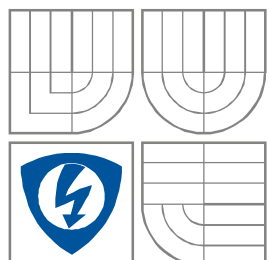


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

Modelování netradičních monopolů v programu COMSOL Multiphysics

Modeling non-conventional monopoles in COMSOL Multiphysics

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Vladimír Zmeškal

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

BRNO, 2008

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Vladimír Zmeškal
Bytem: Seloutky 31, 798 04
Narozen/a (datum a místo): 16. Srpna 1985 v Olomouci

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 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: Modelování netradičních monopolů v programu COMSOL Multiphysics

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

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.

* hodící se zaškrtněte

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

Práce se zabývá modelováním netradičních monopolů v programu COMSOL Multiphysics. Nejprve je popsána práce ve zvoleném programu. Následně se zaměříme na návrh a modelování tří určitých typů netradičních monopolů: kónického monopolu, monopolu s kapacitním zakončením a kapkového monopolu. Pro každý monopol jsou zobrazeny směrové charakteristiky. Diskutován je vliv změn parametrů anténního ramene. V dalším bodu práce byly vypracované modely monopolů doplněny o globální optimalizační metody: genetický algoritmus a metodu roje částic. Optimalizace proběhla v MATLABu. Byl tak vytvořen nástroj pro počítačový návrh monopolů.

The project deals with the computer simulation of non-conventional monopoles in the program COMSOL Multiphysics. First, the methodology for using COMSOL Multiphysics is described. Second, we concentrate on the design and modeling of three types of non-conventional monopoles: the conical one, the capacitively loaded one, and the drop-shaped one. For each monopole, directivity patterns are displayed. The influence of the variation of antenna dimensions to its parameters is discussed. Monopoles are mutually compared. Finally, models of monopoles are completed by global optimizations techniques: genetic algorithms and particle swarm optimization. That way, a design tool is developed in MATLAB.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Anténní monopol, COMSOL Multiphysics, modelování, globální optimalizace.

KEYWORDS:

Monopole antenna, COMSOL Multiphysics, modeling, global optimization.

Bibliografická citace mé práce:

ZMEŠKAL, V. *Modelování netradičních monopolů v programu COMSOL Multiphysics*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008. 41 s., Vedoucí bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Modelování netradičních monopolů v programu COMSOL Multiphysics jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....
podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD	8
2 COMSOL MULTIPHYSICS.....	8
3 MODELOVÁNÍ ANTÉN.....	9
3.1 Postup vytváření modelů.....	9
3.2 Kónický monopol.....	11
Simulace	12
Směrové charakteristiky	12
Shrnutí	13
3.3 Monopól s kapacitním zakončením	15
Simulace	15
Směrové charakteristiky	15
Shrnutí	18
3.4 Kapkový monopol	18
Simulace	18
Směrové charakteristiky	19
Shrnutí	21
4 OPTIMALIZACE.....	22
4.1 Genetické algoritmy	23
Průběh optimalizace.....	23
Implementace GA v MATLABU	24
Výsledky a shrnutí optimalizace	26
4.2 Metoda roje částic	31
Průběh optimalizace.....	32
Implementace PSO v MATLABU	32
Výsledky a shrnutí optimalizace	34
5 ZÁVĚR.....	38
POUŽITÁ LITERATURA	39
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	40
SEZNAM PŘÍLOH.....	41

1 ÚVOD

V praxi se setkáváme s anténou, která se nazývá monopól a je prutovou nebo tyčovou anténou. Tvoří ji jedno rameno symetrického dipólu umístěné kolmo nad vodivou plochou, např. deskou, střešinou, „zemí“ a je buzena nesymetricky vůči této „zemi“. Podle principu zrcadlení můžeme vliv proudů v „zemi“ nahradit zářením zrcadlového obrazu antény, takže skutečná anténa společně se zrcadlovým obrazem vytvoří symetrický dipól. Takováto anténa rezonuje při $\lambda/4$, impedance 36Ω (polovina impedance dipólu). Bohužel, ideálně nekonečná uzemněná rovina pod anténou v praxi buď neexistuje vůbec, nebo se vyskytuje chaoticky. Skutečné vyzařovací charakteristiky pak značně závisí na konkrétní instalaci. [2]

Cílem této práce je modelovat a porovnat tři typy anténních monopólů. A nalézt nejvhodnější instalaci.

2 COMSOL MULTIPHYSICS

COMSOL Multiphysics™ je program pro modelování a simulaci fyzikálních procesů popsatečných pomocí parciálních diferenciálních rovnic. Metoda je známá také pod názvem EBM - Equation Based Modeling, kdy základem řešení je knihovna parciálních diferenciálních rovnic popisujících vybrané úlohy. Uživatel však není omezován aplikačními režimy z této knihovny, ale má možnost díky otevřenosti systému volně definovat své vlastní úlohy [1].

Většina úloh v COMSOL Multiphysics je řešena metodou konečných prvků. Program je určen k modelování a k simulaci úloh z oblasti strojírenství, elektrotechniky, chemie a z různých oblastí fyziky jako je přenos tepla, dynamika tekutin, akustika, vibrace, elektromagnetismus a šíření vln, fotonová fyzika, simulace jevů v polovodičích, strukturální mechanika, difúze a proudění porézními médii, chemické reakce, geofyzika, biologie, palivové články, polovodiče, vedení tepla, MEMS - Microelectromechanical Systems, kvantová mechanika, atd. [1]

COMSOL Multiphysics usnadňuje pochopení řady fyzikálních a technických procesů díky názorné grafice, snadné změně vstupních parametrů a možnosti simulace dané úlohy. Na řešení je možné v krátké době pohlednout z několika zorných úhlů a efektivně tak najít optimální variantu. Právě srozumitelnost, otevřenost, schopnost řešit více fyzikálních jevů současně (multifyzikální úlohy) a velké množství předzpracovaných typových příkladů jsou hlavními přednostmi tohoto nástroje. [1]

COMSOL Multiphysics se původně jmenoval FEMLAB a byl koncipován jako nadstavba nad programem MATLAB. Od vyšších verzí již může COMSOL pracovat jako samostatný program, nicméně při instalaci lze zvolit i možnost práce nad MATLABem. Tento způsob práce má tu základní výhodu, že výsledky analýzy z COMSOLu lze snadno exportovat do MATLABu a zde je dále zpracovávat. [1]

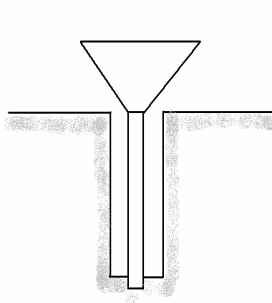
COMSOL v sobě zahrnuje mnoho modulů. Monopóly, na jejichž modelování je zaměřen tento projekt, jsem modeloval v tzv. RF Module. Radiofrekvenční modul obecně usnadňuje návrh systémů, pracujících s elektromagnetickým vlněním. Lze vytvářet prototypy zařízení, které přenášejí, přijímají nebo zpracovávají elektromagnetické vlny ve frekvenčním rozsahu od radiových do optických vln. Uživatel má možnost brát v úvahu multifyzikální vlivy zahrnující například interakce mezi přenosem tepla a mechanickým zatížením. Je možné zkoumat např. vliv tepla na frekvenční odezvu mikrovlnného filtru, lze zkoumat výkonové vlnovody. Modul nabízí připravené multifyzikální aplikace. Uživatel tak nemusí složitě zkoumat, kterou aplikaci má zařadit do které třídy multifyzikálních úloh.

3 MODELOVÁNÍ ANTÉN

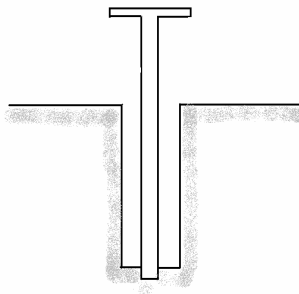
3.1 Postup vytváření modelů

V rámci projektu jsem měl vytvořit v programu COMSOL Multiphysics modely tří typů monopólů, které se od sebe liší tvarem svého ramene. Jedná se o kónický monopól (obr. 3.1a), monopól s kapacitním zakončením (obr. 3.1b) a kapkový monopól (obr. 3.1c).

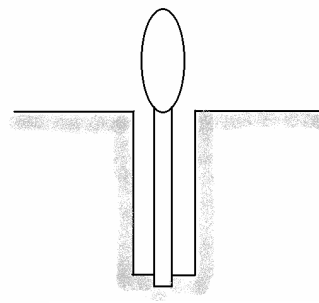
Jak je z obrázků zřejmé, všechny tři monopóly jsou tvořeny vnitřním vodičem koaxiálního vedení, které je prodlouženo nad rovinný reflektor. Monopóly jsou rotačně souměrné, takže je lze modelovat jako dvojrozměrné struktury.



obr. 3.1 a.)



obr.3.1 b.)

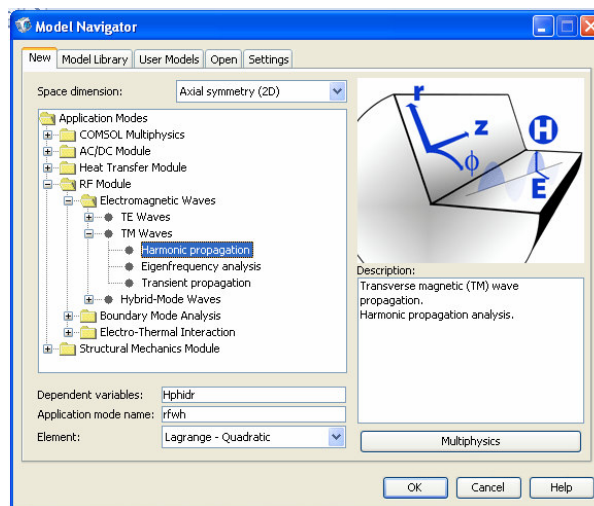


obr. 3.1 c.)

Obr. 3.1 Modelované monopóly: a.) kónický monopól;
b.) monopól s kapacitním zakončením; c.) kapkový monopól.

Základní kroky analýzy monopólů jsou identické, liší se pouze vykreslováním tvaru anténního ramene. Postup vytváření modelu si tedy vysvětlíme na modelu kónického monopólu.

Po spuštění programu se otevře dialog pro zadání dimenze analyzované struktury a pro výběr třídy modelů, do níž analyzovaná struktura spadá (viz obr. 3.2).



Obr. 3.2 Dialog pro výběr třídy úlohy.

Nejprve zvolíme v úvodním okně v liště *Space dimension* dvojrozměrnou rotační strukturu *Axial Symmetry (2D)*. Poté pokračujeme specifikací modelu; postupně vybíráme: *RF Module* → *Electromagnetic Waves* → *TM Waves* → *Harmonic propagation*.

Poté v grafickém editoru vykreslíme model zvolené antény. Díky rotační symetrii kreslíme jen polovinu struktury. Anténu přitom musíme nakreslit tak, aby se vlna šířila zespodu nahoru.

Postup práce v grafickém editoru:

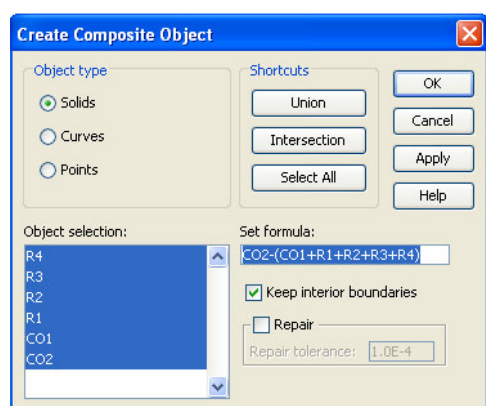
1. V kombu DRAW zvolíme kreslení obdélníku:

DRAW → *Draw objects* → *Rectangle/square*. Zadáváním zvolených rozměrů vykreslíme navrhnoutou strukturu monopólu. Získáváme objekty *R1*, *R2*, *R3* a *R4*.

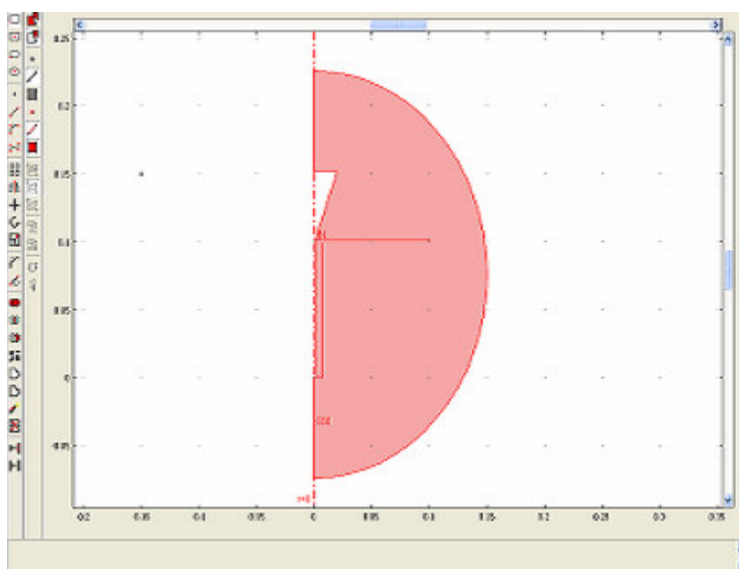
2. Trychtýř navrhnuté antény vykreslíme pomocí kreslení přímek. V kombu DRAW zvolíme: *DRAW* → *Draw objects* → *Line*. Zde se opět zadáváním zvolených rozměrů dostaneme k navrhnuté struktuře monopólu. Získáváme objekt *CO1*.

3. Celou strukturu musíme obalit dokonale přizpůsobenou bublinou, aby nedocházelo k odrazům. V kombu DRAW zvolíme: *DRAW* → *Draw objects* → *Ellipse/circle* a navrhnoutou strukturu touto bublinou obalíme. Získáváme objekt *CO2*.

4. V poslední řadě musíme vytvořit složený objekt (*Composite Object*) z celé struktury. V kombu DRAW zvolíme *DRAW* → *Create composite object*. A do pole s názvem „*Set formula*“. A od bubliny odečteme zbylé objekty, přenecháme jak je na obrázku 3.3. Operaci provedeme zmáčknutím tlačítka OK.



Obr. 3.3 Postup vytvoření složené Struktury.



Obr. 3.4 Výsledná struktura Monopólu.

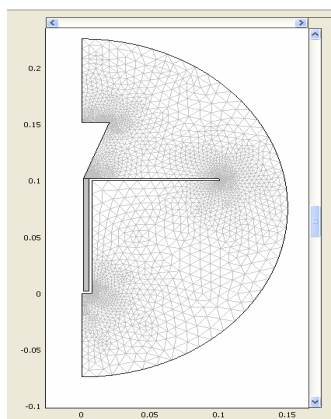
V dalším kroku musíme zadat vlastnosti antény a okrajové podmínky. Prostřednictvím položky menu *Physics / Scalar Variables* zadáme kmitočet (*frequency*), na němž anténu analyzujeme např.: $5e9$ (5 GHz).

Pro zadání okrajových podmínek se přepneme do menu *Physics / Boundary Settings*: v listboxu *Boundary Selection* postupně vybíráme jednotlivá rozhraní, v kombu *Boundary Condition* vybíráme typ okrajové podmínky. Vnitřní vodič i jeho prodloužení nad rovinný reflektor a rovinný reflektor jsou z dokonalého elektrického vodiče (*Perfect Electric Conductor*). Počátek vlnovodu je napájen coaxiálním vedením v kombu *Boundary Condition* zvolíme *PORT*. Objeví se záložka *PORT*, kde nastavíme *COAXIAL* v kombu *Mode specification*. Příkon antény pin nastavíme na 1 WAT.

Neexistující stěny uvnitř antény jsou nastaveny jako *Continuity*.

Poslední krok spočívá v tom, že musíme uzavřený prostor uvnitř naší bubliny, rozdělit na konečné prvky pomocí tlačítka v liště → *Refine mesh*. Naše struktura je nyní rozdělena viz obr.3.5.

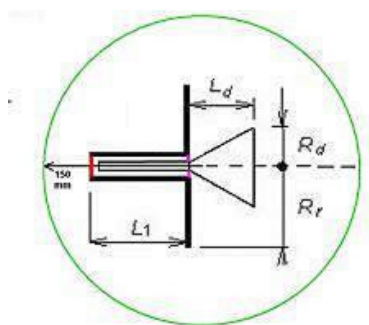
Model je tedy připraven k simulování, libovolných charakteristik.



Obr. 3.5 Výsledná struktura rozdělená na soubor konečných prvků.

3.2 Kónický monopól

Zvolené parametry kónického monopólu. Pro analýzu jsem zvolil poloměr vnitřního vodiče napáječe $r = 1 \text{ mm}$; poloměr vnějšího vodiče napáječe $R = 7 \text{ mm}$, vnější poloměr reflektoru $R_r = 102 \text{ mm}$, délku monopólu $L_d = 50 \text{ mm}$, poloměr širšího konce kónického ramene $R_d = 20 \text{ mm}$ a délku napájecího vedení $L_1 = 100 \text{ mm}$. Tloušťka reflektoru a vnějšího vodiče je $t = 2 \text{ mm}$. Anténu jsem obalil dokonale přizpůsobenou bublinou o poloměru 150 mm



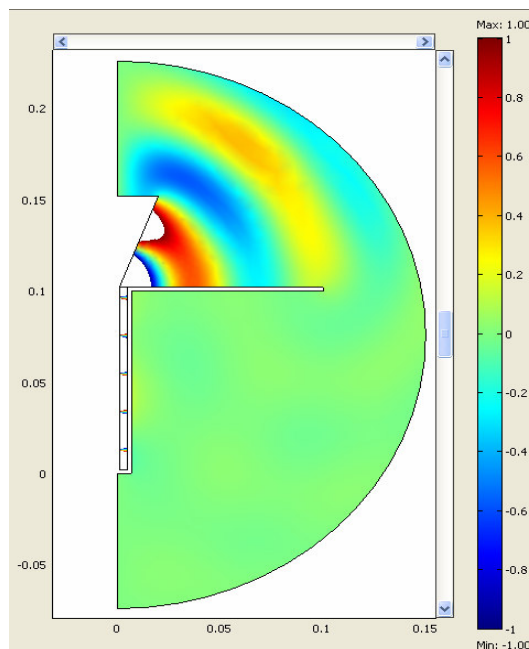
Obr. 3.6 Navrhnutá struktura kónického monopólu.

Vysvětlivky: Dokonale elektricky vodivé části jsou vykresleny ČERNĚ, stěny *Scattering Boundary Condition* (dokonale přizpůsobená bublina) ZELENĚ, budicí stěna červeně, stěny *Continuity* (neexistující stěny vlnovodu) FIALOVOU

Navrhnutou strukturu jsem postupem popsaným výše navrhl a odsimuloval v programu COMSOL Multiphysics. Parametry navrhnuté antény jsem zkoumal na kmitočtech $f \in (1 \text{ GHz} - 5 \text{ GHz})$.

Simulace

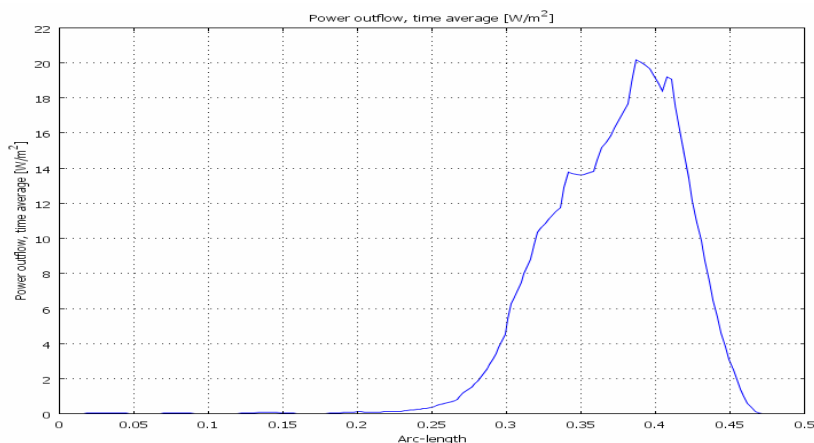
Na obrázku 3.7 vidíme rozložení elektromagnetického pole uvnitř a vně kónického monopólu s reflektorem, napájeného coaxiálním vedením při frekvenci 5 GHz. Zde si můžeme všimnout, že vlna za reflektorem nevyzařuje, intenzita magnetického pole má v těchto oblastech nulovou hodnotu (na obrázku barva zelená). Maximum velikosti intenzity magnetického pole nalezneme u výstupu z monopólu (barva tmavě červená). Bílá místa jsou oblasti, kde intenzita dosahovala hodnot mimo rozsah zvoleného měřítka (MIN = -1, MAX = 1).



Obr. 3.7 Rozložení elektromagnetického pole uvnitř a vně kónického monopólu. Axiální složka intenzity magnetického pole.

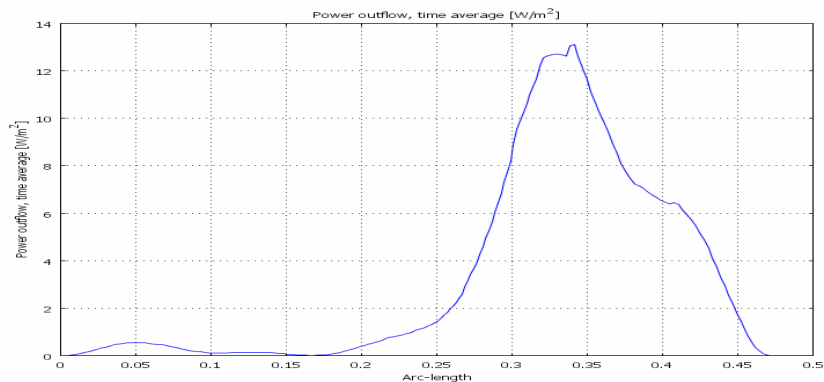
Směrové charakteristiky

V dalším kroku jsem zobrazil směrové charakteristiky pro jednotlivé frekvenční kroky (1 GHz, 3 GHz, 5 GHz). Směrová charakteristika antény je definována jako reprezentace směrových vlastností antény v závislosti na prostorových souřadnicích. Vliv změny frekvence, jsem vynesl do grafu, který je závislostí maximálního vyzářeného výkonu na frekvenci viz. obr. 3.11. Zde jsem frekvenci měnil od 200 MHz až po 10 GHz.



Obr. 3.8 Směrová charakteristika kónického monopólu pro kmitočet 5 GHz.

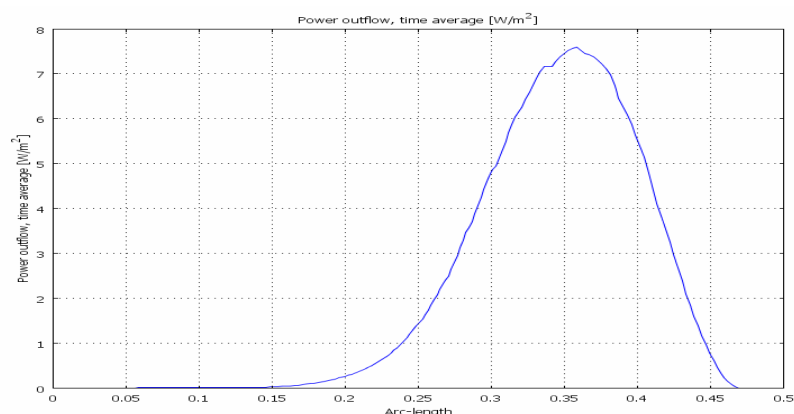
Z grafu směrové charakteristiky pro kmitočet 5 GHz, sem odečetl maximální výkon vyzářený do okolí, který je 20 W/m^2 .



Obr. 3.9 Směrová charakteristika

kónického monopólu pro kmitočet 3GHz.

Při snížení frekvence na 3 GHz došlo ke zmenšení vyzářeného výkonu na hodnotu 13 W/m^2 .



Obr. 3.10 Směrová charakteristika

kónického monopólu pro kmitočet 1GHz.

Při frekvenci 1GHz, se maximální vyzářený výkon ještě snížil s porovnáním s předchozími případy. A to na hodnotu: $7,5 \text{ W/m}^2$.

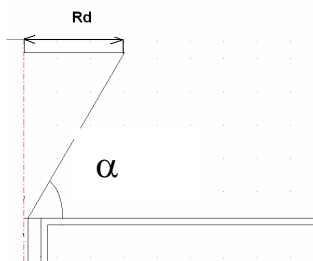


Obr. 3.11 Vliv změny frekvence na maximální vyzářený výkon.

Shrnutí

Zobrazil jsem směrové charakteristiky pro jednotlivé frekvenční kroky a odečetl jejich maximální vyzářený výkon. Vliv změny frekvence jsem zobrazil v grafu a zjistil, že anténa vykazuje nejvyšší vyzářený výkon na frekvenci 7 400 MHz a to $34,5 \text{ W/m}^2$.

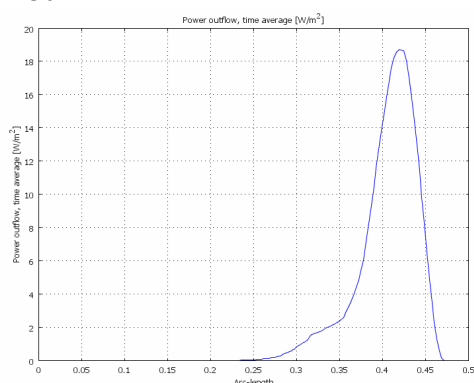
Dále jsem zkoumal jaký vliv má na směrovou charakteristiku úhel (α) rozevření kónického ramene. Měnil jsem poloměr širšího konce kónického ramene R_d , tak aby se úhel rozevření kónického ramene rovnal $\alpha_1 = 80^\circ$, $\alpha_2 = 60^\circ$. Již odsimulované směrové charakteristiky byly pro $\alpha_0 = 69,2^\circ$. Frekvenci jsem zvolil $f = 5$ GHz.



Obr. 3.12 Úhel rozevření kónického ramene.

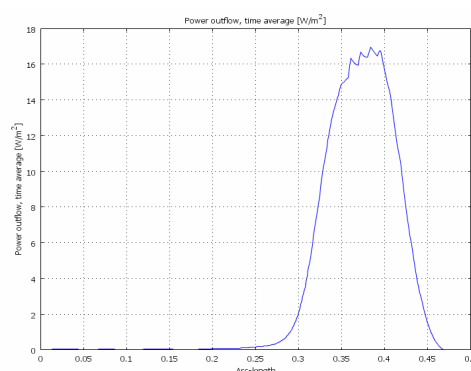
Směrové charakteristiky analyzované antény s různými úhly rozevření kónického ramene.

$\alpha = 80^\circ$



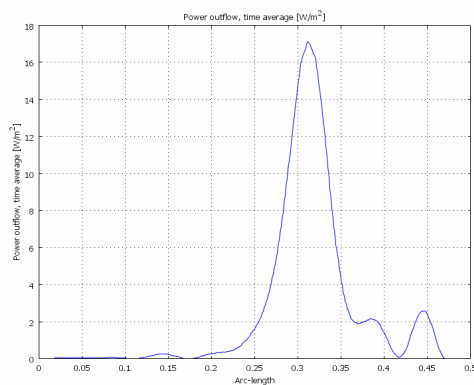
a.)

$\alpha = 60^\circ$



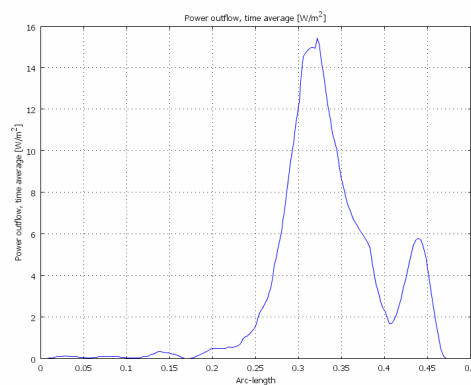
b.)

$\alpha = 45^\circ$



c.)

$\alpha = 35^\circ$



d.)

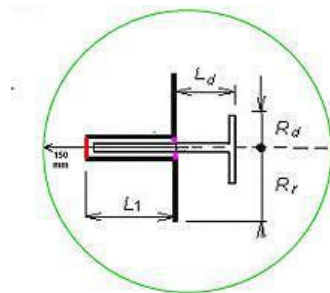
Obr. 3.13 Směrové charakteristiky kónického monopólu pro různé úhly rozevření kónického ramene
a.) $\alpha = 80^\circ$; b.) $\alpha = 60^\circ$; c.) $\alpha = 45^\circ$; d.) $\alpha = 35^\circ$.

Shrnutí

V tomto kroku jsem zkoumal vliv úhlu rozevření kónického ramene (α). Dá se konstatovat, že nejlépe se chová anténa při $\alpha = 69,2^\circ$ (původně navrhnutá struktura), při zmenšování úhlu rozevření kónického ramene se snižuje vyzářený výkon a zhoršuje se směrovost. Při zvyšování úhlu rozevření kónického ramene se také vyzářený výkon snižuje, ale anténa je směrovější.

3.3 Monopól s kapacitním zakončením

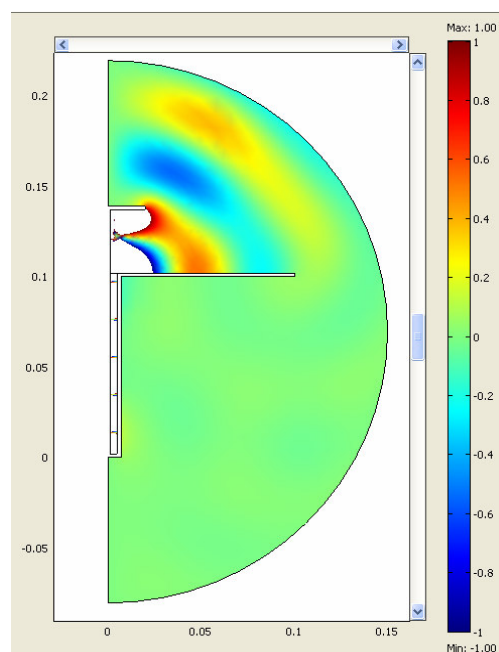
Parametry monopólu s kapacitním zakončením jsem pro analýzu zvolil, poloměr vnitřního vodiče napáječe $r = 1 \text{ mm}$, poloměr vnějšího vodiče napáječe $R = 7 \text{ mm}$, vnější poloměr reflektoru $R_r = 102 \text{ mm}$, délku monopólu $L_d = 35 \text{ mm}$, poloměr širšího konce $R_d = 20 \text{ mm}$ a délku napájecího vedení $L_1 = 100 \text{ mm}$. Tloušťka reflektoru a vnějšího vodiče je $t = 2 \text{ mm}$. Anténu jsem obalil dokonale přizpůsobenou bublinou o poloměru 150 mm.



Obr. 3.14 Navrhnutá struktura monopólu s kapacitním zakončením.

Simulace

Na obrázku 3.15 vidíme rozložení elektromagnetického pole uvnitř a vně monopólu s kapacitním zakončením, napájeného koaxiálním vedením při frekvenci 5 GHz. Na obr. 3.15 si můžeme všimnout, že vlna za reflektorem nevyzařuje, intenzita magnetického pole má v těchto oblastech nulovou hodnotu (na obrázku barva zelená). Maximum velikosti intenzity magnetického pole nalezneme u výstupu z monopólu. (barva tmavě červená). Bílá místa jsou oblasti, kde intenzita dosahovala hodnot mimo rozsah zvoleného měřítka (MIN = -1, MAX = 1).

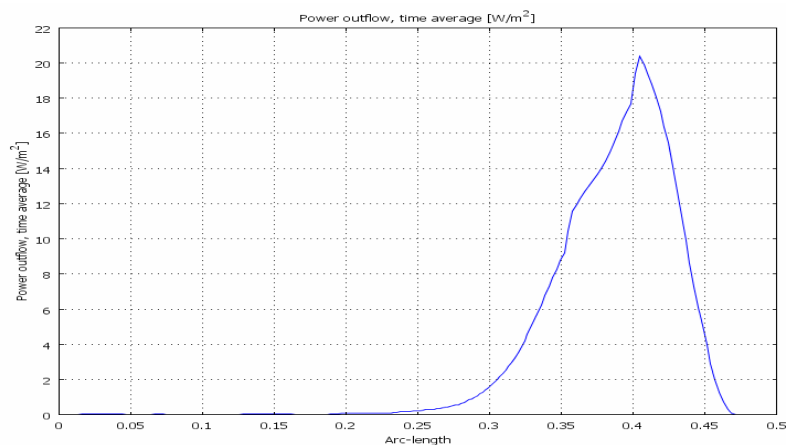


Obr. 3.15 Rozložení elektromagnetického pole uvnitř a vně monopólu s kapacitním zakončením. Axiální složka intenzity magnetického pole.

Směrové charakteristiky

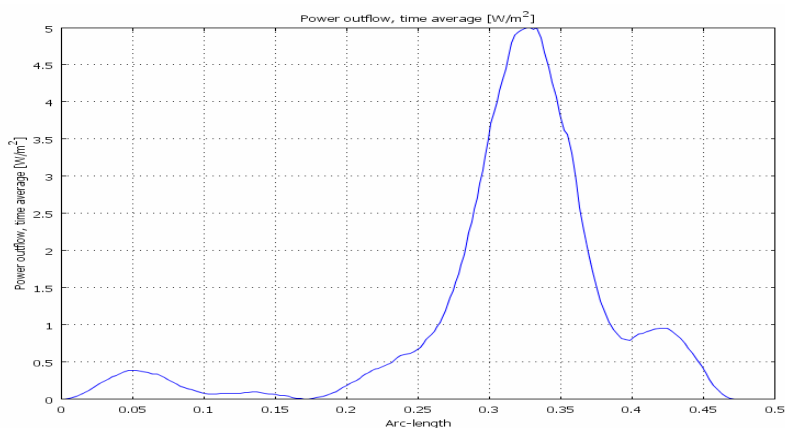
Stejně jako v předchozím případě jsem zobrazil směrové charakteristiky pro jednotlivé frekvenční kroky (1 GHz, 3 GHz, 5 GHz) a výslednou závislost maximálního vyzářeného výkonu na frekvenci obr. 3.19. Dále jsem zkoumal změnu směrové charakteristiky analyzované antény na kmitočtu 5 GHz s různým poloměrem kapacitního disku R_d . Simulace závislosti změn směrové charakteristiky na frekvenci byly pro $R_d = 20 \text{ mm}$.

Směrové charakteristiky pro jednotlivé frekvenční kroky:



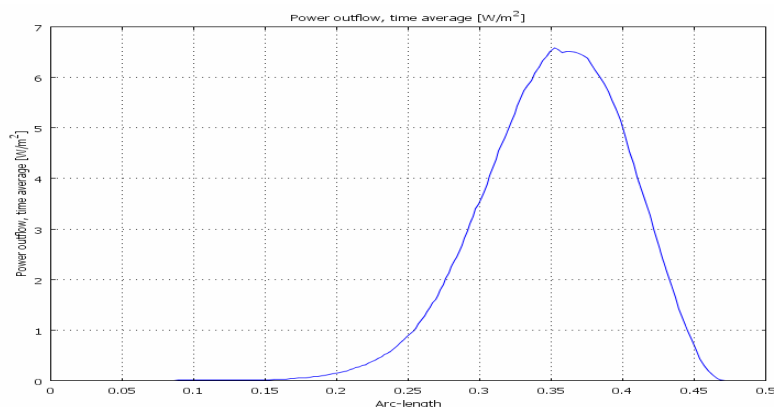
Obr. 3.16 Směrová charakteristika
monopólu s kapacitním zakončením pro kmitočet 5 GHz.

Z grafu směrové charakteristiky pro kmitočet 5 GHz, sem odečetl maximální výkon vyzářený do okolí, který je $20,3 \text{ W/m}^2$.



Obr. 3.17 Směrová charakteristika
monopólu s kapacitním zakončením pro kmitočet 3 GHz.

Při snížení frekvence na 3 GHz, se maximální výkon vyzářený do okolí, snížil na hodnotu 5 W/m^2 .



Obr. 3.18 Směrová charakteristika
monopólu s kapacitním zakončením pro kmitočet 1 GHz.

Na frekvenci 1 GHz byl maximální vyzářený výkon roven hodnotě $6,6 \text{ W/m}^2$.

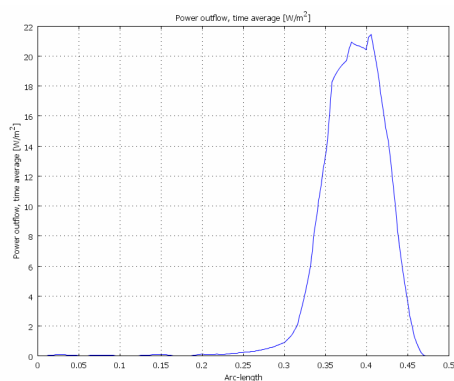


Obr. 3.19 Vliv změny frekvence na maximální vyzářený výkon.

Nejvyšší vyzářený výkon monopól vykazuje při frekvenci $f = 9\,200\text{ MHz}$. Hodnota maximálního výkonu je 28.9 W/m^2 .

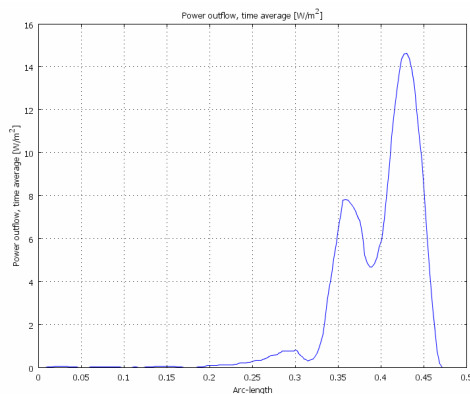
Směrové charakteristiky pro různé velikosti poloměru kapacitního disku R_d :

$R_d = 10\text{ mm}$



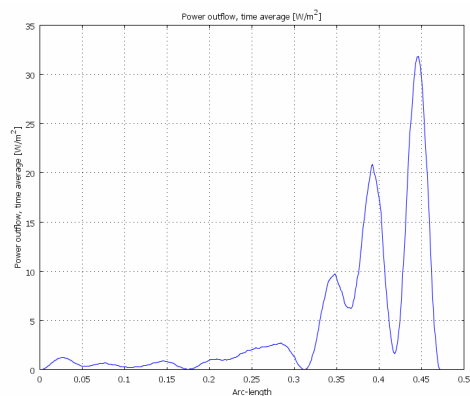
a.)

$R_d = 40\text{ mm}$



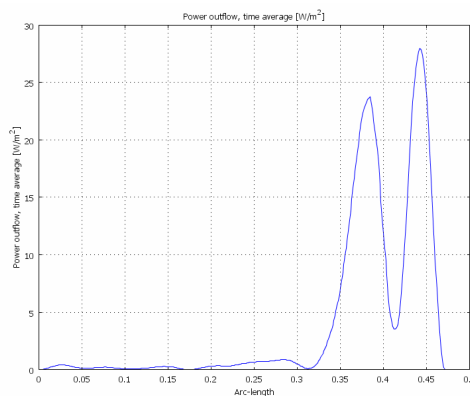
b.)

$R_d = 60\text{ mm}$



c.)

$R_d = 70\text{ mm}$



d.)

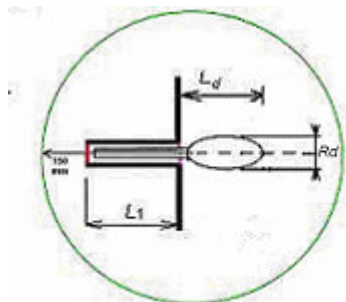
Obr 3.20 Směrové charakteristiky monopólu s kapacitním zakončením pro různé poloměry kapacitního disku R_d
a.) $R_d = 40\text{ mm}$; b.) $R_d = 50\text{ mm}$; c.) $R_d = 60\text{ mm}$; d.) $R_d = 70\text{ mm}$.

Shrnutí

Ze závislosti vyzářeného výkonu na změně frekvence, je patrné, že nejvyšší výkon je na frekvenci 9 200 MHz, tento výkon dosahuje hodnoty $28,9 \text{ W/m}^2$. Při zkoumání vlivu změny poloměru kapacitního disku R_d . Jsem došel k závěru, že nejlepší vlastnosti má anténa při $R_d = 10 \text{ mm}$. Dalším zvětšováním R_d , dojde ke zmenšení vyzářeného výkonu a od velikosti $R_d = 40 \text{ mm}$, i k deformaci směrové charakteristiky.

3.4 Kapkový monopol

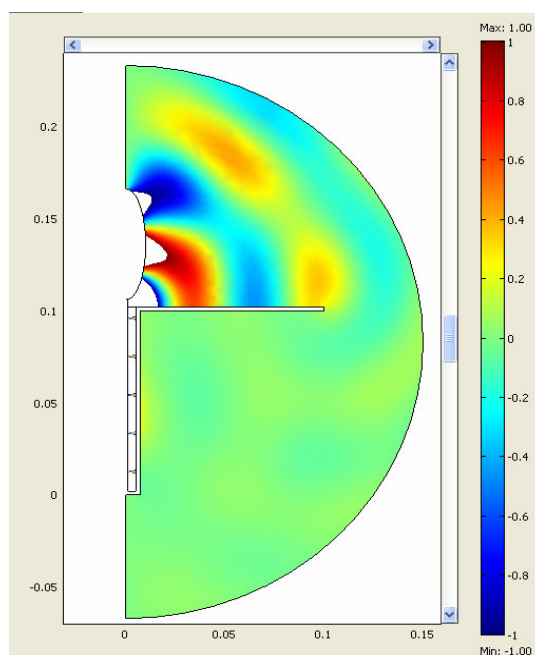
Struktura kapkového monopolu je identická s předchozími dvěma případy, liší se pouze tvarem a velikostí anténního ramene. Šířka kapkového ramene $R_d = 10 \text{ mm}$ a délka ramen $L_d = 60 \text{ mm}$.



Obr. 3.21 Navrhnutá struktura kapkového monopolu.

Simulace

Na obrázku 3.22 vidíme rozložení elektromagnetického pole uvnitř a vně kapkového monopolu, napájeného koaxiálním vedením při frekvenci 5 GHz. Intenzita magnetického pole má v oblastech za reflektorem nulovou hodnotu (na obrázku barva zelená). Maximum velikosti intenzity magnetického pole nalezneme u výstupu z monopolu. (barva tmavě červená). Bílá místa jsou oblasti, kde intenzita dosahovala hodnot mimo rozsah zvoleného měřítka (MIN = -1, MAX = 1).



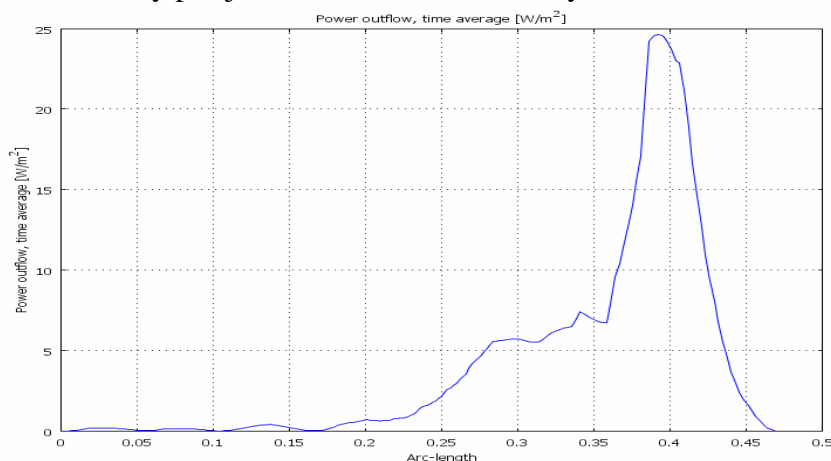
Obr. 3.22 Rozložení elektromagnetického pole uvnitř a vně monopolu s kapacitním zakončením. Axiální složka intenzity magnetického pole.

Směrové charakteristiky

V tomto kroku jsem zobrazil směrové charakteristiky pro jednotlivé frekvenční kroky (1 GHz, 3 GHz, 5 GHz). Stejně jako u předchozích monopólů, jsem také zobrazil graf závislosti změny frekvence obr. 3.26.

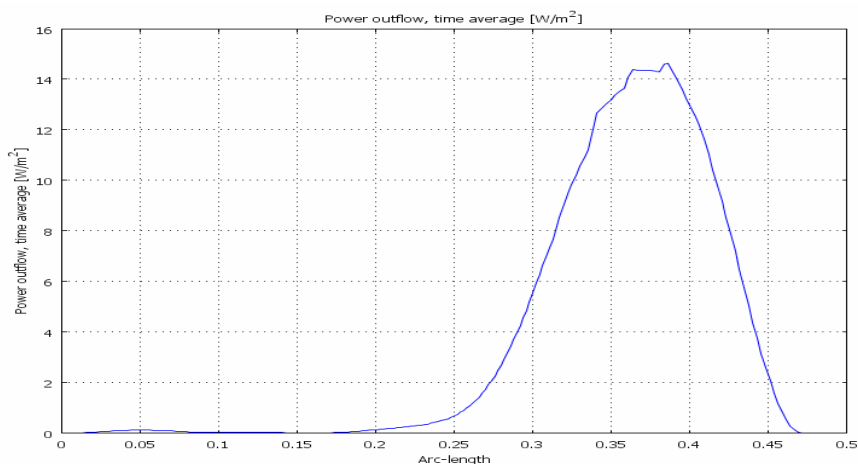
Dále jsem zkoumal změnu směrové charakteristiky analyzované antény na kmitočtu 5 GHz s různou šířkou kapkového ramene. Simulace závislosti změn směrové charakteristiky na frekvenci byly pro $R_d = 10$ mm.

Směrové charakteristiky pro jednotlivé frekvenční kroky



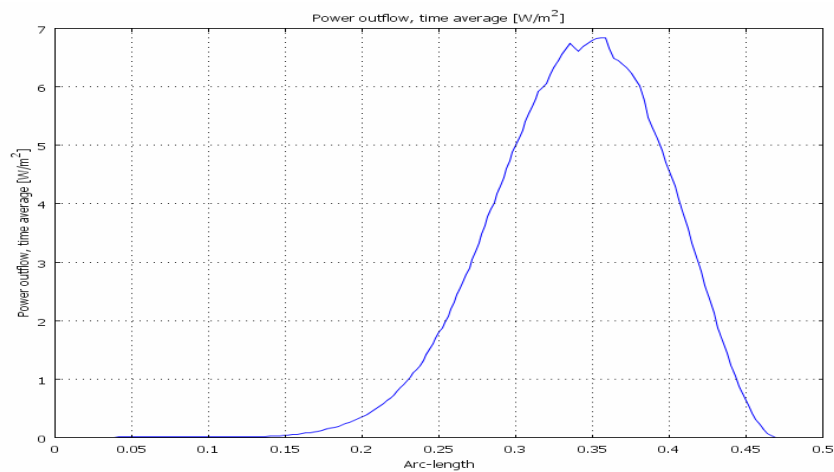
Obr. 3.23 Směrová charakteristika
kapkového monopólu pro kmitočet 5 GHz.

Z grafu směrové charakteristiky pro kmitočet 5 GHz, sem odečetl maximální výkon vyzářený do okolí, který je $24.7 W/m^2$.



Obr. 3.24 Směrová charakteristika
kapkového monopólu pro kmitočet 3GHz.

Pro frekvenci 3 GHz byl maximální vyzářený výkon $14,5 W/m^2$.



Obr. 3.25 Směrová charakteristika kapkového monopólu pro kmitočet 1 GHz.

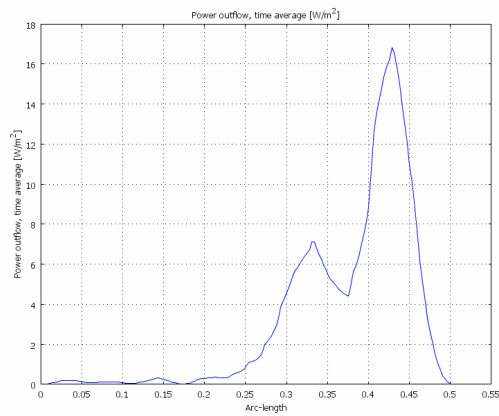
Pro frekvenci 1GHz byl maximální vyzářený výkon 6,8 W/m².



Obr. 3.26 Vliv změny frekvence na vyzářený výkon.

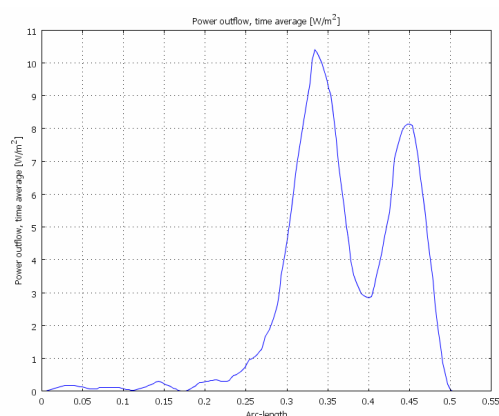
Směrové charakteristiky pro změnu šířky kapkového ramene.

R_d = 20 mm



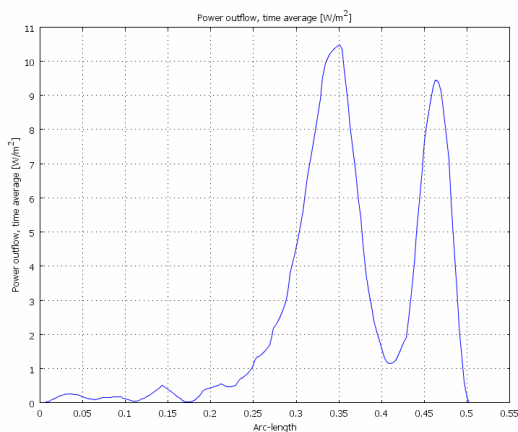
a.)

R_d = 30 mm



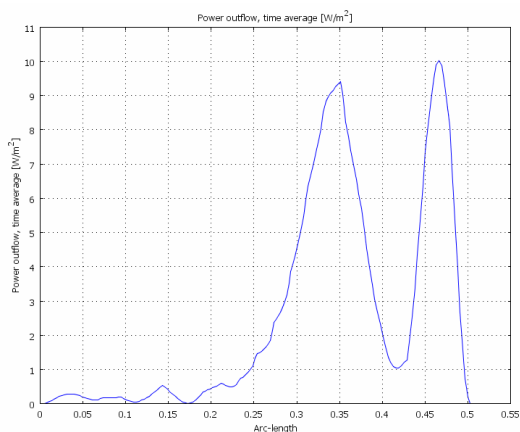
b.)

$R_d = 40 \text{ mm}$



c.)

$R_d = 45 \text{ mm}$



d.)

Obr. 3.27 Směrové charakteristiky kapkového monopólu
pro různé šířky kapkového ramene R_d
a.) $R_d = 20 \text{ mm}$; b.) $R_d = 30 \text{ mm}$; c.) $R_d = 40 \text{ mm}$; d.) $R_d = 45 \text{ mm}$.

Shrnutí

Zobrazil jsem směrové charakteristiky pro jednotlivé frekvenční kroky a graf závislosti vyzářeného výkonu na frekvenci, z kterého jsem odečetl, že kapkový monopól vyzařuje nejvyšší výkon při frekvenci 7 600 MHz, hodnota tohoto výkonu je $46,76 \text{ W/m}^2$. Při zkoumání vlivu změn velikosti poloměru kapkového ramene R_d . Jsem došel k závěru, že nejlepší vlastnosti má anténa při $R_d = 10 \text{ mm}$. Dalším zvětšováním R_d , dojde ke zmenšení vyzářeného výkonu a od velikosti $R_d = 40 \text{ mm}$, i k deformaci směrové charakteristiky.

4 OPTIMALIZACE

V anténní technice se setkáváme s požadavkem optimalizovat vlastnosti určité antény. To znamená, že se snažíme nalézt takové konkrétní parametry antény (rozměry, geometrickou strukturu, elektrické a magnetické parametry materiálu, atd.), abychom je co nejvíce přiblížili požadavkům na vlastnosti optimalizované struktury. Optimalizace se u antén využívá nejčastěji k dosažení požadované hodnoty vstupní impedance, požadovaného tvaru směrové charakteristiky a požadovaného zisku. [4]

Vyhledáváním optimálních hodnot parametrů antény je úkolem optimalizačních metod (*optimization method*). Optimalizační metody, lze rozdělit na lokální metody (nalezené optimum je značně závislé na výchozím bodě optimalizace, nalezen je jen lokální extrém v blízkém okolí výchozího bodu) a na metody globální (jsou na počátečních podmínkách závislé jen málo a jsou schopny vyhledat globální extrém). [4]

Pro optimalizaci modelovaných monopólů jsem využil dva nejznámější globální algoritmy. Jedná se o genetické algoritmy (GA, *genetic algorithms*) a metodu roje částic (PSO, *particle swarm optimization*). Tyto algoritmy jsem naprogramoval v programu MATLAB, neboť m-soubory MATLABu lze snadno propojit s programem COMSOL Multiphysics.. Vytvořený numerický model antény lze totiž v programu COMSOL uložit ve formátu m-souboru a volat jej z m-souboru s optimalizací jako každou jinou funkci. Důležité je ovšem spustit program COMSOL with MATLAB.

Samotnou implementaci optimalizačních algoritmů v MATLABu přiblížím v následujících podkapitolách. Jelikož optimalizační programy pro jednotlivé typy monopólů se liší pouze v typu numerického modelu, ve svém popisu se soustředím na monopól s kapacitním zakončením, jehož numerický model je uložen v souboru *trychtyr.m*. Zbývající dva modely jsou pak k dispozici v m-souborech *kapka.m* a *kapacit.m*.

Pro správnou činnost numerických modelů antén je nutné do souboru *flplot.m* (standardní funkce COMSOLu, uložená v adresáři programu COMSOL Multiphysics) na řádky 402 a 403 dopsat příkazy:

```
MAX = max(ydata);  
save ( 'pokus.mat' , 'MAX' );
```

Tím jsou výsledky simulace uloženy do diskového souboru, z něhož si je optimalizační rutina následně načítá.

Pomocí zvolených optimalizačních algoritmů, jsem hledal optimální rozměry anténních ramen monopólů, abych dosáhl požadované směrové vyzařovací charakteristiky. Měnila se výška anténního ramene L_d (viz. obr. 3.6, 3.14, 3.21) v intervalu $L_d \sim D \in (10 \text{ mm}; 100 \text{ mm})$ a šířka anténního ramene R_d (viz. obr. 3.6, 3.14, 3.21) v intervalu $R_d \sim L \in (10 \text{ mm}; 50 \text{ mm})$.

4.1 Genetické algoritmy

Tato optimalizační metoda vychází z Darwinovy teorie o vývoji druhů. Využívá zákony a pravidla adaptačních a optimalizačních procesů v přírodě. Do oblasti elektromagnetismu pronikly genetické algoritmy koncem 80. let dvacátého století. Optimalizační metody s genetickými algoritmy jsou z podstaty stochastické a jsou tedy méně náchylné ke sklouznutí do lokálního extrému. Stochastická podstata, ale neznamená, že k výsledku dochází náhodně. V přírodě hraje sice náhoda velkou roli, ale vývojový proces probíhá cíleně. [4]

Genetické algoritmy (GA) nepracují přímo s hodnotami parametrů systému, nýbrž s tzv. chromozomy (chromosome). Hodnoty parametrů jsou v nich zakódovány, většinou v binární soustavě. Chromozomy jsou tvořeny geny (gene), jeden gen odpovídá hodnotě jednoho parametru systému, který je převeden z dekadické hodnoty na binární. Chromozom je tedy reprezentován posloupností jedniček a nul. GA neoptimalizuje najednou jediné řešení úlohy, nýbrž pracuje s celou skupinou různých řešení. Touto skupinou je tzv. populace a každý její prvek je jedinec. Každá nová populace vytváří novou další generaci. Cílem algoritmu je vytváření kvalitnějších a silnějších jedinců než byli v generaci původní. K posouzení kvality jedinců nám slouží chybová, nebo-li také kritériální funkce Q . U této funkce hledáme požadovaný extrém. [4]

Průběh optimalizace

Optimalizace probíhá v následujících krocích.

- 1 Vytvoří se výchozí populace. Každý jedinec, je vygenerován počítačem jako zcela náhodná sekvence nul a jedniček. Vytvoříme tím soubor řešení, který je často velmi nekvalitní. Mluvíme o první generaci.
- 2 Pro každého jedince zvlášť je třeba spočítat hodnotu chybové funkce. Aby to bylo možné, musíme chromozom rozdělit na geny, binární vyjádření převést na dekadické, vypočítat parametry jedince (voláním numerického modelu COMSOLu) a dosadit jej do chybové funkce Q . Chybová funkce spojuje algoritmus s fyzickou stránkou optimalizovaného problému.
- 3 Dalším krokem optimalizace je selekce (výběr, *selection*). Úkolem selekce je preferovat lepší jedince v populaci (dle hodnoty chybové funkce Q) a ty horší znevýhodňovat nebo z populace úplně vyloučit.

Nejjednodušším způsobem selekce je tzv. *decimace populace*: jedince v populaci jsou seřazeni dle hodnoty chybové funkce Q a jejich horší polovina je zrušena. Tento způsob selekce je méně účinný, neboť i horší jedinci mohou nést část genetické informace, která obsahuje výhodnou sekvenci bitů. Tato sekvence se později nesnadno hledá a celý vývoj se tak zpomalí.

Dalšími způsoby selekce jsou např. proporcionální výběr a výběr soutěží.

- 4 Po selekci následuje párování (*pairing*). Z jedinců, kteří v populaci zůstali, vytvoříme páry. Stávají se tak z nich rodiče. Každý rodičovský pár dá za vznik dvěma potomkům pro další generaci.
- 5 Následujícím krokem je křížení (*crossover*). Při křížení se z rodičovského páru (otce a matky) vytvoří dva další jedinci (potomci): v řadě bitů v chromozómu se náhodně zvolí dělítka, jeden potomek zdědí část genetické informace od otce (vlevo od dělítka) a část od své matky (vpravo od dělítka), u potomka druhého je tomu naopak.
- 6 Nakonec se takto vytvoření jedinci mutují (*mutation*). Jde o proces, kdy se na náhodně vybraných pozicích invertuje příslušný bit.

Po dokončení získáváme novou generaci. Optimalizační proces se vrací na začátek (konkrétně do bodu 2). Tento proces se opakuje tak dlouho, dokud se nenajde příslušné řešení dané úlohy. [4]

Implementace GA v MATLABU

Matlabovský program pro genetické hledání optimálních rozměrů anténního ramene sestává z následujících funkcí:

- `x = main( G, I, pc, pm)` je hlavním programem, v jehož těle se nacházejí všechna inicializační nastavení (včetně náhodného generování první generace jedinců), ohodnocení jedinců, vykreslení požadované směrové charakteristiky a průběhu chybové funkce.
- `X = decode( I, bit, gen)` je funkce, která převádí binárně kódované parametry jedince na parametry reálné.
- `gen = decim( gen, pc, pm, I, geb)` je funkce, která vybírá potencionální rodiče decimací populace a která rodí nové jedince.
- `MAX = monopole( L, D, f)` je numerický model zkoumaného monopólu.

Výše uvedené symboly mají následující význam:

- `G` celkový počet generací ;
- `I` celkový počet jedinců v jedné generaci;
- `pc` pravděpodobnost křížení;
- `pm` pravděpodobnost mutace
- `D` výška anténního ramene (L_d);
- `L` šířka anténního ramene (R_d);
- `f` požadovaná frekvence;

Program spustíme zavoláním funkce *main* a definováním potřebných parametrů.

`x = main(50,10,0.9,0.1)` je zřejmé, že bylo zvoleno 50 generací, 10 jedinců v generaci, pravděpodobnost křížení je 90% a pravděpodobnost mutace 10%.

Program postupuje v následujících krocích. Nejprve je náhodně vytvořena první generace jedinců.

```
gen = round( rand( I, geb-1));           % náhodně vygenerovaná 1.generace
```

Každého jedince v generaci je třeba dekodovat. Toto provádí funkce *decode*.

```
function X = decode( I, bit, gen)
```

```
pos(1) = bit(1);                         % pozice posledních bitů parametrů
pos(2) = pos(1) + bit(2);                 % v chromozomu
X(:, 1) = 0.01 + 0.09 * to_rat( I, pos(1), 1, gen, bit);
X(:, 2) = 0.01 + 0.04 * to_rat( pos(1)+ 1, pos(2), 2, gen, bit);
```

```
function out = to_rat( lw, up, n, gen, bit);
out = gen(:,lw:up) * pow2( 0:bit(n)-1)' / pow2( bit(n));
```

Takto dekodovanou populaci ohodnotíme. Pro každého jedince zvlášť spočítáme hodnotu chybové funkce.

```
for n=1:I:I                               % cyklus pro ohodnocení dané populace
    D = X(n,1);                           % parametry jedince
    L = X(n,2);                           % D (výška ramene), L (šířka ramene)
    MAX = KAPACIT(L,D,f);                 % načtení numerického modelu
    k(n,1) = MAX;                         % přiřazení max. výkonu danému jedinci
    K(n,1) = ( P - k(n,1)) ;              % ohodnocení daného jedince
    if K(n,1) < 0
        K(n,1) = (-1 * K(n,1));
    end
end
```

Proměnná *K* zde představuje hodnotu chybové funkce a proměnná *P* je hodnota požadovaného maximálního výkonu vyzářeného do okolí.

V dalším kroku musí optimalizační program vyhledat jedince s nejmenší chybou.

```
gen( :, geb) = K ; % přiřazení chybové funkce danému jedinci
e(g) = min( gen( :,geb)); % jedinec s nejmenší chybou v generaci
[val,ind] = min( gen( :,geb)); % index jedince s nejmenší chybou v generaci
x = X( ind, :); % parametry jedince s nejmenší chybou v generaci
gen = decim( gen, pc, pm, I, geb); % rození nových jedinců (decimace)
```

Nyní optimalizační program zná hodnotu chybové funkce u každého jedince, která je uložena do posledního sloupce matice *gene*. Známy jsou také indexy nejlepších jedinců. Můžeme tedy začít s vytvářením další generace, vytvořením nových jedinců. Voláme funkci *decim.*, která jedince vybírá decimací populace

```
function out = decim( gen, pc, pm, I, geb)
```

```
for n=1:coup % cyklus pro seřazení jedinců dle kvality
    [val,ind] = min( gen( :,geb)); % jedinec s min.účelovou funkcí
    par( n,:) = gen( ind, :);
    gen( ind, geb) = 1e20;
end
```

Všichni jedinci v populaci jsou již seřazeni podle hodnoty chybové funkce. S horší polovinou generace se již nebude pracovat. Takto vybrané „rodiče“ musíme křížit.

```
for n=1:coup
    ind0 = 1 + round( rand*doup); % index 1.rodiče
    ind1 = 1 + round( rand*doup); % index 2.rodiče
    cros = round( rand*geb/pc); % křížení genu
    icrs = cros + 1;

    if cros<geb
        chld( ind+0, 1 :cros) = par( ind0, 1 :cros);
        chld( ind+0, icrs:geb) = par( ind1, icrs:geb);
        chld( ind+1, 1 :cros) = par( ind1, 1 :cros);
        chld( ind+1, icrs:geb) = par( ind0, icrs:geb);
    end;
```

Úkolem výše uvedeného kódu je vytvořit z rodičů s indexy *ind0* a *ind1* potomky s indexy (*ind+0*) a (*ind +1*). Bity od 1 do *cros* dítěte(*ind +0*) jsou totožné s bity od 1 do *cros* rodiče *ind0* ostatní bity jsou totožné se stejně umístěnými bity rodiče *ind1*. Posledním krokem k vytvoření zcela nové generace je mutace.

```
mut = ceil( rand*geb/pm); % mutace
if mut<geb
    chld( ind+0, mut) = 1 - chld( ind+0, mut);
end

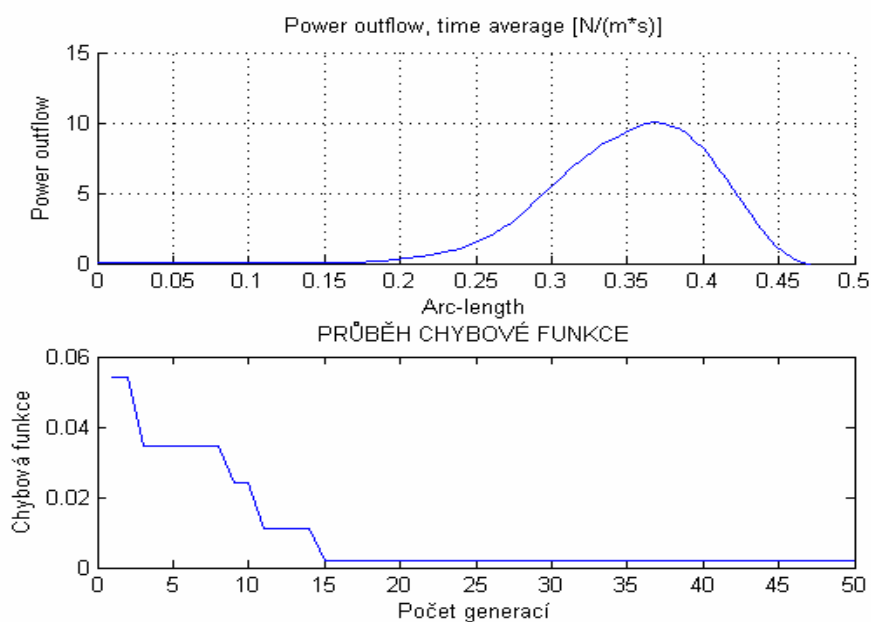
mut = ceil( rand*geb/pm);
if mut<geb
    chld( ind+1, mut) = 1 - chld( ind+1, mut);
end
```

Tímto je vytvořena zcela nová generace. Optimalizační cyklus se vrací na začátek a vše probíhá znovu. Optimalizační program běží do naplnění počtu generací. V tomto případě bylo vytvořeno 50 generací a každá generace byla složena z 10 jedinců.

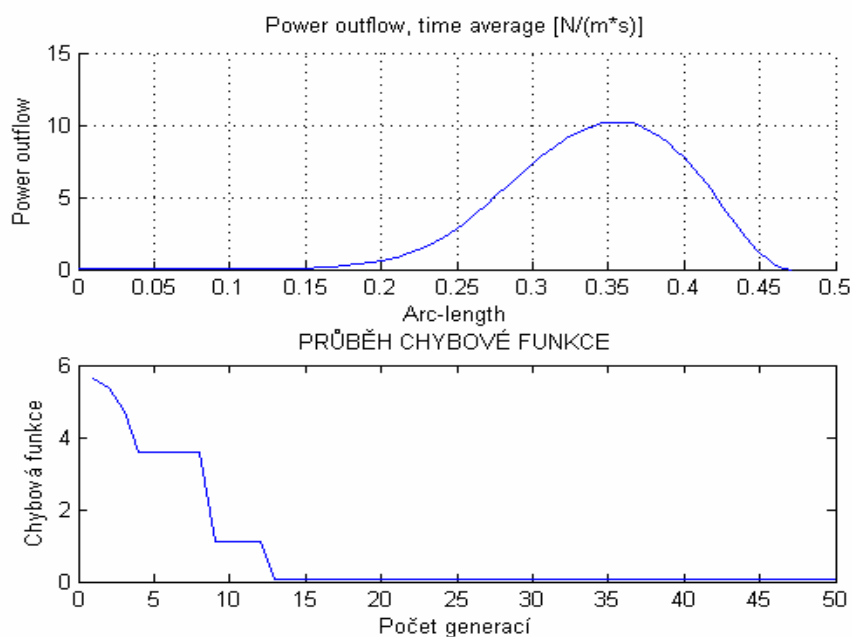
Na závěr program vykreslí výslednou optimalizovanou směrovou charakteristiku a časový průběh chybové funkce viz obr. 4.1; 4.2 a 4.3.

Výsledky a shrnutí optimalizace

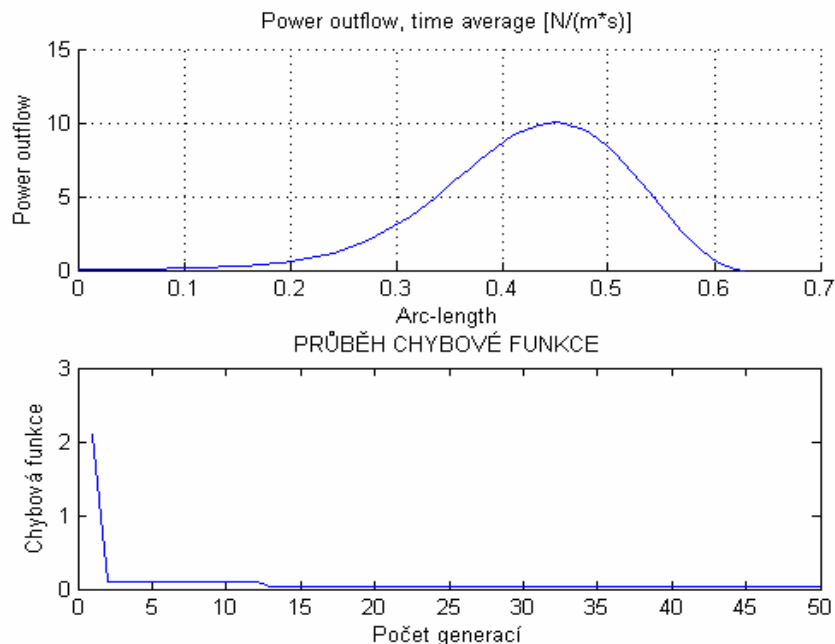
V této části jsou zobrazeny grafické výstupy optimalizačního programu využívající metodu GA. Jde o výslednou optimalizovanou směrovou charakteristiku a časový průběh chybové funkce, pro jednotlivé monopóly na frekvenci 1 GHz. Parametry optimalizačního procesu jsou nastaveny následovně: $G = 50$, $I = 10$, $pc = 0.9$, $pm = 0.1$.



Obr. 4.1 Grafický výstup optimalizačního programu pro kónický monopól.



Obr. 4.2 Grafický výstup optimalizačního programu pro monopól s kapacitním zakončením.



Obr. 4.3 Grafický výstup optimalizačního programu pro kapkový monopól.

Zobrazené charakteristiky jasně ukazují, že optimalizace proběhla úspěšně. Chybová funkce se rovná téměř nule. Výchylka od požadovaného maximálního vyzářeného výkonu nepřesáhla 2%. Lze tedy říci, že optimalizační algoritmus pracuje dle požadavků. Optimální rozměry anténních ramen a velikost optimalizovaného výkonu, pro zkoumané typy monopólů jsou uvedeny v tab. 1.

Kónický monopól				
frekvence	požadovaný výkon	Ld	Rd	optimalizovaný výkon
[GHz]	[W/m ²]	[mm]	[mm]	[W/m ²]
1	10	84	28	9,97
3	10	11,8	20	9,96
5	10	11,4	35,5	9,93
Monopól s kapacitním zakončením				
frekvence	požadovaný výkon	Ld	Rd	optimalizovaný výkon
[GHz]	[W/m ²]	[mm]	[mm]	[W/m ²]
1	10	82	20	9,95
3	10	48	15,5	10,02
5	10	35	25,8	10,03
Kapkový monopól				
frekvence	požadovaný výkon	Ld	Rd	optimalizovaný výkon
[GHz]	[W/m ²]	[mm]	[mm]	[W/m ²]
1	10	89	26	10,02
3	10	46,6	12	9,92
5	10	42	28	9,25

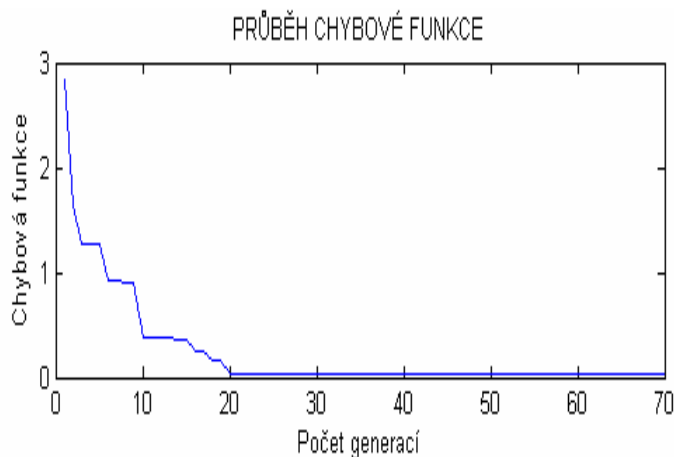
Tab. 1 Tabulka zobrazuje optimální rozměry anténních ramen monopólů, požadovaný a optimalizovaný vyzářený výkon pro tři různé frekvence.

optimalizace pomocí GA																			
G	I	Rd	Ld	Pmax	G	I	Rd	Ld	Pmax	G	I	Rd	Ld	Pmax	G	I	Rd	Ld	Pmax
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[W/m ²]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[W/m ²]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[W/m ²]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[W/m ²]
1	1	44,5	49,5	7,51	5	1	73,3	41,5	10,25	9	1	70,5	41,5	10,09	13	1	70,5	40	10,002
	2	79,3	51,9	11,3		2	74	41,5	10,29		2	70,5	41,5	10,09		2	69,1	41,5	9,916
	3	18,8	34,7	1,32		3	74	41,5	10,29		3	70,5	41,5	10,09		3	69,1	41,5	9,916
	4	70,5	71	8,27		4	73,3	30,6	9,6		4	70,5	41,5	10,09		4	70,5	40	10,002
	5	88,7	52,3	12,24		5	70,5	41,5	10,09		5	70,5	41,5	10,09		5	69,1	41,5	9,916
	6	20,5	18,3	1,22		6	73,3	53,4	10,8		6	69,1	41,5	9,916		6	69,1	41,5	9,916
	7	48	52,3	8,14		7	73,3	41,5	10,25		7	70,5	41,5	10,09		7	69,1	41,5	9,916
	8	73,3	54	10,9		8	73,3	41,5	10,25		8	70,5	41,5	10,09		8	69,1	41,5	9,916
	9	52,2	30,4	8,37		9	74	41,5	10,29		9	70,5	41,5	10,09		9	69,1	41,5	9,916
	10	28,6	51,7	3,5		10	74	41,3	10,28		10	70,5	41,5	10,09		10	70,5	40	10,002
2	1	73,3	54	10,9	6	1	70,5	41,5	10,09	10	1	69,1	41,5	9,916	14	1	70,5	40	10,002
	2	70,8	71	8,23		2	73,3	41,5	10,25		2	70,5	41,5	10,09		2	69,1	40	9,85
	3	48	39,8	7,88		3	73,3	41,5	10,25		3	70,5	41,5	10,09		3	70,5	41,5	10,09
	4	79,3	54	11,3		4	73,3	41,5	10,25		4	70,5	41,5	10,09		4	69,1	16,5	8,39
	5	73,3	53,4	10,8		5	73,3	41,5	10,25		5	70,5	41,5	10,09		5	70,5	41,5	10,09
	6	93	51,9	12,96		6	73,3	41,5	10,25		6	70,5	35,3	9,8		6	70,1	41,5	10,09
	7	34,3	52,3	4,92		7	70,5	41,5	10,09		7	70,5	41,5	10,09		7	69,1	40	9,84
	8	79,3	51,9	11,33		8	70,5	41,5	10,09		8	70,5	41,5	10,09		8	91,6	41,5	12,1
	9	52,2	30,4	8,33		9	73,3	41,5	10,25		9	70,5	41,5	10,09		9	69,1	41,5	9,916
	10	70,5	30,6	9,4		10	70,5	41,5	10,09		10	70,5	41,5	10,09		10	69,1	40	9,85
3	1	70,5	30,6	9,4	7	1	70,5	41,5	10,09	11	1	69,1	41,5	9,916	15	1	70,5	40	10,002
	2	73,3	53,4	10,8		2	70,5	41,5	10,09		2	69,1	41,5	9,917		2	70,1	41,5	10,09
	3	73,3	52,5	10,9		3	70,5	41,5	10,09		3	70,5	41,5	10,09		3	69,1	41,5	9,91
	4	73,3	52,1	10,87		4	76,1	41,5	10,05		4	70,5	40	10,002		4	70,5	40	10,002
	5	79,3	53,8	11,32		5	70	41,5	8,33		5	70,5	41,5	10,09		5	69,1	41,5	9,91
	6	73,3	41,5	10,25		6	70,5	41,5	10,09		6	70,5	41,5	10,09		6	69,1	41,5	9,91
	7	73,3	52,5	10,89		7	70,5	41,5	10,09		7	70,5	41,5	10,09		7	69,1	41,5	9,91
	8	79,3	54	11,34		8	70,5	41,5	10,09		8	70,5	41,5	10,09		8	70,5	41,5	10,09
	9	73,3	51,9	10,86		9	70,5	41,5	10,09		9	70,5	41,5	10,09		9	69,1	41,5	9,91
	10	79,3	51,9	11,33		10	70,5	41,5	10,09		10	70,5	41,5	10,09		10	70,5	41,5	9,91
4	1	73,3	41,5	10,25	8	1	70,5	41,5	10,09	12	1	7,05	40	10,002					
	2	73,3	53,4	10,81		2	70,5	41,5	10,09		2	70,5	41,5	10,09					
	3	73,3	52,1	10,87		3	70,5	41,5	10,09		3	69,1	41,5	9,916					
	4	73,3	51,9	10,86		4	70,5	41,5	10,09		4	70,5	41,5	10,090					
	5	73,3	53,4	10,81		5	70,5	41,5	10,09		5	69,1	41,5	9,916					
	6	73,3	53,4	10,82		6	70,5	41,5	10,09		6	70,5	40	10,002					
	7	70,5	30,6	9,42		7	70,5	41,5	10,09		7	69,1	41,5	9,916					
	8	73,3	41,5	10,25		8	70,5	41,5	10,09		8	24,1	45,1	2,38					
	9	74	41,5	10,29		9	70,5	41,5	10,09		9	70,5	41,5	10,09					
	10	73,3	51,9	10,86		10	70,5	41,5	10,09		10	70,5	41,5	10,09					

Tab. 2 Tabulka zobrazuje průběh optimalizačního procesu.
pro kapacitní monopol a frekvenci 3GHz.
jde o výpis nalezených rozměrů anténního ramene a maximálních výkonů.

Tabulka 2 zobrazuje průběh optimalizačního procesu. Pro každou generaci je zde zobrazeno deset jedinců. Pro každého jedince, je zde zobrazena velikost anténního ramene a maximální vyzářený výkon. Tučnou barvou jsou označeni jedinci, kteří mají nejlepší hodnotu chybové funkce v generaci. Barvou červenou je označen jedinec, který vykazuje nejlepší vlastnosti a proto, byl optimalizačním algoritmem vybrán jako výsledná optimalizovaná struktura. Simulace proběhla pro kónický monopol na frekvenci 3 GHz.

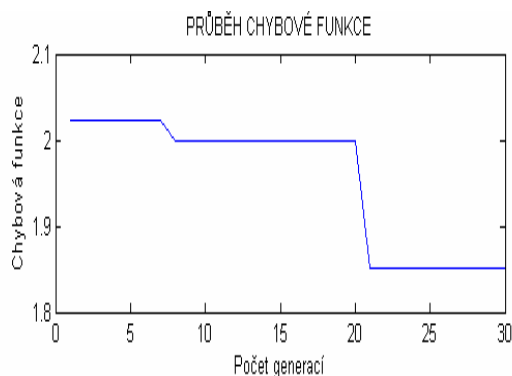
Následně jsem se zabýval vlastnostmi optimalizačního procesu a jeho závislostí na počtu generací. A jaký je minimální funkční počet generací, protože má velký vliv na dobu běhu optimalizačního programu. Čím je více generací, tím více optimalizačního času potřebujeme. Proto jsem hledal určité minimum, které zajišťuje správný chod programu. Monopóly jsem optimalizoval pro 70 generací. Počet jedinců v generaci byl $I = 10$ pravděpodobnost křížení a mutace, jsem nastavil na hodnoty: $pc = 90\%$ a $pm = 10\%$. Výsledky optimalizace jsou uvedeny na obr. 4.4.



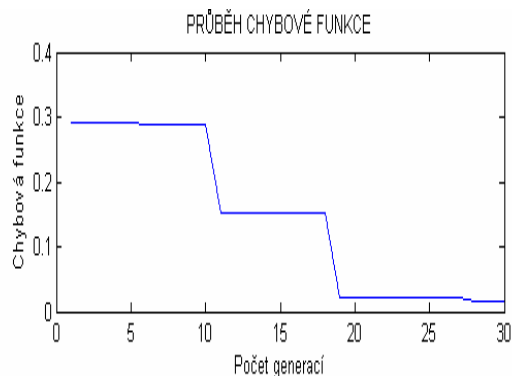
Obr. 4.4 Průběh chybové funkce pro počet generací $G = 70$ počet jedinců v jedné generaci, $I = 10$.

Při tomto zkoumání, jsem dospěl k závěru, že přesně nelze určit od jaké meze optimalizace pracuje bezchybně. Je to způsobeno náhodným výběrem první generace a do určité míry i štěstím se kterou je tato generace vybrána. Pokud je první generace velmi nekvalitní, trvá optimalizačnímu programu relativně dlouho, než najde požadované řešení a „spotřebuje“ při tom velký počet generací. Proto optimalizace s deseti generacemi může vykazovat lepší vlastnosti, jako optimalizace s generacemi dvaceti. Obecně lze s určitostí říci, že optimalizační program, potřebuje minimálně 30 generací, okolo této meze bylo, ve většině případů, nalezeno optimální řešení. Takže pro zajištění naprosté funkčnosti optimalizačního programu volíme počet generací v rozmezí 30-50. Volit počet generací vyšší než 50, je zbytečné. Program běží velmi dlouho. A požadované řešení je ve většině případu nalezeno mnohem dříve.

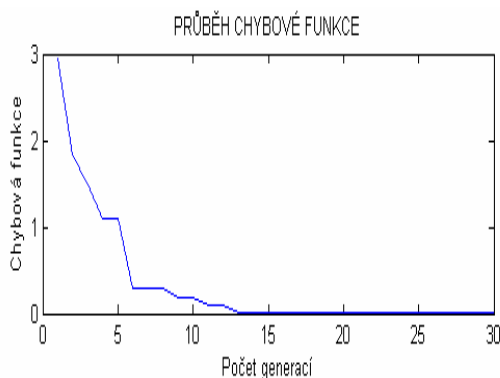
Velký vliv na běh programu má také počet jedinců v generaci. Pokud je tento počet nízký, algoritmus nemá dostatek prostředků pro hledání optima. Musí to rovněž nahradit vyšším počtem generací viz obr. 4.5. Kde jde názorně vidět rozdíl, mezi průběhem chybové funkce, pro různý počet jedinců v generaci.



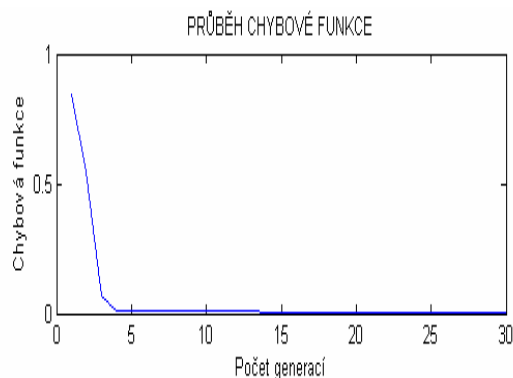
a.)



b.)



c.)

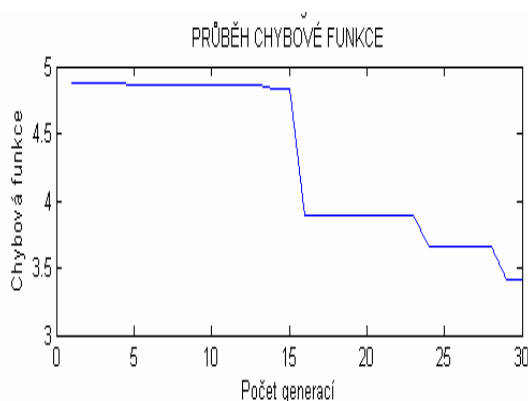


d.)

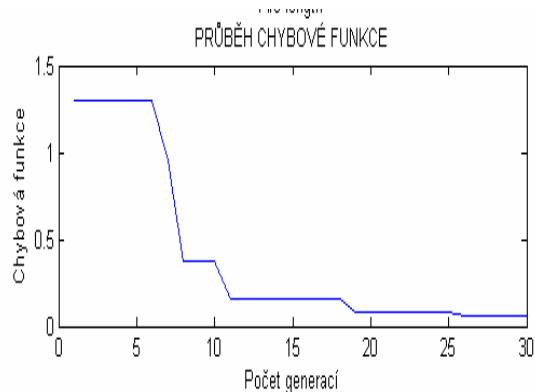
Obr.4.5 Průběhy chybové funkce pro různý počet jedinců v generaci **I** a.) $I = 5$; b.) $I = 10$; c.) $I = 15$; d.) $I = 20$.

Průběh chybové funkce pro $I = 5$ nevyhovuje požadavkům, program i při třiceti generacích nenašel optimální řešení. Výchylka se u tohoto nastavení pohybuje kolem 18%. Při dalších nastaveních, algoritmus již optimální řešení našel, pro $I = 10$ to bylo kolem dvacáté generace, pro $I = 15$ našel optimální řešení u třinácté generace a pro $I = 20$ byla anténa optimalizována, již u čtvrté generace. Z toho je zřejmé, že pro správnou funkci programu je nezbytné volit počet jedinců v generaci v intervalu pro $I \in (10 ; 20)$.

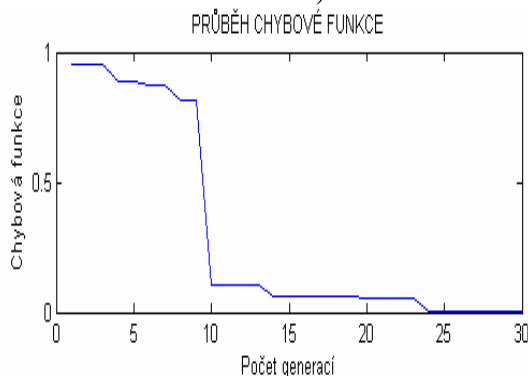
Dalším parametrem, který je třeba nastavit, je pravděpodobnost křížení (pc). V odborné literatuře se uvádí, že by se tento parametr měl volit mezi 80 % a 90 %. Na obr. 4.6 je uvedeno, jak se změní průběh chybové funkce, pokud tento interval nedodržíme. Ostatní parametry mají následující hodnoty. $G = 30$, $I = 10$, $pm = 10\%$.



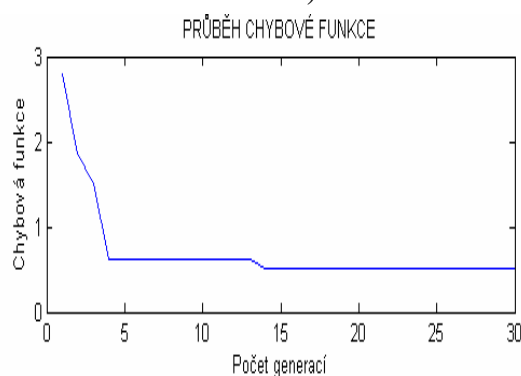
a.)



b.)



c.)



d.)

Obr. 4.6 Průběhy chybové funkce pro různou pravděpodobnost křížení pc a.) $pc = 10\%$; b.) $pc = 50\%$; c.) $pc = 70\%$; d.) $pc = 100\%$.

Uvedené průběhy chybové funkce naznačují, že nejlepší vlastnosti má, dle předpokladů, devadesáti procentní pravděpodobnost křížení (obr. 4.5c.). Použit lze také optimalizace pro sedmdesáti procentní a padesáti procentní pravděpodobnost křížení. U ostatních nastavení, je výchylka od požadovaného výkonu příliš vysoká.

Posledním parametrem, který ovlivňuje optimalizaci pomocí genetických algoritmů, je pravděpodobnost mutace. Najít vhodné nastavení tohoto parametru je poměrně obtížné. Jsou na něj kladeny dva protichůdné požadavky. Jedním z nich je mutovat pozdější generace, aby nedošlo ke stagnaci vývoje (rodič produkuje sám sebe jako potomka), často je nutné geny mutovat velmi razantně. Naproti tomuto požadavku, stojí potřeba zanechávat výhodné sekvence bitů, které mutace může narušit. Dochází tak ke ztrátě důležité informace. Proto údaje doporučené v odborných literaturách se pohybují v rozmezí dvou řádů (0,1% - 10% z celkového počtu bitů).[6] Pro účely mé práce, používám hodnotu pravděpodobnosti mutace o velikosti 10%.

Pro správný chod optimalizačního programu pomocí genetických algoritmů, je nezbytně nutné správně nastavit vstupní parametry. Z mého zkoumání vyplynulo, že nejlépe a nejšetrněji program pracuje při těchto hodnotách parametrů: $G = 50$, $I = 10$, $pc = 90\%$, $pm = 10\%$. Při správném nastavení parametrů program optimalizuje antény s velkou přesností.

4.2 Metoda roje částic

Metoda roje částic (*particle swarm optimization*; PSO) je stochastická evoluční optimalizace založená na principu rojení včel. Metoda využívá inteligence a pohybu každé včely v roji. Roj se snaží najít nejvyšší koncentraci květů na louce, a proto ji prohledává. Roj nemá jakoukoliv předchozí znalost této louky. [7]

Každá včela louku prohledává zcela náhodně a s různou rychlostí. Při tomto prohledávání, si včela pamatuje kde našla nejvíce květů. Informace si včely předávají, takže každý jedinec v roji získává informaci o úspěšnosti ostatních. Včely tak poletují mezi místem, které našly osobně, a mezi místem, o kterém se dozvěděly od ostatních. Pokud včely najdou rozkvetlejší lokalitu, než byly nalezeny doposud, změni se jejich trajektorie podle nově nalezeného místa. Tímto způsobem roj prozkoumá celou louku a najde její nejrozkvetlejší část. [6]

Chování včelího roje lze aplikovat na optimalizaci antén. Louka představuje určitou množinu řešení a množství květů funkční hodnotu kritériální funkce

Metoda roje částic pracuje s následujícími výrazy [6]:

- **Agent**, jedinec v roji (včela, částice). Jeho úkolem je pohybovat se mezi místem svého osobního optima a mezi místem optima určeného celým rojem.
- **Pozice**. Je reprezentována souřadnicemi agenta v prostoru řešení. Souřadnice bodu reprezentují možná řešení optimalizačního problému.
- **Kritériální funkce** slouží k ohodnocení kvality řešení na dané pozici.
- **Osobní optimum** (*pbest*, *personal best*) je pozice každého jednoho agenta v roji, která odpovídá nejlepší hodnotě kritériální funkce, které tento agent dosáhl. Agent v každém bodě trajektorie srovnává hodnotu kritériální funkce na aktuální pozici s nejlepší hodnotou doposud osobně nalezenou. Pokud aktuální pozice vykazuje lepší hodnotu kritériální funkce, než byla doposud nalezena, osobní optimum je nahrazeno aktuálním umístěním agenta.
- **Globální optimum** (*gbest*, *global best*), je pozice agenta s nejlepší hodnotou kritériální funkce v celém roji (je vybrána ze všech osobních optim celého roje). Každý jedinec je o této hodnotě informován a pohybuje se mezi tímto globálním a svým osobním optimem. Pokud jedinec najde místo výhodnější než je dosavadní globální optimum, je nové globální optimum zaznamenáno a celý roj je následně přivoláván k tomuto místu.

- **Rychlost pohybu agenta.** Rychlost agenta je závislá na relativním umístění osobního a globálního optima a na jeho setrvačnosti.
- **Setrvačná váha.** Velikost tohoto parametru určuje, nakolik se agent setrvačně pohybuje ve svém původním směru neovlivněn tahem k osobnímu a globálnímu optimu.
- **Osobní a globální měřítko** jsou koeficienty, které jsou mírou relativního tahu k osobnímu a globálnímu optimu.

Průběh optimalizace

První věcí, kterou je nutno udělat, je definování řešeného prostoru. Jedná se o výběr parametrů, které potřebujeme optimalizovat, a omezení rozsahu, ve kterém má náš problém řešení. Dále je třeba, definovat chybovou funkci. Tato funkce a definice řešeného prostoru, jsou specifické pro každou optimalizaci.

Následujícím krokem, je zvolení počátečního umístění roje. Toto umístění je vybráno zcela náhodně. Když jsou všichni agenti umístěni, začíná prohledávání určeného prostoru. Agenti se pohybují s náhodnou rychlostí. Na každé pozici agenta je vypočítána hodnota chybové funkce, která je porovnána s hodnotou p_{best} tohoto agenta. Hodnota g_{best} se vybírá ze všech hodnot p_{best} a je neustále porovnávána se všemi nově získanými hodnotami p_{best} , popřípadě nahrazena kvalitnější pozicí.

Agenti se pohybují mezi tímto g_{best} a svým osobním p_{best} . Velice důležitým parametrem optimalizace, ovlivňující pohyb agentů je rychlost jednotlivých agentů. [7]

$$v_{n+1} = w \cdot v_n + c_1 r_1 (p_{best,n} - x_n) + c_2 r_2 (g_{best,n} - x_n); \quad (4.1)$$

Význam uvedených symbolů je vysvětlen v předchozí části. Dále r_1 a r_2 jsou náhodná čísla od nuly do jedničky, která vedou ke stochastické změně relativního tahu k p_{best} a g_{best} (simulace nepředvídatelné chování včely v roji).

Nové souřadnice agenta získáme dle [7]

$$x_{n+1} = x_n + \Delta t \cdot v_{n+1}; \quad (4.2)$$

kde Δt je časový krok, za který se změní pozice agenta.

Tento postup se opakuje tak dlouho, dokud není nalezeno optimální řešení, nebo neproběhne zvolený počet iterací.

Popsaný algoritmus nemá žádná omezení. Může se tedy stát, že včela vylétne z louky. Proto zavádíme omezení, díky kterým jsme schopni zabránit vzniku takové situace. Existuje řada možností, jak taková omezení realizovat (omezením maximální dovolené rychlosti v_{max} , zavedení vhodných váhových konstant w , c_1 a c_2). Tyto mechanismy však nejsou dostačující podmínkou pro udržení řešení problému uvnitř zadaného prostoru. Proto přidáváme navíc okrajové podmínky (tzv. absorpční hranice). Pokud částice udeří do hranice, její rychlost se v tom okamžiku stane nulovou. [7]

Implementace PSO v MATLABU

V této části se blíže seznámíme s programováním PSO v MATLABu (kompletní program pro hledání optimálních rozměrů anténního ramene pomocí metody PSO je uložen v příloze) Program se sestává z následujících funkcí:

- out = main(G, I) je hlavním programem, v jehož těle se nacházejí všechna nastavení
- K = ohodnoceni(x,I,f,P) je kritériální funkce

Nyní detailněji probereme nejdůležitější části optimalizačního programu. Nejdříve musíme definovat proměnné.

```

f = 1e9; % simulovaný kmitočet
P = 10; % požadovaný výkon [W/m^2] nebo [N/(m*s)]
dt = 0.1; % časový krok, změny pozice agenta
c1 = 1.49; % osobní koeficient pohybu agenta
c2 = 1.49; % globální koeficient pohybu agenta
l = 1e+2; % pomocná proměnná
x = zeros( I, 3); % pozice agenta
p = zeros( I, 3); % osobní optimum

```

Dalším krokem je náhodné rozmístění agentů do určeného prostoru.

```

for n=1:I
    x(n,1) = 0.01 + 0.1*rand(); p(n,1) = x(n,1);
    x(n,2) = 0.005 + 0.055*rand(); p(n,2) = x(n,2);
    p(n,3) = 1e+2;
end

```

Nyní máme všechny agenty rozmístěny a určen prostor. Může tedy začít prohledávání tohoto prostoru.

```

w = 0.5*(G-m)/G + 0.4; % váhová konstanta
K = ohodnoceni (x,I,f,P); % funkce pro ohodnocení umístění agentů
x( :, 3) = K; % přiřazení spočítané chyby agentům
[e(m),ind] = min( x( :,3)); % jedinec s nejmenší chybou

```

V tomto kroku jsme určili váhovou konstantu, podle toho v jakém iteračním cyklu se nacházíme. Pro každou pozici agenta jsme spočítali hodnotu chybové funkce a našli pozici s nejmenší chybou. Ohodnocení pozice agenta chybovou funkcí probíhá ve funkci *ohodnocení*.

```

function K = ohodnoceni (x,I,f,P);
    for n=1:I
        D = x(n,1); % parametry jedince
        L = x(n,2); % D (výška ramene), L (šířka ramene)
        MAX = trychtyr(L,D,f); % načtení numerického modelu
        k (n,1) = MAX; % přiřazení max. výkonu danému jedinci
    end
    % OHODNOCENÍ DANNÉHO JEDINCE
    K (n,1) = ( P - k(n,1))^2
    if K (n,1) < 0
        K (n,1)=(-1 * K(n,1));
    end
end

```

Nyní optimalizační program zná hodnotu chybové funkce pro každou pozici daného agenta v tomto iteračním cyklu. V následujícím kroku bude pozice agenta s nejmenší hodnotou chybové funkce porovnána s nejlepší doposud známou pozicí celého roje (*gest*), popřípadě tuto pozici nahradí.

```

if e(m)< l % podmínka pro získání nejlepší pozice pro celý roj
    g = x( ind, 1:2);
    l = e (m);
end

```

Následující cyklus slouží ke zjištění nejlepší pozice každého agenta. Pokud agent při své cestě našel lepší pozici, než byla ta předchozí jednoduše jí nahradí pozicí původní. Dále zde probíhá změna rychlosti agentů, nalezení nových souřadnic pro agenty a vytyčení smysluplných hranic metodou absorpční hranice.

```

for n=1:I
    if x(n,3)<p(n,3) % nejlepší pozice každého agenta

```

```

    p(n,:) = x(n,:);
end

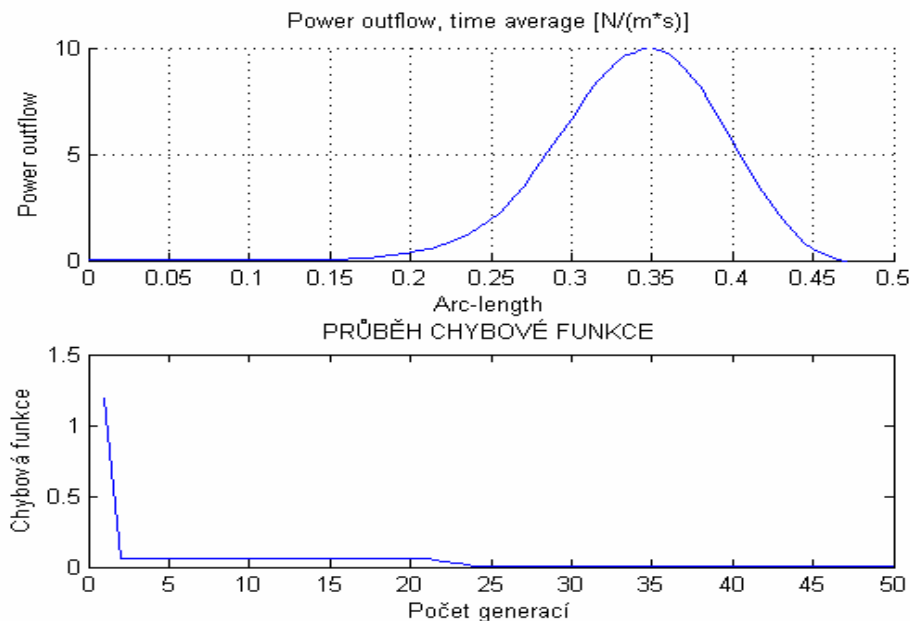
    % změna rychlosti rychlost agentů
    v(n,:) = w*v(n,:) + c1*rand()*(p(n,1:2) - x(n,1:2));
    v(n,:) = v(n,:) + c2*rand()*(g(1,1:2) - x(n,1:2));
    % nové souřadnice agenta
    x(n,1:2) = x(n,1:2) + dt*v(n,:);
    % vytyčení smysluplných hranic metodou absorpční stěny
    if x(n,1) > 0.11
        x(n,1) = 0.11; end
    if x(n,2) > 0.06
        x(n,2) = 0.06; end

```

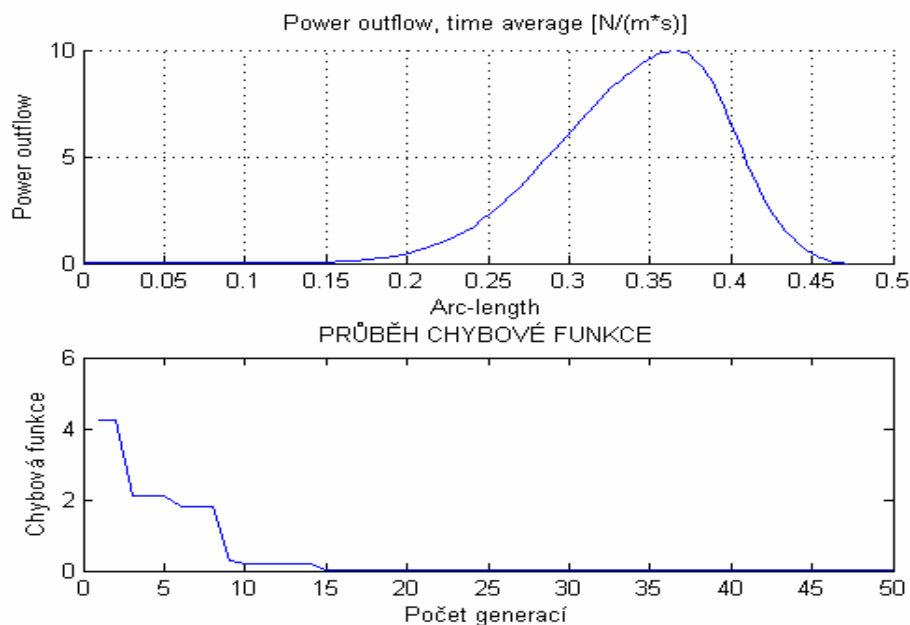
Takto vytvořený optimalizační algoritmus se opakuje a prohledává vymezený prostor, dokud neproběhne zvolený počet iterací. Grafickým výstupem tohoto programu jsou obrázky 4.6; 4.7; 4.8.

Výsledky a shrnutí optimalizace

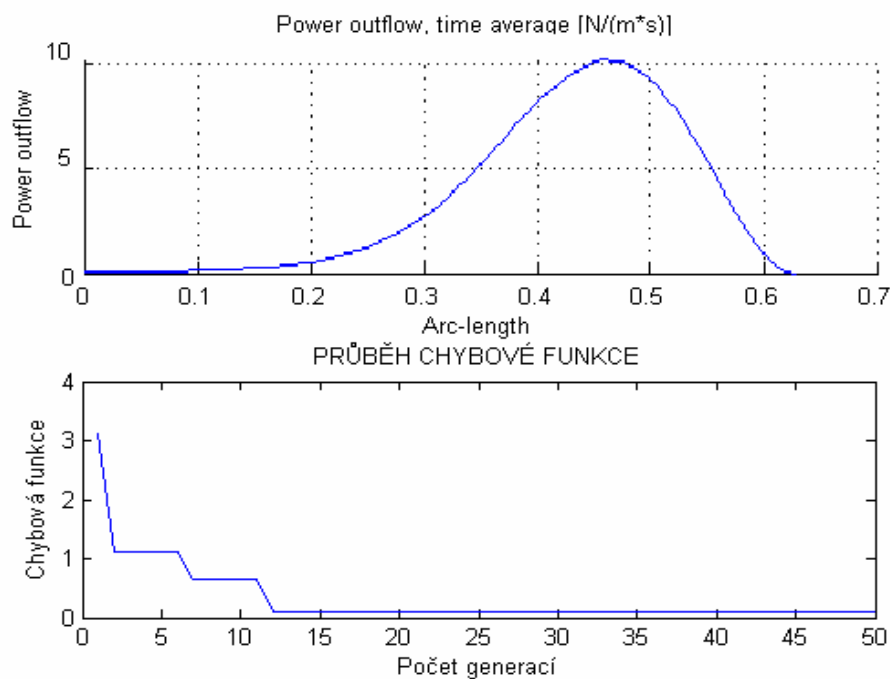
V této části jsou zobrazeny grafické výstupy optimalizačního programu využívající metodu PSO. Jde o výslednou optimalizovanou směrovou charakteristiku a časový průběh chybové funkce, pro jednotlivé monopóly. Parametry optimalizačního procesu jsou nastaveny následovně: $G = 50$, $I = 10$.



Obr. 4.6 Grafický výstup optimalizačního programu pro kónický monopól.



Obr. 4.7 Grafický výstup optimalizačního programu pro monopól s kapacitním zakončením.



c.)

Obr. 4.8 Grafický výstup optimalizačního programu pro kapkový monopól.

Ze zobrazených průběhů lze vidět, že optimalizace proběhla úspěšně u všech zkoumaných monopólů. Optimalizace dosahuje dobrých výsledků, chyba je ve všech případech téměř nulová. V tab. 3. je naznačen postup optimalizačního procesu, pro kapacitní monopól a frekvenci 3GHz. Parametry optimalizačního programu jsou nastaveny: $G = 50$, $I = 10$.

V tab.4 jsou pro každý monopól uvedeny optimální rozměry anténního ramene a hodnoty optimalizovaného výkonu, pro tři různé frekvence.

optimalizace metodou PSO																			
G	I	Rd	Ld	Pmax	G	I	Rd	Ld	Pmax	G	I	Rd	Ld	Pmax	G	I	Rd	Ld	Pmax
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[W/m2]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[W/m2]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[W/m2]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[W/m2]
1	1	11,4	39,3	7,77	5	1	59,9	50	16,5	9	1	48,5	50	10,9	13	1	62	41,2	66,9
	2	33,1	34	10,52		2	58,7	46,4	15,3		2	19,8	38,5	5,1		2	58,2	31	25
	3	82,5	38,4	38,4		3	48,2	50	11,1		3	44,6	50	10,4		3	62,9	36,4	35
	4	68,8	28,8	12,15		4	55,9	50	10,8		4	40,4	50	15,4		4	63,3	38,3	61
	5	34,4	28,6	11		5	66,1	39,9	17,6		5	27,1	46,6	1,9		5	61,6	39,6	82,5
	6	11	38,5	8,83		6	43,1	50	11,7		6	17,4	46,9	5,3		6	45,3	31,7	6,5
	7	105,8	10,2	14,3		7	90	27,6	45,5		7	83,3	22,1	27,8		7	69,7	30,3	11,7
	8	13,6	53,8	5,64		8	90	50	56,7		8	42,4	50	12,1		8	60,7	40,1	27,28
	9	34,7	5,5	20,3		9	65,3	50	47,8		9	35,7	50	13,7		9	69,9	33,8	26,3
	10	90	44,2	108		10	81,7	47,7	11,3		10	44,8	50	10,2		10	66,6	32,8	34,2
2	1	26,4	50	2,4	6	1	61,7	50	28,3	10	1	46,9	50	9,3	14	1	61,6	41	62,2
	2	90	50	56,7		2	40,9	42,6	11,9		2	28,2	39,9	1,3		2	57,7	29,8	19,1
	3	75	50	18,8		3	46,3	50	9,5		3	44,5	50	10,4		3	64,2	34,7	36
	4	90	50	56,7		4	40,6	50	15,3		4	44,4	50	10,2		4	59,4	39,3	39,4
	5	85,6	37	32,9		5	35,8	39	10,4		5	39,6	49,6	16,4		5	59,7	39,5	21,14
	6	68,3	50	15,1		6	12,2	50	5,3		6	29,1	42,4	2,1		6	36,6	32,7	9,8
	7	90	15,8	25,9		7	90	28,4	112,7		7	71,6	29,2	10,019		7	72,9	28,4	10,6
	8	76,7	50	13,5		8	80,7	50	11,1		8	40,6	50	15,3		8	61,8	38,2	63,1
	9	71,7	50	25,7		9	51,7	50	11,2		9	35,9	50	13,9		9	66,6	34,6	35,8
	10	90	50	56,7		10	66	46	20,7		10	50,6	44,6	14,5		10	63,9	35,1	50,5
3	1	41,1	50	14,6	7	1	56	50	13	11	1	53,4	46,2	17,9	15	1	59,7	42,4	35,6
	2	90	50	56,7		2	18,5	36,8	5,7		2	44,3	36,6	6,9		2	60,7	29,2	37,6
	3	65,7	50	23,2		3	45,5	50	10,2		3	54	44,4	6,5		3	60,7	37,2	50,2
	4	87,2	50	210		4	34,7	50	12,3		4	56,2	44,2	6,6		4	58,4	38,9	21,100
	5	90	42,9	51,4		5	14,6	38,4	6,2		5	47,8	48,2	9,8		5	56,9	40,9	12,1
	6	89,3	50	90		6	2	50	4,2		6	47,3	36	7,6		6	32,8	33,2	11,5
	7	90	21,5	49		7	86,8	26,4	18,1		7	65	33,2	59,1		7	73,8	27,8	7,8
	8	90	50	56,7		8	64,4	50	54,1		8	48,9	47,2	10,3		8	64,0	35,6	22,7
	9	87,6	50	700		9	41,5	50	14,3		9	47,7	40	10,6		9	65,3	34,7	19,8
	10	90	48,2	30,4		10	53,5	46,9	23,4		10	56,8	39,7	15,1		10	11,4	39,3	7,77
4	1	51,7	50	10,45	8	1	51,5	50	10,6	12	1	59,1	42,9	27,5					
	2	90	50	56,7		2	15,3	36,8	6,3		2	55	34	7,6					
	3	55,8	50	10,48		3	45	50	10,1		3	62,6	37,9	75,56					
	4	75,1	50	23,76		4	35,6	50	13,8		4	59,3	42,1	52,7					
	5	90	43	37,7		5	12,3	42	6,2		5	57,7	43	8,6					
	6	75,3	50	22,8		6	0,6	50	1,8		6	56,2	31,6	13,6					
	7	90	25	99,5		7	90	20,1	185,6		7	64,5	33,5	21					
	8	90	50	56,7		8	51	50	10,8		8	56,1	43,6	16,1					
	9	82,4	50	26,6		9	36,7	50	14,6		9	62	39,5	74,2					
	10	90	47,4	118,5		10	48,5	48,7	11		10	62,6	35,6	30,8					

Tab. 3 Tabulka zobrazuje průběh optimalizačního procesu.
pro kapacitní monopol na frekvenci 3GHz.
jde o výpis nalezených rozměrů anténního ramene a maximálních výkonů.

Tabulka 3 ukazuje postup optimalizačního algoritmu metodou PSO. V první generaci se náhodně rozmístí agenti a vybere se globální optimum. Globální optimum je v tabulce označeno tučně, personální optimum je označeno šedě a červenou barvou je označena pozice agenta, která vykazuje nejvýhodnější vlastnosti.

Kónický monopol				
frekvence	požadovaný výkon	Ld	Rd	optimalizovaný výkon
[GHz]	[W/m ²]	[mm]	[mm]	[W/m ²]
1	10	72	38	9,98
3	10	34	50	9,99
5	10	12	49	9,95
Monopól s kapacitním zakončením				
frekvence	požadovaný výkon	Ld	Rd	optimalizovaný výkon
[GHz]	[W/m ²]	[mm]	[mm]	[W/m ²]
1	10	98	49	9,85
3	10	50	36	10,02
5	10	71	29,2	10,01
Kapkový monopol				
frekvence	požadovaný výkon	Ld	Rd	optimalizovaný výkon
[GHz]	[W/m ²]	[mm]	[mm]	[W/m ²]
1	10	94,6	35	9,99
3	10	100	36,5	9,98
5	10	100	56,2	10,1

Tab. 4 Tabulka zobrazuje optimální rozměry anténních ramen monopolů, požadovaný a optimalizovaný vyzářený výkon pro tři různé frekvence. Parametry jsou nastaveny takto: $G = 50$, $I = 10$.

Tak jako v předchozím případě, je velmi důležité nastavit správný počet generací (G), i počet agentů v jedné generaci (I). I u této metody, tyto počty velmi ovlivňují dobu běhu optimalizačního programu. Ani zde nelze přesně určit minimální hodnoty těchto parametrů. Je to způsobeno náhodným rozmístěním agentů v prostoru a také na velikosti daného prostoru. Optimalizační algoritmus, vždy našel požadované řešení mezi desátou a třicátou generací. Pro správný chod programu, je tedy nezbytné volit počet generací z intervalu $G \in (30, 50)$. Při optimalizaci bylo zvoleno počet generací $G = 50$. Počet agentů v populaci je třeba volit z intervalu $I \in (10, 20)$.

5 ZÁVĚR

Ve své práci jsem se zabýval třemi typy monopólů. Jednalo se o kónický monopól, monopól s kapacitním zakončením a kapkový monopól. Všechny tři typy monopólů jsem postupně simuloval a zobrazoval jejich směrové charakteristiky. Prozkoumal jsem také vliv změny kmitočtů a změny rozměrů anténního ramene na vyzařování zkoumaných monopólů.

Pro každý monopól jsem zobrazil závislost vyzářeného výkonu na měnící se frekvenci. Kónický monopól vyzařuje nejvyšší výkon při frekvenci 7 400 MHz tento výkon dosahuje hodnot $34,54 \text{ W/m}^2$. Monopól s kapacitním zakončením dosahuje maxima při frekvenci 9 200 MHz a tento maximální vyzářený výkon vykazuje velikost $28,9 \text{ W/m}^2$. Kapkový monopól vyzařuje maximum o velikosti $46,76 \text{ W/m}^2$ při frekvenci 7 600 MHz.

Ze vzájemného porovnání všech tří monopólů vyplynulo, že nejvyšší vyzářený výkon vykazuje kapkový monopól. Z hlediska směrovosti se nejlépe chová kónický monopól. Při změně parametrů anténních ramen se směrové charakteristiky monopólu s kapacitním zakončením a kapkového monopólu deformují.

Dále jsem vypracované modely monopólů doplnil o dvě globální optimalizační metody, genetický algoritmus (GA) a metodu roje částic (PSO). Optimalizace proběhla v programu MATLAB. Optimalizační algoritmy jsem naprogramoval, prozkoumal vliv nastavení vstupních parametrů a vzájemně porovnal. Našel jsem optimální nastavení parametrů, pro genetické algoritmy jsou: $G = 50$, $I \in (10, 20)$, $pc = 90\%$, $pm = 10\%$. Pro metodu roje částic: $G = 50$, $I \in (10, 20)$,

Při vzájemném porovnání obou optimalizačních metod jsem dospěl k závěru, že značnou výhodou metody PSO je jednodušší algoritmus. Jednoduchost spočívá v menším počtu parametrů, kterými jsou: velikost populace a váhové koeficienty. Velmi důležité je ovšem tyto parametry správně nastavit. GA pracuje nejenom s velikostí populace, ale také s pravděpodobností křížení a mutace.

Výsledky optimalizací monopólů pro tři různé frekvence, jsou uvedeny v tab. 1 a tab. 4. Na první pohled je z tabulek zřejmé, že obě metody vykazují jiné výsledky pro totožné monopóly. Objevují se zde velké rozdíly mezi velikostmi optimalizovaných struktur. Lze si to jednoduše vysvětlit tím, že optimalizace má více řešení pro jednu strukturu. Rozdíly jsou způsobeny jistou náhodou, která v obou optimalizačních procesech hraje velmi významnou roli. Proto je velmi obtížné najít shodné řešení pro obě optimalizační metody.

Na závěr jsem nastínil průběh optimalizačního algoritmu pomocí tabulek 1 a 3. Zde je názorně vidět jak algoritmus pracuje s jedinci a jak hledá další generace. Pro tabulku 1 je vidět, že optimalizační program pomocí genetických algoritmů, v pozdějších generacích vykazuje mírnou stagnaci vývoje (produkuje sám sebe jako potomka), tento jev lze zmírnit vyšším procentem pravděpodobnosti mutace. I přes tuto vlastnost, algoritmus našel hledané řešení. V tabulce 2 lze pozorovat, že optimalizační program metodou PSO nachází často, rozměr L_d o velikosti 50 mm. Za tento jev může agent, který vylétl z vymezeného prostoru. Narazil tak do absorpční hranice a jeho rychlost se tak stala nulovou.

Výsledkem této práce jsou tři monopóly, které jsem modeloval a zkoumal vliv změn frekvence a rozměrů anténního ramene na vyzařování zkoumaných monopólů. Dále jsem vytvořil optimalizační algoritmy, které slouží, jako nástroj pro navrhování těchto monopólů.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] COMSOL Multiphysics web pages [online]. Praha: Humusofts s.r.o. [Cit. 11.12.2007]. Dostupné na WWW: <http://www.humusoft.cz/femlab/indexcz.htm>
- [2] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z., RAIDA, Z. Elektromagnetické vlny a vedení. Skriptum. Brno: Nakladatelství VUTIAM, 1999.
- [3] RAIDA, Z. Počítačové řešení komunikačních systémů. Skriptum. Brno: Nakladatelství VUTIAM
- [4] ČERNOHORSKÝ, D., RAIDA, Z., ŠKVOR, Z., NOVÁČEK, Z. Analýza a optimalizace mikrovlnných struktur. VUTIAM, Brno 1999. ISBN 80-214-1512-6.
- [5] MATLAB web pages [online]. Praha: Humusofts s.r.o. [Cit. 3.5.2008]. Dostupné na WWW: <http://www.humusoft.cz/matlab/matlab.htm>
- [6] ROBINSON, J., RAHMAT-SAMII, Y. Particle swarm optimization in electromagnetics, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2004, vol. 52, no. 2, p. 397-407.
- [7] JILKOVÁ, J. *Širokopásmové planární dipóly s koplanárním napájením*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007. Vedoucí diplomové práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

RF	radiofrekvenční modul
TM	vlna příčně magnetická
f	frekvence [Hz]
α	úhel rozevření kónického ramene [°]
r	poloměr vnitřního vodiče napáječe [mm]
R	poloměr vnějšího vodiče napáječe [mm]
R_r	vnější poloměr reflektoru [mm]
R_d	poloměr širšího konce anténního ramene [mm]
L_d	délka monopólu [mm]
L_1	délka napájecího vedení [mm]
t	tloušťka reflektoru a vnějšího vodiče [mm]
GA	genetický algoritmus (<i>genetic algorithm</i>)
PSO	metoda roje částic (<i>particle swarm optimization</i>)
Q	chybová funkce
G	počet generací
I	počet jedinců v generaci
pc	pravděpodobnost křížení [%]
pm	pravděpodobnost mutace [%]
D	výška anténního ramene [mm]
L	šířka anténního ramene [mm]
pbest	osobní optimum (<i>personal best</i>)
gbest	globální optimum (<i>global best</i>)
$r_{1,2}$	náhodná čísla od nuly do jedničky
vn	rychlost pohybu agenta
w	setrvačná váha
$c_{1,2}$	osobní a globální měřítko
Δt	časový krok

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 CD