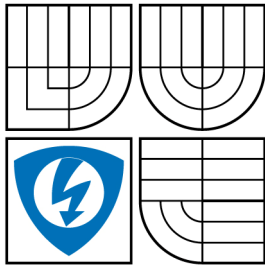


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ZÁŘENÍ SOUSTAV ANTÉN V BLÍZKÉ ZÓNĚ

RADIATION OF ANTENNA ARRAY IN NEAR-FIELD AREA

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

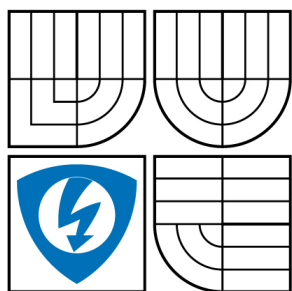
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JIŘÍ HERMANY

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK NOVÁČEK, CSc.

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Elektronika a sdělovací technika

Student: Hermany Jiří Bc.

ID: 47347

Ročník: 2

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Záření soustav antén v blízké zóně

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Analyzujte rozložení elektromagnetického pole soustavy dipólů s rovinným reflektorem v blízké zóně.

Sestavte algoritmus pro výpočet prostorových složek intenzity elektrického i magnetického pole a výkonové hustoty záření v blízké zóně antény pro obecný počet vyzařujících prvků, které leží v rovině rovnoběžné s reflektorem. Při řešení předpokládejte znalost amplitud a fází proudů na vstupních svorkách jednotlivých dipólů soustavy.

Sestavte simulační program pro výpočet výše uvedených veličin v zadaném bodě prostoru, na rovinné a válcové ploše a k zobrazení jejich závislostí pozorovaných v malých vzdálenostech od antény. Podle možností výsledky ověřte experimentálně.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] STRATTON, J.A. Teorie elektromagnetického pole. Praha: SNTL, 1961.

[2] ČERNOHORSKÝ, D., TICHÝ, J. Vyzařování a šíření rádiových vln II. Antény. Učebnice. Brno: VAAZ Brno, 1977

Termín zadání: 5.10.2007

Termín odevzdání: 30.5.2008

Vedoucí práce: doc. Ing. Zdeněk Nováček, CSc.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Jiří Hermany
Bytem:
Narozen/a (datum a místo): 24.1.1983, Mostiště

(dále jen "autor")

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

(dále jen "nabyvatel")

Článek 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Záření soustav antén v blízké zóně

Vedoucí/školitel VŠKP: doc. Ing. Zdeněk Nováček, CSc.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě - počet exemplářů
- elektronické formě - počet exemplářů

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2
Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3
Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....

Nabyvatel

.....

Autor

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav radioelektroniky

Záření soustav antén v blízké zóně

Diplomová práce

Studijní obor: Elektronika a sdělovací technika

Jméno studenta: Bc. Jiří HERMANY

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Zdeněk Nováček, CSc.

Abstrakt

Práce se zabývá zářením soustavy antén v blízké zóně. Hlavním cílem bylo vytvořit program pro výpočet záření v blízkosti soustavy antén s reflektorem, který umožní zobrazit rozložení intenzity elektrického a magnetického pole a hustoty výkonu na rovinné nebo válcové ploše v blízké zóně. Tato anténa je tvořena řadovou soustavou dipólů s reflektorem, který leží v rovině zy rovnoběžně s touto řadou dipólů. V programu MATLAB byla vytvořena aplikace, která umožňuje zobrazení a uložení grafů vypočtených hodnot, jejich uložení do souboru nebo ukládání nastavených parametrů. Program je možné využít například pro demonstraci záření anténní soustavy ve výuce nebo pro grafickou prezentaci záření při návrhu antén.

Klíčová slova

Soustava antén, intenzita elektrického pole, intenzita magnetického pole, výkonová hustota záření, blízká zóna záření, elementární dipól, rovinný reflektor, rovinná plocha, válcová plocha

Bibliografická citace mé práce:

HERMANY, J. *Záření soustav antén v blízké zóně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 58 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Nováček, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Záření soustav antén v blízké zóně jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. května 2008

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Zdeňku Nováčkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 30. května 2008

.....

podpis autora

OBSAH

ÚVOD.....	13
1 ZÁŘENÍ ANTÉN V BLÍZKÉ OBLASTI	14
1.1 ZÁŘENÍ ELEKTRICKÉHO DIPÓLU	14
1.2 ZÁŘENÍ SOUSTAV ANTÉN.....	16
1.3 ZÁŘENÍ SOUSTAV ANTÉN S REFLEKTOREM.....	17
2 ROZLOŽENÍ POLE NA PLOŠE SNÍMÁNÍ.....	20
2.1 ROVINNÁ PLOCHA	20
2.2 VÁLCOVÁ PLOCHA.....	21
2.3 VÝPOČET ROZLOŽENÍ POLE NA VYBRANÉ PLOŠE	22
2.4 VÁLCOVÉ A SFÉRICKÉ SLOŽKY VEKTORŮ.....	24
2.4.1 SOUSTAVY SOUŘADNIC.....	24
2.4.2 VÝPOČET VÁLCOVÝCH SLOŽEK	26
2.4.3 VÝPOČET SFÉRICKÝCH SLOŽEK.....	27
3 KONCEPCE A ŘEŠENÍ PROGRAMU	30
3.1 KONCEPCE PROGRAMU A POPIS HLAVNÍ PROCEDURY	30
3.2 NASTAVENÍ A POPIS PROGRAMU	34
3.2.1 NASTAVENÍ PARAMETRŮ DIPÓLŮ – PRVKŮ SOUSTAVY.....	35
3.2.2 NASTAVENÍ PARAMETRŮ VÁLCOVÉ A ROVINNÉ PLOCHY.....	35
3.2.3 ZOBRAZENÍ SOUSTAVY ANTÉN V PROSTORU.....	36
3.2.4 ZOBRAZENÍ VYPOČTENÝCH HODNOT	37
3.2.5 EXPORT VYPOČTENÝCH HODNOT.....	40
3.3 OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ VÝPOČTU.....	41
3.3.1 JEDEN DIPÓL	41
3.3.2 DVA ROVNOBĚŽNÉ DIPÓLY	43

4 PŘÍKLADY VYPOČTENÝCH ROZLOŽENÍ.....	46
4.1 ZÁŘENÍ DIPÓLU S REFLEKTOREM	46
4.2 ROZLOŽENÍ POLE ANTÉNY F-PANEL.....	51
ZÁVĚR.....	55
LITERATURA	56
PŘÍLOHA 1 - NÁVOD K OVLÁDÁNÍ PROGRAMU	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Vzájemná poloha bodu pozorování P vzhledem k poloze a orientaci dipólu	15
Obr. 2	Princip modelování obecného dipólu pomocí řady elementárních dipólů buzených proudy se sinusovým rozložením	16
Obr. 3	Poloha bodu pozorování P vzhledem k soustavě dvou elektrických dipólů	17
Obr. 4	Zrcadlení dipólu vlivem reflektoru	18
Obr. 5	Poloha a orientace rovinné plochy	21
Obr. 6	Poloha a orientace válcové plochy	21
Obr. 7	Výpočet směrových vektorů \vec{r}_0 a \vec{ds}_0 - poloha a orientace dipólu D vzhledem k bodu P	23
Obr. 8	Souřadnice a směry v kartézské souřadné soustavě	24
Obr. 9	Souřadnice a směry ve válcové souřadné soustavě	25
Obr. 10	Souřadnice a směry ve sférické souřadné soustavě	26
Obr. 11	Válcové souřadnice – výpočet složky \vec{E}_r	26
Obr. 12	Válcové souřadnice – výpočet složky \vec{E}_φ	27
Obr. 13	Sférické souřadnice – výpočet složky \vec{E}_r	28
Obr. 14	Sférické souřadnice – výpočet složky \vec{E}_ϑ	29
Obr. 15	Vývojový diagram postupu výpočtu	31
Obr. 16	Okno simulačního programu	34
Obr. 17	Poloha a orientace válcové plochy a svisle umístěného dipólu	36
Obr. 18	Poloha a orientace rovinné plochy a svisle umístěného dipólu	37
Obr. 19	Okno Zobrazení složek	38
Obr. 20	Okno Uložit obrázek - modul a fáze rozložení vybrané veličiny	39
Obr. 21	Okno Směrové diagramy	40
Obr. 22	Poloha dipólu a rovinné plochy pro srovnání výpočtu s programem 4NEC2	42
Obr. 23	Srovnání rozložení složky E_x intenzity elektrického pole na rovinné ploše	42
Obr. 24	Srovnání rozložení složky E_y intenzity elektrického pole na rovinné ploše	43
Obr. 25	Srovnání rozložení složky E_z intenzity elektrického pole na rovinné ploše	43
Obr. 26	Poloha dvojice dipólů a rovinné plochy pro srovnání s programem 4NEC2	44
Obr. 27	Srovnání rozložení složky E_x intenzity elektrického pole na rovinné ploše	44
Obr. 28	Srovnání rozložení složky E_y intenzity elektrického pole na rovinné ploše	45
Obr. 29	Srovnání rozložení složky E_z intenzity elektrického pole na rovinné ploše	45
Obr. 30	Poloha a orientace rovinné plochy vzhledem k dipólu (vlevo) a dipólu s reflektorem (vpravo)	46
Obr. 31	Srovnání složek E_x záření dipólu (vlevo) a dipólu s reflektorem (vpravo)	47
Obr. 32	Srovnání složek E_y záření dipólu (vlevo) a dipólu s reflektorem (vpravo)	47
Obr. 33	Srovnání složek H_x záření dipólu (vlevo) a dipólu s reflektorem (vpravo)	48
Obr. 34	Srovnání složek H_y záření dipólu (vlevo) a dipólu s reflektorem (vpravo)	48

Obr. 35	Moduly složek hustoty výkonu záření samostatného dipólu (vlevo) a dipólu s reflektorem (vpravo)	49
Obr. 36	Směrové charakteristiky samostatného dipólu.....	50
Obr. 37	Směrové charakteristiky dipólu s reflektorem	50
Obr. 38	Poloha a orientace válcové plochy vzhledem k dipólu (vlevo) a dipólu s reflektorem (vpravo)	51
Obr. 39	Změna charakteru záření vlivem reflektoru – rozložení složky \vec{E}_ϑ (vlevo – bez reflektoru, vpravo – s reflektorem)	51
Obr. 40	Rozměry a vzdálenosti prvků a antény F-Panel.....	52
Obr. 41	Poloha a orientace rovinné plochy vzhledem k anténě F-Panel.....	52
Obr. 42	Rozložení kartézských složek intenzity elektrického pole antény F-Panel na rovinné ploše.....	53
Obr. 43	Rozložení kartézských složek intenzity magnetického pole antény F-Panel na rovinné ploše.....	53
Obr. 44	Směrové diagramy sestavené navrženým programem.....	54
Obr. 45	Směrové diagramy z katalogového listu antény F-Panel (viz [10]).....	54

ÚVOD

Práce popisuje postupy výpočtu záření soustavy elektrických dipólů s reflektorem v blízké oblasti. Výpočtem lze získat hodnoty intenzity elektrického nebo magnetického pole a z nich i výkonovou hustotu záření řešené soustavy. Vhodnou volbou bodů, ve kterých se budou uvedené veličiny zjišťovat, je možné získat rozložení těchto veličin na rovinné nebo válcové ploše. Tyto poznatky byly využity při vytváření programu, který by umožnil výpočet záření v blízké oblasti a zobrazení rozložení daných veličin na rovinné a válcové ploše.

Před tvorbou vlastního programu bylo nejprve nutné analyzovat způsob výpočtu složek intenzity elektrického a magnetického pole v blízké oblasti jednoho dipólu a následně tyto poznatky rozšířit na výpočet záření více dipólů včetně uvážení vlivu reflektoru. Dále bylo třeba definovat rozměry a rozlišení rastru, na kterém bude rozložení pole antény nebo anténní soustavy zkoumáno, tedy na rovinné a válcové ploše. Vypočtené vektory lze vyjádřit pomocí složek ve zvolené souřadné soustavě, v práci je tedy také popsán postup jejich transformace mezi jednotlivými souřadnými soustavami.

Poté byl v grafickém uživatelském rozhraní programu MATLAB vytvořen program pro řešení výše uvedených úloh a byl ověřen srovnáním s výsledky komerčního softwaru 4NEC2.

1 ZÁŘENÍ ANTÉN V BLÍZKÉ OBLASTI

Cílem práce je analyzovat rozložení elektromagnetického pole soustavy dipólů s rovinným reflektorem v blízké zóně. Pro výpočet rozložení lze využít jistých vlastností šíření elektromagnetického pole volným prostorem, a to sčítání příspěvků záření jednotlivých zářících prvků s respektováním jejich buzení i individuálních směrů a délek průvodičů k bodu pozorování. Je možné vypočítat hodnoty elektromagnetického pole v určitých definovaných bodech (na vhodně zvolené ploše) pro každý prvek soustavy a pak jednotlivé příspěvky v každém bodě plochy s ohledem na fáze sečíst.

Použitím reflektoru (kovové desky) v blízkosti soustavy dipólů se projeví tzv. zrcadlení – každý dipól zrcadlí „za reflektorem“ podobný dipól buzený stejně velkým proudem, který má opačnou fázi. Složky záření zrcadlených dipólů se přičítají ke složkám záření skutečných dipólů. Součtem všech složek lze získat hodnoty záření dané soustavy.

1.1 Záření elektrického dipólu

Obecnou strukturu pole elektrického dipólu lze určit, uvažujeme-li konstantní rozložení proudu. Pokud bude délka dipólu značně menší než vlnová délka λ budícího proudu, lze jeho rozložení pokládat za konstantní.

Pak je možno pro zjištění struktury pole elektrického dipólu použít následující vztahy (podle [1]). Vztah (1) pro výpočet intenzity elektrického pole \vec{E} a vztah (2) pro výpočet intenzity magnetického pole \vec{H} lze zapsat jako

$$\vec{E} = \frac{k^3}{4\pi\epsilon} \left\{ -\frac{\vec{r}_0 \times (\vec{r}_0 \times \vec{d}s_0)}{k|\vec{r}|} - j \frac{3(\vec{r}_0 \cdot \vec{d}s_0) \cdot \vec{r}_0 - \vec{d}s_0}{k^2|\vec{r}|^2} + \frac{3(\vec{r}_0 \cdot \vec{d}s_0) \cdot \vec{r}_0 - \vec{d}s_0}{k^3|\vec{r}|^3} \right\} e^{-jk|\vec{r}|} \quad [\text{V/m}] \quad (1)$$

a

$$\vec{H} = -\frac{j\omega}{4\pi} \left(\frac{1}{|\vec{r}|^2} - \frac{jk}{|\vec{r}|} \right) \vec{d}s_0 \times \vec{r}_0 \cdot e^{-jk|\vec{r}|} \quad [\text{A/m}], \quad (2)$$

kde

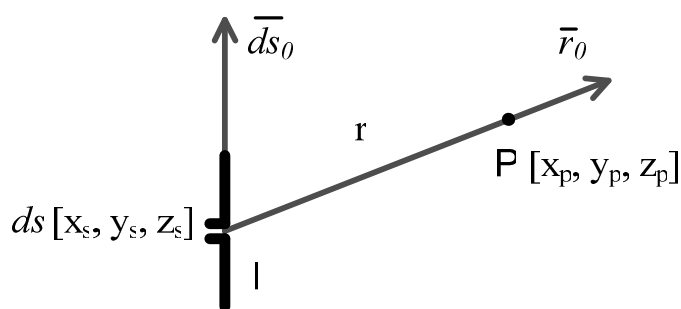
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

je vlnové číslo,

$$\omega = 2\pi f \quad (4)$$

je úhlový kmitočet, ε permitivita vakua, $\vec{d}s_0$ je jednotkový vektor dipólu, \vec{r}_0 je jednotkový vektor mezi polohou středu dipólu a bodu, pro který budeme počítat intenzitu pole, a $|\vec{r}|$ je velikost průvodiče mezi dipólem a bodem pozorování (jejich polohy jsou zakresleny na obr. 1). Pro vyjádření vlivu budícího proudu se v obou vztazích násobí člen $\vec{d}s_0$ proudovým momentem $(j/\omega)Ids$. Výsledkem jsou vektory \vec{E} a \vec{H} , které je možné vyjádřit pomocí složek zvolené souřadné soustavy. Hodnotu celkové intenzity elektrického pole v bodě lze vypočítat pomocí vztahu

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}. \quad (5)$$



Obr. 1 Vzájemná poloha bodu pozorování P vzhledem k poloze a orientaci dipólu

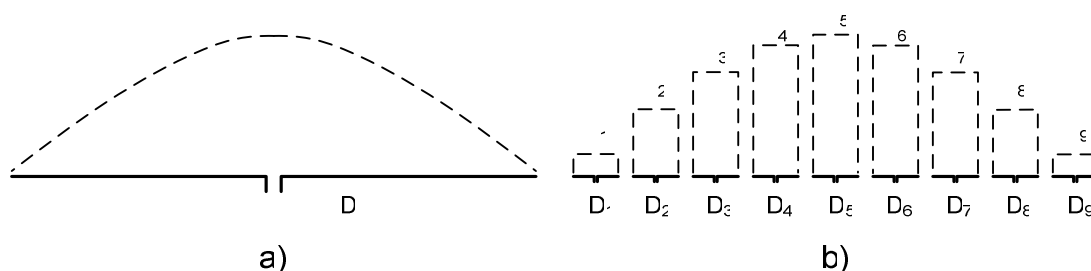
Z vypočtených hodnot komplexních vektorů intenzity elektrického \vec{E} a magnetického \vec{H} pole lze vypočítat Poyntingův vektor

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}^* \quad [\text{W/m}^2]. \quad (6)$$

Poyntingův vektor vyjadřuje výkonovou hustotu elektromagnetického záření a jeho směr je shodný se směrem šíření vlny. Jeho reálná složka udává střední hodnotu činného výkonu procházejícího jednotkovou plochou, která je kolmá na směr šíření vlny (viz [2]).

Vektor \vec{H}^* ve vztahu (6) je komplexně sdružený (má opačné znaménko fáze) k vektoru \vec{H} .

Takto získané hodnoty elektromagnetické intenzity a hustoty výkonu platí v případě, kdy uvažujeme elementární dipól (tj. elektrický dipól, kde $l \ll \lambda$) s konstantním proudem podél vodiče. Pro modelování obecného dipólu by bylo možné využít tytéž vztahy s tou změnou, že bychom zkoumaný dipól (obr. 2a) nahradili řadovou soustavou elementárních dipólů (obr. 2b), které by byly buzeny proudy, jejichž velikost by odpovídala sinusovému rozložení proudu na obrázku obr. 2a.



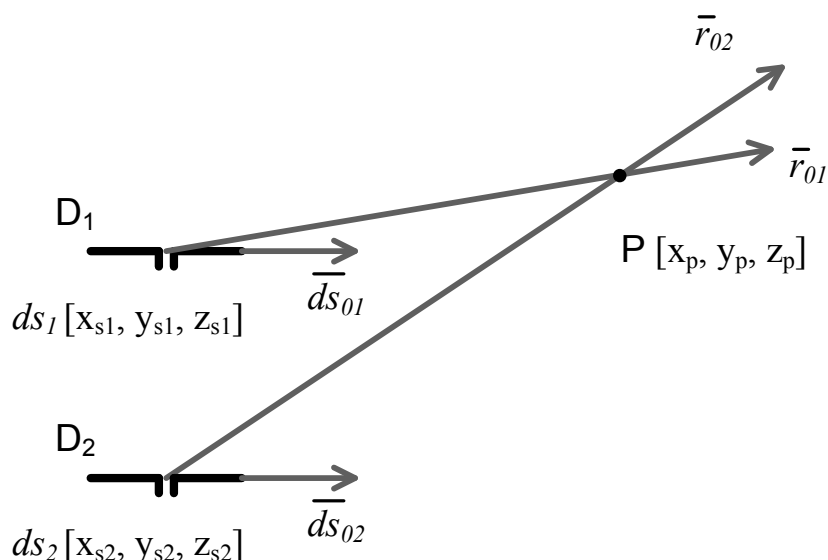
Obr. 2 Princip modelování obecného dipólu pomocí řady elementárních dipólů buzených proudy se sinusovým rozložením

1.2 Záření soustav antén

Na obr. 3 je zobrazena vzájemná poloha dvou elektrických dipólů vzhledem k bodu pozorování, ve kterém chceme vypočítat záření takovéto soustavy. Umístění dipólů v prostoru je určeno polohou středů ds_1 a ds_2 a jejich orientací pomocí jednotkových vektorů \vec{ds}_1 a \vec{ds}_2 . Vzájemná poloha obou dipólů vzhledem k bodu pozorování P je vyjádřena jednotkovými vektory \vec{r}_{01} a \vec{r}_{02} .

Postup výpočtu elektromagnetické intenzity vyzářené takovouto soustavou dipólů je následující. Pro každý z dipólů se vypočítá intenzita elektrického pole

použitím vztahu (1), výsledkem výpočtu jsou dva vektory. Tyto vektory se fázorově (po složkách) sečtou a výsledkem je celková intenzita elektrického pole \vec{E} v bodě pozorování P, které bylo vyzářeno dvojicí dipólů D_1 a D_2 . Obdobným způsobem (součtem hodnot příspěvků záření obou dipólů) lze provést použitím vztahu (2) výpočet celkové intenzity magnetického pole \vec{H} soustavy.



Obr. 3 Poloha bodu pozorování P vzhledem k soustavě dvou elektrických dipólů

Výsledná intenzita pole v bodě pozorování je tedy obecně rovna součtu příspěvků intenzity všech zářících prvků soustavy, proto lze pro výpočet celkové intenzity elektrického pole soustavy n dipólů napsat obecný vztah

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i \quad (7)$$

a obdobně pro výpočet celkové intenzity magnetického pole soustavy n dipólů platí vztah

$$\vec{H} = \sum_{i=1}^n \vec{H}_i. \quad (8)$$

1.3 Záření soustav antén s reflektorem

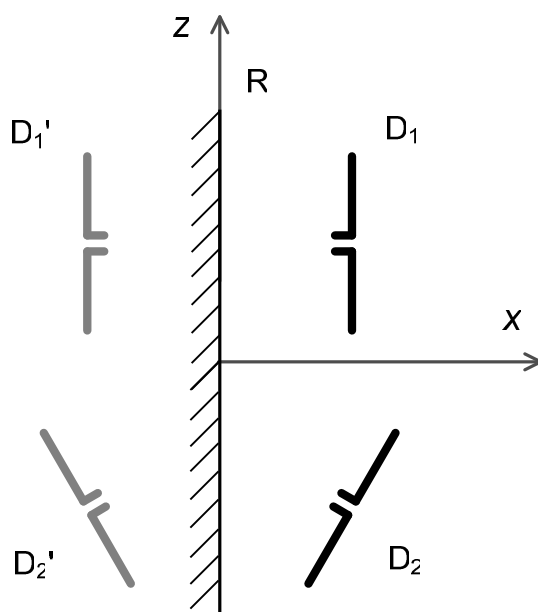
Pokud je elektrický dipól D_1 umístěn v blízkosti dobře vodivé desky (nebo vodivé sítě), dochází k takzvanému „zrcadlení“, kdy se proudy tekoucí po vodivé

desce stávají dalším zdrojem elektromagnetického záření. Tímto způsobem dochází k omezení vyzařování dipólu do prostoru za reflektorem a zvyšuje se jeho směrovost v poloprostoru před ním. Vhodným rozmístěním dipólu nebo soustavy dipólů vzhledem k reflektoru lze dosáhnout lepších směrových vlastností.

Pro výpočet záření soustavy antén s reflektorem je postup analogický jako v předchozí kapitole. Proud procházející vodivým povrchem reflektoru R lze nahradit zářením zrcadlově umístěného dipólu D_1' ve stejné vzdálenosti od reflektoru buzeného proudem I_1' se stejnou velikostí a opačnou fází jako proud I_1 , který budí skutečný dipól D_1 .

Tento způsob nahrazení však platí pouze pro dipóly rovnoběžné s vodivou plochou. Buzení reálných a zrcadlených prvků orientovaných jiným způsobem (např. jako na obr. 4, kde dipóly D_2 a D_2' neleží rovnoběžné s reflektorem) by se lišilo o jinou fázi než o 180° . Protože cílem práce je výpočet záření antén ležících rovnoběžně s reflektorem, bude postačovat první způsob popisu vlivu reflektoru.

Výsledný vektor intenzity pole je pak roven součtu hodnoty intenzity vypočítané pro reálný dipól D_1 a hodnoty intenzity vyzařené jeho obrazem D_1' (situace je znázorněna na obr. 4). Tímto postupem lze zjistit hodnoty intenzit elektromagnetického pole v bodech poloprostoru před reflektorem.



Obr. 4 Zrcadlení dipólu vlivem reflektoru

Pokud je tedy řadová soustava elektrických dipólů umístěna v blízkosti reflektoru (vodivé desky nebo sítě), je nutné sečíst příspěvky intenzity všech reálných dipólů umístěných před reflektorem spolu s příspěvky vyzářenými dipóly zrcadlenými za reflektorem. Celkovou intenzitu elektrického pole lze tedy zapsat obecně jako

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n (\vec{E}_i + \vec{E}'_i), \quad (9)$$

obecný vztah pro výpočet intenzity magnetického pole soustavy n dipólů s reflektorem je

$$\vec{H} = \sum_{i=1}^n (\vec{H}_i + \vec{H}'_i). \quad (10)$$

Pomocí těchto postupů a užitím vztahů uvedených v této kapitole lze vypočítat intenzitu pole v jakémkoli bodě prostoru (pokud uvažujeme reflektor, tak v poloprostoru před ním). V dalších částech práce uvažujeme polohu reflektoru v počátku souřadné soustavy a jeho orientaci rovnoběžnou s rovinou xy .

2 ROZLOŽENÍ POLE NA PLOŠE SNÍMÁNÍ

Pro sledování rozložení intenzity záření antény či soustavy antén je nutno vhodně definovat množinu bodů v prostoru, ve kterých bude charakter záření zkoumán. První takovou vhodnou skupinou bodů může být rovinná plocha, jako další se budeme zabývat plochou válcovou.

2.1 Rovinná plocha

Rovinná plocha je množina bodů, které leží ve stejné rovině. Plocha může být v prostoru libovolně umístěna a orientována. Jedním z možných způsobů, jakým definovat její umístění a orientaci, je určením polohy středu roviny a jejím natočením a rozměry.

Střed plochy leží v bodě P se souřadnicemi P_x , P_y , P_z , její rozměry udávají rozměry v obou směrech (A_{\min} a A_{\max} , B_{\min} a B_{\max}). Orientace plochy je určena úhlem φ , který svírá rovinná plocha s rovinou zx, a úhlem ϑ , který svírá daná rovina s osou z.

Přepočítání bodů roviny ze souřadnic $[A_m, B_n]$ a uhlů natočení φ a ϑ na kartézské souřadnice x, y, z lze provést pomocí následujících vztahů

$$x_{mn} = P_x + A_m \cdot \cos \varphi + B_n \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \varphi, \quad (11)$$

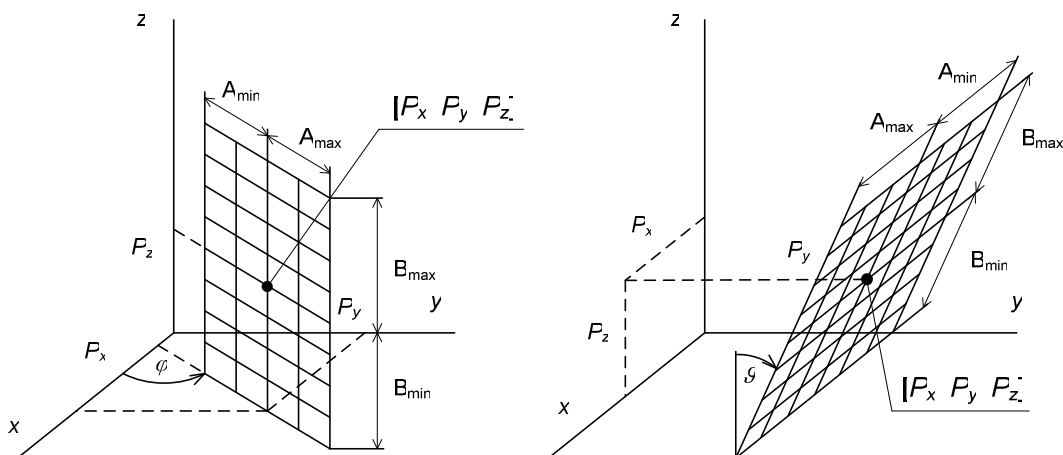
$$y_{mn} = P_y + A_m \cdot \sin \varphi + B_n \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \varphi, \quad (12)$$

$$z_{mn} = P_z + B_n \cdot \cos \vartheta, \quad (13)$$

kde m je pozice řádku a n pozice sloupce bodu v matici bodů definované souřadnicemi $[A_n, B_m]$.

Základními polohami vhodnými pro sledování charakteru záření zadané soustavy antén je poloha svislá ($\vartheta = 0$) pootočená o úhel φ znázorněná na obr. 5 vlevo a poloha s nulovým úhlem φ pootočená o úhel ϑ na obr. 5 vpravo. Každý bod

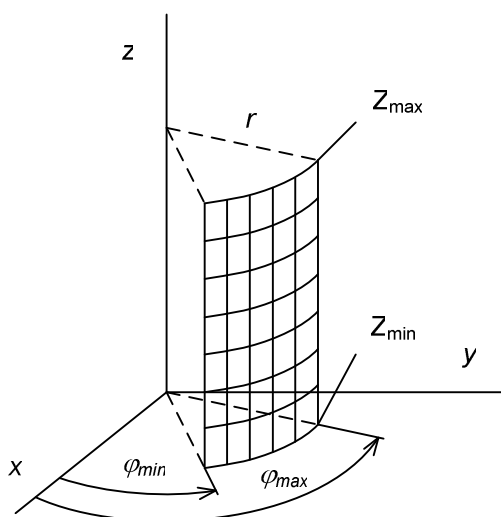
rovinné plochy je jednoznačně určen svými souřadnicemi x , y , z v kartézské souřadné soustavě.



Obr. 5 Poloha a orientace rovinné plochy

2.2 Válcová plocha

Válcová plocha byla vybrána z toho důvodu, aby bylo možné zkoumat záření antény umístěné v počátku souřadné soustavy. Je to skupina bodů, které leží na válcové mřížce a leží všechny ve stejné vzdálenosti od osy z (válcová mřížka je tedy množina bodů na plášti válce, jehož osa leží na ose z). Rozměry válcové plochy jsou dány její výškou Z_{min} a Z_{max} a rozmezím úhlů φ_{min} a φ_{max} (obr. 6).



Obr. 6 Poloha a orientace válcové plochy

Body válcové plochy jsou určeny válcovými souřadnicemi r, φ, z , pro přepočítání válcových souřadnic na kartézské platí vztahy (viz [6]):

$$x = r \cos \varphi, \quad (14)$$

$$y = r \sin \varphi, \quad (15)$$

$$z = z \quad (16)$$

a pro transformaci kartézských souřadnic na válcové

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (17)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right), \quad (18)$$

$$z = z. \quad (19)$$

2.3 Výpočet rozložení pole na vybrané ploše

Výpočet rozložení pole na rovinné nebo válcové ploše, které byly popsány výše, pomocí vztahů popsaných v první kapitole je možný po vyjádření jednotkových vektorů \vec{r}_0 a \vec{ds}_0 (obr. 7).

Válcová plocha je složena z bodů, jejichž poloha je zadána válcovými souřadnicemi. Ty je nutné nejprve převést na kartézské použitím vztahů (14), (15) a (16), což lze zapsat takto

$$P = [x_p; y_p; z_p] = [r \cdot \cos \varphi; r \cdot \sin \varphi; z]. \quad (20)$$

Body, které tvoří rovinnou plochu, jsou zadány přímo v kartézských souřadnicích a není je nutné transformovat.

Jednotkový vektor \vec{r}_0 , který určuje směr spojnice středu dipólu s bodem P ležícím v prostoru, lze vypočítat jako

$$\vec{r}_0 = [r_{01}; r_{02}; r_{03}] = [x_p - x_s; y_p - y_s; z_p - z_s] \quad (21)$$

a jeho velikost je

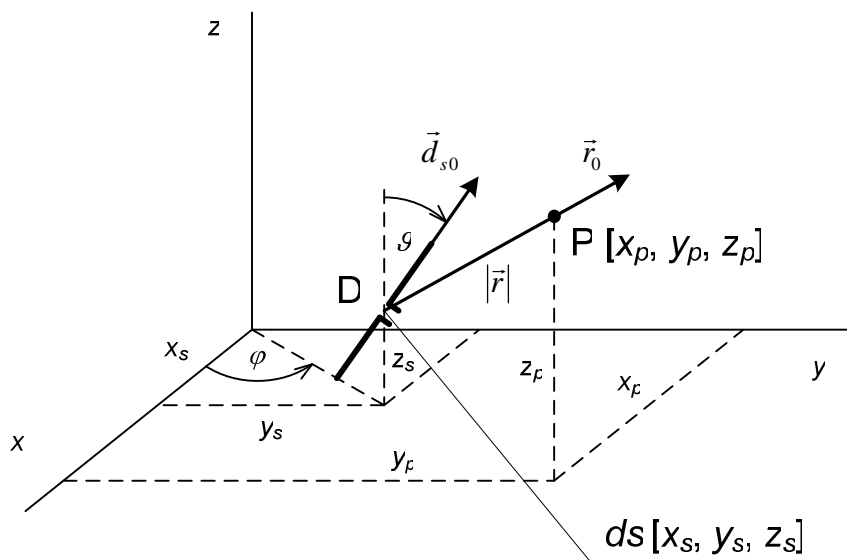
$$|\vec{r}| = \sqrt{r_{01}^2 + r_{02}^2 + r_{03}^2}. \quad (22)$$

Dále je nutné znát polohu a orientaci dipólu, jehož záření budeme počítat. Ty mohou být zadány souřadnicemi koncových bodů, souřadnicemi středu a jednotkovým vektorem nebo souřadnicemi středu dipólu a úhly φ a ϑ .

V tomto případě využijeme zadávání polohy dipólu pomocí souřadnic středu $[x_s; y_s; z_s]$ a úhlů φ a ϑ . Z nich lze vypočítat jednotkový vektor

$$\vec{d}_{s0} = [\cos \varphi \cdot \sin \vartheta; \sin \varphi \cdot \sin \vartheta; \cos \vartheta]. \quad (23)$$

Tímto postupem je možný výpočet jednotkových vektorů \vec{r}_0 a \vec{d}_{s0} pro obecnou polohu bodu a dipólu. Jsou tak k dispozici všechny údaje potřebné k výpočtu intenzity elektrického a magnetického pole pomocí vztahů (1) a (2) pro anténu na rovinné nebo válcové ploše.



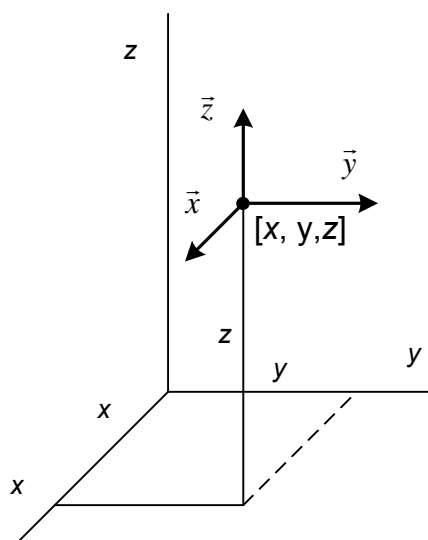
Obr. 7 Výpočet jednotkových vektorů \vec{r}_0 a \vec{d}_{s0} - poloha a orientace dipólu D vzhledem k bodu P

2.4 Válcové a sférické složky vektorů

Polohu jakéhokoli bodu v prostoru lze popsat pomocí jeho souřadnic. Existuje několik typů souřadných soustav, které umožňují definovat polohu bodu určitým způsobem. Zde budou využity souřadnice kartézské x, y, z , válcové r, φ, z a sférické r, φ, ϑ . Souřadná soustava jednak určuje, jakými souřadnicemi je definována poloha bodu v prostoru, dále také směry jednotkových vektorů.

2.4.1 Soustavy souřadnic

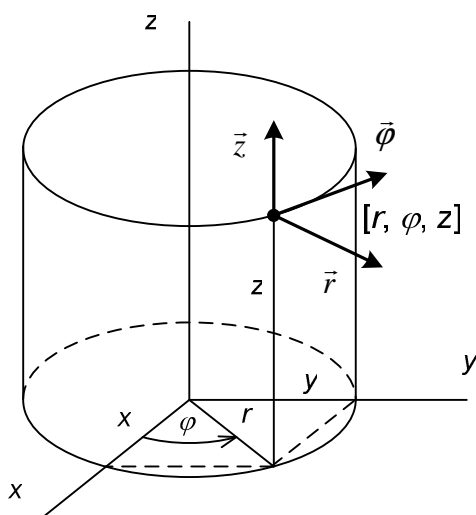
V kartézské souřadné soustavě (obr. 8) je poloha bodu určena souřadnicemi x, y, z a jednotkové vektory \vec{x}, \vec{y} a \vec{z} jsou orientovány ve směru os soustavy, tj. x, y, z .



Obr. 8 Souřadnice a směry v kartézské souřadné soustavě

Válcová souřadná soustava znázorněná na obr. 9 vychází prakticky z polární soustavy souřadnic, která obdobně popisuje polohu bodů v rovině. První souřadnice (r) udává vzdálenost bodu od osy z , druhá (φ) udává úhel, který v rovině xy svírá spojnice bodu a osy z s osou x a jeho hodnota roste v protisměru hodinových ručiček od kladné osy x . Třetí souřadnice (z) určuje polohu bodu na ose z .

Směry jednotkových vektorů odpovídají situaci znázorněné na obr. 9. Vektor \vec{r} je orientován ve směru od osy z . Vektor $\vec{\varphi}$ je na něj kolmý a leží rovnoběžně s rovinou xy ve směru kladného smyslu úhlu φ . Vektor \vec{z} je rovnoběžný s osou z (odpovídá vektoru \vec{z} v kartézské souřadné soustavě).

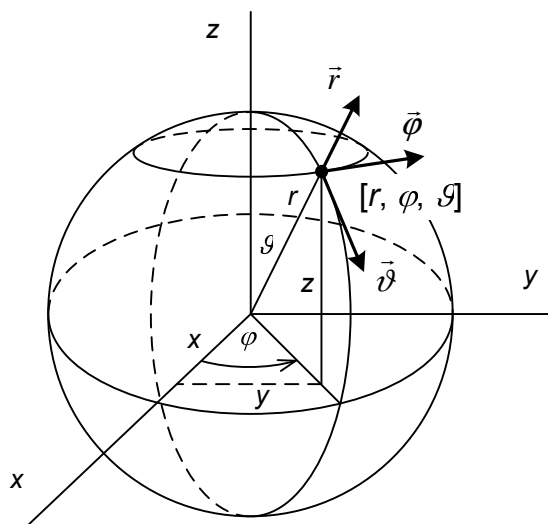


Obr. 9 Souřadnice a směry ve válcové souřadné soustavě

Souřadnice sférické souřadné soustavy jsou r, φ, ϑ . První souřadnice (r) udává vzdálenost bodu od počátku souřadnic, druhá (φ) udává úhel, který v rovině xy svírá spojnice bodu a osy z s osou x (stejně jako u válcové souřadné soustavy). Třetí souřadnice (ϑ) je dána úhlem, který spolu svírají průvodič bodu s osou z .

Na obr. 10 je znázorněna poloha bodu určená sférickými souřadnicemi a směry jednotkových vektorů $\vec{r}, \vec{\varphi}, \vec{\vartheta}$. Vektor \vec{r} udává směr od počátku souřadnic, vektor $\vec{\varphi}$ leží (stejně jako ve válcové souřadné soustavě) rovnoběžně s rovinou xy a je orientován ve směru kladného smyslu úhlu φ . Vektor $\vec{\vartheta}$ leží kolmo k vektorům \vec{r} a $\vec{\varphi}$ v rovině tvořené osou z a průvodičem bodu.

Ze souřadnic a jednotkových vektorů jedné souřadné soustavy lze vypočítat souřadnice nebo vektory v jiné soustavě souřadnic. Postup výpočtu válcových $\vec{E}_r, \vec{E}_\varphi, \vec{E}_z$ a sférických $\vec{E}_r, \vec{E}_\varphi, \vec{E}_\vartheta$ vektorů z vektorů $\vec{E}_x, \vec{E}_y, \vec{E}_z$ v kartézské souřadné soustavě je popsán v následujících kapitolách (2.4.2 a 2.4.3).



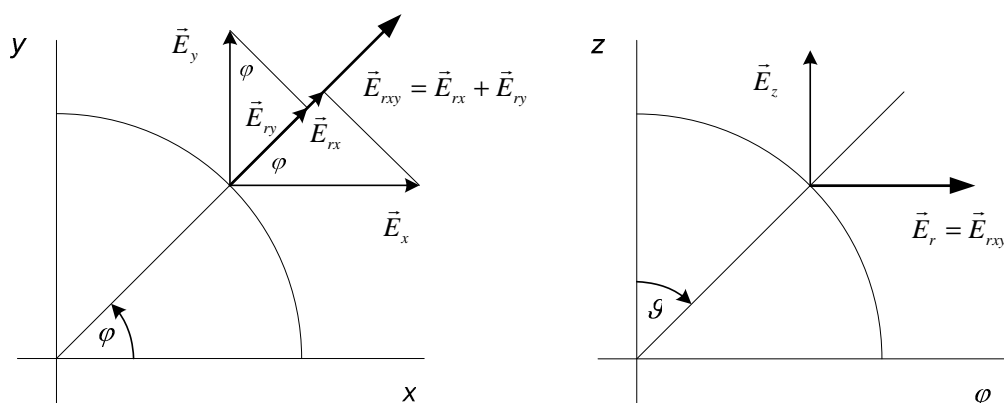
Obr. 10 Souřadnice a směry ve sférické souřadné soustavě

2.4.2 Výpočet válcových složek

Protože je vektor \vec{E}_r rovnoběžný s rovinou xy , bude příspěvek \vec{E}_{rz} vektoru \vec{E}_z roven 0 a hodnotu vektoru \vec{E}_r lze vypočítat součtem průmětů vektorů \vec{E}_x a \vec{E}_y do směru spojnice bodu s počátkem. Vztah lze zapsat

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{rxy} + \vec{E}_{rz} = \vec{E}_{rxy} + 0 = \vec{E}_{rx} + \vec{E}_{ry} = \vec{E}_x \cdot \cos \varphi + \vec{E}_y \cdot \sin \varphi, \quad (24)$$

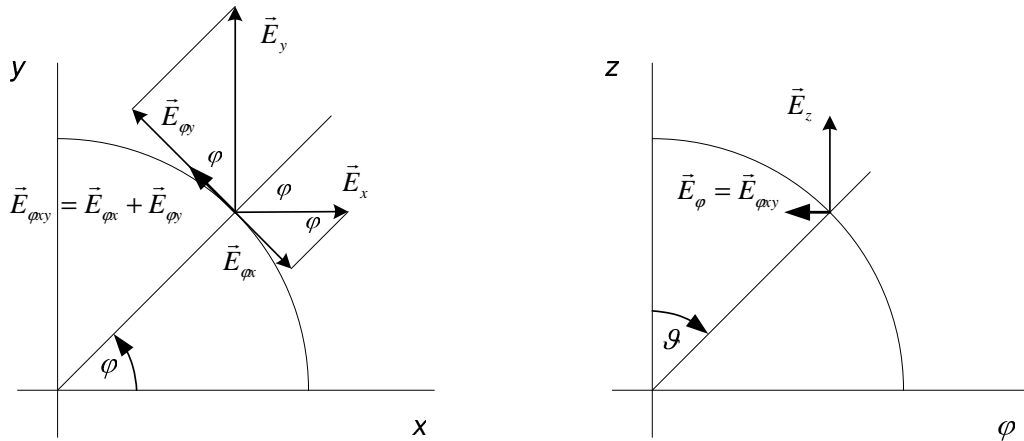
princip výpočtu je znázorněn graficky na obr. 11.



Obr. 11 Válcové souřadnice – výpočet složky \vec{E}_r

Při výpočtu složky \vec{E}_φ je příspěvek vektoru \vec{E}_z opět roven 0, velikost vektoru je dána rozdílem průmětů vektorů \vec{E}_x a \vec{E}_y (obr. 12 vlevo) na přímku tečnou v daném bodě k válcové ploše a vztah lze zapsat

$$\vec{E}_\varphi = \vec{E}_{\varphi y} + \vec{E}_{\varphi x} = \vec{E}_{\varphi y} + 0 = -\vec{E}_{\varphi x} + \vec{E}_{\varphi y} = -\vec{E}_x \cdot \sin \varphi + \vec{E}_y \cdot \cos \varphi. \quad (25)$$



Obr. 12 Válcové souřadnice – výpočet složky \vec{E}_φ

Vektor \vec{E}_z ve válcové souřadné soustavě je roven vektoru \vec{E}_z v kartézské soustavě souřadnic, proto

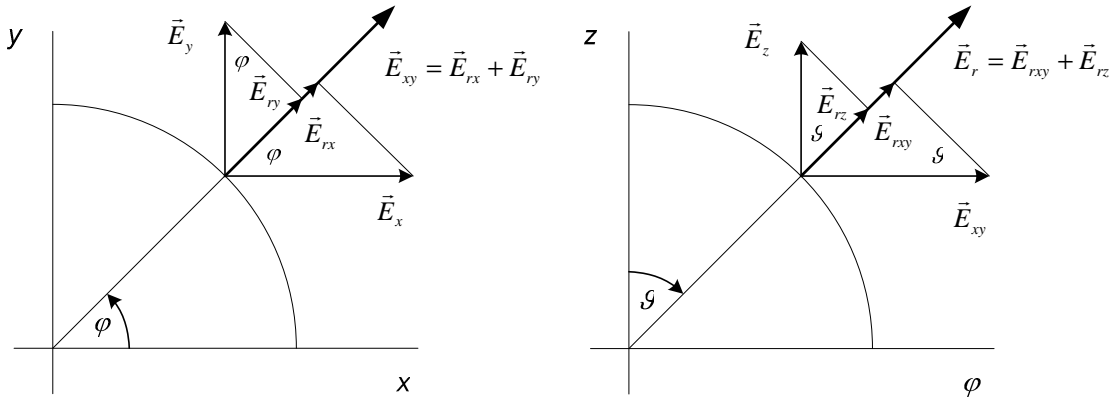
$$\vec{E}_z = \vec{E}_z. \quad (26)$$

2.4.3 Výpočet sférických složek

Vektor \vec{E}_r leží ve směru jednotkového vektoru \vec{r} sférické souřadné soustavy a je tedy součtem průmětů vektorů \vec{E}_x , \vec{E}_y , \vec{E}_z na přímku spojující daný bod s počátkem souřadnic, vztah lze zapsat takto

$$\begin{aligned} \vec{E}_r &= \vec{E}_{rx} + \vec{E}_{rz} = (\vec{E}_{rx} + \vec{E}_{ry}) \cdot \sin \vartheta + \vec{E}_z \cdot \cos \vartheta = \\ &= (\vec{E}_x \cdot \cos \varphi + \vec{E}_y \cdot \sin \varphi) \sin \vartheta + \vec{E}_z \cdot \cos \vartheta. \end{aligned} \quad (27)$$

Průmět vektorů \vec{E}_x a \vec{E}_y do roviny zx pootočené o úhel φ je znázorněn na obr. 13 vlevo, vpravo je průmět vektorů \vec{E}_z a \vec{E}_{xy} do směru vektoru \vec{r} .



Obr. 13 Sférické souřadnice – výpočet složky \vec{E}_r

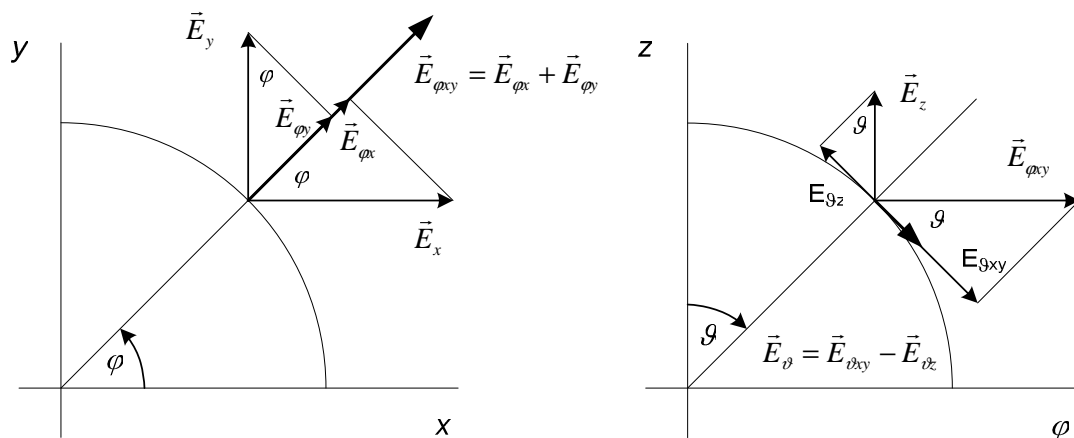
Výpočet složky \vec{E}_ϑ je totožný jako u válcové souřadné soustavy a je popsán v předchozí kapitole (viz obr. 12), platí vztah

Vektor \vec{E}_ϑ leží ve směru jednotkového vektoru $\vec{\vartheta}$ sférické souřadné soustavy a je tedy součtem průmětů vektorů \vec{E}_x , \vec{E}_y , \vec{E}_z na přímku, která je ke kulové ploše a leží ve směru vektoru $\vec{\vartheta}$.

Vztah pro výpočet vektoru \vec{E}_ϑ lze zapsat takto

$$\begin{aligned} \vec{E}_\vartheta &= \vec{E}_{\vartheta xy} - \vec{E}_{\vartheta z} = (\vec{E}_{\varphi x} + \vec{E}_{\varphi y}) \cdot \cos \vartheta - \vec{E}_z \cdot \sin \vartheta = \\ &= (\vec{E}_x \cdot \cos \varphi + \vec{E}_y \cdot \sin \varphi) \cos \vartheta - \vec{E}_z \cdot \sin \vartheta. \end{aligned} \quad (28)$$

Průměty vektorů \vec{E}_x a \vec{E}_y do roviny zx pootočené o úhel φ je znázorněn na obr. 14 vlevo, vpravo jsou průměty vektorů \vec{E}_z a $\vec{E}_{\varphi xy}$ do směru vektoru $\vec{\vartheta}$.



Obr. 14 Sférické souřadnice – výpočet složky \vec{E}_{ϑ}

3 KONCEPCE A ŘEŠENÍ PROGRAMU

V předchozích kapitolách byl popsán výpočet záření elektrického dipólu, a princip, pomocí kterého je možné zjistit a sledovat charakter záření soustavy dipólů s reflektorem.

Dále byl rozebrán způsob výběru vhodné skupiny bodů na rovinné či válcové ploše a jejich definice. Bylo řečeno, jak lze při znalosti polohy a orientace dipólu v prostoru vzhledem k bodům pozorování určit jednotkové vektory \vec{r}_0 a \vec{ds}_0 , a dále byl popsán způsob transformace složek vektorů zapsaných pomocí souřadnic v kartézském souřadném systému na složky ve válcových a sférických souřadnicích.

Byl vytvořen algoritmus umožňující výpočet vektorů intenzity elektrického a magnetického pole v zadaných bodech v blízké oblasti soustavy elektrických dipólů a dále také vektoru hustoty výkonu. Pro výpočet uvedených veličin bylo v programu MATLAB vytvořeno uživatelské rozhraní, jehož řešení bude popsáno v této kapitole.

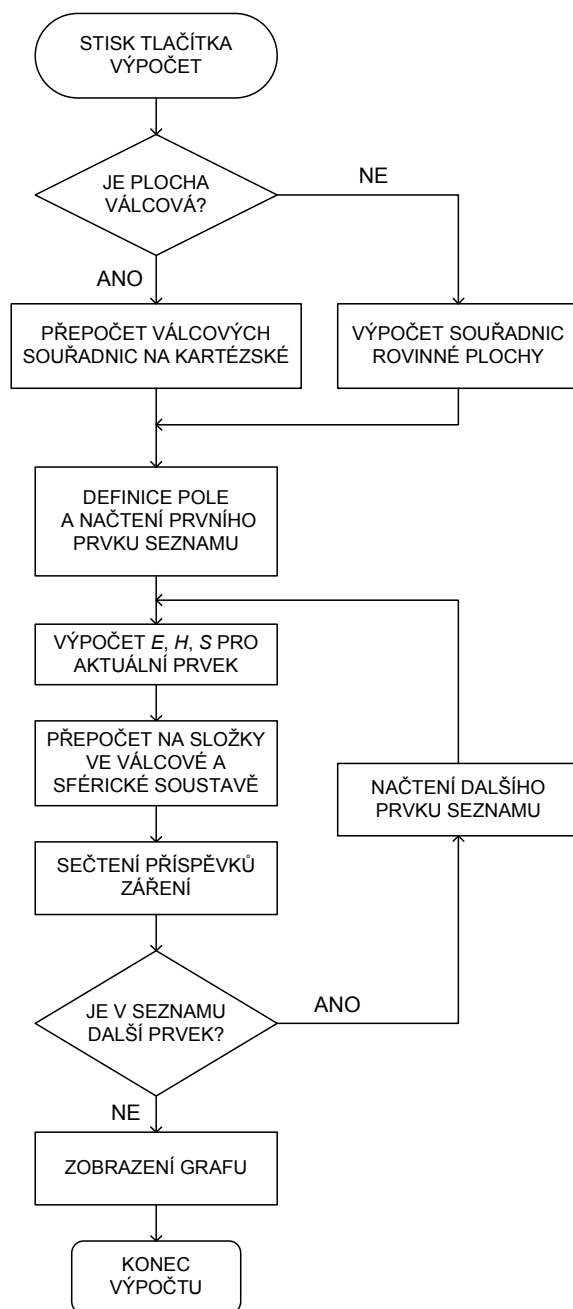
3.1 Koncepce programu a popis hlavní procedury

Po stisku tlačítka **Výpočet** dojde ke spuštění procedury pro provedení výpočtu, který je znázorněn vývojovým diagramem na obr. 15. Nejprve proběhne výpočet souřadnic bodů ze zadaných parametrů vybrané plochy. Následuje deklarace pole, do kterého budou zapisovány vypočtené složky jednotlivých veličin.

Dále jsou ze seznamu prvků po jednom načteny jejich parametry a je proveden výpočet rozložení \vec{E} , \vec{H} a \vec{S} ve všech bodech rastru. Z těchto rozložení, které jsou v kartézských souřadnicích, je poté proveden přepočet na složky ve válcových a sférických souřadnicích a dojde k sečtení těchto hodnot v pole. Tento výpočet rozložení se opakuje pro všechny zadané prvky antény.

Vypočtené hodnoty mohou být zobrazeny v grafu, při přepínání mezi zobrazeními jednotlivých složek už nedochází k novému výpočtu, ale pouze

k zobrazení těchto hodnot. Nový výpočet je nutné provést pouze v případě, dojde-li ke změně parametrů prvků antény nebo plochy.



Obr. 15 Vývojový diagram - postup výpočtu

Výpočet kartézských souřadnic bodů na válcové ploše probíhá podle vztahů (14), (15) a (16) na straně 22, tj. souřadnice r , φ , z , kterými je zadána válcová plocha, jsou transformovány na kartézské souřadnice x , y , z . Zápis ve zdrojovém kódu programu MATLAB vypadá takto:

```

fi=[fimin:fistep:fimax];           % vektoru úhlů fi
fi=fi*pi/180;                       % převod vektoru fi na radiány
Z=[Zmin:Zstep:Zmax];               % vektor souřadnice Z
X=R*cos(fi);                        % vektor souřadnice X
Y=R*sin(fi);                        % vektor souřadnice Y

```

Pokud je vybrána plocha rovinná, je třeba vypočítat souřadnice jejích bodů ze zadaných parametrů středu plochy, úhlů orientace a jejích rozměrů

```

P=[Px Py Pz];                       % souřadnice středu plochy
fi=fi*pi/180;                       % přepočítání úhlu fi na radiány
theta=theta*pi/180;                 % přepočítání úhlu theta na radiány
A=[Amin:Astep:Amax];               % vektor A souřadnic na ploše
B=[Bmin:Bstep:Bmax];               % vektor B souřadnic na ploše

% výpočet souřadnic X, Y, Z
X=P(1)+A*cos(fi)+B*sin(theta)*sin(fi);
Y=P(2)+A*sin(fi)+B*sin(theta)*cos(fi);
Z=P(3)+B*cos(theta);

```

Poté jsou načteny parametry prvního prvku v seznamu dipólů a postupně je pro každou z nich proveden výpočet veličin, které jsou na konci sečteny. Nejprve jsou určeny hodnoty potřebných konstant.

```

% výpočet konstant
epsilon=8.854187e-12;               % permitivita vakua
lambda=3e8/f;                       % vlnová délka
k=2*pi/lambda;                      % vlnové číslo
omega=2*pi*f;                       % úhlový kmitočet

```

Následuje výpočet jednotkových vektorů \vec{r}_0 a \vec{d}_{s_0} podle kapitoly 2.3.

```

% výpočet směrového vektoru ds0 z hodnot úhlů natočení dipólu
ds0= [sin(theta)*cos(fi), sin(theta)*sin(fi), cos(theta)];
% normování směrového vektoru dipólu

```



```

DS0=sqrt(ds0(1)^2 + ds0(2)^2 + ds0(3)^2);
ds0=ds0/DS0;

% výpočet směrového vektoru r0 mezi bodem rastru a středem dipólu
% ds - souřadnice středu dipólu
r0=[X-ds(1), Y-ds(2), Z-ds(3)];
R=sqrt( r0(1)^2 + r0(2)^2 + r0(3)^2 ); % velikost vektoru r0
r0=r0/R; % normování vektoru r0
% násobení vektoru ds0 proudovým elementem (viz kapitola 1.1)
ds0= ds0*i*I/omega;

```

Pak už je možné provést výpočet rozložení pole na ploše, pro výpočet je použito funkcí `cross` pro výpočet vektorového součinu a `dot` pro skalární součin.

```

% výpočet intenzity elektrického pole
E = k^3/ (4*pi*epsilon) *(...
    - cross(r0,cross(r0,ds0))/(k*R)...
    - i*((3*r0*dot(r0,ds0))-ds0)/((k*R)^2)...
    + ((3*r0*dot(r0,ds0))-ds0)/((k*R)^3)...
) *exp(-i*k*R);

% výpočet intenzity magnetického pole
H = -i*omega/(4*pi) * cross((1/R^2 - i*k/R)*ds0,r0)*exp(-i*k*R);

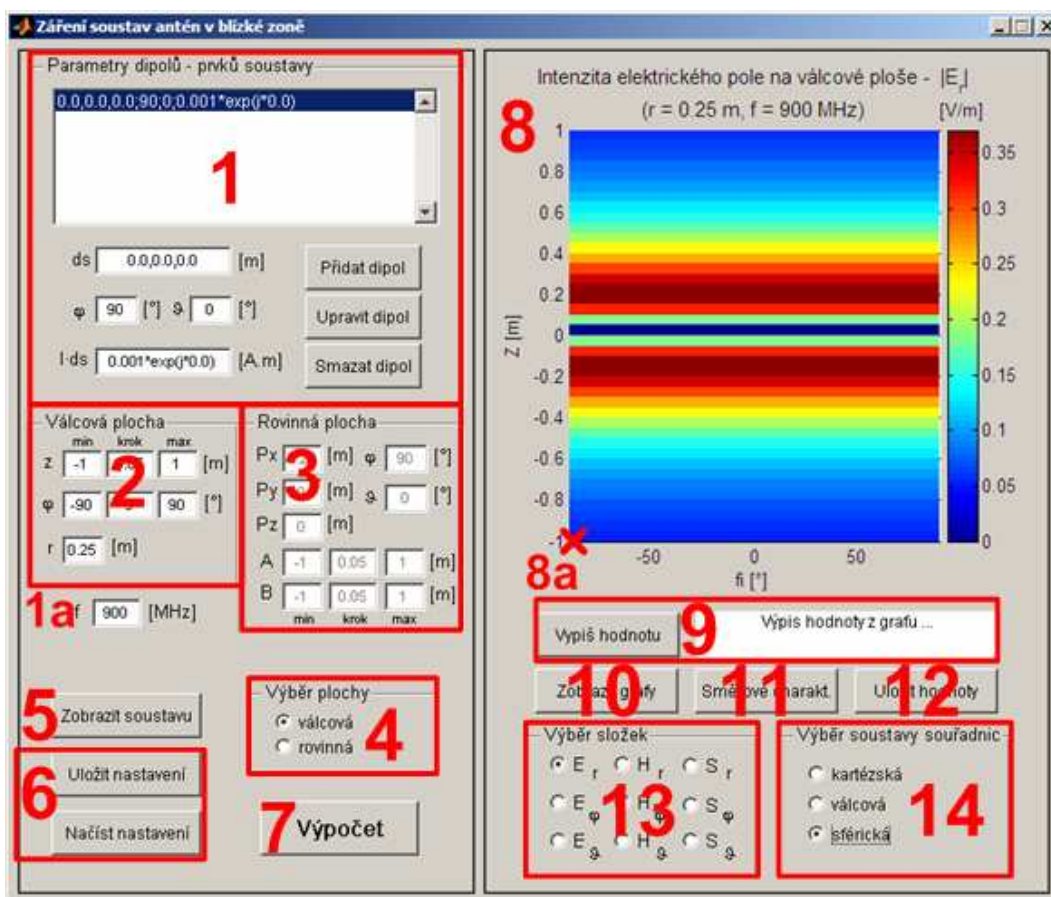
% výpočet hustoty výkonu
S = cross(E,conj(H));

```

Složky vypočtených veličin jsou v kartézských souřadnicích, pro možnost sledování rozložení složek také ve válcových a sférických složkách je v této části provedena transformace tak, jak byla popsána v kapitolách 2.4.2 a 2.4.3. Poté dojde k sečtení odpovídajících složek vypočtených veličin. Tento postup je proveden pro všechny prvky v seznamu dipólů. Jakmile je výpočet rozložení pole proveden pro všechny prvky v seznamu, lze výsledky zobrazit graficky.

3.2 Nastavení a popis programu

Program byl od počátku koncipován jako snadno ovladatelný a názorný. Jeho hlavní okno je zachyceno na obr. 16.



Obr. 16 Okno simulačního programu

Po zadání parametrů dipólu nebo soustavy dipólů (prvků soustavy), kmitočtu budicího signálu, nastavení rozměrů válcové nebo rovinné plochy a její vzdálenosti od antény (v levé části okna) je možné provést výpočet. Po jeho ukončení se v pravé části zobrazí graf rozložení absolutní hodnoty složky \vec{E}_x intenzity elektrického pole na vybrané ploše. Podrobné možnosti nastavení a popis jednotlivých funkcí je obsahem následujících kapitol.

3.2.1 Nastavení parametrů dipólů – prvků soustavy

Tato část obsahuje ve své horní části (č. 1 na obr. 16) seznam dipólů, jejichž poloha je zadána souřadnicemi středu \mathbf{ds} , orientace pomocí úhlů φ a ϑ a buzení hodnotou proudového momentu $I \cdot \mathbf{ds}$ (v tomto pořadí). Každý řádek v seznamu představuje jeden prvek soustavy, tj. jeden dipól.

Pro zadání antény s reflektorem je nutné zadat skutečný dipól rovnoběžný s rovinou zy (v poloprostoru kladné osy x) a souměrně k němu (v opačném poloprostoru) stejně orientovaný dipól buzený proudem s opačnou fází. Tím je reprezentován vliv reflektoru, jehož umístění předpokládáme v počátku souřadnic rovnoběžně s rovinou zy .

Tlačítkem **Přidat dipól** je do seznamu přidán prvek s parametry, které jsou načteny ze vstupních polí \mathbf{ds} , φ , ϑ a $I \cdot \mathbf{ds}$. Kliknutím na řádek seznamu jsou do vstupních polí \mathbf{ds} , φ , ϑ a $I \cdot \mathbf{ds}$ načteny parametry tohoto dipólu. Jejich změnou a použitím tlačítka **Upravit dipól** lze právě vybraný prvek přednastavit. Tlačítko **Smazat dipól** odstraní ze seznamu řádek, který je právě aktivní.

Kmitočet budicího proudu f se zadává ve vstupním poli pod parametry válcové plochy (č. 1a na obr. 16).

3.2.2 Nastavení parametrů válcové a rovinné plochy

Výška válcové plochy (č. 2 na obr. 16) je určena souřadnicemi její spodní (Z_{min}) a horní hrany (Z_{max}) a rozteč mezi jednotlivými body je určena krokem (prostřední vstupní pole parametru \mathbf{z}). Podobně, pomocí minima, kroku mezi body a maxima, jsou definovány souřadnice φ , body se souřadnicí $\varphi = 0$, leží v rovině zx , tzn. souřadnice $y = 0$. Vzdálenost bodů válcové plochy (a tedy jejího poloměru) je nastavena parametrem r .

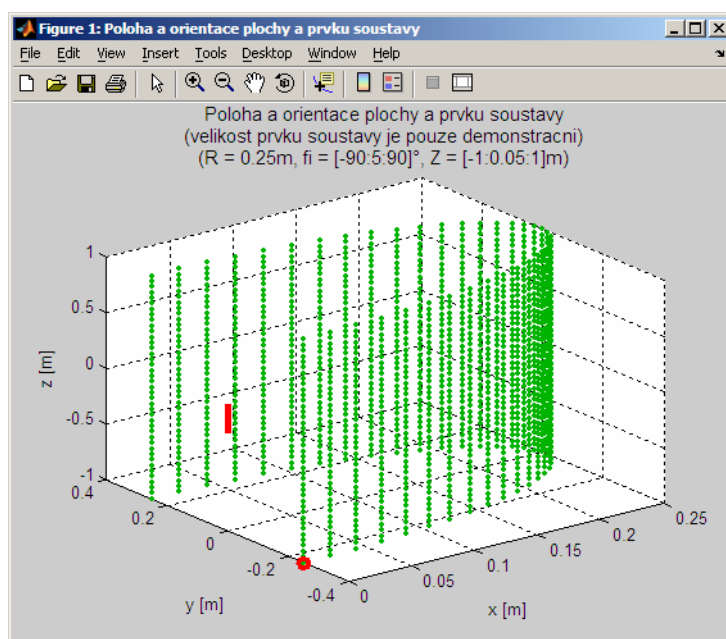
Polohu rovinné plochy (č. 3 na obr. 16) určují souřadnice P_x , P_y a P_z , natočení udávají hodnoty úhlů φ a ϑ , rozměry jsou definovány hodnotami A a B (stejně jako u válcové plochy jsou zadány svým minimem, maximem a krokem mezi body).

Zda bude probíhat výpočet rozložení na válcové nebo rovinné ploše, lze nastavit v části **Výběr plochy** (č. 4 na obr. 16). Výpočet se spustí stiskem tlačítka **Výpočet** (č. 7 na obr. 16).

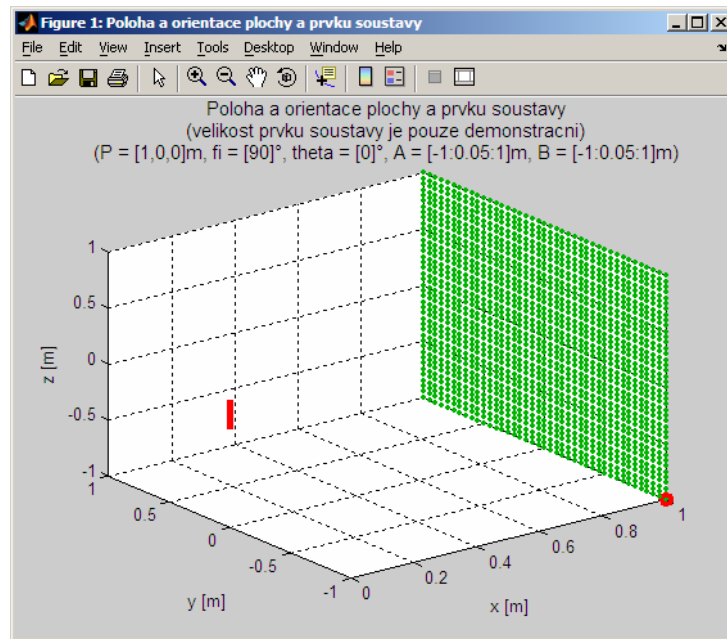
Po každé změně výběru plochy (z válcové na rovinnou a naopak) či parametrů ploch nebo prvků soustavy je nutné znovu provést výpočet.

3.2.3 Zobrazení soustavy antén v prostoru

Stiskem tlačítka **Zobrazit soustavu** (č. 5 na obr. 16) se otevře nové okno s grafem vykreslujícím vzájemné polohy a orientace vybrané plochy a zadaných prvků soustavy. Na obr. 17 je zachycena poloha svisle umístěného dipólu a válcové plochy, na obr. 18 je tentýž dipól se zobrazenou rovinnou plochou. Pro rychlou orientaci se v tomto okně vykresluje červený bod, který odpovídá bodu umístěnému v levém spodním rohu (č. 8a na obr. 16) grafu rozložení zvolené veličiny.



Obr. 17 Poloha a orientace válcové plochy a svisle umístěného dipólu



Obr. 18 Poloha a orientace rovinné plochy a svisle umístěného dipólu

Stiskem tlačítka **Uložit nastavení** (č. 6 na obr. 16) jsou všechny vstupní parametry (prvky soustavy, nastavení rozměrů ploch a budicí kmitočty) uloženy v podadresáři **nastavení**, který se nachází v adresáři, ze kterého byl program spuštěn. V tomto adresáři je poté vytvořen soubor (se zadaným názvem) s příponou **mat**, což je formát, v jakém MATLAB umožňuje ukládat proměnné. Aby bylo možné bez spuštění MATLABu zjistit, jaké parametry jsou v daném souboru uloženy, je při stisku tlačítka **Uložit nastavení** vytvořen také stejně pojmenovaný soubor s příponou **txt**, ve kterém jsou v textové podobě potřebné parametry uloženy.

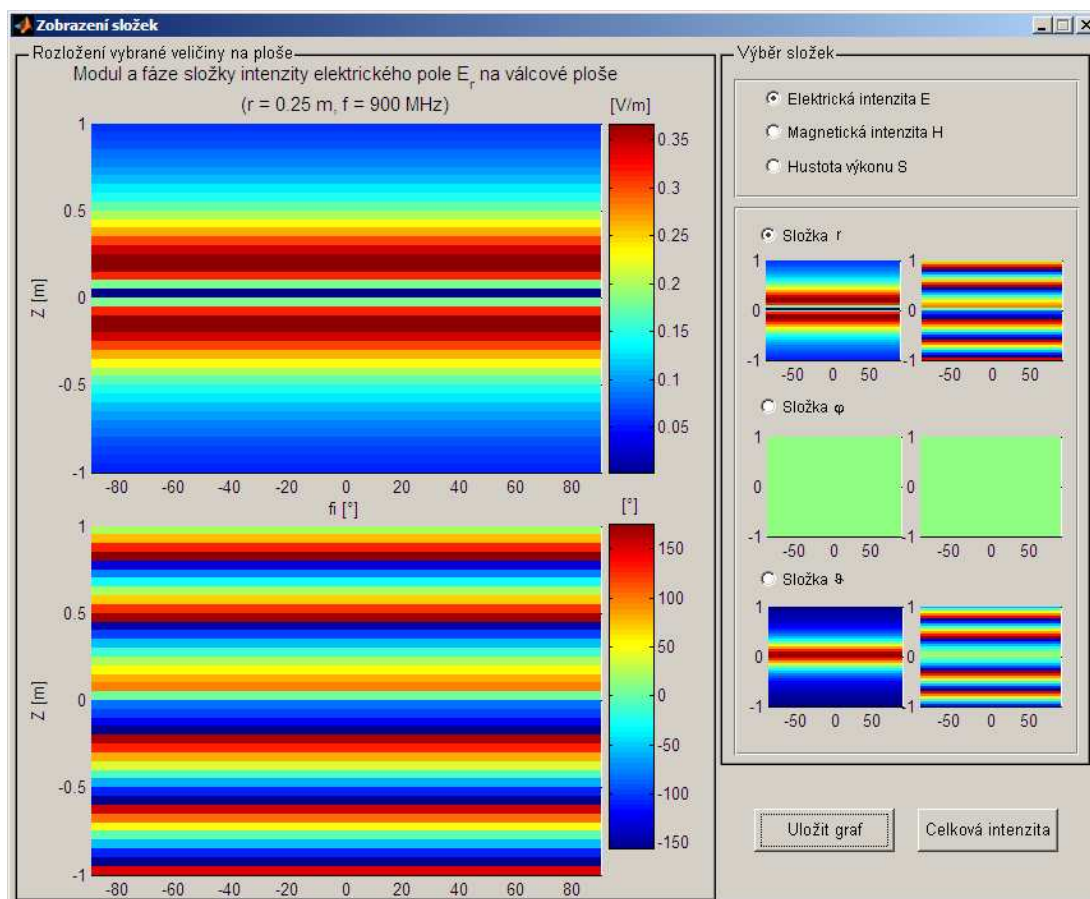
Pro načtení parametrů antény ze souboru slouží tlačítko **Načíst nastavení** (č. 6 na obr. 16), kterým lze obnovit nastavení provedená při předchozí práci. Po vybrání souboru dat, se kterými chceme dále pracovat, jsou parametry soustavy i válcové a rovinné plochy vloženy do patřičných vstupních polí.

3.2.4 Zobrazení vypočtených hodnot

Stiskem tlačítka **Výpočet** (č. 7 na obr. 16) dojde k volání funkce pro výpočet rozložení intenzit elektromagnetického pole a hustoty výkonu. Po jeho provedení se v grafu (č. 8 na obr. 16) zobrazí rozložení modulu intenzity složky \vec{E}_x intenzity

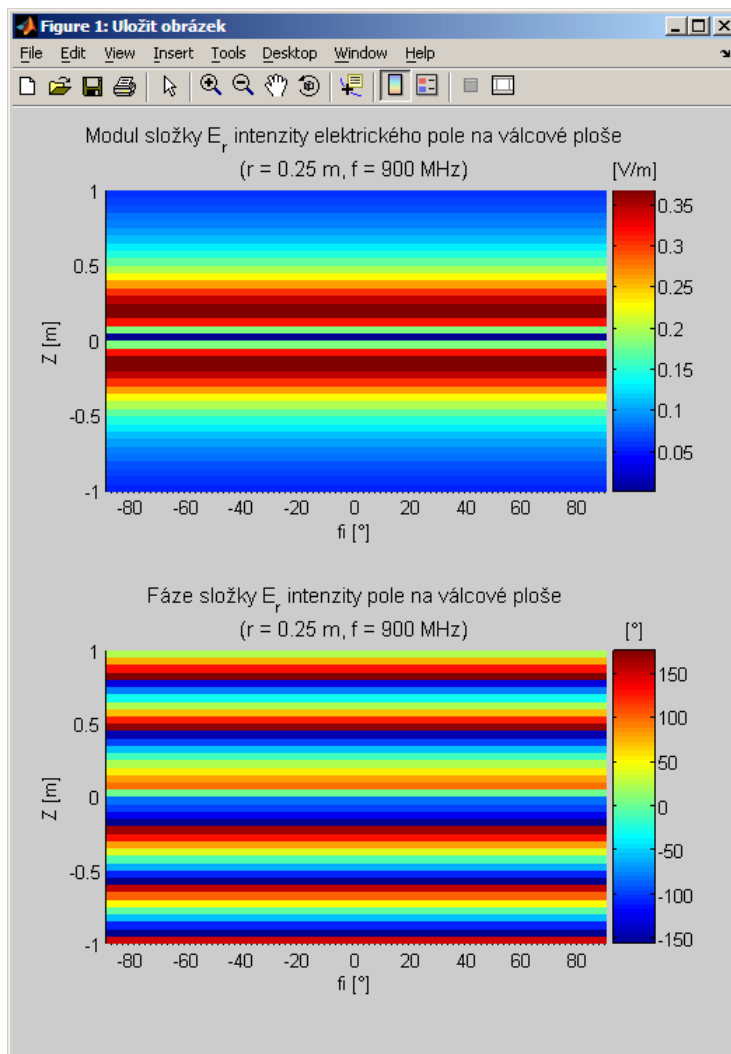
elektrického pole na vybrané ploše. Výběrem některé z voleb v části **Výběr složek** (č. 13 na obr. 16) lze vybrat některou ze složek intenzity elektrického pole \vec{E} , intenzity magnetického pole \vec{H} nebo hustoty výkonu \vec{S} , která je pak zobrazena v grafu. To, zda budou zobrazena rozložení těchto veličin ve složkách kartézských (x, y, z), válcových (r, φ, z) nebo sférických (r, φ, ϑ) lze zvolit v části **Výběr soustavy souřadnic** (č. 14 na obr. 16). Daný výběr se projeví překreslením rozložení v grafu.

Pokud je třeba zjistit hodnotu vypočtené veličiny v některém místě grafu, lze využít následující funkce. Po stisku tlačítka **Vypiš hodnotu** (č. 9 na obr. 16) se u kurzoru myši zobrazí kříž. Pokud v této chvíli dojde ke kliknutí v oblasti grafu, zobrazí se v textovém poli vedle tlačítka souřadnice bodu a modul a fáze vybrané veličiny v tomto bodě.



Obr. 19 Okno Zobrazení složek

Tlačítko **Zobrazit grafy** (č. 10 na obr. 16) otevře nové okno **Zobrazení složek** (obr. 19), v jehož levé části jsou zobrazeny grafy rozložení modulu a fáze vybrané veličiny. V pravé části lze zvolit, zda se má vykreslovat rozložení intenzit elektrického nebo magnetického pole či hustoty výkonu. Dále je možné vybrat, která složka rozložení těchto veličin na ploše má být v grafu vykreslena.

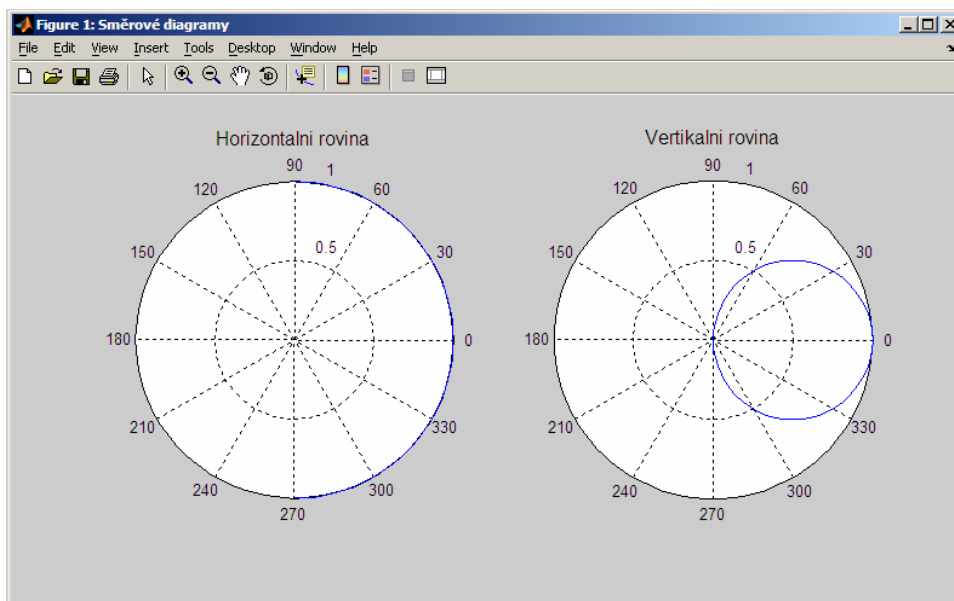


Obr. 20 Okno **Uložit obrázek** - modul a fáze rozložení vybrané veličiny

Pokud je stisknuto tlačítko **Uložit graf**, zobrazí se další okno, ve kterém je zobrazeno rozložení modulu a fáze pouze vybrané složky vybrané veličiny (obr. 20). Obsah okna (vykreslené grafy) lze uložit v různých formátech (např. **png**, **jpg** nebo **pdf**). Zobrazený graf je možné před uložením upravit (např. zvětšit, zmenšit, otočit) nebo změnit parametry nastavení exportu.

Po stisku tlačítka **Celková intenzita** (v pravé části okna na obr. 19) je zobrazen graf modulu a fáze celkové intenzity elektrického pole E (viz (5)).

Tlačítko **Směrové charakt.** (č. 11 na obr. 16) umožní zobrazení směrových diagramů v hlavních rovinách v poloprostoru před reflektorem, tj. ve směru kladné osy x . Diagramy se zobrazí v novém okně (obr. 21), ze kterého je možné, podobně jako v předchozím případě, měnit parametry vzhledu nebo zobrazené diagramy ve vhodném formátu uložit.



Obr. 21 Okno Směrové diagramy

3.2.5 Export vypočtených hodnot

Je-li stisknuto tlačítko **Uložit hodnoty** (č. 12 na obr. 16), je po zadání názvu v adresáři **data** vytvořen podadresář s tímto jménem a v něm jsou do jednotlivých souborů formátu **mat** uloženy složky vypočtených veličin pro danou soustavu dipólů a vybraný typ plochy.

Do samostatných souborů jsou uloženy kartézské, válcové i sférické souřadnice všech tří vypočtených veličin (intenzity elektrického pole, intenzity magnetického pole a hustoty výkonu). Názvy uložených matic jsou například **s_E_r.mat**, kde **s** určuje o jakou souřadnou soustavu se jedná (**k** - kartézská, **v** - válcová, **s** - sférická), **E** o jakou jde veličinu (**E** - intenzita el. pole, **H** - intenzita mg. pole, **S** - hustota výkonu) a **r** udává složku (**x** - x , **y** - y , **z** - z , **r** - r , **fi** - φ , **theta** - ϑ).

Do stejného adresáře je uložen také soubor s názvem *export_parametry.txt*, který obsahuje textový popis parametrů antény spolu s nastavením plochy, v jejichž bodech byly tyto veličiny vypočteny.

3.3 Ověření výsledků výpočtu

Pro ověření správnosti výpočtů rozložení intenzity el. pole na rovinné ploše bylo využito simulace v programu 4NEC2 (viz [10]), což je volně dostupný nástroj pro tvorbu a optimalizaci antén ve 2D a 3D.

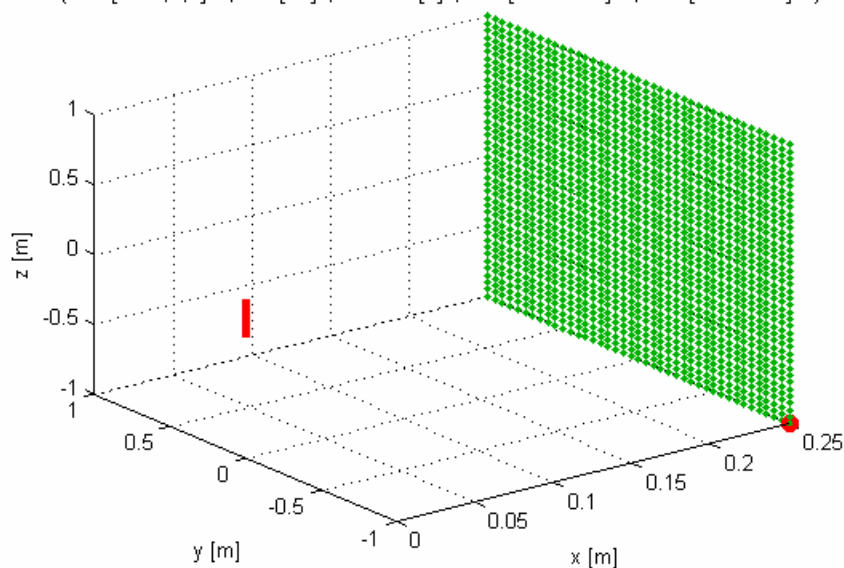
Program umožňuje výpočet a zobrazení rozložení složek intenzity elektromagnetického pole v kartézské souřadné soustavě na rovinné ploše. V této kapitole bude provedeno srovnání dvou základních případů – záření jednoho dipólu a záření dvou rovnoběžných dipólů, které představují soustavu dipólu s reflektorem.

4NEC2 neposkytuje informace o rozložení fází složek intenzit, proto budou srovnána pouze rozložení jejich modulů. Z důvodu odlišného zadávání velikosti budicího signálu nelze srovnat velikosti vypočtených hodnot, ale pouze charakter rozložení.

3.3.1 Jeden dipól

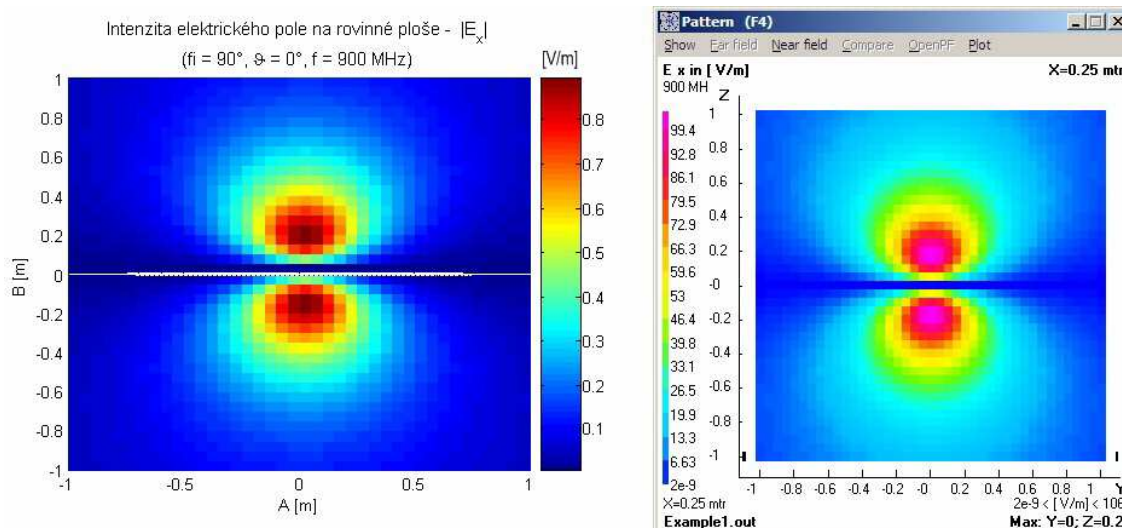
Na obr. 22 je zobrazena poloha dipólu vzhledem k rovinné ploše, pro kterou bude vypočteno rozložení intenzity elektrického pole. Dipól leží v počátku $[0,0,0]$ souřadné soustavy a je rovnoběžný s osou z . Rovinná plocha leží rovnoběžně s rovinou zy a je umístěna ve vzdálenosti 0,25 m od počátku souřadnic.

Poloha a orientace plochy a prvku soustavy
 (velikost prvku soustavy je pouze demonstracni)
 (P = [0.25,0,0]m, $\phi_i = [90]^\circ$, theta = [0]°, A = [-1:0.05:1]m, B = [-1:0.05:1]m)

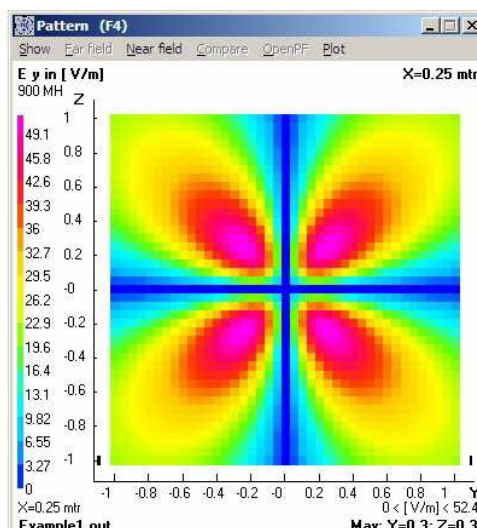
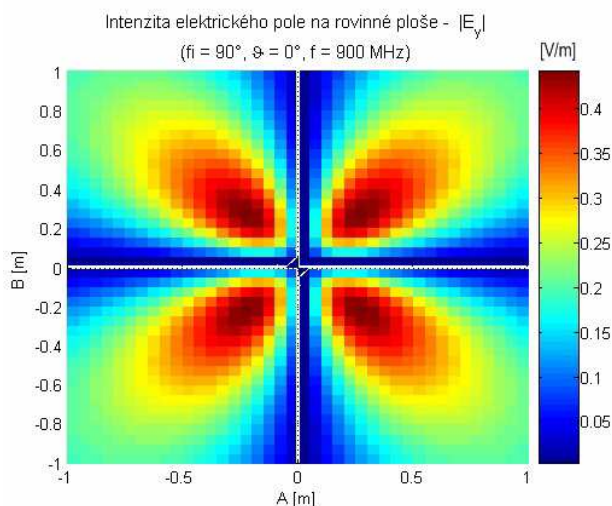


Obr. 22 Poloha dipólu a rovinné plochy pro srovnání výpočtu s programem 4NEC2

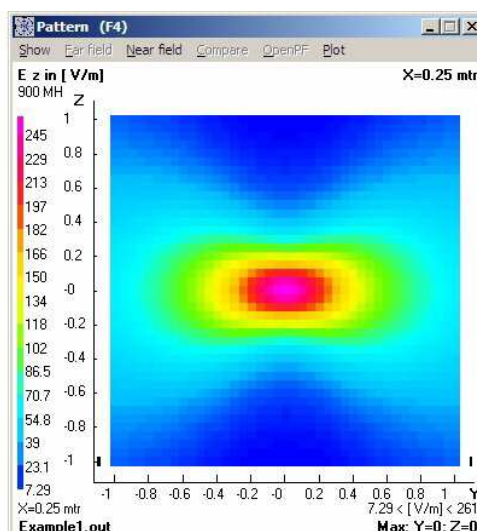
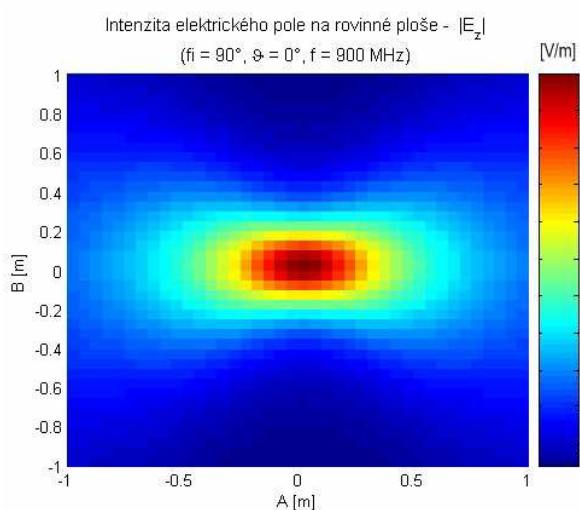
Na obr. 23, obr. 24 a obr. 25 jsou vedle sebe zobrazeny výsledky výpočtu rozložení jednotlivých složek E_x , E_y a E_z intenzity záření elektrického pole pro jeden dipól umístěný svisle ve středu souřadné soustavy. Na obrázcích jsou vlevo výsledky výpočtu programu vytvořeného v rámci diplomové práce, vpravo jsou rozložení složek intenzity získané pomocí programu 4NEC2.



Obr. 23 Srovnání rozložení složky E_x intenzity elektrického pole na rovinné ploše



Obr. 24 Srovnání rozložení složky E_y intenzity elektrického pole na rovinné ploše



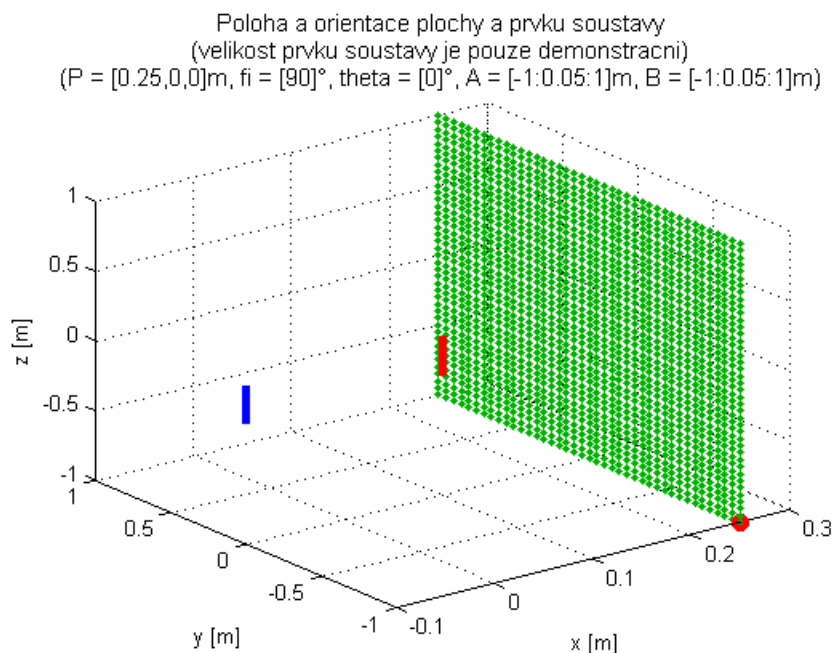
Obr. 25 Srovnání rozložení složky E_z intenzity elektrického pole na rovinné ploše

3.3.2 Dva rovnoběžné dipóly

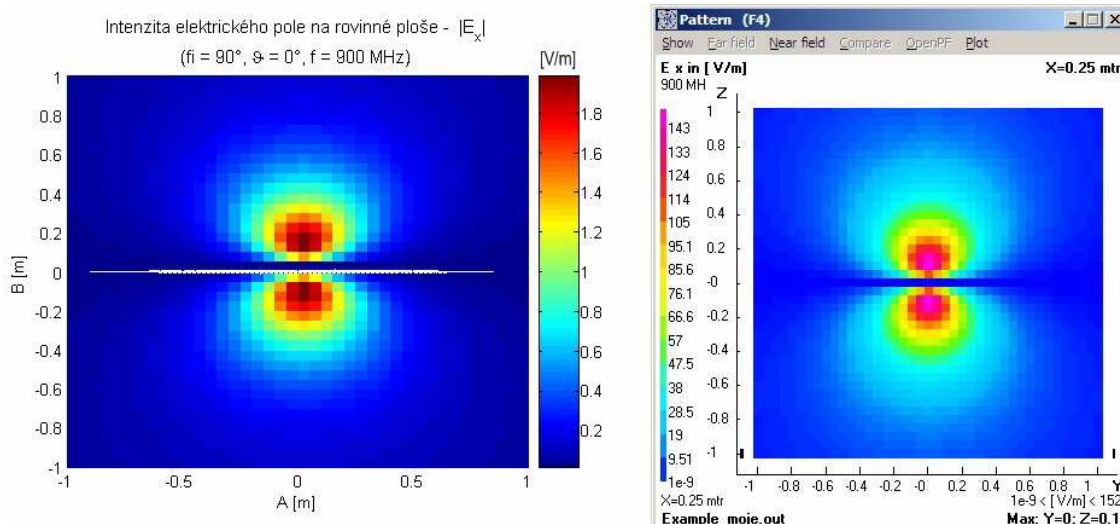
Srovnání výsledků výpočtu bylo provedeno také pro případ více dipólů, zde je uveden příklad záření dvou el. dipólů napájených budícím proudem s opačnou fází (což představuje umístění reflektoru rovnoběžného s rovinou zy v blízkosti dipólu z předchozí kapitoly). Dipóly jsou orientovány svisle (rovnoběžně s osou z), jejich polohy jsou $[0.1,0,0]$ m a $[-0.1,0,0]$ m. Rovinná plocha leží v rovině zy a je

umístěna ve vzdálenosti 0,25 m od počátku souřadnic. Vzájemná poloha dipólů a rovinné plochy je znázorněna na obr. 26.

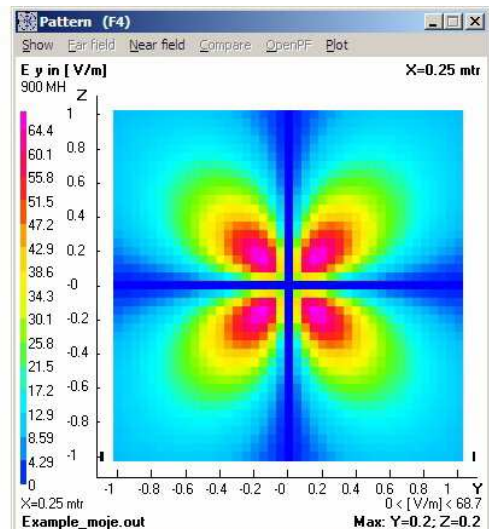
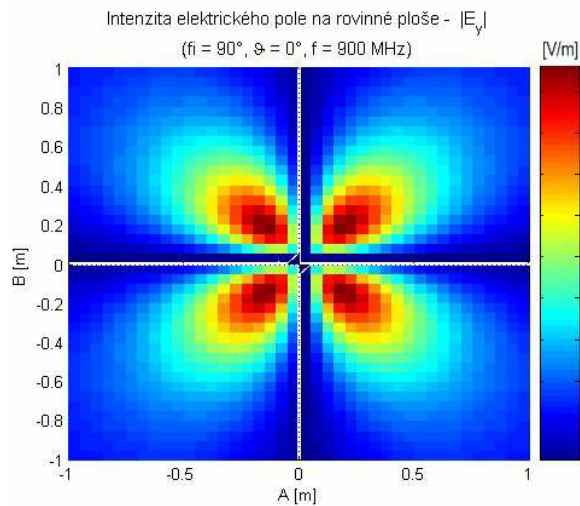
Na dalších obrázcích (obr. 27, obr. 28 a obr. 29) lze pak porovnat výsledky výpočtu rozložení složek intenzity pomocí obou programů pro dva svisle umístěné dipóly.



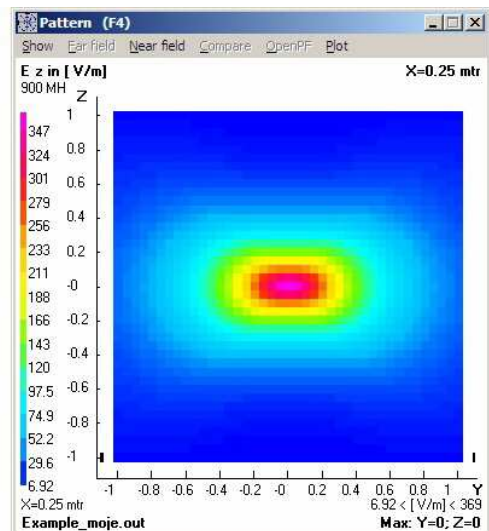
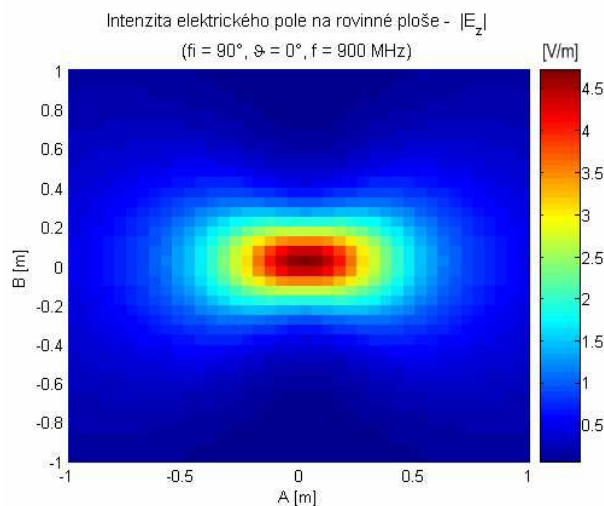
Obr. 26 Poloha dvojice dipólů a rovinné plochy pro srovnání s programem 4NEC2



Obr. 27 Srovnání rozložení složky E_x intenzity elektrického pole na rovinné ploše



Obr. 28 Srovnání rozložení složky E_y intenzity elektrického pole na rovinné ploše



Obr. 29 Srovnání rozložení složky E_z intenzity elektrického pole na rovinné ploše

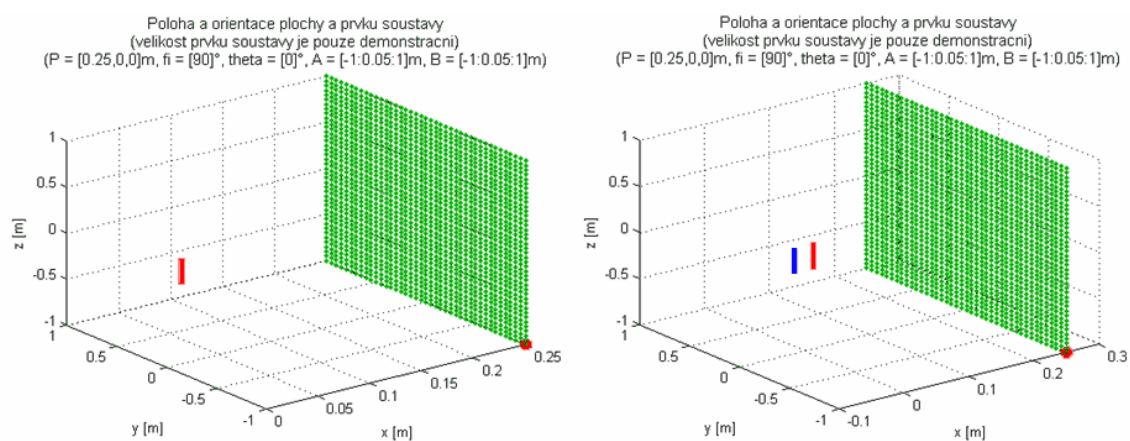
V obou případech byl porovnáván charakter rozložení složek intenzity elektrického pole na rovinné ploše se stejným rozměry a stejnou vzdáleností od antény. Přestože oba programy používají o něco odlišný rozsah barevné škály, lze říci, že je v obou případech charakter rozložení pole totožný.

4 PŘÍKLADY VYPOČTENÝCH ROZLOŽENÍ

V této kapitole bude uvedeno několik příkladů charakteru elektromagnetického záření soustavy dipólů s reflektorem. Nejprve bude ukázán vliv reflektoru na záření jednoho dipólu. Dále bude prezentován příklad záření některé složitější antény. Nastavení parametrů příkladů popsanych v této kapitole je možné načíst z podadresáře *nastaveni* v adresáři programu.

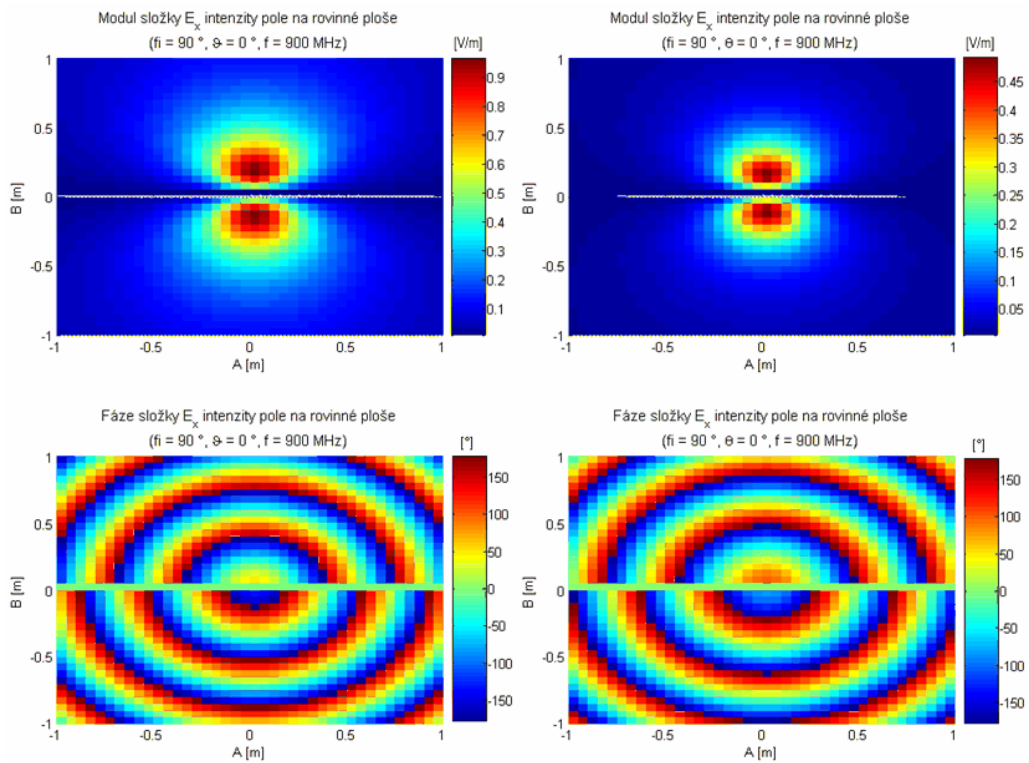
4.1 Záření dipólu s reflektorem

První anténou je elektrický dipól umístěný svisle se středem v bodě $[0.015, 0, 0]$ m, druhou je stejný dipól umístěný v blízkosti reflektoru (poloha skutečného dipólu je $[0.015, 0, 0]$ m, zrcadleného $[-0.015, 0, 0]$ m, reflektor leží v počátku souřadnic rovnoběžně z rovinou zy), obě jsou buzeny signálem s kmitočtem 900 MHz. Jejich polohy vzhledem k rovinné ploše jsou znázorněny na obr. 30 (rovinná plocha je natočena kolmo na osu x ve vzdálenosti 0.25 m, její šířka je dána parametrem A , výška parametrem B ; vztah rozměrů A , B vzhledem ke kartézským souřadnicím x , y , z je popsán v kapitole 2.1).

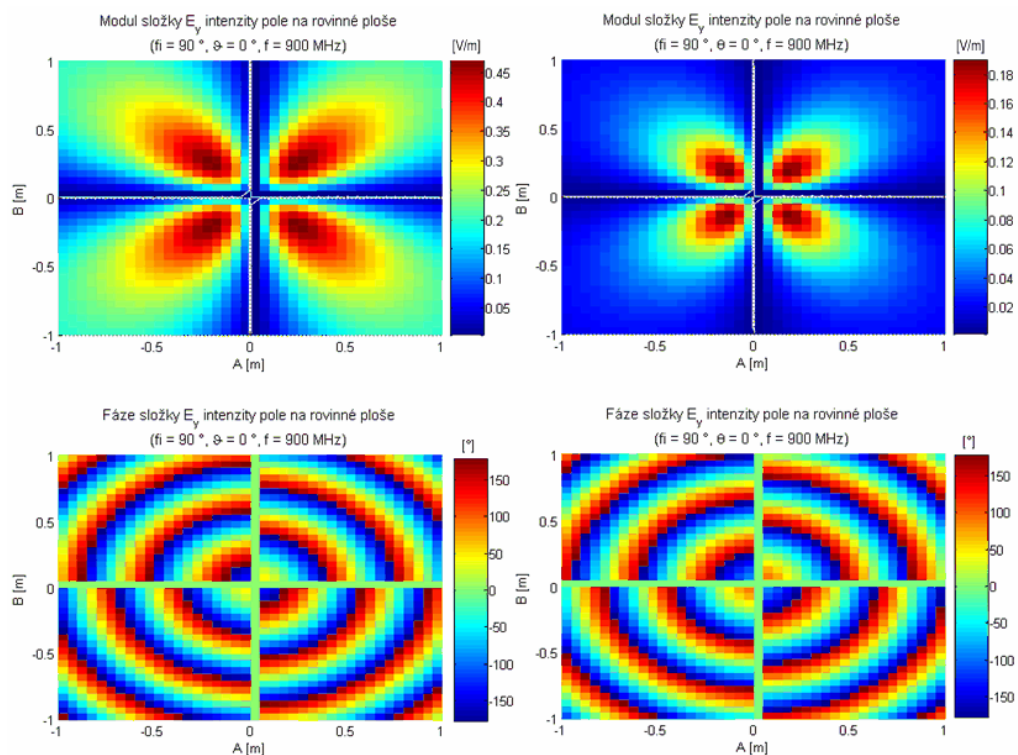


Obr. 30 Poloha a orientace rovinné plochy vzhledem k dipólu (vlevo)
a dipólu s reflektorem (vpravo)

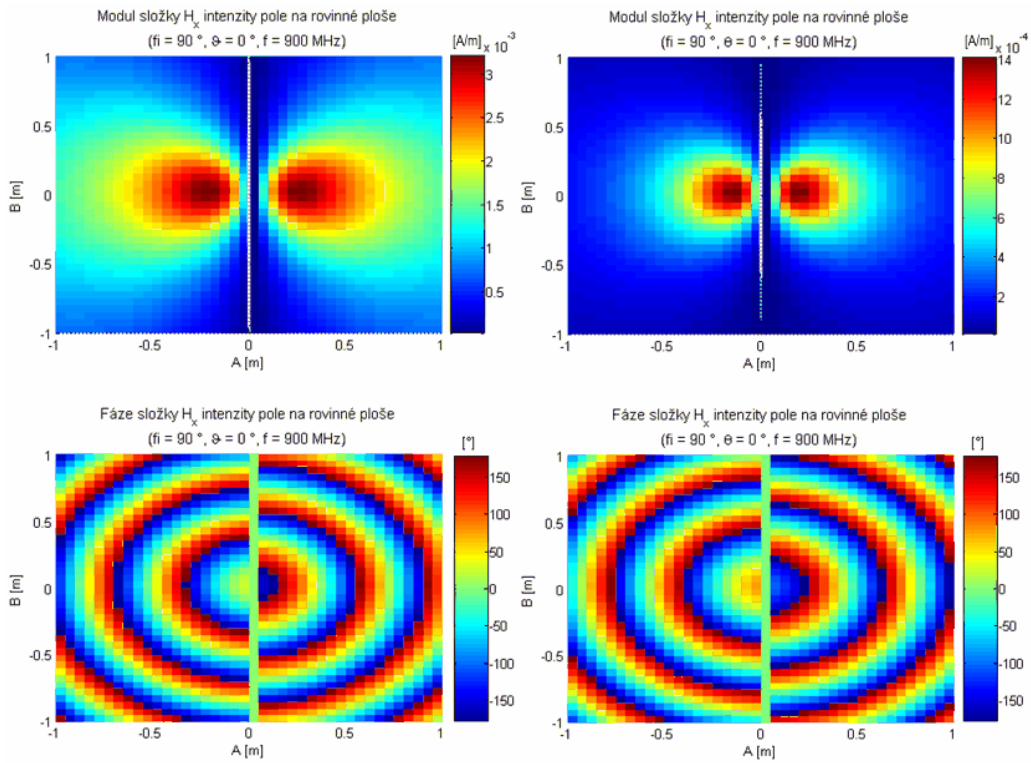
Na následujících obrázcích jsou vedle sebe pro srovnání umístěny složky elektrického a magnetického pole vypočtené pro samostatný dipól (vlevo) a pro dipól s reflektorem (vpravo).



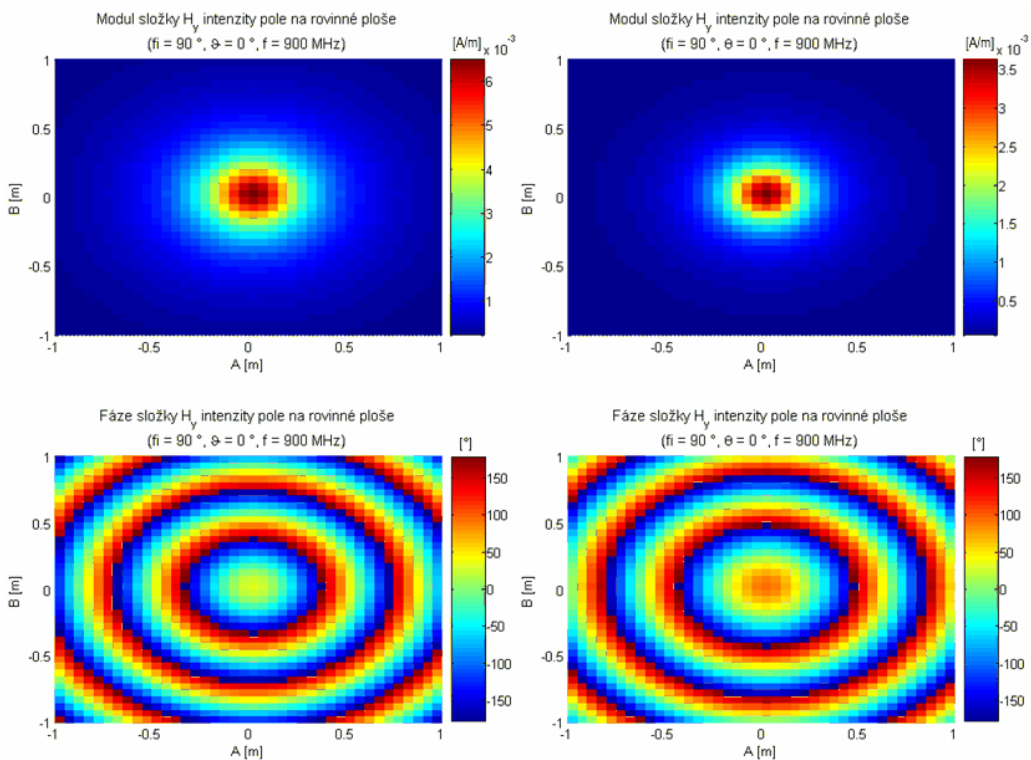
Obr. 31 Srovnání složek E_x záření dipólu (vlevo) a dipólu s reflektorem (vpravo)



Obr. 32 Srovnání složek E_y záření dipólu (vlevo) a dipólu s reflektorem (vpravo)

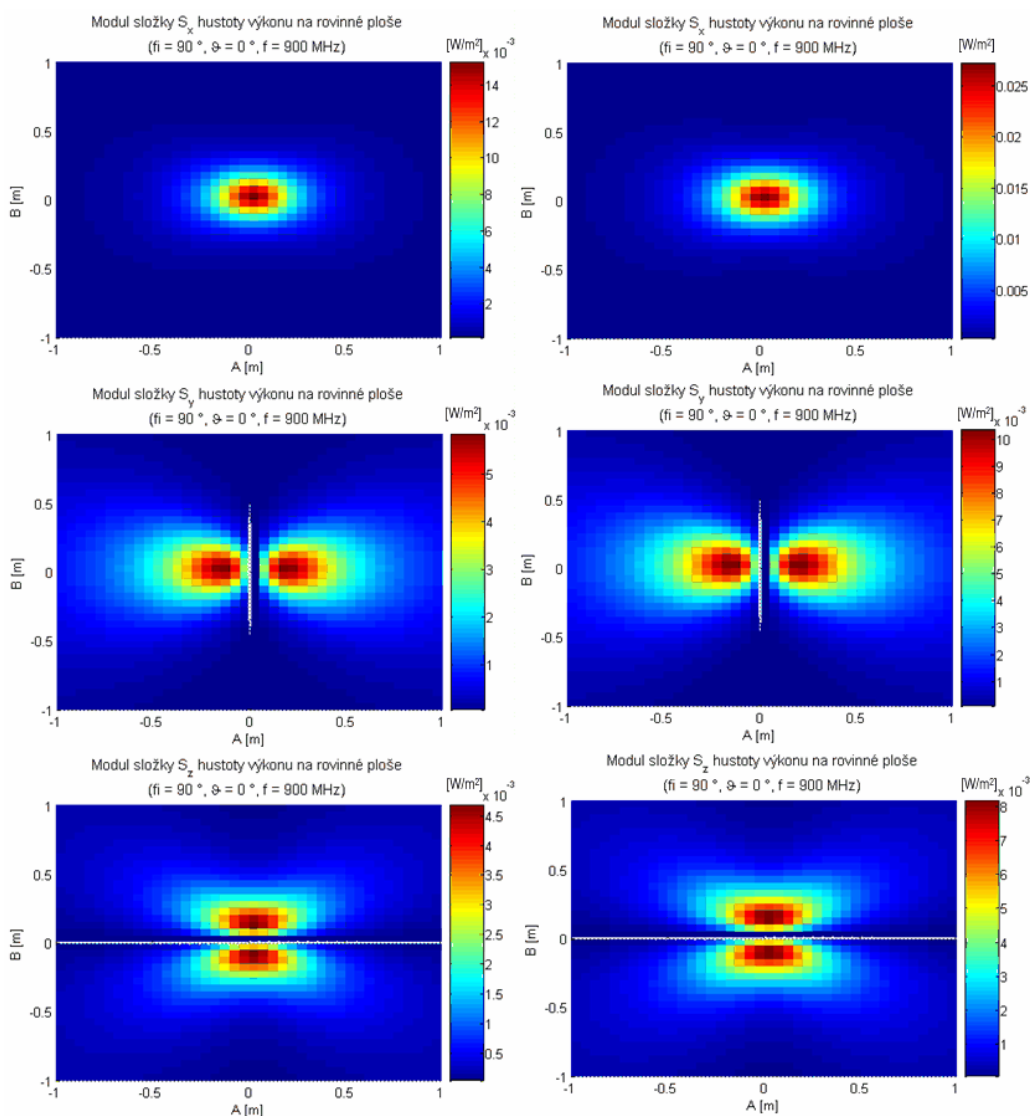


Obr. 33 Srovnání složek H_x záření dipólu (vlevo) a dipólu s reflektorem (vpravo)



Obr. 34 Srovnání složek H_y záření dipólu (vlevo) a dipólu s reflektorem (vpravo)

Jak u rozložení složek intenzit elektrického tak i magnetického pole lze pozorovat, že vlivem reflektoru dochází k zúžení vyzařovací charakteristiky. Nejzřetelněji je to vidět v grafech obr. 32 a obr. 33.



Obr. 35 *Moduly složek hustoty výkonu záření samostatného dipólu (vlevo) a dipólu s reflektorem (vpravo)*

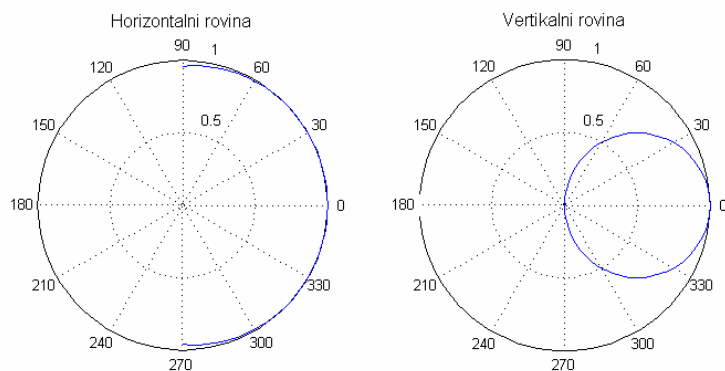
Na obr. 35 jsou zobrazena rozložení kartézských složek hustoty výkonu záření, přidání reflektoru se na jejich charakteru neprojevilo tak výrazně jako u složek intenzit elektrického a magnetického pole.

Zvýšení směrovosti vlivem reflektoru je patrné ze směrových charakteristik obou antén (obr. 36 a obr. 37) vykreslených v poloprostoru před reflektorem. Pro rozložení celkové intenzity elektrického pole elementárního dipólu platí, že září

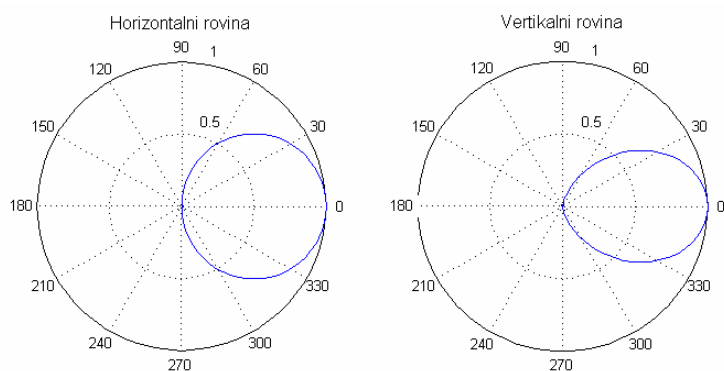
v rovině kolmé na vodič ve všech směrech, v rovině rovnoběžné s vodičem má jeho charakteristika tvar funkce $\sin \vartheta$ [3].

Pozn.: Směrová charakteristika samostatného dipólu v horizontální rovině (obr. 36 vlevo) by měla mít tvar kružnice s poloměrem 1. Protože však dipól neleží přímo v počátku souřadné soustavy, ale je posunut ve směru kladné osy y , je tato kružnice posunuta vpravo.

Vlivem reflektoru dojde v horizontální rovině k omezení záření pouze do poloroviny před reflektorem a také k zúžení vyzařování v rovině vertikální. Směrové charakteristiky jsou zobrazeny pouze v poloprostoru před reflektorem, ležícím v rovině zy , protože náhrada záření proudů tekoucích reflektorem zrcadlovými obrazy dipólů platí pouze pro tuto oblast (kapitola 1.3).



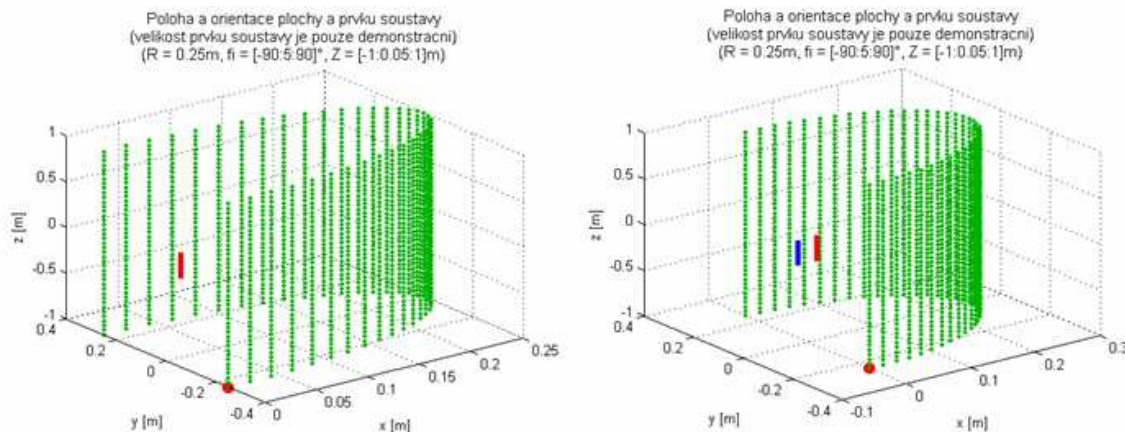
Obr. 36 Směrové charakteristiky samostatného dipólu



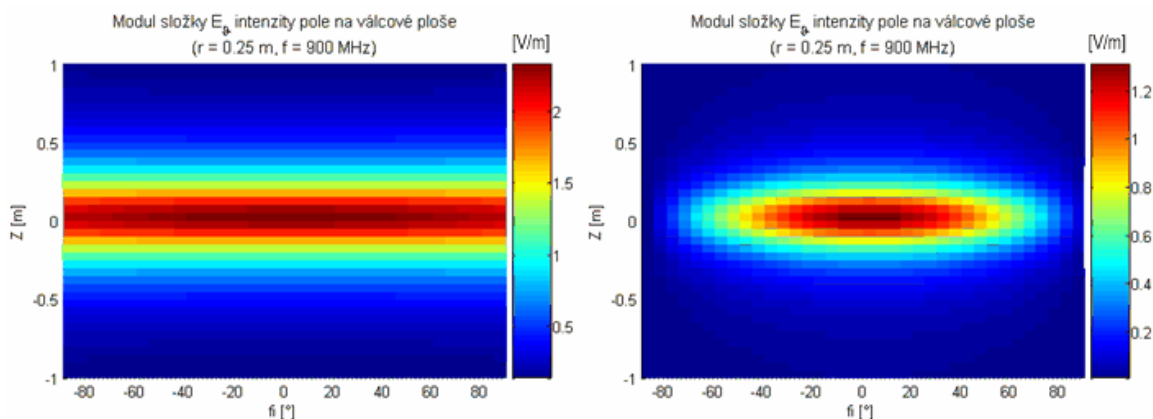
Obr. 37 Směrové charakteristiky dipólu s reflektorem

Změnu rozložení intenzity lze pozorovat také na válcové ploše, její vzájemná poloha vzhledem k dipólům je na obr. 38. Všesměrový charakter záření jednoho dipólu lze sledovat na obr. 39 vlevo, kde se ve vodorovném směru modul složky

intenzity \vec{E}_ϑ skoro nemění. Přidáním reflektoru dojde ke snížení hodnoty modulu \vec{E}_ϑ ve směrech v okolí úhlů $\pm 90^\circ$ (rozložení modulů je na obr. 39 vpravo), tj. směrovost antény se zvýší.



Obr. 38 Poloha a orientace válcové plochy vzhledem k dipólu (vlevo) a dipólu s reflektorem (vpravo)

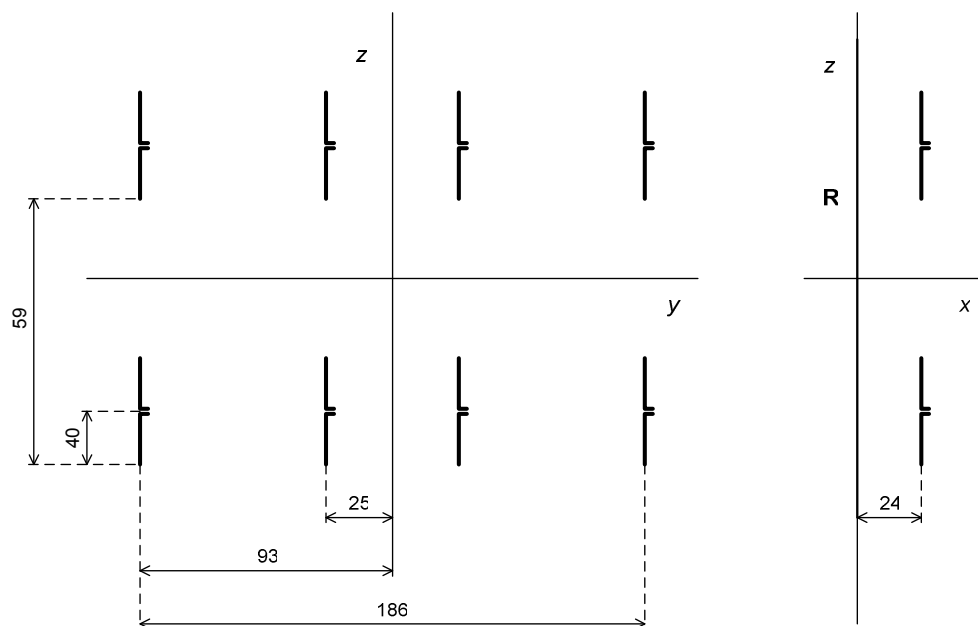


Obr. 39 Změna charakteru záření vlivem reflektoru – rozložení složky \vec{E}_ϑ (vlevo – bez reflektoru, vpravo – s reflektorem)

4.2 Rozložení pole antény F-Panel

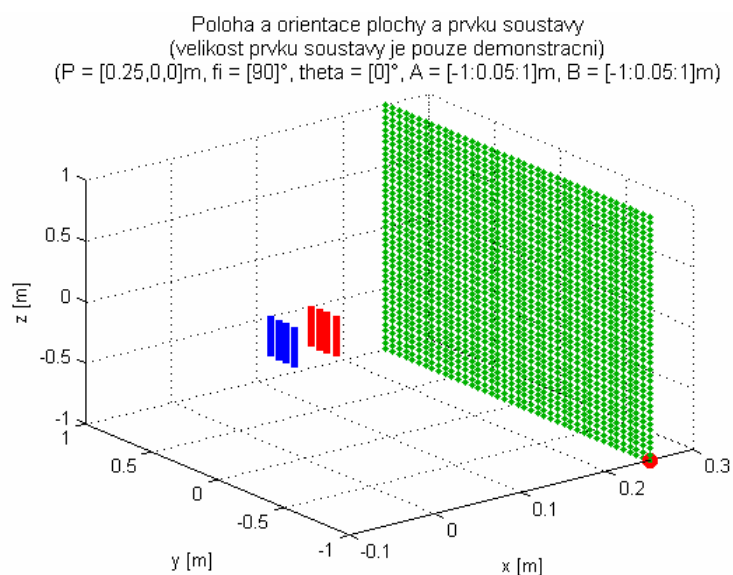
Pro příklad rozložení elektromagnetického pole v blízké oblasti antény byla vybrána skládaná anténa F-Panel (viz [11]) od firmy KATHREIN. Tato soustava je určena pro kmitočtové pásmo 1710-1990 MHz a skládá se z osmi dipólů s reflektorem. Rozmístění a vzdálenosti prvků (v mm) jsou na obr. 40, vlevo je

pohled zředu, vpravo je znázorněna vzdálenost od reflektoru, který je stejně jako v předchozích případech umístěn v rovině zy .

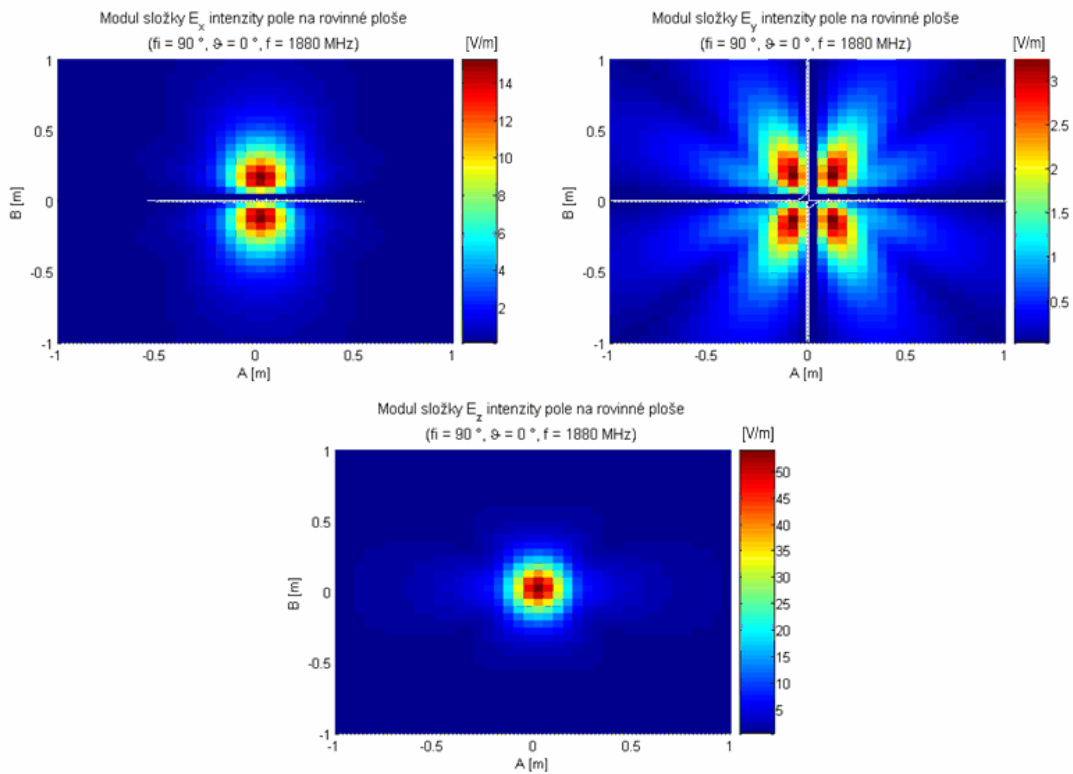


Obr. 40 Rozměry a vzdálenosti prvků a antény F-Panel

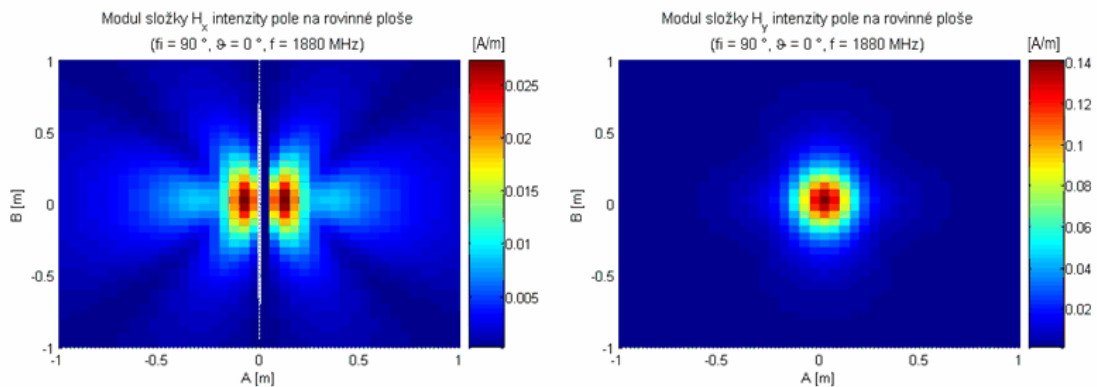
Při výpočtu rozložení záření na rovinné ploše byla anténa orientována tak, aby reflektor ležel v rovině zy (viz obr. 41). Kmitočet budícího proudu byl pro výpočet nastaven na 1880 MHz.



Obr. 41 Poloha a orientace rovinné plochy vzhledem k anténě F-Panel



Obr. 42 Rozložení kartézských složek intenzity elektrického pole antény F-Panel na rovinné ploše

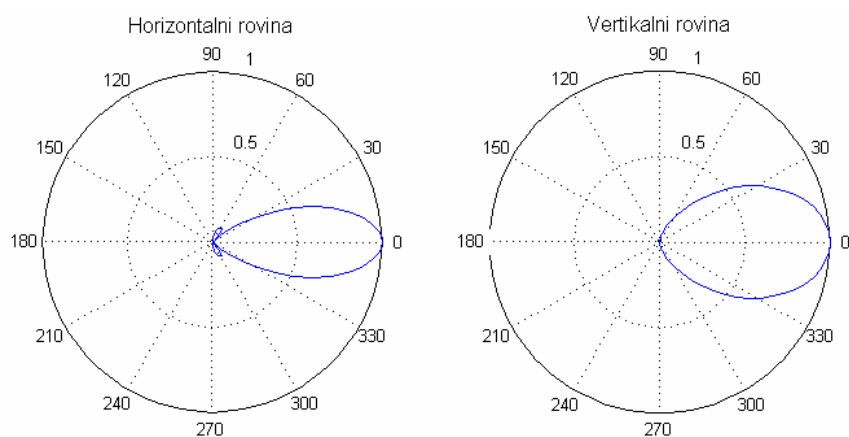


Obr. 43 Rozložení kartézských složek intenzity magnetického pole antény F-Panel na rovinné ploše

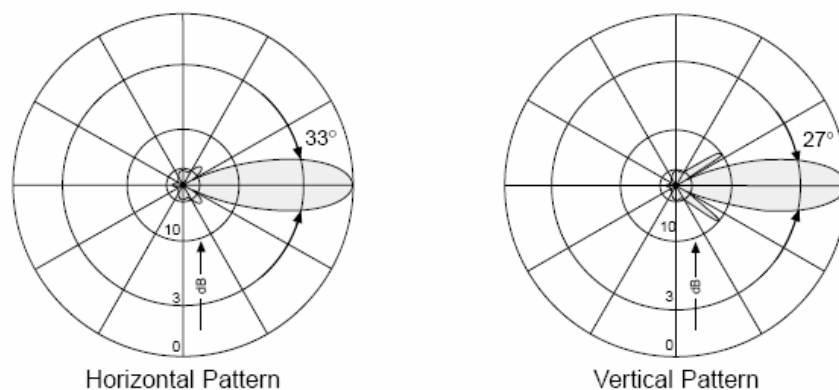
Z rozložení složek intenzity elektrického (obr. 42) a magnetického (obr. 43) pole na rovinné ploše lze pozorovat, že směrovost antény je značně lepší než v kapitole 4.1. Toho bylo dosaženo vhodným rozmístěním jednotlivých prvků s ohledem na vlnovou délku (resp. kmitočet) budicího signálu.

Větší směrovost je možné sledovat také z charakteru směrových diagramů. Na obr. 44 jsou polární diagramy sestavené pomocí vytvořeného programu. Pokud je srovnáme s diagramy z katalogového listu antény (obr. 45), lze pozorovat určitou shodu charakteru záření v horizontální rovině.

Diagram však docela neodpovídá v rovině vertikální. Tato nepřesnost je zřejmě způsobena tím, že anténa je složena z dipólů s délkou ramene přibližně $\lambda/4$ (pro kmitočet $f = 1880$ MHz je $\lambda = 0,16$ m), zatímco program umožňuje výpočet záření elementárních dipólů. Pro ty platí, že délka ramene je značně menší než délka vlny ($\lambda \ll l$), kdy se dá rozložení proudu ve vodiči považovat za konstantní.



Obr. 44 Směrové diagramy sestavené navrženým programem



Obr. 45 Směrové diagramy z katalogového listu antény F-Panel (viz [11])

ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvořit program pro výpočet složek záření v blízké zóně antény pro obecný počet prvků. Nejprve bylo tedy nutné definovat body, ve kterých bude vhodné hodnoty záření pozorovat, byla vybrána rovinná a válcová plocha.

V průběhu řešení vyplynulo, že bude vhodné zobrazovat rozložení vypočtených hodnot nejen v kartézských složkách, ale i ve složkách válcové a sférické souřadnicové soustavy. Lze tak pozorovat například to, jakým způsobem se mění radiální složka záření v závislosti na vzdálenosti bodu pozorování od antény.

Vytvořený program umožňuje zadání parametrů soustavy antén s reflektorem složené obecně z libovolného počtu dipólů. Pro takto definovanou anténu lze zobrazit rozložení intenzit elektrického pole, intenzit magnetického pole a hodnot hustoty výkonu v bodech na rovinné nebo válcové ploše. Hodnotu v libovolném bodě grafu lze zjistit kliknutím kurzoru myši na zvolený bod. Zobrazené grafy lze také uložit jako obrázky. Pro pozdější práci je možné uložit vypočtené hodnoty do datových souborů.

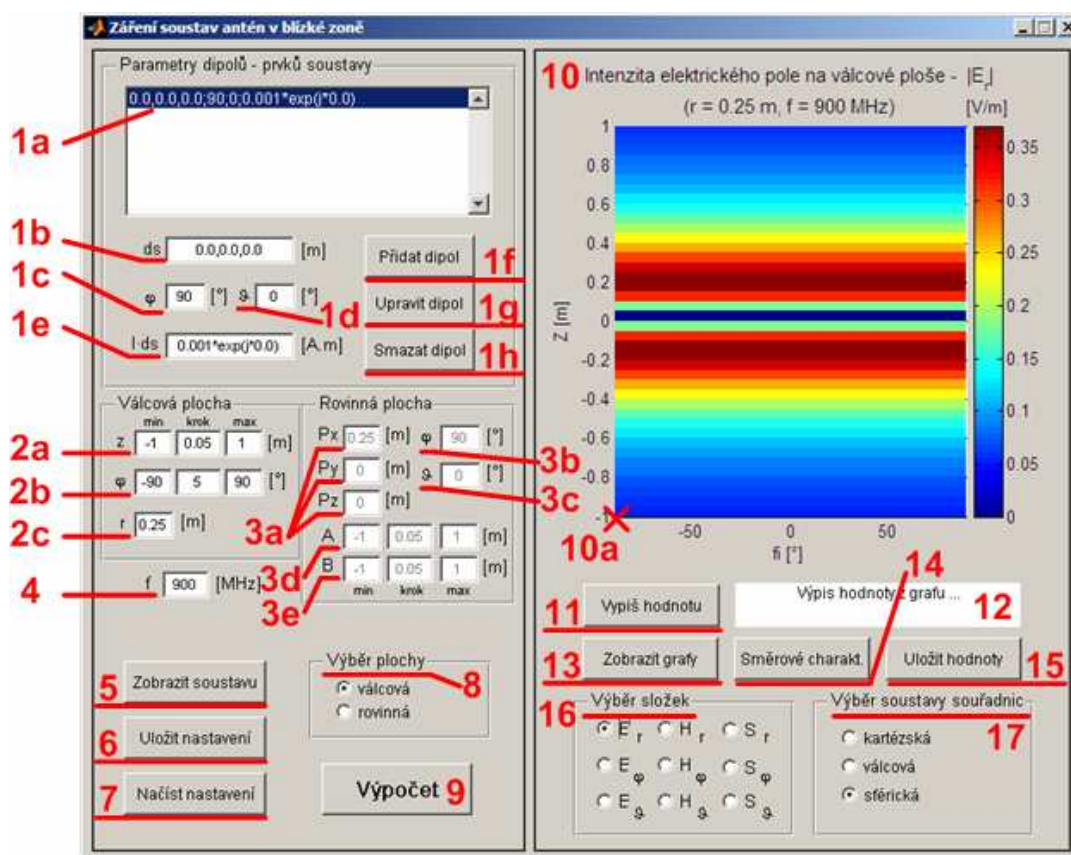
Z časových důvodů nebylo možné ověřit výsledky výpočtu měření, proto bylo alespoň provedeno srovnání s výpočty získanými v programu 4NEC2. Bylo možné srovnat pouze rozložení modulů na rovinné ploše (3.3), ale záření vypočtené pomocí obou programů má stejný charakter.

Program umožňuje vcelku intuitivní ovládání. Je možné využít jej například pro demonstraci záření anténní soustavy ve výuce nebo pro grafickou prezentaci složek záření při návrhu antén.

LITERATURA

- [1] STRATTON, J. A. Teorie elektromagnetického pole. SNTL, Praha 1961, 592 s.
- [2] NOVÁČEK, Z. Elektromagnetické vlny, antény a vedení. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně.
- [3] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z. Antény a šíření rádiových vln, Přednášky. Skriptum FEKT VUT v Brně. MJ Servis s. r. o., Brno, 2005.
- [4] ČERNOHORSKÝ, D., TICHÝ, J. Vyzařování a šíření rádiových vln, II. Díl Antény. Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1977.
- [5] SLATER, D. Near field antenna measurement. Artech House, Norwood, 1991. 310 s. ISBN 0-89006-361-3.
- [6] Wikipedie, otevřená encyklopedie [online]. 2002 - [cit. 3. května 2007]. Dostupné z www: http://cs.wikipedia.org/wiki/Válcová_soustava_souřadnic.
- [7] Wikipedie, otevřená encyklopedie [online]. 2002 - [cit. 3. května 2007]. Dostupné z www: http://cs.wikipedia.org/wiki/Sférická_soustava_souřadnic.
- [8] WEISSTEIN, E. W. „Cylindrical Coordinates“ From MathWorld - A Wolfram Web Resource [online]. MathWorld: The Web's Most Extensive Mathematics Ressource, [1999-2008] - [cit. 16. 5. 2008]. Dostupné z www: <http://mathworld.wolfram.com/CylindricalCoordinates.html>.
- [9] WEISSTEIN, E. W. „Spherical Coordinates“ From MathWorld - A Wolfram Web Resource [online]. MathWorld: The Web's Most Extensive Mathematics Ressource, [1999-2008] - [cit. 16. 5. 2008]. Dostupné z www: <http://mathworld.wolfram.com/SphericalCoordinates.html>.
- [10] NEC based antenna modeler and optimizer [online]. [2005-2008] - [cit. 30. 4. 2008]. Dostupné z WWW: <http://home.ict.nl/~arivoors/>.
- [11] Katalogové listy antény F-Panel, Kathrein [online]. [cit. 22. 5. 2008] Dostupné z WWW: <http://www.kathrein.de/de/mca/produkte/download/9361291g.pdf>.

PŘÍLOHA 1 - NÁVOD K OVLÁDÁNÍ PROGRAMU



(1) Okno programu - rozložení ovládacích prvků

Parametry dipólů - prvků soustavy:

- 1a - **Seznam prvků** - seznam vložených prvků, pořadí parametrů je: „**ds; φ ; ϑ ; $I \cdot ds$** “
- 1b - **ds** [m] - souřadnice středu dipólu
- 1c - **φ** [°] - úhel určující pootočení dipólu od kladné osy x ve směru proti chodu hodinových ručiček
- 1d - **ϑ** [°] - úhel svíraný dipólem a kladnou osou z
- 1e - **$I \cdot ds$** [A.m] – proudový moment dipólu
- 1f - **Přidat dipól** - přidá do seznamu prvků dipól s parametry v polích **ds**, **φ** , **ϑ** a **$I \cdot ds$**
- 1g - **Upravit dipól** - upraví parametry dipólu vybraného v seznamu prvků podle hodnot zadaných v polích **ds**, **φ** , **ϑ** a **$I \cdot ds$**
- 1h - **Smazat dipól** - smaže vybraný dipól ze seznamu prvků

Definice parametrů válcové plochy:

- 2a - **z** [m] - souřadnice výšky plochy (minimum, krok, maximum)
- 2b - **φ** [°] - souřadnice vodorovného rozměru plochy (minimum, krok, maximum)
- 2c - **r** [m] - poloměr válcové plochy.

Definice parametrů rovinné plochy:

- 3a - **Px** [m], **Py** [m] a **Pz** [m] - souřadnice středu rovinné plochy

3b - φ [°] - úhel určující pootočení rovinné plochy od kladné osy x ve směru proti chodu hodinových ručiček

3c - ϑ [°] - úhel mezi zadávanou plochou a kladnou osou z

4d - **A** [m] - svislý rozměr plochy (minimum, krok, maximum)

4e - **B** [m] - vodorovný rozměr plochy (minimum, krok, maximum)

4 - **f** [MHz] - nastavení kmitočtu budicího proudu

5 - Po stisku tlačítka **Zobrazit soustavu** se v grafu (**10**) zobrazí poloha vybrané plochy a zadané soustavy dipólů v prostoru. Červeně je zde vyznačen bod, který se v grafu vykreslí do levého spodního rohu (**10a**).

6 - Po stisku tlačítka **Uložit nastavení** budou nastavené parametry uloženy do souboru v adresáři **nastavení**.

7 - Tlačítko **Načíst nastavení** umožňuje načtení parametrů z vybraného souboru.

8 - **Výběr plochy** - výběr mezi válcovou a rovinnou plochou.

9 - Po stisku tlačítka **Výpočet** dojde k výpočtu veličin elektrického pole pro zadané parametry a v grafu (**10**) se zobrazí rozložení modulu vybrané složky.

Grafické zobrazení vypočtených dat (**10**): Po provedení výpočtu a výběru složky se zobrazí grafická závislost modulu vybrané veličiny (elektrické nebo magnetické intenzity nebo hustoty výkonu) na poloze bodu.

10 - Oblast grafu, kde se zobrazuje rozložení vybrané veličiny

11 - Po stisku tlačítka **Vypiš hodnotu** se v grafu zobrazí kurzor. Po kliknutí na vybrané místo v grafu se v části „**Výpis hodnoty z grafu...**“ (**12**) zobrazí souřadnice vybraného bodu a modul a fáze vybrané veličiny v tomto bodě.

13 - Po stisku tlačítka **Zobrazit grafy** se otevře nové okno **Zobrazení složek**. V tomto okně lze zobrazit grafy rozložení modulů a fází vypočtených veličin na vybrané ploše a podle potřeby je uložit ve vhodném formátu.

14 - Po stisku tlačítka **Směrové charakt.** se v novém okně otevře graf, ve kterém jsou zobrazeny směrové diagramy v horizontální a vertikální rovině. Ty je možné uložit jako obrázek ve vybraném datovém formátu (např. png, jpg či bmp).

15 - Po kliknutí na tlačítko **Uložit hodnoty** se zobrazí okno pro zadání názvu složky, do které chceme uložit vypočtené hodnoty. Po jeho zadání dojde k uložení vypočtených rozložení intenzit a hustoty výkonu do souborů ve formátu *.mat v adresáři **data**. Dále jsou do textového souboru uloženy parametry, pro které byl výpočet rozložení proveden.

16 - **Výběr složek** - výběr veličiny, jejíž rozložení na vybrané ploše (**8**) se zobrazí v grafu (**10**).

17 - **Výběr soustavy souřadnic:**

kartézská - výběr kartézské souřadné soustavy (souřadnice x, y, z)

válcová - výběr válcové souřadné soustavy (souřadnice r, φ , z)

sférická - výběr sférické souřadné soustavy (souřadnice r, φ , ϑ).