnenia pri meraní v bezodrazovej komore a pre vyvedenie napájacieho vedenia antény bola doplnená o diery na hornom veku a spodnej strane plášťu.

Meraním na vektorovom analyzátore (Obr. 64) bola zistená charakteristika činiteľa odrazu samotnej antény (nekalibrované meranie) a následne aj antény s kostrou (kalibrované meranie) (Obr. 59). Anténa bola vzdialená od povrchu kostry 20 mm .

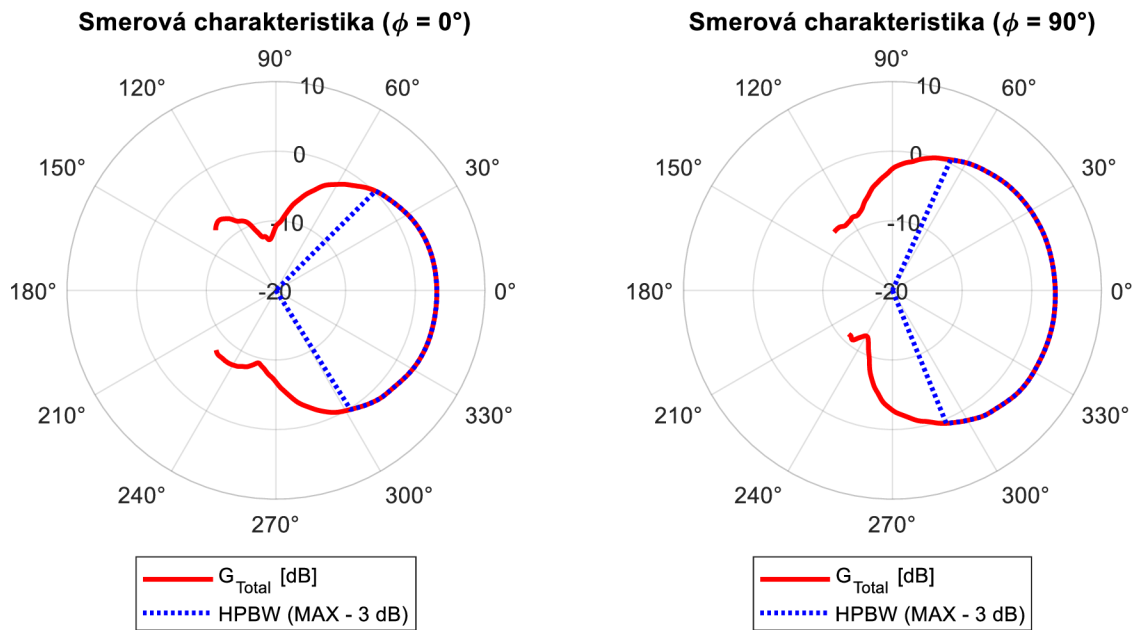


Obr. 59: Frekvenčná charakteristika činiteľa odrazu na vstupe antény pri samotnej anténe (nekalibrované meranie) a pri anténe s kostrou družice (kalibrované meranie)

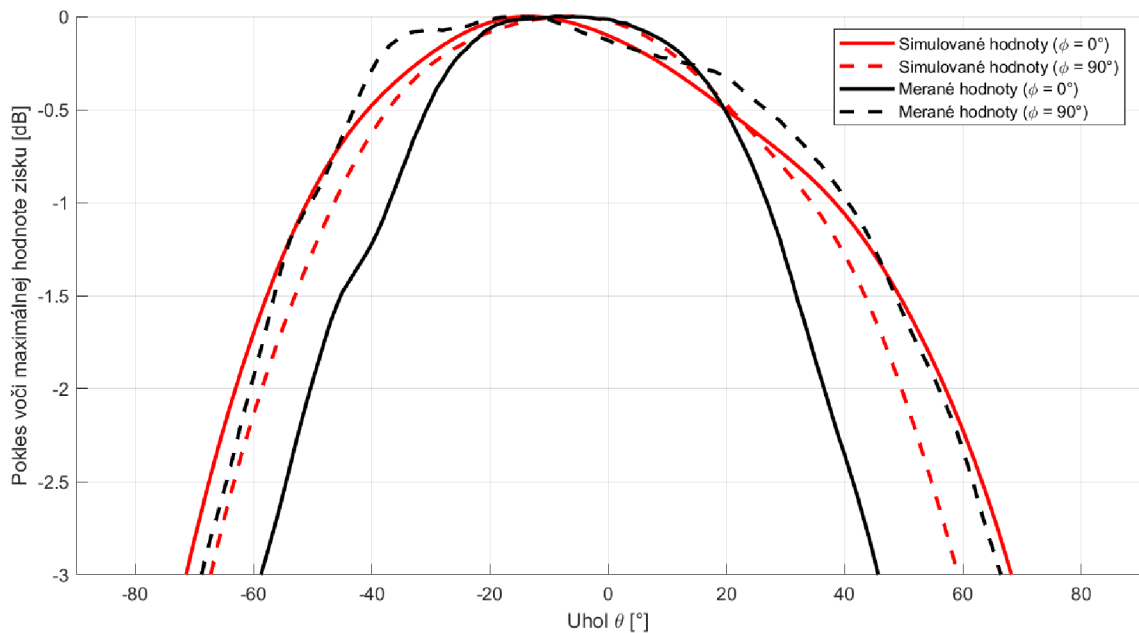
Rezonančná frekvencia antény bola značne nižšia ako požadovaná a simulovaná hodnota ($2,4 \text{ GHz}$), pravdepodobne vplyvom väčších dĺžok ramien realizovanej antény QFH. Pri meraní bez kostry išlo o frekvenciu $2,2 \text{ GHz}$ s hodnotou činiteľa odrazu $-9,48 \text{ dB}$, pri meraní s kostrou družice bola frekvencia $2,22 \text{ GHz}$ s hodnotou činiteľa odrazu $-12,76 \text{ dB}$, je teda pozorovateľný značný vplyv kostry satelitu na hodnotu činiteľa odrazu,

avšak na hodnotu frekvencie mala prítomnosť kostry len malý vplyv. Oproti simulovanej minimálnej hodnote činiteľa odrazu bola meraná hodnota o 3,83 dB nižšia.

V bezodrazovej komore boli odmerané parametre realizovanej antény QFH spolu s kostrou satelitu. Výstupom tohto merania boli smerové charakteristiky zisku antény pri frekvencii 2,2 GHz (Obr. 60 a Obr. 61), ako aj frekvenčná charakteristika parametru Axial Ratio v hlavnom smere vyžarovania (Obr. 62)

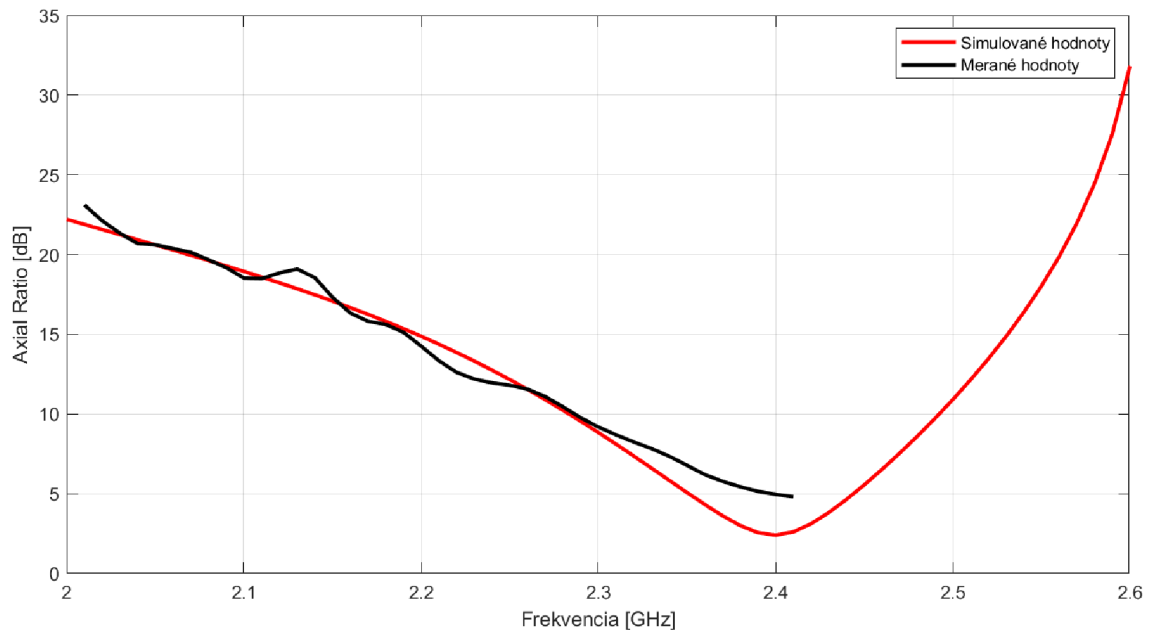


Obr. 60: Smerové charakteristiky zisku realizovanej antény QFH spolu s kostrou satelitu pri frekvencii 2,2 GHz



Obr. 61: Smerové charakteristiky zisku simulovaného modifikovaného modelu antény QFH a jej realizácie

Z porovnávacieho zobrazenia charakteristík (Obr. 61) je viditeľné zúženie vyžarovacej charakteristiky v rovine $\phi = 0^\circ$ oproti výsledkom simulácie, zároveň je v tejto rovine pozorovateľné aj vychýlenie od hlavného smeru. Výsledné vyžarovacie uhly realizovanej antény boli 103° v rovine $\phi = 0^\circ$ a 134° v rovine $\phi = 90^\circ$. Maximálny zisk realizovanej antény bol 3,5 dBi, čo je o 1,55 dB menej ako simulovaná hodnota.

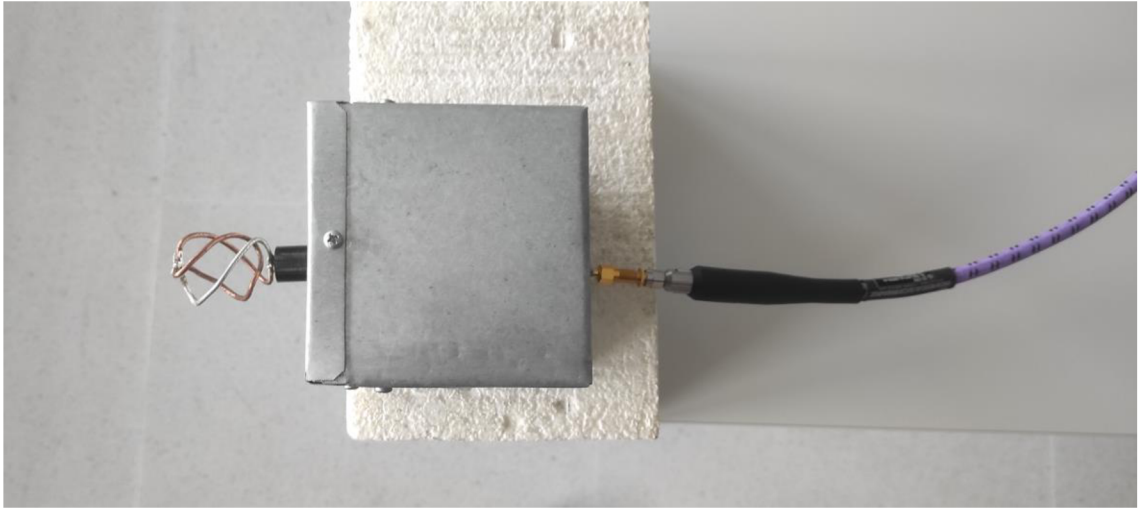


Obr. 62: Frekvenčná charakteristika parametru AR simulovaného modelu antény QFH a realizovanej antény v hlavnom smere vyžarovania

Aj napriek výrazne rozdielnej rezonančnej frekvencii antény oproti simuláciám, pri frekvenčnej charakteristike parametru AR nedošlo k výraznému posunutiu tejto charakteristiky oproti simulácii (teda na rezonančnej frekvencii realizovanej antény je hodnota AR vysoká, 14,26 dB), avšak v okolí požadovanej frekvencie došlo k zvýšeniu hodnoty AR na 4,96 dB pri frekvencii 2,4 GHz. Nakoľko však anténa na vyššom rozsahu nebola prispôbená, neboli hodnoty AR pre frekvencie väčšie ako 2,41 GHz odmerané, a teda je poloha minima charakteristiky AR neznáma.



Obr. 63: Realizovaná anténa QFH



Obr. 64: Meranie činiteľu odrazu realizovanej antény QFH spolu s kostrou satelitu pomocou vektorového analyzátoru

ZÁVER

V tejto práci bola zhrnutá teória satelitov a satelitnej komunikácie s ohľadom na satelity typu CubeSat a antény, ktoré sú vhodné pre použitie na tomto type satelitov. V prvej kapitole bola riešená problematika vzájomnej polohy a orientácie satelitu a pozemnej stanice pri dvoch hlavných typoch jednoosej stabilizácie satelitov, a to pri stabilizácii gravitačným gradientom a geomagnetickým poľom. Pre tieto stabilizácie boli taktiež analyzované minimálne potrebné vyžarovacie uhly antény v závislosti na elevačnom uhle satelitu. Okrem toho bola rozobraná teória smerových charakteristík antén, ktoré boli využívané pri simuláciách a meraniach jednotlivých antén, polarizácie antén a strát vyplývajúcich z nevhodného výberu polarizácie antény spolu s činiteľmi vplývajúcimi na veľkosť týchto strát. Bol spracovaný prehľad použiteľných antén pre družice typu CubeSat, hlavne z hľadiska smerových charakteristík a rozmerov týchto antén.

V programe ANSYS HFSS boli vymodelované tri antény – polvlnná dipólová anténa, pravotočivo kruhovo polarizovaná fliačková anténa so skosenými protiľahlými rohmi a pravotočivo kruhovo polarizovaná anténa quadrifilar helix s rezonančnými frekvenciami 2,4 GHz. Pri jednotlivých modeloch antén boli analyzované ich rôzne umiestnenia vzhľadom ku kostre satelitu CubeSat, z ktorých pre každú anténu boli vybrané tri najvýhodnejšie, ako aj samotný vplyv kostry satelitu na vyžarovacie charakteristiky antény. Ten sa plne prejavil pri dipólovej anténe, pri ktorej bola veľmi výrazná závislosť charakteristík na polohe voči kostre satelitu, pri fliačkovej anténe a anténe QFH sa vplyv kostry v simulovaných charakteristikách objavil, ale často len v minimálnej podobe, napríklad rozšírením alebo zúžením vyžarovacej smerovej charakteristiky o niekoľko stupňov.

Vzhľadom k množstvu vykonaných simulácií jednotlivých konfigurácií a ich optimalizácii bola po dohode s vedúcim bakalárskej práce zvolená pre realizáciu a meranie len jedna anténa oproti dvom, ktoré boli definované v zadaní. Z hľadiska charakteristík sa najlepšou voľbou pre realizáciu stala anténa QFH, ktorá mala najväčšiu šírku vyžarovacieho uhlu v oboch rovinách a bola kruhovo polarizovaná.

Skonstruovaná anténa QFH sa z hľadiska výsledkov značne líšila od jej modelu v programe ANSYS HFSS, hlavne čo sa týka rezonančnej frekvencie antény, ktorá bola 2,2 GHz namiesto požadovanej a simulovanej hodnoty 2,4 GHz, s najväčšou pravdepodobnosťou nepresným dodržaním rozmerov jednotlivých ramien. Vyžarovací uhol antény bol 104° v rovine $\phi = 0^\circ$ a 134° v rovine $\phi = 90^\circ$. Na rezonančnej frekvencii 2,2 GHz mala anténa veľmi zlú hodnotu parametru AR 14,26 dB, teda nebola kruhovo polarizovaná. Pri meraní skonstruovanej antény pomocou vektorového analyzátoru sa však ukázal výraznejší vplyv kostry satelitu na hodnotu činiteľa odrazu ako v prípade simulácií.

LITERATÚRA

- [1] WESTON, Sarah, ed. *State-of-the-Art Small Spacecraft Technology* [online]. 1. Moffett Field (California, USA): NASA Ames Research Center, 2021 [cit. 20.11.2021]. NASA/TP—20210021263. Dostupné z: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/soa_2021.pdf
- [2] VELJOVIC, Miroslav. *Antennas for CubeSat Communication*. Lausanne (Švýcarsko), 2020. Dostupné také z: <https://infoscience.epfl.ch/record/275511>. Disertace. École polytechnique fédérale de Lausanne. Vedoucí práce A. Skrivervik.
- [3] ABULGASEM, Suhila, Faisal TUBBAL, Raad RAAD, Panagiotis THEOHARIS, Sining LU a Saeid IRANMANESH. *Antenna Designs for CubeSats: A Review*. IEEE Access. 2021, 9, 45289-45324. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2021.3066632
- [4] FISHELL, Robert. *Gravity Gradient Stabilization of Earth Satellites*. In: APL Technical Digest. Laurel (Maryland, USA): John Hopkins University Applied Physics Laboratory, 1964, , s. 12-21. vol. 3-5.
- [5] CHAHAT, Nacer, ed. *CubeSat Antenna Design*. 1. Hoboken (New Jersey, USA): Wiley, 2021. ISBN 9781119692584.
- [6] DOODY, David. *Basics of Space Flight*. In: NASA Science: Solar System Exploration [online]. Pasadena (California, USA): NASA Jet Propulsion Laboratory, 2017 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://solarsystem.nasa.gov/basics/>
- [7] *NCEI Geomagnetic Calculators: Magnetic Field Calculators*. In: National Oceanic and Atmospheric Administration: National Centers for Environmental Information [online]. Ashville (Severná Karolína, USA): NCEI NOAA [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>
- [8] MACOUN, Jindra. *Směrovost a zisk antén (1)*. Praktická elektronika: Amatérské radio. Praha (Česká republika): AMARO, 2012, 2012(09), 31-32. ISSN 1804-7173.
- [9] RAIDA, Zbyněk et al. *Multimediální učebnice: Elektromagnetické vlny / Mikrovlnná technika* [online]. Brno (Česká republika): FEKT VUT Brno, 2010 [cit. 2021-12-04]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php>
- [10] BEVELACQUA, Peter. *The Antenna Theory Website: antenna-theory.com* [online]. c2009-2016 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.antenna-theory.com/>

- [11] *Antenna Theory Tutorial: Learn Antenna Theory [online]*. Hyderabad (Telangana, India): Tutorials Point, 2021 [cit. 2021-12-26]. Dostupné z: https://www.tutorialspoint.com/antenna_theory/index.htm
- [12] SLADE, Bill. *The Basics of Quadrifilar Helix Antennas [online]*. Orlando (Florida, USA): Orban Microwave, 2015 [cit. 26.12.2021]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/275828209>
- [13] BALANIS, Constantine. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 3rd ed. Hoboken (New Jersey, USA): Wiley, 2005.
- [14] COPPENS, John. *Quadrifilar Helicoidal Antenna - Javascript on-line calculator [online]*. 2010 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://jcoppens.com/ant/qfh/calc.en.php>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

| | |
|-------|--|
| angl. | anglicky |
| AR | angl. axial ratio |
| HPBW | uhol polovičného výkonu angl. Half Power Beamwidth |
| IEEE | angl. Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| ITU | Medzinárodná telekomunikačná únia angl. International Telecommunication Union |
| LEO | nízka obežná dráha Zeme angl. Low Earth Orbit |
| napr. | napríklad |
| PLF | koeficient polarizačných strát angl. polarisation loss factor |
| QFH | angl. quadrifilar helix |
| resp. | respektíve |
| RHCP | pravotočivo kruhovo polarizovaná angl. right hand circular polarised |
| TT&C | angl. Telemetry, Tracking and Command |