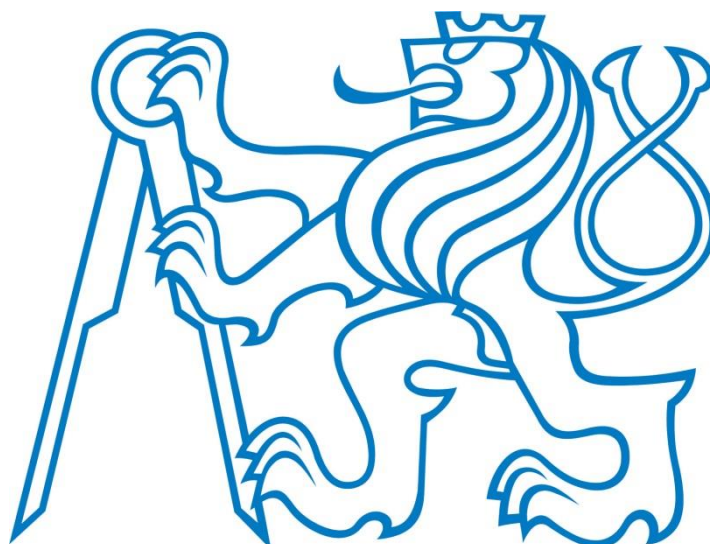


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromagnetického pole



Diplomová práce

Polarizační vlastnosti antén

Vypracoval: Bc. Radim Oliva

Vedoucí práce: prof. Ing. Miloš Mazánek, CSc.

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektromagnetického pole

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Radim Oliva**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Komunikační systémy

Název tématu: **Polarizační vlastnosti antén**

Pokyny pro vypracování:

Na základě polarizačního diagramu interpretovaného Poincarého koulí polarizačních stavů implementujte takto graficky popisovanou situaci do vyzářovacího diagramu literatury zpracujte přehled definic polarizačního stavu antény. Pro znázornění použijte zobrazení na Poincarého kouli. Pro počítačovou simulaci připravte elektrický a magnetický elementární zdroj s řízením amplitudy a fáze (nejlépe poměrově). Zdroje definujte pomocí elektrického a magnetického momentu. Jako výsledek vykreslete vyzářovací diagram a připravte polarizační diagram (Poincarého kouli a složky).

Seznam odborné literatury:

1. J. E. Roy and L. Shafai: Generalization of the Ludwig-3 Definition for Linear Copolarization and Cross Polarization. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 49, NO. 6, JUNE 2001
2. H. George. :The Polarization Sphere as a Graphical Aid in Determining the Polarization of an Antenna by Amplitude Measurements Only. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. AP-15, NO. 2, MARCH 1967
3. A. C. Ludvig: The Definition of Cross Polarization. IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, JANUARY 1973 pp 116-119
4. J. E. Roy and L. Shafai: Corrections to "Generalization of the Ludwig-3 Definition for Linear Copolarization and Cross Polarization". IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 52, NO. 2, FEBRUARY 2004, pp 638-639

Další materiály poskytne vedoucí práce

Vedoucí: prof.Ing. Miloš Mazánek, CSc.

Platnost zadání: ZS 2016/2017



Prof. Ing. Pavel Pechač, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 4. 9. 2015

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou prací "Polarizační vlastnosti antén" vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 24. května 2016

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Prof. Ing. Miloši Mazánkovi, CSc za trpělivý přístup při vedení mé diplomové práce a za podporu při studiu.

Polarizační vlastnosti antén

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou polarizačních vlastností antén. Dále se zabývá simulací elektromagnetického pole elementárního dipólu a elementární smyčky v prostředí Matlab a výpočtem polarizačních stavů superpozicí dvou lineárních polarizací těchto zdrojů. Výstupem práce je také grafické rozhraní vytvořené v prostředí Matlab. Toto grafické rozhraní zpracovává hodnoty naměřené na reálné anténě nebo ze simulátoru, vykresluje vyzařovací charakteristiku, polarizační stavy antény na Poincareho kouli a polarizační elipsu.

Klíčová slova: polarizace, polarizační stav, elementární elektrický dipól, elementární magnetický dipól, vyzařovací charakteristika, Poincareho koule, polarizační elipsa

Polarization Properties of Antennas

Abstract

Thesis deals with the polarization properties of antennas. It also deals with the simulation of electromagnetic fields of elementary dipole and elementary loops in Matlab and calculating the polarization states from a superposition of linear polarizations of these two resources. The outcome of this work is also a graphical interface developed in Matlab. This graphical interface handles the values measured through the real antenna or from the simulator, draws the radiation pattern, antenna polarization states on the Poincare sphere and polarization ellipse.

Key words: polarization, polarization state, elementary electric dipole, elementary magnetic dipole, radiation pattern, Poincare sphere, polarization ellipse

Obsah

Seznam obrázků	7
1. Úvod.....	8
2. Cíl práce	8
3. Teoretický rozbor.....	8
3.1 Polarizace elektromagnetických vln	8
3.2 Polarizační vlastnosti antén	9
3.3 Elementární elektrický zářič – Hertzův dipól	9
3.4 Polarizace.....	12
3.4.1 Eliptická polarizace.....	13
3.4.2 Kruhová polarizace	14
3.4.3 Lineární polarizace	14
3.5 Složky kruhové polarizace.....	14
3.6 Polarizace Huygensova zdroje.....	16
3.7 Vztahy mezi soustavami	16
3.8 Transformace cross polarizace podle Ludwig	17
3.8.1 Tří-dimenzionální měření antény.....	19
3.8.2 Určení polohy cosiny úhlů.....	20
3.8.3 Polární sférický souřadný systém	20
3.8.4 Azimut nad elevací	21
3.8.5 Elevace nad azimutem	22
3.8.6 Ludwig III Eco a Ecross polarizace	23
3.9 Stokesův popis polarizace.....	24
3.10 Poincarého koule.....	25
4. Vlastní řešení	26
4.1 Prostředí simulující elektrický a magnetický dipól	26
4.1.1 Výpočet v prostředí Matlab	26
4.1.2 Grafické rozhraní programu.....	28
4.2 Grafické prostředí pro zpracování naměřených hodnot.....	31
4.2.1 Získání dat.....	31
4.2.2 Formát dat	32
4.2.3 Vyhledání dat.....	33
4.2.4 Zpracování dat	35
4.2.5 Návrh grafického rozhraní	35
4.2.6 Grafické prvky vykreslovací plochy.....	36
Vykreslovací plocha vyzařovací charakteristiky	36
Vykreslovací plocha polarizačních stavů – Poincareho koule.....	36
Vykreslovací plocha polarizační elipsy	37
4.2.7 Textové prvky	38
4.2.8 Ovládací prvky.....	39
Checkbox	39
slidery	40
listbox	40
tlačítka	41
4.2.9 Grafický výstup vyzařovací charakteristiky	41

4.2.10	Grafický výstup polarizačních stavů.....	43
4.2.11	Grafický výstup polarizační elipsy.....	45
4.2.12	Ovládání programového prostředí.....	47
5.	Závěr.....	48
6.	Použité zdroje informací.....	52
7.	Přílohy.....	53

Seznam obrázků

Obrázek 1:	cylindrické souřadnice vektoru [12].....	10
Obrázek 2:	vyzařovací charakteristika Herzova dipólu [14].....	11
Obrázek 3:	polarizační elipsa s vyznačením úhlu sklonu [2].....	13
Obrázek 4:	vznik polarizační elipsy součtem levo a pravotočivých složek [2].....	15
Obrázek 5:	mechanické uspořádání rotátoru [4].....	18
Obrázek 6:	vztahy úhlu v různých souřadných systémech [4].....	19
Obrázek 7:	polární-sférická soustava polarizace [4].....	21
Obrázek 8:	Az/El soustava polarizace [4].....	22
Obrázek 9:	El/Az soustava polarizace [4].....	23
Obrázek 10:	Ludwig 3 co-polar a cross-polar soustava polarizace [4].....	23
Obrázek 11:	Poincareho koule s vynesemím Stokových parametrů [11].....	26
Obrázek 12:	Grafické rozhraní programu [14].....	28
Obrázek 13:	posuvník poměru proudu mezi dipolem a smyčkou [14].....	29
Obrázek 14:	Ovládací prvky vstupních hodnot a tlačítko "Calc" [14].....	29
Obrázek 15:	Zobrazení 3D vyzařovací charakteristiky a směru „špendlíkem“ [14].....	30
Obrázek 16:	Princip Poincareho zobrazení [11] a zobrazení v grafice programu [14].....	31
Obrázek 17:	dialog pro výběr souboru [14].....	33
Obrázek 18:	pohled na grafické rozhraní [14].....	35
Obrázek 19:	vykreslovací plocha vyzařovací charakteristiky [14].....	36
Obrázek 20:	vykreslovací plocha polarizačních stavů [14].....	37
Obrázek 21:	vykreslovací plocha polarizační elipsy [14].....	37
Obrázek 22:	vykreslovací plocha animace [14].....	38
Obrázek 23:	textové popisky ovládacích prvků [14].....	38
Obrázek 24:	textová okénka pro výstup hodnot [14].....	39
Obrázek 25:	textový prvek pro výběr hodnot [14].....	39
Obrázek 26:	umístění checkboxů [14].....	40
Obrázek 27:	posuvníky pro nastavení úhlů [14].....	40
Obrázek 28:	textové pole pro výběr frekvence [14].....	41
Obrázek 29:	ovládací tlačítka [14].....	41
Obrázek 30:	zobrazení sférických pravítek [14].....	42
Obrázek 31:	ukotvení pozorovacího úhlu zobrazovací plochy [14].....	43
Obrázek 32:	vykreslení všech polarizačních stavů [14].....	44
Obrázek 33:	vykreslení polarizačních stavů v řezu phi [14].....	45
Obrázek 34:	zobrazení polarizační elipsy v režimu animace [14].....	46
Obrázek 35:	ovládací tlačítko pro nahrání souboru [14].....	47
Obrázek 36:	tlačítko spuštění animace [14].....	48

1. Úvod

Práce se zabývá problematikou polarizačních vlastností antén. Uvádí základní vztahy vzniku polarizovaných vln a popis jednotlivých druhů polarizací vln, vznikajících působením dvou nezávislých intenzit elektrického pole. Uvádí možné popisy polarizačních stavů antény. Práce se dále zabývá simulací elektromagnetického pole elementárního dipólu a elementární smyčky v prostředí Matlab, a výpočtem polarizačních stavů superpozicí dvou lineárních polarizací těchto zdrojů. Dále je zde řešena problematika polarizace rovinné vlny antény ve vzdálené zóně a grafického znázornění polarizačních stavů antény ve všech směrech vyzařování. Pro praktické použití by bylo vhodné tímto zobrazením názorně vykreslit hodnoty naměřené na skutečné anténě v echuprosté komoře. Takovou možnost nabízí přepracování a rozšíření grafického rozhraní jako navazující práce na grafické prostředí vytvořené v rámci mého individuálního projektu.

2. Cíl práce

Práce si klade za úkol sestavit grafické prostředí pro výpočet a zobrazení vyzařovací charakteristiky superpozicí vyzařovacích charakteristik elementárního elektrického dipólu a elementárního magnetického dipólu, a umožnit uživateli změnit základní parametry této konstalace. Pro zkoumání polarizačních stavů této konstalace pak umožnit uživateli zvolit prostorový směr, ve kterém budou konkrétní vlastnosti řešeny. Pro zobrazení polarizačních stavů pak využít zobrazení na Poincareho kouli. Jako hlavní cíl pak úpravu tohoto grafického prostředí především tak, aby bylo schopno namísto matematicky simulovaných hodnot zpracovat textový soubor, vytvořený z hodnot naměřených na reálné anténě v echuprosté komoře, nebo hodnoty exportované anténním simulátorem.

3. Teoretický rozbor

3.1 Polarizace elektromagnetických vln

Nejjednodušším řešením vlnové rovnice je rovinná vlna, u níž je směr vektorů E a H při šíření v prostoru neměnný. Taková vlna se nazývá lineárně polarizovaná a rovinou polarizace je rovina tvořená vektory E a k . Podstatně obecnějším, pro praxi důležitějším řešením vlnové rovnice, je superpozice dvou rovinných, lineárně polarizovaných vln, které mají obecný fázový posun ψ a jejichž roviny polarizace jsou na sebe kolmé.

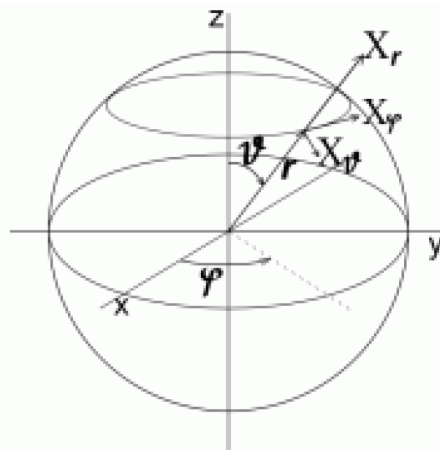
V tomto obecném případě dostáváme superpozici dvou lineárně polarizovaných vln vlnu elipticky polarizovanou. Směr i amplituda intenzit pole se u takové vlny mění. Vektory intenzit se při šíření natáčejí. Pro jednoznačné určení takové vlny je nutné ještě určit směr obíhání koncového bodu vektoru E po elipse. Pokud při pohledu ve směru vlny obíhá koncový bod ve směru chodu hodinových ručiček, jde o pravotočivou polarizaci. Při oběhu proti směru chodu hodinových ručiček je to polarizace levotočivá.[1]

3.2 Polarizační vlastnosti antén

Polarizační vlastnosti antény v daném směru jsou definovány polarizací vyzařované vlny (v tomto případě předpokládáme, že anténa je vysílací). Většinou se pod polarizací vlny vyzářené konkrétní anténou myslí polarizace ve směru maxima vyzařovací charakteristiky. To je však zjednodušený pohled, protože právě tak, jak se mění směrové vlastnosti antény, mění se se směrem i její polarizační vlastnosti. Úplné polarizační vlastnosti by pak bylo možné opět znázornit v závislosti na konkrétním směru na fiktivní kouli představující zářivou oblast. Pro určení polarizace se používá průmět koncového bodu vektoru intenzity elektrického pole do roviny kolmé na směr šíření.[1]

3.3 Elementární elektrický zářič – Hertzův dipól

Elementárním zářičem (vyzařujícím dipólem) je přímý úsek vodiče dl s harmonickým proudem I . Úloha vyzařování elementárního dipólu je zjednodušená situace, která předpokládá, že rozložení proudu je po celé délce dl konstantní. To je splněno za předpokladu, že dl je velmi krátký element ve srovnání s vlnovou délkou a vyzařování sledujeme ve vzdálenosti $r \gg dl$. Pole elementárního dipólu je určeno vektorem elektrické intenzity E a vektorem magnetické indukce H . Vzhledem k uvažované geometrii použijeme cylindrické souřadnice. [12]



Obrázek 1: cylindrické souřadnice vektoru [12]

Vektor elektrické intenzity E a vektor magnetické intenzity H v cylindrických souřadnicích:

$$E = (E_{\vartheta}, E_r, E_{\varphi}) \quad (1)$$

$$H = (H_{\vartheta}, H_r, H_{\varphi}) \quad (2)$$

$$E_{\vartheta} = -\frac{I \cdot dl}{4\pi} Z k^2 \sin \vartheta \left(\frac{1}{jkr} + \frac{1}{(jkr)^2} + \frac{1}{(jkr)^3} \right) e^{-jkr} \quad (3)$$

$$E_r = -\frac{I \cdot dl}{4\pi} Z k^2 2 \cos \vartheta \left(\frac{1}{(jkr)^2} + \frac{1}{(jkr)^3} \right) e^{-jkr} \quad (4)$$

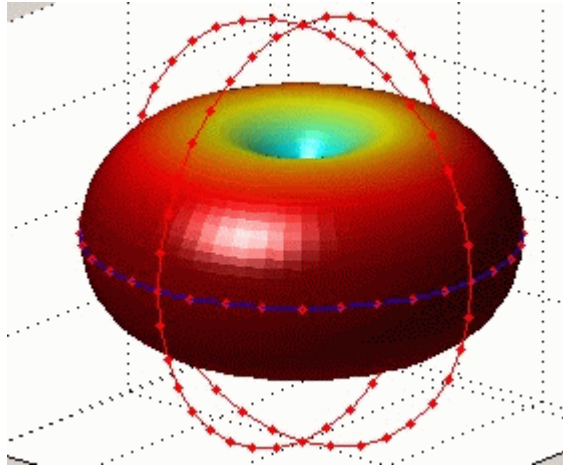
$$H_{\varphi} = -\frac{I \cdot dl}{4\pi} k^2 \sin \vartheta \left(\frac{1}{jkr} + \frac{1}{(jkr)^2} \right) e^{-jkr} \quad (5)$$

Ostatní složky vektoru elektrické intenzity a magnetické indukce jsou nulové:

$$E_{\varphi} = H_r = H_{\vartheta} = 0 \quad (6)$$

Navíc si můžeme povšimnout, že složky pole nejsou závislé na úhlu φ , neboli že pro všechny $\varphi \in \langle 0, 2\pi \rangle$ úhly má elementární dipól stejnou vyzářovací charakteristiku.

Vyzářovací charakteristika má maximum pro $\vartheta = \frac{\pi}{2}$. Dipól nevyzařuje do směrů $\vartheta = 0$ a $\vartheta = \pi$.



Obrázek 2: vyzářovací charakteristika Herzova dipólu [14]

Ve velkých vzdálenostech platí: $\frac{1}{kr} > \frac{1}{(kr)^2} > \frac{1}{(kr)^3}$. Členy $\frac{1}{(kr)^2}$, $\frac{1}{(kr)^3}$ zanedbáme a složky elektrického a magnetického pole zjednodušíme na: (ostatní jsou nulové)

$$E_{\vartheta} = -\frac{jI dl}{4\pi r} Z k \sin \vartheta e^{-jkr} \quad (7)$$

$$H_{\varphi} = \frac{jI dl}{4\pi r} k \sin \vartheta e^{-jkr} \quad (8)$$

Střední hodnota Poyntingova vektoru ve vzdálené zóně je

$$\mathbf{S}_{str} = \frac{1}{2} \text{Re}\{E_{\vartheta} H_{\varphi}^*\} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 dl}{4\pi r} k \sin \vartheta \right)^2 Z \mathbf{r}_0 \quad (9)$$

Střední hodnota klesá s druhou mocninou vzdálenosti r . Tato závislost je samozřejmá, protože kulová plocha roste s druhou mocninou r a integrál musí být přes libovolnou plochu obklopující dipól stejný, rovný energii vyzářené dipólem. Jinak řečeno splňujeme Sommerfeldovu vyzářovací podmínku. Výkon vyzářený dipólem potom je:

$$P_r = \oiint \mathbf{S}_{str} \cdot d\mathbf{S} = \int_r \mathbf{S}_{str} 2\pi r \sin \vartheta r d\vartheta \quad (10)$$

Po dosazení dostaneme:

$$P_r = \pi \left(\frac{Idl}{4\pi} k \right)^2 Z \int_0^\pi \sin^3 \vartheta d\vartheta = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{Idl}{4\pi} k \right)^2 Z$$

$$= \frac{40\pi^2}{\sqrt{\varepsilon_r}} \left(\frac{Idl}{\lambda_0} k \right)^2 \quad (11)$$

a pro vyzářovací odpor platí:

$$R_r = \frac{P_{vyz}}{I_{ef}^2} = \frac{80\pi^2}{\sqrt{\varepsilon_r}} \left(\frac{dl}{\lambda_0} \right)^2 [\Omega] \quad (12)$$

Ve vzdálené zóně jsou vektory E a H ve fázi, přenášejí pouze činný výkon, který se šíří ve směru od dipólu, pokud prostředí považujeme za bezztrátové.

V bezprostřední blízkosti dipólu platí $\frac{1}{(kr)^3} > \frac{1}{(kr)^2} > \frac{1}{kr}$. Ve složkách pole zanedbáme členy $\frac{1}{kr}$ s nízkými mocninami. Pro vyzářený výkon plochou S kolem dipólu ve vzdálenosti r dostaneme: [12]

$$P = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \mathbf{S} \mathbf{r}_0 r^2 \sin(\vartheta) d\vartheta d\varphi = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (E_\vartheta H_\varphi^* \mathbf{r}_0 - E_r H_\varphi^* \boldsymbol{\vartheta}_0) \mathbf{r}_0 r^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi$$

$$= Z \frac{\pi}{3} \left(\frac{I_0 dl}{\lambda} \right)^2 \left[1 - j \frac{1}{(kr)^3} \right] \quad (13)$$

Výkon pak můžeme rozdělit na reálnou a imaginární část:

$$P_{vyz} = Re\{P\} = Z \frac{\pi}{3} \left(\frac{I_0 dl}{\lambda} \right)^2 \quad (14)$$

$$2\omega(W_m - W_e) = Im\{P\} = -Z \frac{\pi}{3} \left(\frac{I_0 dl}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{(kr)^3} \quad (15)$$

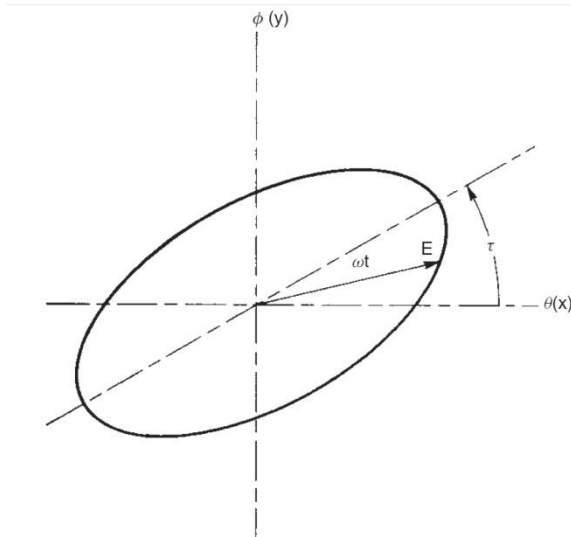
3.4 Polarizace

Polarizace vlny je určena směrem intenzity elektrického pole. Všechny stavy polarizace můžeme popsat vektorovými operacemi ve dvourozměrném prostoru při použití ortogonálních radiálních vektorů ve vzdálené zóně jako jednotkových vektorů lineárních polarizací v této tečné rovině. [2]

3.4.1 Eliptická polarizace

Kulová vlna ve vzdálené zóně má jen θ a φ složky elektrického pole. $\mathbf{E} = E_\theta \hat{\theta} + E_\varphi \hat{\varphi}$.

E_θ a E_φ jsou fázorové složky ve směru jednotkových vektorů θ a φ . Také můžeme popsat směr elektrického pole složkami rovinné vlny šířící se v ose z jako $\mathbf{E} = E_x \hat{x} + E_y \hat{y}$. Směr šíření tak omezí elektrické pole ve vzdálené zóně na tečnou rovinu ke směru šíření. [2]



Obrázek 3: polarizační elipsa s vyznačením úhlu sklonu [2]

Popis polarizace se tak omezuje pouze na popis v tomto dvourozměrném prostoru. Obě lineární polarizace uvedené výše můžeme přepsat jako:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= E_\theta (\hat{\theta} + \hat{\rho}_L \hat{\varphi}) & \hat{\rho}_L &= \frac{E_\varphi}{E_\theta} \\ \mathbf{E} &= E_x (\hat{x} + \hat{\rho}_L \hat{y}) & \hat{\rho}_L &= \frac{E_y}{E_x} \end{aligned} \quad (16)$$

kde $\hat{\rho}_L$ je lineární polarizační poměr. Pokud vložíme do výrazů čas, pak špička elektrického pole vykreslí elipsu rotující ve směru, nebo proti směru hodinových ručiček. Na obrázku č. Obrázek 3 je znázorněn sklon τ polarizační elipsy měřený od osy x ($\varphi=0^\circ$) a sklon hlavní osy elipsy. Poměr hlavní a vedlejší osy elipsy, tedy poměr maximální ku minimální velikosti elektrického pole, se nazývá osový poměr. Pro $\hat{\rho}_L = e^{\pm j\pi/2}$ se elipsa roztáhne do kruhu a poskytne zvláštní případ kruhové polarizace. Velikost elektrického pole je pak konstantní, ale rotuje buď ve směru, nebo proti směru hodinových ručiček s rychlostí ωt pro vlnu šířící se kolmo směrem do stránky. [2]

3.4.2 Kruhová polarizace

Jak již bylo řečeno, kruhová polarizace je zvláštní případ eliptické polarizace. Elipsa přejde v kružnici pokud:

souřadnice vektoru elektrické intenzity E_x a E_y si budou vzájemně rovny, tedy $a_x=a_y$ a zároveň fázový rozdíl mezi E_x a E_y bude $\delta = \delta_y - \delta_x = m\frac{\pi}{2}$; $m = 2k + 1$; $k \in \mathbf{Z}$

U kruhově polarizované vlny mohou nastat dva případy.

Pravotočivě polarizovaná: $\delta_y - \delta_x = \frac{\pi}{2}$

Levotočivě polarizovaná: $\delta_y - \delta_x = -\frac{\pi}{2}$

3.4.3 Lineární polarizace

Lineární polarizace je opět speciální případ eliptické polarizace, kdy elipsa přejde v úsečku. Vektor intenzity elektrického pole tedy kmitá v rovině. Lineární polarizace nastane, pokud bude fázový rozdíl $\delta = \delta_y - \delta_x = m\frac{\pi}{2}$; $m \in \mathbf{Z}$, nebo jedna složka elektrické intenzity E_x nebo E_y je rovna nule. [11]

3.5 Složky kruhové polarizace

Dvě kruhové polarizace také zaujímají dvourozměrný prostor polarizace. Levo- a pravostanné ortogonální jednotkové vektory definované jako lineární složky jsou:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{\theta} - j\hat{\phi}) \quad \text{nebo} \quad \hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{x} - j\hat{y}) \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{L}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{\theta} + j\hat{\phi}) \quad \text{nebo} \quad \hat{\mathbf{L}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{x} + j\hat{y}) \quad (18)$$

Elektrické pole v polarizační rovině pak může být na základě těchto nových jednotkových vektorů vyjádřeno jako:

$$\mathbf{E} = E_L \hat{\mathbf{L}} + E_R \hat{\mathbf{R}} \quad (19)$$

Průmětem vektoru do některého z těchto jednotkových vektorů pak dostaneme:

$$E_L = \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{L}}^* \quad E_R = \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{R}}^* \quad (20)$$

Při projekci R na sebe sama dostaneme:

$$\hat{\mathbf{R}} \cdot \hat{\mathbf{R}}^* = \frac{1}{2}(\hat{\theta} - j\hat{\phi}) \cdot (\hat{\theta} + j\hat{\phi}) = \frac{1}{2}(1 - j \cdot j) = 1 \quad (21)$$

podobně

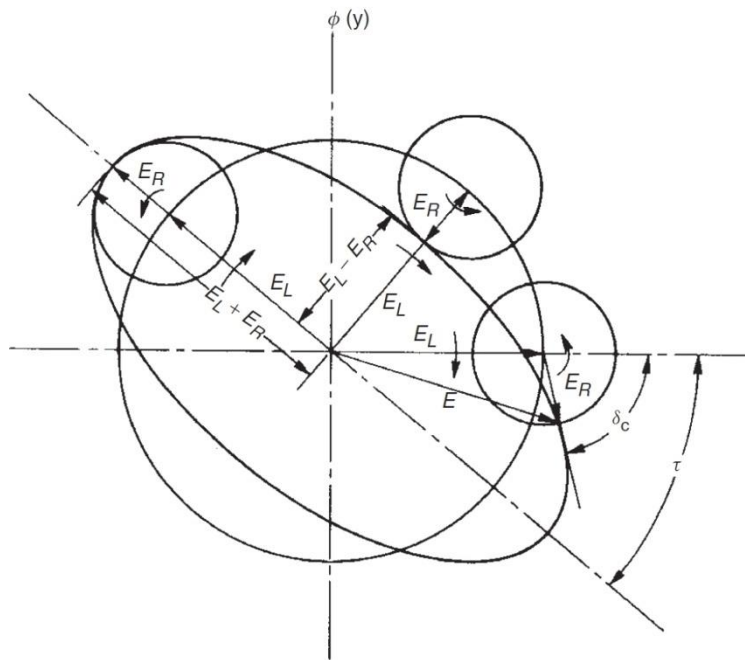
$$\hat{\mathbf{L}} \cdot \hat{\mathbf{R}}^* = \frac{1}{2}(\hat{\theta} + j\hat{\phi}) \cdot (\hat{\theta} + j\hat{\phi}) = \frac{1}{2}(1 + j \cdot j) = 0 \quad (22)$$

Pravo a levo kruhové (RHC a LHC) složky jsou ortogonální.

Poměr kruhové polarizace můžeme definovat rovnicí

$$\mathbf{E} = E_L(\hat{\mathbf{L}} + \hat{\rho}_c \hat{\mathbf{R}}) \quad \hat{\rho}_c = \frac{E_R}{E_L} = \rho_c e^{j\delta_c} \quad (23)$$

Na obrázku č. 4 je pohled na dominantní levotočivou kruhově polarizovanou vlnu, jejíž složka E_L je v čase a prostoru situována do nulové fáze. Polarizaci můžeme zobrazit pomocí dvou kruhů rotujících opačným směrem rychlostí ωt . [2]



Obrázek 4: vznik polarizační elipsy součtem levo a pravotočivých složek [2]

Pro názornost autor pomyslně upevnil střed pravotočivé kružnice na konec levotočivého vektoru. Jejich vzájemnou fázi polarizačního kruhového poměru $\hat{\rho}_c$ vypočteme z komplexního poměru pravo a levotočivé kruhové složky. Maximum a minimum

elektrického pole vznikne, když se střídavě sčítají a odčítají při své rotaci. Úhel sklonu elipsy τ je polovina δ_C fáze $\hat{\rho}_C$. Poměr maxima a minima průmětu vektoru elektrického pole do roviny polarizační elipsy pak nazýváme osovým poměrem (26). [2]

$$E_{max} = \frac{(|E_L| + |E_R|)}{\sqrt{2}} \quad (24)$$

$$E_{min} = \frac{(|E_L| - |E_R|)}{\sqrt{2}} \quad (25)$$

$$axial\ ratio = \frac{E_{max}}{E_{min}} \quad (26)$$

3.6 Polarizace Huygensova zdroje

Při promítnutí proudů indukovaných na parabolickém reflektoru do roviny apertury, Huygensovy zdroje záření indukují zarovnané proudy vyzářující nulovou cross-polarizaci v hlavních rovinách. V takovém případě rozdělíme vyzářovací zdroje antény na ortogonální Huygensovy zdroje. Pro výpočet vyzářovací charakteristiky ve vzdálené zóně můžeme vynechat umocňování proudů a integraci přes pole Huygensových zdrojů v ploše apertury. Provedeme transformaci změřeného pole na ortogonální Huygensovy zdroje pomocí:

$$\begin{bmatrix} E_C \\ E_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\theta f} \\ E_{\varphi f} \end{bmatrix} \quad (27)$$

kde E_C je polarizace ve směru $\varphi=0^\circ$ a E_x je polarizace ve směru $\varphi=90^\circ$. Toto rozdělení koresponduje s definicí Ludwig 3 o cross polarizaci. Následující matice převádí Huygensovy zdroje polarizace do složek sférické soustavy ve vzdálené zóně. [2]

$$\begin{bmatrix} E_\theta \\ E_\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\theta f} \\ E_{\varphi f} \end{bmatrix} \quad (28)$$

3.7 Vztahy mezi soustavami

V problematice náhodně orientovaných antén mají výhodu kruhově polarizované složky oproti složkám polarizovaných lineárně. Pokud soustava rotuje, amplituda a fáze se mění s ρ_L , poměrem lineární polarizace, zatímco poměr kruhové polarizace ρ_C je konstantní při

rotaci a mění se pouze fáze. Jinými slovy, poměr průměrů kruhů je konstantní. Kruhové složky mohou být odvozeny ze složek lineárních projekcí:

$$E_R = (E_\theta \hat{\theta} + E_\varphi \hat{\varphi}) \cdot \hat{\mathbf{R}}^* = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_\theta \hat{\theta} + E_\varphi \hat{\varphi})(\hat{\theta} + j\hat{\varphi}) \quad (29)$$

$$E_R = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_\theta + jE_\varphi) \quad (30)$$

podobně

$$E_L = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_\theta - jE_\varphi) \quad (31)$$

Lineární polarizace může být odvozena podobně na základě kruhových složek:

$$E_\theta = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_L + E_R) \quad E_\varphi = \frac{j}{\sqrt{2}} (E_L - E_R) \quad (32)$$

Tyto vztahy dovolují převod mezi polarizacemi.

Dobře kruhově polarizovanou anténu pro široké pásmo je těžké vyrobit, ale dobře lineárně polarizované antény získáme snadno. Jakmile změříme fázi a amplitudu E_θ a E_φ fázorových složek, spočítáme kruhové složky z rovnice (30), poměr os z rovnice (26) a sklon polarizační elipsy τ jako jednu polovinu fáze E_R/E_L . Maximum a minimum lineárních složek spočítáme průmětem lineárních složek do kruhového souřadného systému polarizační elipsy: [2]

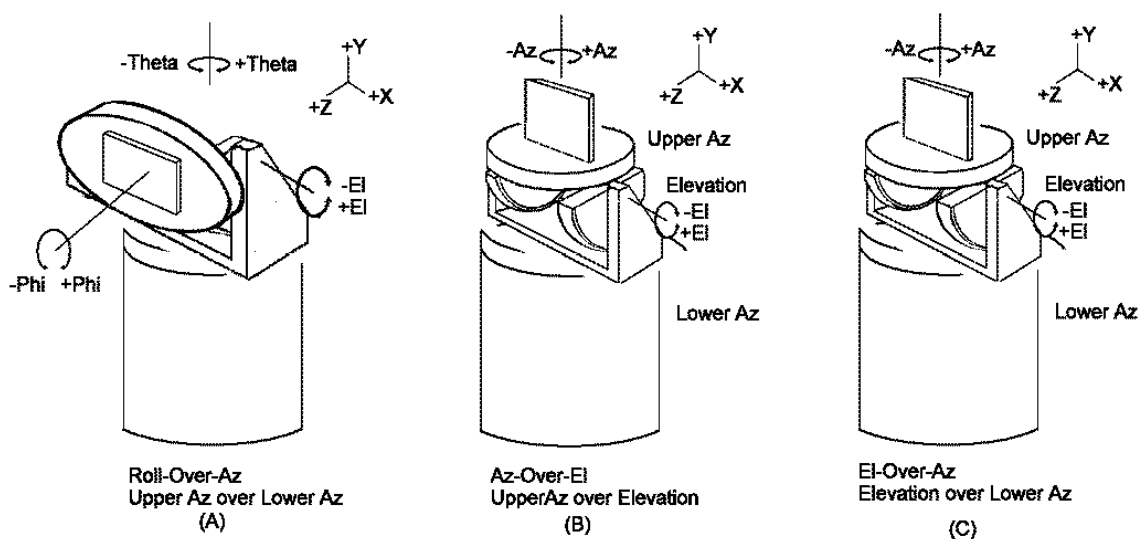
$$E_{max} = E_\theta \cos \tau + E_\varphi \sin \tau \quad (33)$$

$$E_{min} = -E_\theta \sin \tau + E_\varphi \cos \tau \quad (34)$$

3.8 Transformace cross polarizace podle Ludwig

Téma transformací souřadných systémů by vydalo na samostatnou práci, proto je zde uveden jen základní popis jednotlivých soustav. Měření na anténě jsou prováděna na povrchu pomyslného tělesa jako funkce polohy vztahené k anténě. Při měření použitý souřadnicový systém přímo ovlivňuje jak jsou data na povrch roviny, válce, koule či jiného tělesa mapována. Měření ve vzdálené zóně je obvykle mapováno a konvertováno na

povrch koule, na kterou jsou přepočtem promítnuty směrovost a polarizace. Často snímací systém nepoužívá stejný souřadný systém v jakém jsou výsledky mapovány, a to vyžaduje přepočet vzorců k tomu určenými. Navíc projekce takových dat do dvou nebo třírozměrných polárních nebo pravoúhlých grafů představuje další problém s jejich interpretací. V krátkém shrnutí budou představeny základní používané rotační soustavy a souřadnicové soustavy související s jejich mechanickou konstrukcí. Rotace antény a snímače během měření přímo ovlivňuje výsledný obrazec. Polarizační vektory jsou přímo ovlivněny mechanickým uspořádáním rotátoru a mohou být hodně odlišné v porovnání s jiným typem rotátoru. Na obrázku č. Obrázek 5 je zobrazen klasický rotátor s konstrukcí osových volností rotace nad elevací, a ta nad azimutem (Roll over Elevation over Azimuth). Toto je velice rozšířený typ rotátoru, který díky tomuto uspořádání podporuje tři základní typy souřadných systémů. Zde zmíněné vzorce a vysvětlení se budou týkat tohoto uspořádání rotátoru a pro jiné uspořádání je nezbytné vzorce patřičně upravit. [4]



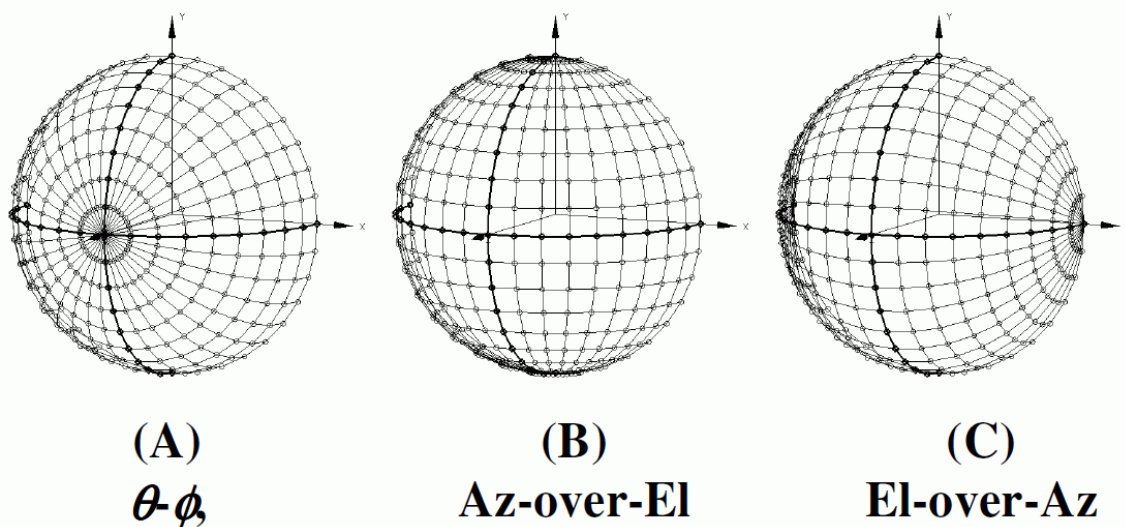
Obrázek 5: mechanické uspořádání rotátoru [4]

Obrázek Obrázek 5A ukazuje měřenou anténu připevněnou v pozici osy rotace s osou elevace skloněnou na 90° . Toto je standardní Theta-Phi souřadnicový systém. Obrázky 5B a 5C ukazují upevnění antény pro oba dva zbylé souřadné systémy. Každý souřadný systém sestává ze dvou pohyblivých os a jedné osy pevné, která v tom případě není součástí souřadného systému. Každý ze systémů má svůj přirozený výchozí směr orientovaný v jiné ose. Tento směr je ten, ve kterém anténa nemění úhel v prostoru při otáčení jedné ze dvou os definovaných pro tento souřadný systém.

System	Pole	Roll (Upper-Az)	Elevation	Azimuth (Lower-AZ)
θ - ϕ	Z-axis	Phi	Fixed at 90.0	Theta
Az/El	Y-axis	Azimuth	Elevation	Fixed at 0.0
El/Az	X-axis	Fixed at 0.0	Elevation	Azimuth

Tabulka 1: uspořádání os jednotlivých souřadných systémů [4]

Obrázek 6 ukazuje rozložení úhlových měření ve vzdálené zóně při rotaci antény. Je potřeba si uvědomit, že je zde rozdíl mezi úhlem kterým směřuje anténa do prostoru, a úhlem mezi měřicí anténou a rotátorem. Každý souřadnicový systém má dva úhly a dva póly. Úhel-1 je měřen vzhledem k ose pólů. Celá kružnice v úhlu-1 prochází vždy oběma póly. Druhý z úhlů (úhel-2) vytváří kružnice okolo pólů. Velikost kružnic úhlu-2 je funkcí úhlu-1. Tabulka 1 ukazuje vzájemné vztahy mezi úhlem-1 a úhlem-2 pro jednotlivé souřadné systémy. [4]



Obrázek 6: vztahy úhlu v různých souřadných systémech [4]

3.8.1 Tří-dimenzionální měření antény

Trojrozměrné měření antény se uskutečňuje rotací dvou os tak, aby bylo postupně dosaženo měření amplitudy a fáze na celé kouli. V praxi obvykle není možné provést měření v celém rozsahu koule z důvodu mechanické blokace rotátoru. Nicméně je možné

provést měření kompletní koule rotací jedné osy v rozsahu 180° a druhé osy v rozsahu 360° . [4]

3.8.2 Určení polohy cosiny úhlů

Určení polohy bodu v prostoru dosáhneme pomocí cosinů úhlů α , β , γ . Bod je definován vektorem r , vedeného z nulových souřadnic do tohoto bodu. Cosiny úhlů souvisejí s vektorem r v Kartézské soustavě takto:

$$r = u\hat{a}_x + v\hat{a}_y + w\hat{a}_z \quad (35)$$

u , v a w jsou váhovány v každém směru jednotkovým vektorem

$$u = \cos \alpha = a/\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \quad (36)$$

$$v = \cos \beta = b/\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \quad (37)$$

$$w = \cos \gamma = c/\sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \quad (38)$$

Úhly α , β , γ jsou měřeny od os x , y , z . S použitím uvedených výrazů je možné přímo vyjádřit konverzi mezi kterýmikoli ze tří typických souřadných systémů: Theta-Phi, Azimuth over Elevation, Elevation over Azimuth. To provedeme určením délky $r=1$ a určením vztahů dvou úhlů anténního souřadného systému a cosinů úhlů.

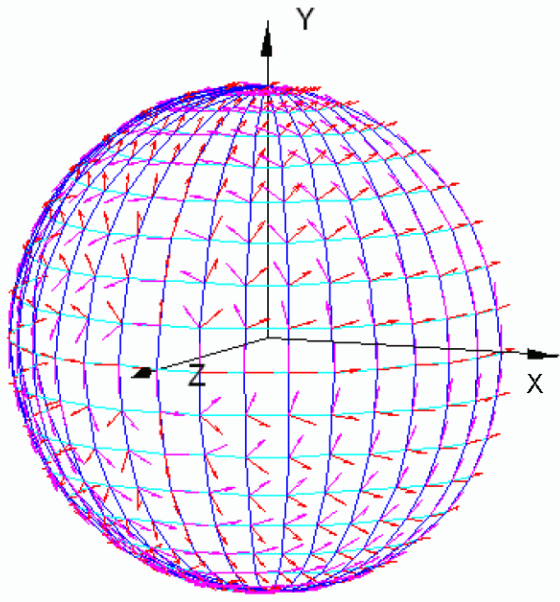
3.8.3 Polární sférický souřadný systém

Jak ukazuje obrázek 6A, rotace Phi úhlu je v tomto případě situována do úhlu Theta. To znamená, že póly vzniknou při $\text{Theta} = 0^\circ, 180^\circ, 360^\circ$, atd. To znamená, že pól leží na ose z a $\text{Theta}=\text{gamma}$ a phi bude kombinací Alfa a beta podle rovnic: [4]

$$u = \cos \alpha = \sin \theta \cos \varnothing \quad (39)$$

$$v = \cos \beta = \sin \theta \sin \varnothing \quad (40)$$

$$w = \cos \gamma = \cos \theta \quad (41)$$



Obrázek 7: polární-sférická soustava polarizace [4]

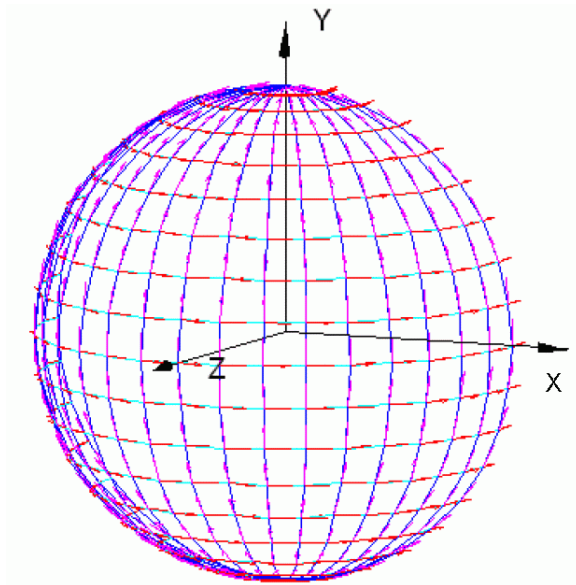
3.8.4 Azimut nad elevací

Jak ukazuje obrázek 6B, rotace v úhlu azimutu je umístěna nad úhlem elevace. To znamená, že póly vzniknou ve dvou pozicích elevace, a to při -90° a 90° . Pól leží na ose y , takže $El = -\beta + 90^\circ$ a Az je kombinací α a γ podle: [4]

$$u = \cos \alpha = \sin Az \cos El \quad (42)$$

$$v = \cos \beta = \sin El \quad (43)$$

$$w = \cos \gamma = \cos Az \cos El \quad (44)$$



Obrázek 8: Az/El soustava polarizace [4]

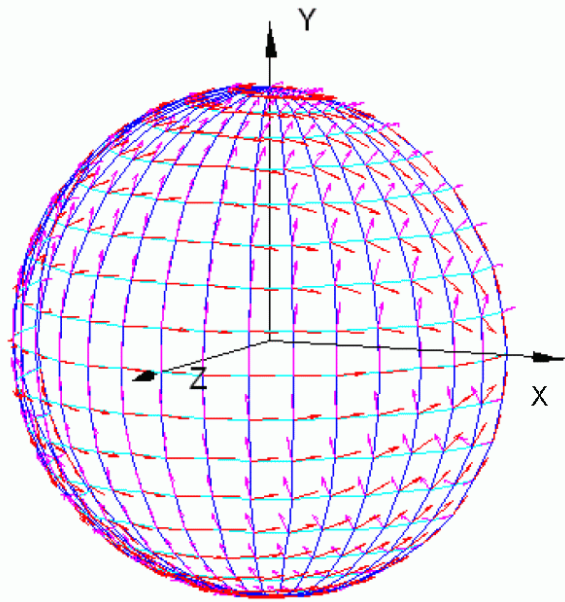
3.8.5 Elevace nad azimutem

Jak ukazuje obrázek 6C, rotace v úhlu elevace je umístěna nad úhlem azimutu. To znamená, že póly vzniknou ve dvou pozicích azimutu a to při -90° a 90° . Pól leží na ose x, takže $Az = -\gamma + 90^\circ$ a Az je kombinací α a γ podle: [4]

$$u = \cos \alpha = \sin Az \quad (45)$$

$$v = \cos \beta = \cos Az \sin El \quad (46)$$

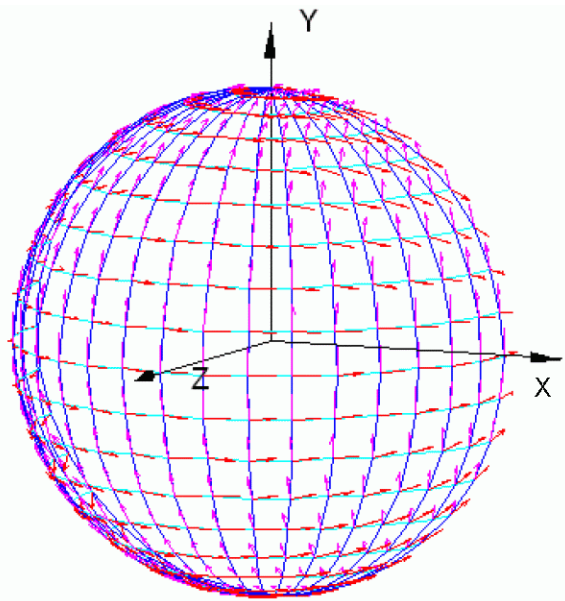
$$w = \cos \gamma = \cos Az \cos El \quad (47)$$



Obrázek 9: E1/Az soustava polarizace [4]

3.8.6 Ludwig III Eco a Ecross polarizace

Modifikací vektorových složek theta a phi je řešen problém s jejich nevhodným směrem vzniklým zmíněnými souřadnými soustavami a je často užíván při měření v echuprostých komorách. Jednotkové složky the a phi rotují radiálně ve směru úhlu phi, abychom získali vektorové složky uváděné jako Ludwig3 složky.



Obrázek 10: Ludwig 3 co-polar a cross-polar soustava polarizace [4]

Pro tyto složky je použito označení h a v , jelikož tyto složky aproximují v podstatě horizontální a vertikální složky přes celou polokouli. Souřadný systém a vektory pro tento souřadný systém ukazuje obrázek 10. Měření ve vzdálené zóně s užitím Ludwig-3 složek rotuje zdrojová anténa v úhlu φ . Jestliže jsou známy amplituda a fáze dvou složek v jednom souřadném systému, ostatní mohou být vypočteny následujícími transformacemi.

$$\begin{bmatrix} E_h \\ E_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_\theta \\ E_\varphi \end{bmatrix} \quad (48)$$

Úpravou transformace můžeme pak provádět transformace z jedné soustavy do jiné. [5][4]

3.9 Stokesův popis polarizace

Prostřednictvím Stokesových parametrů a Poincarého koule můžeme snadno stanovit charakter polarizace a stupeň polarizace. Všechny informace v této kapitole pochází převážně z [6] a [7]. Rovinnou, úplně polarizovanou vlnu můžeme popsat pomocí tří parametrů: amplitudami elektrické intenzity a_x a a_y a dále jejich vzájemným fázovým rozdílem $\delta = \delta_y - \delta_x$. Místo těchto parametrů můžeme použít tzv. Stokesovy parametry S_0 až S_3 , které jsou definovány podle (49) až (52).

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \quad (49)$$

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \quad (50)$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \quad (51)$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta \quad \delta = \delta_y - \delta_x \quad (52)$$

Protože máme ve 4 rovnicích (49) až (52) 3 neznámé, můžeme jeden z parametrů vyjádřit pomocí ostatních. Např. parametr S_0 lze vyjádřit jako:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (53)$$

Parametr s_0 je úměrný elektrické intenzitě (dále jen intenzitě) vlny I , s_1 udává rozdíl mezi intenzitou lineárně polarizované vlnou ve směru osy x a y , s_2 udává rozdíl mezi lineárně polarizovanými vlnami pod úhly 45° a -45° vůči ose x . Poslední parametr s_3

udává rozdíl mezi pravotočivě a levotočivě kruhově polarizovanou vlnou. Již zde je vidět výhoda Stokesových parametrů: ihned je zřejmé, jakým způsobem je vlna polarizována a dále jaká je intenzita vlny. Pro vzájemné porovnávání polarizačních různých vln nás většinou nezajímá celková intenzita, ale pouze stupeň polarizace, případně úhly ψ a χ v polarizační elipse. Proto se často používají normované Stokesovy parametry (54) až (57), kdy hodnota parametru S_0 je jednotková (tj. elektrická intenzita vlny je také jednotková): $S_0 = 1$.

$$S_{N0} = 1 \quad (54)$$

$$S_1 = \frac{E_{0x}^2 - E_{0y}^2}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} \quad (55)$$

$$S_2 = \frac{2E_{0x}E_{0y} \cos \delta}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} \quad (56)$$

$$S_3 = \frac{2E_{0x}E_{0y} \sin \delta}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} \quad (57)$$

3.10 Poincarého koule

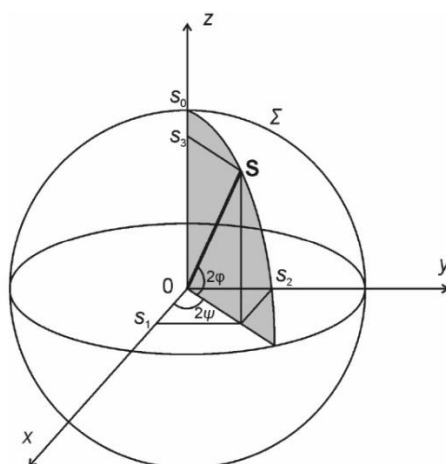
Stokesovy parametry je možné alternativně vyjádřit pomocí parametru S_0 , úhlů χ a ψ , které lze určit odvozením z eliptické polarizace. Tento způsob výpočtu je však komplikovaný, neboť výpočet úhlů χ a ψ je nutno počítat v limitách, principiálně je však možný a správný. [8]

$$S_1 = S_0 \cos 2\chi \cos 2\psi \quad (58)$$

$$S_2 = S_0 \cos 2\chi \sin 2\psi \quad (59)$$

$$S_3 = S_0 \sin 2\chi \quad (60)$$

Tyto rovnice mají jednoduchý geometrický význam. Jedná se o parametrické vyjádření kulové plochy Σ v kartézské soustavě souřadnic. Kulová plocha Σ se nazývá Poincarého koule, viz obr. Obrázek 11. [11]



Obrázek 11: Poincarého koule s vynesím Stokesových parametrů [11]

4. Vlastní řešení

4.1 Prostředí simulující elektrický a magnetický dipól

4.1.1 Výpočet v prostředí Matlab

Řešení zpracování reálných hodnot uložených v textovém souboru předcházela tvorba programu s grafickým prostředím umožňujícím matematickou modelaci antény složené z elementárního elektrického a magnetického dipólu. Tato část řešení vycházela z dílčího cíle ověřit na takové simulované konstalaci dvou zdrojů správnost matematického zpracování vyzařovací charakteristiky, polarizačních stavů antény, a také připravit vhodné grafické prostředí pro jejich prezentaci.

Následným krokem pak bylo přepracovat program s využitím již připravených funkcí a grafických rozhraní tak, aby namísto modelovaných hodnot vyhověl zpracování skutečných hodnot importovaných z textového souboru. Současně zde byl požadavek na rozšíření některých výpočetních i zobrazujících funkcí. Pro výsledné řešení práce byl tedy použit jako základ níže popsany program pro modelaci vyzařovacích a polarizačních vlastností, který byl výsledkem mého individuálního projektu. Vzhledem k odlišným požadavkům na toto nové prostředí a požadavku na vyšší interaktivitu uživatelského prostředí byl program přepracován jak graficky tak programově.

Program počítá složky elektrické intenzity ve vzdálené zóně vyzařované elementárním elektrickým a magnetickým dipólem a jejich vektorovou superpozici. Magnetický dipól je představován pomyslnou elementární smyčkou pro odlišení od elektrického dipólu, dále jen smyčka. Ortogonální složky těchto dvou prvků vyzařované ve směru určeném úhly θ a

☉ nám umožňují dále studovat polarizační vlastnosti této anténní konstalace v daném směru. Následně program superponuje složky na rovinné vlně ve výsledný vektor elektrické intenzity. Touto metodou vypočteme výslednou velikost elektrické intenzity ve zvoleném směru. Výpočtem superpozice složek elektrické intenzity přes celou kuloplochu získáme vyzařovací charakteristiku této konstalace elektrického a magnetického dipólu.

Pro oba dipóly je vyzařovací charakteristika dána funkcí $\sin(\theta)$, výpočet a převod do euklidovských souřadnic je vypočten v programu následně:

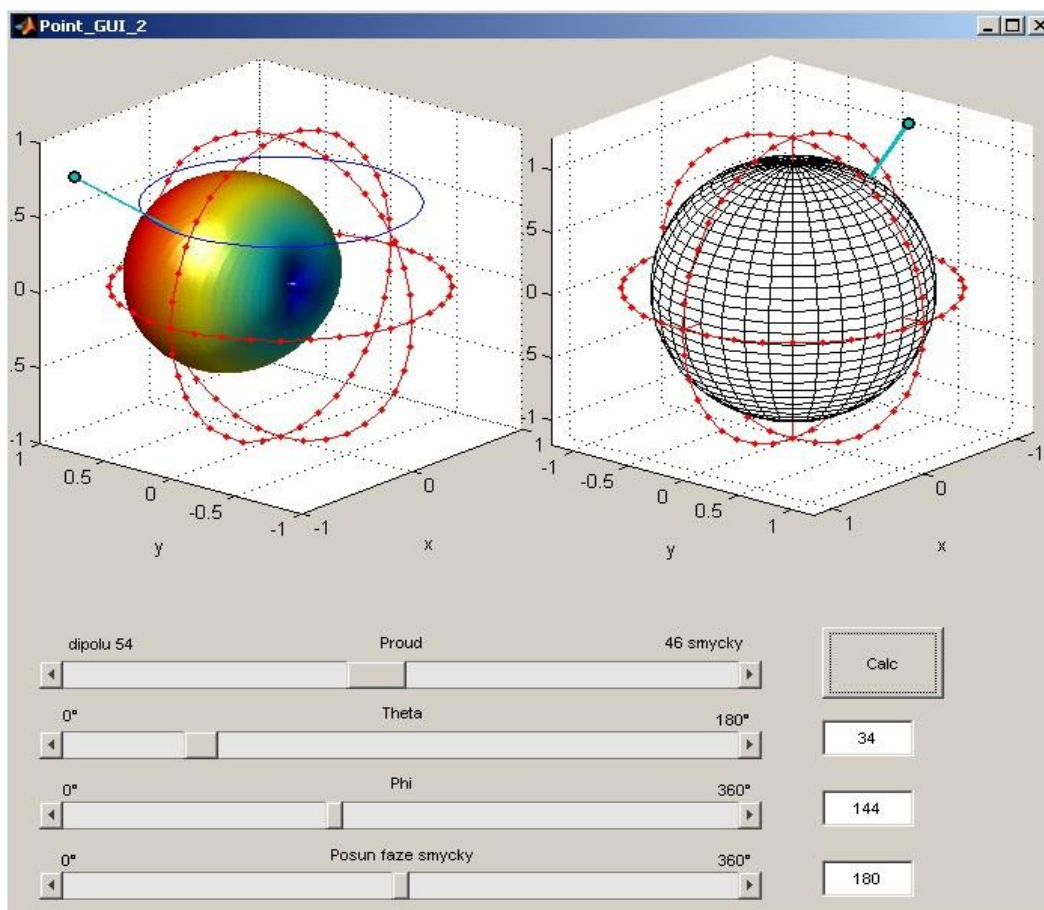
```
%vyzarovaci char. dipolu
radiod = (Id * sin(t));
%Jednotkova kuloplocha
xx = sin(t).*cos(p);
yy = sin(t).*sin(p);
zz = cos(t);
%3D vyzarovaci char. dipolu
xd = radiod.*xx;
yd = radiod.*yy;
zd = radiod.*zz;
```

Simulační a matematické prostředí Matlab následně umožňuje 3D projekci výsledné vyzařovací charakteristiky, což usnadňuje představu o vyzařovacích vlastnostech v závislosti na nastavení vstupních parametrů této základní konstalace vyzařovacích prvků. Vstupními parametry pro výpočty a následné zobrazení výsledků jsou především velikost proudu dipólu a proudu smyčky. Pro studium poměrů elektrické intenzity v konstalaci jsou zajímavé stavy, kdy jsou proudy na dipólu a smyčce odlišné, a bylo tedy zvoleno poměrové nastavení velikosti proudu. Jelikož konkrétní velikost proudu není pro potřeby těchto výpočtů důležitá, je poměrové nastavení proudu mezi dipólem a smyčkou pouze v procentech jednotkového proudu. Jak již bylo uvedeno, zajímá nás velikost a složky elektrické intenzity v určitém prostorovém směru. Dalším nezbytným parametrem je tedy určení tohoto směru na pomyslné kuloploše okolo vyzařovací konstalace. Takový směr v polární soustavě jednoznačně určuje úhel azimutu a elevace. Dalším parametrem, kterým je možno ovlivňovat vyzařovací a polarizační vlastnosti konstalace dipólu a smyčky, je fázový posun napájecích proudů dipólu a smyčky. Tento posun má významný vliv na superpozici složek intenzit elektrického pole, což se projeví výslednou velikostí elektrické

intenzity ve vyzařovací charakteristice, a také má vliv na polarizační stavy konstalace takto buzeného dipólu a smyčky.

4.1.2 Grafické rozhraní programu

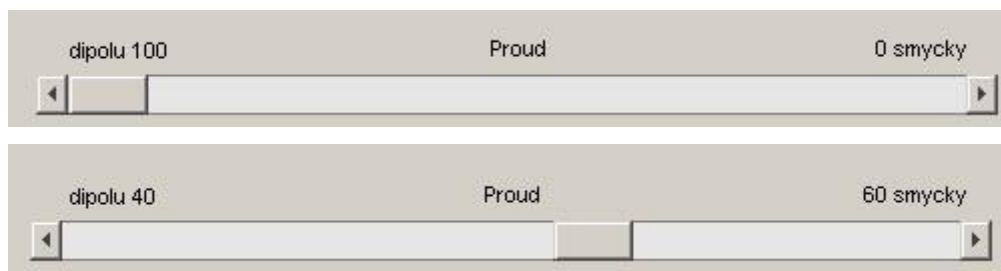
Vypočtené hodnoty je nezbytné uživateli vhodným způsobem zobrazit a současně zvolit vhodný způsob pro snadné zadávání vstupních parametrů. Pro výpočet chování obecných elementárních prvků není potřeba zadávat konkrétní číselné hodnoty. Pro všechny parametry byly tedy zvoleny ovládací prvky v podobě posuvníků s vhodným zobrazením nastavené hodnoty. Čtyři posuvníky tak ovládají poměr proudu mezi dipólem a smyčkou, úhel theta elevace zkoumaného směru, úhel phi azimutu zkoumaného směru a fázový posun proudu smyčky vzhledem k proudu dipólu.



Obrázek 12: Grafické rozhraní programu [14]

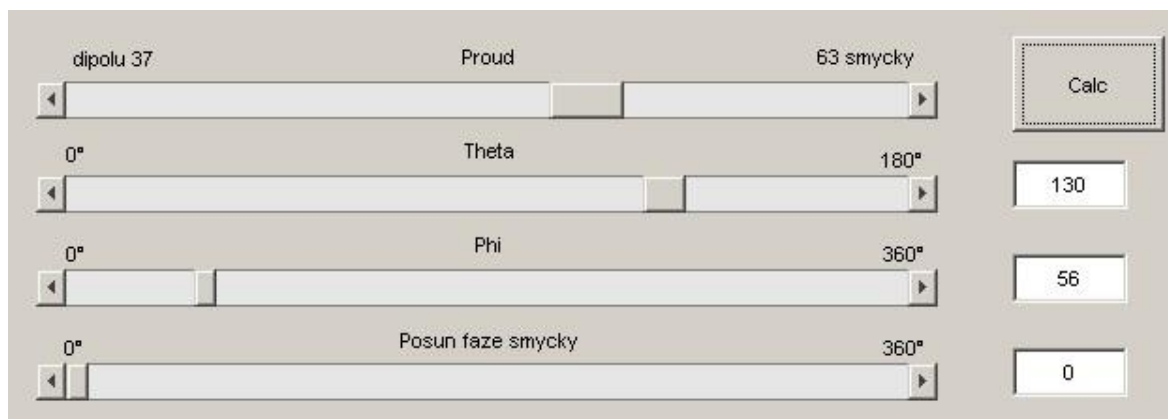
Zadání poměru proudu mezi dipólem a smyčkou je možné provést poměrovým posuvníkem s popisem „Proud“, v jehož levé polovině převažuje proud dipólu a v pravé

pak proud smyčky. Velikost nastaveného proudu je zobrazena v levém a pravém popisku posuvníku u levé, respektive pravé ovládací šipky.



Obrázek 13: posuvník poměru proudu mezi dipolem a smyčkou [14]

Poměr proudů je tak možné pohodlně nastavit jedním tahem v rozmezí 100 až 0% pro dipól a 0 až 100% pro smyčku. Ovládací šipky posuvníku pak na kliknutí myši zvyšují a snižují hodnoty daným směrem o jednotku. Kliknutí myši do prostoru posuvníku mimo jeho ovládací plošku zvyšují a snižují hodnoty daným směrem o desítku. Takto je možné snadno nastavit požadované hodnoty na všech použitých posuvnících. Pro spuštění výpočtu s nově nastavenými hodnotami je na ploše umístěno tlačítko „Calc“, na které je potřeba po takové změně kliknout myši, aby došlo k výpočtu a zobrazení nových výsledků.

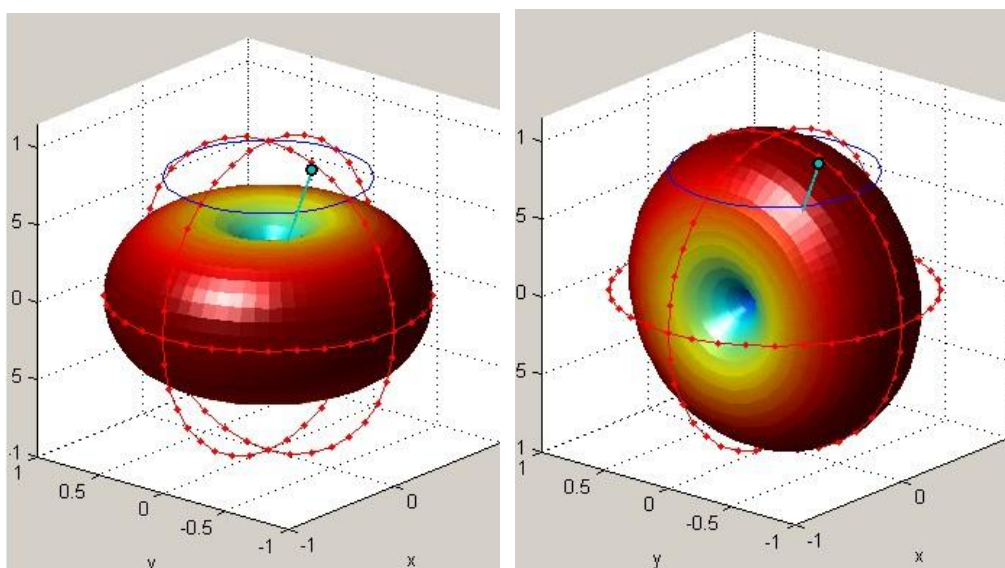


Obrázek 14: Ovládací prvky vstupních hodnot a tlačítko „Calc“ [14]

Zkoumaný prostorový směr daný azimutem Phi a elevací Theta je pak možné nastavit na posuvnících označených „Theta“ v rozsahu 0 až 180° a „Phi“ v rozsahu 0 až 360°.

Hodnoty úhlů nastavené na posuvnících se zobrazují, na rozdíl od ovládání poměru proudu, v samostatných textových boxech po pravé straně od příslušného posuvníku.

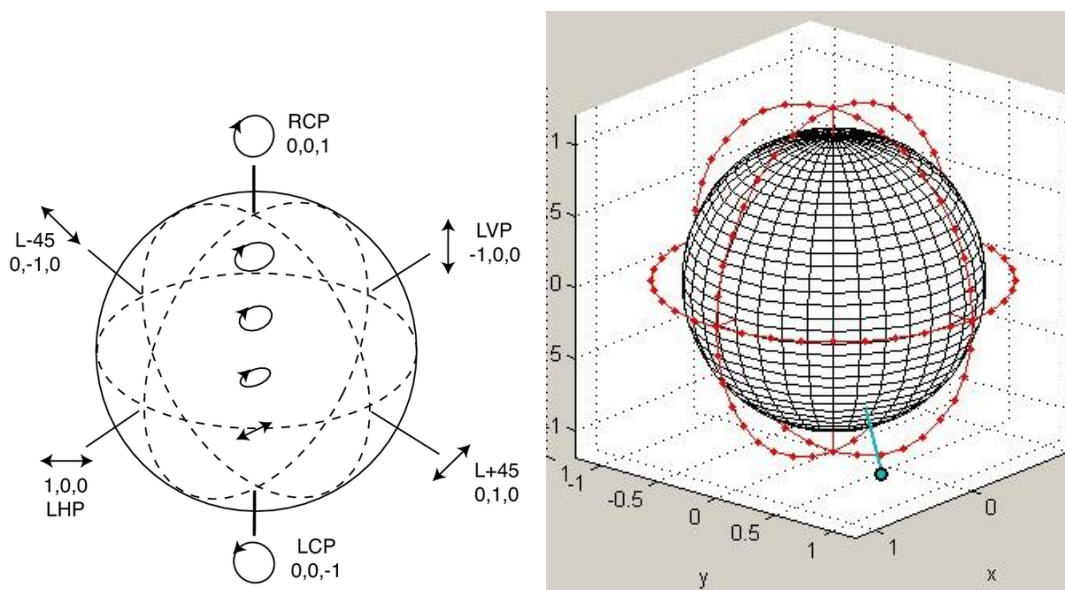
Zvolený směr je v grafickém znázornění zobrazen „špendlíkem“ zapíchnutým v nastaveném směru do vyzářovací charakteristiky.



Obrázek 15: Zobrazení 3D vyzařovací charakteristiky a směru „špendlíkem“ [14]

Posledním vstupním parametrem je pak posun fáze smyčky oproti dipólu v rozsahu 0 až 360°. Tato hodnota je také zobrazena v samostatném boxu po pravé straně tohoto posuvníku. Pro ovládání těchto posuvníků úhlů platí stejné možnosti ovládání zmíněné výše u posuvníku proudu. Vypočtené výsledky jsou zobrazeny na dvou 3D grafických plochách. Na jedné grafické ploše je zobrazována 3D projekce vyzařovací charakteristiky vznikající superpozicí vyzařovacích charakteristik dipólu a smyčky. Pomyslná kuloplocha vyzařovací charakteristiky je v 3D projekci pro lepší orientaci zvýrazněna hlavními kružnicemi v každé rovině 3D prostoru. Na každé z těchto kružnic je body zvýrazněno dělení s úhlovým odstupem 10°. Do vyzařovací charakteristiky je v této projekci „zapíchnut“ graficky znázorněný „špendlík“, znázorňující prostorový směr, ve kterém jsou zkoumány další parametry konstalace dipólu a smyčky. Zkoumaný směr, který je označen polohou „špendlíku“, je dán úhly nastavenými na ovládacích prvcích úhlů. Určující směr znázorněný „špendlíkem“ se zobrazí ve své nově nastavené poloze spolu s výpočtem vyzařovací charakteristiky po stisknutí tlačítka „Calc“.

Na druhé grafické ploše je zobrazována 3D projekce koule, na které je opět „špendlíkem“ označena poloha polarizačního stavu konstalace ve zkoumaném prostorovém směru. Jedná se o Poincareho [15] zobrazení polarizačních stavů antény na povrchu koule, kdy na ose x je umístěna lineární polarizace horizontální, respektive vertikální, na ose y lineární polarizace se sklonem 45° respektive -45°, a na ose z pak polarizace kruhová pravotočivá, respektive levotočivá.



Obrázek 16: Princip Poincareho zobrazení [11] a zobrazení v grafice programu [14]

Na povrchu koule se pak nachází veškeré kombinace polarizací mezi těmito hlavními typy polarizace. Konkrétní polarizační stav pak lze vyjádřit polohou na povrchu této koule. Obě grafické plochy je možno po výpočtu uchopit a rotovat ve všech osách tak, aby bylo možno prohlédnout i stav zobrazený v zákrytu.

4.2 Grafické prostředí pro zpracování naměřených hodnot

4.2.1 Získání dat

Hodnoty pro zpracování a grafické zobrazení v programu mají specifický formát daný výstupem simulátoru „CST“ do souboru. Simulátor věrně napodobí vyzařovací charakteristiku navržené mechanické konstrukce antény pro libovolné frekvence. Tato metoda je snadná a rychlá pro ověření konstrukčního záměru. Stejně tak je možné získat potřebné hodnoty měřením v echuprosté komoře na konkrétní anténě měřícím přístrojem. Na anténě jsou měřeny tečné složky intenzity elektrického pole ve směrech tečných vektorů $\hat{\varphi}$ a $\hat{\theta}$, a to v celém kulovém prostoru antény v jednotlivých, předem určených úhlových krocích. Hodnoty elektrické intenzity jsou měřeny jako Re složka a Im složka, a to jak pro složku phi, tak pro složku theta. Výsledné hodnoty jednotlivých měření jsou zaznamenány jako textový výstup do souboru spolu s dalšími informacemi o parametrech měření, jako například „počet frekvencí“ pro které celé prostorové měření proběhlo, a je

zaznamenáno v oddílech textového výstupu, „úhlový krok“ ve směru phi a theta pro jednotlivá měření.

4.2.2 Formát dat

Textový soubor obsahuje kromě naměřených hodnot měřených veličin také hodnoty parametrů měření samotného. Jednotlivým hodnotám předchází v souboru specifický oddělovač a textová hlavička slovně popisující jaký údaj následuje.

V textovém souboru naměřených dat je tedy potřeba vyhledat především tyto hlavičky:

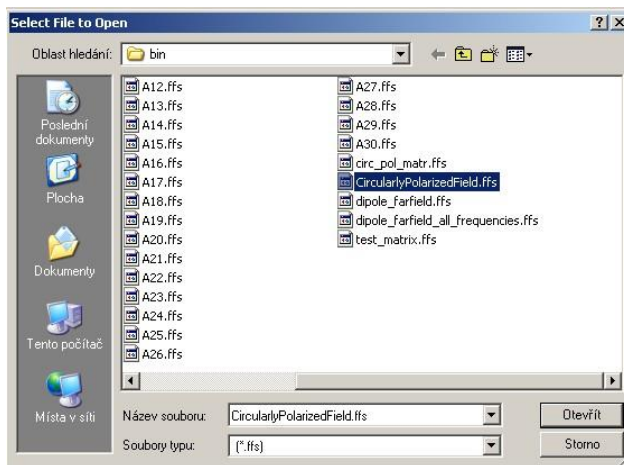
```
„// #Frequencies“  
    počet frekvencí, pro které bylo měření provedeno  
„// Radiated/Accepted/Stimulated Power , Frequency“  
    konkrétní frekvence uvedené jako poslední hodnota tohoto bloku  
„// >> Total #phi samples, total #theta samples“  
    počet úhlových kroků mezi jednotlivými měřeními  
„// >> Phi, Theta, Re(E_Theta), Im(E_Theta), Re(E_Phi), Im(E_Phi):“  
    naměřené hodnoty složek elektrické intenzity
```

Úvodní část takového textového souboru popisující celé měření a jeho výsledky pak může vypadat takto:

```
/ CST Farfield Source File  
  
// Version:  
3.0  
  
// Data Type  
Farfield  
  
// #Frequencies  
1  
  
// Radiated/Accepted/Stimulated Power , Frequency  
4.382590e-001  
4.801797e-001  
5.000000e-001  
1.400000e+009  
  
// >> Total #phi samples, total #theta samples  
73 37  
  
// >> Phi, Theta, Re(E_Theta), Im(E_Theta), Re(E_Phi), Im(E_Phi):  
0.000 0.000 -8.36431205e-001 -6.50140142e+000 -2.60561546e-006 -
```


4.2.3 Vyhledání dat

Po spuštění program nejprve vyzve otevřením dialogového okna k výběru zdrojového souboru dat s příponou „.ffs“.



Obrázek 17: dialog pro výběr souboru [14]

Vybraný soubor je načten, a v pořadí v jakém jsou jednotlivé hodnoty v souboru uloženy, jsou vyhledány jejich hlavičky a do odpovídajících proměnných hodnoty načteny. Vyhledání hlavičky pro počet frekvencí a načtení hodnoty provede vyhledávací smyčka programu.

```
%***** otevreni souboru a hledani signatur *****
fid1 = fopen(fullNameWithPath);
tline = fgetl(fid1);
%***** hledani poctu frekvenci *****
while ischar(tline)
    k = strfind(tline, '#Frequencies');
    if ~isempty(k)
        break;
    end
    tline = fgetl(fid1);
end
tline = fgetl(fid1);
numberFreq = str2double(tline);
```

Obdobně program vyhledá i další hlavičky a načte jejich hodnoty.

Načtení samotných dat naměřených hodnot složek elektrické intenzity je provedeno podobným vyhledáním bloku měřených hodnot s tím rozdílem, že celý blok je následně uložen jako matice do souboru. Tato činnost se opakuje pro všechny měřené bloky, tedy

tolikrát, pro kolik frekvencí bylo měření na anténě opakováno. Tato procedura tedy vytvoří pro každou frekvenci samostatný soubor, ve kterém jsou měřená data uložena ve stejné struktuře jako tomu bylo ve zdrojovém souboru, avšak již bez hlavičky. Hodnoty jsou tedy v této struktuře uloženy pouze jako čísla, například:

```
0.000 0.000 -8.36431205e-001 -6.50140142e+000 -2.60561546e-006 -8.82590484e-007
0.000 5.000 -8.31257761e-001 -6.46638298e+000 -2.61935202e-006 -8.26424639e-007
0.000 10.000 -8.16509604e-001 -6.36076880e+000 -2.62592630e-006 -7.09812639e-007
0.000 15.000 -7.92700529e-001 -6.18789148e+000 -2.60279649e-006 -5.11399890e-007
```

Příčemž jednotlivé hodnoty oddělené mezerami mají následující význam:

Phi, Theta, Re(E_Theta), Im(E_Theta), Re(E_Phi), Im(E_Phi)

Samotná procedura oddělení jednotlivých bloků a uložení do samostatných souborů je realizována takto:

```
for i = 1:numberFreq
    fname = strcat('A',num2str(i),'.ffs');
    fid2 = fopen(fname,'w');

    while ischar(tline)
        k = strfind(tline,'Im(E_Phi):');
        if ~isempty(k)
            break;
        end
        tline = fgetl(fid1);
    end
    %tline = fgetl(fid1);

    while ischar(tline)
        %k = strfind(tline,'');
        if isempty(tline)
            break;
        end
        fprintf(fid2,'%s\n',tline);
        tline = fgetl(fid1);
    end
    fclose(fid2);

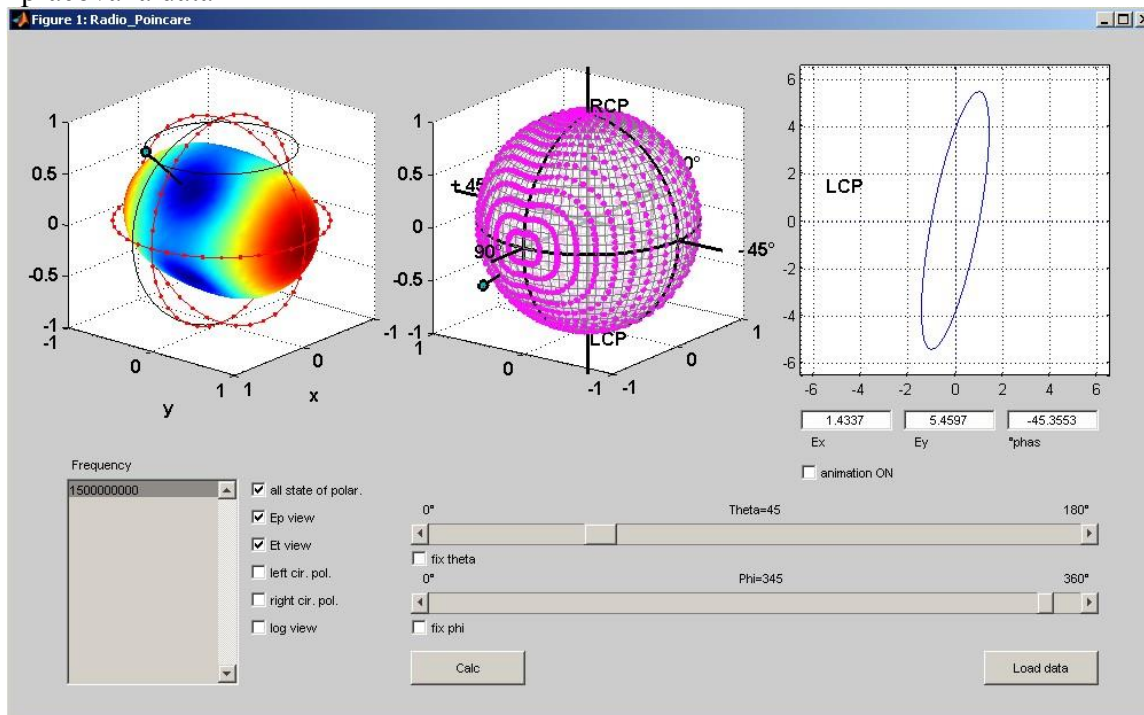
end
```

4.2.4 Zpracování dat

Jedním z cílů práce bylo na základě naměřených hodnot vykreslit prostorový vyzářovací diagram měřené antény s možností výběru z frekvencí, pro které byla v daném souboru měření zaznamenána. Pro zpracování naměřených hodnot byl použit matematický simulační nástroj Matlab. Vytvořený program vyčte z informací uložených v textovém souboru z kolika se sestává frekvencí, což říká pro kolik frekvencí proběhlo měření antény a tedy kolik takových bloků naměřených hodnot se v souboru nachází. Následně program načte hodnoty frekvencí, pro které se v souboru nachází bloky hodnot a počet úhlových dílů měření v osách phi a theta. V souboru nalezne oddělovače jednotlivých bloků měření a z jednotlivých bloků vytvoří samostatné textové soubory. Ty pak individuálně zpracovává podle toho, která frekvence je v grafickém rozhraní programu vybrána k zobrazení. Naměřené hodnoty jsou z dílčích souborů načteny do matice jednotlivých reálných a imaginárních složek elektrické intenzity ve směrech phi a theta. Z matic jsou pak vypočteny výsledné hodnoty vyzářovací charakteristiky ve všech měřených směrech antény. Následně jsou vypočtené hodnoty zobrazeny v grafickém rozhraní pomocí 3D grafu s barevným gradientem odpovídajícím velikosti elektrické intenzity.

4.2.5 Návrh grafického rozhraní

Na obrázku je zobrazena ovládací plocha programového rozhraní již zobrazující nahraná a zpracovaná data

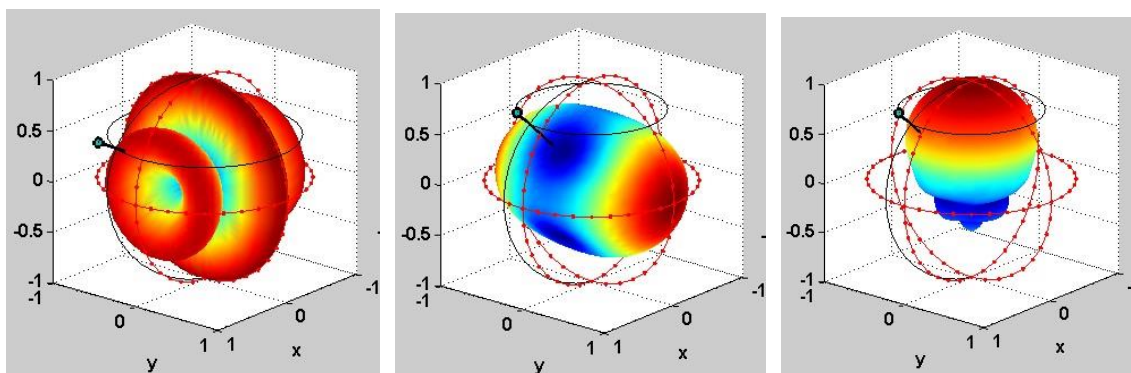


Obrázek 18: pohled na grafické rozhraní [14]

4.2.6 Grafické prvky vykreslovací plochy

Vykreslovací plocha vyzařovací charakteristiky

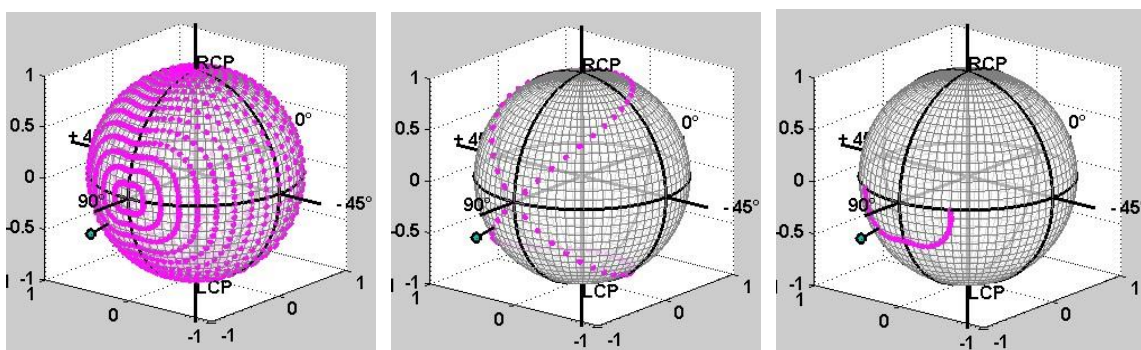
Do grafického rozhraní byly umístěny prvky ovládající pro výpočet a zobrazení potřebné vstupní proměnné a nastavení. Pro zobrazení vyzařovacího diagramu byla zvolena trojrozměrná vykreslovací plocha, umožňující zobrazení prostorového vyzařovacího diagramu s barevným zvýrazněním velikosti hodnot intenzity elektrického pole ve všech směrech. Plocha zobrazující vyzařovací charakteristiku je umístěna v levém horním prostoru grafického rozhraní a je možno s ní otáčet pro možnost snadného shlédnutí tvaru zobrazeného tělesa z odvrácených stran.



Obrázek 19: vykreslovací plocha vyzařovací charakteristiky [14]

Vykreslovací plocha polarizačních stavů – Poincareho koule

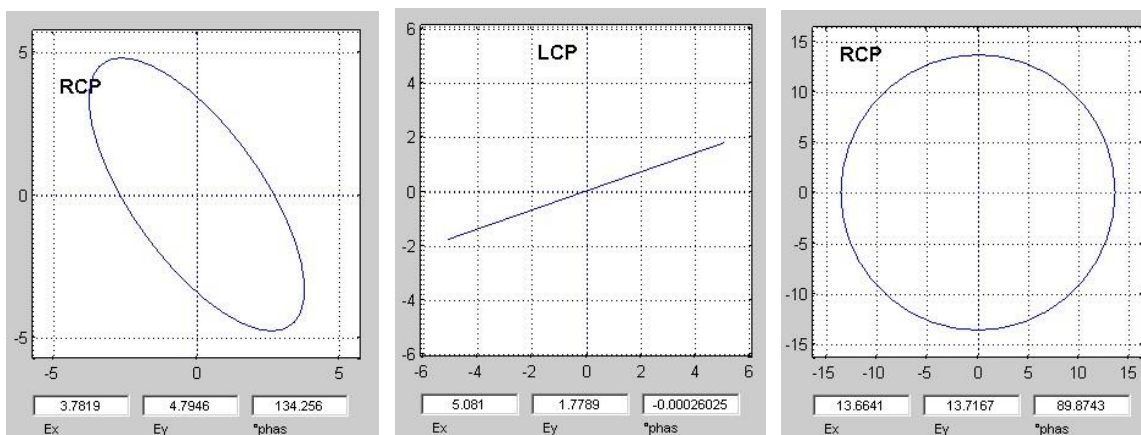
Pro vykreslení polarizačních stavů antény byla zvolena také trojrozměrná vykreslovací plocha, jelikož záměrem bylo použít zobrazení na Poincareho kouli. [15] Patřičné stavy jsou vyznačeny na předkreslené kouli zvýrazněním bodu v odpovídající poloze Poincareho zobrazení. Plocha pro Poincareho zobrazení je umístěna v horní středové části grafické plochy a je možno s ní otáčet pro možnost snadného shlédnutí bodů vyjadřujících polarizační stav, jejichž poloha na Poincareho kouli odpovídá některé z poloh na právě odvrácené straně koule. Vykreslovací plocha Poincareho zobrazení si zachovává takto změněnou polohu otočení i při přepočtu vyvolaném změnami nastavených hodnot.



Obrázek 20: vykreslovací plocha polarizačních stavů [14]

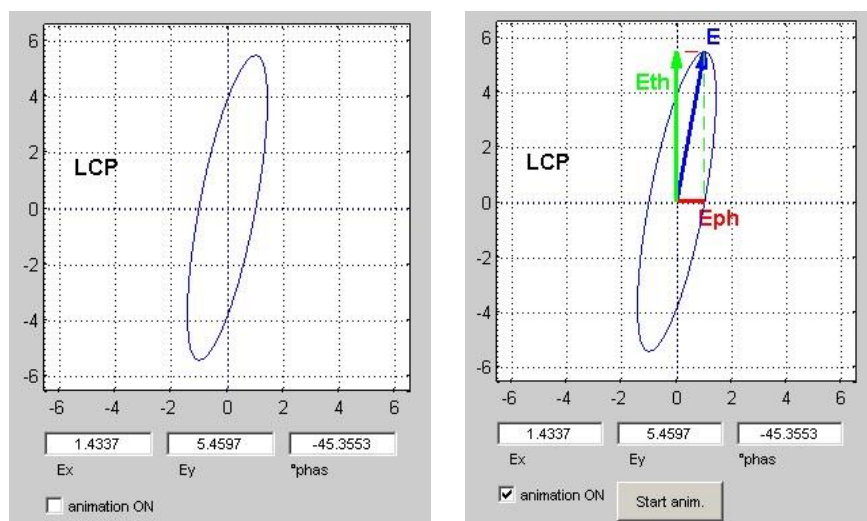
Vykreslovací plocha polarizační elipsy

Třetí vykreslovací plochou, tentokrátle dvojrozměrnou, je plocha pro grafické znázornění polarizačního stavu. Jedná se o vykreslení liniové, eliptické až kruhové polarizace s odpovídajícím úhlem sklonu, tak jak by ji bylo možno pozorovat v rovině tečné k bodu ve zvoleném vyzařovacím směru ve vzdálené zóně.



Obrázek 21: vykreslovací plocha polarizační elipsy [14]

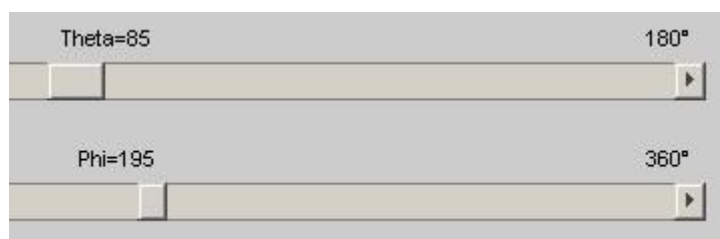
Vykreslovací plocha zaznamenává rotaci a velikost vektorů jednotlivých složek intenzity elektrického pole a je možné ji jako záznam znovu vykreslit.



Obrázek 22: vykreslovací plocha animace [14]

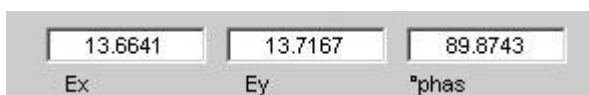
4.2.7 Textové prvky

V grafickém rozhraní je potřeba zobrazit nastavené, nebo vypočtené hodnoty v textovém formátu. Pro tyto účely byly použity tři možnosti zobrazení textu. Hodnoty, měnící se v souvislosti s nastavením ovládacích prvků, byly použitím grafického objektu „text“ zakomponovány do popisek příslušného ovládacího prvku. Tyto popisky zapadají do pozadí grafického rozhraní, nepůsobí rušivě a zlepšují orientaci v interaktivním nastavení ovládacích prvků.



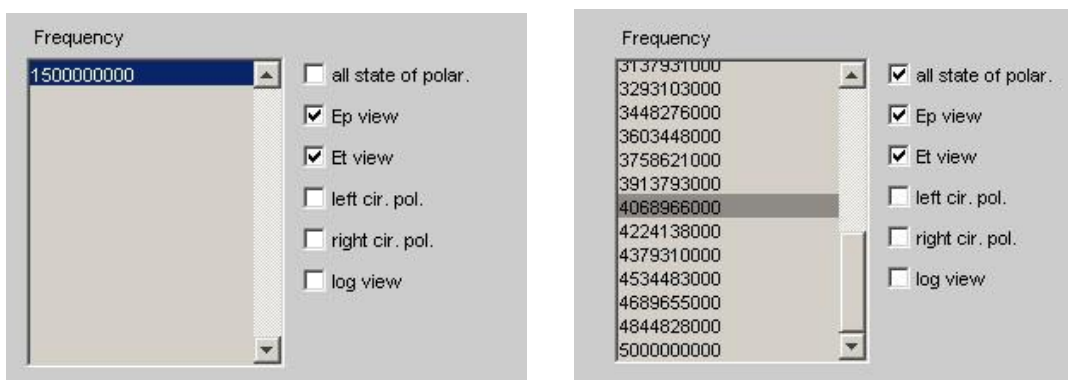
Obrázek 23: textové popisky ovládacích prvků [14]

Popisky a informační texty byly také zakomponovány do grafického rozhraní pomocí objektů „text“, avšak tyto jsou neměnné a bez interakce s ovládacími prvky. Vypočtené hodnoty jsou zobrazeny v grafických objektech „edit text“ s vypnutou vlastností editace, a zůstávají tak pouze v zobrazovací roli výstupních hodnot.



Obrázek 24: textová okénka pro výstup hodnot [14]

Poslední z použitých textových objektů je grafický objekt „list box“, který je současně ovládacím prvkem, kterým lze vybrat některou ze zobrazených hodnot frekvencí.



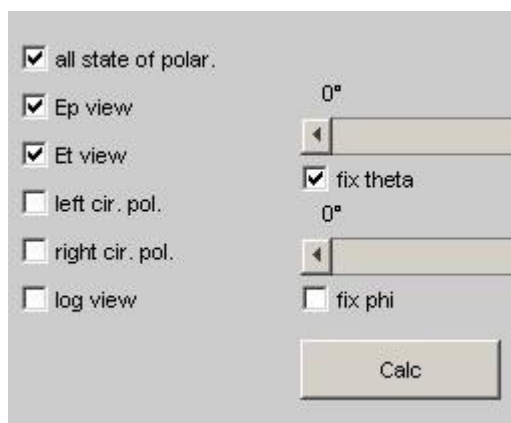
Obrázek 25: textový prvek pro výběr hodnot [14]

4.2.8 Ovládací prvky

V grafickém návrhu bylo použito několik typů ovládacích prvků vyhovujících svými vlastnostmi potřebným vstupům. Jejich rozmístění na ovládací ploše bylo zvoleno tak, aby bylo ovládání snadné, intuitivní a rozmístění navazovalo na vztahy mezi jednotlivými prvky.

Checkbox

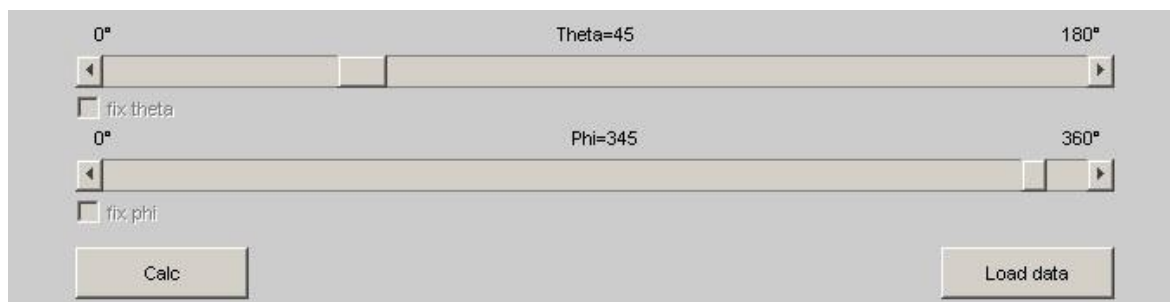
Ovládání výběru mezi dvěma stavy některého z nastavení je zvoleno prostřednictvím ovládacích prvků „check box“, které je možno „označit“ pro pozitivní výběr, nebo naopak „odznačit“ pro zápornou volbu, a je možné je také deaktivovat pro znemožnění změny jeho stavu v určité situaci. Pro některé dvojice či trojice těchto ovládacích prvků byly naprogramovány závislosti, které ovlivňují jejich stavy navzájem dle předurčeného logického schématu. Tyto ovládací prvky byly seřazeny pod sebe po pravé straně textového pole s výčtem frekvencí, a jejich význam je popsán u každého z nich po pravé straně ve stručném popisku. Dva tyto prvky souvisejí přímo s nastavováním úhlů a byly z toho důvodu umístěny vlevo pod každý z posuvníků.



Obrázek 26: umístění checkboxů [14]

slidery

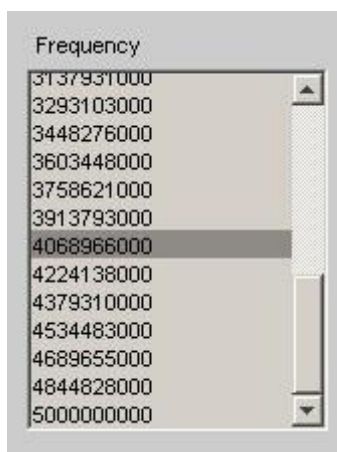
Pro určení na anténě vyšetřovaného směru je potřeba určit úhly Theta a Phi, které definují v kulovém prostoru okolo antény konkrétní směr. Pro nastavení těchto úhlů byly použity vodorovné posuvníky, každý z úhlů je tak možné nastavit nezávisle v celém jeho rozsahu. Posuvníky byly umístěny v dolní polovině grafického rozhraní a na jejich koncích popsány minimální a maximální možnou hodnotou.



Obrázek 27: posuvníky pro nastavení úhlů [14]

listbox

Zdrojový soubor dat, ať už naměřený nebo generovaný simulátorem, může obsahovat hodnoty antény pro více než jednu frekvenci. Hodnoty frekvencí jsou ze souboru načteny a vypsané do jednotlivých řádků textového pole grafického prvku „listbox“. Toto textové pole bylo umístěno v levé spodní části grafického rozhraní s popisem „Frequency“. Z listboxu je možno označením vybrat požadovanou frekvenci, pro kterou následně program zpracuje hodnoty antény a zobrazí grafické výstupy.



Obrázek 28: textové pole pro výběr frekvence [14]

tlačítka

Ovládání programu vyžadovalo také možnost spuštění určitých obslužných procedur. Takové, na vyžádání spuštěné procedury, je vhodné přiřadit ke stisknutí příslušného tlačítka. Tlačítka byla do prostoru grafického rozhraní umístěna tři. Jedno pojmenované „Calc“ pro spuštění výpočtu bylo umístěno ve spodní části rozhraní. Druhé tlačítko bylo přiřazeno vyvolání dialogu pro výběr souboru s daty, který je po potvrzení v dialogu nahrán, zpracován, a výsledky pak zobrazeny v grafickém rozhraní. Tlačítko pro vyvolání tohoto dialogu a nahrání souboru bylo umístěno v pravé spodní části rozhraní a bylo popiskou pojmenováno „Load data“. Třetí tlačítko bylo určeno pro spuštění animace polarizační elipsy. Je umístěno pod vykreslovací plochou polarizační elipsy a je zobrazeno pouze pokud je animace vyžádána zaškrtnutím checkboxu „animation ON“.

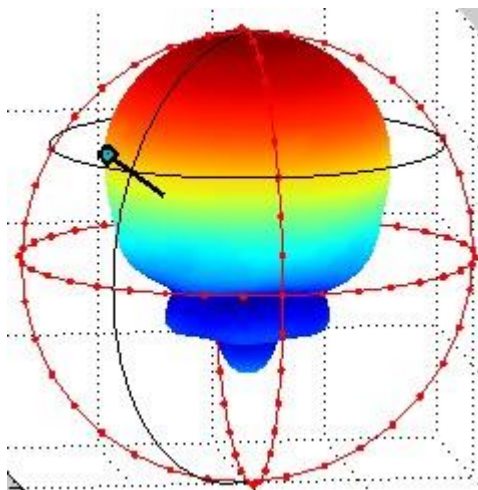


Obrázek 29: ovládací tlačítka [14]

4.2.9 Grafický výstup vyzařovací charakteristiky

Pro zobrazení vyzařovacího diagramu byla zvolena trojrozměrná vykreslovací plocha umožňující zobrazení prostorového vyzařovacího diagramu s barevným zvýrazněním velikosti hodnot intenzity elektrického pole ve všech směrech. Pro snadnou orientaci v prostorovém zobrazení vyzařovacího diagramu byly do vykreslovací plochy umístěny orientační jednotkové kružnice. Kružnice byly umístěny do všech třech os a byly po svých obvodech rozděleny po 10° zvýrazněnými značkami. Orientační kružnice v rovině x,y a její rozdělující značky tedy zastupuje úhel phi vyzařovací charakteristiky. V rovinách x,z a

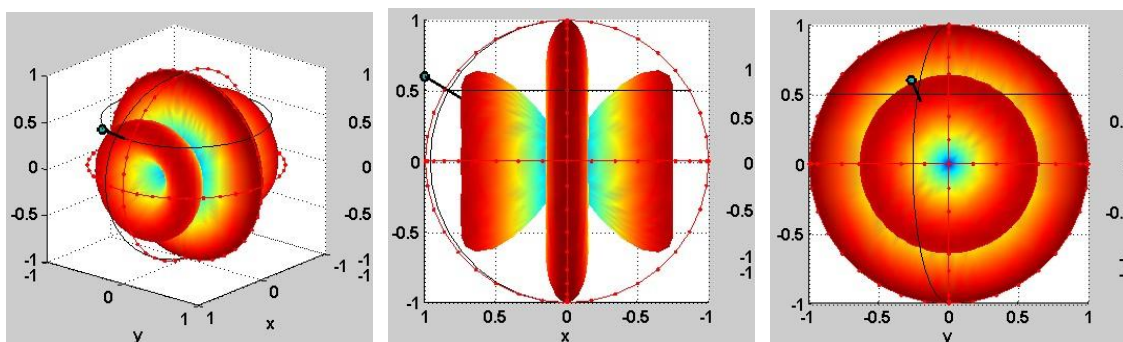
y,z pak orientační kružnice a jejich rozdělovací značky zastupují u obou kružnic úhel theta. Rozvržení orientace trojrozměrné vykreslovací plochy je shodné s orientací použitou anténním simulátorem „CST“ a také používanou orientací při měření antén v echoprosté komoře katedry radiotechniky na ČVUT. Orientace směru $\theta=0^\circ$ je tedy položena do osy z. Jako další orientační prvek je do vykreslovací plochy vyzařovací charakteristiky vykreslen orientační „špendlík“ zobrazující vybraný prostorový úhel, pro který je zpracován výpočet polarizačního stavu antény. Pozice tohoto ukazovátka v podobě špendlíku je dána úhly theta a phi předem nastavenými na posuvnicích sloužících právě k výběru zkoumaného vyzařovacího směru. Jelikož trojrozměrná vyzařovací charakteristika není prakticky nikdy kulová, průsečík špendlíku s plochou vyzařovací charakteristiky se tak nalézá uvnitř pomyslné koule vyjadřující vzdálenou zónu. To ztěžuje orientaci ve vybraném úhlu, i když je takto špendlíkem přesně definován. Pro lepší zobrazení vyšetřovaného úhlu ve vzdálené zóně byly do pozice průchodu špendlíku jednotkovou koulí vloženy dvě pomocná sférická pravítka. Jedno kruhové rovnoběžkové v rovině x,y, a druhé půlkruhové poledníkové v rovině procházející osou z. Špendlík pak prochází průsečíkem těchto pomocných sférických pravítek usnadňujících tak orientaci v zobrazení vyšetřovaného směru.



Obrázek 30: zobrazení sférických pravítek [14]

Hlavním prvkem zobrazovaným v této vykreslovací ploše je však vyzařovací charakteristika samotná. Je zobrazena jako trojrozměrné těleso uvnitř pomyslné jednotkové kulové plochy. Barevně odstupňované stínování povrchu trojrozměrného vyzařovacího diagramu znázorňuje velikost intenzity elektrického pole v daném směru. Barevná škála od

modrých minim po červená maxima odpovídá tvaru tělesa, respektive vzdálenosti bodu na jeho povrchu od středu souřadného systému, ve kterém je těleso vykresleno, a vzdálenost každého bodu odpovídá $E = \sqrt{E_{\theta}^2 + E_{\phi}^2}$. Barevné škále není pro účely zobrazení potřeba přiřazovat škálu hodnot vzhledem k tomu, že pro vyšetření polarizačního stavu nejsou absolutní hodnoty intenzity elektrického pole a jejich složek důležité. Trojrozměrná vyzařovací charakteristika je při jejím výpočtu normalizována na jednotkovou velikost. Vykreslovací plochu je možno kdykoli uchopit a otočit okolo všech os tak, aby bylo možné prohlédnout vykreslenou prostorovou vyzařovací charakteristiku ze všech úhlů. Pro zlepšení práce s plochou, především nastavení úhlu, případně změnu tvaru vyzařovací charakteristiky po jejím přepočtu, je uživatelem zvolený pozorovací úhel plochy zafixován až do jeho následné změny nebo stisku tlačítka „Calc“. Stisknutím tlačítka „Calc“ spustíme výpočet a plocha je zobrazena v jejím výchozím pozorovacím úhlu.

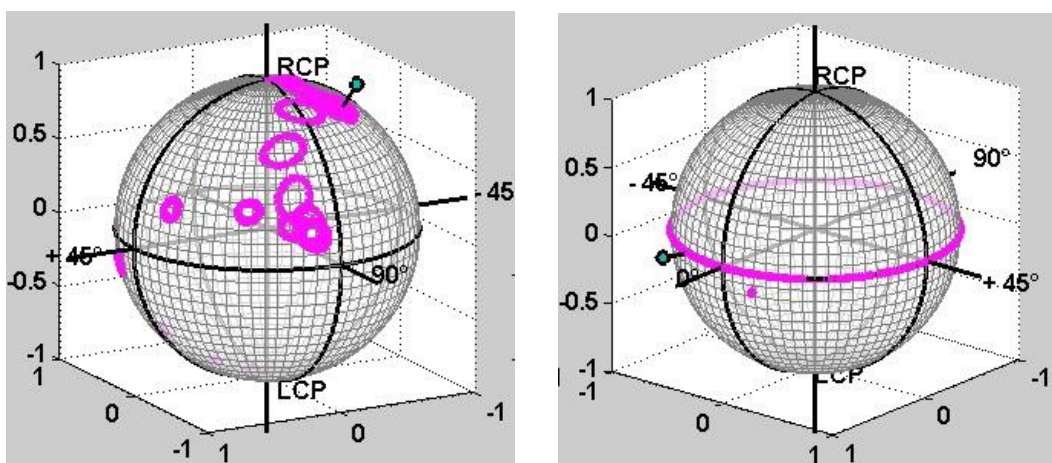


Obrázek 31: ukotvení pozorovacího úhlu zobrazovací plochy [14]

4.2.10 Grafický výstup polarizačních stavů.

Cílem práce je zkoumat polarizační stavy antény ve všech prostorových směrech a jejich přehledné zobrazení. K tomu účelu je vhodné zobrazení polarizačních stavů na Poincareho kouli, kde polarizační stav je vyjádřen polohou na povrchu této koule. [15] Pro vykreslení koule byla zvolena také trojrozměrná vykreslovací plocha. Pro výpočet a následné vyznačení patřičného polarizačního stavu byly použity Stokeho parametry udávající polohu na povrchu koule. Pro lepší orientaci na Poincareho kouli a snadné nalezení zobrazeného bodu byl do zobrazení v této vykreslovací ploše vložen orientační „špendlík“, podobně jako ve vykreslovací ploše vyzařovacího diagramu. Špendlík ukazuje na aktuální polarizační stav, tedy ten, který je aktuálně určen vybranými úhly směru vyzařovací charakteristiky, a to i v případě, že je zobrazeno více polarizačních stavů současně.

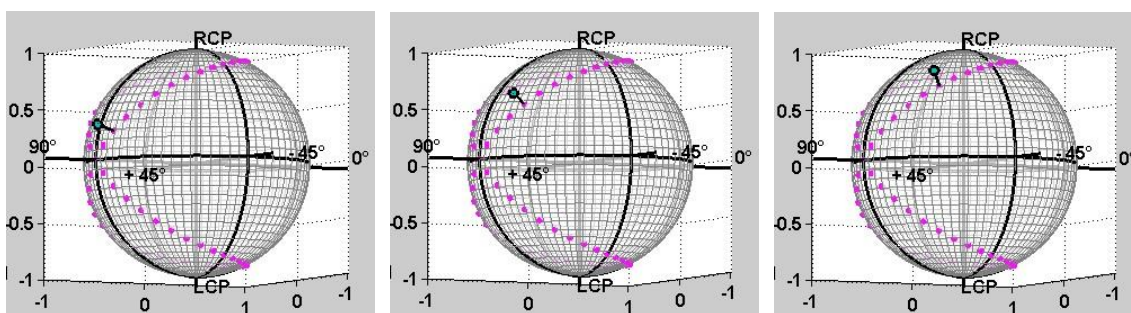
Ucelenou představu o polarizačních vlastnostech antény je možné si udělat při zobrazení všech polarizačních stavů antény napříč všemi prostorovými směry vyzařovacího diagramu. Takový přehled je možný označením políčka „all state of polar.“. V takovém případě budou předpočítány polarizační stavy ve všech měřených směrech a zobrazeny na Poincareho kouli současně. Díky této možnosti zobrazení si uživatel může udělat představu o polarizačním chování antény. Současně je pomocí špendlíku označena poloha polarizačního stavu příslušejícího aktuálně zvoleným úhlům posuvníky. Změnou úhlu na některém posuvníku se automaticky aktualizuje označení příslušného polarizačního stavu špendlíkem, a je tak možno sledovat změnu polarizačního stavu antény v závislosti na vyzařovacím směru. Toto zobrazení může být ale nepřehledné, například v případech, kdy anténa vykazuje převážně stejný typ polarizačních stavů, a jejich zobrazení vytváří místní nebo liniové shluky na povrchu Poincareho koule. Také může být nepřehledné v případech, kdy jsou polarizační stavy rozprostřeny pravidelně či nepravidelně po celém povrchu Poincareho koule. [15]



Obrázek 32: vykreslení všech polarizačních stavů [14]

Dále pak se v tomto zobrazení prakticky multiplikuji polarizační stavy měřené při úhlu $\theta = 0^\circ$ nebo $\theta = 180^\circ$ a jednotlivých krocích úhlu ϕ . Jako příklad mějme anténu, například dipól, vyzařující v ose $\theta = 0^\circ$ při nastavení úhlu $\phi = 0^\circ$ horizontální lineární polarizaci. Pak jistě při úhlu $\theta = 0^\circ$ a postupných krokových změnách úhlu ϕ bude výsledná polarizace opět lineární, avšak s úhlem sklonu odpovídajícím úhlu ϕ natočení antény. Těmto lineárním polarizačním stavům odpovídá v zobrazení na Poincareho kouli její hlavní kružnice v rovině x,y a na tomto pomyslném rovníku se nám tak zobrazí tento

jeden polarizační stav násobně s počtem měření ve směru úhlu $\theta = 0^\circ$ a stejně tak při úhlu $\theta = 180^\circ$. Z pohledu měření a zobrazení polarizačních stavů antény v daném směru vyzařování a natočení antény je toto zobrazení polarizačních stavů samozřejmě naprosto správné. Avšak při jejich současném zobrazení spolu s polarizačními stavy pro zbylé směry vyzařovací charakteristiky, které se navíc mohou při souměrnosti antény také duplikovat, může být zobrazení nepřehledné. Pro lepší přehlednost o změně polarizačního stavu v závislosti na změně zkoumaného směru je vhodné provést v jednom z prostorových úhlů θ nebo ϕ pomyslný řez vyzařovací charakteristikou a zobrazit polarizační stavy pouze v tomto řezu. Taková možnost byla do programu zařazena prostřednictvím zaškrtnutých políček u jednotlivých úhlových posuvníků. Označení tohoto políčka zafixuje zobrazení polarizačních stavů pro tento vybraný úhel a předpočítány a zobrazeny jsou pak pouze polarizační stavy odpovídající změně úhlu doplňujícího.



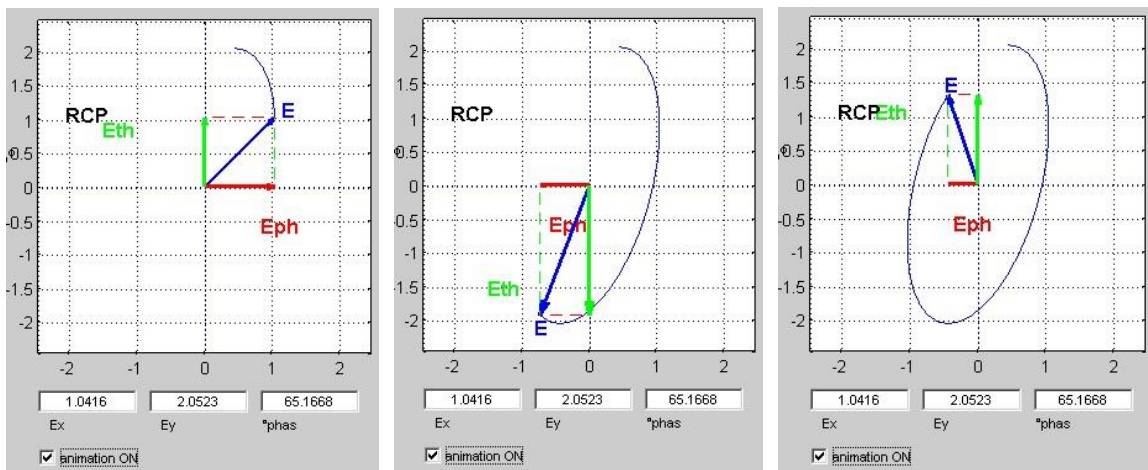
Obrázek 33: vykreslení polarizačních stavů v řezu ϕ [14]

Takové zpracování a názorné zobrazení polarizačních stavů na povrchu Poincareho koule podá uživateli ucelenou představu o polarizačním chování antény, například při jejím vyosení ze směru radiového spoje.

4.2.11 Grafický výstup polarizační elipsy.

Polarizační stav antény zkoumaný ve zvoleném směru je znázorněn na přehledovém zobrazení Poincareho koule velice názorně. [15] Pro představu o poměrech vektorových složek intenzity elektrického pole vytvářejících eliptickou polarizaci byla vložena dvojrozměrná vykreslovací plocha, do které je zobrazen průběh výsledného vektoru elektrického pole vzniklého součtem průmětů vektoru elektrické intenzity v ose úhlu θ a vektoru elektrické intenzity v ose úhlu ϕ do tečné roviny pomyslné koule vzdálené zóny v bodě určeného úhly θ a ϕ na této kouli. Podle poměru vektorů E_θ a E_ϕ a

jejich fázového posunu je v této vykreslovací ploše zobrazena názorně polarizace lineární, eliptická či kruhová, s určením, zda se jedná o levotočivou či pravotočivou polarizaci. Vykreslení polarizační elipsy je pro názornost a výukové potřeby možno přepnout také do režimu vykreslení i s jednotlivými vektorovými složkami a jako animaci pak následně zopakovat. Pod vykreslovací plochou polarizační elipsy byla umístěny tři doprovodná textová pole s hodnotami velikosti vektorových složek a úhlu fázového posunu mezi nimi ve stupních. Hodnoty velikosti vektorových složek byly uvedeny jen jako poměrové bez uvedení jednotek, neboť právě jejich vzájemný poměr a fázový posun je dostatečný k zobrazení výsledné polarizační elipsy. Pro výukové účely byla k vykreslovací ploše polarizační elipsy přidána možnost vykreslit ji v podobě animace součtu složek vektorů.

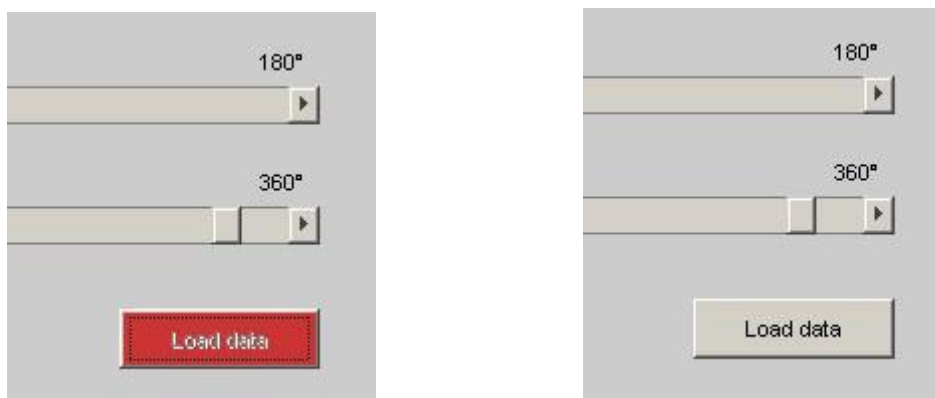


Obrázek 34: zobrazení polarizační elipsy v režimu animace [14]

V naměřených datech jsou hodnoty imaginárních a reálných složek vektorů intenzity elektrického pole pro složky theta a phi. Jejich vzájemný poměr udává jejich absolutní fázový posun. Rozdílem těchto úhlů dostaneme fázový posun mezi složkami theta a phi, tento posun definuje spolu s reálnými částmi složek tvar polarizační elipsy a její rotaci. Volba animace vykreslí průměty složek elektrické intenzity a jejího výsledného vektoru do tečné roviny ve zkoumaném bodě kuloplochy vzdálené zóny, jejich pohyb v této rovině a výslednou polarizační elipsu. Tato animace je zaznamenána v podobě série jednotlivých obrázků a je možné ji opakovaně přehrát bez nutnosti opětovného výpočtu. V rozhraní se pro tuto volbu objeví po první animaci tlačítko, po jehož stisknutí se poslední zobrazená animace přehraje dvakrát opakovaně.

4.2.12 Ovládání programového prostředí

Po spuštění programu v prostředí Matlab se zobrazí grafické uživatelské prostředí s rozložením grafických ovládacích prvků dle obrázku č. 3. Všechny grafické výstupy programu vycházejí z výpočtů nad připravenými daty, které je potřeba do prostředí nahrát. To provedeme prostřednictvím tlačítka „Load data“ umístěném v pravém dolním rohu grafického rozhraní. Tlačítko při stisku otevře dialogové okno pro nahrání souboru ve kterém je potřeba vybrat požadovaný soubor s příponou „ffs“ a potvrdíme tlačítkem „Otevřít“. Soubor je načten do paměti a jsou z něj extrahovány informace o uložených měřených hodnotách, počet frekvencí měření, počet dílčích úhlů měření, konkrétní frekvence a samotné hodnoty měření. Tlačítko je během zpracování dat zablokováno proti opětovnému stisknutí a je vybarveno červeně. Jakmile se tlačítko obarví opět šedou barvou a je odblokováno, jsou data zpracována a následně zobrazena v grafických zobrazovacích plochách.



Obrázek 35: ovládací tlačítko pro nahrání souboru [14]

Pokud jsou obsahem souboru měření pro více frekvencí, jsou tato zobrazena v řádcích textového pole listboxu, a jako aktuálně vybraná frekvence je vybraná první v seznamu. Pokud byla nahrána data pro více než jednu měřenou frekvenci, má uživatel možnost v tomto listboxu kdykoli vybrat některou z nich. Dále již je možno vybrat některou z možností zobrazení a vyšetřovaný směr vyzařování nastavením úhlů pomocí posuvníků. Ve vykreslovací ploše vyzařovací charakteristiky je interaktivně směr zvýrazněn špendlíkem, jehož prostorové úhly theta a phi odpovídají právě nastaveným. Po spuštění jsou úhly přednastaveny na $\theta=0^\circ$ a $\phi=0^\circ$ a pro pozorování v jiném směru je potřeba požadovaný úhel změnit. Další možnosti zobrazení polarizačních stavů a vyzařovací charakteristiky je možné vybrat zaškrtnávacími políčky. V zobrazení vyzařovací

charakteristiky je tak možné zvolit zobrazení pouze theta nebo phi složek, levotočivou nebo pravotočivou polarizaci a logaritmické zobrazení. K zobrazení polarizačních stavů na vykreslovací ploše Poincareho koule se pak vztahují zaškrťovací políčka, dovolující zobrazit na Poincareho kouli všechny polarizační stavy, políčka „fix theta“ a „fix phi“, filtrující zobrazení pouze polarizačních stavů vztahujících se k aktuálně vybranému úhlu. Vykreslení polarizační elipsy je možné přepínat mezi dvěma režimy zaškrťovacím políčkem „animation ON“. V prvním případě, kdy není políčko zaškrtnuto, je v zobrazovací ploše polarizace zobrazen jen tvar elipsy odpovídající velikosti složek E_x a E_y a jejich vzájemnému fázovému posunu. V případě zaškrtnutí políčka je vykreslována elipsa animována vektorem E a jeho složkami E_x a E_y . Po vykreslení animace je zobrazeno pod vykreslovací plochou tlačítko „Start anim.“, které vykreslenou a zaznamenanou animaci přehraje ve vykreslovací ploše dvakrát znovu.



Obrázek 36: tlačítko spuštění animace [14]

Detailnější popis jednotlivých vykreslovacích ploch a jejich ovládacích prvků je uveden v popisu jejich grafického návrhu.

5. Závěr

Hlavním cílem práce bylo vytvoření grafického prostředí pro zobrazení vyzařovacího diagramu a zobrazení polarizačních stavů antény na Poincareho kouli [15] na základě vstupních hodnot měřených na anténě v echoprosté komoře nebo simulované softwarem „CST“. Dílčím cílem práce bylo vytvoření grafického prostředí pro zobrazení vyzařovacího diagramu a zobrazení polarizačních stavů antény na Poincareho kouli na základě superpozice vyzařovacích simulovaných charakteristik elementárního elektrického a magnetického dipólu. Pro řízení parametrů simulace mělo být použito poměrové řízení amplitudy a řízení fáze obou zdrojů.

První část shrnuje teorii týkající se vlastností antén souvisejících s vypracováním praktické části. Práce se věnuje především problematice týkající se polarizačních vlastností antén. Popisuje jednotlivé polarizace a jejich rozklad na ortogonální vektorové složky. Je

zde rozebrána teorie Stokesových parametrů popisujících polarizační stav. Dále pak je popsán způsob a význam zobrazení polarizačních stavů na Poincareho kouli, v této práci konkrétně s využitím Stokesových parametrů.

Druhá, praktická část, pak řeší dílčí a hlavní cíl práce tvorbou grafických rozhraní v prostředí Matlab.

Simulace elektrického a magnetického dipólu byla pro naplnění dílčího cíle zapracována do grafického rozhraní, s využitím prostředků pro tvorbu grafického rozhraní Matlab GUIDE, umožňujícího uživateli snadným způsobem zadat hodnoty parametrů pro výpočet vyzařovacích charakteristik elementárního elektrického dipólu a elementárního magnetického dipólu. Současně je možné stejně snadno zadat hodnoty úhlů pro nastavení prostorového směru na výsledné vyzařovací charakteristice, ve kterém je dále při výpočtech zkoumán polarizační stav konstalace dipólu a smyčky. Vytvořené prostředí je schopno vypočítat dle zadaných parametrů vyzařovací charakteristiku elementárního dipólu a elementární smyčky, provést jejich superpozici a graficky zobrazit tuto vyzařovací charakteristiku trojrozměrnou projekcí. Současně prostředí zobrazuje polarizační stav ve zvoleném zkoumaném směru na trojrozměrné projekci Poincareho koule.

Pro grafickou vizualizaci vlastností antény na základě naměřených hodnot bylo pro naplnění hlavního cíle použito programových částí již zpracovaných v řešení dílčího cíle práce. Po stránce programové však bylo řešení celé přepracováno a nebylo již použito prostředku GUIDE v prostředí Matlab. Program je schopen načíst hodnoty změřené na anténě z textového souboru, vypočítat a zobrazit trojrozměrnou vyzařovací charakteristiku antény, polarizační stavy antény a tvar polarizace. Grafická vizualizace polarizačních stavů antény byla znázorněna v trojrozměrném zobrazení na Poincareho kouli [15] a rozšířena o další možnosti zobrazení zlepšující orientaci v polarizačním chování antény. Pro určení polohy polarizačního stavu na ploše koule bylo použito parametrického popisu Stokesovými parametry. Polarizační stav, který je polohou na povrchu koule přesně definován Stokesovými parametry, dává vizuální informaci o jaký typ polarizace se jedná. V zobrazení polarizačního stavu na Poincareho kouli je takto vizuálně definována jak elipticita polarizace, tak její sklon, ale současně také i směr její rotace. V předcházející individuální projektové práci jsem usuzoval, že užitečným pohledem na polarizační stavy antény by mohlo být vykreslení všech polarizačních stavů antény současně, nebo pak zvýraznění jejich četností. V této, na projekt navazující práci se ukázalo, že zkoumat

četnosti polarizačních stavů by nepřispělo k poznání o polarizačních vlastnostech antény. Naopak, předpočítání a zobrazení všech polarizačních stavů podá ihned přehled o celkových polarizačních vlastnostech zkoumané antény a je tak přínosným zlepšením grafického rozhraní vytvořeného v projektové práci. Při zpracování grafického zobrazení polarizačních stavů se pak ukázalo, že dalšího zlepšení vypovídajících schopností je možno dosáhnout omezením zobrazení jen pro řez vyzařovací charakteristikou ve směru theta nebo phi, které podá ještě názornější představu o změně polarizačního stavu antény v závislosti na směru vyzařování. Tuto možnost grafického zobrazení hodnotím pro pozorování polarizačních stavů na anténě jako velice přínosnou. Dalším postřehem při zkoumání polarizačních stavů antény na Poincareho kouli bylo zjištění, že je zde možno pozorovat různá “vyosení” v rozložení polarizačních stavů poukazující na konstrukční nesymetrii antény. Z grafických výstupů programu je patrné, že taková konstrukční nesymetrie, které se často nelze vyhnout, není na vyzařovacím diagramu vůbec patrná, ale v rozložení polarizačních stavů je již zřetelně viditelná.

Pro vizuální představu o elipticitě polarizace v daném směru bylo do grafického rozhraní přidáno zobrazení polarizační elipsy s hodnotami vektorových složek a jejich vzájemného posunu. Toto zobrazení bylo pro výukové potřeby doplněno animací vektorových složek elektrického pole tvořících elipsu zobrazené polarizace.

Animace polarizační elipsy je názorná a vhodná pro výukové a demonstrační účely, není ji však vhodné nechat zapnutou pokud studujeme polarizační stavy antény. Animace je časově náročnější operace, a při násobné změně zkoumaného směru dojde k hromadění požadavku na vykreslení animace, ovládání programu se stane obtížným, a program může skončit chybou.

V závěru individuální projektové práce jsem navrhoval zlepšení obsluhy programu interaktivní reakcí rozhraní na změny ovládacích prvků. Toto zlepšení bylo do programového řešení grafického rozhraní zpracováno a ukázalo se jako velmi užitečné pro usnadnění ovládání.

Stanovené cíle práce tak byly naplněny a vytvořené grafické prostředí je možno použít jak pro laboratorní, tak i výukové a studijní účely.

Prostor pro další rozvoj a rozšíření grafického rozhraní vidím v rozšíření o možnost vynést a vybrat na Poincareho kouli dva polarizační stavy antény, a na základě jejich vzájemné polohy vypočítat například crosspolarizační ztráty mezi těmito stavy. Neměně

zajímavým doplněním by pak byla možnost konverze vstupních měřených hodnot některou z transformací Ludwig, s ohledem na použitou mechanickou konstalaci polohovacího mechanismu antény při měření v echuprosté komoře.

6. Použité zdroje informací

- [1] Miloš Mazánek, Pavel Pechač, Šíření elektromagnetických vln a antény, České vysoké učení technické v Praze 2007, 2. vyd. 259 stran, č. publikace 10931
- [2] Thomas A. Milligan, Modern Antenna Design, IEEE Press, Wiley-Interscience, A John Wiley & sons, Inc., 2005, second edition,
- [3] Constantine A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd Edition, IEEE Press, Wiley-Interscience, A John Wiley & sons, Inc. ISBN: 978-0-471-66782-7
- [4] Gregory F. Masters, Coordinate System Plotting For Antenna Measurements, Nearfield Systems Inc., 19730 Magellan Drive, Torrance, CA 90502-1104, USA, Stuart F. Gregson, dostupný online z: http://ww2.nearfield.com/amta/AMTA07-0092-GFM_SFG.pdf
- [5] Allen C. Newell, Greg Hindman, Antenna Spherical Coordinate System and Application in Combining Results from Different Antenna Orientations, Nearfield Systems Incorporated 1330 E. 223rd St. Bldg. 524 Carson, CA 90745 USA, dostupný online z: https://www.nearfield.com/aboutus/documents/1999ESTEC_AN_GH_Antenna_Spherical_Coordinate_Systems_and_Application_in_Combining_Result_000.pdf
- [6] BORN, M. WOLF, M. Principles of Optics. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 952 s. ISBN 0-521-642221
- [7] GOLDSTEIN, D. Polarized light: Second Edition, Revised And Expanded. Basel: Marcel
- [8] ANSI/IEEE Std. 149-1979, IEEE Standard Test Procedures for Antennas. IEEE: 1979.
- [9] Zinka, S., "On the Ludwig's Definitions of Cross-polarization," <https://zinka.files.wordpress.com/2011/07/my-thoughts-on-ludwig-polarization-definitions-i1.pdf>
- [10] Pouhe, D., Kamga, J., Monich, G., "Description of Electrically Small Resonant Antennas by Electric and Magnetic Dipoles," Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 32, 191-216, 2011, <http://www.jpier.org/PIERB/pierb32/11.11051713.pdf>
- [11] Ivan Macháček, Polarizační stav optické vlny, Brno, 2008, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky
- [12] Vojtěch Závada, Numerická analýza vyzářovací úlohy elektricky zmenšené smyčky, Praha, 2013, Diplomová práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromagnetického pole
- [13] Odborný článek, Newport, Polarization in Fiber Optics, dostupný online z: <http://www.newport.com/Tutorial-Polarization-in-Fiber-Optics/849671/1033/content.aspx>
- [14] autor práce
- [15] softwarová komponenta pro Matlab, volně dostupná z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10979-poincare-sphere-plot-of-polarimetry-stokes-vectors>

7. Přílohy

CD s touto prací a autorem vytvořené aplikace v prostředí Matlab.