

# **Tvorba programu pro zpracování dat získaných při měření vyzařování elektronických zařízení v blízké zóně**

Development of program for processing data obtained by measurement the radiation of electronic devices in the near field.

Bc. Jiří Pavlíček







## ABSTRAKT

Cílem této práce je zhotovení programu pro zpracování dat naměřených v blízké zóně vyzařujícího elektrického zařízení.

V teoretické části jsou popsány specifické vlastnosti blízké zóny elektronického zařízení, možnosti transformace elektromagnetického pole do vzdálené zóny a obecné principy interpolace měřených dat.

V praktické části je popsána metodika tvorby uživatelského prostředí v programu MATLAB a návrh software simulujícího sběr dat na obecné rovině. Jsou zde popsány postupy použité při projekci měřených dat, interpolaci na rovnoměrnou síť, a transformaci do vzdálené zóny. Poslední část se zabývá testováním akvizice pro různě položené roviny a porovnáním výsledků s rovnoměrně rozloženou sítí.

### Klíčová slova

blízká zóna, měření, elektromagnetické pole, rovina, matlab, grafické uživatelské rozhraní, akvizice, projekce, interpolace, transformace

## ABSTRACT

The aim of this thesis is to develop a program for data measured in radiating device's near field zone.

In theory part, there are near field zone specific properties described, as well as possibilities to transform electromagnetic field from near-field to far-field zone, and general principles of measured data interpolation.

The practical part describes methodology of user interface development in MATLAB, as well as designing software for simulation of gathering data on arbitrary plane. There are also described the procedures used in projection of the measured data, interpolation to an uniform grid, and transformation of data to far-field zone. The last section deals with testing of acquisitions on variously positioned planes, and comparing results with those on uniformly distributed network.

### Keywords

Near-field zone, measurement, electromagnetic field, plane, matlab, graphical user interface, acquisition, projection, interpolation, transformation

---

Rád bych poděkoval panu Ing. Stanislavu Goňovi, Ph.D. za příkladné vedení diplomové práce, za jeho trpělivost, cenné připomínky a doporučení, a pomoc při nejasnostech v konkrétních částech práce.

**Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

**Prohlašuji,**

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....  
podpis diplomanta

## OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>1 MĚŘENÍ V BLÍZKÉ ZÓNĚ .....</b>	<b>11</b>
1.1 VNĚJŠÍ PROSTOR ANTÉN .....	11
1.2 VZDÁLENÁ ZÓNA .....	11
1.3 BLÍZKÁ ZÓNA .....	12
1.3.1 Reaktivní blízká zóna.....	12
1.3.2 Vyzařující blízká zóna .....	12
1.4 FRESNELŮV A FRAUNHOFERŮV PROSTOR .....	12
1.5 VYZAŘOVÁNÍ DRÁTOVÉHO DIPÓLU .....	13
1.5.1 Měření na libovolné ploše.....	14
1.5.2 Měření ideální sondou na ortogonálním povrchu .....	15
<b>2 TRANSFORMACE Z BLÍZKÉ DO VZDÁLENÉ ZÓNY .....</b>	<b>17</b>
2.1 HUYGENSŮV PRINCIP.....	17
2.2 TRANSFORMACE PROSTOROVÉHO SPEKTRA.....	18
<b>3 INTERPOLACE MĚŘENÝCH DAT .....</b>	<b>19</b>
3.1 METODA NEJBLIŽŠÍHO SOUSEDA .....	19
3.2 POLYNOMIÁLNÍ INTERPOLACE.....	20
3.3 EXTRAPOLACE .....	22
<b>4 TVORBA UŽIVATELSKÉHO ROZHRAŇÍ V PROSTŘEDÍ MATLAB .....</b>	<b>24</b>
4.1 STRUKTURA GUI .....	25
<b>5 POŽADAVKY NA FUNKCI PROGRAMU ANFA .....</b>	<b>26</b>
<b>6 REALIZACE PROGRAMU.....</b>	<b>27</b>
<b>7 NÁVRH INTERFACE .....</b>	<b>28</b>
7.1 TYPE OF DATA .....	28
7.2 FREQUENCY .....	29
7.3 ACQUISITION CONTROL A ACQUISITION PLANE.....	30
7.4 PROJECTION BOX A PROJECTION PLANE .....	30
7.5 TRANSFORMED PLANE.....	32
<b>8 VÝPOČET SLOŽEK ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE .....</b>	<b>33</b>
8.1 ELEMENTÁRNÍ FUNKCE .....	33
8.2 GENEROVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH SLOŽEK NA AKVIZIČNÍ ROVINĚ .....	34
<b>9 AKVIZICE .....</b>	<b>36</b>
9.1 SYSTÉM AKVIZIČNÍCH ZÁZNAMŮ.....	36
9.2 PROCES AKVIZICE DAT .....	37
9.3 SYSTÉM VÝPOČTU ÚHLŮ NATOČENÍ AKVIZIČNÍ PLOCHY .....	39

---

9.3.1	Posouzení přesnosti výpočtu rotačních úhlů.....	43
<b>10</b>	<b>PROJEKCE.....</b>	<b>44</b>
10.1	SYSTÉM ORGANIZACE PROJEKTOVANÝCH DAT .....	44
10.2	KOLMÁ PROJEKCE .....	45
<b>11</b>	<b>INTERPOLACE .....</b>	<b>47</b>
11.1	MOŽNOSTI INTERPOLACE V PROSTŘEDÍ MATLAB .....	47
11.2	PŮVODNÍ KONCEPT INTERPOLACE .....	48
11.3	POUŽITÝ INTERPOLAČNÍ ALGORITMUS .....	48
<b>12</b>	<b>PŘEPOČET POLE DO VZDÁLENÉ ZÓNY.....</b>	<b>51</b>
<b>13</b>	<b>TESTOVÁNÍ PROGRAMU .....</b>	<b>52</b>
13.1	SYMETRIE ROZLOŽENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE .....	52
13.2	FÁZOVÝ PRŮBĚH ELEKTROMAGNETICKÝCH SLOŽEK .....	53
13.3	SROVNÁNÍ GENEROVANÝCH DAT S PROJEKTOVANÝMI .....	54
13.4	OHRANIČENÍ PROJEKČNÍ ROVINY .....	56
13.5	URČENÍ ROTAČNÍCH ÚHLŮ.....	56
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>58</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>60</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>62</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>63</b>



## ÚVOD

Problematika měření v blízké zóně vyzařujícího elektronického zařízení je specializovaná činnost vyžadující vysoké požadavky na znalost fyzikálních projevů vlnění v této oblasti. Teoretické poznatky v tomto oboru vychází ze základních principů šíření elektromagnetických vln a vyžadují hluboké matematické a fyzikální znalosti tohoto tématu. Není cílem práce zacházet do podrobností v oblasti teorie elektromagnetického pole, proto je tato problematika v teoretické části opravdu jen nastíněna, aby bylo možné udělat si představu o situaci.

Motivace měření elektronických zařízení v blízké zóně spočívá především v tom, že může být levnější a vhodnější (především pro vysokofrekvenční zařízení) alternativa ke klasickému měření ve vzdálené zóně, avšak každý typ měření má své výhody a nevýhody, které podléhají řadě kritérií. Měření v blízké zóně vyžaduje sofistikované prostředky s ohledem na vlastnosti elektromagnetického pole v této oblasti. Díky projevům reaktivních složek pole zde dochází k ovlivňování měřeného zařízení samotnou měřicí sondou, proto bývají naměřené hodnoty odlišné od reálných. To se řeší dodatečnými korekcemi podle parametrů měřicí sondy.

Software pro zpracování dat, který je cílem této práce, bude v budoucnu použit jako součást dalšího projektu, který bude zahrnovat i zpracování odpovídajícího hardwarového vybavení. Prozatím má být pouze přípravou na zpracování reálných dat, a proto si generuje vlastní data na základě matematických rovnic definujících základní anténu – drátový dipól. Je zpracován v prostředí programu MATLAB (verze R2006b), který je svou všestranností dlouhodobě na vrcholu programových prostředí pro výpočty a simulace (a mnoho dalších oblastí). K programování v MATLABu slouží vyšší programovací jazyk (vycházející z Fortranu), který není příliš náročné používat po osvojení několika desítek základních příkazů. Poskytuje plně modifikovatelné zobrazovací prostředky nabízející množství možností při publikování výpočtů. Základem práce v programu, jak je všeobecně známo, je povědomí o maticových operacích, které umožňují efektivní zpracování i velkých množství dat.

V diplomové práci je zpracována řada principů, které konečný program využívá. Je zde zmíněna teorie transformace elektromagnetického pole z blízké do vzdálené zóny za použití Huygensova principu nebo transformací prostorového spektra. Jsou zde popsány interpolační mechanismy, které bylo potřeba aplikovat na generovaná data, a možnosti interpolace ve vývojovém prostředí.

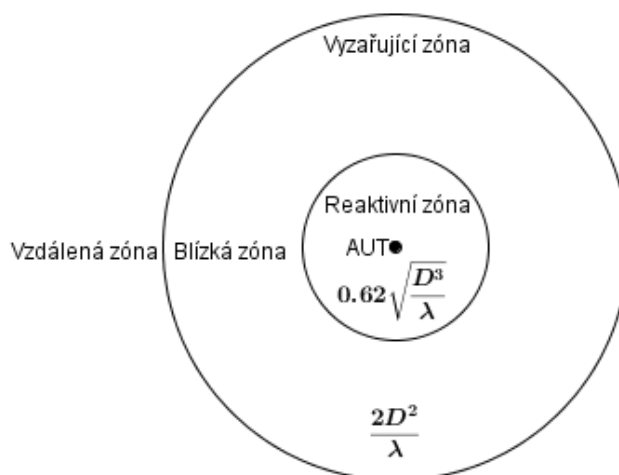
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 MĚŘENÍ V BLÍZKÉ ZÓNĚ

Měření antén v blízké zóně je na rozdíl od měření ve vzdálené zóně specifické zejména odlišnými fyzikálními vlastnostmi elektromagnetického pole kolem antény. Je to dáno především tím, že se zde uplatňují tzv. reaktivní složky záření, které ovlivňují měřicí zařízení.

### 1.1 Vnější prostor antén

Prostor kolem měřeného zařízení lze dle Yaghiana [4] rozdělit do několika oblastí v závislosti na projevech elektromagnetických složek záření. Projevy elektromagnetických polí vyzařující antény jsou v jednotlivých oblastech zcela odlišné. Celková velikost antény  $D$  a vzdálenost od antény vyjádřená vlnovou délkou  $\lambda$  jsou hlavními parametry určující meze jednotlivých oblastí. Na Obr. 1 jsou jednotlivé oblasti znázorněny.



Obr. 1: Vnější prostor antény [4]

Dělicí meze mohou být v mnoha případech orientační a jejich přesnost závisí na typu antény, jejích vlastnostech apod. Zároveň změna vlastností elektromagnetických polí není v rámci mezí skoková, ale spojitá, tudíž se v okolí hranice projevují vlastnosti obou sousedních oblastí.

### 1.2 Vzdálená zóna

**Vzdálená zóna** je taková oblast, kde elektrické a magnetické pole závisí na vzdálenosti vztahem  $1/R$  a zasahuje z nekonečna do tzv. Rayleighovy vzdálenosti, tj. radius  $R \gg 2D^2/\lambda$ . Aby se jednalo o vzdálenou zónu, je nutno splnit i podmínku  $R \gg D$ . Ve vzdálené zóně jsou  $\vec{E}$  a  $\vec{H}$  vůči sobě kolmé, tj. jsou vzájemně posunuty o  $90^\circ$ .

### 1.3 Blízká zóna

Jako **blízká zóna** se nazývá prostor mezi povrchem antény a vzdálenou zónou. Tento prostor se obvykle dělí na dva subregiony: **reaktivní** a **vyzařující blízkou zónu**.

#### 1.3.1 Reaktivní blízká zóna

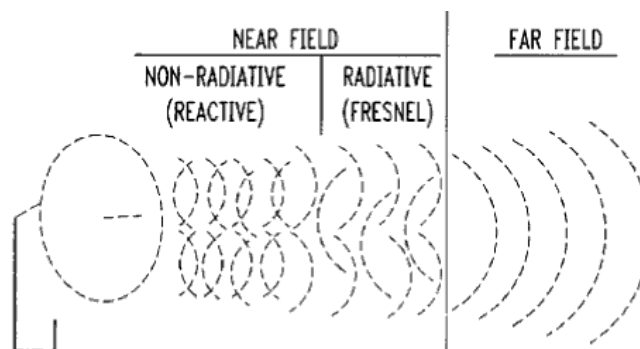
Reaktivní zóna zasahuje dle [4] a [9] do vzdálenosti  $R < \lambda/2\pi$  od povrchu antény. V jiných zdrojích se uvádí  $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$  a dle Yaghiana [4] je vzhledem k praktickým poznatkům vzdálenost jedné vlnové délky jako hranice reaktivní zóny dostatečná. V reaktivní zóně nejsou vůči sobě vektory  $\vec{E}$  a  $\vec{H}$ , ve fázi  $90^\circ$ , neboť se zde významně projevuje také složka  $E_r$ , která posouvá fázi vektoru  $\vec{E}$ . Velikost složky  $E_r$  klesá se vzdáleností dle vztahu  $1/R^2$ , proto se přibližně po přechodu do vzdálené zóny již prakticky neprojevuje. Při měření reálnou sondou v tomto prostoru dochází k významnému impedančnímu ovlivňování.

#### 1.3.2 Vyzařující blízká zóna

Za vyzařující blízkou zónu se pak považuje prostor mezi reaktivní zónou a vzdálenou zónou, tj. dle vztahu  $0.62\sqrt{D^3/\lambda} < R < 2D^2/\lambda$ . Reaktivní složky se zde projevují méně než v reaktivní zóně a vyzařující složky dominují. V tomto prostoru již měřicí sonda vyzařované spektrum měřené antény zásadně neovlivňuje, proto se při měření v blízké zóně pohybujeme právě v tomto prostoru. Dle [9] se o vyzařující blízké zóně mluví pouze v souvislosti s elektricky velkými anténami, tj. s maximálním rozměrem  $D \gg \lambda$ .

### 1.4 Fresnelův a Fraunhoferův prostor

Dále se jako názvy oblastí v okolí antén uvádějí optické termíny jako Fresnelův prostor a Fraunhoferův prostor, v souvislosti s odlišným principem difrakce, ke kterým v těchto oblastech dochází. Fraunhoferův prostor lze dle [1] a [4] považovat za synonymum vzdálené zóny, Fresnelův prostor definovaný vzdáleností  $D/2\sqrt{D/2\lambda}$  je subregionem vyzařující blízké zóny. V. Schejbal v [9] uvádí, že za určitých podmínek lze dojít k tomu, že Fresnelova zóna může být ve větší vzdálenosti než Fraunhoferova. Na Obr. 2 jsou tyto prostory znázorněny v kontextu s prostory kolem antény.



Obr. 2: Fresnelova a Fraunhoferova difrakce [11]

## 1.5 Vyzařování drátového dipólu

Teorii měření antén v blízké zóně můžeme vysvětlit na příkladě vyzařování Hertzova dipólu ve sférickém souřadném systému. Ten je definován třemi souřadnicemi  $r, \vartheta, \varphi$  (viz Obr. 3) odpovídající radiální vzdálenosti, inklinacímu úhlu od osy  $z$ , a azimutu (odklonění od osy  $x$  v rovině  $xy$ ). Transformační vztahy dle [12] mezi kartézským a sférickým souřadným systémem jsou:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \quad (0 \leq r < \infty) \quad (1)$$

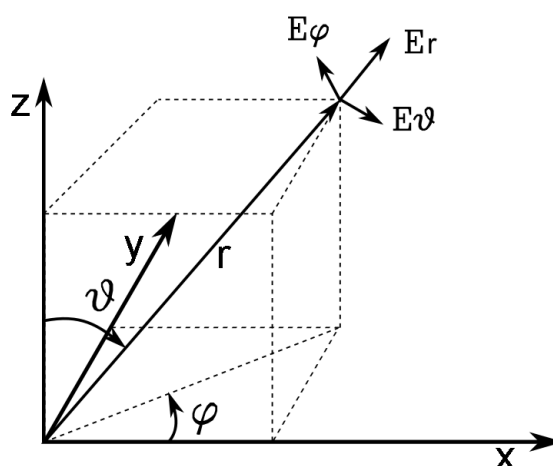
$$\vartheta = \tan^{-1} \left[ \left( \sqrt{x^2 + y^2} \right) / z \right]; \quad (0 \leq \vartheta \leq \pi) \quad (2)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{y}{x} \right); \quad (0 \leq \varphi < 2\pi) \quad (3)$$

$$x = r \cdot \sin\vartheta \cdot \cos\varphi \quad (4)$$

$$y = r \cdot \sin\vartheta \cdot \sin\varphi \quad (5)$$

$$z = r \cdot \cos\vartheta \quad (6)$$



Obr. 3: Složky elektrické intenzity ve sférickém souřadném systému

Za drátový dipól považujeme rovný drát, jímž protéká proud  $I$ , a jehož velikost  $l$  je mnohem menší než jeho poloměr. Podle [10] platí pro složky elektrické a magnetické intenzity vyzařované drátovým dipólem v oblasti blízké zóny vztahy:

$$E_r = Z_0 \frac{I \cdot l \cdot \cos \vartheta \cdot e^{-jkr}}{2\pi r^2} \left[ 1 + \frac{1}{jkr} \right] \quad (7)$$

$$E_\vartheta = jZ_0 \frac{k \cdot I \cdot l \cdot \sin \vartheta \cdot e^{-jkr}}{4\pi r} \left[ 1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2} \right] \quad (8)$$

$$E_\varphi = H_r = H_\vartheta = 0 \quad (9)$$

$$H_\varphi = j \frac{k \cdot I \cdot l \cdot \sin \vartheta \cdot e^{-jkr}}{4\pi r} \left[ 1 + \frac{1}{jkr} \right] \quad (10)$$

kde  $Z_0 = 120\pi$  ... impedance volného prostoru,

$k = 2\pi/\lambda$  ... vlnová konstanta

$r$  ... radiální vzdálenost měřeného bodu od dipólu

V blízké zóně se tedy uplatňují složky  $E_r$ ,  $E_\vartheta$ , a  $H_\varphi$ , z toho vyplývá, že vektory  $\vec{E}$  a  $\vec{H}$  na sebe nejsou kolmé, neboť vektor  $\vec{E}$  je vychylován svou radiální složkou.

Pro vzdálenou zónu, kde je vzdálenost o poloměru  $r$  od antény dostatečně velká, tak že se  $E_r$  neprojeví, je možno vztahy upravit na tvar:

$$E_r = E_\varphi = H_r = H_\vartheta = 0 \quad (11)$$

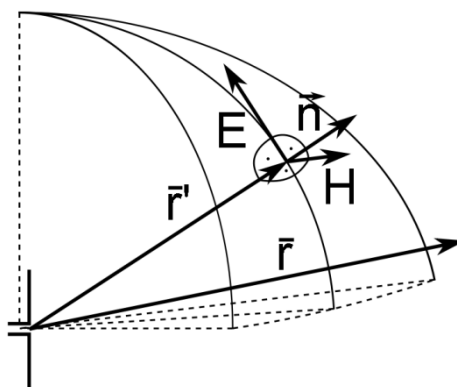
$$E_\vartheta = jZ_0 \frac{k \cdot I \cdot l \cdot \sin \vartheta \cdot e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (12)$$

$$H_\varphi = j \frac{k \cdot I \cdot l \cdot \sin \vartheta \cdot e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (13)$$

Z toho vyplývá, že pro  $R \gg 2D^2/\lambda$  se podíl  $E/H \cong Z_0$ .

### 1.5.1 Měření na libovolné ploše

Předpokládejme, že máme ideální měřicí zařízení, kterým měříme elektrické a magnetické pole na libovolném uzavřeném povrchu  $S$  kolem antény. Náčrt výseče sférického povrchu je na Obr. 4. Pole  $\vec{E}$  a  $\vec{H}$  tečné k povrchu  $S$ , ve vzdálenosti  $\vec{r}'$  určují dle [1[4] tzv. Kottler-Franzovy rovnice, které jsou podrobněji rozebrány v [1].



Obr. 4: Elektrické a magnetické pole na povrchu sféry

Elektrické pole ve vzdálenosti  $\bar{r}$  je dáno tzv. Kirchhoffovým vektorovým integrálem:

$$\bar{E}(\bar{r}) = \frac{-ike^{ikr}}{4\pi r} \hat{r} \times \oint_S (\bar{K}_m + Z_0 \hat{r} \times \bar{K}_e) e^{-ik\hat{r} \cdot \bar{r}} dS \quad (14)$$

$$\bar{K}_e = \hat{n} \times \bar{H}; \bar{K}_m = -\hat{n} \times \bar{E} \quad (15)$$

kde  $\hat{n}$  je jednotkový vektor normály k ploše  $S$ . Na základě elektrických a magnetických polí měřených na povrchu  $S$  lze dle [4] vypočítat pole ve větších vzdálenostech za použitím upraveného Kirchhoffova integrálu:

$$\bar{E}(\bar{r}) = \oint_S [\hat{n}' \times \bar{E}(\bar{r}')] \bar{G}(\bar{r}', \bar{r}) dS \quad (16)$$

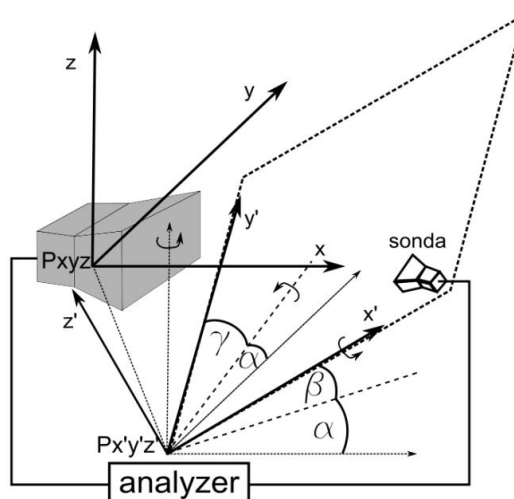
$$\bar{G}(\bar{r}', \bar{r}) = \sum [N_m(\bar{r}') \bar{M}_m(\bar{r}) - \bar{M}_m(\bar{r}') N_m(\bar{r})] \quad (17)$$

$\bar{G}$  je Greenova funkce popisující transformaci z plochy ve vzdálenosti  $\bar{r}'$  do plochy ve vzdálenosti  $\bar{r}$  za pomoci vlastních funkcí  $M, N$ , které definují kolmé geometrické systémy obou ploch. Použití těchto funkcí podporuje podle [4] šest ortogonálních systémů, z nichž se pro praktické měření antén v blízké zóně používají tři, tj. rovinný, válcový a sférický.

### 1.5.2 Měření ideální sondou na ortogonálním povrchu

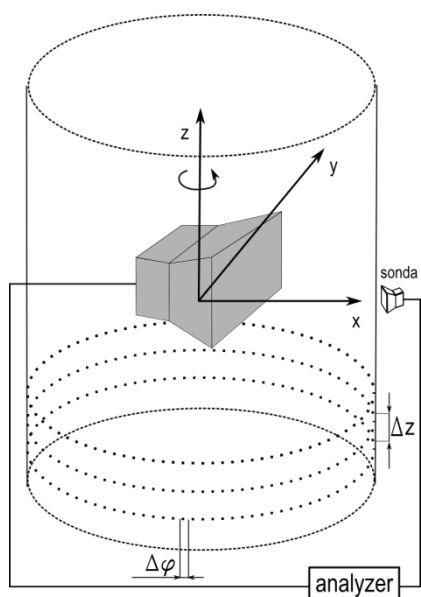
U rovinného snímání (Obr. 5) je měřená anténa nepohyblivá. Měřicí sonda se pohybuje v souřadném systému definovaném pro měřicí rovinu  $(x', y', z')$ , který může být vůči globálnímu systému  $(x, y, z)$  posunutý do počátku  $P_{x'y'z'}$ , a zároveň pootočený kolem svých os. Sonda se pohybuje ve směru os  $x', y'$ . Maximální vzájemná vzdálenost dvou vzorků je  $\Delta x = \lambda/2, \Delta y = \lambda/2$ .

Při válcovém snímání (Obr. 6) je měřená anténa upevněna na zařízení umožňující otáčivý pohyb kolem vertikální osy  $z$ . Měřicí sonda se pohybuje podélně, rovnoběžně s osou  $z$  a opisuje tak válcovou plochu v ekvidistanční vzdálenosti od antény. Maximální vzájemná vzdálenost dvou vzorků je  $\Delta z = \lambda/2, \Delta \varphi = \lambda/[2(r + \lambda)]$ .

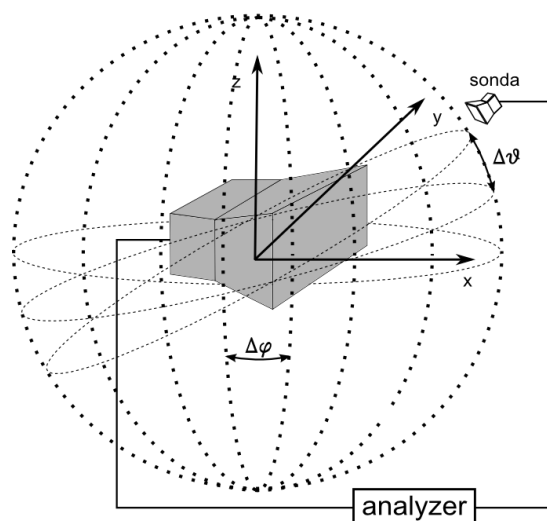


Obr. 5: Rovinné snímání

Sférické snímání (Obr. 7) vyžaduje zařízení umožňující otáčení měřené antény ve dvou osách tj. ve směru  $\varphi, \vartheta$ . Snímací zařízení je umístěno nepohyblivě směrem do středu otáčení. Maximální vzájemná vzdálenost dvou vzorků je  $\Delta\vartheta = \lambda/[2(r + \lambda)]$ ,  $\Delta\varphi = \lambda/[2(r + \lambda)]$ .



Obr. 6: Válcové snímání



Obr. 7: Sférické snímání

Vlastní měření charakteristik antén se provádí sondami, u kterých je předpoklad, že jejich vlastnosti ovlivní měřené zařízení co možná nejméně. Jsou zde nároky zejména na velikost, která musí být nepoměrně menší vyzařované vlnové délce tak, aby sonda neovlivňovala impedanci a vyzařovací charakteristiku měřené antény a neodrážela dopadající vlnění. V reálných podmínkách je třeba brát v úvahu parametry reálné sondy, a podle toho zavést kompenzační činitele upravující naměřené hodnoty. Vztahy pro výpočet elektromagnetických polí měřených reálnými sondami uvádí Yaghian [4].



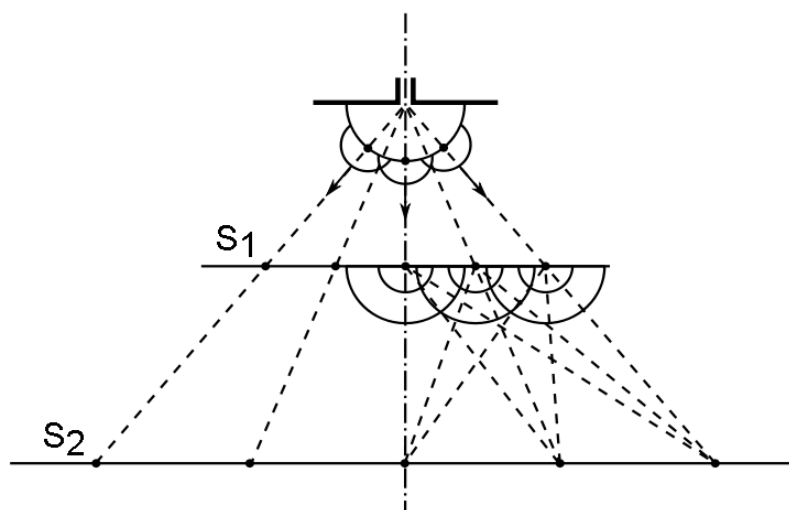
## 2 TRANSFORMACE Z BLÍZKÉ DO VZDÁLENÉ ZÓNY

Pro transformaci dat z blízké do vzdálené zóny lze použít tři základních metod:

- Huygensův princip
- Transformace prostorového spektra
- Metoda integrální rovnice elektrických polí

### 2.1 Huygensův princip

Dle Huygensova principu lze každý bod vlnoplochy vlnění v prostoru chápat jako nový zdroj vlnění tzv. sekundárních vln. Další vlnoplochy lze potom chápat jako vnější obálku těchto nových sekundárních vlnoploch (viz. Obr. 8).



Obr. 8: Huygensův princip

Aplikací tohoto principu na problematiku rozložení elektromagnetických polí v prostoru kolem vyzařující antény lze dovodit, že v libovolném bodě přímky, vedené v radiálním směru od antény, bude velikost vektorů vzdálené zóny  $\vec{E}_{FAR}$  a  $\vec{H}_{FAR}$  odvoditelná z velikosti vektorů blízké zóny  $\vec{E}_{NEAR}$  a  $\vec{H}_{NEAR}$ , neboť tyto vystupují jako elementární zdroje záření.

Danou závislost pro elektrické pole je možno popsat následovně:

$$\begin{bmatrix} E_{\vartheta FAR} \\ E_{\varphi FAR} \end{bmatrix} = \frac{-jk}{4\pi} \begin{bmatrix} Z_0 (\bar{J}_{eq} \cdot \bar{T}_{xyz\vartheta}) & \bar{M}_{eq} \cdot \bar{T}_{xyz\varphi} \\ Z_0 (\bar{J}_{eq} \cdot \bar{T}_{xyz\varphi}) & \bar{M}_{eq} \cdot \bar{T}_{xyz\vartheta} \end{bmatrix} \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (18)$$

$$\bar{J}_{eq} = \bar{n} \times \bar{H}; \quad \bar{M}_{eq} = \bar{n} \times \bar{E} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \bar{T}_{xyz\vartheta} &= [\sin \vartheta \cos \varphi \quad \sin \vartheta \sin \varphi \quad \cos \vartheta] \\ \bar{T}_{xyz\varphi} &= [\cos \vartheta \cos \varphi \quad \cos \vartheta \sin \varphi \quad -\sin \vartheta] \end{aligned} \quad (20)$$

kde  $\bar{J}_{eq}$  a  $\bar{M}_{eq}$  jsou ekvivalentní elektrický a magnetický proud,  $\bar{T}_{xyz_\varphi}$  a  $\bar{T}_{xyz_\theta}$  jsou řádky matice pro transformaci ze sférických do kartézských souřadnic a  $\vec{n}$  je normála k ploše, na kterou je prováděn přepočet.

## 2.2 Transformace prostorového spektra

Další metodou výpočtu elektromagnetického pole na základě blízkozónního měření je metoda transformace prostorového spektra.

Pro transformaci rovinného spektra platí podle [4] vztahy (21), (22), kde  $\bar{E}_t(x, y, z)$  v libovolné vzdálenosti  $z$  od antény je Fourierovou transformací prostorového spektra  $\bar{T}_t$  závislého na konstantách šíření ve směrech  $x, y$ , přičemž vztah pro  $\bar{T}_t(k_x, k_y)$  je transformací elektrického pole  $\bar{E}_t$  proměnného v prostorových souřadnicích  $x, y$ , které máme k dispozici změřené v oblasti  $z = z_0$ , podle Obr. 9.

$$\bar{E}_t(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{T}_t(k_x, k_y) e^{i\gamma z} e^{ik_x x} e^{ik_y y} dk_x dk_y \quad (21)$$

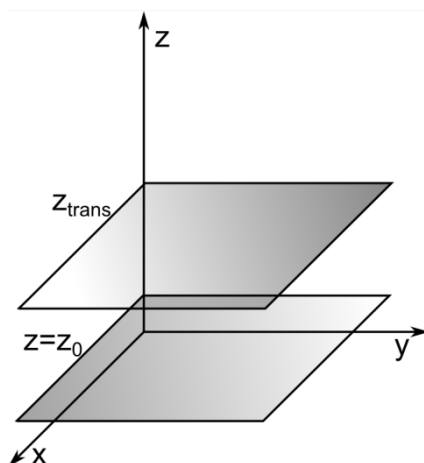
$$\bar{T}_t(k_x, k_y) = e^{i\gamma z_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{E}_t(x, y, z_0) e^{-ik_x x} e^{-ik_y y} dx dy \quad (22)$$

Konstanty  $k_x, k_y, \gamma$  zde představují konstanty šíření ve směrech  $x, y$  a  $z$  (podle symboliky v [4]) a můžeme říci, že jsou to složky vektoru  $k_0$ , jehož velikost odpovídá vlnovému číslu.

$$\sqrt{k_x^2 + k_y^2 + \gamma^2} = k_0; \|k_0\| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (23)$$

Zjednodušeně lze říci, že elektrické pole v libovolné vzdálenosti  $z$  od zdroje lze odvodit na základě změřeného pole v menší vzdálenosti  $z = z_0$  dle vztahu:

$$\bar{E}(kx, ky, z) = \bar{E}(kx, ky, z_0) \cdot e^{-i\gamma(z-z_0)} \quad (24)$$



Obr. 9: Transformace rovinného spektra

### 3 INTERPOLACE MĚŘENÝCH DAT

Máme-li soubor dat  $z(x, y)$  měřených s náhodným rozložením na ploše  $S(D_x, D_y)$ , je pro další práci s těmito daty nutné rozdělit plochu  $S$  (s ohledem na vzorkovací vzdálenost), na konečný počet rovnoměrně rozložených vzorků dvojice  $[x_i, y_i]$ . Tyto vzorky tvoří tzv. *grid*, tj. síť uzlů nad plochou  $S$ , jejichž hodnoty je třeba dopočítat na základě obecné závislosti naměřených hodnot na prostorových souřadnicích v intervalu dané plochy. Určení obecné funkční závislosti  $z = f(x, y)$  z naměřených vzorků, umožňující výpočet hodnoty  $z$  pro takové dvojice  $(x, y)$ , které nejsou obsaženy v souboru dat, je úkolem *interpolace* a jejích metod.

Obecnou úlohou interpolace je:

- určit pro známou funkci  $z = F(x, y)$  takovou funkci  $z = G(x, y)$ , pro kterou platí, že na požadovaném intervalu  $\langle x_{min}; x_{max} \rangle, \langle y_{min}; y_{max} \rangle$  nabývá pro  $n$  dvojic  $[x_i, y_i]$  stejných hodnot jako funkce  $F(x, y)$  (tj. platí pro ni  $G(x_i, y_i) = F(x_i, y_i)$ , kde  $i = 1, 2, \dots, n$ ),
- vypočítat pomocí náhradní funkce  $G(x, y)$  přibližné hodnoty  $z_i = F(x_i, y_i)$  v bodech  $[x_i, y_i]$ ,
- určit nepřesnost náhrady funkčních hodnot  $F(x, y)$  hodnotami  $G(x, y)$  pro dvojice  $[x_i, y_i]$ .

Pro případ, kdy známe dostatečný počet hodnot  $z_i(x_i, y_i)$  v určitém omezeném prostorovém intervalu a požadujeme modelovat rozložení dat na této ploše i v bodech, kde data neexistují, je nutné určit takovou funkci  $z = F(x, y)$ , která pro tento prostorový interval nabývá v daných bodech  $[x_i, y_i]$  předem známých hodnot  $z_i$ , tj.  $z_i = F(x_i, y_i)$ .

Interpolačních algoritmů existuje celá řada a to, který je nejlepší pro tu kterou aplikaci určuje především poměr výpočetní náročnosti k přesnosti interpolovaných dat vůči originálu. Pravděpodobně nejjednodušším a taky nejméně přesným algoritmem, je tzv. metoda nejbližšího souseda (interpolace 0.řádu) blíže rozvedená v následující podkapitole, dále navazuje blok polynomiálních interpolací, ať už jde o lineární, kvadratickou, kubickou nebo vyšších řádů.

#### 3.1 Metoda nejbližšího souseda

Podstatou této metody je prosté nahrazení hodnoty v požadovaných souřadnicích  $[x_i, y_i]$  nejbližší známou hodnotou  $z = F(x, y)$ , tj.  $z_i(x_i, y_i) = z_{nearest}(x, y)$ . Výsledkem této interpolace je po částech konstantní funkční průběh, u kterého se radikálně projevuje

nedostatek dat v okolí požadovaných bodů. Je to jednoduchá, nenáročná metoda, která může být dostačující v určitých specifických aplikacích, především s požadavkem na rychlost výpočtu, a s dostatečně jemným rozložením naměřených hodnot.

### 3.2 Polynomiální interpolace

Při výpočtu polynomiální interpolace se dle [15] vychází z funkčního předpisu ve tvaru:

$$\psi(x; a_0, \dots, a_n) = a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_n, \quad (25)$$

kde koeficienty  $a_0, \dots, a_n$  jsou konstanty interpolačního polynomu  $P_n$ , pro který platí, že pro dané body  $x_i$  nabývá stejných hodnot jako aproximovaná funkce  $f(x)$ , tedy platí:

$$P_n(x_i) = f(x_i) \quad (26)$$

Metod polynomiální interpolace je opět několik, my se budeme zabývat především tou základní, Lagrangeovou. Platí, že pro  $(n + 1)$  daných dvojic čísel  $(x_i, f_i)$  existuje právě jeden takový interpolační polynom nejvýše stupně  $n$ . Ten nazýváme jako Lagrangeův polynom a sestrojíme jej jako lineární kombinaci všech funkčních hodnot dle vztahu

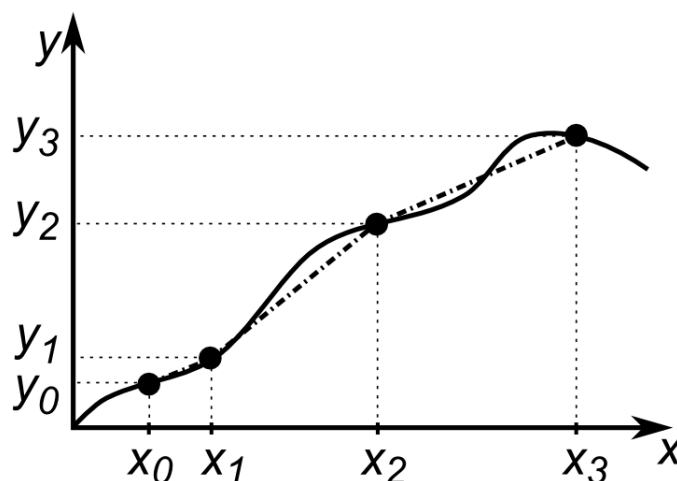
$$P_n(x) = \sum_{i=0}^n l_i(x) \cdot f(x_i) \quad (27)$$

přičemž  $l_i(x)$  jsou tzv. fundamentální, či elementární polynomy definované vztahem

$$l_i(x) = \frac{(x - x_0) \dots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \dots (x - x_n)}{(x_i - x_0) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n)} \quad (28)$$

Tímto postupem lineární kombinace známé funkční hodnoty a fundamentálního polynomu lze dospět k polynomům vyšších řádů, podle nároků na přesnost interpolace, výpočetní složitosti, apod. Pro účely interpolace do rovnoměrné sítě je postačující, když je známo malé množství bodů v okolí interpolovaných bodů sítě, proto se v praxi používají především lineární (tzv. interpolace 1. řádu), kvadratické, či kubické interpolace v různých dodatečných úpravách. Od počtu bodů se odvíjí přesnost výsledného průběhu.

Při lineární interpolaci se dva sousedící body  $[x_0, y_0]$ ,  $[x_1, y_1]$  proloží přímkou a funkční hodnoty bodů náležejících do intervalu  $\langle x_0, x_1 \rangle$  jsou interpolovány jako hodnoty z intervalu  $\langle y_0, y_1 \rangle$ . Průběh lineární interpolace je uveden na Obr. 10., kde čerchovaná linie znázorňuje interpolovaný průběh, do kterého pak náleží libovolné interpolované body.



Obr. 10: Lineární interpolace

Při kubické interpolaci je potřeba znát také derivace v hraničních bodech tak, aby bylo možno sestavit plynulý přechod mezi jednotlivými intervaly. Jelikož vycházíme z funkčního předpisu:

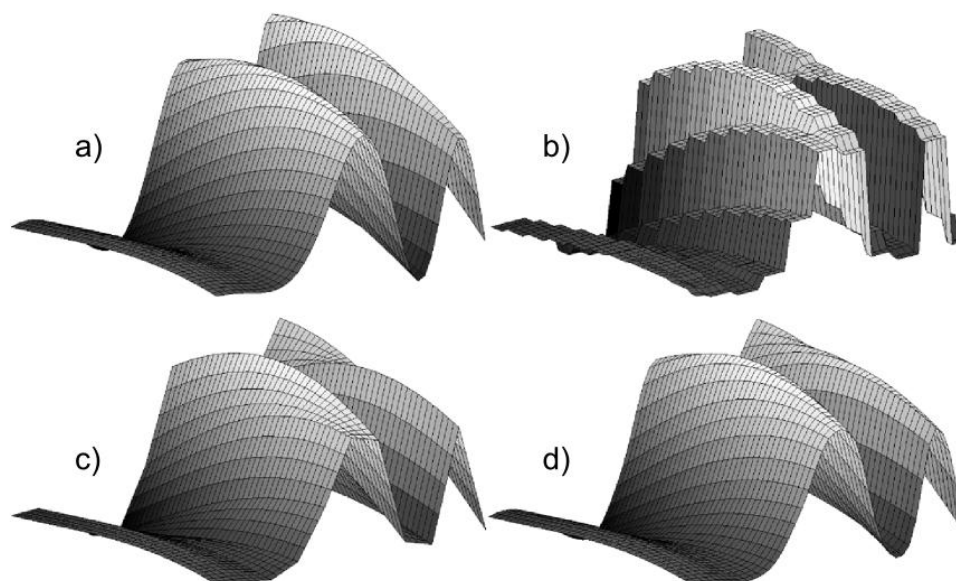
$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (29)$$

a jeho derivace:

$$f'(x) = 3ax^2 + 2bx + c \quad (30)$$

je nutné znát celkem čtyři body ke zjištění čtyř neznámých, anebo dva hraniční body intervalu a hodnoty derivací v nich.

Kubická interpolace již vytváří dostatečně věrný obraz spojitého funkčního průběhu, je ale výpočetně náročnější. Často se používají i kubické *spline* interpolace, která vypočítává interpolující funkci po částech, a u které se vyžaduje v každém bodě spojitost druhého řádu, tj. i druhá derivace.

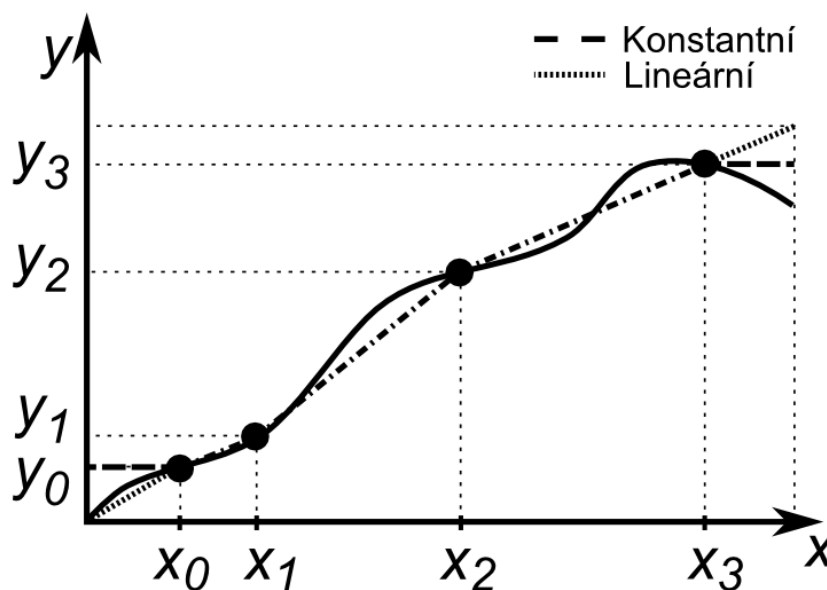


Obr. 11: Srovnání interpolačních metod

Na Obr. 11 je srovnání všech popsaných interpolačních metod aplikovaných na obecný funkční průběh (a). Ten je vzorkován krokem  $\pi/20$ . Pro interpolované průběhy je pro názornost jako předloha zvolen tentýž funkční průběh s krokem  $\pi/5$ , proto se u něj vytrácí část informace o tvaru, který by interpolace měla víceméně rekonstruovat. U metody nejbližšího souseda (b) k rekonstrukci tvaru nedochází, touto metodou získáváme jen hrubý odhad možného tvaru, spočívající jen v přenesení známých hodnot do nejbližšího okolí. Vzniká tak po částech konstantní průběh. Lineární interpolace (c) poskytuje již lepší představu o spojitosti originální funkce, body jsou však vzájemně spojeny úsečkami, proto jsou plynulé přechody mezi vzorky ignorovány. Kubická interpolace (d) prokládá vzorky křivkami v závislosti na derivacích v nich, proto dochází k rekonstrukci původního tvaru i mezi jednotlivými vzorky, a celkový průběh se jeví, vzhledem k počtu vzorků, hladší než originál.

### 3.3 Extrapolace

Pro rovnoměrně rozložená data je interpolace definitivní operace, neboť jsou známy hodnoty v celém rozsahu interpolace. Při interpolování měřených dat s nerovnoměrným rozložením, kdy neznáme hodnotu funkce na okrajích měřeného rozsahu, nastává problém s dopočítáním funkce až do mezních hodnot, případně za ně, to ale v praxi nemá velký význam. Běžně se používá dvou způsobů: při tzv. konstantní extrapolaci se funkční hodnota pro  $x < x_0$  rovná  $y_0$ , anebo při lineární metodě se hodnota počítá stejně jako v intervalu  $\langle x_0, x_1 \rangle$ , tedy lineárním průběhem podle pravé derivace na tomto intervalu. Rozdíl mezi těmi to metodami je zobrazen na lineární interpolaci na obrázku dole.



Obr. 12: Metody extrapolace

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 TVORBA UŽIVATELSKÉHO ROZHRAŇÍ V PROSTŘEDÍ MATLAB

Cílem této práce je tvorba programu pro zpracování dat naměřených v blízké zóně elektronického zařízení v prostředí simulačního software MATLAB. Vycházíme při tom z poznatků uvedených v teoretické části práce, zejména o vlastnostech elektromagnetického záření v blízké zóně, a o interpolačních metodách pro zpracování naměřených dat. Proto je na místě alespoň ve zkratce se zmínit o MATLABu samotném, zejména o principech tvorby uživatelského prostředí.

MATLAB nabízí široké využití snad ve všech oblastech vědy a výzkumu, poskytuje velké množství užitečných funkcí nejen v základní verzi, ale i v množství nadstandardních modulů. Dokumentace software [6] je přehledná, s množstvím výukových příkladů, syntaxe programu je víceméně intuitivní a lze se naučit poměrně rychle. Při nejasnostech jsou některé základní postupy programování v MATLABu rozebrány v [7] nebo [8], včetně zmínky o tvorbě uživatelského prostředí.

Grafické uživatelské prostředí (GUI) lze v MATLABu tvořit jak přímo programově (to platí pro tuto práci), tak skrze speciálně na to vytvořený editor GUIDE, který programový kód generuje na základě požadavků na vlastnosti jednotlivých prvků GUI.

Postup programování GUI v prostředí MATLAB je stručně řečeno založen na definování vlastností jednotlivých objektů, jejich hierarchické přiřazování k jiným objektům, tzv. rodičům, a volání funkcí, které se vykonají při splnění určitých podmínek a událostí. Hlavní prvky uživatelského rozhraní se generují funkcí *uicontrol*, jejíž hlavní vlastností je *Style*, která specifikuje, o který prvek se bude jednat. Další vlastnosti se vztahují právě k definovanému typu prvku. Mezi hlavní prvky uživatelského rozhraní patří:

- stisknutelná tlačítka (push buttons),
- zatrhávací tlačítka (check boxes),
- výběrová tlačítka (radio buttons),
- textová pole (editable text fields),
- výběrová pole (list boxes),
- rozbalovací menu (pop-up menus),
- posuvníky (sliders),
- textové popisky (static text labels),
- grafické osy (axes).



Vlastností jednotlivých prvků je relativně velké množství a pro každý prvek se v něčem odlišují podle jeho povahy; ty hlavní (jako např. pozice) jsou však zavedeny pro všechny. Jejich přesný výčet a způsob použití, včetně příkladů, obsahuje dokumentace software [6], která je volně dostupná na Internetu.

## 4.1 Struktura GUI

Hlavní část GUI je obecná funkce, definovaná obecnou syntaxí *[výstup]=function název\_funkce(vstup)*, za kterou následují iniciační data, podmínky, výčet prvků, které GUI obsahuje, a definice jejich vlastností. Hlavním prvkem GUI je především příkaz *figure(vlastnost,hodnota,...)*, který definuje hlavní okno. Za prvky GUI následuje blok funkcí, které obsluhují události vzniklé v souvislosti s prvky uživatelského rozhraní (např. stisk tlačítka, výběr položky menu, apod.). Tyto funkce mohou být realizovány více způsoby, avšak MATLAB nabízí funkce typu *Callback*, která je pro tyto účely speciálně vytvořená, a při uskutečnění události posílá obslužnému bloku instrukcí také informaci o objektu, který událost vyvolal, a o typu události, která nastala. Název obslužné funkce musí být uveden jako hodnota vlastnosti *Callback* daného prvku podle příkladu na Obr. 13., nebo jako funkce přiřazená některé jiné vlastnosti určené pro vykonání po vzniku události (blíže viz [6], vlastnosti *uicontrol*, aj.).

```
...
uicontrol(surfdlg_fig, ...
    'Style','popupmenu', ...
    'Units','Pixels', ...
    'Position',[360 375 100 20], ...
    'String',{'E' 'Ex' 'Ey' 'Ez'}, ...
    'Enable','on', ...
    'Callback',{@popup_callback,ax_E_ampl,ax_E_angle}, ...
    'Tag','E_popup');
...
function popup_callback(obj,event,ax_E_ampl,ax_E_angle)
```

Obr. 13: Příklad definice vlastností a volání funkce typu *Callback*

GUI se může skládat z několika \*.m souborů, resp. samostatných funkcí, na které se hlavní program odkazuje, stejně tak dobře se však může sestávat jen z jednoho souboru, který má vnitřní funkce, včetně obslužných, definovány ve svém těle. Obecně lze říci, že odkazování na samostatné \*.m soubory je pravděpodobně přehlednější, s tím, že při práci se mezi soubory přepíná. V MATLABu lze ale relativně efektivně vyhledávat řetězce, automaticky formátovat kód, zakládat záložky, což umožňuje mít vše pohromadě, v jednom souboru. Tolik ve zkratce k programování GUI v MATLABu.

## 5 POŽADAVKY NA FUNKCI PROGRAMU ANFA

Funkce programu ANFA (Automatic Near-Field Acquisition) je utvářena požadavky, které musí splňovat, proto zde popíšu prvotní představy o činnosti programu.

Program má sloužit pro zpracování dat naměřených na libovolné rovinné ploše v blízké zóně elektrického zařízení.

Protože návrh a realizace měřicího hardwaru není součástí této práce, měřená data se budou prozatím generovat programově, přičemž je požadována připravenost programu pro vstup reálných dat přes sériový port.

Elektrické zařízení (pro simulaci použijeme drátový dipól) je umístěno v počátku globálního kartézského souřadného systému  $xyz$ , a měřená rovina (akviziční plocha) je vůči němu prakticky libovolně posunuta a potočena.

Data měřená na akviziční rovině jsou polohově vztažena k počátečnímu bodu na této rovině, proto pro tyto účely zavádíme lokální kartézský souřadný systém  $x'y'z'$  definovaný třemi body akviziční roviny, z nichž jeden je počátkem tohoto systému. Uživatel tyto tři body zadává nezávisle na sobě, v globálních souřadnicích, takže je jasně definovaná vzdálenost roviny od zdroje záření.

Při simulaci měření na akviziční ploše budeme brát v úvahu reálné poziční chyby, které zadává uživatel ve všech třech osách, proto jsou generovaná data nerovnoměrně rozložena. Akviziční plocha bude v programu vedena a ukládána jako akviziční záznam, který bude zahrnovat body určující tuto plochu, matici obsahující naměřené, popř. generované údaje o jednotlivých složkách elmag. pole, a poziční odchylky měřicího zařízení.

Program má být schopen na základě měřeného elektromagnetického pole určit rozložení pole v jakékoli vzdálenosti od měřeného zařízení, a proto musí být známo rozložení pole v celém jeho okolí. Pro tyto účely zavádíme kolem měřeného zařízení projekční krychli (příp. kvádr), na jejíž stěny projektujeme data z akvizičních ploch; to znamená, že akviziční roviny musí být voleny tak, aby byly v bezprostřední blízkosti stěny projekční krychle.

Projektovaná data na stěnách krychle budou interpolována na rovnoměrnou síť tak, aby byla připravena pro přepočet dle Huygensova principu.

## 6 REALIZACE PROGRAMU

Tvorbu výsledného programu lze dle výše popsaných požadavků rozdělit do několika etap, které budou podrobněji popsány v následujících kapitolách.

Pro názornost začneme návrhem interface programu, aby byla zřejmá jeho funkce z hlediska uživatele, a poté vysvětlíme činnost jeho struktur.

Protože se jedná především o program zpracovávající naměřená data v prostoru kolem antény, který má zároveň být schopen tato data generovat, budeme pokračovat popisem funkcí pro *výpočet složek vyzařovaného elektromagnetického pole*. Dále je potřeba zajistit generování těchto dat na libovolné rovině, tedy vytvořit zásobník pro *akvizici dat* a následně simulovat sběr bod po bodu. Dalším krokem bude *projekce akvizičních bodů* na některou z projekčních rovin a následná *interpolace do rovnoměrné sítě*, která je potřebná pro *přepočet rozložení elektromagnetického pole* do vzdálené zóny.

## 7 NÁVRH INTERFACE

Interface programu je rozložen do několika oddělených panelů podle funkčnosti jednotlivých komponent (viz Obr. 14).

V zásadě jde o čtyři části: vlevo nahoře je prostor pro zadání konstantních hodnot uživatelem. V levé dolní části je prostor pro zobrazení rozložení akviziční roviny. Vpravo dole je vykreslena projekční rovina, tj. jedna ze stěn projekční krychle. Pravá horní část je vyčleněna pro vykreslení transformovaného rozložení v jiných vzdálenostech, než pro jaké je provedeno měření.

Velikost okna je dimenzována pro monitor 1024x768 a spustit lze jen jedno okno zároveň – při pokusu o spuštění okna v době, když je již jedno otevřeno se objeví chybový dialog a aktivita se předá předchozímu oknu.

### 7.1 Type of data

V tomto panelu uživatel nastavuje typ dat, který se má použít. Výchozím stavem je generování a sběr syntetických dat. V případě, že se výběr změní, vyvolá se informační dialog oznamující danou změnu. Pokud jsou vybrána reálná data, pak se v průběhu činnosti programu testuje, zda jsou data přítomna na sériovém portu PC. Program však není pro tento případ testován, tato možnost má být pouze brána v úvahu a celková struktura programu má být uzpůsobena tak, aby nebylo příliš komplikované do něj sběr reálných dat začlenit.

Výběrem z rolovacího menu *Function* se nastavuje typ zařízení, jehož vyzařování se bude simulovat. Je to název funkce, jejíž \*.m soubor je umístěn v adresáři *Simulations* aktuálního adresáře, ve kterém je soubor *anfa.m*. Po spuštění programu se projde adresář *Simulations* a názvy všech souborů v něm se zobrazí v rolovacím menu. Jako výchozí je nastaven soubor funkce *dipole\_nf*. Případné další soubory bude možno vkládat jako moduly, které musí splňovat požadavky na kompatibilitu, tj. musí mít stejnou hlavičku a výpočet elektromagnetických složek musí probíhat ve sférických souřadnicích (viz kap. 8 Výpočet složek elektromagnetického pole).

Poziční odchylky simulovaného měřicího zařízení pro každou osu souřadného systému lze nastavit ve třech editačních polích. Tyto hodnoty jsou použity jako meze výpočtu náhodné chyby při určení přesné polohy snímacího bodu (viz kap. 9 Akvizice).

The screenshot displays the ANFA program interface, which is organized into several functional panels:

- Type of data:** Includes radio buttons for 'Synthetic data' (selected) and 'Real data'. A 'Function' dropdown menu is set to 'apdlig.m'. Below are input fields for 'Err\_x[m]', 'Err\_y[m]', and 'Err\_z[m]', all containing the value '0.0125'.
- Frequency:** Contains input fields for 'fmin[Hz]' (3e+008), 'fmax[Hz]' (6e+008), and 'fstep[Hz]' (1e+008).
- Acquisition Control:** Features buttons for 'New', 'Start', 'Delete', and 'Stop', along with a list box for managing data sets.
- Projection Box:**
  - 'Select frequency:' dropdown set to '300000...'.
  - 'Plane orientation:' dropdown set to 'Front'.
  - 'Lower left corner:' section with 'x-coordination:' (-0.5 m), 'y-coordination:' (-0.5 m), and 'z-coordination:' (-0.5 m).
  - 'Cube dimension:' section with 'x-dimension:' (1 m), 'y-dimension:' (1 m), and 'z-dimension:' (1 m).
- Transformed Plane:** A large empty rectangular area for displaying transformed data.
- Acquisition Plane:** A large empty rectangular area for displaying acquisition data, with a 'Set coordinates' button at the bottom.
- Projection Plane:** A large empty rectangular area for displaying projection data, with buttons for '2D', '3D', and 'Surface' at the bottom.

Obr. 14: Interface programu ANFA po spuštění

## 7.2 Frequency

Zde uživatel zadává frekvenční rozsah v Hz, pro který bude elektromagnetické pole vypočítáváno. Tři hodnoty editačních polí tvoří vektor s lineárním rozložením podle zadaného frekvenčního kroku. Pro každý frekvenční krok se v módu syntetických dat počítají hodnoty celé roviny. Od zadané frekvence, resp. vypočítané vlnové délky se odvíjí hustota rozložení generovaných dat tak, aby byl zajištěn dostatek akvizčních vzorků pro oblast ve vzdálenosti  $\lambda/20$ , která byla shledána jako dostačující vzhledem k množství dat a vzorkovacímu teorému.

Po ukončení akvizice lze v rozbalovacím menu *Select frequency* panelu *Project Box* vybrat konkrétní frekvenci z rozsahu a posoudit tak, je-li pro tuto frekvenci dostatek akvizčních bodů.

### 7.3 Acquisition control a Acquisition Plane

Zde se ovládá generování nové akviziční plochy tlačítkem *New*, mazání *Delete*, spouštění měření na aktuální ploše tlačítkem *Start*, a zastavení *Stop*.

Po stisku tlačítka *New* se založí nový záznam akviziční plochy s automaticky generovaným názvem, který se objeví jako nová položka listboxu. Zároveň se v panelu *Acquisition plane* vykreslí osy s výchozí akviziční rovinou.

Stiskem tlačítka *Set coordinates* lze měnit souřadnice bodů *ABC*, které rovinu definují. Pro tyto účely se spouští nový potvrzovací dialog (viz Obr. 15).

Zde se zadávají souřadnice v globálním systému, v jehož počátku je měřené zařízení. Výchozí hodnoty jsou nastaveny pro projektování na vertikální rovinu *Front*, tj.  $A = [-0,5; -0,5; -0,5]$ ,  $B = [0,5; -0,5; -0,5]$ ,  $C = [0,5; -0,5; 0]$ . Po stisku tlačítka *Apply* se vypočítají rotační úhly lokálního systému  $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$ , a předají se mateřské aplikaci *ANFA*. Výpočet rotačních úhlů je poměrně komplikovaný, a proto je popsán v samostatné podkapitole 9.3.

a1x	a1y	a1z	Thx
-0.5	-0.5	-0.5	Thy
b1x	b1y	b1z	Thz
0.5	-0.5	-0.5	Apply
c1x	c1y	c1z	OK
0.5	-0.5	0	Cancel

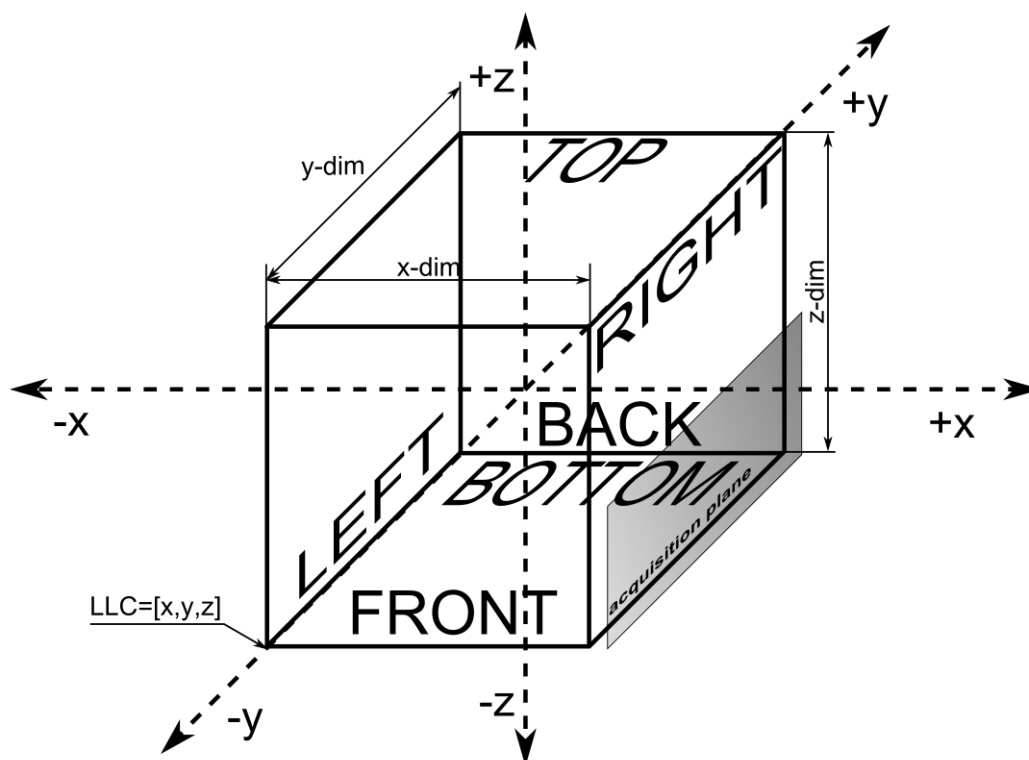
Obr. 15: AP dialog box

Stisk tlačítka *Start* se povolí po založení první akviziční roviny stiskem tlačítka *New* a po výběru projekční plochy z rolovacího menu v panelu *Projection box*. Teprve až jsou obě podmínky splněny, je možné zahájit akvizici, protože zároveň s akvizicí dat je spuštěna i projekce na stěnu projekční krychle (viz Obr. 16).

### 7.4 Projection box a Projection plane

Tento panel slouží k definování zmíněné projekční krychle kolem měřeného zařízení. Tato krychle je určena rozměry svých stěn ve směrech os souřadného systému, tj. *xyz-dimensions* a polohovým vektorem jednoho z rohových bodů – zvolen levý spodní roh, blíže k pozorovateli (viz LLC=Lower Left Corner na Obr. 16). Výchozí souřadnice

rohového bodu jsou  $[-0,5; -0,5; -0,5]$ , rozměr krychle je 1 m ve směru každé osy, to znamená, že AUT (Antenna Under Test) je ve středu krychle.

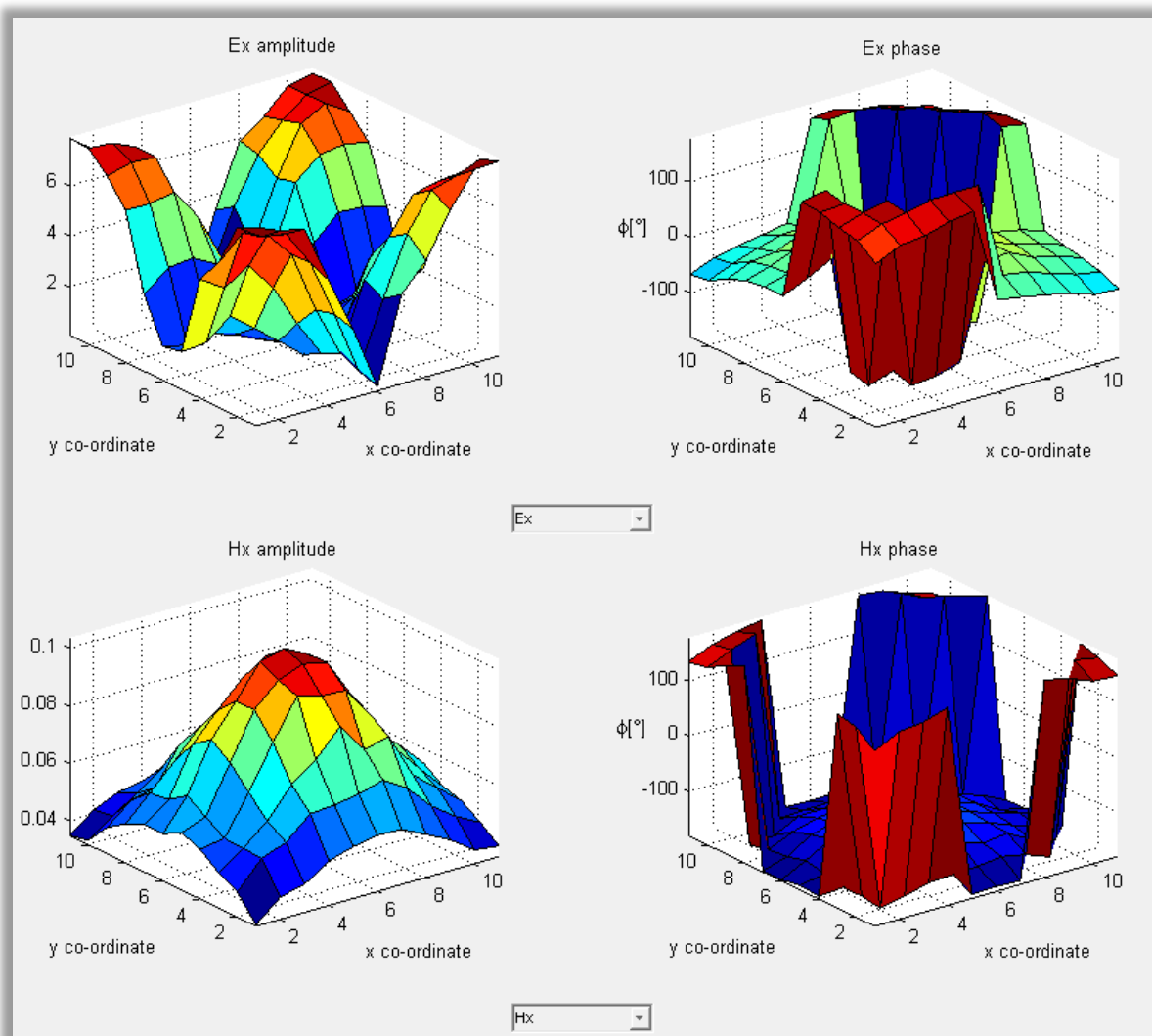


Obr. 16: Projekční krychle

Rolovací menu *Plane orientation* určuje, na kterou stěnu krychle se budou měřená data projektovat. Značení stěn je dle obrázku Obr. 16 vzhledem k pozorovateli v záporném směru osy  $y$ . Po výběru jedné ze stěn se do panelu *Projection plane* vykreslí osy projekční roviny ve výchozím 2D pohledu a s červeným prokreslením. To symbolizuje nedostatek dat pro interpolaci na ploše. Až po startu akvizice se postupně projektují naměřené body a po jejím ukončení je kolem nich vykreslena modrá zóna označující dostatek dat pro přilehlou oblast.

Osy projekční roviny lze přepínat mezi 2D a 3D danými tlačítky, přičemž oba pohledy mají svou funkci. Trojrozměrný pohled přispívá k lepší orientaci při zadávání pozičních hodnot akvizčních ploch a projekční krychle. Dvojitrozměrný pohled je zobrazen během akvizice dat a jsou do něj vykreslovány pozice měřených bodů.

Po ukončení akvizice je možno interpolovaný průběh zobrazit jako povrchový graf tlačítkem *Surface*. Po jeho stisku se otevře okno *Projected surface plots* se čtveřicí os pro porovnání jednotlivých složek intenzit elektrického i magnetického pole a jejich fází. Po výběru některé ze složek z rolovacích menu se daná veličina vykreslí do příslušných os. Vlevo je vynášena amplitudová, vpravo fázová závislost.



Obr. 17: Okno Projected surface plots

## 7.5 Transformed plane

Po projekci a interpolaci dat je projekční matice v takovém tvaru, který umožňuje transformaci dat do vzdálené zóny. V tomto panelu se po ukončení akvizice zobrazí osy a editační pole pro zadání souřadnic pozorovacího bodu, do kterého se data přepočítají. Poloha bodu se určuje jeho vzdáleností od zdrojové plochy, tedy od projekční roviny, ve sférických souřadnicích (vzhledem ke globálnímu systému)  $r, \vartheta, \varphi$  v metrech, resp. stupních. Uživatel však zadává jen vzdálenost  $r$ , protože úhly  $\vartheta, \varphi$  jsou pevně dané programově podle roviny, ze které je přepočítáváno.

Po stisku tlačítka *Transform* se data přepočítají a výsledek se vykreslí do příslušných os. Přepočet může trvat několik desítek vteřin podle výpočetní rychlosti HW.



## 8 VÝPOČET SLOŽEK ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

Při generování dat o elektromagnetickém poli je potřeba znát vyzařovací rovnice simulovaného zařízení. Ty jsou získány měřením jeho charakteristik a pro základní antény jsou známy.

### 8.1 Elementární funkce

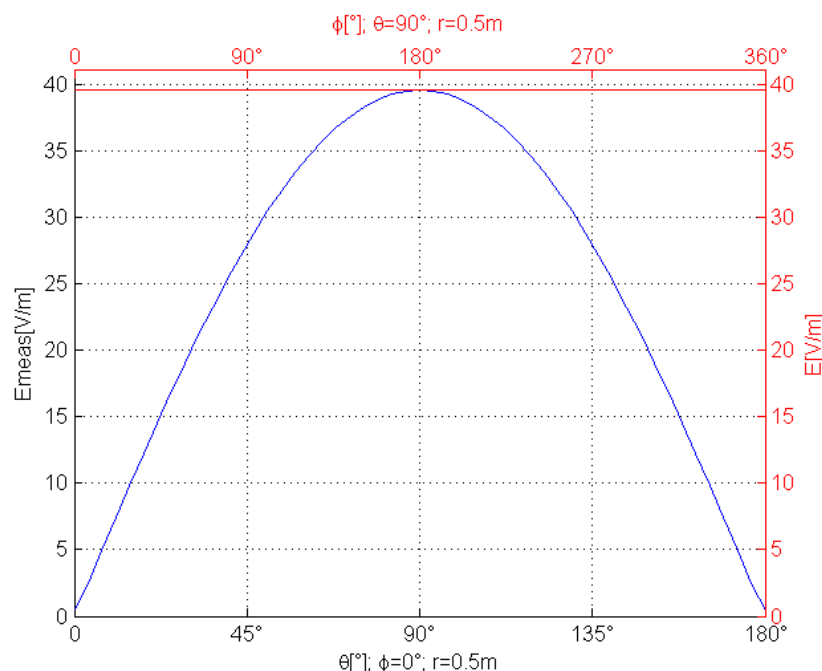
Pro naše účely používáme drátový dipól, který je definován rovnicemi (7) až (10) ve sférickém souřadném systému  $(r, \vartheta, \varphi)$ . Výpočet složek elektrické a magnetické intenzity v bodě o zadaných souřadnicích provádí funkce *dipole\_nf*. Její parametry jsou v Tab. 1.

Výpočet je proveden podle zmíněných rovnic, funkce je upravena a testována i pro vstup matic, ačkoli v programu se toho nevyužívá.

Tab. 1: Parametry funkce *dipole\_nf*

<b>Vstup</b>	$r, \theta, \phi, Params$
<b>Výstup</b>	$E_r, E_\theta, E_\phi, H_r, H_\theta, H_\phi$
<b>Proměnná</b>	<b>Popis</b>
$r, \theta, \phi$	Sférické souřadnice bodu v prostoru (vzdálenost, elevace, azimut)
$Params$	$[f, I, L]$ vektor konstant (frekvence vlnění, proud dipólem, velikost dipólu)
$Z_0$	Impedance volného prostoru
$c$	Rychlost světla
$k$	Vlnové číslo $2\pi/\lambda$
$E_r, E_\theta, E_\phi$	Sférické složky vektoru intenzity elektrického pole
$H_r, H_\theta, H_\phi$	Sférické složky vektoru intenzity magnetického pole

Správnost vzorců i podle nich napsané funkce dokazuje graf na Obr. 18. Ten zobrazuje závislost elektrické intenzity na úhlu elevace  $\vartheta$  při nulovém azimutu a konstantní vzdálenosti, resp. závislost na azimutu  $\varphi$  při elevaci  $\vartheta = 90^\circ$  a konstantní vzdálenosti. Vidíme, že pole je maximální při  $\vartheta = 90^\circ$  a minimální nad a pod dipólem. Zároveň je na azimutu  $\varphi$  nezávislé, což se shoduje s teorií o drátovém dipólu.



Obr. 18: Závislost intenzity elektrického pole drátového dipólu na poloze

## 8.2 Generování elektromagnetických složek na akviziční rovině

Sběr dat se uskutečňuje v odlišném souřadném systému, a očekává se, že rovnice pro simulaci rozložení pole kolem antény jsou ve sférických souřadnicích. Pro převod mezi těmito systémy je určena funkce *geteh\_acqplane*.

Tab. 2: Parametry funkce *geteh\_acqplane*

<b>Vstup</b>	<i>xxa,yya,zza,FName,Params,Pxyz_acq,thx,thy,thz</i>
<b>Výstup</b>	<i>Ex,Ey,Ez,Hx,Hy,Hz,Pxyz</i>
<b>Proměnná</b>	<b>Popis</b>
<i>xxa,yya,zza</i>	Lokální souřadnice bodu v prostoru
<i>FName</i>	Název funkce, která pro daný bod počítá jednotlivé složky polí
<i>Params</i>	$[f,I,L]$ vektor konstant (frekvence vlnění, proud dipólem, velikost dipólu)
<i>Pxyz_acq</i>	Globální souřadnice počátku lokálního systému roviny
<i>thx,thy,thz</i>	Rotační úhly kolem os lokálního souř. systému
<i>sup_list</i>	Pole řetězců názvů podporovaných funkcí
<i>xyz_</i>	Vektor nerotovaných lokálních souřadnic po převodu do fci <i>convca3cn</i>
<i>x,y,z</i>	Globální kartézské souřadnice měřeného bodu
<i>r,th,phi</i>	Globální sférické souřadnice měřeného bodu
<i>Er,Etheta,Ephi</i>	Sférické složky vektoru intenzity elektrického pole
<i>Hr,Hth,Hphi</i>	Sférické složky vektoru intenzity magnetického pole
<i>Ex,Ey,Ez</i>	Kartézské složky vektoru intenzity elektrického pole
<i>Hx,Hy,Hz</i>	Kartézské složky vektoru intenzity magnetického pole
<i>Pxyz</i>	Poloha měřeného bodu v globálních souřadnicích

Ta podporuje jen výpočetní funkce, jejichž název je v poli řetězců *sup\_list*. Na tento seznam je v těle funkce testována proměnná *FName* obsahující název výpočetní funkce. Zdrojové soubory funkcí musí být umístěny v adresáři *Simulations*.

Funkce *geteh\_acqplane* nejdříve převádí souřadnice akvizčního bodu (v systému  $x'y'z'$ ) na sférické souřadnice v globálním systému a pro ty vypočítává složky elektromagnetického pole zvolenou přichystanou funkcí.

Postup je takový, že se z úhlů  $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$ , o které je lokální systém  $x'y'z'$  pootočený vypočítá pozice nerotovaného systému použitím funkce *convca3cn*. Výpočet rotačních úhlů je poměrně komplikovaný, a proto je popsán v samostatné podkapitole 9.3.

Součtem souřadnic akvizčního bodu v lokálním systému a globálních souřadnic počátku lokálního systému získáme kartézské souřadnice akvizčního bodu v globálním systému. Ty se převedou na sférické funkcí *convcasp*, a předají se jako argumenty zvolené výpočetní funkci (*dipole\_nf*).

Posledním krokem funkce *geteh\_acqplane* je přepočet výsledných složek elektromagnetického pole ze sférických na kartézské funkcí *convtoca*.

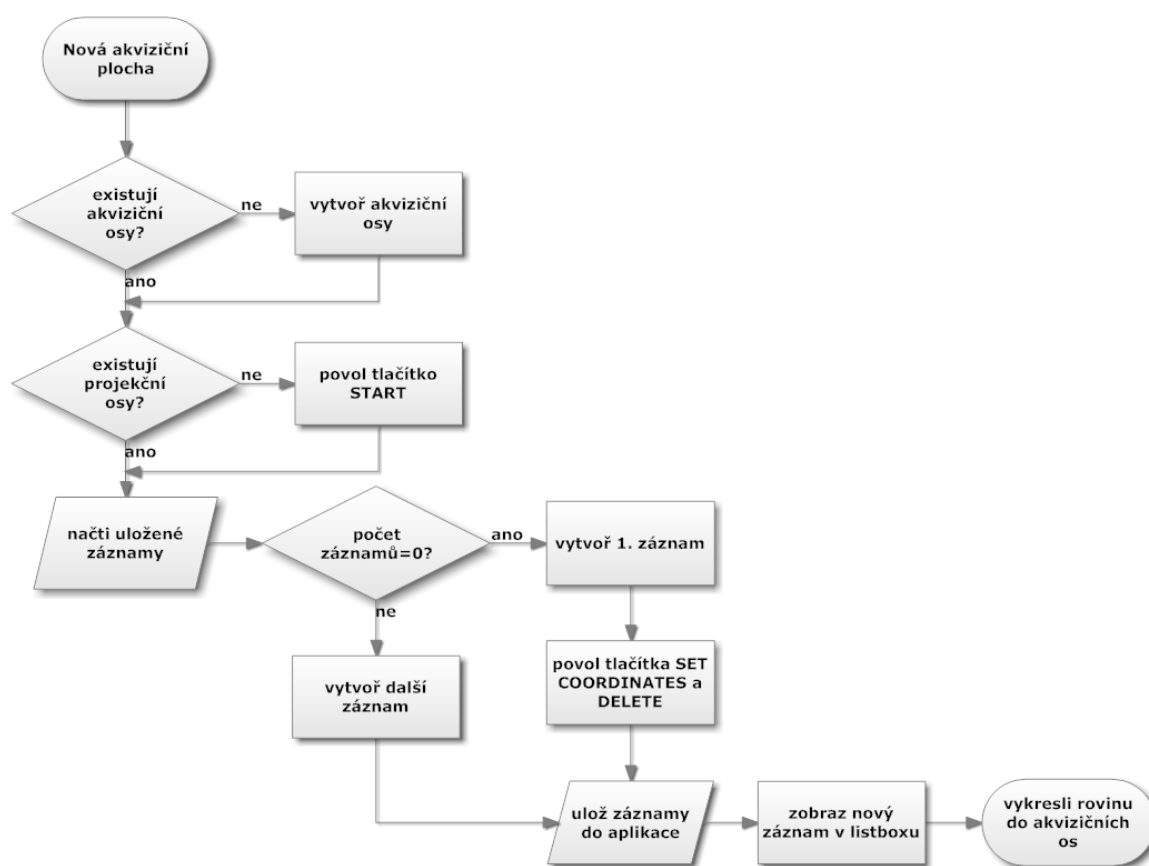
Funkce vrací spolu se složkami pole i globální souřadnice bodu, pro které jsou spočteny – to pro kontrolu, že výpočet úhlů proběhl v pořádku, protože v hlavním programu se pro vykreslení bodu na akvizční rovinu používají právě tyto souřadnice.

Ukázky generování elektromagnetických složek na různých rovinách funkcí *geteh\_acqplane* je součástí kapitoly 12.

## 9 AKVIZICE

### 9.1 Systém akvizičních záznamů

Akviziční rovina se vytváří po stisku tlačítka *New* panelu *Acquisition control*. V programu je jako vlastnost *Callback* tohoto tlačítka přiřazeno volání *anfa('anfa\_newacq')*, které znovu zavolá mateřský program s argumentem *action='anfa\_newacq'*. Na tento argument je aplikace testována, a pokud se rovná právě *'anfa\_newacq'*, spustí se část programu uvozená podmínkou *elseif strcmp(action,'anfa\_newacq')*, kterou popisuje následující diagram.



Obr. 19: Vývojový diagram vytvoření nové akviziční roviny

Akviziční údaje se v programu ANFA uchovávají ve formě tzv. buněčného pole (typ *cell*) *acq\_rec* o rozměrech  $1 \times \langle \text{počet akvizičních ploch} \rangle$ . Do každé buňky tohoto pole lze umístit jakoukoli datovou matici (vektor) o libovolném rozměru. Každá tato buňka odpovídá záznamu o jedné akviziční ploše, který má rozměry  $1 \times 7$ . Každý ze sedmi sloupců má následující význam.

1. Název...automaticky generovaný řetězec tvaru '*acq.no.<číslo\_záznamu>*'
2. *mx\_abc*...vektor (1x9), který odpovídá souřadnicím bodů *ABC*
3. *Err\_Pos*...vektor (1x3), kde jsou uloženy poziční chyby měřicího zařízení
4. *mx\_EH\_acq*...3-D matice tvaru (Np,6,Nf), kde jsou uložena generovaná data;  
Np odpovídá počtu generovaných bodů;  
Nf počtu frekvencí;  
každému z generovaných bodů náleží šest složek elektromagnetického pole  $[E_r, E_\theta, E_\phi, H_r, H_\theta, H_\phi]$ , a to pro každou frekvenci zadaného frekvenčního rozsahu.
5. *mx\_xcoord\_acq*...vektor ve tvaru (1,Np) odpovídající globálním souřadnicím ve směru osy *x*
6. *mx\_ycoord\_acq*...vektor ve tvaru (1,Np) odpovídající globálním souřadnicím ve směru osy *y*
7. *mx\_zcoord\_acq*...vektor ve tvaru (1,Np) odpovídající globálním souřadnicím ve směru osy *z*

Pro účely práce s akvizičními rovinami je uchovávána informace o počtu akvizičních ploch (*acq\_rec\_count*), které byly vytvořeny (z důvodů automatického pojmenovávání záznamů), a o aktuální ploše vybrané z listboxu (*acq\_rec\_actual*).

## 9.2 Proces akvizice dat

Po stisku tlačítka Start se spouští generování datové matice, ze které se následně v pravidelných intervalech čtou, a zároveň projektují akviziční body. V programu je tato část uvozena *elseif strcmp(action,'anfa\_startacq')*. Zde se vytváří matice *mx\_EH\_acq*, poziční vektory *mx\_<osa>coord\_acq*, a objekt časovače, který synchronizuje celý proces sběru dat periodou 20 ms, která po zkušenostech s rychlostí programu při akvizici představuje rozumný kompromis.

Časovač má řadu nastavitelných vlastností umožňující široké použití. Jednou z nich je *BusyMode*, která definuje chování časovače v případě, když je nucen spustit periodickou obslužnou funkci *TimerFcn* v okamžiku, kdy ještě neukončil tu předchozí. Může ji buď zahodit (hodnota *drop*), vyvolat chybové hlášení (*error*), anebo zařadit k pozdějšímu provedení (*queue*) – náš případ. To může časem vést k vykreslování několik bodů najednou, protože je bohužel obvyklé, že s rostoucím počtem vykreslených bodů stoupá i výpočetní čas.

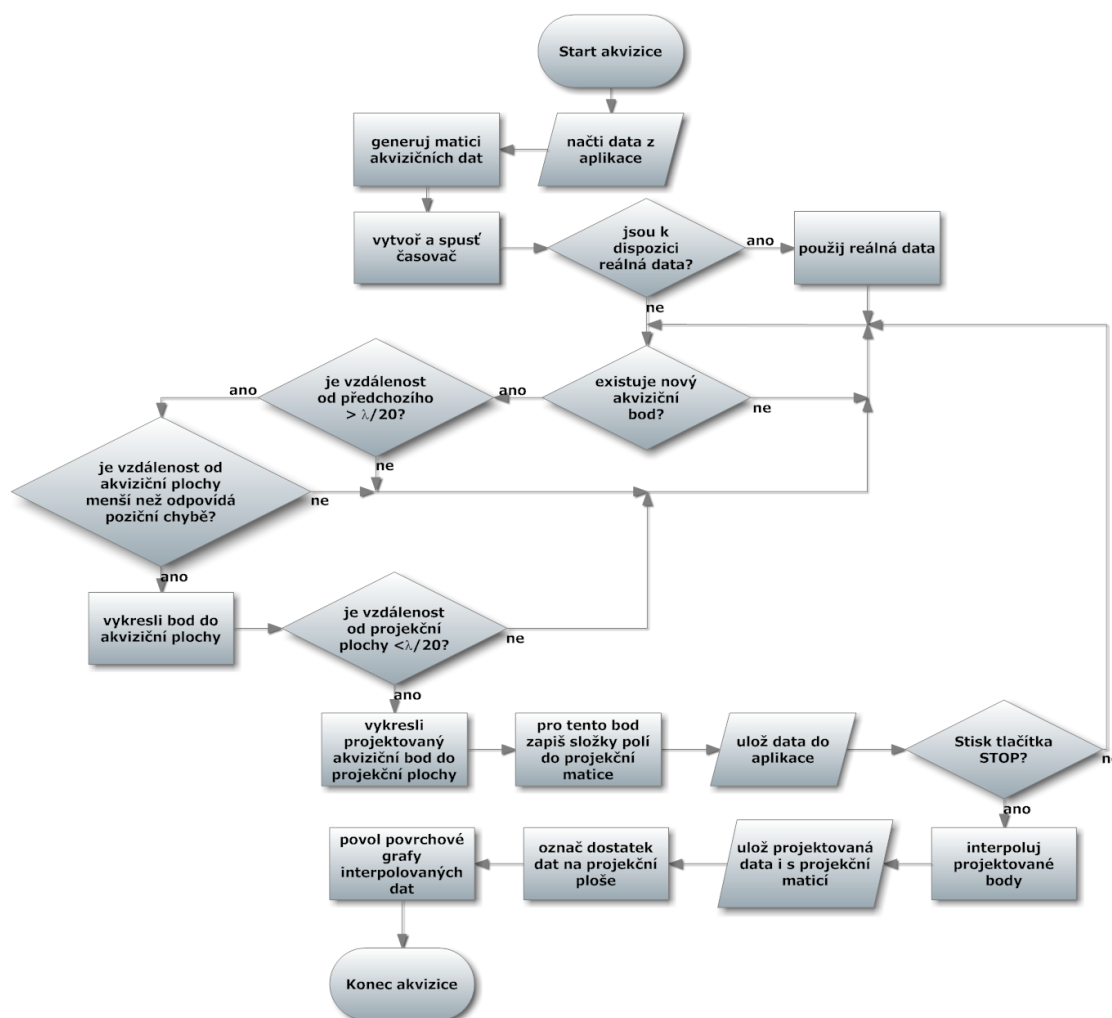
V obslužné funkci (vlastnost *TimerFcn*) časovače, *timertick* je obsažen rozhodovací proces, který určuje, za jakých podmínek je aktuální akviziční bod akceptován, projektován a vykreslen do příslušných os.

Platí, že akviziční bod je vykreslen do akvizičních os, pokud je jeho vzdálenost od akviziční roviny *dist2* menší než velikost vektoru pozičních chyb - rovnice (31), a zároveň je jeho vzdálenost od předchozího bodu  $dist3 > \lambda/20$ . To bude důležité pro vykreslování reálných dat, kdy bude s periodou řádově několika ms do programu posíláno velké množství bodů. Tak bude bod akceptován až po posunutí měřicího zařízení mimo polohu předešlého bodu.

$$dist2 < \sqrt{Err\_Posx^2 + Err\_Posy^2 + Err\_Posz^2} \quad (31)$$

Projektovat tento bod do projekčních os má smysl pouze tehdy, je-li jeho vzdálenost od projekční roviny  $dist1 > \lambda/20$ .

Akviziční proces charakterizuje následující diagram.

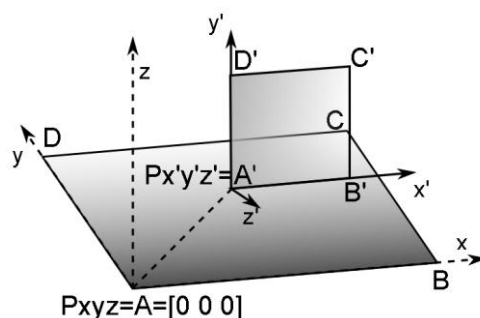


Obr. 20: Proces akvizice dat

Po ukončení akvizice tlačítkem Stop je časovač vymazán, data se interpolují, a kolem projektovaných bodů se funkcí *rectangle* vykreslí modrá oblast o velikosti  $\lambda/20$ , znázorňující dostatek dat v okolí bodu.

### 9.3 Systém výpočtu úhlů natočení akviziční plochy

Tím, že uživatel v *AP dialogu* přímo zadává globální souřadnice bodů  $A'B'C'$  (bod  $D'$  je dopočítáván), které určují libovolný čtyřúhelník, je výpočet úhlů, o které je akviziční plocha pootočená vůči referenční poloze  $ABCD$  (viz. Obr. 21), do jisté míry komplikovaný.

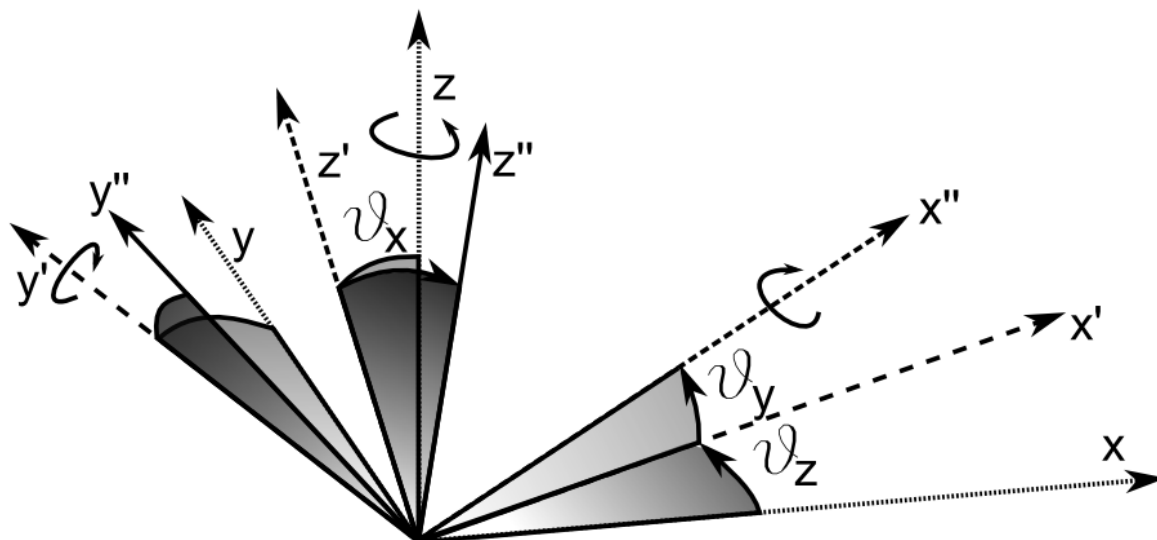


Obr. 21: Relativní poloha akviziční plochy vůči globálnímu s. s.

Situace je taková, že známe polohu dvou vektorů  $\overrightarrow{AB}$ ,  $\overrightarrow{AD}$  v prostoru. Ty jsou vůči sobě libovolně ložené, svírají libovolný úhel, ale mají společný bod A. Z těchto dvou vektorů je potřeba udělat systém tří na sebe kolmých vektorů představujících směry os  $x'y'z'$ .

Jako nejjednodušší se jeví určit bod A jako počátek systému  $x'y'z'$ , a směr vektoru  $\overrightarrow{AB}$  jako směr osy  $x'$ . Vektor  $z'$  získáme vektorovým součinem  $\overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AD}$  a vektor  $y'$  součinem  $z' \times \overrightarrow{AD}$ . Z principu vektorového součinu je důležité zachovat pořadí vektorů. Z praktických důvodů vytvoříme z výsledných vektorů jednotkové vektory. V tomto okamžiku známe polohu všech tří vektorů pootočeného systému.

Ke zpětnému určení úhlů rotace vzhledem k výchozí poloze je potřeba najít takový rotační systém, který umožňuje otáčení kolem všech třech os, proto nevystačíme pouze se sférickým systémem.

Obr. 22: Eulerovy úhly  $\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z$  v konvenci Z-Y-X

Po řadě pokusů a testování se jeví jako nejvhodnější vycházet ze systému Eulerových úhlů dle [14] v konvenci Z-Y-X, která určuje pořadí otáčených os. Nejprve se tedy otáčí kolem osy  $z$  o úhel  $\vartheta_z$ , potom kolem již pootočené osy  $y'$  o úhel  $\vartheta_y$  a na závěr kolem osy  $x''$  o  $\vartheta_x$ , kde  $x''$  je poloha osy  $x$  po otočení kolem os  $z$  a  $y'$  (viz Obr. 22).

Rotace bodu kolem jednotlivých os je realizována násobením souřadnic otáčeného bodu rotačními maticemi  $R_z, R_y, R_x$ .

Otočení kolem všech třech os souřadného systému symbolizuje výsledná transformační matice  $T_{xyz \rightarrow x'y'z'}$  dle symboliky znázorněné na Obr. 21, tj.  $x'y'z'$  zde představuje pootočený souřadný systém.

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_z & \sin \vartheta_z & 0 \\ -\sin \vartheta_z & \cos \vartheta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (32)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_y & 0 & -\sin \vartheta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \vartheta_y & 0 & \cos \vartheta_y \end{bmatrix}; \quad (33)$$

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \vartheta_x & \sin \vartheta_x \\ 0 & -\sin \vartheta_x & \cos \vartheta_x \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$T_{xyz \rightarrow x'y'z'} = R_z \cdot R_y \cdot R_x \quad (35)$$

V našem případě se ale pohybujeme v systému  $x'y'z'$ , a body akviziční roviny jsou známy právě v tomto systému. Potřebujeme tedy transformovat ze systému  $x'y'z'$  do  $xyz$ , proto použijeme transponovanou transformační matici  $T_{x'y'z' \rightarrow xyz}$ :



$$\begin{bmatrix} \cos \vartheta_z \cos \vartheta_y & -\sin \vartheta_z \cos \vartheta_y & \sin \vartheta_y \\ \sin \vartheta_z \cos \vartheta_x + \cos \vartheta_z \sin \vartheta_y \sin \vartheta_x & \cos \vartheta_z \cos \vartheta_x - \sin \vartheta_z \sin \vartheta_y \sin \vartheta_x & -\cos \vartheta_y \sin \vartheta_x \\ \sin \vartheta_z \sin \vartheta_x - \cos \vartheta_z \sin \vartheta_y \cos \vartheta_x & \cos \vartheta_z \sin \vartheta_x + \sin \vartheta_z \sin \vartheta_y \cos \vartheta_x & \cos \vartheta_y \cos \vartheta_x \end{bmatrix} \quad (36)$$

Souřadnice bodu definovaného v pootočeném kartézském systému přepočítáme do nerotovaného kartézského systému vztahem (37), který je tělem transformační funkce *convca3cn* zmíněné v kap. 8.2.

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = T_{x'y'z' \rightarrow xyz} \cdot \begin{bmatrix} P_{x'} \\ P_{y'} \\ P_{z'} \end{bmatrix} \quad (37)$$

Výpočet rotačních úhlů je realizován vnitřní funkcí *eval\_angles* souboru *apdlg.m*, který vytváří dialog pro zadání souřadnic akviziční plochy.

Úhel  $\vartheta_z$  je svírána vektory  $x$  a  $x'$ , pokud ale známe jen konečnou polohu, tj. vektor osy  $x''$ , musíme jej promítat do roviny  $xy$  vynulováním třetí složky vektoru. Z průmětu vytvoříme jednotkový vektor dle vztahu  $uni_{x_{xy}} = x' / \|x'\|$ , jehož  $x$ -ová složka určuje úhel  $\vartheta_z$ .

$$\vartheta_z = \cos^{-1} uni_{x_{xy}}(1) \quad (38)$$

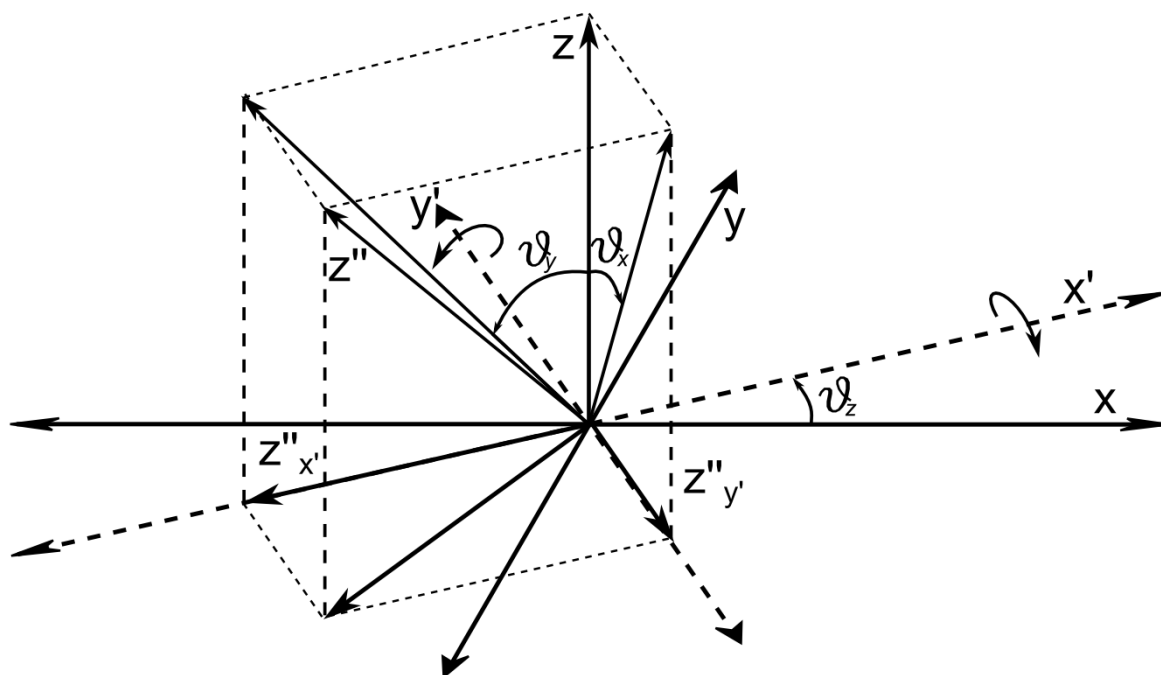
Určení úhlů  $\vartheta_y$  a  $\vartheta_x$  je složitější vzhledem k tomu, že obě osy  $y''$  a  $z''$  už byly z výchozí polohy vychýleny dvakrát a průmět na některou z kolmých stěn  $xy$ ,  $yz$  nebo  $xz$  se ukázal jako nefunkční. Proto se jako nejrozzumnější řešení ukázala projekce vektoru  $z''$  do šikmého systému  $x'y'$ , (náčrt na Obr. 23) neboť úhel  $\vartheta_z$ , který tento systém definuje, známe. Souřadnice  $z''_x, z''_y$  vektoru  $z''$  transformujeme na  $z''_{x'}, z''_{y'}$  dle vztahu:

$$\begin{bmatrix} z''_{x'} \\ z''_{y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z''_x \\ z''_y \end{bmatrix} \quad (39)$$

Úhel  $\vartheta_y$ , resp.  $\vartheta_x$  vypočítáme podle náčrtu na Obr. 23 podílem  $z''_z$  ku velikosti přepony na straně  $z''_{x'}$ , resp.  $z''_{y'}$  pomyslného kvádru vztahy:

$$\vartheta_y = \cos^{-1} \left( \frac{z''_z}{\sqrt{z''_{x'}^2 + z''_z^2}} \right) \quad (40)$$

$$\vartheta_x = \cos^{-1} \left( \frac{z''_z}{\sqrt{z''_{y'}^2 + z''_z^2}} \right) \quad (41)$$



Obr. 23: Projekce vektoru  $z''$  do roviny  $x'y'$

Tato interpretace nicméně není zcela univerzální. Aby byly takto geometricky vypočítané úhly kompatibilní s rotačními maticemi a zpětný přepočet souhlasil s reálnou polohou akviziční roviny, musí splňovat požadavky konvence, podle které jsou tyto matice odvozeny. Ta určuje, kromě pořadí os, kolem kterých je se systémem otáčeno, také orientaci úhlů.

Vychází se z pravidla pravé ruky, s palcem směřujícím ve směru otáčené osy. Kladný směr úhlu  $\vartheta_z$  je v rovině  $xy$  standardně ve směru od  $x$  k  $y$ . Pro úhel  $\vartheta_y$  je to směr od  $z$  k  $x$ , a pro úhel  $\vartheta_x$  od  $y$  k  $z$ .

Tyto stavy ošetříme změnou znaménka úhlů  $\vartheta_y$ ,  $\vartheta_x$  podle orientace vektoru  $z''$ , tzn. při přechodu jeho  $x'$ -ové složky do záporná, je úhel  $\vartheta_y$  záporný, při přechodu jeho  $y'$ -ové složky do kladná, je záporný úhel  $\vartheta_x$ . Při pohledu na Obr. 23 je tedy  $\vartheta_z$  kladný,  $\vartheta_y$  záporný, a  $\vartheta_x$  kladný.

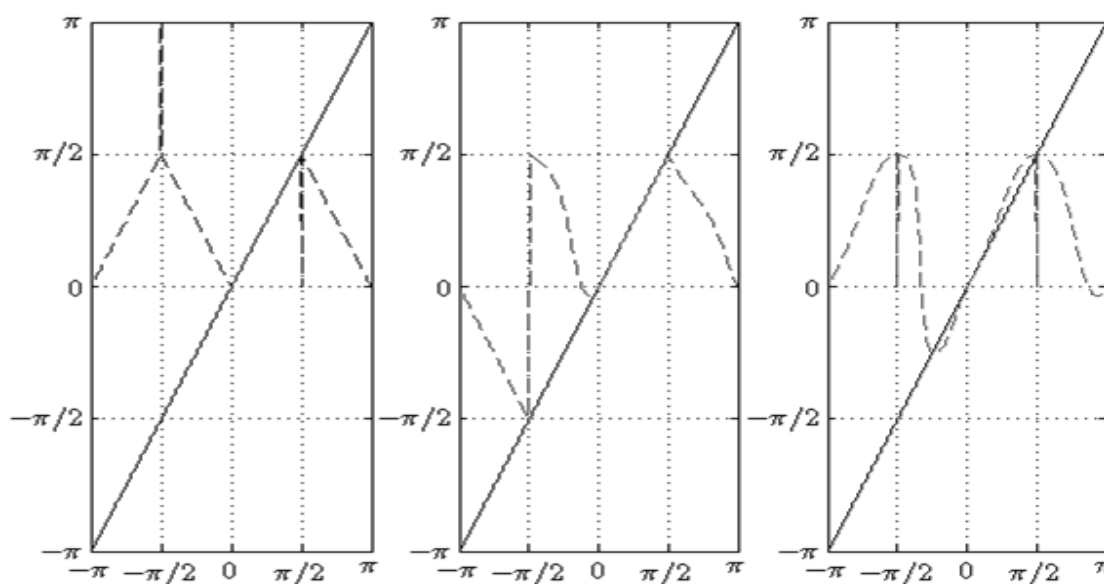
Další komplikace nastává, když je akviziční plocha nastavena vertikálně. Tehdy je vektor  $z''$  položený horizontálně, tj. jeho vertikální složka  $z''_z$  je nulová, a proto oba úhly  $\vartheta_y$ ,  $\vartheta_x$  dle vzorců (40), (41) vychází na  $90^\circ$ , ačkoli k tomu dojde v případě, kdy je jen jeden z těchto úhlů roven  $90^\circ$ . Pokud je vektor  $z''$  zároveň rovnoběžný s osou  $y$ , resp. osou  $x$ , pak výpočty nejsou definované, protože odmocňujeme nulu. Ošetření tohoto stavu spočívá v nastavení  $\vartheta_y = 0$ , pokud  $z''_{x'} \sim 0$ , resp.  $\vartheta_x = 0$ , pokud  $z''_{y'} \sim 0$ .

### 9.3.1 Posouzení přesnosti výpočtu rotačních úhlů

Přesnost navrhnutého geometrického výpočtu rotačních úhlů jsem ověřil funkcí *angles\_test.m*. Funkce je okomentovaná a poskytuje několik nastavení bez nutnosti dalšího zásahu do kódu.

V testu vytvářím rovinu *ABCD* stejně jako akviziční plochu. Touto plochou rotuji kolem všech třech os o stejný úhel v kroku  $\pi/100$ . Následně jsou úhly spočteny stejným algoritmem jako v programu. Z výsledků na Obr. 24 je patrné, že výpočet je za těchto podmínek věrohodný jen intervalu  $(0, \pi/2)$ , přičemž  $\vartheta_x$  i na tomto intervalu projevuje určitou nelinearitu.

Je to způsobeno jak vlastnostmi kosinu, tak tím, že po překonání  $\pi/2$  se dostáváme do oblastí, pro které zvolený geometrický výpočet jednoduše neplatí, a ošetřit všechny stavy tak, aby výsledek vycházel na všechny podmínky je dle mého názoru nereálné.



Obr. 24: Analýza přesnosti výpočtu rotačních úhlů

(zleva  $\vartheta_z$ ,  $\vartheta_y$ ,  $\vartheta_x$ )

Jiná situace nastává při otáčení pouze kolem jedné osy, kdy ostatní úhly jsou nulové. V takovém případě dochází ke korelaci na celém intervalu  $(-\pi, \pi)$  pro úhly  $\vartheta_z$ ,  $\vartheta_x$ , resp. na intervalu  $(-\pi/2, \pi/2)$  pro úhel  $\vartheta_y$ .

Nicméně pro naše účely je tento geometrický výpočet dostačující při zavedení určitých pravidel při akvizici dat a zakládání akviziční roviny ve vztahu k přepočtu pole do vzdálené zóny (viz kap. 12).

## 10 PROJEKCE

Systém projekce dat byl z větší části popsán v kapitole 7.4 *Projection box a Projection plane*. Vždy se projektuje z akviziční roviny na jednu ze stěn projekční krychle a to pouze, pokud vzdálenost mezi původním a projektovaným bodem není větší než  $\lambda/20$ , a pokud projektovaný bod spadá do oblasti mezi hraniční body projekční plochy.

Body z akviziční roviny projektujeme za účelem převodu dat do rozdílných vzdáleností. Proto potřebujeme plochu kolmou na zdroj vyzařování a rovnoměrné rozložení dat na ní. Tomu vyhovuje zavedení zmíněné krychle.

### 10.1 Systém organizace projektovaných dat

Projektovaná data jsou podobně jako akviziční záznamy uchovávány v buněčném poli o rozměrech 1x6, které zahrnuje všech šest stěn projekční krychle. V aplikaci má název *all\_mx\_proj*.

Každá z těchto buněk je další buněčné pole o rozměrech 1x6, které představují následující položky:

1. *mx\_xcoord\_proj* ... vektor ve tvaru (1,Np) odpovídající globálním souřadnicím ve směru osy  $x$ , kde Np je počet projektovaných bodů (který je pravděpodobně menší než počet akvizičních bodů)
2. *mx\_ycoord\_proj* ... vektor ve tvaru (1,Np) odpovídající globálním souřadnicím ve směru osy  $y$
3. *mx\_zcoord\_proj* ... vektor ve tvaru (1,Np) odpovídající globálním souřadnicím ve směru osy  $z$
4. *mx\_EH\_proj* ... datová matice ve tvaru (Np,6,Nf), kde Nf je počet frekvencí podle zadaného frekvenčního rozsahu. Stejně jako u akviziční matice existuje pro každý bod šest složek elektromagnetického pole, které je pro každou frekvenci rozdílné.
5. *proj\_pl* ... vektor o velikosti 1x9 obsahující 3D souřadnice třech bodů ABC, které určují projekční rovinu
6. *mx\_EH\_proj\_grid* ... datová matice ve tvaru (indy,indx,6,Nf), která představuje interpolovanou síť bodů pro každou složku pole a pro danou frekvenci. Matice je upravena pro vstup do prostorového grafu pro vybranou složku a frekvenci.

Na začátku programu jsou všechny položky buněčných polí prázdné matice, které se vytváří až v průběhu akvizice, resp. po jejím ukončení.

## 10.2 Kolmá projekce

Konečná verze programu k projekci používá klasickou kolmou projekci bez vazby na polohu AUT nebo ostatní akviziční roviny.

Kolmou projekci zajišťuje funkce *perp\_project*. Jejím výstupem jsou souřadnice bodu  $P$ , který je kolmým průmětem bodu  $a$  na rovinu *proj\_pl*, definovanou body  $A$ ,  $B$ ,  $C$  (viz Obr. 25Obr. 1).

Využíváme faktu, že obecná rovina je definovaná jak třemi body v prostoru, tak svým jedním bodem a normálovým vektorem. Tento normálový vektor nám určuje kolmý směr na rovinu, takže jej lze použít k definici přímky  $p$ , které náleží bod  $a$ , jež budeme projektovat, a která je kolmá na rovinu *proj\_pl*.

Máme-li tedy bod  $A = [x_A, y_A, z_A]$ , a normálu  $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ , pak rovinu definujeme jako:

$$x_A \cdot n_x + y_A \cdot n_y + z_A \cdot n_z + d = 0 \quad (42)$$

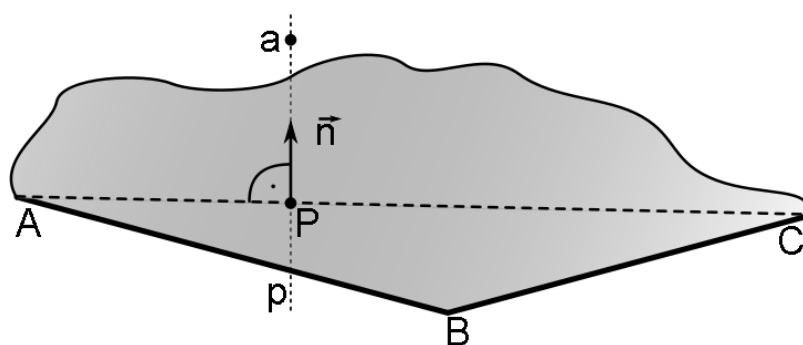
kde  $d$  je konstanta, kterou vyčíslíme dosazením souřadnic bodu  $A$ . Normálu počítáme jako vektorový součin vektorů  $\overrightarrow{BA}$  a  $\overrightarrow{BC}$ .

Bod  $P$ , tedy žádaný kolmý průmět, je průsečíkem přímky  $p$  a roviny  $ABC$ . Je definován za použití parametrické rovnice obecné přímky s parametrem  $t$ :

$$P = [x_a + t \cdot n_x; \quad y_a + t \cdot n_y; \quad z_a + t \cdot n_z] \quad (43)$$

Parametr  $t$  lze dosazením bodu  $P$  do rovnice roviny (42) určit rovnicí:

$$t = \frac{-d(x_a + y_a + z_a)}{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} \quad (44)$$



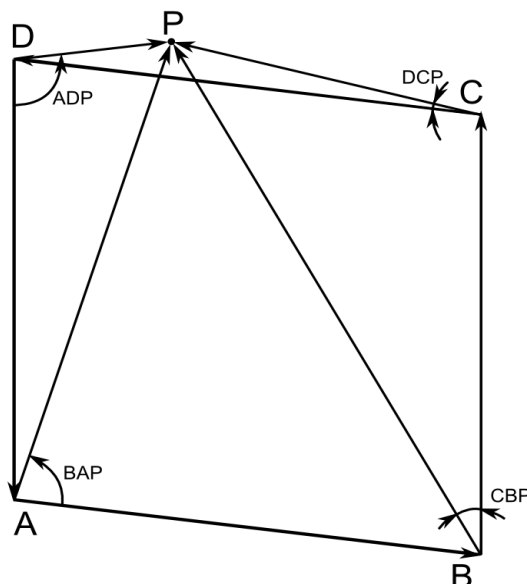
Obr. 25: Kolmý průmět bodu na rovinu

Pro potřeby projekce na stěny projekční krychle je zapotřebí odfiltrovat body, které nenáleží obecnému čtyřúhelníku  $ABCD$ , proto se funkce po projekci rozhoduje, jestli bod této ploše náleží.

Jelikož se pohybujeme ve trojrozměrném prostoru, a funkce může být volána k projekci na libovolnou z šesti stran krychle, zvolil jsem rozhodování na základě porovnávání prostorových úhlů vypočítaných z geometrické interpretace skalárního součinu.

$$\sphericalangle BAP = \cos^{-1} \left( \frac{\overrightarrow{AB} \cdot \overrightarrow{AP}}{\|\overrightarrow{AB}\| \cdot \|\overrightarrow{AP}\|} \right) \quad (45)$$

Úhly vztažené k bodu  $P$  jsou porovnávány ve všech čtyřech rozích s úhly, které mezi sebou svírají přilehlé strany (viz. Obr. 26, na kterém jsou pro přehlednost pouze úhly k bodu  $P$ ), kde bod  $P$  je projektovaný bod. V případě, že jsou pro všechny čtyři případy zároveň úhly k bodu  $P$  menší nebo rovny k úhlům přilehlých stran, je projektovaný bod akceptován a vrácen volající funkci, v opačném případě je vrácen NaN. V programu je na tuto hodnotu vrácený bod testován, podle toho vykreslen nebo ne.



Obr. 26: Hranice projekční plochy

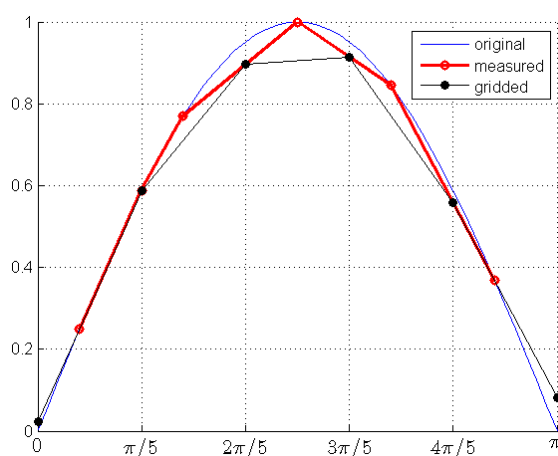
## 11 INTERPOLACE

Interpolace projektovaných dat do rovnoměrné sítě je stěžejní pro následný přepočet elektromagnetického pole do vzdálenějších míst.

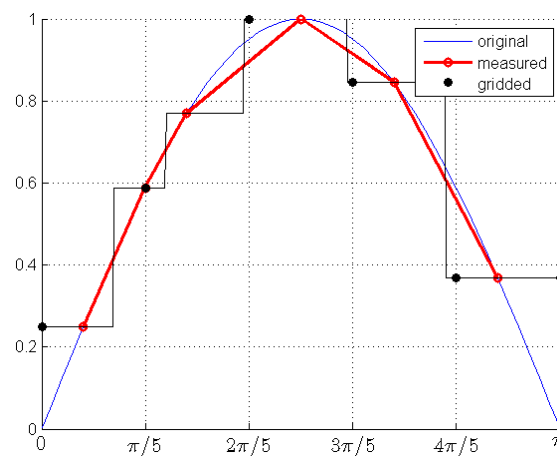
Jak bylo popsáno v kapitole o interpolacích v teoretické části, typů interpolace je několik. Každá prokazuje rozdílné vlastnosti a je různě náročná, což hraje v případě velkého měřených bodů významnou roli.

### 11.1 Možnosti interpolace v prostředí MATLAB

Pro rovnoměrně rozložená data existují v prostředí MATLAB R2006b funkce *interp1*, *interp2* (*interp3* pro 3D matice – není náš případ). Interpolovat je možné několika metodami, totiž *nearest*, *linear*, *cubic*, a *spline*. Pro jednorozměrnou interpolaci je k dispozici také metoda Hermitovského polynomu *pchip* (Piecewise cubic Hermite interpolation). Následující grafy zobrazují princip tzv. gridování, které je vlastně interpolací do rovnoměrné sítě, s využitím extrapolace dat do první a poslední pozice gridu.



Obr. 27: Interpolace 1.řádu



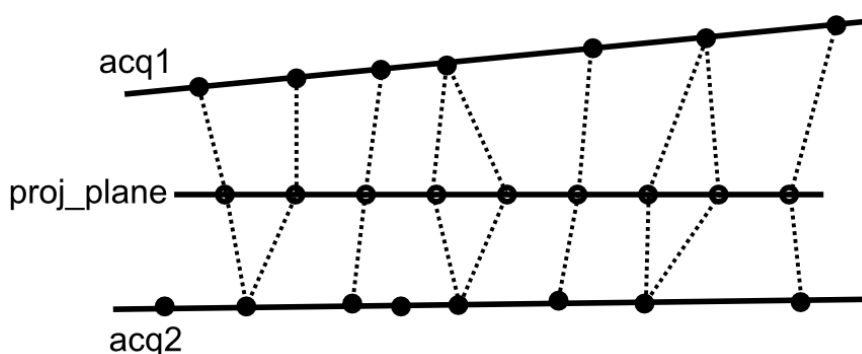
Obr. 28: Interpolace 0.řádu

Naproti tomu pro nerovnoměrně rozložená data není k dispozici obecná funkce, která by byla pro interpolaci na čtvercovou síť vhodná. Je zde několik funkcí pro generování tzv. interpolantu (matematická interpretace tvaru daného průběhu) trojúhelníkové sítě (*delaunay*), ta ale nevyhovuje požadavkům na přepočet. Nabízí se zde také funkce *griddata*, která produkuje čtvercovou síť i z nerovnoměrně rozložených dat, při pokusech se ale pro naše účely prokázala jako nestabilní a i ve vyšších verzích MATLABu se z tohoto důvodu nedoporučuje a je nahrazena funkcí *TriScatteredInterp*. Proto bylo součástí práce navrhnout algoritmus pro interpolaci nerovnoměrně rozložených dat.

## 11.2 Původní koncept interpolace

Metoda projekce akvizičních dat měla být oproti kolmé projekci, kterou používá poslední verze programu, odlišná. Původní myšlenka předpokládala projekci zavedenou společně s interpolací mezi dvěma akvizičními rovinami.

Na projekční ploše se měl vytvořit grid odpovídající vzorkovacím požadavkům vzhledem k vlnové délce. Následně se měla generovat data dvou akvizičních rovin v těsné blízkosti projekční roviny, každá z jedné strany. Pro každý bod rovnoměrné sítě se měl z každé akviziční roviny vybrat jeho nejbližší soused. Z hodnot těchto bodů se měla vypočítat hodnota v bodě rovnoměrné sítě (viz Obr. 29).



Obr. 29: Původní interpolace dat na projekční rovině

V další verzi se měla akviziční matice postupně prohledávat a pro každý bod rovnoměrné sítě hledat nejbližší sousedící bod akviziční roviny, a jeho hodnotu přepisovat do projekční matice (interpolace 0.řádu).

Zejména z důvodu výpočetních nároků při prohledávání všech položek pozičních vektorů pro každý bod rovnoměrné sítě se od tohoto konceptu upustilo. Konečná verze pracuje s již projektovanými daty na projekční rovině a je i od tohoto konceptu odlišná.

## 11.3 Použitý interpolační algoritmus

Finální verze metody interpolace je předmětem funkce *anfa\_interp*, a je charakteristická tím, že průměruje hodnoty akvizičních bodů v okolí uzlu rovnoměrné sítě. Tyto body jsou již projektovány na projekční rovinu metodou kolmé projekce.

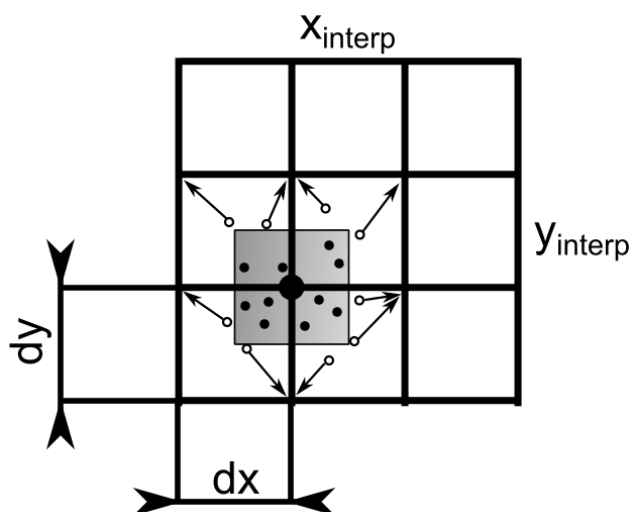
Po ukončení projekce se rozhoduje, na základě toho, o kterou stěnu se jedná, které polohové vektory ( $x, y$  nebo  $z$ ) tvoří projekční plochu (osy  $x, y$ ). Tyto vektory se předají interpolační funkci spolu s celým polem stěny a vlnovou délkou dle tabulky níže.



Tab. 3: Parametry funkce *anfa\_interp*

<b>Vstup</b>	<i>mx_proj, x, y, lambda</i>
<b>Výstup</b>	<i>mx_proj, xinterp, yinterp, dx, dy</i>
<b>Proměnná</b>	<b>Popis</b>
<i>mx_proj</i>	Buněčné pole aktuální stěny projekční krychle o rozměrech (1,6)
<i>x, y</i>	Polohové vektory na projekční rovině o rozměrech (1, $N_p$ );
<i>lambda</i>	Vlnová délka vybrané frekvence
<i>han</i>	Proměnná typu struct obsahující odkazy na prvky GUI v okně ANFA
<i>mx_EH_proj</i>	Matice dat projektovaných na příslušnou stěnu krychle o rozměrech ( $N_p, 6, N_f$ )
<i>proj_pl</i>	Vektor obsahující hraniční body projekční plochy
<i>Dx, Dy</i>	Rozměr projekční plochy ve směru dané osy
<i>Nx, Ny</i>	Počet uzlů interpolované sítě ve směru dané osy
<i>dx, dy</i>	Rozměr elementární buňky interpolované sítě ve směru dané osy
<i>Np, Nf</i>	počet projektovaných bodů, počet frekvenčních bodů
<i>indx, indy</i>	Indexy aktuálního bodu interpolované sítě
<i>xi, yi</i>	Indexy předchozího bodu interpolované sítě
<i>mx_EH_proj_grid</i>	Matice hodnot v interpolované síti o rozměrech ( $N_x, N_y, 6, N_f$ )
<i>mx_proj</i>	Buněčné pole aktuální stěny projekční krychle o rozměrech (1,6), ve které šestý sloupec představuje matici <i>mx_EH_proj_grid</i>
<i>xinterp, yinterp</i>	Polohové vektory interpolované sítě o rozměrech (1, $x_i$ ), resp. (1, $y_i$ )

Funkce nejdříve určí rozměry plochy, podle vlnové délky vypočítá počet bodů na stranu plochy, a šířku jedné buňky. Dále se prochází polohové vektory. Hodnota každého bodu (kromě prvního) je průměrována s tím předešlým, a zapisována do interpolační matice *mx\_EH\_proj\_grid*. Na Obr. 30 je princip algoritmu stručně znázorněn. Všechny body, které po zaokrouhlení spadají do oblasti uzlu sítě, určují hodnotu pole v uzlu stejnou vahou.



Obr. 30: Princip navrhnutého algoritmu

Matice *mx\_EH\_proj* a *mx\_EH\_proj\_grid* mají rozdílné rozměry, proto je každý řádek transformován funkcí *reshape*. Každá složka elektromagnetického pole je pak interpretována jako matice ( $N_x, N_y$ ) a je přístupná zadáním indexu složky a indexu frekvence do třetího, resp. čtvrtého rozměru matice *mx\_EH\_proj\_grid*. Zároveň jsou zapisovány polohové vektory *xinterp*, *yinterp* pro pozdější využití při přepočtu dat.

Tento algoritmus není pro tyto účely nejvhodnější a je to vidět i na konečném průběhu jednotlivých složek. Dochází ke zkreslení vlivem aproximace hodnot. Ale za předpokladu, že v dané oblasti existuje dostatek dat, je tato metoda možná i vhodnější než metoda nejbližšího souseda.

## 12 PŘEPOČET POLE DO VZDÁLENÉ ZÓNY

Přepočet pole realizuje funkce *rcs\_arrf*, která je volána v obslužné funkci *transform\_callback*. Funkce pracuje s celými dvourozměrnými maticemi jednotlivých složek (3. rozměr matice *mx\_EH\_proj\_grid*). Vyžaduje poziční matice s rovnoměrným rozložením *xx*, *yy* (produkt funkce *meshgrid* – pro každý sloupec *x* je proměnný sloupec *y*), rozměry elementární buňky *wx*, *wy*, vlnové číslo *k*, a sférické souřadnice pozorovacího bodu – k této pozici se výstup vztahuje.

Funkce se používá pevnou vzdálenost *r* a krokované úhly elevace a azimutu. Ty jsou určeny z pozice roviny vůči počátku globálního systému. Vždy se přepočítává od vzdálenějších míst, čili ve směru od počátku ven. Tomu odpovídají meze intervalu úhlů. Úhel  $\vartheta$  zde představuje opravdu elevaci k ploše *xy*, ne inklinaci od osy *z*, jak tomu bylo v doposud používané konvenci. Pro bod určený kartézskými souřadnicemi  $[1,0,0]$  platí, že  $\vartheta = 0$ ;  $\varphi = 0$ . Při pohybu nahoru se  $\vartheta$  zvětšuje, dolů zmenšuje. Výchozí vzdálenost od projektované plochy je 0,5 m.

Na základě Huygensova principu a rozložení elektrických proudů je pole přepočítáno násobením jednotlivých složek buňkami transformační matice (rovnice (18)) a koeficienty vzdálenosti.

Pro intenzitu magnetického pole se předpokládá, že ve vzdálené zóně je zanedbatelná.

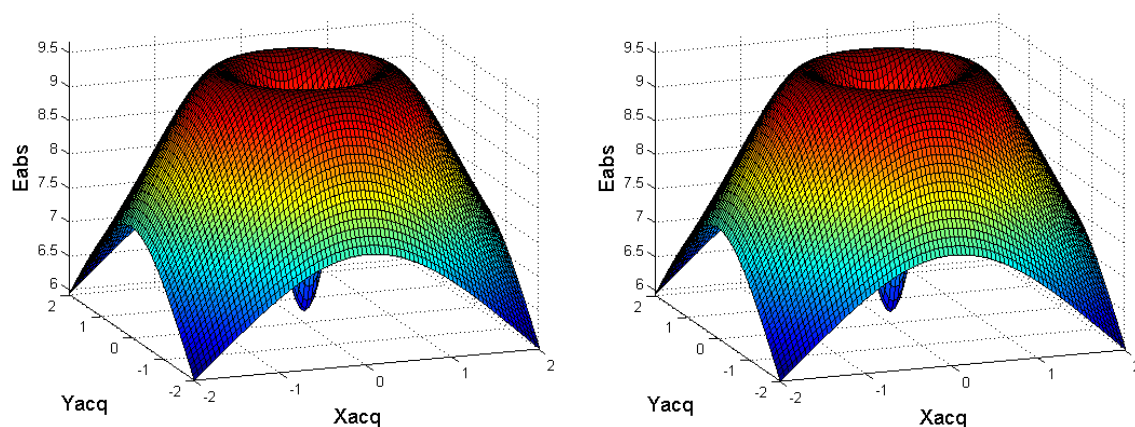
## 13 TESTOVÁNÍ PROGRAMU

Vývoj programu ANFA zahrnovalo mnoho testování a ověřování jednotlivých funkcí ve všech úsecích práce, a vzniklo několik testovacích souborů, které jsou také součástí práce (ve složce *Testing* na přiloženém CD).

### 13.1 Symetrie rozložení elektromagnetického pole

Úvodem je nutné ověřit správnost generovaných dat pro elementární funkci *dipole\_nf*. Závislost intenzity elektrického pole na polohových souřadnicích už byla zmíněna v kapitole 8.1. Celkový 2D průběh na různě otočené a posunutě ploše se ale mohl chovat jinak, proto se testovala symetrie rozložení elektromagnetického pole na rovinách kolmých k počátku systému, ve kterém je umístěn zdroj vlnění.

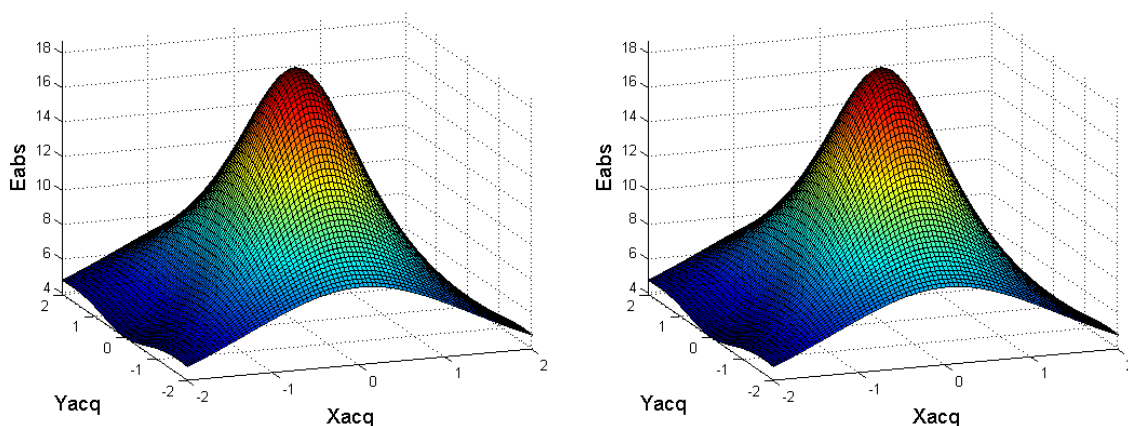
Pro tyto účely používám funkci *acq\_test\_plane*. Zde generujeme rovnoměrný grid v rozsahu od  $-2$  do  $2$  m s krokem  $0.05$  m, který předáváme spolu s ostatními parametry funkci *geteh\_acqplane*. Polohu roviny určujeme souřadnicemi počátku a úhly otočení. K dispozici pro vykreslení do os zde jsou jak všechny složky intenzity elektrického pole, tak i jeho složená velikost  $E_{abs}$ .



Obr. 31: Ověření symetrie 1 m nad a pod AUT

Pro ověření symetrie rozložení pole používáme kolmé plochy nad a pod AUT (Obr. 31), resp. vlevo a vpravo od zařízení (Obr. 32). Před a za zařízením je průběh stejný jako vlevo a vpravo z podstaty zdroje (možno ověřit ve funkci).

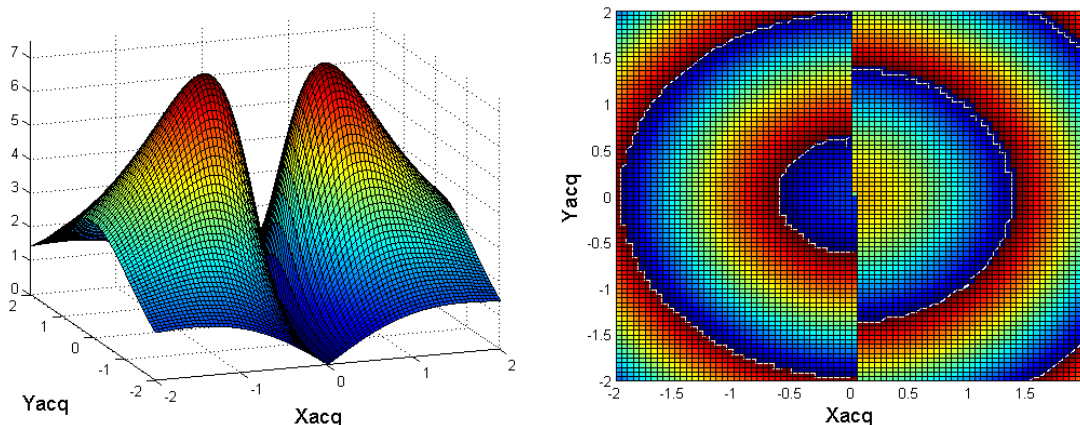
Je vidět, že nad zdrojem je úsek, kde je pole nejmenší. Je to právě ta pozice, kdy se sférická souřadnice  $\vartheta$  blíží  $0^\circ$ , resp.  $180^\circ$  ( $E_\vartheta$  má koeficient  $\sin \vartheta$  - rovnice (8)).



Obr. 32: Ověření symetrie 1 m vlevo a vpravo od AUT

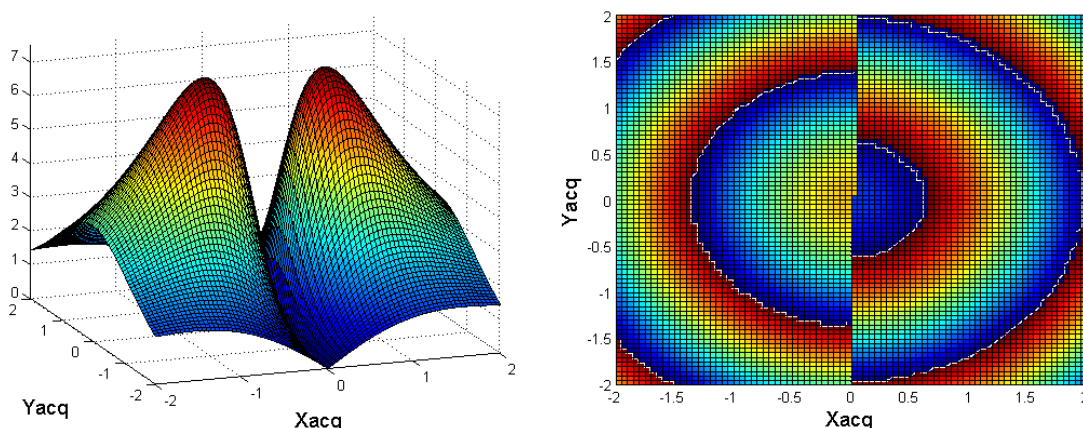
### 13.2 Fázový průběh elektromagnetických složek

Při zobrazení rozložení pole nad anténou v minulém příkladě jenom posouváme počátek lokálního souřadného systému do bodu  $[0,0,1]$ , protože rovina není oproti referenční poloze nijak otočena. Při tomtéž se pro rovinu 1 m pod AUT použije rovina otočená o  $180^\circ$  kolem osy x. To proto, že určité složky (záleží na směru složky a poloze roviny) mění s přechodem přes zdroj záření svou fázi. Pokud si zobrazíme průběh amplitudy a fáze některé ze složek 1 m nad zařízením (Obr. 33), a porovnáme s tímž 1 m pod zařízením (Obr. 34), zjistíme, že amplitudy souhlasí, ale fáze jsou ve směru osy složky opačné.



Obr. 33: Průběh  $E_x$  1 m nad AUT (vlevo amplituda, vpravo fáze)  $\vartheta_x=0^\circ$

Dodržení směru fáze je důležité pro přepočet dat do vzdálené zóny. Proto je nutné řídit se pokyny pro stanovení bodů akviziční roviny právě pro správné určení rotačních úhlů. Jak již bylo naznačeno v kapitole 9.3.1, přesnost výpočtu úhlů klesá, pokud se použije k rotaci dvou nebo tří úhlů, proto je vhodné používat jen jeden a pozici roviny upravovat vhodným umístěním počátečního bodu systému (bod A).



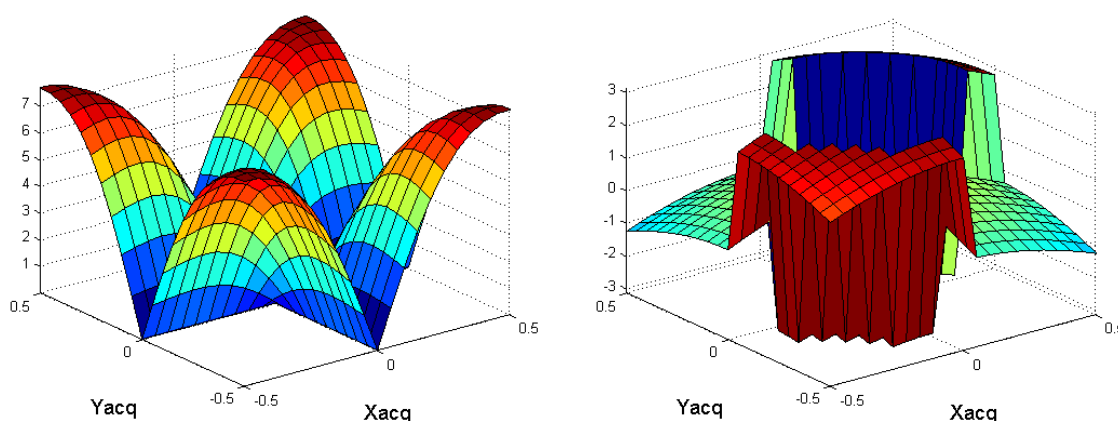
Obr. 34: Průběh  $E_x$  1 m pod AUT (vlevo amplituda, vpravo fáze)  $\vartheta_x = 180^\circ$

### 13.3 Srovnání generovaných dat s projektovanými

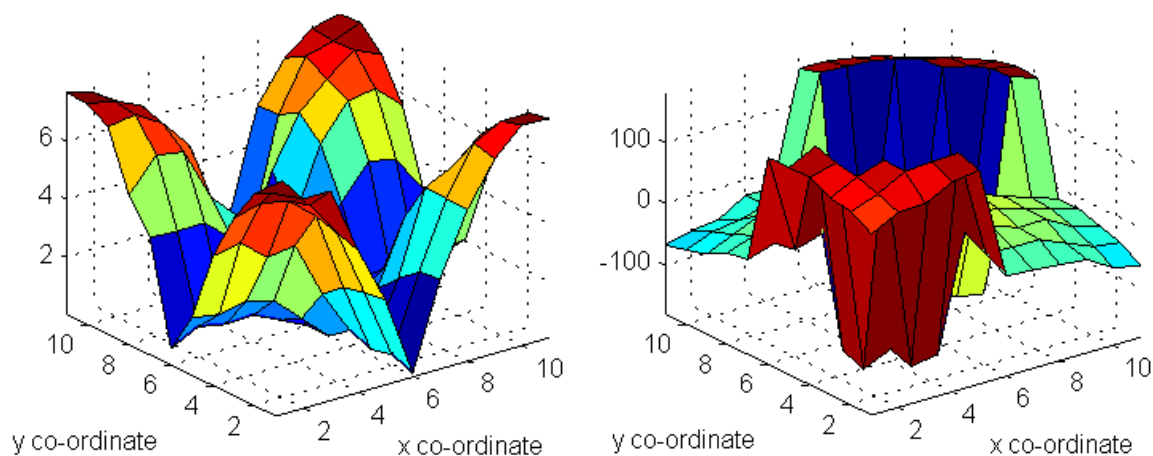
Generovaná data na akvizici rovině jsou po zavedení náhodné chyby, kolmé projekce a interpolace na hrubší rovnoměrnou síť poznamenána nepřesnostmi, které jednotlivé operace způsobily, a které interpolační algoritmus neeliminuje, proto vypadá výsledek zákonitě hůře než čistě generovaný originál. Nezbytné je porovnání alespoň základního tvaru obou průběhů.

Pro testování používáme grid v rozsahu od  $-0.5$  do  $0.5$  m s krokem  $0.05$  m. Z nedostatku prostoru budeme testovat jen složku  $E_x$  pro dvě stěny projekční krychle (mimo DP byly testovány všechny). Nejdříve průběhy amplitudy a fáze generujeme přímo funkcí *geteh\_plane* (Obr. 35), následně je porovnáme s interpolovanými průběhy přímo z programu ANFA.

Pohybujeme se ve vzdálenosti  $0.5$  m před měřeným zařízením, s akvizici rovinou nastavenou tak, že vektor ve směru její osy  $z$  směřuje od AUT, tj.  $\vartheta_x = 90^\circ$ . Fáze se pohybuje od  $\pi$  do  $\pi$ , intenzita dosahuje přibližně  $8$  V/m.

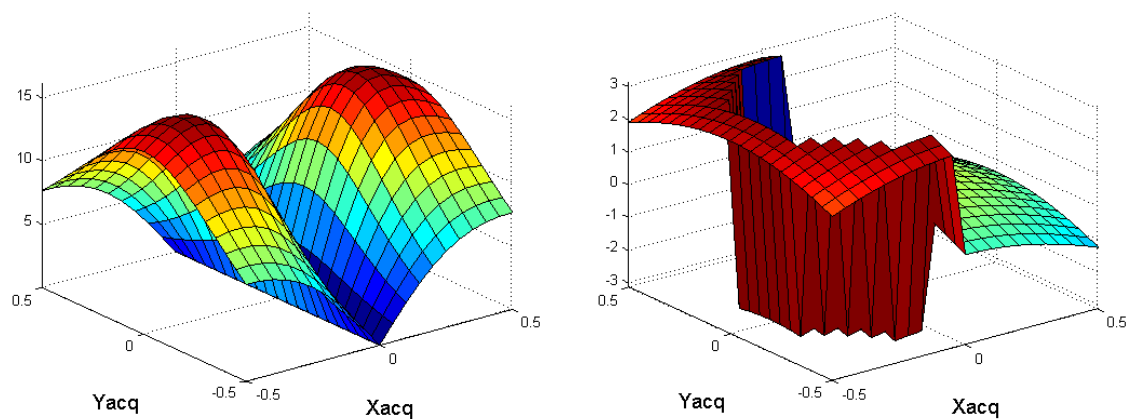


Obr. 35: Generovaný průběh  $E_x$  0,5 m před AUT

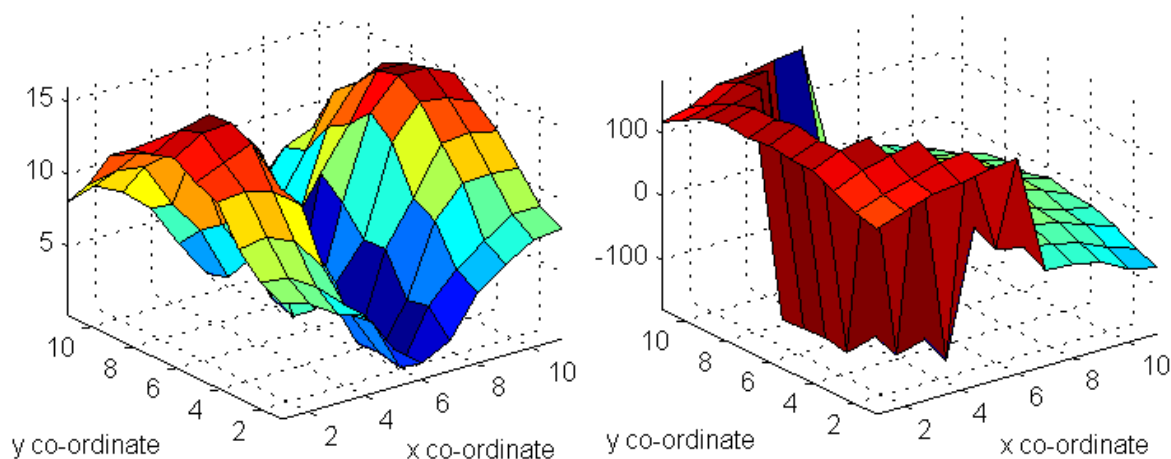


Obr. 36: Interpolovaný průběh  $E_x$  z programu ANFA 0,5 m před AUT

Pro polohu 0,5 m pod AUT v záporném směru osy  $z$  použijeme otočení  $\vartheta_x=180^\circ$  tak, aby vektor  $z$  opět směřoval z krychle ven.



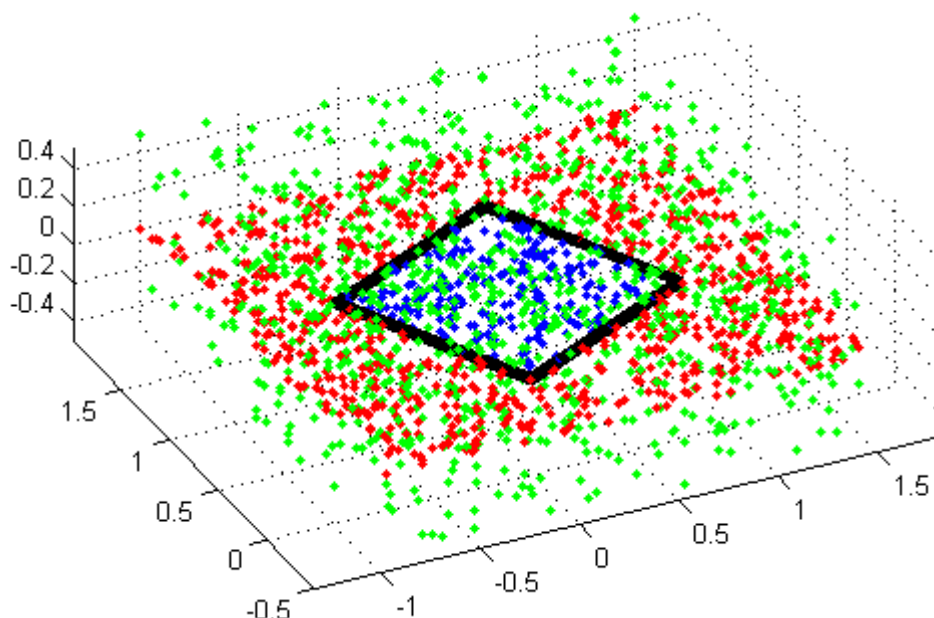
Obr. 37: Generovaný průběh  $E_x$  0,5 m pod AUT



Obr. 38: Interpolovaný průběh  $E_x$  z programu ANFA 0,5 m pod AUT

### 13.4 Ohraničení projekční roviny

Na projekční rovinu jsou akviziční data projektovány kolmou projekcí funkcí *perp\_project*, která zahrnuje rozhodovací podmínku, která akceptuje pouze body uvnitř plochy. I toto se testuje ve funkci *perp\_project\_test*



Obr. 39: Test ohraničení obecné roviny

Jako zelené jsou označeny body náhodně rozložené ve všech třech osách v pevně daném rozsahu. Ty se projektují na obecnou rovinu čtyřúhelníka. Body spadající do oblasti čtyřúhelníka jsou vykresleny modře, ostatní červeně. Červené body jsou projektovány s metodou 'outrange', modré s metodou 'inrange'.

Použité rozhodování na základě velikosti prostorových úhlů je nezbytné pro spolehlivé určení hranic libovolně položené plochy.

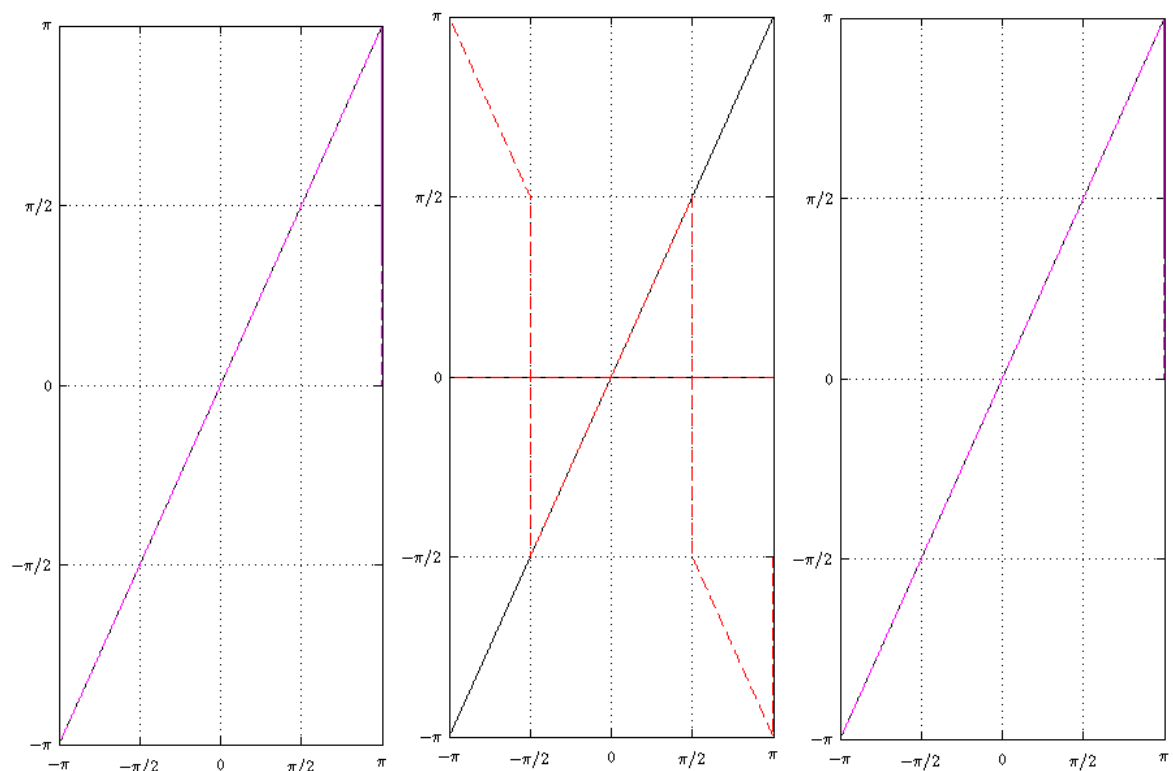
### 13.5 Určení rotačních úhlů

Pravděpodobně největším problémem, který vývoj programu zbrzdil jistě o několik dní až týdnů je systém otáčení akviziční roviny, resp. zpětné určení rotačních úhlů z konečné polohy zadaných bodů pootočené roviny.

Na Obr. 24 je zobrazena situace pro otáčení všech úhlů zároveň, na Obr. 40 je zobrazeno, jak to vypadá v případě otáčení vždy jen kolem jedné z os. Vždy ten úhel, který je zobrazen je zároveň jediný, se kterým je otáčeno.

Je vidět, že pro úhly  $\vartheta_z$ ,  $\vartheta_x$  na intervalu  $\langle -\pi, \pi \rangle$  koreluje průběh vypočteného úhlu s průběhem zadaného úhlu. Zatímco výpočet  $\vartheta_y$  je spolehlivý pouze na  $\langle -\pi/2, \pi/2 \rangle$ .





Obr. 40: Rotační úhly zleva  $\vartheta_z$ ,  $\vartheta_y$ ,  $\vartheta_x$  při rotaci pouze jednoho úlu

## ZÁVĚR

Vývoj programu ANFA provázela řada problémů náročných na představivost a orientaci v prostoru. Počínaje generováním složek elektromagnetického pole pro rovinu v prostoru, přes zpětný výpočet rotačních úhlů, projekci, interpolaci dat na ploše, po přepočít generovaného blízkozónního pole do vzdálené zóny, neustále byly problémy s interpretací rotačního systému, vzájemnou kompatibilitou vytvořených funkcí při změnách orientace projektované plochy nebo s jejich univerzálností na libovolné podmínky.

I přesto se podařilo vyvinout funkční program, jehož zdrojový kód včetně používaných funkcí a dialogových oken čítá téměř 2000 řádků.

Pro využitelnost programu do budoucna se v každém případě předpokládají další úpravy především ve vazbě na vstup reálných dat z měřicího zařízení. Forma a obsah dat není, vzhledem ke stadiu výzkumu měřících prostředků jasná. Proto by bylo nesystémové dělat jakékoli předpoklady předem a následně software upravovat podle reálných požadavků. MATLAB nabízí řadu vstupně výstupních funkcí uzpůsobených pro zpracování dat přes komunikační rozhraní a jejich použití bude záležet na řešitelích.

Možná bude žádoucí měřit několik rovnoměrně rozložených vzorků zároveň, aby se docílilo vyšší přesnosti. Bude potřeba definovat rotační úhly akviziční roviny. Je možné, že se stávající systém prokáže jako nevyhovující a použije se jiný. Všechny tyto skutečnosti mohou zapříčinit podstatnou změnu v programu, která způsobí jiné chování.

Jisté je, že zde budou vstupovat složky elektromagnetického pole měřené zařízením polarizovaným ve směru dané osy, a poziční souřadnice měřeného zařízení. Pravděpodobně bude potřeba definovat korekční činitel měřicího zařízení.

Program má bohužel několik nedostatků, které by bylo možné vylepšit. Návrh interpolačního algoritmu přesně neodpovídá teorii o interpolacích, jedná se spíše o aproximaci dat na určité oblasti. Pro naše podmínky se ale projevil jako dostačující vzhledem k množství dat na rovině. Přepočít do vzdálených míst není bohužel řádně otestován pro všechny případy.

Daná problematika příliš nesouvisí s průmyslem komerční bezpečnosti, nicméně každá nová zkušenost je dobrá zkušenost, a získané dovednosti s prací v prostředí programu MATLAB se mohou do budoucna ukázat jako cenné.

## RESULT

Development of ANFA program was accompanied by a series of challenges demanding on the imagination and orientation in space. From generating components of the electromagnetic field plane in space, through back-calculation of rotation angles, projection, interpolation of data on the plane, to near-field far-field transformation, there were always problems with interpretation of the rotation system, mutual compatibility of functions in any change of projection planes orientation or with their versatility in any condition.

Even though, we managed to develop a working program, whose total size, including the source code used by functions and dialogs, counts nearly two thousand lines.

For usefulness of the program in the future we expect further adjustments in particular in relation to the input of real data from the measuring device. Form and content of the data isn't, due to the stage of research measuring means, clear. It would therefore be unsystematic to make any assumptions in advance and then adjust the software according to real requirements. MATLAB offers a variety of input / output functions adapted for processing data through communication interfaces and their use will depend on the researcher.

It may be desirable to measure the number of evenly spaced samples simultaneously, to achieve greater accuracy. There will be a need to define the rotation angles of the acquisition plane. It is possible that the current system will prove inadequate and will be replaced by the other. All of this can cause a substantial change in the program that causes different behavior.

It is certain that there will enter the components of the electromagnetic field measured in the direction of given axis, and the positional coordinates of the measured device. There may also occur a need to define a correction factor of the measuring device.

Unfortunately, the program has several weaknesses that could be improved. The interpolation algorithm does not exactly match the interpolation theory, but rather the approximation of data on specific areas. For our conditions, however, it proved itself to be sufficient according to the amount of data on the plane. Conversion to far-field locations is unfortunately not properly tested for all cases.

The issue isn't exactly related to the commercial security industry, but any new experience is good experience and acquired MATLAB programming skills may prove valuable in the future.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SOPHOKLES, E. Electromagnetic Waves and Antennas, 2010. New York. Dostupné z <[www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa](http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa)>.
- [2] BOLOMEY, J.,C., GARDIOL, F., E. Enginneering applications of modulated scattering techniques. 2001. Norwood (Massachusetts): Artech House. ISBN 1-58053-147-4.
- [3] RAIDA, Z., a kol. Internetová učebnice elektromagnetických vln. Brno : VUT, 2001. Dostupné z <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida>>.
- [4] YAGHIJAN, A. An overview of near-field antenna measurements. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Jan 1986, vol. 34, no.1, s. 30–45.
- [5] GOŇA, S. Implementation of near field cylindrical scanner. In proceedings of the COMITE 2003 conference, 2003.
- [6] R2011a Documentation, MATLAB.: The MathWorks, Inc., 1984-2011. Dostupné z WWW: <<http://www.mathworks.com/help/techdoc/>>.
- [7] PERŮTKA, K. MATLAB : základy pro studenty automatizace a informačních technologií, 1.vyd. Zlín, 2005. 303 stran. ISBN 80-731-83552.
- [8] HERINGOVÁ, B., Hora, P. MATLAB : M A T L A B. Díl I. - Práce s programem. Zlín, 1995. 303 stran. ISBN 80-731-83552.
- [9] SCHEJBAL,V.: Šíření vln v blízké a vzdálené zóně antény, seminář Šíření 2009, Pardubice 2009. Dostupné z <<http://hajny.webpark.cz/RADAR/Schejbal.pdf>>
- [10] Antenna Fundamentals. Dostupné z <<http://etd.lib.fsu.edu/theses/available/etd-04102004-143656/unrestricted/Chapter2.pdf>>
- [11] Near and far field. 2011. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Near\\_and\\_far\\_field](http://en.wikipedia.org/wiki/Near_and_far_field)>
- [12] DONOHOE, J. P. ECE 3313 Electromagnetics I (course resources). Chapter 3 – Vector analysis, Dostupné z <[http://www.ece.msstate.edu/~donohoe/ece3313vector\\_analysis.pdf](http://www.ece.msstate.edu/~donohoe/ece3313vector_analysis.pdf)>
- [13] SAKAR, T. K., A. TAAGHOL, Near-field to near/far-field transformation for arbitrary near-field geometry utilizing an equivalent electric current and MoM, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 47, 566–573, Březen 1999.
- [14] Euler angles. In *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 22.12.2003, last modified on 3.4.2011 [cit. 2011-04-18]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Euler\\_angles](http://en.wikipedia.org/wiki/Euler_angles)>.

- [15] HOROVÁ, Ivana; ZELINKA, Jiří. *Numerické metody*. Vyd. 2., rozš. Brno : Masarykova univerzita v Brně, 2004. 285 s. ISBN 8021033177.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Vnější prostor antény [4] .....	11
Obr. 2: Fresnelova a Fraunhoferova difrakce [11] .....	13
Obr. 3: Složky elektrické intenzity ve sférickém souřadném systému .....	13
Obr. 4: Elektrické a magnetické pole na povrchu sféry .....	15
Obr. 5: Rovinné snímání .....	16
Obr. 6: Válcové snímání .....	16
Obr. 7: Sférické snímání .....	16
Obr. 8: Huygensův princip .....	17
Obr. 9: Transformace rovinného spektra .....	18
Obr. 10: Lineární interpolace .....	21
Obr. 11: Srovnání interpolačních metod .....	21
Obr. 12: Metody extrapolace .....	22
Obr. 13: Příklad definice vlastností a volání funkce typu Callback .....	25
Obr. 14: Interface programu ANFA po spuštění .....	29
Obr. 15: AP dialog box .....	30
Obr. 16: Projekční krychle .....	31
Obr. 17: Okno Projected surface plots .....	32
Obr. 18: Závislost intenzity elektrického pole drátového dipólu na poloze .....	34
Obr. 19: Vývojový diagram vytvoření nové akviziční roviny .....	36
Obr. 20: Proces akvizice dat .....	38
Obr. 21: Relativní poloha akviziční plochy vůči globálnímu s. s. ....	39
Obr. 22: Eulerovy úhly $\vartheta_x$ , $\vartheta_y$ , $\vartheta_z$ v konvenci Z-Y-X .....	40
Obr. 23: Projekce vektoru $z''$ do roviny $x'y'$ .....	42
Obr. 24: Analýza přesnosti výpočtu rotačních úhlů .....	43
Obr. 25: Kolmý průmět bodu na rovinu .....	45
Obr. 26: Hranice projekční plochy .....	46
Obr. 27: Interpolace 1.řádu .....	47
Obr. 28: Interpolace 0.řádu .....	47
Obr. 29: Původní interpolace dat na projekční rovině .....	48
Obr. 30: Princip navrhnutého algoritmu .....	49
Obr. 31: Ověření symetrie 1 m nad a pod AUT .....	52
Obr. 32: Ověření symetrie 1 m vlevo a vpravo od AUT .....	53
Obr. 33: Průběh $E_x$ 1 m nad AUT (vlevo amplituda, vpravo fáze) $\vartheta_x=0^\circ$ .....	53
Obr. 34: Průběh $E_x$ 1 m pod AUT (vlevo amplituda, vpravo fáze) $\vartheta_x=180^\circ$ .....	54
Obr. 35: Generovaný průběh $E_x$ 0,5 m před AUT .....	54
Obr. 36: Interpolovaný průběh $E_x$ z programu ANFA 0,5 m před AUT .....	55
Obr. 37: Generovaný průběh $E_x$ 0,5 m pod AUT .....	55
Obr. 38: Interpolovaný průběh $E_x$ z programu ANFA 0,5 m pod AUT .....	55
Obr. 39: Test ohraničení obecné roviny .....	56
Obr. 40: Rotační úhly zleva $\vartheta_z$ , $\vartheta_y$ , $\vartheta_x$ při rotaci pouze jednoho úlu .....	57

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1: Parametry funkce dipole_nf .....	33
Tab. 2: Parametry funkce geteh_acqplane .....	34
Tab. 3: Parametry funkce anfa_interp .....	49