

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Diplomová práce

Optimalizace směrového vyzařování
dvojice všesměrových antén

Poděkování

Zde bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Mrázovi Ph.D. za jeho odborné vedení, konzultace a trpělivost.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne _____

podpis

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan MEJZR**
Osobní číslo: **E12N0078P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Telekomunikační a multimediální systémy**
Název tématu: **Optimalizace směrového vyzařování dvojice všesměrových antén**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

Cílem diplomové práce je optimalizovat původně všesměrové vyzařování dvojice antén s kolmou polarizací tak, aby vykazovala směrovou charakteristiku se šířkou svazku 120 stupňů.

1. Seznamte se s problematikou mikrovlnných plošných antén poskytujících všesměrové charakteristiky a s problematikou sestavování anténních řad z nich. Uvažte aplikace v moderních bezdrátových sítích.
2. Navrhněte pro dané bezdrátové všesměrové zařízení úpravu konfigurace antén s využitím reflektoru tak, aby bylo dosaženo požadovaných směrových vlastností.
3. Využijte softwarového vlnového simulátoru pole pro návrh a ověření návrhu. Navržené řešení zhotovte a upravte dané zařízení ve shodě s návrhem.
4. Proveďte experimentální ověření vlastností navrženého řešení současně se zjištěním chování systému původního a porovnejte elektromagnetické vlastnosti původního uspořádání s uspořádáním po navržené úpravě.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Mráz, Ph.D.**


Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Volné mikrovlnné pásmo 5 GHz, využívané pro pásmo WiFi, je dnes v městském prostředí, díky jeho hojnému využití, téměř nepoužitelné pro realizaci kvalitního, výkonově nepředimenzovaného spoje. Špatná situace je způsobena neodbornou instalací sítí, zejména nevhodnou regulací vysílaného výkonu a zbytečným nadužíváním všesměrových antén. Firma Mikrotik nabízí kvalitní, cenově zajímavá a dálkově dobře spravovatelná zařízení, které se hojně využívají při výstavbě WiFi sítí. V jejich sortimentu však chybí jednotky se sektorovými anténami. Cílem této práce je navrhnout a vyrobit univerzální reflektor, jednoduše upevnitelný na jednotku Mikrotik Omnitik U5HnD, který změní vyzařovací charakteristiku dvou různě polarizovaných všesměrových integrovaných antén na vyzařovací úhel 120° horizontálně a zvýší zisk antén z původních 7,5 dBi na více než 10 dBi. Návrh reflektoru bude realizován v programu CADFEKO pro simulace antén. S následně vyrobeným prototypem reflektoru bude anténa změřena v bezodrazové komoře a výsledky měření budou porovnány s původními anténami. Sektorizací hojně využívaných antén můžeme dosáhnout zlepšení situace při realizaci WiFi sítí v pásmu 5 GHz v městském prostředí.

Abstract

The subject of this bachelors work is development and realization of wireless networks web management system based on the “Mikrotik” technology. This system has the extraordinary capability to centrally control and acquire information from the global and local range routers in the network. The content-matter includes introduction to the actual problem in the network communication protocol and network router data mining, followed by the main parameters of the network setting, concept and realization of the automated system. The last part of the thesis is dedicated to the description and comparison of other similar system that are available on the marked.

Obsah

1 Úvod	5
1.1 Popis řešené problematiky	5
2 Teorie	6
2.1 Základní pojmy a parametry z teorie antén [1]	6
2.1.1 Izotropní zářič	7
2.1.2 Směrový zářič	7
2.1.3 Směrová charakteristika	7
2.1.4 Výkonová hustota vyzářeného pole	8
2.1.5 Intenzita vyzařování	8
2.1.6 Směrovost	9
2.1.7 Vstupní impedance [4]	9
2.1.8 Účinnost antény	10
2.1.9 Vyzařovací účinnost antény	10
2.1.10 Výkonový zisk antény	10
2.2 Použité anténní struktury	11
2.2.1 Planární dipól [4]	11
2.2.2 Štěrbinové antény (Slot antennas) [1]	11
2.2.3 Anténní řady [3]	12
2.3 Reflektorové antény	15
2.3.1 Rovinný reflektor	15
2.3.2 Úhlový reflektor	16
2.4 Mikropáskové napájecí vedení [4]	17
2.5 Program FEKO	17
3 Praktická část	19
3.1 Rozbor použitých anténních struktur	19

3.1.1	Vertikálně vyzařující anténa	20
3.1.2	Horizontálně vyzařující anténa	22
3.2	Poznátky z praktického nasazení jednotky Omnik U-5HND	24
3.3	Návrh reflektoru	25
3.3.1	Návrh reflektoru - vertikální polarizace	25
3.3.2	Návrh reflektoru - horizontální polarizace	27
3.4	Simulace	27
3.4.1	Simulace vertikální struktury	28
3.4.2	Simulace horizontální struktury	29
3.4.3	Simulace vertikální struktury s reflektorem	30
3.4.4	Simulace horizontální struktury s reflektorem	31
3.5	Výroba reflektoru	32
3.6	Měření	32
3.6.1	Postup měření	33
3.6.2	Naměřené hodnoty	34
3.7	Shrnutí výsledků	41
4	Závěr	43
	Obrazová příloha	I

Seznam obrázků

2.1	Definice pojmů na směrové charakteristice antény [1]. a) prostorové zobrazení b) kartézské zobrazení hlavních řezů	8
2.2	Zobrazení principiálních rozdílů (vlevo štěrbinová anténa, vpravo dipól) .	12
2.3	dvojice infinitesimálních dipólů [3]	14
2.4	Některé používané typy reflektorů [3]	15
2.5	Parametry úhlového reflektoru [3]	16
2.6	úhlové reflektory a zrcadlové obrazy jejich zářičů [3]	17
2.7	Návrhové prostředí CADFEKO sloužící pro nákres struktury	18
2.8	Simulační prostředí POSTFEKO	18
3.1	Přední strana jednotky Mikrotik Omnitik U-5HND	20
3.2	Závislost zisku na pracovní frekvenci jednotky Omnitik U-5HND pro jednotlivé polarizace [5]	20
3.3	Přední strana struktury pro vertikální polarizaci (+ pól)	21
3.4	Přední strana struktury pro vertikální polarizaci (- pól)	21
3.5	Směrová charakteristika vertikálně vyzářující antény [5]	21
3.6	Pravá zadní strana struktury pro horizontální polarizaci	22
3.7	Levá zadní strana struktury pro horizontální polarizaci	22
3.8	Přední strana struktury pro horizontální polarizaci	23
3.9	Směrová charakteristika horizontálně vyzářující antény jednotky Omnitik U-5HND [5]	23
3.10	Signál z jednotlivých polarizací v odlišných místech příjmu	24
3.11	Simulované charakteristiky vertikální struktury	28
3.12	Charakteristiky vertikální struktury udané výrobcem [5]	29
3.13	Simulované charakteristiky horizontální struktury	30
3.14	Charakteristiky horizontální struktury udané výrobcem [5]	30

3.15	Charakteristiky vertikálně vyzařující antény s reflektorem (vlevo azimut, vpravo elevace)	31
3.16	Charakteristiky horizontálně vyzařující antény s reflektorem	31
3.17	Naměřené charakteristiky horizontálně polarizované antény v Azimutu (5,5 - 5,8 GHz)	35
3.18	Naměřené charakteristiky horizontálně polarizované antény v Azimutu (5,5 - 5,8 GHz)	36
3.19	Zobrazení změřených hodnot horizontálně polarizované antény v Azimutu pro frekvence 5,5 - 5,8 GHz	37
3.20	Zobrazení změřených hodnot horizontálně polarizované antény v elevaci pro frekvence 5,5 - 5,8 GHz	38
3.21	Zobrazení změřených hodnot vertikálně polarizované antény v azimutu pro frekvence 5,5 - 5,8 GHz	39
3.22	Zobrazení změřených hodnot vertikálně polarizované antény v elevaci pro frekvence 5,5 - 5,8 GHz	40
3.23	Porovnání simulované a změřené vyzařující charakteristiky vertikálně vyzařující antény v azimutu	41
3.24	Porovnání simulované a změřené vyzařující charakteristiky horizontálně vyzařující antény v azimutu	42
1	Model reflektoru pro horizontálně vyzařující anténu	I
2	Zjednodušený model horizontálně vyzařující antény	I
3	Model reflektoru pro vertikálně vyzařující anténu	II
4	Zjednodušený model vertikálně vyzařující antény	II
5	Výkres s rozměry úhlového reflektoru pro Omnitik U5HND	III
6	Přední strana úhlového reflektoru pro jednotku Omnitik U5HND	IV
7	Zadní strana úhlového reflektoru pro jednotku Omnitik U5HND	IV
8	Přední strana úhlového reflektoru pro jednotku Omnitik U5HND	V
9	Zadní strana úhlového reflektoru pro jednotku Omnitik U5HND	V
10	Snímek z měřicí komory při měření Vertikální polarizace v elevaci	VI

Kapitola 1

Úvod

1.1 Popis řešené problematiky

Tato práce má za cíl navrhnout a vyrobit univerzální reflektor, jednoduše upevnitelný na jednotku Mikrotik Omnitik U-5HnD, který změní vyzařovací charakteristiku dvou různě polarizovaných všesměrových integrovaných antén na vyzařovací úhel 120° horizontálně a zvýší zisk antén z původních 7,5 dBi na více než 10 dBi.

Návrh reflektoru bude realizován v programu FEKO pro simulace antén. S následně vyrobeným prototypem reflektoru bude anténa změřena v bezodrazové komoře a výsledky měření budou porovnány s původními anténami.

Práce je rozdělena do tří částí:

První část se zabývá teoretickým úvodem do dané problematiky. Najdete v ní některé základní pojmy z teorie antén, informace o použitých anténních strukturách a programu FEKO, který byl použit pro návrh, optimalizaci a simulaci reflektorů.

Druhá, nejobsáhlejší část se zabývá ryze praktickou částí. Obsahuje popis struktury originálních antén, návrh obou reflektorů a jejich odladění v programu FEKO, jejich výrobu a měření v bezodrazové komoře. Na konci jsou porovnány simulované výsledky s výsledky naměřenými v bezodrazové komoře.

Třetí částí je závěr, ve kterém je celá práce shrnuta.

Kapitola 2

Teorie

Anténa je zařízení, které slouží pro příjem a vysílání radiových signálů. Je to hraniční prvek radiokomunikačního řetězce, který zprostředkovává změnu charakteru šíření harmonické elektromagnetické vlny z šíření podél uměle vytvořeného vedení na šíření v obecném prostoru a naopak. Vzhledem ke skutečnosti, že se na různých frekvencích chová elektromagnetická vlna ve volném prostoru odlišně, musíme i konstrukční řešení samotných antén přizpůsobit jejich konkrétnímu použití. Základní dělení antén je na vysílací a přijímací.

V našem případě se jedná o dvojici všesměrových antén, z nichž jedna je určena pro vertikální a druhá pro horizontální polarizaci. Antény pracují ve frekvenčním pásmu 5 GHz dle standardu IEEE 802.11 a/n. Anténa pro vertikální polarizaci je tvořena anténní řadou sestavenou z pěti párů plošných dipólů, které by měly zajistit zvýšení zisku a zúžení vyzařovací charakteristiky v nežádoucím směru. Horizontální anténa je tvořena čtyřmi páry štěrbinových antén pootočených o úhel 69° . Použití více prvků má opět za následek zvýšení zisku a zúžení charakteristiky v nežádoucím směru.

Na následujících několika stranách se kvůli správnému pochopení funkce těchto antén zaměříme kromě základních parametrů antén na problematiku plošného dipólu, štěrbinových antén a anténních řad.¹

2.1 Základní pojmy a parametry z teorie antén [1]

Parametry antén můžeme rozdělit do dvou základních skupin. Do první skupiny patří parametry, které popisují antény z hlediska jejich vnějšího chování, tj. jak se anténa chová

¹ Informace pro tuto kapitolu jsou čerpány ze zdroje [1]

při měření ve volném prostoru kolem ní (směrové charakteristiky, polarizační charakteristiky, směrovost), do druhé pak patří ty parametry, které lze naměřit přímo na anténě jako na části obvodu (impedanční vlastnosti). Jak směrové tak impedanční vlastnosti spolu souvisí, protože jejich základní podstata vychází z rozložení zdrojových veličin (proudů) na anténě. Anténa je koncovým prvkem radiokomunikačního řetězce a svými parametry zásadně ovlivňuje jeho celkovou kvalitu. Vzhledem k tomu, že anténa jak na přijímací tak vysílací straně přímo interaguje s elektromagnetickou vlnou, je anténa citlivá na frekvenci, směr šíření a polarizaci vlny.

2.1.1 Izotropní zářič

Jedná se o všesměrovou fyzikálně nerealizovatelnou anténu, jejíž vyzařovací vlastnosti nejsou závislé na směru. Používá se jako reference pro popis vlastností reálných antén.

2.1.2 Směrový zářič

Směrová anténa, která má výše uvedené vlastnosti podstatně závislé na konkrétním směru.

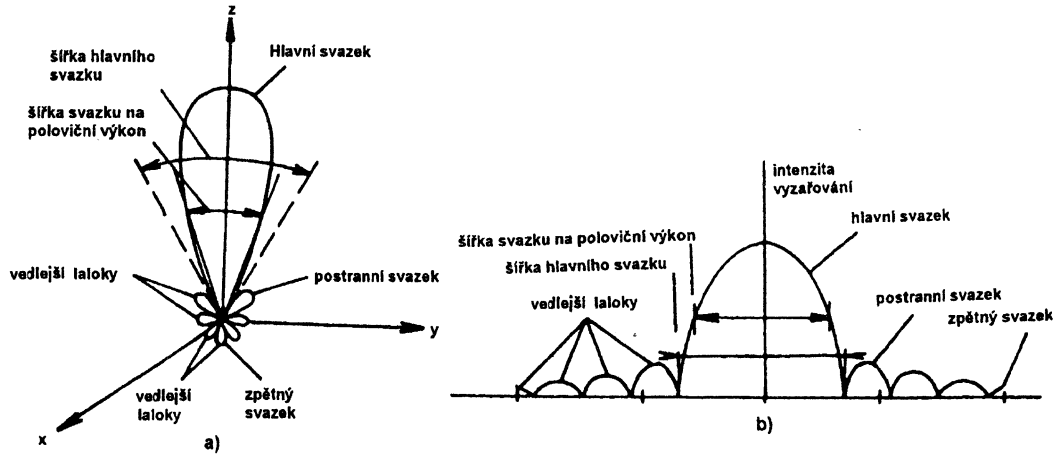
2.1.3 Směrová charakteristika

Směrová charakteristika (směrový diagram) je grafickým vyjádřením směrových vlastností antény v závislosti na prostorových souřadnicích. Nejčastěji se určuje pro vzdálenou oblast. Směrová charakteristika je často zaměňována s vyzařovací charakteristikou, což je z principu reciprocity možné. Termín směrová používáme u přijímacích antén a vyzařovací u vysílacích. Do směrových vlastností zahrnujeme intenzitu elektrického pole (obecně amplitudu a fázi) a polarizační vlastnosti. Používáme dvě základní směrové charakteristiky:

- výkonovou směrovou charakteristiku (power pattern) - zobrazuje přijímaný výkon
- směrovou (napěťovou) charakteristiku (field pattern) - zobrazuje intenzitu elektrického pole

V praxi se měří třírozměrná směrová charakteristika, která se pro názornost zobrazuje do jednotlivých řezů v dvourozměrném souřadném systému. Využívají se především řezy v hlavních rovinách (vertikální a horizontální) v závislosti pouze na jedné proměnné (úhlu). Velmi často se používá zobrazení vyzařovací charakteristiky v rovině E (E plane) a v rovině H (H plane), kdy se vyzařovací charakteristika protne vektorem intenzity

elektrického či magnetického pole. Asi nejnázornějším zobrazením je zobrazení v polárních souřadnicích.



Obrázek 2.1: Definice pojmů na směrové charakteristice antény [1].

a) prostorové zobrazení

b) kartézské zobrazení hlavních řezů

2.1.4 Výkonová hustota vyzářeného pole

Výkonová hustota je dána Poyntingovým vektorem, který je dán součinem okamžitých hodnot intenzity elektrického a magnetického pole 2.1.

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{e} \times \mathbf{h} \quad (2.1)$$

Celkový výkon antény získáme integrací Poyntingova vektoru přes obklopující plochu. Pro časově periodicky proměnná pole pak můžeme zapsat Poyntingův vektor a následnou integrací z něho získaný výkon takto:

$$\mathbf{S}(x, y, z) = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}] \quad (2.2)$$

$$\mathbf{P}_{vyz} = \frac{1}{2} \oint \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}] dS \quad (2.3)$$

2.1.5 Intenzita vyzařování

Intenzita vyzařování U je parametr platný pro tzv. vzdálenou oblast, který je definován jako výkon vyzařovaný anténou do jednotkového úhlu. Spočteme jej podle vzorce

jako násobek vyzařované výkonové hustoty se čtvercem vzdálenosti.

$$\mathbf{U} = r^2 \mathbf{S}_{vyz} \quad (2.4)$$

\mathbf{U} - intenzita vyzařování [$W \cdot sr^{-1}$]

S_{vyz} - hustota vyzařovaného výkonu [$W \cdot m^{-2}$]

r - vzdálenost od zdroje (antény) [m]

2.1.6 Směrnost

Směrnost D (directivity) je poměr intenzity vyzařování U v daném směru k intenzitě vyzařování referenční antény U_0 . Ve většině případů se jako referenční anténa používá izotropický zářič, ale lze použít i krátký nebo půlvlnný dipól. Vždy je nutné uvádět k jakému zářiči je hodnota vztažena. Pro případ přepočtu směrnosti od všesměrového referenčního zářiče k elementárnímu zářiči musíme odečíst 1,76 dB. Pro případ přepočtu údaje k půlvlnnému zářiči odečíst 2,15 dB. Je důležité říci, že často se pod pojmem směrnost myslí směrnost ve směru hlavního maxima antény.

$$D(\vartheta, \varphi) = \frac{U(\vartheta, \varphi)}{U_0} = \frac{4 \pi U(\vartheta, \varphi)}{P_{vyz}} \quad (2.5)$$

$$D_{max} = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4 \pi U_{max}}{P_{vyz}} \quad (2.6)$$

$$U_{max} = B_0 F_{max}^2(\vartheta_0, \varphi_0) \quad (2.7)$$

F_{max} - maximum směrové charakteristiky (napěťové)

ϑ_0, φ_0 - úhly určují směr maxima vyzařování

B_0 - konstanta úměrnosti

2.1.7 Vstupní impedance [4]

Vstupní impedance antény je impedance, kterou bychom naměřili na vstupních svorkách antény. Skládá se z vyzařovacího odporu R_{vyz} (po jeho vynásobení s kvadrátem proudu I_{vst}^2 dostaneme činný vyzářený výkon), ze ztrátového odporu ($R_{vyz} I_{vst}^2$ udává výkon, který se v anténě a jejím okolí mění na teplo) a z reaktance záření X_A (popisuje vzájemné přelévání energie mezi anténou a elektromagnetickým polem v jejím okolí). Vyzařovací odpor a reaktance spolu tvoří impedanci zařízení.

2.1.8 Účinnost antény

Celkovou účinnost antény vyjádříme jako podíl celkového vyzářeného výkonu antény P_{vyz} a výkonu dodaného na její vstup P_{vst} .

$$\eta = \frac{P_{vyz}}{P_{vst}} \quad (2.8)$$

Tato celková účinnost v sobě zahrnuje ztráty na vstupu a uvnitř anténní struktury. Celkovou účinnost lze také vyjádřit jako součet ztrát, které vznikají na vstupu a uvnitř anténní struktury.

$$\eta = \eta_r \eta_d \eta_e \quad (2.9)$$

- η - bezrozměrná celková účinnost antény
- η_r - ztráty odrazem výkonu v důsledku nepřizpůsobení napájecího vedení a antény
- η_d - ztráty v důsledku konečné vodivosti kovových částí antény
- η_e - dielektrické ztráty v dielektriku anténní struktury

Celkovou účinnost antény dále ovlivňují prvky, které jsou sice mimo anténní strukturu, ale nacházejí se v jejím blízkém poli. Ovlivňují rozložení proudů, napětí a absorbují část výkonu.

2.1.9 Vyzařovací účinnost antény

Vyzařovací účinnost antény je definována vztahem

$$\eta_{vyz} = \frac{R_{vyz}}{R_{ztr} + R_{vyz}} = \eta_c + \eta_d \quad (2.10)$$

a slučuje v sobě ztráty způsobené konečnou vodivostí materiálu η_c a ztráty v dielektriku η_d .

2.1.10 Výkonový zisk antény

Výkonový zisk antény je dán poměrem vysílaného výkonu z antény do vzdálené zóny k výkonu dodávanému na vstup antény. Často se definuje jako 4π krát poměr intenzity vyzařování v daném směru k výkonu přiváděnému do antény. Pro obecný směr je výkonový zisk G definován jako

$$G(\vartheta, \varphi) = 4\pi \frac{U(\vartheta, \varphi)}{P_{vyz}} \quad (2.11)$$

Častěji se používá relativní zisk, jako poměr výkonového zisku v daném směru k výkonovému zisku referenční antény, např. všesměrovému zářiči. Potom je zisk antény poměr výkonu bezeztrátové referenční antény k výkonu, který musíme přivést do skutečné antény, aby produkovala v daném směru stejné pole.

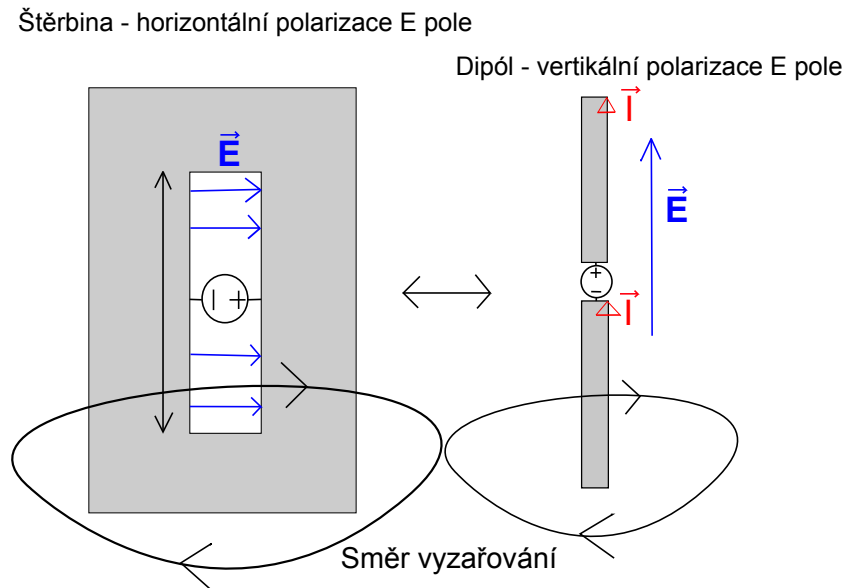
2.2 Použité anténní struktury

2.2.1 Planární dipól [4]

Planární dipól je velmi podobný flíčkové anténě, odlišuje ho však jeho poměr délky k šířce. Šířka dipólu je obvykle menší než $0,05 \lambda_0$ (délka vlny ve volném prostoru). Vyzařovací charakteristiky dipólu a flíčku jsou shodné při shodném podélném rozložení proudu. Nicméně vyzařovací odpor, šířka pásma a úroveň křížové polarizace se liší. Mikropáskové dipóly jsou zajímavé antény díky svým vlastnostem, kterými jsou malá velikost a lineární polarizace. Dipóly jsou velice vhodné pro vyšší frekvence a dosahují výrazných šířek pásma. Příkladem je symetrický skládaný tištěný dipól, který je ze složeného dipólu kombinovaného s jiným shodným dipólem (zrcadlový obraz) a vytváří tak symetrickou strukturu. Tato struktura může být považována za obdélníkový flíček se štěrbinou tvaru H. Při $PSV = 2$ je šířka pásma tohoto dipólu kolem 16 %.

2.2.2 Štěrbínové antény (Slot antennas) [1]

Štěrbínová anténa je jedním ze dvou druhů použitých antén v anténní soustavě, se kterou pracujeme. Štěrbínové antény se typicky používají pro frekvence od 300 MHz do 24 GHz. Jsou velice oblíbené, protože je lze velmi snadno vytvořit na libovolném povrchu. Jedná se o lineární antény s všesměrovou vyzařovací charakteristikou, které vyzařují z ozářené plochy. Při jejich návrhu můžeme libovolně pracovat s jejich rozměry a tvarem, abychom dosáhli požadovaných parametrů, což následně vede k jejich velmi obtížné analýze. Štěrbínovou anténu vytvoříme tak, že v tenkém nekonečně velkém vodivém stínítku vyřízneme úzkou štěrbinu. Pokud ve štěrbině vybudíme elektrické pole podobné dominantnímu vidu v obdélníkovém vlnovodu, bude toto pole kolmé ke štěrbině a podél ní se jeho velikost bude měnit podle sinusovky. V okolním prostředí má elektrické pole půlkruhový charakter. Magnetické pole ve štěrbině má pouze kolmou složku a jeho tvar připomíná elektrické pole páskového dipólu. Štěrbínová anténa a páskový dipól jsou navzájem duální útvary a můžeme pro jejich řešení uplatnit Babinetův princip (obr.2.2).



Obrázek 2.2: Zobrazení principiálních rozdílů
(vlevo štěrbinová anténa, vpravo dipól)

Můžeme tedy řešení problému přenést na problém duální, a elektrické pole tak nahradit magnetickým, a magnetické záporným elektrickým. Toto tvrzení je však omezené, protože oba útvary mají pro svá pole různé hraniční podmínky. U páskového dipólu je okolní prostor spojitý, kdežto u štěrbině jsou oba poloprostory odděleny vodivou deskou.

2.2.3 Anténní řady [3]

Vyzařovací diagram jednoho prvku je relativně široký a samotný prvek má malou hodnotu zisku. V mnoha případech je tak nutné navrhnout anténu s úzce směrovou charakteristikou (velkým ziskem) pro dosažení velkých komunikačních vzdáleností. Při použití jednoho prvku můžeme dosáhnout lepší směrovosti pouze zvětšením jeho rozměru. Další možností jak dosáhnout úzce směrové charakteristiky, a přitom nezvětšovat rozměr prvku, je použití více prvků ve vzájemné geometrické a elektrické konfiguraci. Takovéto antény říkáme anténní řada. Jednotlivé prvky řady jsou většinou shodné, což je při konstrukci velmi praktické, ale není to tak vždy. Jednotlivé prvky anténní řady mohou mít různé tvary (drát, flíček, štěrbin, atd.). Celkové pole je dáno součtem příspěvků polí jednotlivých prvků za předpokladu, že uvažujeme ve všech prvcích shodné rozložení proudů jako v osamoceném izolovaném prvku. V praxi však toto neplatí, protože se prvky vzájemně ovlivňují a tak i proudové rozložení závisí na mnoha faktorech, jako je např. vzdálenost,

intenzita pole apod. Podmínkou dosažení úzce směrové charakteristiky je, aby pole jednotlivých prvků směřovalo vždy do požadovaného směru a ne jinam. Toho lze však dosáhnout pouze v ideálním případě. V praxi můžeme tvar vyzařovací charakteristiky řídit pomocí pěti pravidel:

- geometrického uspořádání celého pole (lineární, kruhové, válcové, atd.)
- relativní vzdálenosti mezi prvky
- amplitudě buzení jednotlivých prvků
- budící fáze jednotlivých prvků
- vyzařovacího diagramu jednotlivých prvků

Nejjednodušší a nejčastěji používané řešení je umístění jednotlivých prvků v jedné řadě. Asi nejjednodušší anténní řadou je dvouprvková anténní řada.

Dvouprvková anténní řada [3]

Předpokládejme, že anténa, kterou se zabýváme je anténní řada složená ze dvou nekonečně tenkých horizontálních dipólů umístěných podél osy z , jak ukazuje obrázek 2.3. Celkové pole vyzářené těmito prvky, za předpokladu, že jsou vzájemně nevodivě odděleny, je rovné součtu dvou, a v ose y - z je dáno:

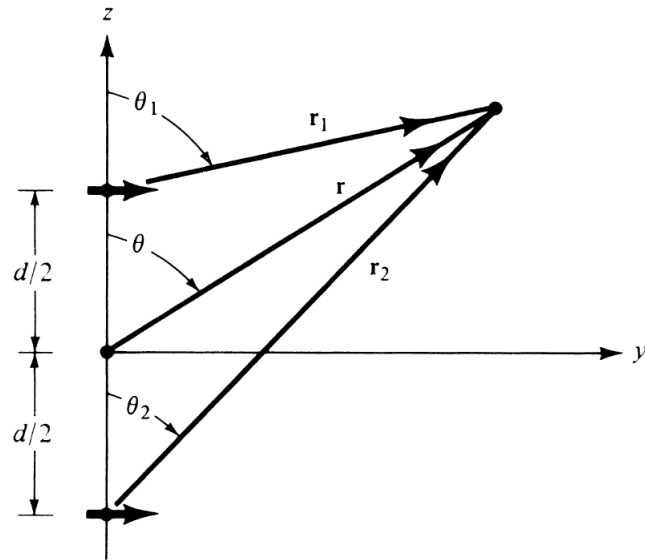
$$E_t = E_1 + E_2 = a_0 j \eta \frac{kI_0 l}{4\pi} \left\{ \frac{e^{-j[kr_1 - (\beta/2)]}}{r_1} \cos\Theta_1 + \frac{e^{-j[kr_2 - (\beta/2)]}}{r_2} \right\} \quad (2.12)$$

kde β je fázový rozdíl mezi prvky. Velikost buzení zářičů je stejná. Rovnici 2.12 dále upravíme následovně:

$$\begin{aligned} E_t &= a_0 j \eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos\Theta [e^{+j(kd \cos\Theta + \beta/2)} + e^{-j(kd \cos\Theta + \beta/2)}] \\ E_t &= a_0 j \eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos\Theta \{2 \cos[\frac{1}{2}(kd \cos\Theta + \beta)]\} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Z této úpravy je patrné, že celkové pole anténní řady je rovné poli jednoho prvku násobeného konstantou, které se říká faktor anténní řady (AF - Array factor). Ten je pro dvouprvkové pole o konstantní amplitudě dán vzorcem:

$$AF = 2 \cos\left[\frac{1}{2}(kd \cos\Theta + \beta)\right] \quad (2.14)$$



Obrázek 2.3: dvojice infinitesimálních dipólů [3]

a jeho normalizovaný tvar je:

$$(AF)_n = \cos\left[\frac{1}{2}(k d \cos\Theta + \beta)\right] \quad (2.15)$$

Faktor anténní řady je funkce závislá na geometrii pole a jeho vyzařované fázi. Změnou vzdálenosti d nebo fáze β mezi jednotlivými prvky se mění jak AF tak charakteristika celkového pole.

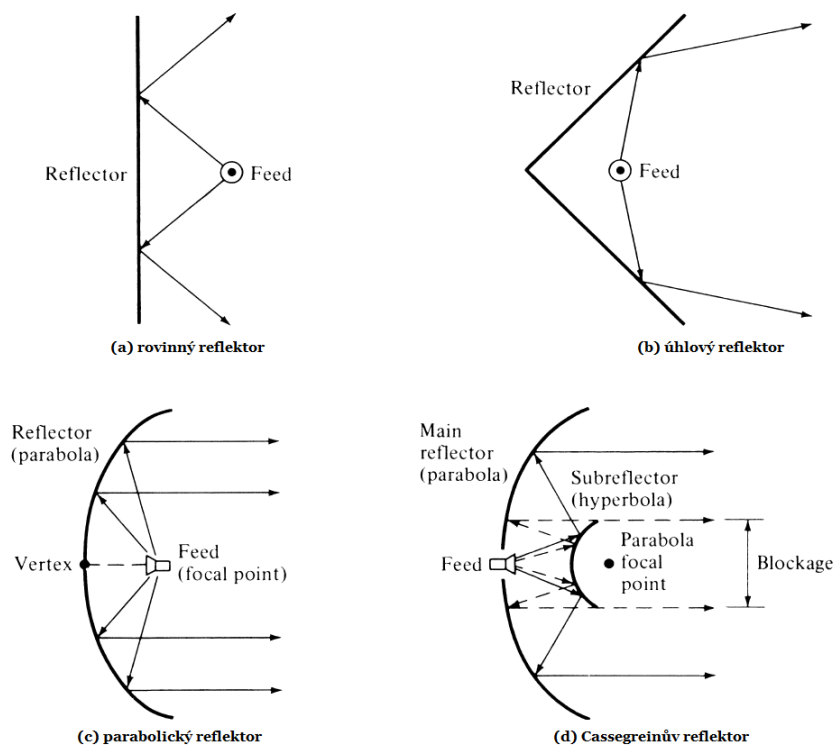
Vzorec 2.16 platí pouze pro dvouprvkovou anténní řadu, ve které je relativní velikost prvků stejná.

$$\boxed{\mathbf{E}(\text{celkové}) = \mathbf{E}(\text{jedoho prvku v referenčním bodě}) \times AF} \quad (2.16)$$

Každá anténní řada má svůj AF. AF je funkce závislá na počtu prvků, jejich geometrickém uspořádání, relativní velikosti, fázi a vzájemné vzdálenosti. AF bude mít jednodušší zápis, pokud budou mít jednotlivé prvky stejné amplitudy, fáze a vzdálenosti. Vzhledem k tomu, že AF nezávisí na směrových charakteristikách jednotlivých zářičů, můžeme při jeho formulaci použít záměnu zářičů za izotropní (bodové) zdroje. Jakmile odvodíme AF pomocí pole bodových zdrojů, celkové pole pak získáme pomocí vzorce 2.16.

2.3 Reflektorové antény

Reflektorové antény se používají od objevení elektromagnetického vlnění Heinrichem Rudolfem Hertzem roku 1888. Jejich největší rozmach byl v době 2. světové války při nasazení v radarových aplikacích. Díky jejich velkému zisku v porovnání s jejich rozměrem jsou předurčeny pro komunikace na velké vzdálenosti. Anténních reflektorů je celá řada, ale pro tuto konkrétní aplikaci se zaměříme na rovinný a úhlový reflektor, které jsou použitelné pro zkoumanou anténu.



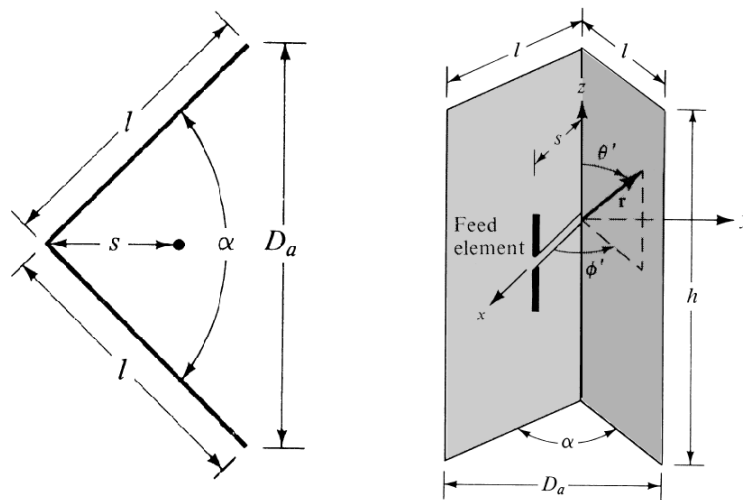
Obrázek 2.4: Některé používané typy reflektorů [3]

2.3.1 Rovinný reflektor

Nejjednodušším typem reflektoru je rovinný reflektor, který směruje energii požadovaným směrem. Jeho zobrazení můžeme vidět na obrázku 2.4 (a). Při jeho umístění do správné vzdálenosti od zářiče můžeme vytvořit širokou směrovou charakteristiku (malý zisk). Vzhledem k tomu, že se vlastně jedná o úhlový reflektor o úhlu otevření 180° , je jeho analýza shodná s úhlovým reflektorem, který bude probrán podrobněji v následující části.

2.3.2 Úhlový reflektor

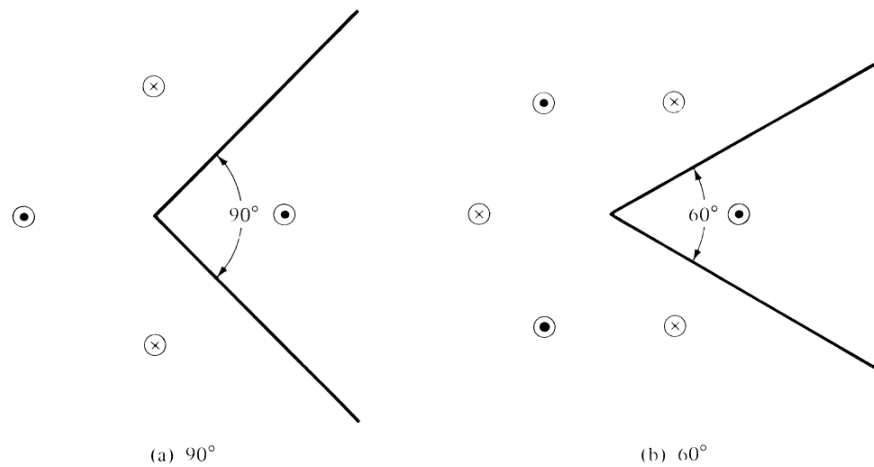
Pro lepší soustředění energie v požadovaném směru musíme zamezit vyzařování do všech ostatních směrů. Abychom toho dosáhli, musíme změnit tvar standardního plošného reflektoru. Jednou z možností je použití reflektoru složeného ze dvou odrazných ploch tzv. úhlového reflektoru, který je na obrázku 2.4 (b). S tímto reflektorem jsme schopni dosáhnout úzké vyzařovací charakteristiky a tedy velkého zisku. Pro sestavení úhlového reflektoru je nutné znát velikosti jednotlivých konstrukčních parametrů, které jsou na obrázku 2.5. V praxi se rozměr D_a úhlového reflektoru pohybuje od jedné do dvou



Obrázek 2.5: Parametry úhlového reflektoru [3]

vlnových délek ($\lambda < D_a < 2\lambda$). Délka stran l se při použití 90° úhlu otevření bere dvojnásobek vzdálenosti zářiče od středu reflektoru ($l \simeq 2s$). Pro reflektory s menším úhlem je l větší. Vzdálenost zářiče od reflektoru s je nejčastěji $\lambda/3$ a $2\lambda/3$ ($\lambda/3 < s < 2\lambda/3$). Pro každý reflektor existuje optimální vzdálenost od zářiče. Pokud je vzdálenost příliš malá, klesá odolnost systému vůči rušení a snižuje se jeho účinnost. Pokud je naopak příliš velká, produkuje velké množství nežádoucích postranních laloků a ztrácí na směrovosti. Měření také prokázala, že zvětšování stěn reflektoru nemá vliv na šířku svazku ani směrovost, ale zvětšuje šířku pásma a odolnost proti rušení. Výška reflektoru (h) je nejčastěji 1.2 až 1.5 násobek celkové délky zářiče, aby zabránila záření do nežádoucího zpětného směru.

Pro analýzu úhlového reflektoru se používá metoda zrcadlení. Rozmístění jednotlivých zrcadel je závislé na úhlu reflektoru viz. obr. 2.6.



Obrázek 2.6: úhlové reflektory a zrcadlové obrazy jejich zářičů [3]

2.4 Mikropáskové napájecí vedení [4]

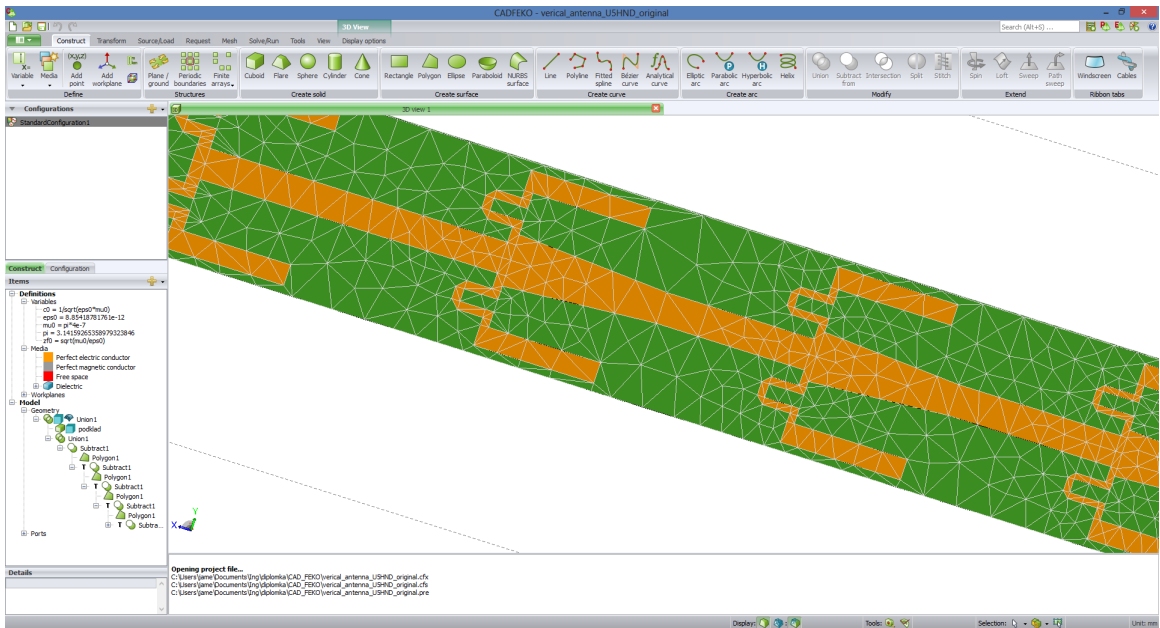
Napájecí struktura ovlivňuje impedanční přizpůsobení, provozní módy, parazitní vyzařování, šíření povrchových vln nebo vyzářený výkon. Nejčastěji se používá napájení koaxiálním kabelem (vnější vodič spojen se zemní plochou, vnitřní vodič s anténním prvkem) a napájení mikropáskovým vedením, které je použito v našem případě.

Buzení antény pomocí mikropáskového vedení je dnes velmi častou volbou. Hlavním důvodem je skutečnost, že anténní prvek i napájecí struktura jsou vyráběny najednou. Dalším důvodem je rovněž fakt, že i samotný anténní prvek může být použit jako prodloužení mikropáskového vedení.

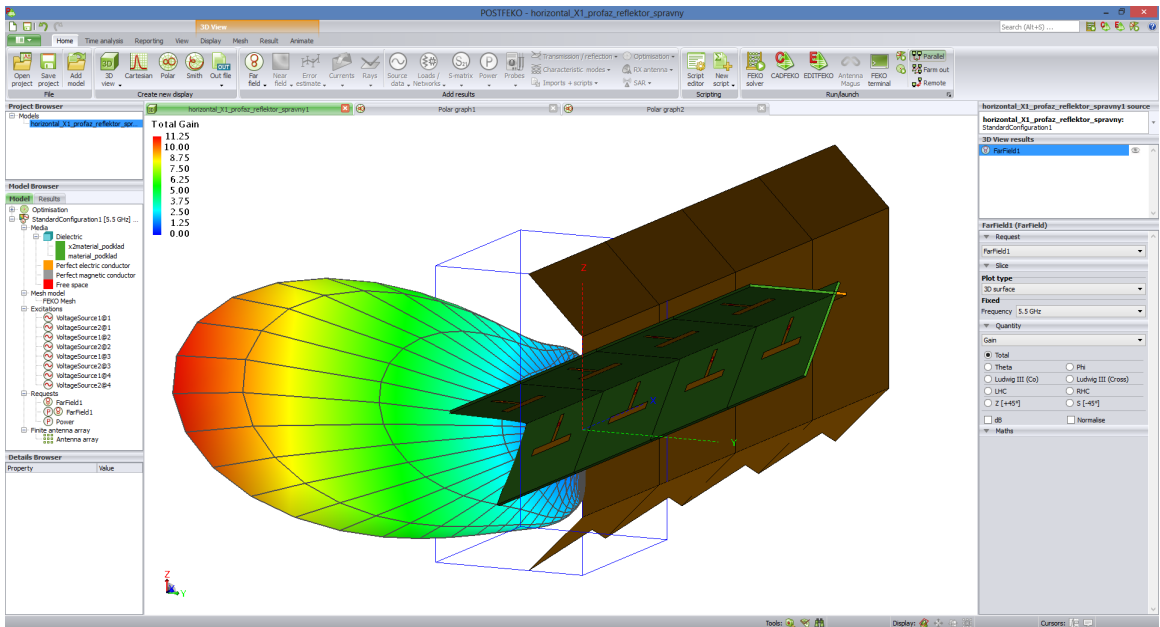
2.5 Program FEKO

Pro simulace antén a návrh reflektorů byl použit počítačový simulační software FEKO Suite od firmy EM Software & systems-S.A.. Z tohoto balíku byly použity programy CADFEKO pro fyzický návrh a optimalizaci antény a POSTFEKO pro samotné grafické zobrazení rozložení polí v 2-D a 3-D diagramech. FEKO je komplexní simulační softwarový nástroj pro simulaci elektromagnetických polí, založený na moderních technikách výpočtů. Díky jeho simulačním možnostem, které nabízí mnoho technik řešení problému se používá v celé řadě průmyslových odvětví. Typicky se používá pro analýzu antén, různých EMC problémů (stínění krytů, analýzy kabelových spojek), analýzu homogenních a nehomogenních těles, vlnovodných struktur a podobně. Pracovní prostředí

programu CADFEKO a POSTFEKO je na obrázcích 2.7 a 2.8.



Obrázek 2.7: Návrhové prostředí CADFEKO sloužící pro náčrt struktury



Obrázek 2.8: Simulační prostředí POSTFEKO

Kapitola 3

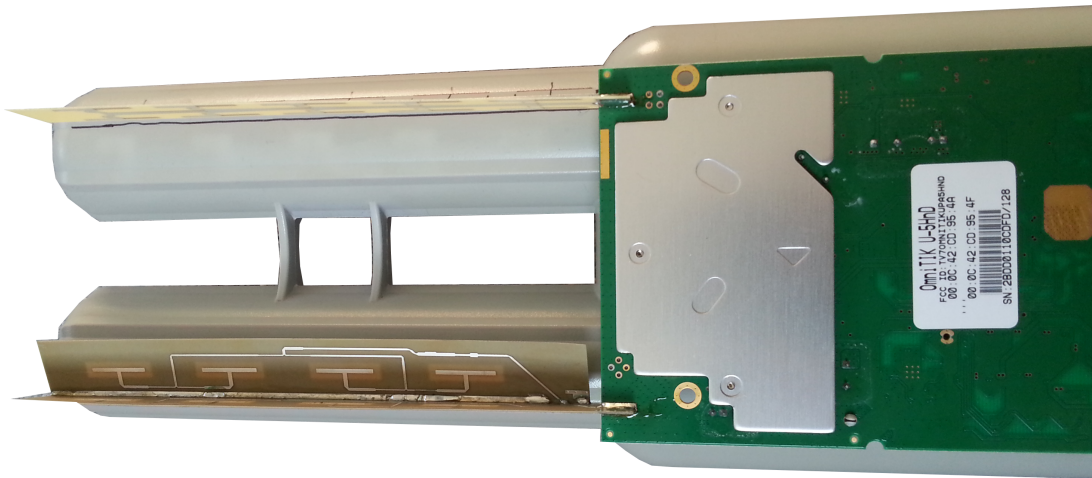
Praktická část

Tato kapitola je rozdělena do pěti částí. V první části je podrobně popsána fyzická struktura antén jednotky Omnitik U-5HND a jejich parametry udané výrobcem. Druhá část pojednává o postupu při návrhu jednotlivých reflektorů. Třetí část obsahuje postup při simulacích jednotlivých antén s následnou aplikací navržených reflektorů a porovnáním změn v jejich vyzařovacích charakteristikách. Čtvrtá část informuje o postupu výroby reflektorů a obsahuje technickou dokumentaci potřebnou k jejich výrobě. Poslední pátá část obsahuje data z měření v bezodrazové komoře a data z reálného měření ve venkovním prostředí a jejich vzájemné srovnání.

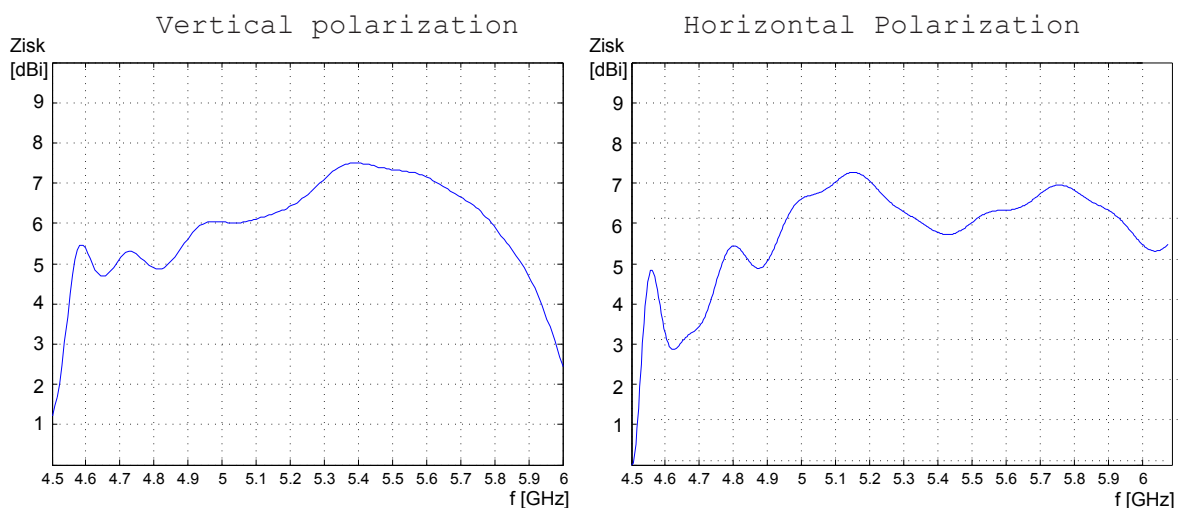
3.1 Rozbor použitých anténních struktur

Aby bylo možné reflektory správně navrhnout, bylo nejprve nutné podrobně se seznámit s anténní strukturou jednotek Mikrotik Omnitik U-5HND. Tato jednotka slouží jako přístupový bod pro klientské jednotky síťové infrastruktury pracující v pásmu 5 GHz podle normy IEEE 802.11 a/n. Protože nároky na síťový provoz z hlediska datových objemů jsou v současnosti stále vyšší, využívá tato jednotka pro zvětšení šířky pásma systém MIMO (systém více antén), který je tvořen dvěma anténami s odlišnou polarizací. Na obrázku 3.1 je foto anténního systému jednotky Omnitik U-5HND. Z obrázku je na první pohled patrné, že se anténní struktury pro jednotlivé polarizace zásadně liší jak tvarem, tak počtem prvků anténní řady a bude proto nutné navrhnout dvojici reflektorů oproti jednomu původně očekávanému.

Ze slepých charakteristik na obrázku 3.1 je vidět, jak se zisk jednotlivých antén mění v závislosti na frekvenci. Grafy jsou převzaty přímo z datasheetu výrobce. Na ose X by měl být zisk a na ose Y frekvence v GHz.



Obrázek 3.1: Přední strana jednotky Mikrotik Omnitik U-5HND



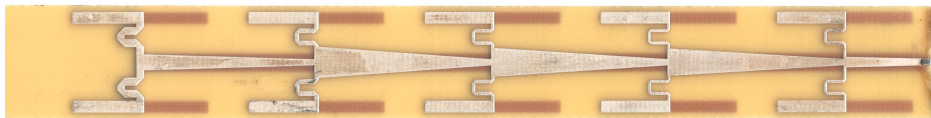
Obrázek 3.2: Závislost zisku na pracovní frekvenci jednotky Omnitik U-5HND pro jednotlivé polarizace [5]

Na Obrázku

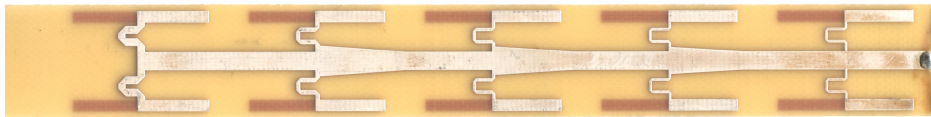
3.1.1 Vertikálně vyzařující anténa

Na obrázcích 3.3 a 3.4 je detailní záběr vertikálně vyzařující anténní struktury. Ta je tvořena pěti páry sério-parallelně řazenými plošnými dipóly na dielektrickém substrátu o tloušťce 0,5 mm. Jednotlivé dipóly jsou napájeny pomocí plošného dvouvodičového vedení. Plocha zemní strany dvouvodičového vedení je širší, aby se zabránilo nadbytečnému vyzařování napájecí struktury, která by měla následný vliv na celkovou vyzařovací charakteristiku antény. Můžeme si povšimnout, že napájecí vedení se od prvního páru dipólů

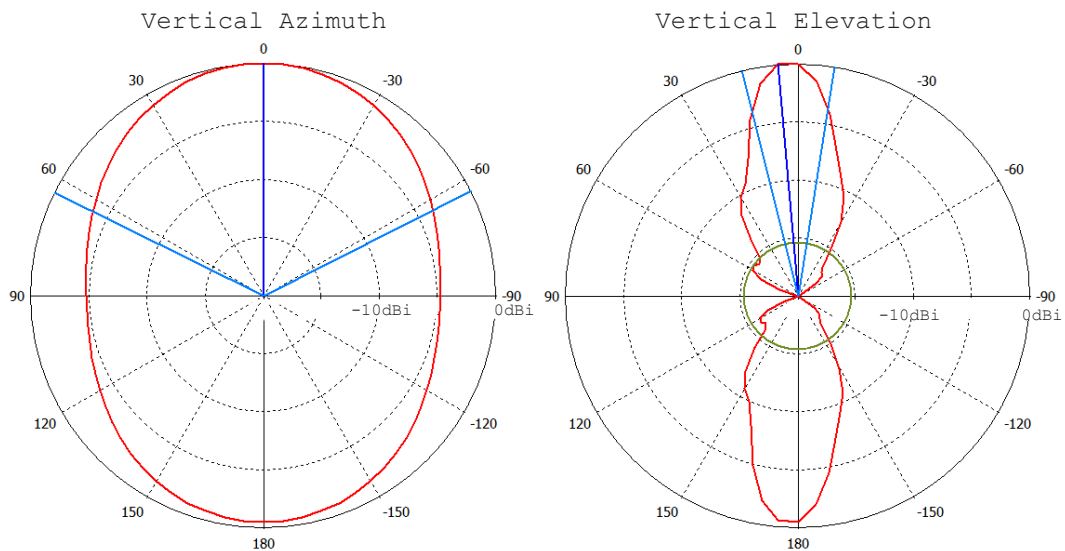
rozšiřuje. Toto postupné rozšíření zajišťuje vyrovnanou hodnotu impedance ke všem dipólům a udržuje tak stejnou hodnotu budícího napětí. Samotná paralelní dvojice dipólů vykazuje všesměrovou charakteristiku se ziskem okolo 2,5 dBi. Aby došlo ke zvýšení zisku a zúžení vyzařovacího diagramu, jsou přidány další 4 páry těchto dvojic. Získáváme tak velmi úzkou všesměrovou vyzařovací charakteristiku se ziskem okolo 7,5 dBi, který udává výrobce.



Obrázek 3.3: Přední strana struktury pro vertikální polarizaci (+ pól)



Obrázek 3.4: Přední strana struktury pro vertikální polarizaci (- pól)



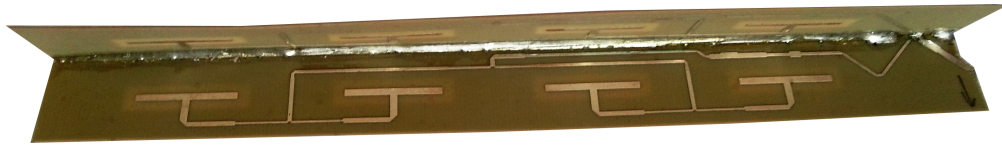
Obrázek 3.5: Směrová charakteristika vertikálně vyzařující antény [5]

Obrázek 3.5 ukazuje směrový diagram vertikálně vyzařující struktury jednotky Omnitik U5HND v obou polarizacích. Z diagramu je patrné, že charakteristika je oproti

složitější horizontální struktura na obr. 3.9 více symetrická a nejsou v ní tak znatelné výkonové propady. Z charakteristik můžeme vyčíst, že v azimutu má vertikální struktura směrovost (bráno při poklesu o -3 dB) 130° a v elevaci 30° .

3.1.2 Horizontálně vyzařující anténa

Na obrázcích 3.6 3.7 3.8 je zobrazen detailní záběr horizontálně vyzařující struktury. Ta je složena ze čtyřech párů štěrbinových antén, jež jsou buzeny pomocí kapacitní vazby s budiči na opačné straně substrátu. Tyto páry jsou umístěny na dvojici substrátů svírajících úhel 69° s propojenou zemní plochou. Pootočení substrátů vůči sobě má za následek všesměrové rozložení vyzařovací charakteristiky. Čtyři nad sebou posazené řady, obdobně jako u vertikální struktury, generují větší zisk a zúžení charakteristiky v nežádoucím směru. Zajímavé je zde provedení rozvodu napájecího vedení, které je děleno již v dolní části antény a poté na jednotlivých, vzájemně pootočených substrátech paralelně napájí jednotlivé budiče budící elektrické pole ve štěrbinách.

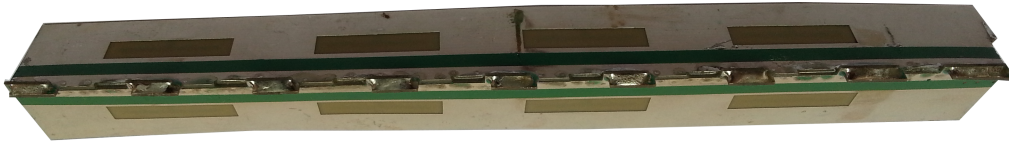


Obrázek 3.6: Pravá zadní strana struktury pro horizontální polarizaci

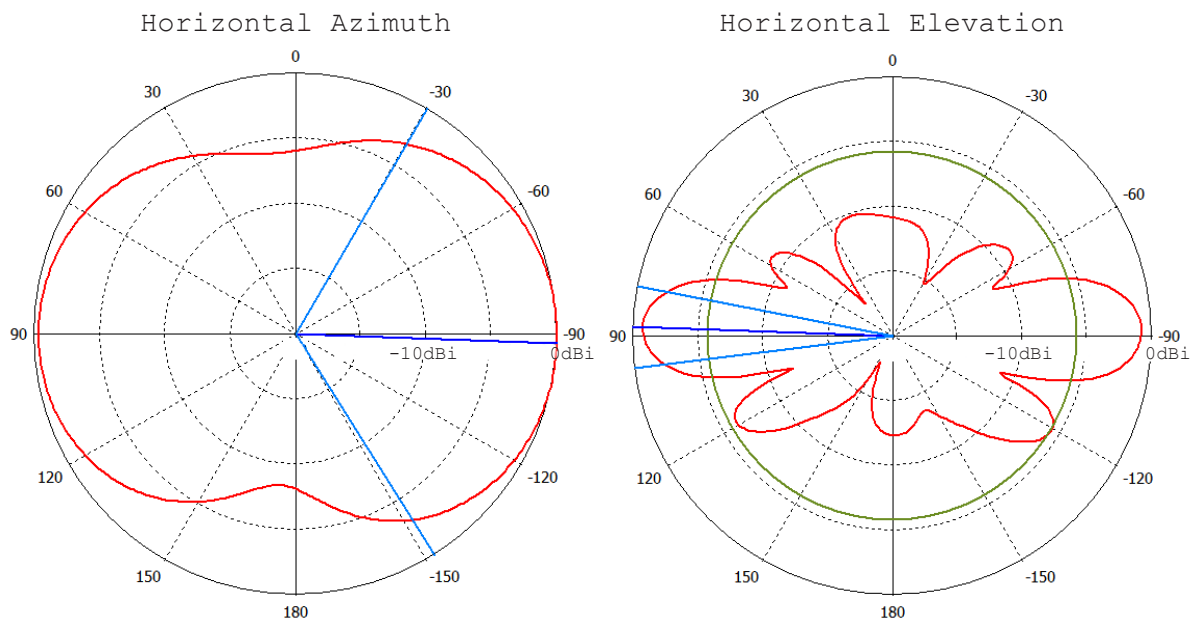


Obrázek 3.7: Levá zadní strana struktury pro horizontální polarizaci

Na obrázku 3.9 je zobrazen směrový diagram antény pro obě polarizace horizontálně vyzařující struktury. Je patrné, že charakteristika azimutu není zcela symetrická a mezi místem nejnižšího a nejvyššího zisku je zhruba 8 dB rozdíl, což je velký výkonový propad a může být zásadní pro kvalitu bezdrátového spoje v tomto úhlu na větší vzdálenost. Jednotka je však určena pro krátké vzdálenosti do okruhu kolem 1 km a tak je tato ztráta vzhledem k použití dvou polarizací, které se navzájem kompenzují, a nízké prodejní ceně jednotky, výrobcem přijatelná.



Obrázek 3.8: Přední strana struktury pro horizontální polarizaci



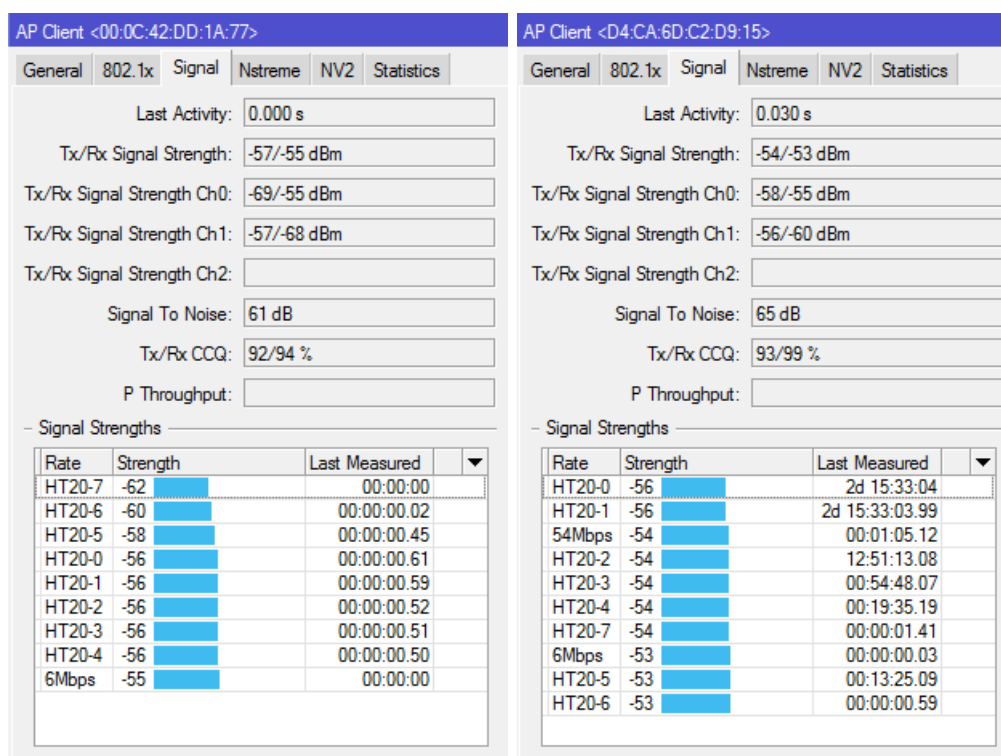
Obrázek 3.9: Směrová charakteristika horizontálně vyzařující antény jednotky Omnitik U-5HND [5]

3.2 Poznatky z praktického nasazení jednotky

Omnitik U-5HND

Tyto jednotky využívají hlavně poskytovatelé internetového připojení pro připojení klientů na krátkou vzdálenost např. jako jeden z několika vysílačů v obci (pro pokrytí jednotlivých částí obce). Velkou výhodou jednotky je možnost úpravy pasivního PoE (Power Over Ethernet) napájení na různé porty, což velmi zjednodušuje celkovou instalaci, kdy stačí přivést pouze napájení k této jednotce a ostatní prvky (např. směrová anténní jednotka pro přístup k síti) jsou napájeny z jednoho ze čtyř zbylých portů.

Při připojení klientských zařízení v různých úhlech k jednotce Omnitik U-5HND jsou patrné nevyrovnané charakteristiky jednotlivých antén. Vždy dominuje výkon přijatý od jedné z vertikálně nebo horizontálně polarizovaných vln. Na obrázku 3.10 jsou reálné hodnoty signálu mezi AP jednotkou Mikrotik Omnitik U-5HND a klientskými jednotkami Mikrotik SXT-5NDR2 ve stejně vzdálených, ale úhlem odlišných místech příjmu. Je zde vidět že příjem (RX) se skutečně v jednotlivých polarizacích (Ch0/Ch1) liší. Jednotka si vždy vybere lépe vyhovující kanál a ten při následné komunikaci upřednostňuje.



Obrázek 3.10: Signál z jednotlivých polarizací v odlišných místech příjmu

3.3 Návrh reflektoru

Pro odlišnou strukturu a vlastnosti jednotlivých antén bylo nutné pro každou z nich navrhnout separátní reflektor. Bylo zapotřebí vybrat takový typ reflektoru, který bude možné jednoduše vyrobit a aplikovat na jednotku Omnitik. Pro obě antény byla zvolena kombinace úhlového a rovinného reflektoru. Analytické řešení návrhu reflektoru připadalo v úvahu pouze u vertikálně vyzařující struktury, která se dá v ideálním případě považovat za anténní řadu složenou z pěti dipólů. Analytické řešení reflektoru pro horizontálně vyzařující strukturu by bylo příliš složité a proto se jeho návrh opírá o teoretické poznatky s přihlédnutím ke konstrukčním možnostem jež budou aplikovány a ověřeny v simulačním softwaru FEKO Suite.

Aby bylo možné ověřit funkčnost uvažovaného tvaru reflektorů a doladit jejich rozměrové parametry, bylo nutné v programu FEKO navrhnout strukturu antén, která by odrážela vlastnosti těch reálných. Kvůli omezení licence programu FEKO na práci s 1 GB operační paměti bylo nutné struktury co nejvíce zjednodušit. Při jejich návrhu byly použity stejné rozměry jako u reálných antén s tím, že nebylo uváženo napájecí vedení, ale pouze samotné zářiče. U vertikální antény to byly dipóly, u horizontální pak šterbiny s dipóly pro jejich buzení. Vyzařovací diagramy simulovaných struktur byly srovnány s diagramy dodávanými výrobcem. Byly zjištěny jejich minimální odchylky a mohly tak být použity pro návrh anténních reflektorů.

Navržené struktury antén pro simulace reflektorů jsou uvedeny v obrazové příloze na straně I a II. Technický výkres vyrobeného reflektoru je v obrazové příloze na straně III.

3.3.1 Návrh reflektoru - vertikální polarizace

Návrh reflektoru pro vertikálně polarizovanou anténu vycházel ze znalosti základních typů reflektorů. Pro dipól se nejčastěji používá úhlový, plošný nebo parabolický reflektor. Protože parabolický reflektor nepripadá kvůli konstrukčním možnostem v úvahu, bylo možné využít pouze zbylých dvou. Podle doporučení pro návrh úhlového reflektoru z kapitoly 2.3.2, byl v prostředí FEKO vytvořen reflektor, do jehož ohniska byl dán střed vertikálně vyzařující struktury. Jak se ukázalo, tento návrh byl funkční, ale směrový diagram byl velmi úzký (vyzařovací úhel 15° a zisk 16 dB). Úkolem však bylo navrhnout reflektor, který změní všesměrovou charakteristiku na sektorovou o úhlu 120° . Abychom rozšířili hlavní svazek a přitom zachovali přijatelný zisk, bylo nutné zkombinovat plošný reflektor s úhlovým. Plošný reflektor dokáže vytvořit "půlkruhovou" charakteristiku s malým zis-

kem, která je velmi závislá na vzdálenosti od zářiče. K této ploše byly ze stran přidány další dvě plochy pootočené o úhel 60° (přidání "úhlového reflektoru"), pomocí kterých bylo možné tvarovat charakteristiku v dopředném směru, zvýšit tak její zisk a zároveň snížit vyzařování v zadním směru. Protože změnou úhlu těchto postranních ploch nebo jejich šířky docházelo pouze k nárůstu zisku v dopředném směru, bylo nutné tyto plochy tvarovat. Díky použití trojúhelníkového stříhu, který začíná v úrovni konců dipólů a končí v jejich středu (reguluje se tak intenzita záření jednotlivých prvků), bylo možné dosáhnout vyrovnané charakteristiky hlavního svazku. Model reflektoru je vidět na straně I obrazové přílohy.

Všechny tyto parametry a struktury byly navrženy v programu FEKO. Zde byly také zjištěny základní parametry podstatné pro návrh. Nejdůležitější parametry, které bylo nutné v programu FEKO odladit byly:

- vzdálenost antény od reflektoru
- šířka zadního plošného reflektoru
- šířka bočních stěn
- úhel naklopení bočních stěn
- hloubka záběru vystřižených vzorů

Při hledání nejvhodnější charakteristiky se nám podařilo tyto parametry optimalizovat. Následující tabulka 3.1 obsahuje nejdůležitější parametry, které z této optimalizace vzešly.

Vzdálenost antény od reflektoru	8,5 mm od středu struktury
Šířka zadního plošného reflektoru	40 mm
Šířka bočních stěn	15 mm
Úhel naklopení bočních stěn	60°
Hloubka záběru stříh. vzorů	7,5 mm

Tabulka 3.1: Hodnoty parametrů pro reflektor vertikálně vyzařující antény

Simulace výsledných charakteristik tohoto reflektoru lze nalézt v kapitole 3.4.3 na straně 30. Naměřené charakteristiky z bezodrazové komory lze nalézt v kapitole 3.4.4 na straně 31.

3.3.2 Návrh reflektoru - horizontální polarizace

Návrh reflektoru pro horizontálně polarizovanou anténu probíhal podobným způsobem jako pro předchozí vertikální. Zde již nebylo možné využít žádného numerického přiblížení, protože struktura se štěrbinovými anténami je již poměrně složitá. Při srovnání charakteristik s vertikálně vyzařujícími anténami bylo zjištěno, že se o mnoho neliší a bude tedy možné použít velmi podobný reflektor. Celá anténa pro horizontální polarizaci je však pootočena a bylo nutné směr jejího vyzařování pootočit na střed. Toho bylo dosaženo posunutím antény ze středu reflektoru o 2 mm a vyplněním jinak nastříhané pravé strany reflektoru, která vyzařované pole přitáhla ke své straně.

- Model reflektoru je vidět na straně I obrazové přílohy.
- Simulované charakteristiky tohoto reflektoru nalezneme na straně 31.
- Charakteristiky tohoto reflektoru naměřené v bezodrazové komoře jsou na straně 37.

Vzdálenost antény od reflektoru	8,5 mm od počátku strukt.
Šířka zadního plošného reflektoru	40 mm
Šířka bočních stěn	15 mm
Úhel naklopení bočních stěn	60°
Hloubka záběru stříh. vzorů	7,5 mm (pouze levý)
Posunutí od středu	2 mm vpravo

Tabulka 3.2: Hodnoty parametrů pro reflektor horizontálně vyzařující antény

3.4 Simulace

Simulace byly prováděny v prostředí FEKO. Nejprve byla překreslena celá struktura jednotlivých antén do návrhového programu CADFEKO. Jak se však ukázalo, omezení licence na 1 GB paměti a celková doba výpočtu by návrh velmi zkomplikovaly a tak se přistoupilo k simulaci pouze části antén, a to vždy k paralelní dvojici dipólů. Pro simulace bylo nutné určit přibližný druh materiálu substrátu. Přibližná relativní permitivita substrátu byla určena ze znalosti pracovní frekvence a rozměrů struktury dipólu.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{5,5 \cdot 10^9} = 0,054\text{m} \quad (3.1)$$

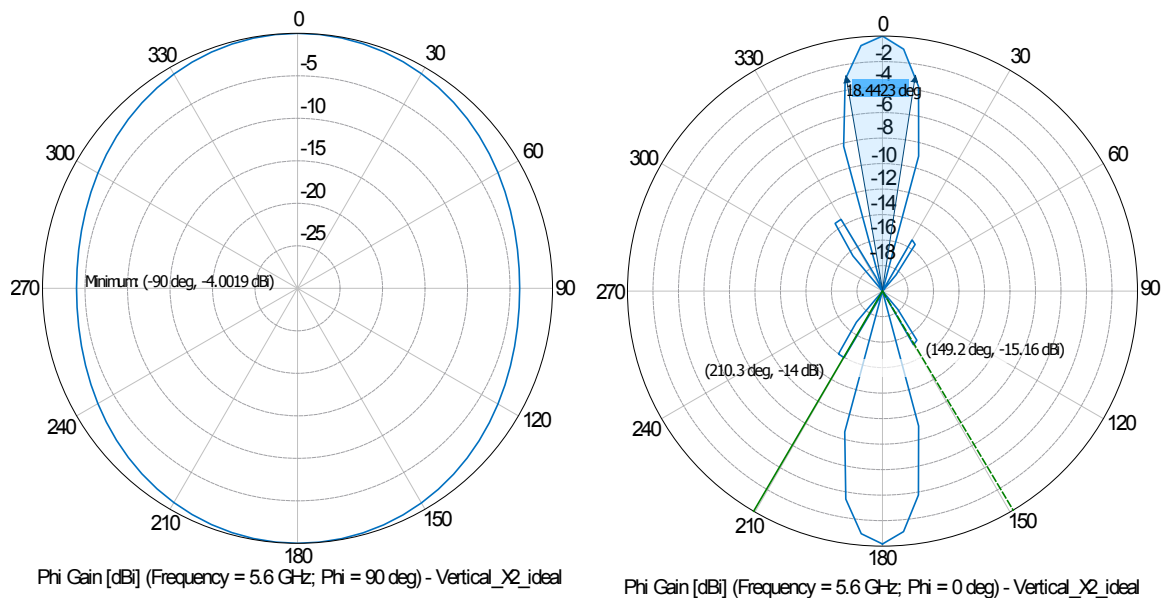
$$l_{\text{dipol}} = \frac{d}{2} = \frac{0,0224}{2} = 0,0112\text{m} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\lambda}{l_{\text{dipol}}} = \frac{0,054}{0,0112} = 4,82 \quad (3.3)$$

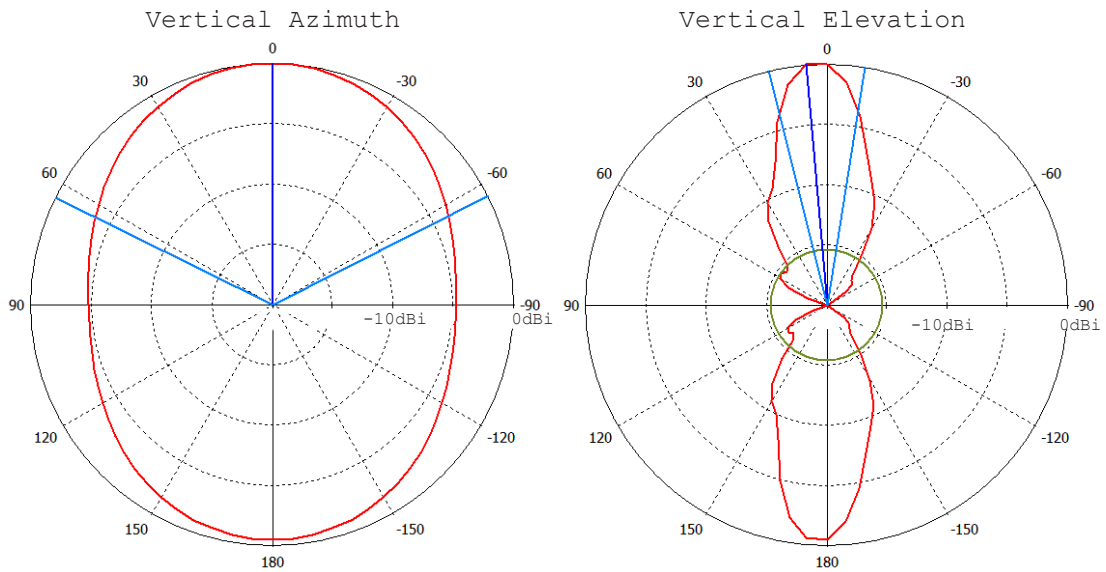
Pro konečnou simulaci byla jednoduchá struktura pomocí lineárního zrcadlení zobrazena několikrát nad sebou, čímž byla získána konečná struktura imitující vlastnosti reálné antény. Nevýhodou tohoto způsobu simulace je, že se nejedná o celistvou strukturu a lze pro tento postup reálně uvažovat pouze charakteristiku v dopředném směru.

3.4.1 Simulace vertikální struktury

Pro simulaci vertikální struktury byl použit zjednodušený model, který reflektuje vlastnosti originální struktury antény. Bylo zanedbáno napájecí vedení a na substrátu stejných rozměrů byly uváženy pouze dipóly s napájením v jejich středu. Model připravený v programu CADFEKO je na obrázku 4 v obrazové příloze. Vzhledem ke skutečnosti, že při změně frekvence v rozsahu 5,5 - 5,8 GHz vykazuje model minimální změny, budou následné charakteristiky zobrazeny pouze na frekvenci 5,6 GHz.



Obrázek 3.11: Simulované charakteristiky vertikální struktury



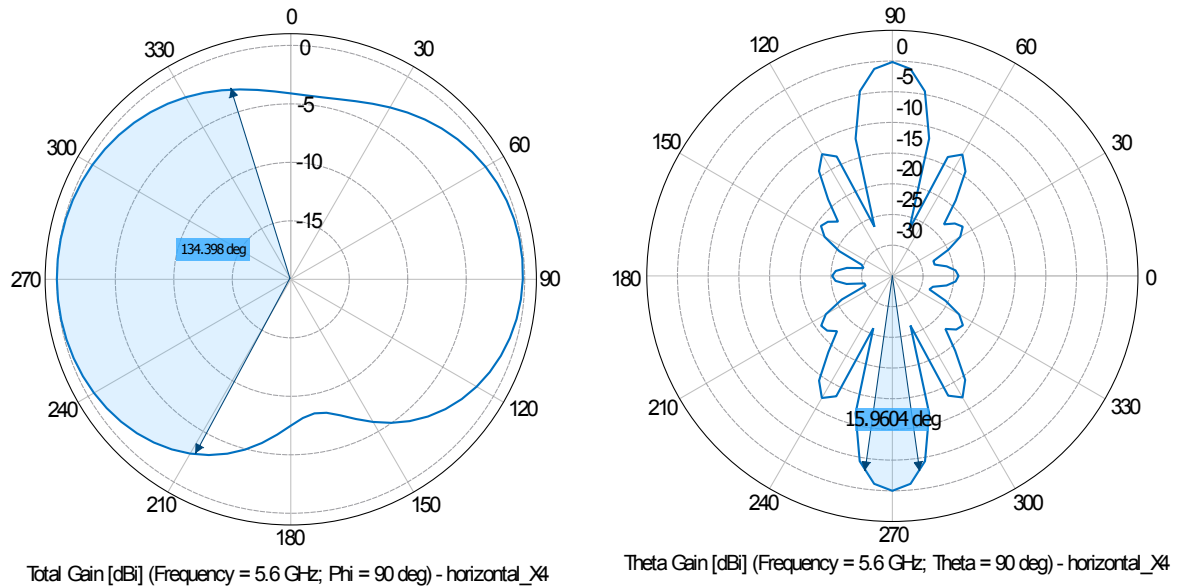
Obrázek 3.12: Charakteristiky vertikální struktury udané výrobcem [5]

Na obrázcích 3.11 a 3.12 jsou zobrazeny směrové charakteristiky v azimutu a elevaci, které byly výsledkem simulací náhradní struktury a charakteristiky dané výrobcem. Při porovnání těchto charakteristik bylo zjištěno, že se liší o max. 1 dB a zjednodušený model tedy můžeme pro návrh reflektoru použít.

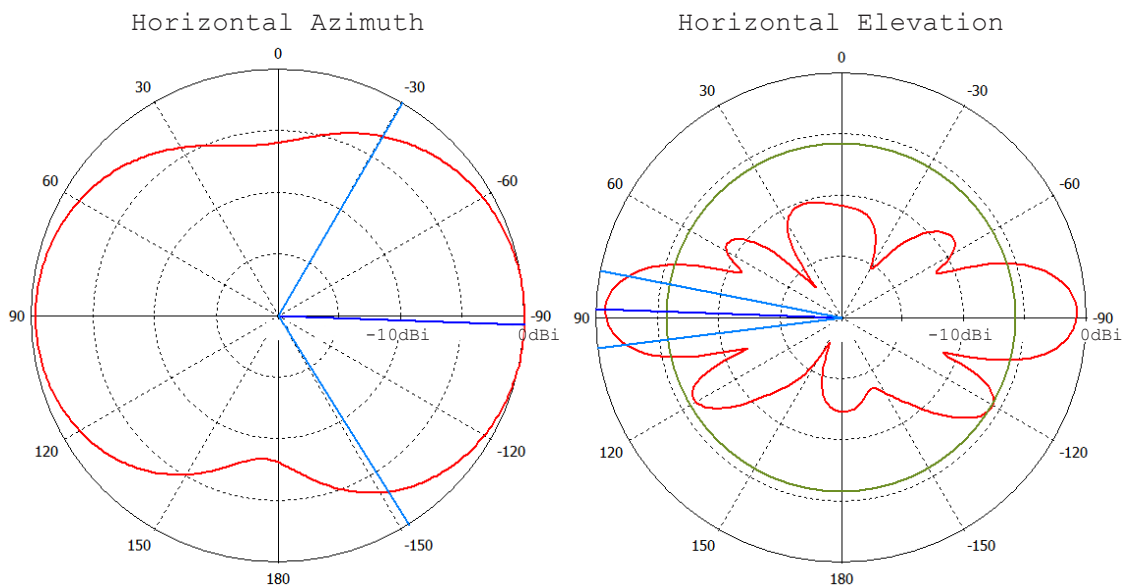
3.4.2 Simulace horizontální struktury

Pro simulaci charakteristik byl vytvořen zjednodušený model, který je na obrázku 1 v obrazové příloze. Z vnější strany substrátu byly ve vodivé vrstvě vytvořeny štěrby, které jsou buzeny budiči na opačné straně substrátu. Část vedení k budičům musela být zachována, aby bylo možné do nich zavést napájecí body.

Na obrázcích 3.13 a 3.14 jsou zobrazeny simulované a výrobcem udávané směrové charakteristiky horizontálně vyzařující antény. Z těchto grafů je možné říci, že se charakteristiky liší o přibližně 0,5 dB. Charakteristiky v azimutu jsou jen zrcadlově převráceny, jak lze vyčíst z jejich os. Z těchto údajů můžeme tedy usuzovat, že náhradní model simulované horizontálně vyzařující antény lze považovat za dostatečný pro použití při návrhu reflektoru.



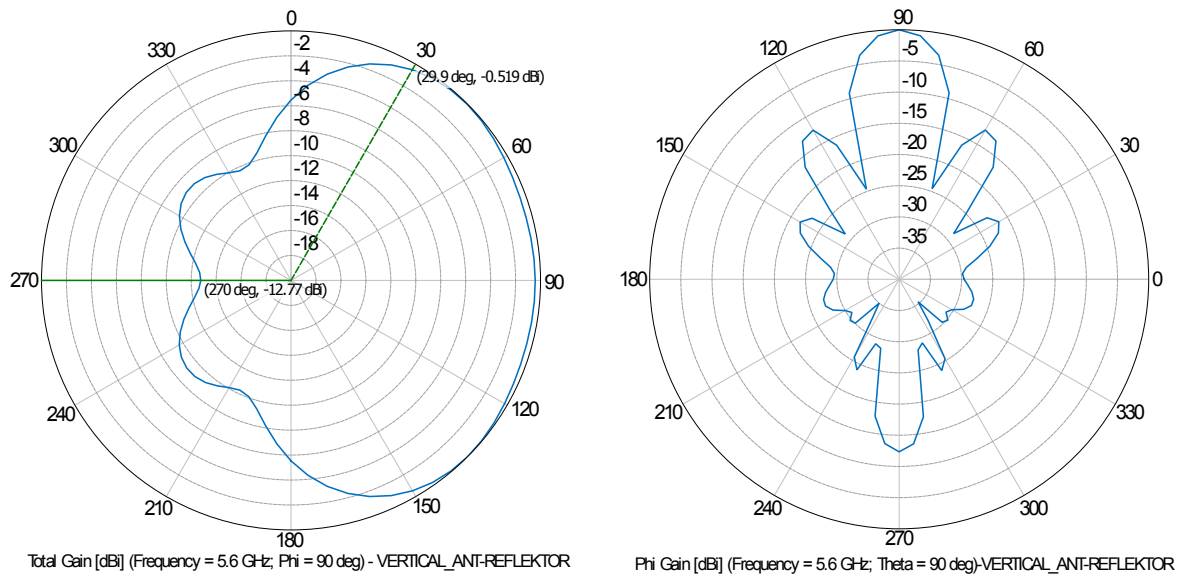
Obrázek 3.13: Simulované charakteristiky horizontální struktury



Obrázek 3.14: Charakteristiky horizontální struktury udané výrobcem [5]

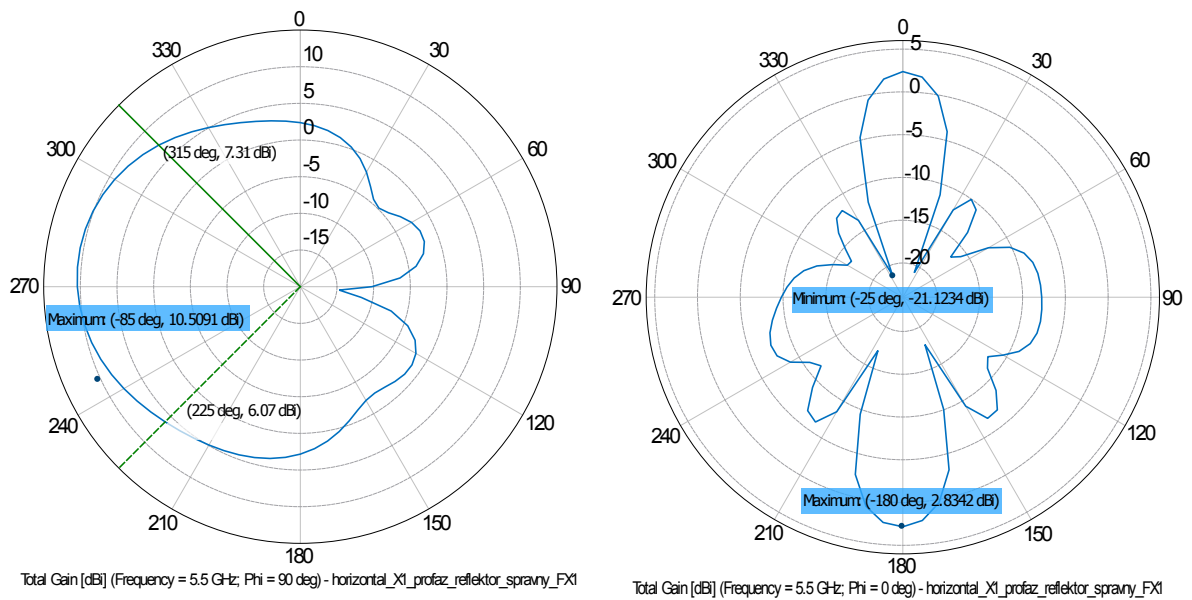
3.4.3 Simulace vertikální struktury s reflektorem

Z obrázku 3.15 lze vidět, že se charakteristiku v požadovaném úhlu 120° podařilo vyrovnat. Pod tímto úhlem má tak přibližnou hodnotu zisku 8 dBi.



Obrázek 3.15: Charakteristiky vertikálně vyzářující antény s reflektorem (vlevo azimut, vpravo elevace)

3.4.4 Simulace horizontální struktury s reflektorem



Obrázek 3.16: Charakteristiky horizontálně vyzářující antény s reflektorem

Na obrázku 3.16 jsou charakteristiky horizontálně vyzařující antény s reflektorem. Kvůli specifickému tvaru struktury antény a jejímu odlišnému chování oproti vertikální části, nebylo možné vytvořit vyrovnanou charakteristiku. Změnou všech parametrů se nakonec podařilo reflektor optimalizovat tak, že anténa s reflektorem má při 120° zisk okolo 5 dBi a v hlavním směru přes 10 dBi.

3.5 Výroba reflektoru

Realizace reflektoru probíhala ruční výrobou. Vzhledem k metodě výroby je i výrobní tolerance poměrně vysoká a to $\pm 0,5\text{mm}$. Rozměry navrženého reflektoru byly nejprve přeneseny na výkres v poměru 1:1 (viz. obrázek na straně III v obrazové příloze). K výrobě reflektoru byl pro svou dostupnost a dobré vodivé vlastnosti zvolen jako materiál hliník o tloušťce 1 mm. Reflektory byly pro každou z antén vyrobeny zvlášť a následně poté snýtovány k podkladovému hliníkovému plechu. Na straně IV jsou fotografie samotného vyrobeného reflektoru. Na straně V je pak reflektor připevněný na jednotku Omnitik U-5HND.

K uchycení reflektoru na samotnou jednotku Omnitik U-5HND byly do reflektoru vyvrtány otvory v místech vyzařovacích minim. Tyto otvory jsou umístěny v těsné blízkosti zlomů na krytu Omnitiku a zabraňují tak špatnému nasazení reflektoru na jednotku, který by měl za následek nežádoucí změnu vyzařovací charakteristiky. Pomocí těchto otvorů, jimiž budou protaženy montážní UV odolné pásky, bude reflektor ve čtyřech bodech připevněn k jednotce. Reflektor připevněný na jednotku je na obrázcích 8 a 9 v obrázkové příloze.

3.6 Měření

Měření antén s vyrobeným reflektorem probíhalo v bezodrazové komoře Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni a bylo provedeno pomocí síťového analyzátoru Rhode&Swartz ZVB8 s automatizovaným měřicím stanovištěm ovládaným radičem polohy FCTAM01. Jako měřicí anténa byla použita širokopásmová trychtýřová anténa s frekvenčním rozsahem 3 - 18 GHz.

3.6.1 Postup měření

Základním problémem bylo přijít na to, jak anténní systém nedestruktivním způsobem změřit. V první fázi jsme se snažili spektrálním analyzátozem zachytit signál ze samotné jednotky nastavené do režimu AP dle normy IEEE 802.11a. To se však ukázalo jako zavádějící, protože analyzátor zachytil signál pouze tehdy, byl-li na kanálu generován provoz. Bylo tedy nutné do komory umístit notebook, který přijímal z jednotky kontinuální tok 20 Mbit/s (čím vyšší provoz tím lépe byla špička na analyzátoru vidět). Z tohoto měření se nám již podařilo vyčíst střední hodnotu vysílaného výkonu s využitím možnosti analyzátoru dekodovat signál 802.11a. Problémem však byla velká nestabilita a nutnost využití průměrování vzorků. Měření tímto způsobem bylo tedy nutné zavrhnout.

Nakonec jsme přímo na počátek napájecího vedení jednotlivých antén přiletovali koaxiální vedení zakončené N konektorem pro připojení generátoru. Tento způsob je z hlediska impedančního přizpůsobení antén nepřijatelný, protože dochází k velké výkonové ztrátě a do antény se dostane jen část přenášeného výkonu. Naším úkolem však bylo změřit směrové charakteristiky anténního systému a ty se i přes nižší výkon přeneseny do anténního systému nemění. Díky propojení přístrojů pomocí GPIB sběrnice bylo možné celé měření zautomatizovat. Měření bylo provedeno pro:

- Horizontální polarizaci v azimutu
- Horizontální polarizaci v elevaci
- Vertikální polarizaci v azimutu
- Vertikální polarizaci v elevaci

Při měření samostatné jednotky bez reflektoru, které proběhlo později, byly pro obě polarizace naměřeny pouze charakteristiky v azimutu. Na obrázku 10 v obrázkové příloze je snímek z měření v bezodrazové komoře.

3.6.2 Naměřené hodnoty

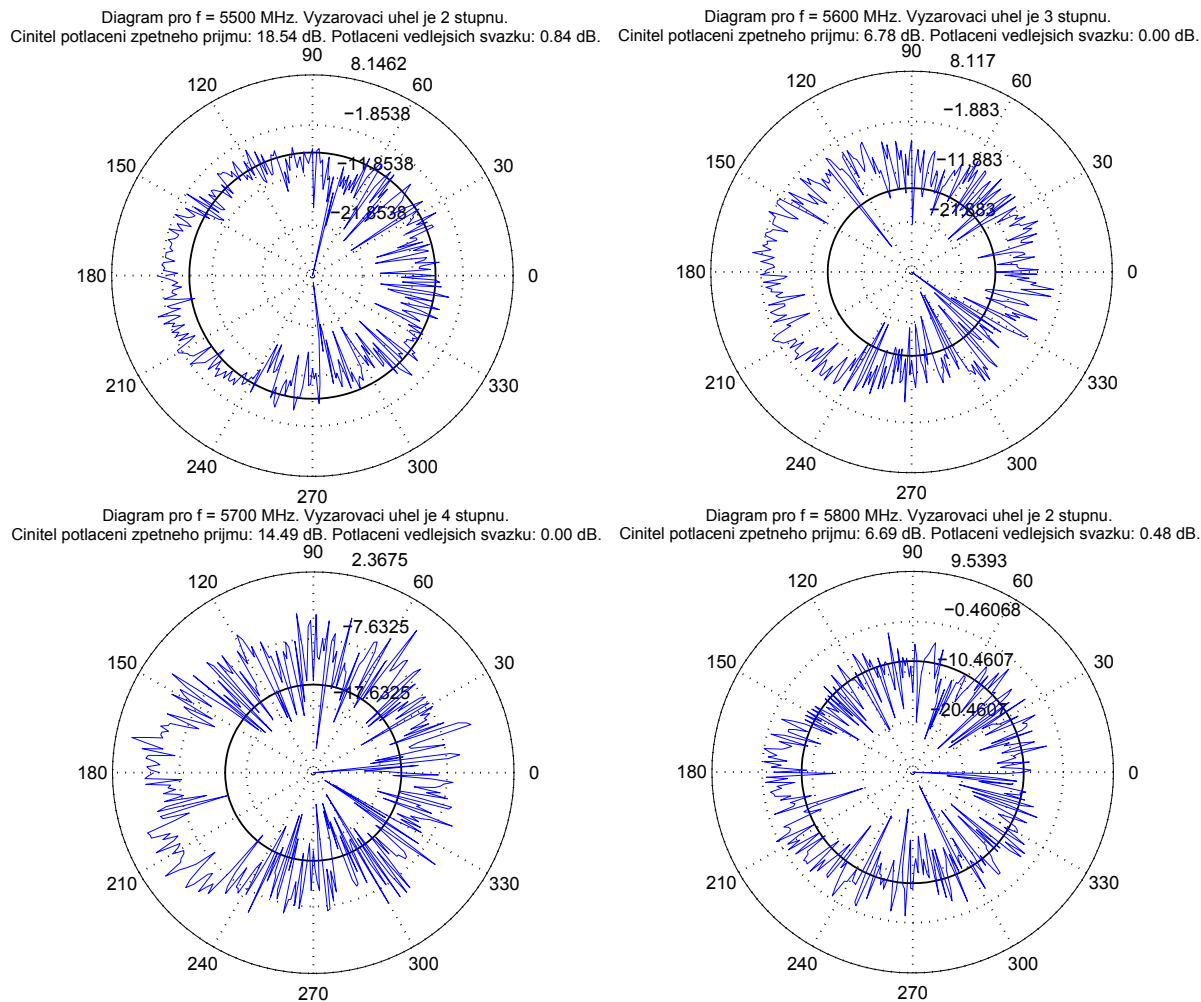
Parametry měření:

Síťový analyzátor	Rhode&Swartz ZVB8
Řadič polohy	FCTAM01
Výška anténního stojanu	1,8 m
Polarizace	Horizontální/Vertikální
Počáteční kmitočet	4 GHz
Koncový kmitočet	8 GHz
Počátek časové brány	60 ns
Konec časové brány	100 ns

Tabulka 3.3: Parametry měření v bezodrazové komoře.

Nastavení časové brány bylo zvoleno od 60 do 100 ns. Horní hranice 100 ns byla zvolena proto, že případný odraz vlny od stěn v této komoře bude delší než 100 ns a neovlivní tak výsledky měření. Velký frekvenční rozsah 4 GHz byl zvolen pro zvýšení prostorového rozlišení a kompenzaci odrazů v komoře. Z naskenovaného pásma 4 GHz byla vyříznuta okna požadovaných frekvencí od 5,2 GHz do 5,8 GHz. Vzhledem k použití v České republice a zde platným regulačním normám ČTU lze považovat za podstatné charakteristiky změřené na frekvencích 5,5 - 5,8 GHz, ve kterých je povoleno vysílat ve venkovním prostředí.

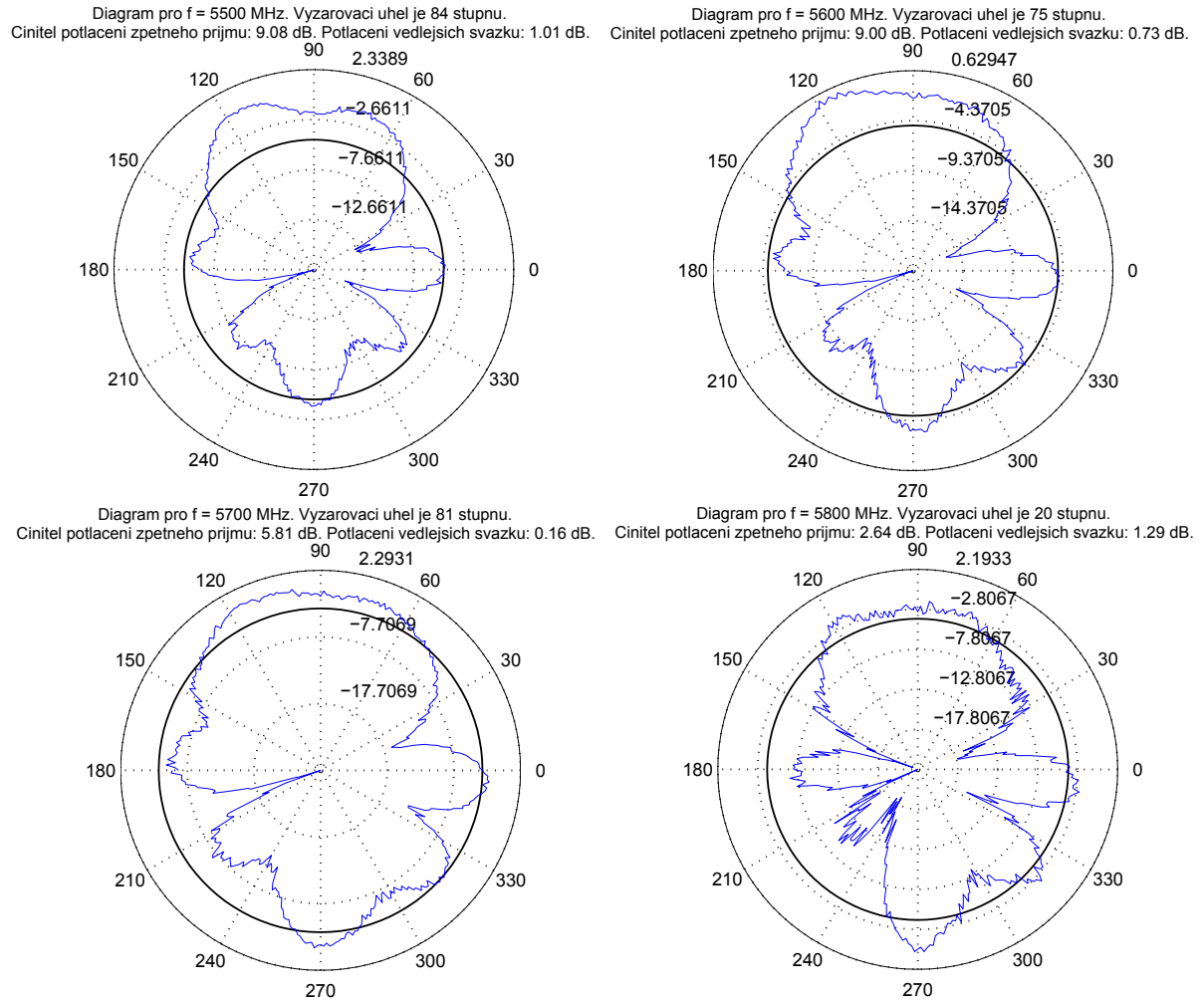
Stávající horizontálně polarizovaná anténa



Obrázek 3.17: Naměřené charakteristiky horizontálně polarizované antény v Azimutu (5,5 - 5,8 GHz)

Na obrázku 3.17 jsou zobrazeny naměřené charakteristiky samostatné horizontálně polarizované antény v azimutu. Signál je velmi zašuměný, protože analyzátor, z důvodu velmi špatného přizpůsobení antén, pracoval na spodní hranici svého dynamického rozsahu. Z naměřených charakteristik se však při jejich aproximaci křivkou dá říci, že odpovídají kruhovému tvaru s poklesy na 90° , jak udává výrobce.

Stávající vertikálně polarizovaná anténa



Obrázek 3.18: Naměřené charakteristiky horizontálně polarizované antény v Azimutu (5,5 - 5,8 GHz)

Na obrázku 3.18 jsou naměřené charakteristiky samostatné vertikálně vyzařující struktury v azimutu. Na první pohled je patrné, že se nejedná o kruhovou všesměrovou charakteristiku, jak udává výrobce nebo provedené simulace. V úhlu 270° se ve vzdálenosti 7,5 cm nachází druhá horizontálně vyzařující anténa, což se v grafu projevilo útlumem signálu v tomto směru. V určitých úhlech dochází k velkým propadům úrovně přijatého signálu. Nejvíce razantní propad je v úhlu cca 205° , kde je pokles přijaté úrovně o více než 20 dB. To může znamenat, že pokud bude v praxi klientská jednotka svírat s Omnitikem právě úhel 205° , bude možné zachytit pouze signál z horizontálně vyzařující struktury.

Reflektor pro horizontálně polarizovanou anténu

Diagram pro $f = 5500$ MHz. Vyzařovací úhel je 75 stupňů.
Činitel potlačení zpětného příjmu: 6.99 dB. Potlačení vedlejších svazků: 0.01 dB.

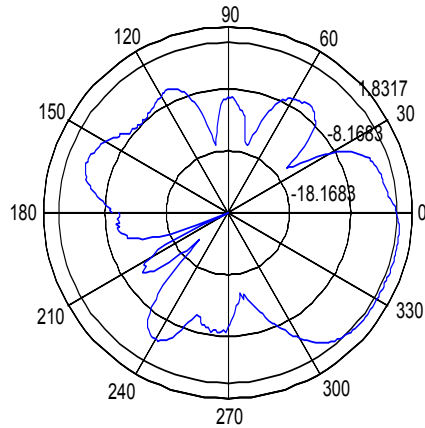


Diagram pro $f = 5600$ MHz. Vyzařovací úhel je 61 stupňů.
Činitel potlačení zpětného příjmu: 12.42 dB. Potlačení vedlejších svazků: 9.18 dB.

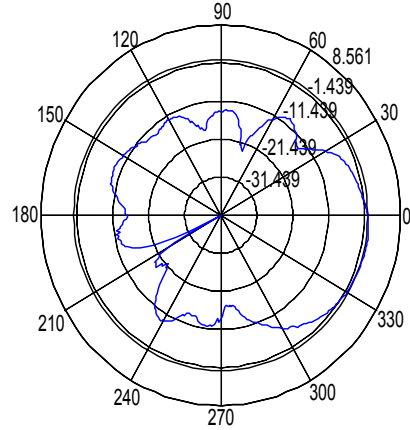


Diagram pro $f = 5700$ MHz. Vyzařovací úhel je 59 stupňů.
Činitel potlačení zpětného příjmu: 14.50 dB. Potlačení vedlejších svazků: 9.59 dB.

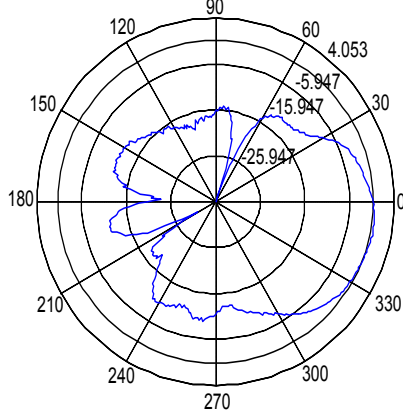
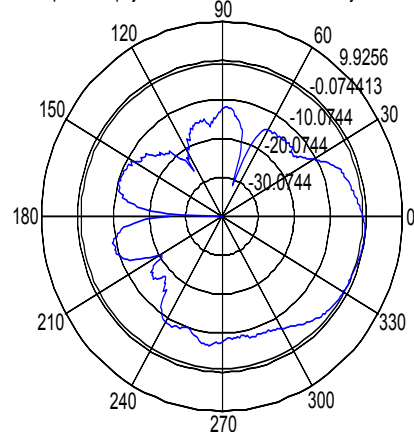
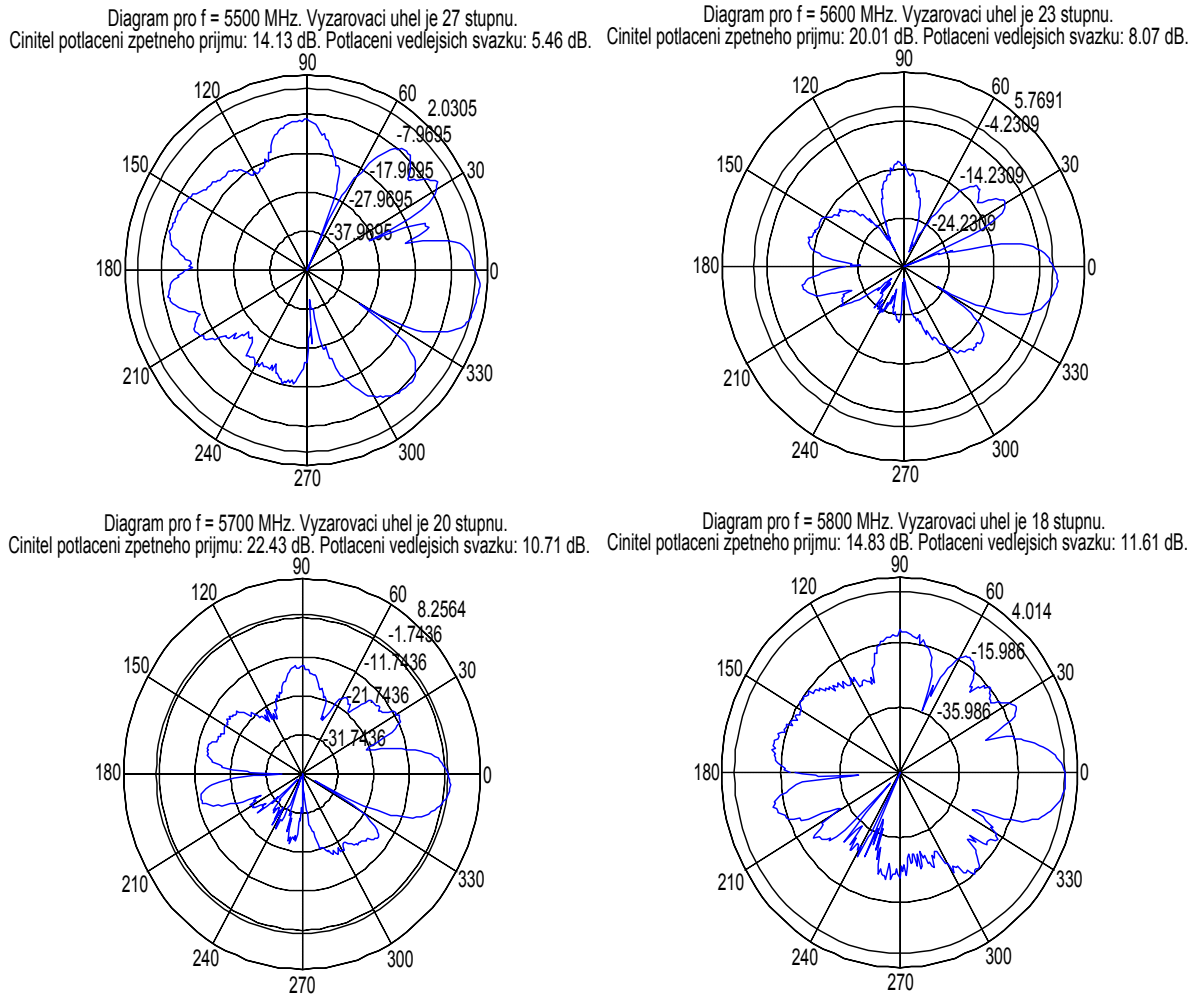


Diagram pro $f = 5800$ MHz. Vyzařovací úhel je 54 stupňů.
Činitel potlačení zpětného příjmu: 13.42 dB. Potlačení vedlejších svazků: 6.68 dB.



Obrázek 3.19: Zobrazení změřených hodnot horizontálně polarizované antény v Azimutu pro frekvence 5,5 - 5,8 GHz

Z obrázku 3.19 je patrné, že se charakteristika s reflektorem pro horizontálně polarizovanou anténu stáčí mimo osu a s rostoucí frekvencí zmenšuje vyzařovací úhel. Z hlediska činitele potlačení zpětného příjmu a vedlejších svazků se anténa nejlépe chová na frekvenci 5,7 GHz. Charakteristika však naprosto neodpovídá požadavkům, které na ní byly kladeny a neodpovídá ani simulovaným charakteristikám. Prakticky od 0° do 60° dochází k systematickému poklesu úrovně a to až o 20 dB. Při frekvenci 5500 MHz se navíc v úhlu 37° objevuje minimum o útlumu téměř 20 dB.



Obrázek 3.20: Zobrazení změřených hodnot horizontálně polarizované antény v elevaci pro frekvence 5,5 - 5,8 GHz

Na obrázku 3.20 jsou charakteristiky naměřené v azimutu pro horizontálně polarizovanou anténu. Z obrázků lze vyčíst, že lalok hlavního maxima, jehož šířka se pohybuje okolo 20° v závislosti na frekvenci, je oproti ostatním lalokům vždy alespoň o 10 dB větší. Dále je vidět, že hlavní lalok je mírně skloněn.

Reflektor pro vertikálně polarizovanou anténu

Diagram pro $f = 5500$ MHz. Vyzařovací úhel je 52 stupnu.
Cíntel potlacení zpetneho prijmu: 15.35 dB. Potlacení vedlejsich svazku: 1.33 dB.

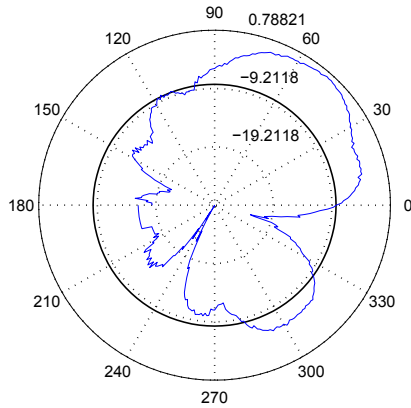


Diagram pro $f = 5600$ MHz. Vyzařovací úhel je 54 stupnu.
Cíntel potlacení zpetneho prijmu: 16.67 dB. Potlacení vedlejsich svazku: 3.77 dB.

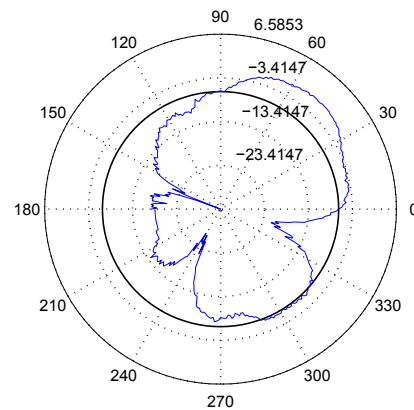


Diagram pro $f = 5700$ MHz. Vyzařovací úhel je 58 stupnu.
Cíntel potlacení zpetneho prijmu: 15.45 dB. Potlacení vedlejsich svazku: 0.18 dB.

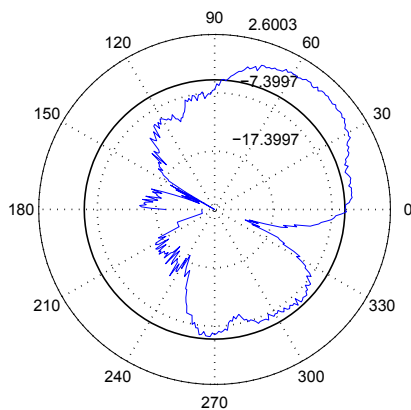
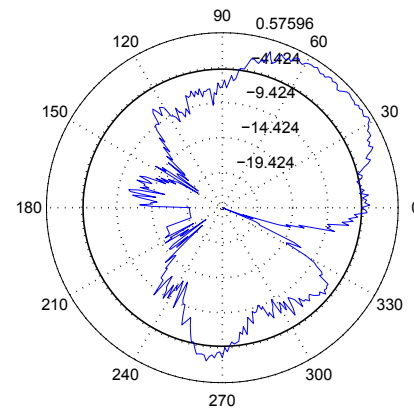


Diagram pro $f = 5800$ MHz. Vyzařovací úhel je 60 stupnu.
Cíntel potlacení zpetneho prijmu: 16.06 dB. Potlacení vedlejsich svazku: 0.10 dB.



Obrázek 3.21: Zobrazení změřených hodnot vertikálně polarizované antény v azimutu pro frekvence 5,5 - 5,8 GHz

Z obrázku 3.21 je vidět, že se i pro tuto anténu charakteristika s reflektorem pro vertikálně polarizovanou vlnu měřenou v elevaci stáčí mimo osu. Navíc je zde oblast okolo úhlu 340° , kdy dochází k silnému útlumu vyzařovaného signálu (cca 20 dB), což je naprosto nepříjemné. Lze sledovat, že se zvyšující frekvencí dochází k prohloubení tohoto minima, ale také k rozšíření vyzařovacího úhlu vertikálně polarizované antény.

Diagram pro $f = 5500$ MHz. Vyzařovací uhel je 18 stupňů. Cíntel potlacení zpetného prijmu: 4.63 dB. Potlacení vedlejších svazku: 0.44 dB.

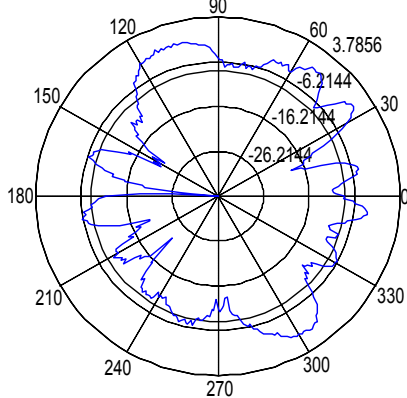


Diagram pro $f = 5600$ MHz. Vyzařovací uhel je 31 stupňů. Cíntel potlacení zpetného prijmu: 17.54 dB. Potlacení vedlejších svazku: 0.35 dB.

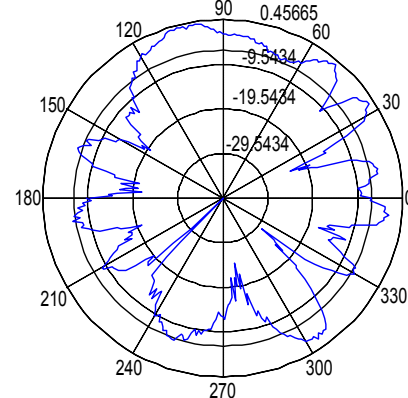


Diagram pro $f = 5700$ MHz. Vyzařovací uhel je 41 stupňů. Cíntel potlacení zpetného prijmu: 6.72 dB. Potlacení vedlejších svazku: 0.53 dB.

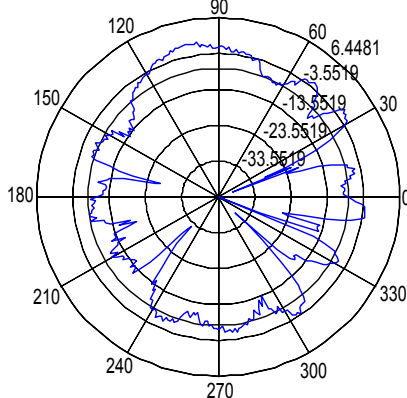
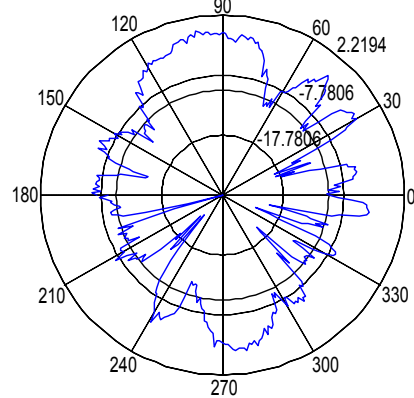


Diagram pro $f = 5800$ MHz. Vyzařovací uhel je 44 stupňů. Cíntel potlacení zpetného prijmu: 1.97 dB. Potlacení vedlejších svazku: 1.26 dB.

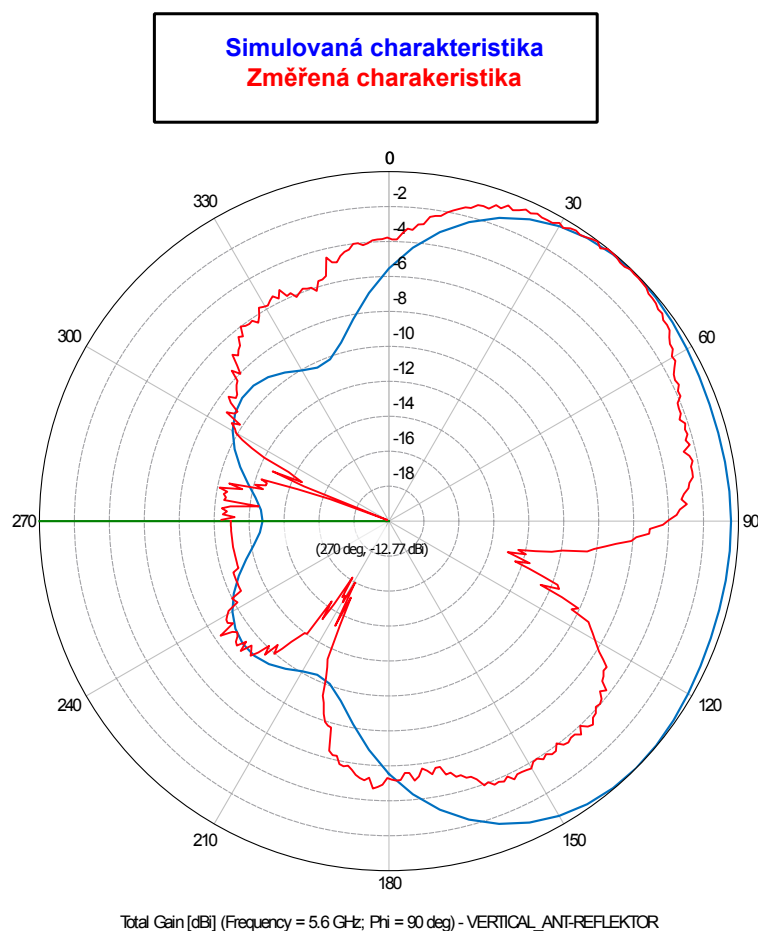


Obrázek 3.22: Zobrazení změřených hodnot vertikálně polarizované antény v elevaci pro frekvence 5,5 - 5,8 GHz

Na obrázku 3.22 jsou zobrazeny naměřené vyzařovací charakteristiky vertikálně polarizované antény v elevaci. Z těchto grafů je patrné, že zatímco horizontální anténa v elevaci se snažila vyzařovat v horizontálním směru, vertikální anténa vyzařuje do více směrů s minimálním potlačením vedlejších svazků. Teprve s rostoucí frekvencí dochází k jejich většímu potlačení a hlavní svazky jsou lépe rozlišitelné.

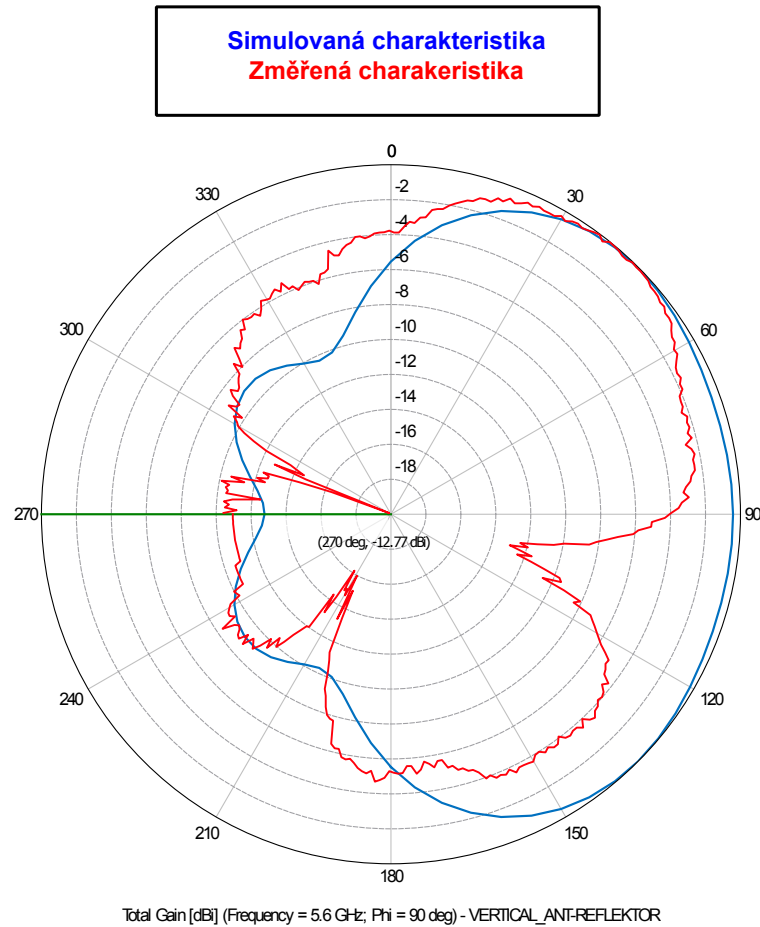
3.7 Shrnutí výsledků

Měření v bezodrazové komoře ukázalo, že vyrobený reflektor neodpovídá předpokladům, které na něj byly kladeny. Nejlépe je to vidět na obrázcích 3.23 a 3.24 kde sou přes sebe překryty simulované a naměřené charakteristiky. Z obrázku 3.23, kde jsou zobrazeny charakteristiky vertikálně vyzařující antény s reflektorem můžeme vidět, že reálná charakteristika se oproti simulované stáčí vlevo. Toto stočení je způsobeno působením druhého reflektoru na pole celé vertikálně vyzařující struktury. Propad v dopředném směru charakteristiky je způsoben již samotnou nevyhovující charakteristikou zariadení.



Obrázek 3.23: Porovnání simulované a změřené vyzařující charakteristiky vertikálně vyzařující antény v azimutu

Na obrázku 3.24 je srovnání simulované a naměřené charakteristiky horizontálně vyzařující antény s reflektorem. Z obrázku je vidět, že se charakteristika stáčí opačným směrem než u druhé antény. To je způsobeno ovlivněním rozložení pole druhým reflektorem. Odlišná struktura zářiče pro horizontální polarizaci a jeho odchylka od reflektoru o 1,5 mm oproti návrhu, má hlavní vliv na zúžení charakteristiky v dopředném směru.



Obrázek 3.24: Porovnání simulované a změřené vyzařující charakteristiky horizontálně vyzařující antény v azimutu

Hlavní příčinou nesprávné funkčnosti reflektorů je chyba při návrhu, kdy nebyl uvážěn druhý reflektor, který zásadně ovlivňuje pole druhé anténní struktury. Při návrhu se pracovalo s charakteristikami dodanými výrobcem. Při měření, které bylo bohužel provedeno až na konci práce, bylo zjištěno, že vertikálně vyzařující anténa těmto charakteristikám neodpovídá a obsahuje velké propady úrovně v řádu až desítek decibelů. Tyto propady se projeví i po aplikaci reflektoru.

Kapitola 4

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a vyrobit reflektor pro jednotku Mikrotik Omnitik U-5HND, která se používá jako všesměrový přístupový bod ve Wi-Fi pásmu 5 GHz. Tento reflektor měl změnit všesměrovou vyzařovací charakteristiku jednotky na sektorovou o vyzařovacím úhlu 120° .

V prvním kroku bylo nutné nejprve se seznámit s problematikou antén a naučit se ovládat software FEKO, ve kterém je návrh tohoto reflektoru realizován.

Následně bylo třeba seznámit se se strukturou stávajících antén. Bylo zjištěno, že jednotka Omnitik používá jako vertikálně vyzařující anténní strukturu pět párů sérioparalelně řazených plošných dipólů a jako horizontálně vyzařující anténní struktura jsou použity dvě čtveřice šterbinových antén ve kterých je elektrické pole buzeno pomocí kapacitní vazby s budiči na opačné straně substrátu. Podle těchto antén byly vytvořeny zjednodušené modely v programu FEKO, které se svými vlastnostmi s těmito reálnými shodují.

Dalším krokem bylo rozhodnout, který typ reflektoru bude pro jednotku Omnitik nejvhodnější z hlediska jeho snadné montáže a technologie výroby. Vzhledem k požadavkům na širokou charakteristiku s vysokým ziskem bylo nutné zkombinovat více typů reflektorů. Jako nejvhodnější byla zvolena kombinace rovinného a úhlového reflektoru. Aplikací rovinného reflektoru bylo dosaženo charakteristiky s velkým vyzařovacím úhlem a pomocí úhlového reflektoru byl zvýšen zisk anténního systému.

Při návrhu reflektoru v programu FEKO bylo zjištěno, že největší vliv na směr vyzařování antény mají vzdálenost reflektoru od zářiče, úhly natočení jeho boků, velikost těchto boků a boční posun zářiče vůči reflektoru. Je nutné říci, že reflektor byl částečně navržen s ohledem na konstrukční možnosti a systém upevnění na jednotku Omnitik.

Z výsledků měření v bezodrazové komoře bylo zjištěno, že naměřené výsledky neod-

povídají simulacím. U obou reflektorů docházelo k deformaci charakteristiky a natočení ve směru druhého reflektoru. Při hledání příčiny této deformace bylo zjištěno, že druhý reflektor silně ovlivňuje pole druhého zářiče a jeho vliv se tak projeví natočením pole tohoto zářiče. Tato skutečnost bohužel nebyla v simulaci zahrnuta. Dalším příčina se ukázala po odříznutí krytu Omnitiku, ve kterém jsou antény uloženy. Po vyzkoušení tří jednotek Omnitik bylo zjištěno, že antény každé z nich jsou nepatrně jinak natočeny, což předmětném případě, kdy je nutné měřit na desetiny milimetru je velký problém. Posledním a nejzajímavějším zjištěním byly naměřené charakteristiky vertikálně vyzařující antény. Ta neodpovídala údajům uváděným výrobcem a obsahovala hluboké propady (minima) ve své charakteristice. Tato minima se pak projevila i po aplikaci reflektoru.

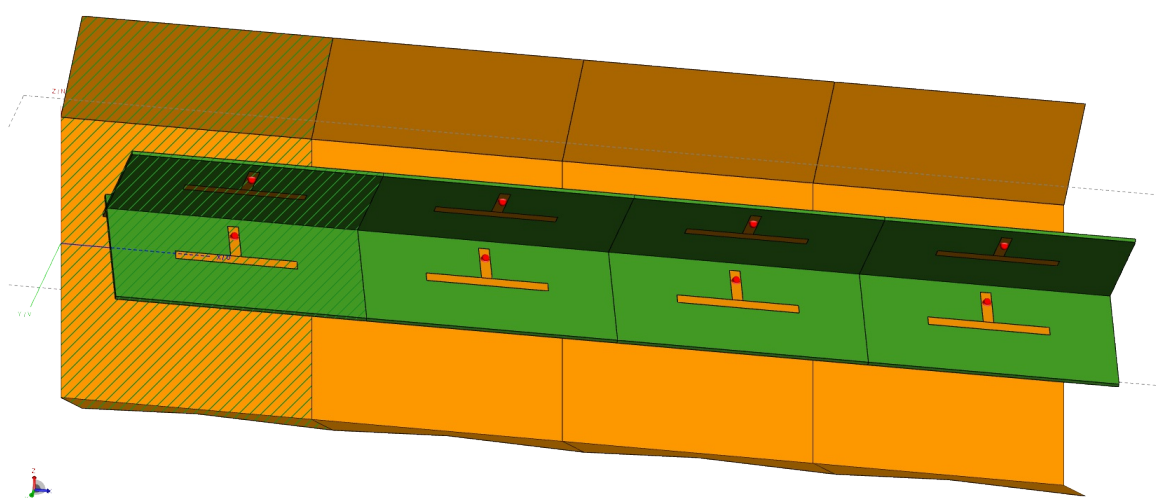
Výsledkem práce bylo několik zjištění a poučení. Návrh antény lze provést pouze s použitím simulačního programu a znalostí šíření elektromagnetických vln v prostředí. Při návrhu antény musíme vzít v potaz všechny předměty (hlavně vodivé) v její blízkosti. Neměli bychom důvěřovat charakteristikám udávanými výrobcem, ale vždy anténu před samotným návrhem přeměřit.

Tato práce vznikla z vlastního podnětu. Ačkoliv se nepodařilo navrhnout funkční reflektor pro jednotku Mikrotik Omnitik U-5HND, na základě provedeného projektu byly získány cenné informace, se kterými již nebude v budoucnu problém takovýto reflektor sestavit.

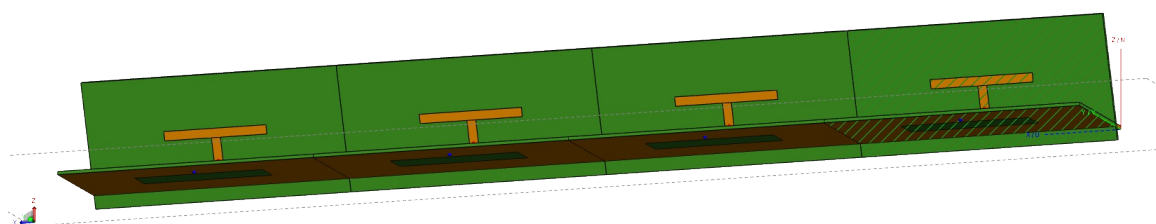
Literatura

- [1] MAZÁNEK Miloš, PECHÁČ Pavel, *Šíření elektromagnetických vln a antény*, Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005, ISBN 80-01-03032-6
- [2] Constantine A. Balanis, *Modern antenna handbook*, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2008, ISBN 978-0-470-03634-1
- [3] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2005, third edition, ISBN: 0-471-66782-X
- [4] kolektiv, *Multimediální učebnice Elektromagnetické vlny Mikrovlnná technika*, FEEC VUT BRNO, 2010, dostupné online z:
<http://www.urel.feec.vutbr.cz/raida/multimedia/>, [cit. 20.4.2014]
- [5] MikroTik, *omnitik-patterns.pdf*, dostupné [online] z:
<http://i.mt.lv/routerboard/files/omnitik-patterns.pdf>, [cit. dne: 10.4.2014]

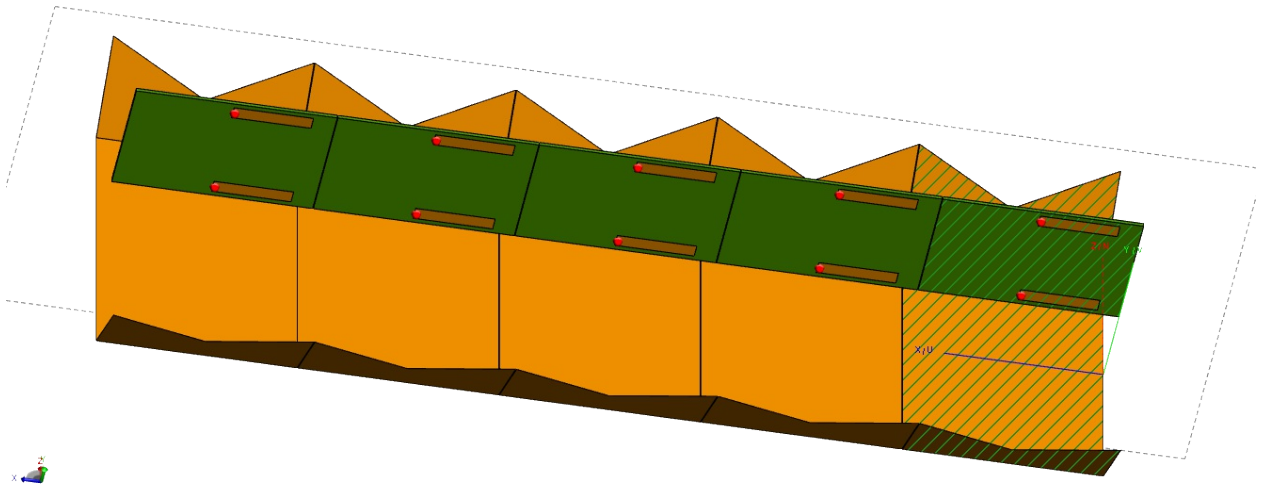
Obrazová příloha



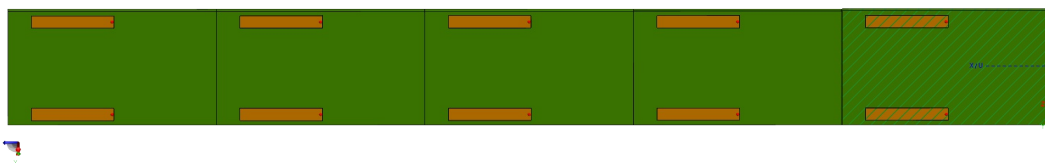
Obrázek 1: Model reflektoru pro horizontálně vyzařující anténu



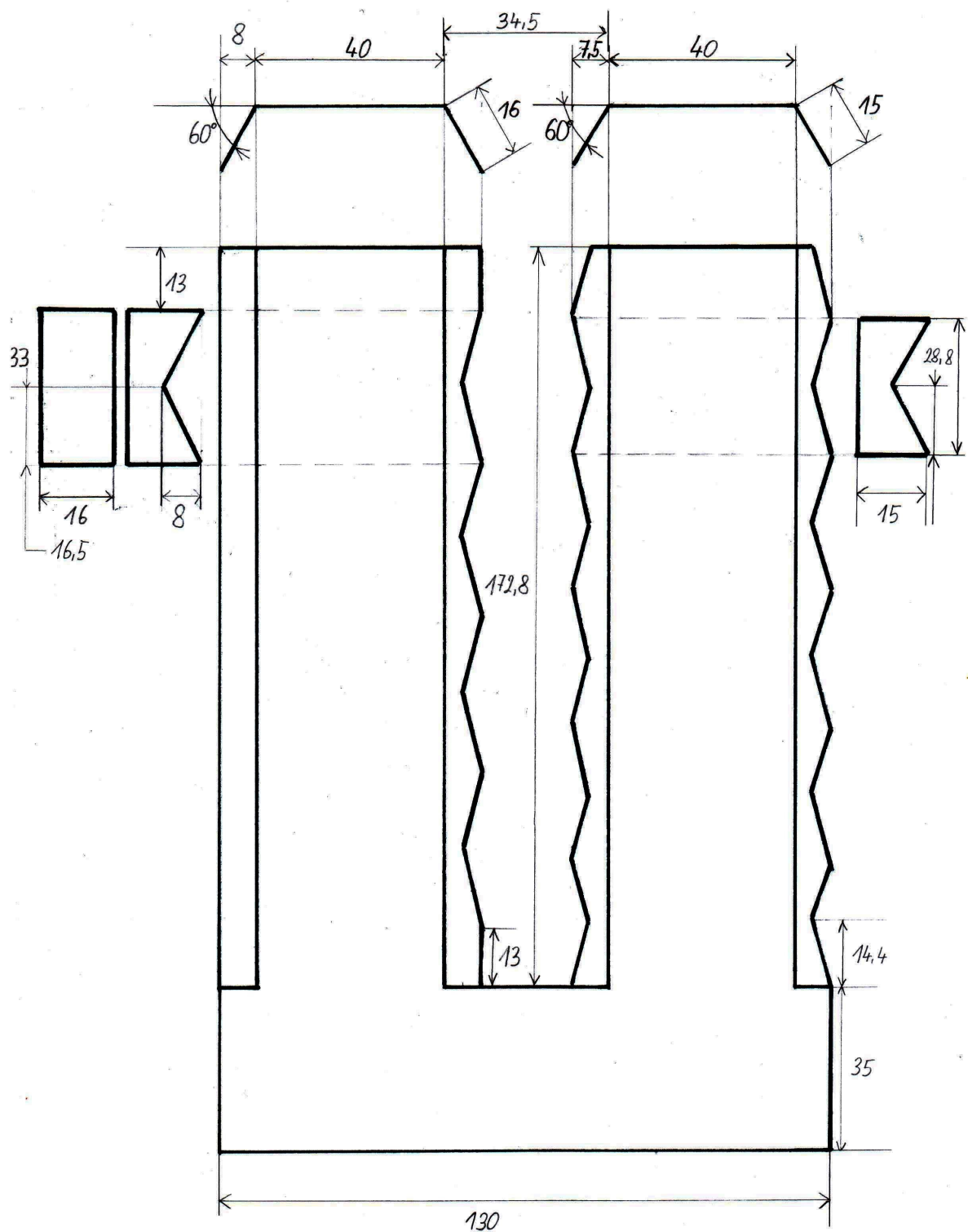
Obrázek 2: Zjednodušený model horizontálně vyzařující antény



Obrázek 3: Model reflektoru pro vertikálně vyzařující anténu



Obrázek 4: Zjednodušený model vertikálně vyzařující antény



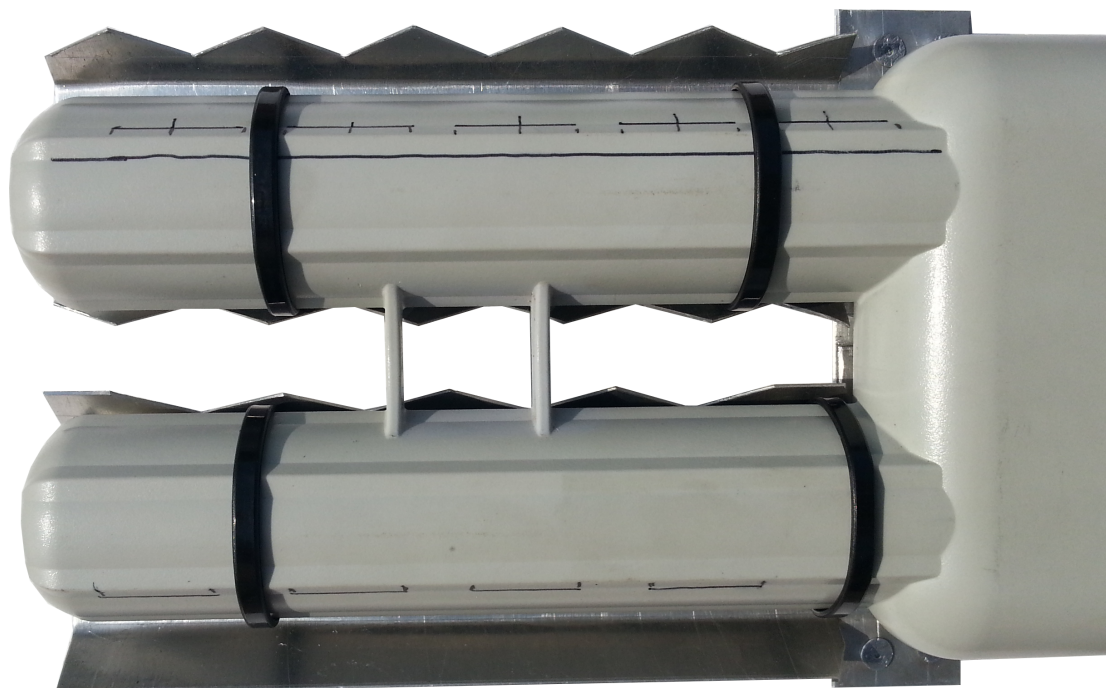
Obrázek 5: Výkres s rozměry úhlového reflektoru pro Omnitik U5HND



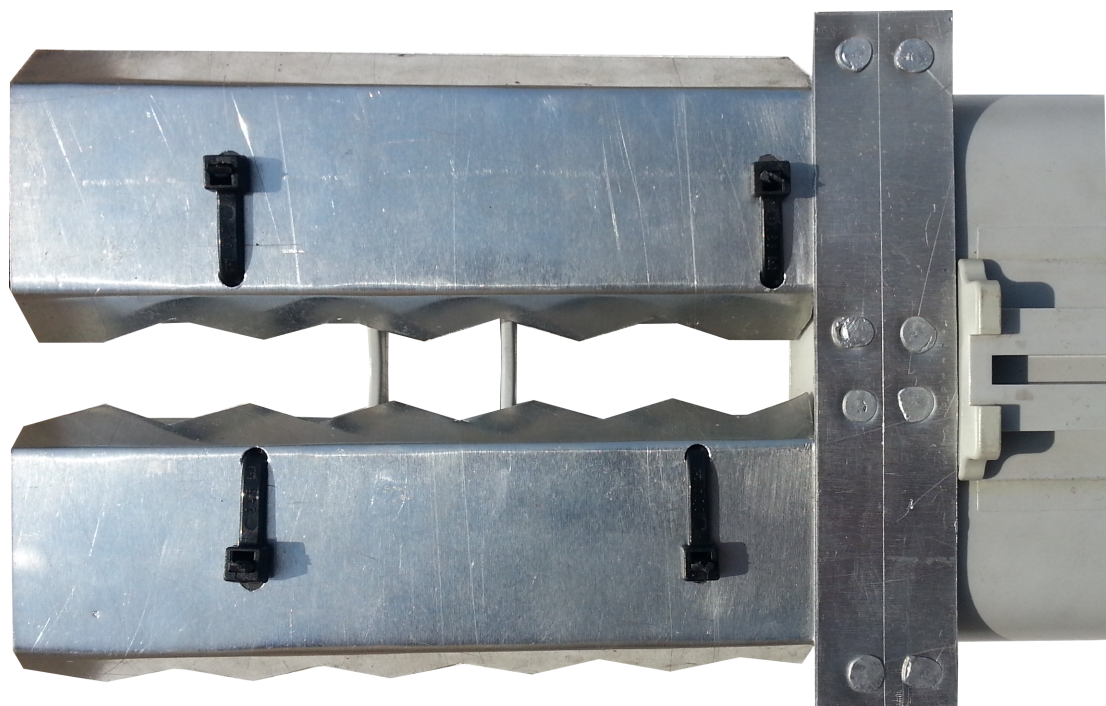
Obrázek 6: Přední strana úhlového reflektoru pro jednotku Omnitik U5HND



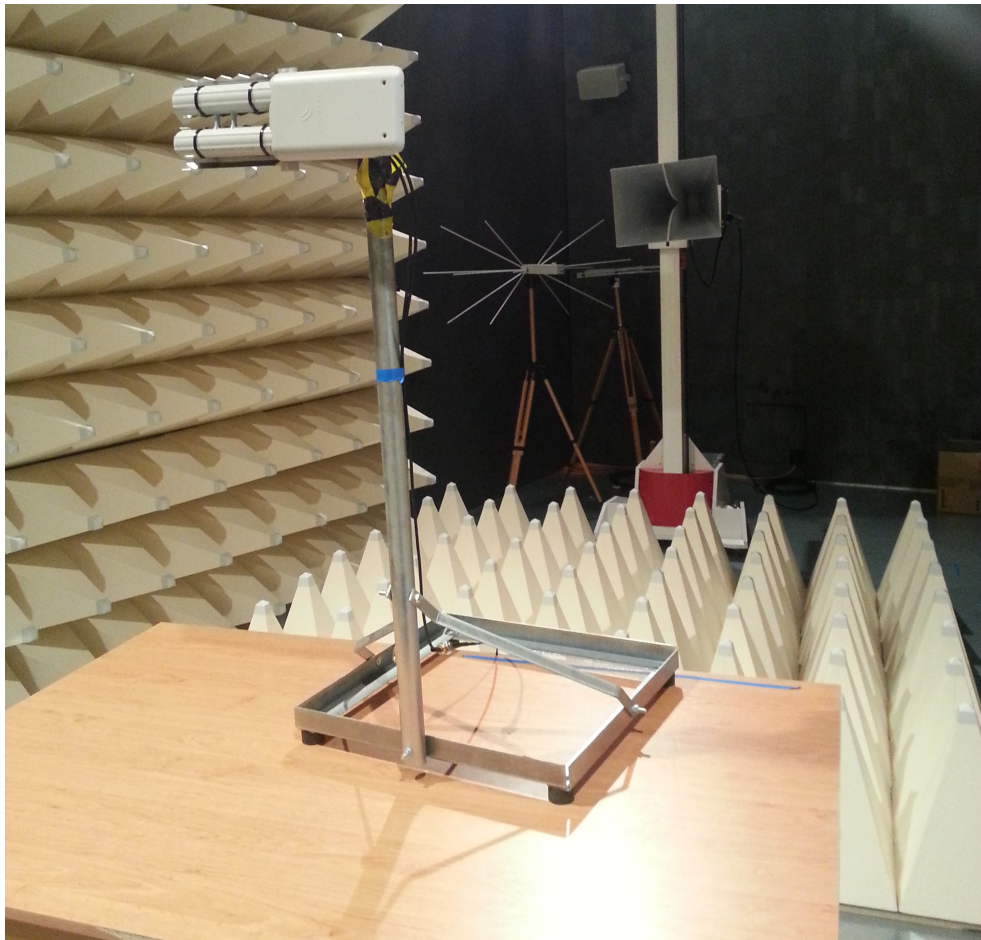
Obrázek 7: Zadní strana úhlového reflektoru pro jednotku Omnitik U5HND



Obrázek 8: Přední strana úhlového reflektoru pro jednotku Omnitik U5HND



Obrázek 9: Zadní strana úhlového reflektoru pro jednotku Omnitik U5HND



Obrázek 10: Snímek z měřicí komory při měření Vertikální polarizace v elevaci