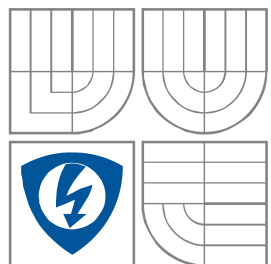




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

SYNTÉZA STRUKTUR S ELEKTROMAGNETICKÝM ZÁDRŽNÝM PÁSMEM

SYNTHESIS OF ELECTROMAGNETIC BANDGAP STRUCTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Michal Šedý

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO, 2009

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Michal Šedý
Bytem: Foltýnova 14, Brno, 635 00
Narozen/a (datum a místo): 6. září 1984 v Brně

(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: Syntéza struktur s elektromagnetickým zádržným pásmem

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Dr. 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: 29. května 2009

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

V mikrovlnném pásmu se pro realizaci elektronických obvodů využívají především planární technologie. Problémem planárních obvodů je šíření povrchové vlny. Povrchové vlny způsobují nechtěné vazby mezi dílčími částmi struktury a degradují její parametry. Řešením je využití struktur s elektromagnetickým zádržným pásmem. Jedná se o periodické struktury, které jsou schopny v určitých pásmech kmitočtů povrchové vlny zadržovat. Tématem práce je seznámení se s modelováním těchto struktur v programu Comsol Multiphysics pro jedno- a dvou rozměrné struktury.

ABSTRACT

In microwave frequency band, the planar technology is mainly used to fabricate electronic circuits. Propagation of surface waves belongs to the significant problem of this technology. Surface waves can cause unwanted coupling among particular parts of the structure and can degrade its parameters. The problem can be solved using an electromagnetic band gap structure (EBG). These periodic structures are able to suppress surface waves in different frequency bands. This thesis is focused on the modeling of these structures in the program COMSOL Multiphysics.

KLÍČOVÁ SLOVA

EBG, Struktura se zádržným pásmem, rozptylové parametry, Brillouinova zóna, Floquetův teorém, defekty, Comsol Multiphysics, šíření harmonické vlny, okrajové podmínky, globální optimalizace, genetické algoritmy, metoda roje částic.

KEY WORDS

Electromagnetic Band Gap (EBG), Scattering parameters, Brillouin zone, Floquet theorem, defects, Comsol Multiphysics, harmonic propagation, boundary conditions, global optimization, genetic algorithm, particle swarm optimization.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE

ŠEDÝ, M. *Syntéza struktur s elektromagnetickým zádržným pásmem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 57 s. Vedoucí diplomové práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Syntéza struktur s elektromagnetickým zádržným pásmem 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 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 29. května 2009

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

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

V Brně dne 29. května 2009

.....
podpis autora

OBSAH

ÚVOD.....	7
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	8
1.1 ROZPTYLOVÉ PARAMETRY	8
1.2 MATERIÁLY S ELEKTROMAGNETICKÝM ZÁDRŽNÝM PÁSMEM	9
1.3 PERIODICKÁ STRUKTURA A JEJÍ DEFEKTY	11
1.4 OPTIMALIZACE V OBLASTI ELEKTROTECHNIKY.....	12
1.5 SHRNUTÍ PRVNÍ KAPITOLY	12
2 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ EBG STRUKTUR.....	13
2.1 NÁVRH EBG STRUKTURY PLANÁRNÍHO VLNOVODU V PROGRAMU COMSOL MULTIPHYSICS	13
2.1.1 <i>Nakreslení modelu zvolené EBG struktury.....</i>	<i>13</i>
2.1.2 <i>Definice podmínek.....</i>	<i>14</i>
2.1.3 <i>Nastavení a výsledky analýzy.....</i>	<i>15</i>
2.1.4 <i>Zhodnocení a porovnání simulace</i>	<i>17</i>
2.2 PARAMETRICKÁ ANALÝZA EBG STRUKTURY	18
2.2.1 <i>Změna rozměrů EBG struktury.....</i>	<i>18</i>
2.2.2 <i>Změna základního substrátu.....</i>	<i>18</i>
2.2.3 <i>Změna poměru r/a.....</i>	<i>19</i>
2.3 NÁVRH EBG STRUKTURY DĚLIČE VÝKONU	20
2.3.1 <i>EBG model v programu Comsol Multiphysics</i>	<i>20</i>
2.3.2 <i>Návrh modelu děliče výkonu v programu Ansoft Designer SV2.....</i>	<i>22</i>
2.4 NÁVRH EBG STRUKTURY ZAHNUTÉHO VLNOVODU	25
2.4.1 <i>Návrh modelu zahnutého vlnovodu strukturou EBG.....</i>	<i>25</i>
2.4.2 <i>Návrh planárního modelu zahnutého vlnovodu.....</i>	<i>26</i>
2.5 NÁVRH EBG STRUKTURY SMĚROVÉ ODBOČNICE	29
2.5.1 <i>EBG model v programu Comsol Multiphysics</i>	<i>29</i>
2.5.2 <i>Návrh modelu směrové odbočnice v programu Ansoft Designer SV2.....</i>	<i>31</i>
2.6 SHRNUTÍ DRUHÉ KAPITOLY	32
3 GLOBÁLNÍ OPTIMALIZACE.....	33
3.1 METODA GENETICKÝCH ALGORITMŮ	33
3.1.1 <i>Princip metody GA.....</i>	<i>33</i>
3.1.2 <i>Vývojový diagram GA</i>	<i>34</i>
3.1.3 <i>Výhody a nevýhody GA</i>	<i>35</i>
3.2 APLIKACE GENETICKÝCH ALGORITMŮ V PROGRAMU MATLAB	35
3.2.1 <i>Pomocná výpočetní funkce rozptylových parametrů.....</i>	<i>36</i>
3.2.2 <i>Vlastní řešení genetického algoritmu</i>	<i>37</i>
3.3 METODA ROJE ČÁSTIC.....	40
3.3.1 <i>Princip metody PSO.....</i>	<i>40</i>
3.3.2 <i>Vývojový diagram PSO</i>	<i>42</i>
3.3.3 <i>Výhody a nevýhody PSO</i>	<i>42</i>
3.4 APLIKACE METODY ROJE ČÁSTIC V PROGRAMU MATLAB	43
3.4.1 <i>Vlastní řešení metody roje částic.....</i>	<i>43</i>
3.5 SHRNUTÍ KAPITOLY	45
4 PRAKTICKÁ ČÁST.....	46
4.1 SROVNÁNÍ VÝSLEDKU OPTIMALIZAČNÍCH METOD.....	46
4.1.1 <i>Metoda GA</i>	<i>46</i>
4.1.2 <i>Metoda PSO</i>	<i>47</i>
4.2 REALIZACE OPTIMALIZOVANÉHO EBG VLNOVODU	48
4.2.1 <i>Postup návrhu</i>	<i>48</i>
4.3 PARALLEL-PLATE VLNOVOD	48
4.3.1 <i>Změřená data</i>	<i>49</i>

4.4	SHRNUTÍ KAPITOLY	51
5	ZÁVĚR.....	52
6	SEZNAMY.....	54
6.1	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	54
6.2	SEZNAM OBRÁZKŮ	55
6.3	SEZNAM TABULEK	56
6.4	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	56
7	PŘÍLOHA.....	57
7.1	ZMĚŘENÉ ROZPTYLOVÉ PARAMETRY REALIZOVANÝCH STRUKTUR.....	57

ÚVOD

Moderní komunikační systémy pracují na stále vyšších kmitočtech. V pásmu decimetrových a centimetrových vln se pro realizaci elektronických obvodů využívají planární technologie, na dielektrickém substrátu jsou vodivými pásy vytvářeny pasivní struktury, tyto pasivní struktury jsou osazovány aktivními polovodičovými prvky [1].

Problémem obvodů pro decimetrové a centimetrové vlny je šíření povrchových vln, které jsou vedeny rozhraním mezi dielektrickým substrátem a vzduchem. Tyto vlny způsobují vznik nechtěných vazeb mezi jednotlivými částmi mikrovlnné struktury, čímž může dojít k degradaci parametrů [2].

Jednou z cest k potlačení povrchových vln nebo k jejich specifickému vedení je využití struktur s elektromagnetickým zádržným pásmem (*electromagnetic bandgap*, EBG). Jedná se o periodické struktury, které jsou schopny v určitých pásmech kmitočtů povrchové vlny zadržovat a minimalizovat tak negativní jevy, které jsou s jejich šířením spojeny.

Cílem diplomové práce je seznámit se a prozkoumat modelování EBG struktur s elektromagnetickým zádržným pásmem v programu COMSOL Multiphysics. V začátku práce nejprve uvedeme nutné teoretické základy pro pochopení nastíněné problematiky a v následujících kapitolách se budeme zabývat řešením zkoumaných struktur.

Na jednoduchých dvojrozměrných modelech ověříme vliv defektů na chování celého obvodu a dosažené výsledky porovnáme s literaturou. Ověřené postupy návrhu struktury se zádržným pásmem následně využijeme k modelování základních mikrovlnných elementů, které známe z planárních mikrovlnných obvodů (děliče výkonu, vazební členy) a detailně porovnáme jejich parametry s parametry planárních ekvivalentů. V neposlední řadě zvolíme jeden typ struktury a provedeme jeho optimalizaci. Pod pojmem optimalizace myslíme navržení modelu pomocí matematického aparátu, který určí nejlepší vstupní parametry obvodu.

Vlastnosti struktur vyrobených klasickou planární technologií a EBG obvodů budou v závěru práce podrobně porovnány. Též se zmíníme o vhodnosti jednotlivých optimalizačních metod pro řešení struktur se zádržným elektromagnetickým pásmem.

1 TEORETICKÁ ČÁST

V úvodní kapitole naší práce si stručně představíme výchozí definice parametrů používaných k charakterizování zkoumaných struktur, popíšeme a vysvětlíme základní fyzikální principy, na nichž EBG struktury pracují. Na závěr se seznámíme s pojmem optimalizace.

1.1 Rozptylové parametry

Hlavním prvkem sloužícím k popisu dílčích parametrů obecně libovolných struktur (periodických, neperiodických) jsou právě rozptylové parametry. Rozptylové parametry tvoří matici a jednotlivé prvky matice mají komplexní charakter (amplituda, fáze).

Pro klasické obvody s jedním vstupem a jedním výstupem (dvojbran) se parametr S_{11} nazývá činitelem odrazu na vstupu dvojbranu, S_{21} je činitelem přenosu ze vstupu na výstup, S_{12} je činitelem přenosu z výstupu na vstup a S_{22} odpovídá činiteli odrazu na výstupu. Dle jejich velikosti můžeme poznat, o jaký obvod se jedná. Platí [3]:

- $S_{11} = 0$ dB všechna energie vlny přicházející na vstup obvodu se odráží zpět,
- $S_{11} < 0$ dB vstupující vlna se v obvodu pohlcuje nebo jím prochází,
- $S_{11} > 0$ dB vlna přicházející od vstupu je silnější než vlna vysílaná generátorem, jedná se o aktivní obvod.
- $S_{21} = 0$ dB veškerá energie přicházející na vstup obvodu se přenáší na výstup, obvod má nulový vložený útlum,
- $S_{21} < 0$ dB obvod část energie vstupní vlny pohlcuje, má nenulový vložený útlum,
- $S_{21} > 0$ dB na výstupu obvodu má vlna větší energii než na vstupu, jedná se o aktivní obvod.

Rozptylové parametry se lze definovat různě. Záleží především na použitém kmitočtu a na přesnosti, s jakou chceme rozptylové parametry určit [4].

Jednou z možností je vypočítat rozptylové parametry ze známých intenzit elektrického pole na branách [4]:

$$S_{11} = \frac{\int_{\text{port 1}} [(E_C - E_1) \cdot E_1^*] dA_1}{\int_{\text{port 1}} (E_1 \cdot E_1^*) dA_1}, \quad (1.1)$$

$$S_{21} = \frac{\int_{\text{port 2}} (E_C \cdot E_2^*) dA_2}{\int_{\text{port 2}} (E_2 \cdot E_2^*) dA_2}, \quad (1.2)$$

kde E_1 a E_2 je intenzita elektrického pole dominantního vidu na první resp. druhé bráně a E_C je celková intenzita elektrického pole (budící vlna + odražená vlna). Výraz $E_C - E_1$ tedy značí intenzitu odražené vlny. Integrály součinů intenzit elektrického pole ve jmenovateli odpovídají celkovým výkonům tekoucím první a druhou branou.

Z výše uvedeného je zřejmé, že rozptylové parametry lze počítat rovněž z výkonů tekoucích branami. Tento výpočet však určuje pouze absolutní hodnotu rozptylových parametrů a nepřináší žádnou informaci o fázi. Na druhou stranu nepotřebujeme znát rozložení intenzity elektrického pole dominantního vidu na jednotlivých branách.

Vztahy pro výpočet rozptylových parametrů z toku výkonu vypadají následovně [4]:

$$S_{11} = \sqrt{\frac{P_{\text{port 1}}^{bw}}{P_{\text{port 1}}^{fw}}}, \quad S_{21} = \sqrt{\frac{P_{\text{port 2}}^{fw}}{P_{\text{port 1}}^{fw}}}. \quad (1.3), (1.4)$$

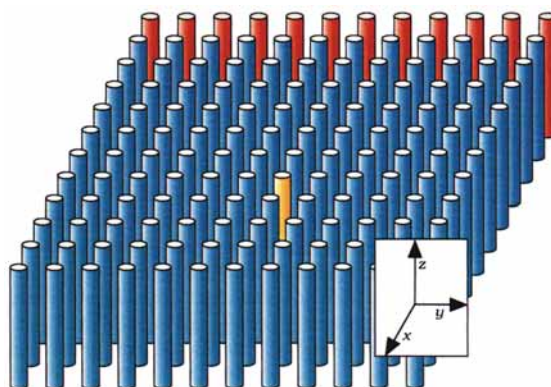
Zde $P_{port\ 1}^{bw}$ značí výkon odražený od brány 1 (*backward*) a $P_{port\ 1}^{fw}$ je výkon dopadající na bránu 1 (*forward*). Dále $P_{port\ 2}^{fw}$ je výkon vystupující z brány 2.

Program COMSOL Multiphysics, v němž budeme modely struktur s elektromagnetickým zádržným pásmem modelovat, podporuje oba způsoby výpočtu rozptylových parametrů.

1.2 Materiály s elektromagnetickým zádržným pásmem

Materiály s elektromagnetickým zádržným pásmem (EBG materiály, *Electromagnetic Band Gap Materials*) jsou nekystalické materiály s periodickou strukturou (viz obr. 1.1) [5]. Mohou se skládat z čistě dielektrických, kovových nebo smíšených periodických struktur. Podle počtu směrů, v nichž jsou materiály periodické, je lze dále dělit na jednorozměrné, dvourozměrné či trojrozměrné. Díky periodické struktuře dochází k mnohonásobným interakcím mezi dopadající vlnou a vlnami odraženými. V důsledku vzniká disperze vln a objevují se propustná i zádržná kmitočtová pásma.

EBG struktury mohou tedy pracovat ve dvou režimech: buď je jejich perioda malá v poměru k vlnové délce, vlna se šíří dál nebo je jejich perioda značná vzhledem k velikosti vlnové délky. Pokud je perioda dostatečně velká vzhledem k velikosti vlnové délky, vznikají elektromagnetická zádržná pásma [6].

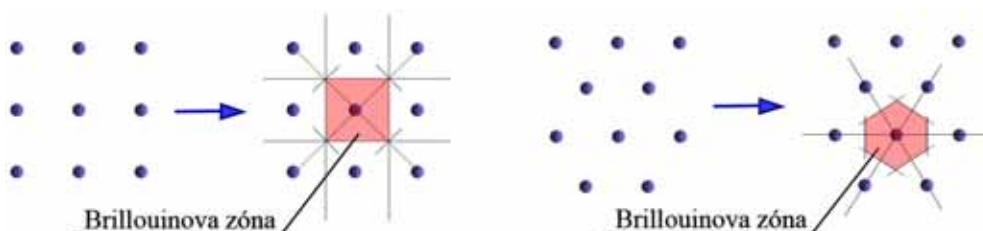


Obr. 1.1 Dvourozměrná periodická struktura demonstrující lineární defekt (značeno červeně) nebo bodovou poruchu (označeno žlutě) [8].

Při zkoumání vlastností periodických struktur přinesl převratný zlom pohled profesora Yablonovitcha [7], který se zaměřil na potlačení šíření pole ze zdroje umístěného uvnitř materiálu. V návaznosti na tuto práci se podařilo objevit mnoho nových vlastností EBG materiálů, např. schopnost pojmout energii v defektu periodické mřížky formou rezonance. Při zkoumání rezonance se ukázalo, že má relativně vysoký činitel jakosti Q díky schopnosti pojmout energii v použitých dvojrozměrných dielektrických materiálech.

Pro řádný popis chování elektromagnetických vln v periodické struktuře je nutno umět popsat jednu elementární buňku a interakci šířící se vlny s touto buňkou. Elementární buňka reciproké mřížky totiž dostatečně charakterizuje šíření vlny v celém periodickém prostředí.

Při popisu elementární buňky se setkáváme s pojmem **Brillouinova zóna**. Brillouinova zóna vznikne spojením ploch o stejné vzdálenosti od vybraného bodu periodické mřížky k sousedním bodům. Z n -té Brillouinovy zóny lze správným rozřezáním vydělit první zónu. Dále nedělitelná (neredukovatelná) Brillouinova zóna je základní elementární buňkou (viz obr. 1.2) a odpovídá první Brillouinově zóně omezené osami souměrnosti [9].

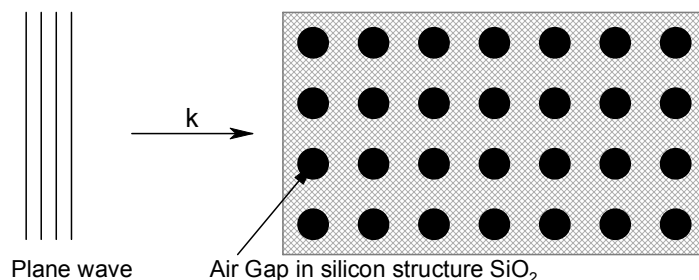


Obr. 1.2 Nedělitelné Brillouinovy zóny pro čtvercovou a hexagonální periodicitu [10].

Nyní se zaměříme na šíření rovinné vlny periodickou strukturou. Časově-prostorová závislost vlny je popsána členem $\exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t)]$, kde $\mathbf{k}$ je vlnový vektor, $\mathbf{x}$ je polohový vektor bodu, kam vlna dorazila, ω značí úhlový kmitočet a t je doba šíření vlny. Pro velikost vlnového vektoru (vlnové číslo) platí [11]:

$$|\mathbf{k}| = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (1.5)$$

kde c je rychlost šíření světla ve vakuu a λ značí vlnovou délku.



Obr. 1.3 Periodická struktura buzená rovinnou elektromagnetickou vlnou [12].

Pro většinu vlnových délek λ se vlna šíří v periodické struktuře bez rozptylu (jednotlivé rozptylové složky se vzájemně kompenzují). Pokud ale vlnová délka λ odpovídá dvounásobku periody mřížky $\lambda \sim 2a$, vznikají destruktivní interference (přímá a odražené vlny se sčítají v protifázi), vlna se nemůže šířit a vzniká tak zakázané pásmo [12].

Šíření elektromagnetických vln v periodických strukturách popsal Floquet [13]. Floquetův teorém uvádí, že módy v periodické struktuře mohou být vyjádřeny jako superpozice množiny rovinných vln, jejichž vlnové vektory jsou popsány vztahem [11]:

$$\mathbf{k}_n = \mathbf{k}_0 + n\mathbf{G}, \quad (1.6)$$

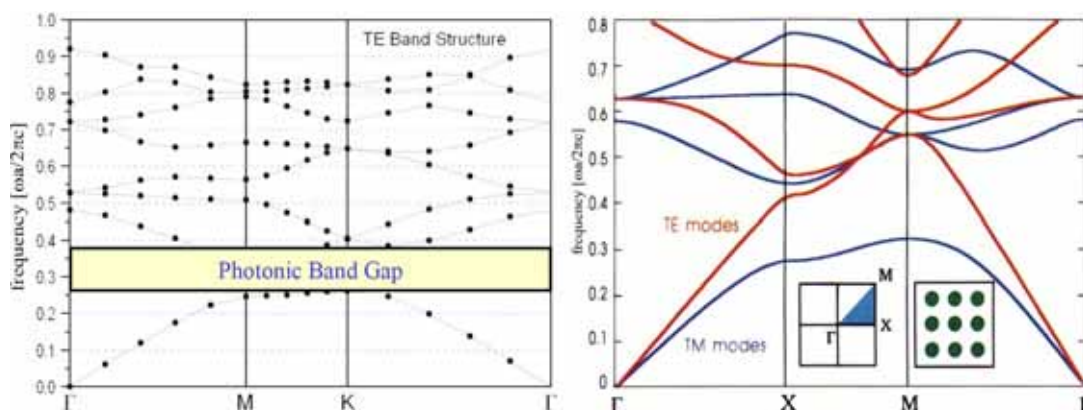
kde $\mathbf{k}_0$ je počáteční libovolný vektor, $\mathbf{k}_n$ je vlnový vektor n -tého módu a $\mathbf{G}$ je reciproký mřížkový vektor.

Floquetův teorém později zobecnil Bloch na vícerozměrné periodické struktury. Módy jsou popsány v Blochově vyjádření následovně [13]:

$$H_k(\mathbf{r}) = e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} u_k(\mathbf{r}) = e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} u_k(\mathbf{r} + \mathbf{R}), \quad (1.7)$$

kde $H_k(\mathbf{r})$ je intenzita magnetického pole, $\mathbf{k}$ je vlnový vektor, $\mathbf{r}$ je polohový vektor, $\mathbf{R}$ je mřížkový vektor a $u_k(\mathbf{r})$ je periodická funkce se stejnou periodou jakou má struktura.

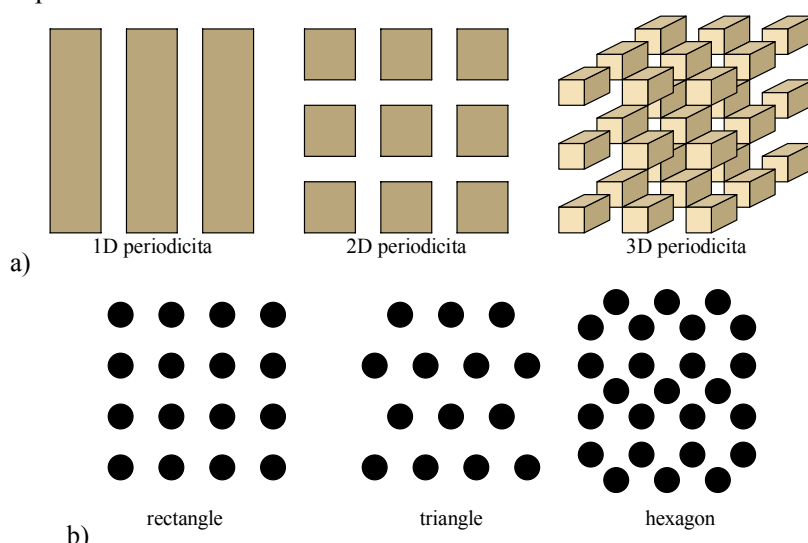
Blochovo vyjádření má důležitou vlastnost – rozdílné hodnoty $\mathbf{k}$ nevedou nutně k rozdílným módům. Mód s vlnovým vektorem $\mathbf{k}$ a mód s vlnovým vektorem $(\mathbf{k} + \mathbf{G})$ jsou tytéž módy, pokud $\mathbf{G}$ je reciproký mřížkový vektor. Následkem toho se zde objevuje redundance v označení $\mathbf{k}$ a můžeme se omezit pouze na konečnou oblast v recipročním prostoru.



Obr. 1.4 Ukázka disperzních diagramů se zádržnými pásmy pro rozdílné struktury [8].

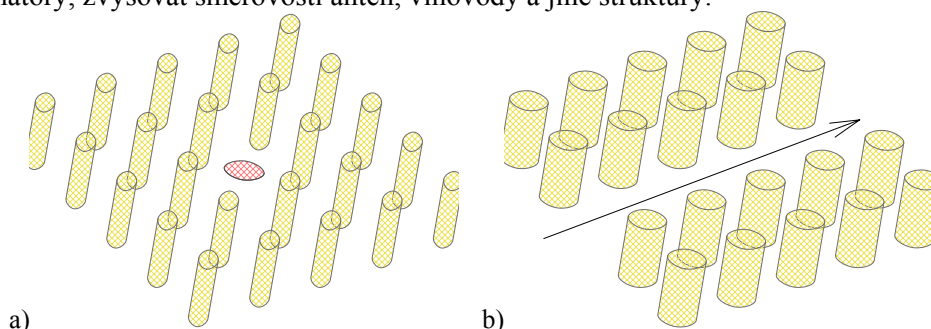
1.3 Periodická struktura a její defekty

Jak již bylo zmíněno výše, podle počtu směrů periodicit se struktury dělí na 1D, 2D a 3D. Dalšími kritérii pro členění periodických struktur je tvar jednotlivých prvků, typ mříže, do které se prvky sestaví, či parametr dielektrického kontrastu (rozdíl permitivit vzájemně sousedících dielektrik) a poměr poloměru prvku k mřížové konstantě.



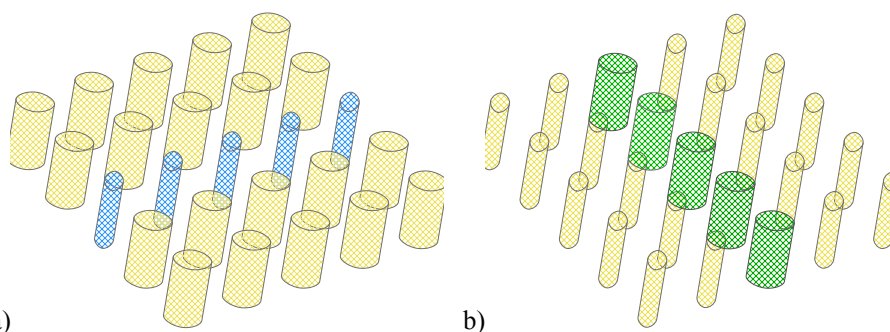
Obr. 1.5 a) Příklady periodicit. b) Přípustné typy 2D mřížek.

Při narušení periodické struktury dochází k poruše zakázaného pásma. Zádržné pásmo se naruší a začne propouštět příčně elektrické (TE) nebo příčně magnetické (TM) vlny na určitých kmitočtech. Vhodně zvolenými poruchami lze tedy relativně snadno a levně vytvořit potřebné vysokofrekvenční filtry, rezonátory, zvyšovat směrovosti antén, vlnovody a jiné struktury.



Obr. 1.6 Příklad defektu v periodické struktuře: a) bodový, b) lineární.

Ve dvourozměrných strukturách lze rozdělit defekty na bodové a lineární (čárové) poruchy. Pod pojmem porucha či defekt se myslí například odstranění příslušné mikrostruktury. Jako příklad uvedme odstranění řady buněk v celkové struktuře, která se výsledně bude chovat jako vlnovod (viz obr. 1.5). Mimo odstranění prvků periodické mřížky je možná jejich modifikace oproti ostatním. Tyto defekty opět ovlivňují zádržné pásmo (viz obr. 1.6).



Obr. 1.7 Příklady lineárních poruch změnou průměru mikrostruktury: a) poloviční poloměr, b) dvojnásobný poloměr.

1.4 Optimalizace v oblasti elektrotechniky

S optimalizací se setkáváme nejčastěji při realizaci nebo modelování výrobků či fyzikálních jevů. Jak již ze samotného názvu vyplývá, jedná se o řešení matematické úlohy, kde je snaha o nalezení optimálního (nejlepšího) řešení dané úlohy. Principem je hledání minimální nebo maximální hodnoty proměnných $x_1, x_2, \dots, x_N$ u účelové (kriteriální) funkce $F(\mathbf{x})$. Kriteriální funkce popisuje velikosti parametrů optimalizovaného systému $y_1, y_2, \dots, y_N$, tedy přesněji jejich rozdíl oproti požadovaným parametrům $d_1, d_2, \dots, d_N$. Čím má dosažený extrém chybové funkce nižší (vyšší) velikost, tím více se blížíme požadovanému řešení úlohy. V mnoha případech se jedná i o protichůdné požadavky, například jako vyrobit výrobek co nejlevněji a na druhé straně s co nejvyšší kvalitou.

Optimalizaci lze jednoduše popsat následující rovnicí převzatou z [23]. Jedná se o minimalizaci kriteriální funkce definované jako součet rozdílů „chyb“. Kvadrát těchto výsledků je z důvodu zabránění vzájemné kompenzace chyby. Mohlo by se stát, že dílčí výsledky mající rozdílné velikosti (včetně záporného či kladného znaménka), se vzájemně vhodně sečtou a vyruší. V tomto případě by optimalizovaný výsledek byl chybný.

$$\min F(\mathbf{x}) = \sum_i [y_i(\mathbf{x}) - d_i]^2. \quad (1.8)$$

Po počátečním numerickém (hrubém) návrhu, který slouží většinou jako vstupní data optimalizačního algoritmu, se nechá proběhnout proces optimalizace. Pro dosažení nejlepších vlastností je též důležité vybrat vhodný optimalizační algoritmus.

Než-li se zmíníme o klasifikaci úloh a typech optimalizačních metod, je nutné si uvědomit, že rovnice (1.8) řeší neomezenou optimalizaci. Stavové parametry mohou nabývat jakékoliv velikosti. Může tedy dojít při samotném řešení k situaci, kdy jeden z parametrů bude záporný či nulový, a přitom je to fyzikálně či prakticky nemožné. Uveďme příklad. Hledáme vhodnou délku tyče s odpovídajícím průměrem, která unese zadané zatížení. Sestavíme odpovídající kriteriální funkci a budeme parametrizovat délku a šíři tyče. Výsledkem nejspíše bude tyč s nulovou délkou nebo naopak s nekonečným průměrem. Abychom obdrželi korektní řešení, je nutné do optimalizace dosadit správné omezující podmínky. Při klasifikaci optimalizačních úloh tedy musíme brát v potaz jak charakter omezujících podmínek, tak charakter kriteriální funkce. Efektivita optimalizační metody totiž klesá se složitějšími funkcemi. Navíc ne každá metoda je vhodná pro dané řešení úlohy. V literatuře [23] je podrobněji rozepsána klasifikace jednotlivých úloh.

Metody optimalizace lze rozdělit mnoha způsoby. Uveďme například dělení na globální a lokální optimalizaci. Globální metody dokáží u zadané funkce najít její globální extrém, zatím co lokální metoda vede k řešení pouze v určitém intervalu hodnot, kde je schopna nalézt minimum (avšak nemusí být globální). Řešení výrazně závisí na zvolení počátečního bodu. Nevýhodou globálních optimalizací je jejich nesrovnatelně vyšší výpočetní náročnost.

Mezi globální optimalizace patří například metody:

- genetické algoritmy,
- PSO (metoda roje částic),
- Direct search,
- ACO (optimalizace kolonií mravenců).

První dvě metody podrobněji popíšeme ve 3. kapitole a uvedeme i dosažené výsledky.

1.5 Shrnutí první kapitoly

V této kapitole jsme především objasnili, co jsou periodické struktury s elektromagnetickým zádržným pásmem. Seznámili jsme se s popisem základní elementární buňky, šířením rovinné vlny a vznikem zádržných pásem. V neposlední řadě byly popsány defekty periodické struktury, kde pouhou změnou tvaru či vynecháním prvků docílíme požadovaného šíření vlny a představili jsme základní rozdělení optimalizačních technik v oblasti elektrotechniky.

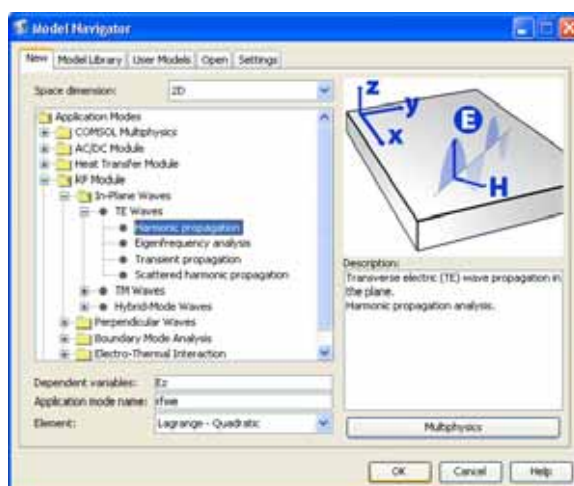
2 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ EBG STRUKTUR

V druhé kapitole se budeme zabývat modelováním 2D struktur s elektromagnetickým zádržným pásmem v prostředí simulačního programu COMSOL Multiphysics v. 3.3. Kompletní postup návrhu struktury si ukážeme na prvním modelu jednoduchého proužku, který se chová jako planární vlnovod (viz obr.2.2). Změnou základních parametrů modelu (permitivity, poměru r/a) si osvětlíme vliv na chování celkového modelu. Následně zhodnotíme srovnáním s experimentální studií.

Obdobným způsobem budeme postupovat při modelování následujících struktur (děliče výkonu, zahnutého vlnovodu a směrové odbočnice). Dosažené výsledky srovnáme s jinými modely v mikrovlnném nebo planárním provedení.

2.1 Návrh EBG struktury planárního vlnovodu v programu COMSOL Multiphysics

Při modelování se pro názornost zaměříme na dvourozměrný návrh, tedy na šíření příčně elektrické rovinné vlny (TE) periodickou strukturou. Po spuštění programu si v hlavním menu simulačních modelů vybereme, jak ukazuje obr. 2.1: *RF Module* (rádiové kmitočty) → *In-Plane Waves* (rovinné vlny) → *TE Waves* (příčně elektrické vlny) → *Harmonic propagation* (šíření harmonické vlny).

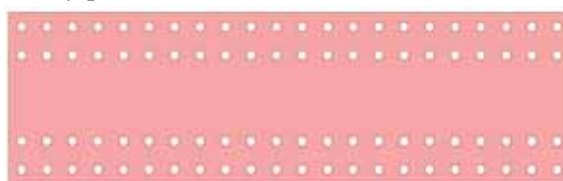


Obr. 2.1 Výběr simulační analýzy.

Pod položkou *Element* je mimo jiné možné zvolit typ aproximace počítané veličiny pole. Použitím vyššího stupně aproximace lze dosáhnout přesnějších výsledků. Pro naši analýzu bude dostačující kvadratická aproximace.

2.1.1 Nakreslení modelu zvolené EBG struktury

Po spuštění příslušného modulu programu je vytvoření modelu periodické struktury relativně snadné (vytváření geometrických modelů jednotlivých částí je dosti intuitivní). Celá struktura bude složena z dielektrického materiálu FR4. Jednotlivé periodicky rozmístěné otvory se z dielektrika odstraní vyvrtáním a nahradí se měděnými válečky. Tyto konkrétní typy materiálů jsou použity, aby bylo možno simulované výsledky porovnat s [14].



Obr. 2.2 Modelovaná EBG struktura v programu Comsol Multiphysics.

Nejprve si nadefinujeme jednu elementární buňku periodické mřížky. Kliknutím na tlačítko *Ellipse/Circle* nakreslíme kruh a dvoj-klikem vyvoláme definiční tabulku, kde vyplníme rozměry a umístění středu prvku. Pomocí *zoom* si můžeme strukturu libovolně zvětšit. Dalším zvláště užitečným nástrojem je příkaz sloužící pro kopírování stejných objektů s názvem *Array*. Označíme si nakreslenou buňku a s použitím tohoto příkazu nadefinujeme v položce *Displacement* vzdálenosti mezi periodicitami v daných směrech a v položce *Array size* počet jejich opakování. V takto vytvořené periodické mřížce si vyznačíme námi zvolenou cestu pro šíření elektrické vlny. Dané prvky jednoduše označíme a pomocí klávesy *Delete* smažeme.

Omezení struktury provedeme tlačítkem *Rectangle/Square*. Nakreslíme obdélník přes prvky a opět po vyvolání tabulky dvoj-klikem, vyplníme rozměry ve směrech *x*, *y* a umístění rohu. Pro lepší přehlednost jsou jednotlivé rozměry vypsány do přehledové tabulky (tab. 2.1).

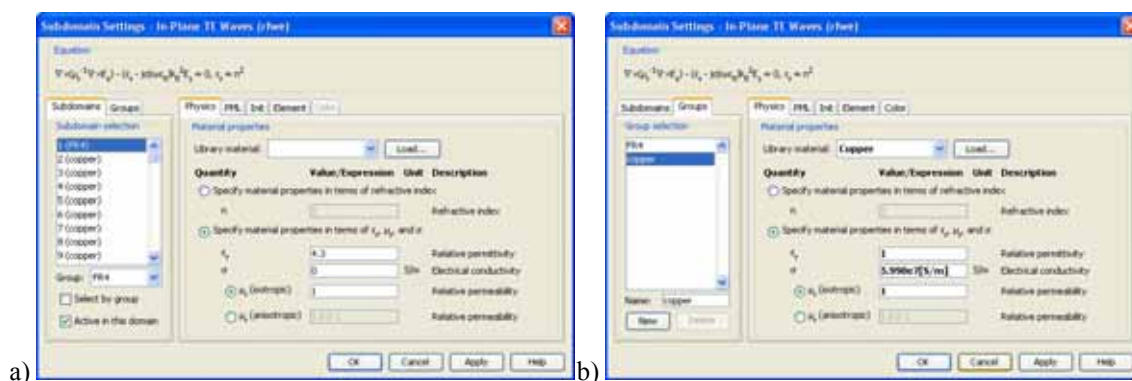
díra	<i>poloosa A</i>	<i>poloosa B</i>	<i>pozice x</i>	<i>pozice y</i>	<i>umístění</i>
	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$	0	0	střed
pole	<i>rozestup x</i>	<i>rozestup y</i>	<i>opakování x</i>	<i>opakování y</i>	
	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	22	6	
obdélník	<i>šířka</i>	<i>výška</i>	<i>pozice x</i>	<i>pozice y</i>	<i>umístění</i>
	$22 \cdot 4,6 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 4,6 \cdot 10^{-3}$	$-2,3 \cdot 10^{-3}$	$-2,3 \cdot 10^{-3}$	roh

Tab. 2.1 Rozměry dílčích částí modelu EBG struktury.

2.1.2 Definice podmínek

Jestliže je model pro simulaci nakreslen, můžeme přejít k definování parametrů pro použité typy materiálů a okrajových podmínek. Jednotlivé materiálové konstanty lze vymezit v *Subdomain mode*. Po dvoj-kliku na nakreslenou strukturu se otevře okno s nastavením. Do této nabídky je možné vstoupit i pomocí záložky *Physics* → *Subdomain Settings* či klávesou F8.

V levé části okna si zvolíme, pro jaký prvek budeme definovat materiálové vlastnosti (dané prvky lze označit i v nakresleném schématu). V pravé části si naopak můžeme vybrat, jakým způsobem vlastnosti materiálu definujeme. První možností je vyhledání materiálu v knihovně programu. Modely jsou velmi přesné a specifikují velkou řadu vlastností. Druhou možností je specifikace materiálu na základě indexu odrazu. Zde je možné dosadit přímo hodnotu nebo výraz definovaný dále v programu. Poslední variantou je určení relativní permitivity ϵ_r a relativní permeability μ_r . Při definování velkého množství stejných prvků je vhodné využít označování po skupinách. Oba případy jsou demonstrovány na následujícím obrázku obr. 2.3 včetně přesných hodnot pro naši simulaci. Po nastavení všech parametrů je nutné uložení hodnot tlačítkem *Apply*.



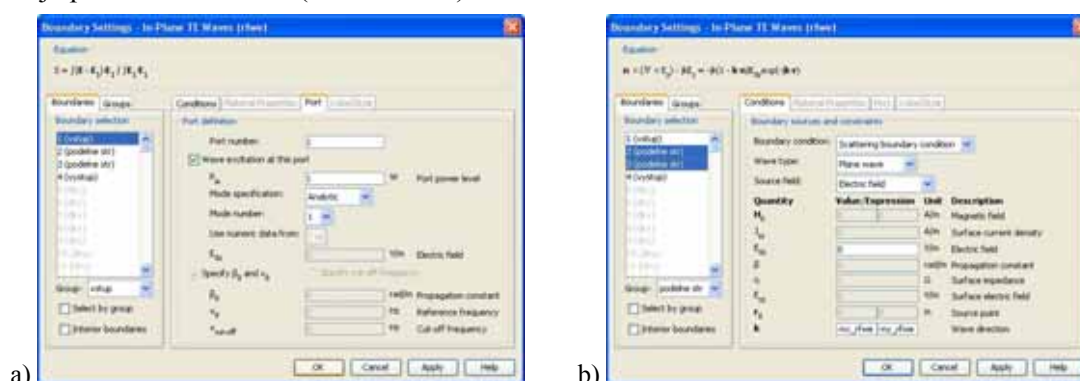
Obr. 2.3 Nastavení materiálových vlastností: a) FR4 dielektrika, b) měděných válečků.

Pro úplné nastavení modelu je třeba doplnit okrajové podmínky struktury. Chování vlny na krajích definujeme v *Boundary mode*. Obdobně jako u materiálových vlastností se lze do nastavení dostat pomocí *Physics* → *Boundary Settings* či klávesou F7.

Opět v levé části dialogového okna volíme jednotlivé hranice a v pravé části jim přiřazujeme příslušné podmínky. Strukturu ozařujeme v simulaci rovinnou vlnou dopadající na levou příčnou stěnu a šíření vlny v podélném směru je po okrajích struktury omezeno. Dále bude vlna pro periodické defekty tvořené měděnými válečky odrážena a intenzita pole na jejich okrajích bude nulová. Z těchto úvah plynou použité hraniční podmínky.

Vstup a výstup modelu (levá a pravá stěna) definujeme jako porty. Pomocí portu lze nechat programem vykreslit rozptylové parametry a analyzovat chování struktury na rozličných frekvencích. Na záložce *Condition* v roletovém menu zvolíme *Port* a po zpřístupnění záložky *Port* nastavíme okrajové podmínky. Vstup označíme jako port 1, zatrhneme volbu buzení (úroveň 1 W standardně ponecháme) a vybereme analytický mód výpočtu (viz obr. 2.4a). Výstup bude definován opět jako *Port*, avšak číselné označení 2 (tímto dodržíme shodu s klasicky značenými S-parametry) a volbu buzení ponecháme bez označení!

Podélné strany struktury modelu struktury si v záložce *Condition* označíme jako *Scattering boundary condition*. Tímto stanovíme, že stěny struktury se chovají jako tzv. absorbér a dopadající vlna se na jejich povrchu tlumí. Je možné i nastavení určité hladiny elektrického pole. V našem případě je ponecháme nulové (viz obr. 2.4b).



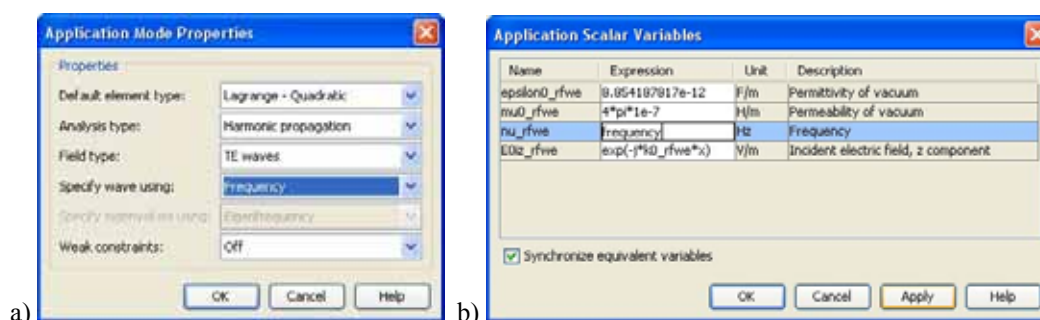
Obr. 2.4 Nastavení okrajových podmínek: a) vstupu, b) podélných stran.

2.1.3 Nastavení a výsledky analýzy

V předchozích odstavcích jsme kompletně namodelovali zkoumanou strukturu. Zbývá pouze nastavení analýzy. Program Comsol Multiphysics umožňuje celou řadu simulací, jak v časové oblasti, tak i ve frekvenční oblasti. Metoda řešení vychází z numerického výpočtu metodou konečných prvků (FDFE – Frequency Domain Finite Elements, TDFE – Time Domain Finite Elements).

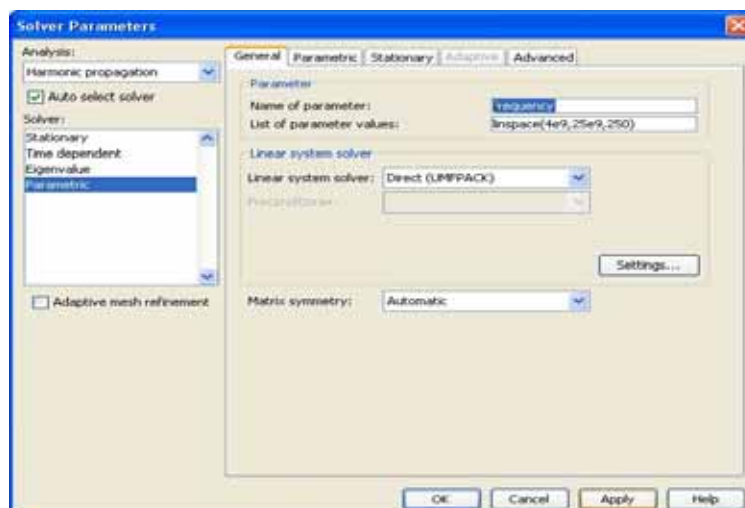
V našem případě se bude jednat o analýzu zkoumající rozložení pole elektrické vlny a jejího šíření strukturou, popsané rozptylovými parametry. Vstupní vlna bude měnit svůj kmitočet v rozsahu 4 GHz až 25 GHz. V programu Comsol je nastavena základní hodnota vlnové délky pro simulaci. Nahrazením číselné hodnoty parametrem (proměnnou) budeme schopni měnit frekvenci.

V záložce *Physics* → *Properties* si nastavíme zadávání formátu vlny v jednotkách Hz v kolonce *Specify wave using* (obr. 2.5a). Následně změníme v záložce *Physics* → *Scalar Variables* položku *nu_rfwe* (obr. 2.5b) z hodnoty na libovolně nazvaný parametr (v našem případě pojmenovaný *Frequency*). Volbu potvrdíme tlačítkem *Apply*.



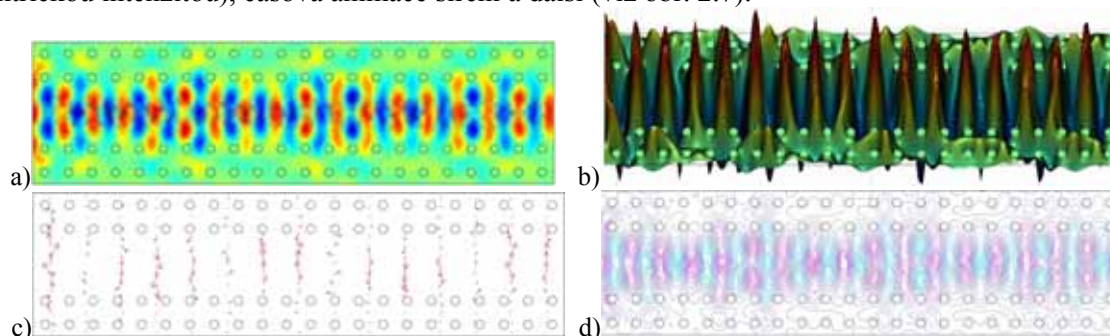
Obr. 2.5 Změna nastavení parametru krokování.

Posledním nastavením před samotným analyzováním struktury v programu je nadefinování rozsahu výpočtu pomocí ikonky *Sovler Parameters*  nebo záložky *Solve* → *Solver Parameters* či klávesy F11. Z levé strany řešení vybereme typ *Parametric*. Do pravé strany vepíšeme název parametru a hodnoty, pro které se bude počítat řešení (viz obr. 2.6). Hodnoty se zapisují ve formátu řádkového vektoru, kde první hodnota odpovídá počáteční frekvenci, druhá konečné frekvenci a poslední hodnota je počet frekvencí, na které je zadaný interval ekvidistantně rozdělen. S rostoucím počtem frekvencí roste přesnost analýzy za cenu delší doby výpočtu a větší velikosti simulovaného souboru. Po nastavení a případně jakékoliv další úpravě vždy uložíme tlačítkem *Apply*.



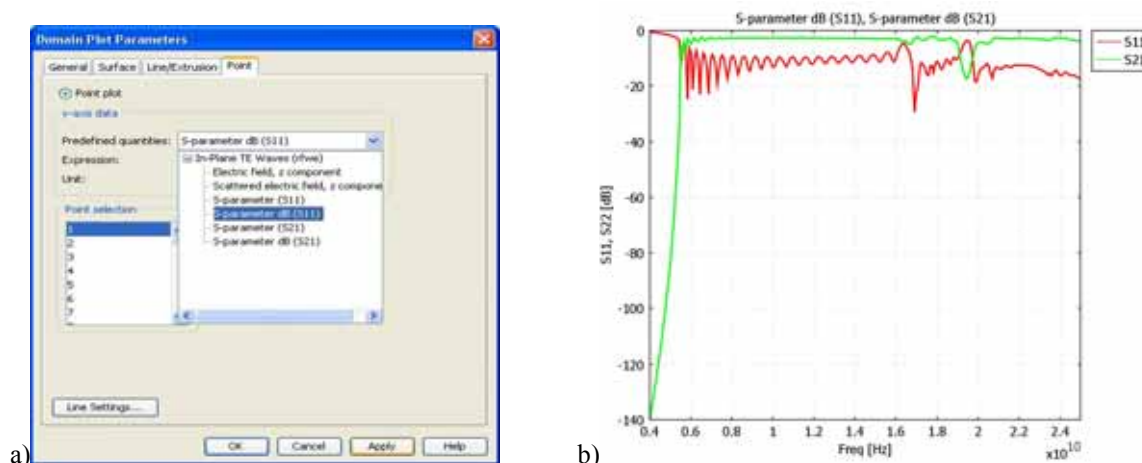
Obr. 2.6 Nastavení rozsahu a přesnosti výpočtu.

Nyní je model kompletně nastaven a připraven ke spuštění analýzy. Tlačítkem *Solve*  nebo přes záložku *Solve* → *Solve Problem* se spustí simulace. Po skončení výpočtu se nám objeví 2D pohled na rozloženého pole TE vlny ve struktuře. Využitím tlačítek na levé boční liště lze přepínat pohledy do 3D režimu, zobrazení vektorového šíření, vrstevnicové zobrazení (míst se stejnou elektrickou intenzitou), časová animace šíření a další (viz obr. 2.7).



Obr. 2.7 Zobrazení výsledků analýzy: a) 2D graf, b) 3D graf, c) vektorový graf, d) konturový graf.

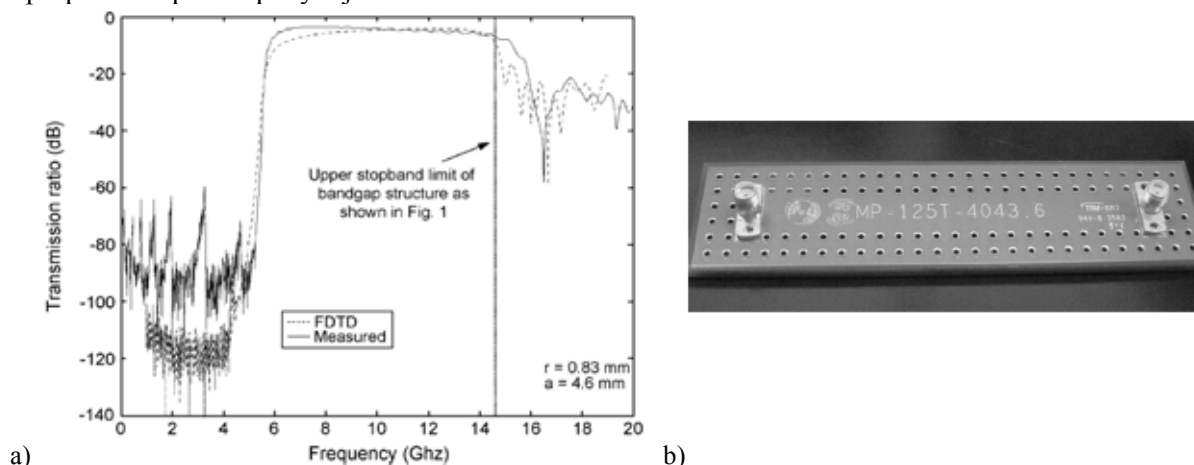
Zobrazení rozptylových parametrů se volí v záložce *Postprocessing* → *Domain Plot Parameters*. V kartě *Point* si zvolíme, který parametr vykreslíme a v jakých jednotkách. Vybereme si v *Point selection* bod, pro nějž budeme vykreslovat S-parametry. Vybraný bod lze označit přímo ve schématu na pozadí (Obr. 2.8). Po stisku tlačítka *Apply* se vykreslí kmitočtový průběh příslušného parametru. Je-li požadováno současné vykreslení více rozptylových parametrů, je potřeba v kartě *General* označit položku *Keep current plot* a po definování nového parametru opět stisknout *Apply*.



Obr. 2.8 Výběr rozptylového parametru: a) nastavení, b) zobrazení.

2.1.4 Zhodnocení a porovnání simulace

Námi analyzovaná struktura vykazuje dobré přenosové vlastnosti na kmitočtech od 6,4 GHz s mírným zvlněním až do oblasti 16 GHz. Použitelný přenos jsme si přitom definovali jako frekvenční rozsah, kde zvlnění amplitudy přenosu nebude větší než ± 1 dB s minimálním vložným útlumem. Průměrný vložný útlum v tomto propustném pásmu je 3 dB s minimální hodnotou 2,6 dB a maximální 3,5 dB. V pásmu frekvencí do 6 GHz se vlna nešíří. Je to způsobeno podkritickými rozměry struktury. Naopak pro vyšší kmitočty se uplatňují defekty ve struktuře. Odraz vlny na vstupu struktury se v propustném pásmu pohybuje na hranici -10 dB.



Obr. 2.9 Vlnovodová struktura [14]: a) přenosové charakteristiky, b) finální testovaný výrobek.

V literatuře [14] je popsána analyzovaná struktura. Testovací simulace zde probíhala s trojrozměrným modelem a pro výpočet elektromagnetického pole byla použita metoda FDTD (metoda konečných diferencí v časové oblasti). Poslední odlišností oproti naší simulaci bylo uvažování dielektrických ztrát v substrátu FR4 a buzení koaxiálními sondami.

Na obr. 2.9a lze vidět přenosovou charakteristiku struktury (plnou čarou je vykreslena změřená charakteristika zhotoveného výrobku). Při porovnání s naší simulací se pásmo propustnosti liší především na svém horním okraji. V textu [14] je uveden rozsah pásma 6 GHz až 14,1 GHz s průměrným vložným útlumem 4,6 dB.

2.2 Parametrická analýza EBG struktury

Pro správnou optimalizaci konkrétního návrhu periodické struktury se zádržnými pásmy (filtry, vlnovody, antény atd.) je třeba vědět, které parametry nejvíce ovlivňují celkové chování modelu. Nedostatečné porozumění vede k nežádoucím změnám vlastností nebo k nesmyslné optimalizaci.

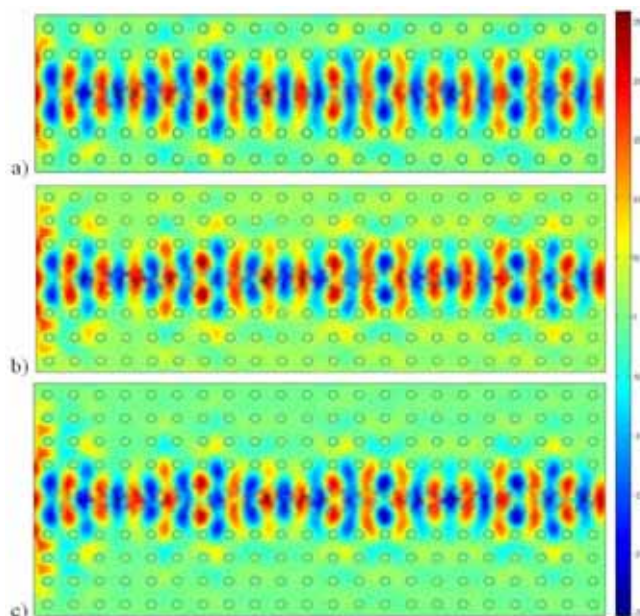
Na naší modelové struktuře předvedeme vliv změn tří základních parametrů a budeme pozorovat šíření vlny a odpovídající kmitočtové průběhy rozptylových parametrů. Měřené parametry jsou:

- rozměry struktury,
- permitivita základního substrátu,
- poměr poloměru kruhových defektů ke vzdálenosti jejich středů r/a .

2.2.1 Změna rozměrů EBG struktury

Změnou rozměrů EBG struktury budeme rozumět změnu příčné velikosti. Podélný směr zůstane zachován pro celkové porovnání. V programu Comsol Multiphysics jsme nadefinovali stejné modely s rozměry počtu buněk periodické mřížky 6×22 , 8×22 , 10×22 .

Z obr. 2.10 vidíme, že změna velikosti struktury v příčném směru po zachování stejné šíře kanálu bez defektů nemá téměř žádný vliv na výsledné šíření elektrické vlny.

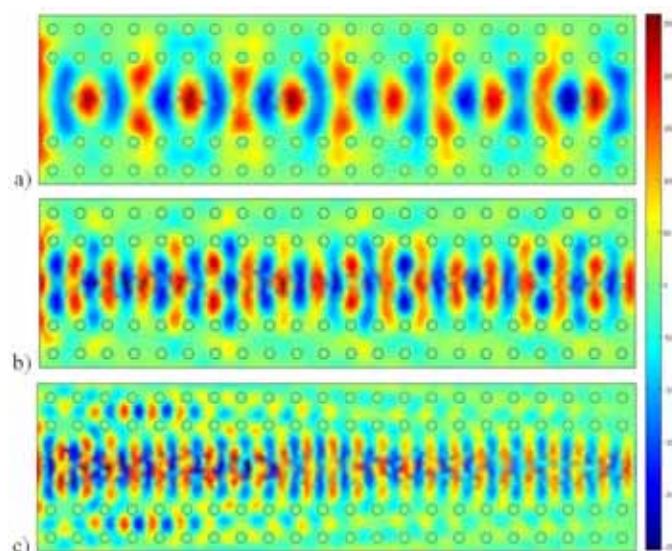


Obr. 2.10 Rozložení elektrického pole ve struktuře pro: a) 6×22 , b) 8×22 , c) 10×22 .

2.2.2 Změna základního substrátu

Změna relativní permitivity substrátu znamená v praxi změnu použitého materiálu. Jedná se tedy o významný parametr zejména v případě výroby. Permitivitu jsme měřili ve třech krocích, pro strukturu s rozměry počtu buněk periodické mřížky 6×22 , poloměrem buněk $r = 0,83 \text{ mm}$ a vzájemnou vzdáleností periodicit $a = 4,6 \text{ mm}$:

- $\epsilon_r = 2,15$,
- $\epsilon_r = 4,3$,
- $\epsilon_r = 8,6$.



Obr. 2.11 Rozložení elektrického pole ve struktuře pro: a) $\varepsilon_r = 2,15$, b) $\varepsilon_r = 4,3$, c) $\varepsilon_r = 8,6$.

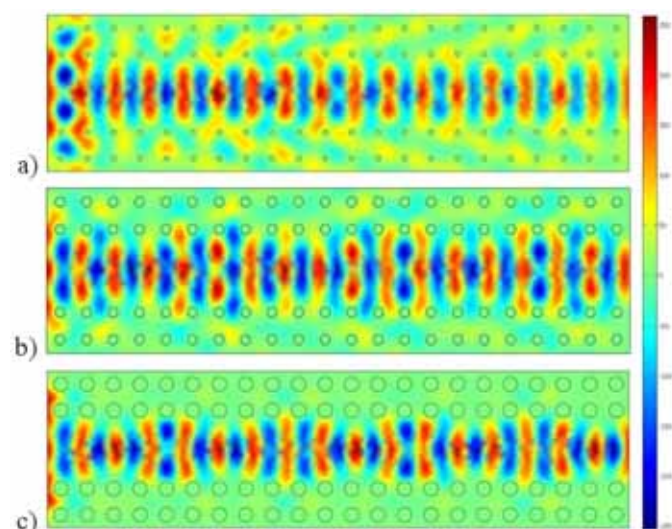
Využitím jiného materiálu výrazně ovlivníme šíření vlny. Pro nižší hodnoty ε_r (oproti nominálnímu $\varepsilon_r = 4,3$) se elektrická vlna kolidující s defekty méně tlumí a šíří se strukturou bez ohledu na případný směr. U dielektrika s vyšší permitivitou dochází ke snížení propustného pásma. Vlna se šíří částečně mezi defekty a je více tlumena. Mezní kmitočet se posouvá směrem k nižším frekvencím. Pro materiály s nízkou hodnotou ε_r mezní kmitočet vzrůstá.

2.2.3 Změna poměru r/a

Jedná se o důležitý parametr. Při základních návrzích zvolených struktur se vychází právě z poměru velikosti periodické buňky r a jejich vzájemné vzdálenosti a . Z důvodů zachování stejného podélného rozměru struktury ponecháme vzájemné vzdálenosti periodicit a budeme měnit pouze poloměry elementárních buněk v rozsazích:

- $r = 0,415 \text{ mm}$,
- $r = 0,83 \text{ mm}$,
- $r = 1,245 \text{ mm}$.

Pro úplnost jen dodejme, že relativní permitivita zůstala ponechána ($\varepsilon_r = 4,3$) a počet prvků struktury je 6×22 .



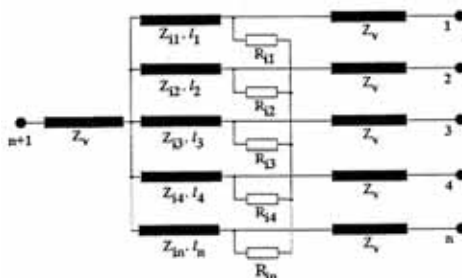
Obr. 2.12 Rozložení elektrického pole ve struktuře pro: a) $r = 415 \mu\text{m}$, b) $r = 830 \mu\text{m}$, c) $r = 1245 \mu\text{m}$.

Elektrická vlna se pro malé hodnoty dutinek šíří dále substrátem. S rostoucím poloměrem se v dutinkách pohlcuje stále více energie vlny. Výsledkem je dokonalejší vedení vlny s menším rozptylem a širším propustným pásmem.

Prezentované změny tří hlavních parametrů simulované struktury nám dávají určitou představu, jakým směrem by se měla případná optimalizace ubírat. Velikost struktury nebude hrát při obdobném návrhu podstatnou roli. Naopak rozhodujícím faktorem bude zvolený materiál pro substrát a především dle použitého pracovního kmitočtu odpovídající poměr r/a .

2.3 Návrh EBG struktury děliče výkonu

Druhou modelovanou strukturou v naší práci je dělič výkonu. Již podle názvu je zřejmá jeho funkce. Je požadováno rozdělení výkonu z jedné vstupní brány do obecně n výstupních bran. Výstupní brány jsou mezi sebou izolovány a výstupní signály mají stejnou fázi. Ve vysokofrekvenční a mikrovlnné technice se těmito strukturami zabýval E. Wilkinson. Navrhl planární struktury (využívající čtvrtvlnné vedení) splňující výše uvedené požadavky a dále definoval, za jakých předpokladů bude struktura správně fungovat. Obr. 2.13 ukazuje příklad Wilkinsonovy struktury převzatý z [15].

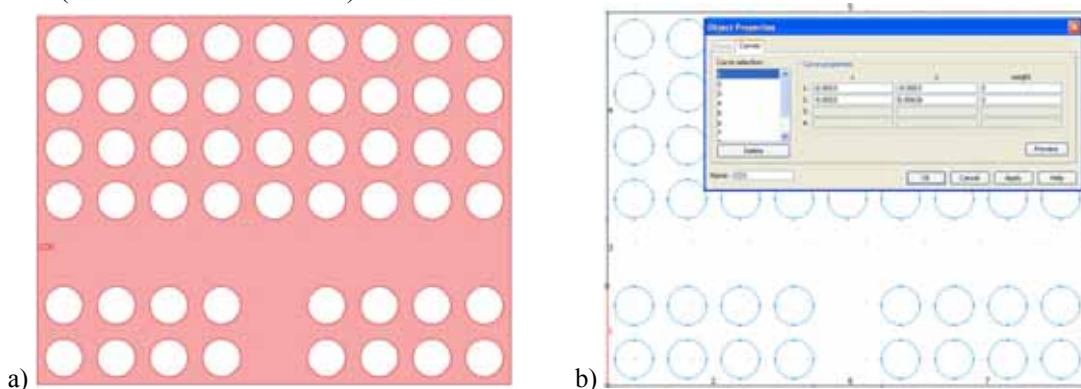


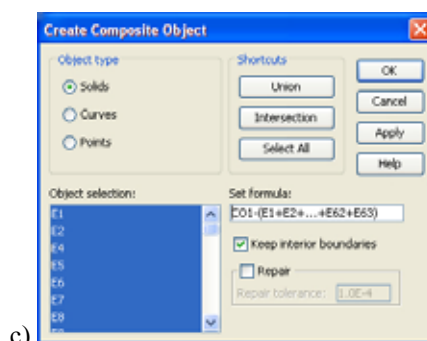
Obr. 2.13 Wilkinsonova struktura děliče výkonu [15].

2.3.1 EBG model v programu Comsol Multiphysics

Při modelování děliče výkonu strukturou EBG se pro jednoduchost omezíme na dvě výstupní brány. Dělení bude probíhat symetricky (ve shodném poměru mezi obě výstupní brány). Relativní permitivitu substrátu ponecháme shodnou s předchozím návrhem $\epsilon_r = 4,3$. Poměr poloměru dutinky a vzájemné vzdálenosti periodicit r/a jsme zvolili dvojnásobný, se zachováním vzdálenosti buněk. Tato změna vychází z poznatků v kapitole 2.2.3.

Po vzoru návrhu planárního vlnovodu si spustíme v programu Comsol Multiphysics simulaci šíření TE harmonické vlny. Obdobným způsobem jako v kapitole 2.1.1 navrhne model simulovaného děliče. Výsledná struktura je zobrazena na obr. 2.14a. Ohraničení struktury není provedeno pomocí nakresleného obdélníku. Je zde využito tlačítka *Line*  nebo z roletového menu *Draw* → *Draw Objects* → *Line*. Pomocí několika kliků myši nakreslíme shodné omezení. Pro jednotlivé úsečky lze definovat okrajové podmínky, čehož dále využijeme pro správné buzení. Dvoj-klikem v nakresleném obdélníku vyvoláme tabulku, kde lze přesně určit jednotlivé koncové body v celé struktuře (viz obr. 2.14b a tab. 2.2).





c)

Obr. 2.14 Návrh modelu výkonového děliče v programu Comsol Multiphysics: a) výsledná struktura, b) definice okraje modelu, c) vytvoření jednotného objektu.

Posledním doplněním je využití tlačítka *Create Composite Object*  či spuštěním z menu *Draw* → *Create Composite Object*. Periodicity budou reprezentovány měděnými válečky obdobně jako u planárního vlnovodu. Postupující vlna se strukturou bude šířit a při dopadu na hranu válečku se pohltí. Z tohoto důvodu si můžeme dovolit nahradit jednotlivé prvky modelu jediným objektem. Zmenší se tím i výpočetní nároky, protože se nebude vyhodnocovat elektrické pole uvnitř periodicit (je nulové). Využijeme-li tedy *Create Composite Object*, objeví se dialogové okno, kde v kolonce *Set Formula* sestavíme výraz, podle kterého se vytvoří výsledný objekt. Jistým usnadněním je možnost výběru pomocí nabídky *Object selection*, kde lze označit naráz více prvků (viz obr. 2.14c). Rozměry modelu výkonového děliče jsou uvedeny v přehledové tabulce tab. 2.2.

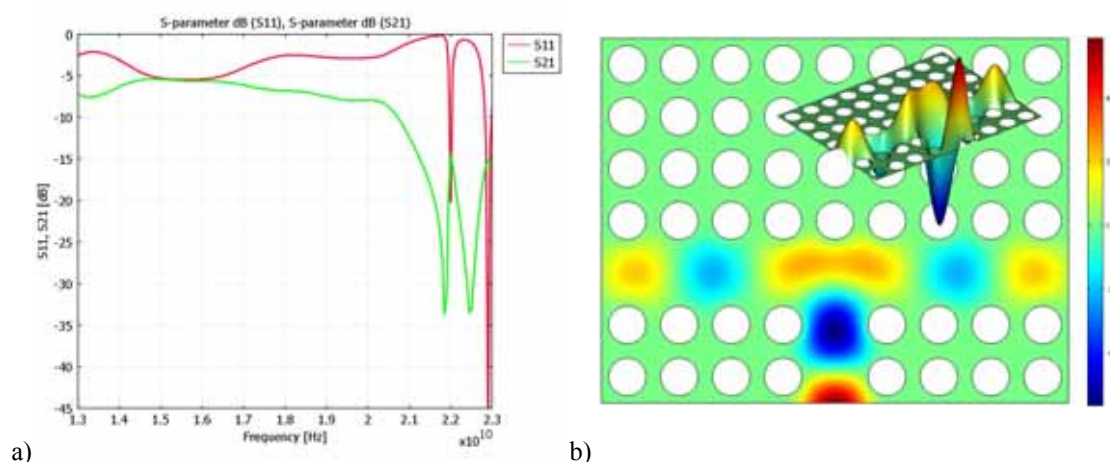
buňka	<i>poloosa A</i>	<i>poloosa B</i>	<i>pozice x</i>	<i>pozice y</i>	<i>umístění</i>
	$1,66 \cdot 10^{-3}$	$1,66 \cdot 10^{-3}$	0	0	střed
pole	<i>rozestup x</i>	<i>rozestup y</i>	<i>opakování x</i>	<i>opakování y</i>	
	$4,60 \cdot 10^{-3}$	$4,60 \cdot 10^{-3}$	9	7	
ohraničení	<i>počátek x</i>	<i>počátek y</i>	<i>konec x</i>	<i>konec y</i>	<i>číslo úsečky</i>
	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	$6,26 \cdot 10^{-3}$	1
	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	2
	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	$6,26 \cdot 10^{-3}$	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-2}$	3
	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-2}$	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	$2,99 \cdot 10^{-2}$	4
	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	$2,99 \cdot 10^{-2}$	$3,91 \cdot 10^{-2}$	$2,99 \cdot 10^{-2}$	5
	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	$2,13 \cdot 10^{-2}$	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	6
	$2,13 \cdot 10^{-2}$	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	$3,91 \cdot 10^{-2}$	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	7
	$3,91 \cdot 10^{-2}$	$-2,30 \cdot 10^{-3}$	$3,91 \cdot 10^{-2}$	$6,26 \cdot 10^{-3}$	8
	$3,91 \cdot 10^{-2}$	$6,26 \cdot 10^{-3}$	$3,91 \cdot 10^{-2}$	$1,21 \cdot 10^{-2}$	9
	$3,91 \cdot 10^{-2}$	$1,21 \cdot 10^{-2}$	$3,91 \cdot 10^{-2}$	$2,99 \cdot 10^{-2}$	10

Tab. 2.2 Rozměry dílčích částí modelu výkonového děliče.

Jakmile máme hotový návrh modelu, můžeme se zabývat nastavením okrajových podmínek a použitým typem substrátu. Postup bude opět identický s kapitolou 2.1.2. Například pomocí klávesy F8 vstoupíme do nabídky definice profilu materiálu. V levé straně okna zvolíme jedinou možnou vrstvu a na pravé straně pro ni určíme relativní permitivitu $\epsilon_r = 4,3$. Změny uložíme tlačítkem *Apply* a potvrdíme *OK*.

Klávesovou zkratkou F7 otevřeme okno s definováním okrajových podmínek. S přidržením klávesy *Ctrl* označíme v modelu děliče všechny obvodové stěny. Vynecháme pouze úseky 3, 6 a 9 z obrázku 2. 14b. Vybrané stěny definujeme jako *Scattering boundary condition* v záložce *Condition*. Totožným způsobem předefinujeme zbylé tři úseky jako *Port*. Vstupní brána modelu neboli *Port 1* se nachází na dolní straně struktury. Výstupní brány – *Port 2, 3* jsou umístěny na levé a pravé boční stěně modelu děliče. Vymezení vstupních a výstupních portů vede k přesnějším simulacím. Program Comsol Multiphysics při stanovení rozptylových parametrů počítá s celou plochou portů a na ní vyšetřuje elektrické intenzity vlny dopadající i odražené. Pokud tedy budíme celou stranu modelu, vznikají možné odrazy, které se negativně projevují na výsledcích simulací. Jedná se především o zvýšení vložného útlumu.

Po celkovém nastavení všech podmínek simulace (modelu, definici rozsahu kmitočtů, hustoty výpočtové mřížky) lze spustit samotný výpočet. Dosažené výsledky simulací rozptylových parametrů ve frekvenčním pásmu 13 GHz až 23 GHz jsou ukázány na obr. 2. 15a. Připomeňme, že se jedná o symetrický výkonový dělič a činitel přenosu S_{21} je shodný s činitelem přenosu S_{31} do brány 3. Pro názornost je předveden i 2D a 3D pohled na rozložení elektrické intenzity pole na frekvenci 15 GHz.



Obr. 2.15 Výkonový dělič: a) rozptylové parametry, b) rozložení pole na 2D a 3D modelu.

2.3.2 Návrh modelu děliče výkonu v programu Ansoft Designer SV2

Dosažené výsledky v simulačním programu Comsol Multiphysics se nám nepodařilo potvrdit v žádné dostupné literatuře. Proto jsme se rozhodli ověřit jejich správnost porovnáním s planárním návrhem mikrovlnného děliče výkonu. S pomocí literatury [15] jsme ručně takový model navrhli. Jedná se o kompenzovaný dělič, který se skládá z úseků vedení dlouhého $\lambda_g/4$, kde λ_g je délka vlny v substrátu, a platí pro ni známý vztah:

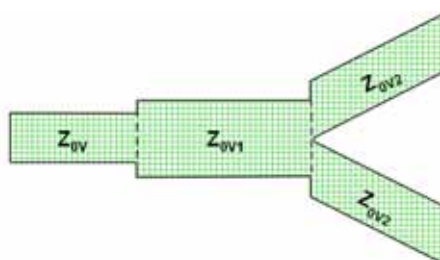
$$\lambda_g = \frac{c}{f} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (2.1)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu, f je kmitočet vlny a ϵ_r relativní permitivita substrátu. Charakteristická impedance jednotlivých mikropásků Z_{0Vx} je vypočtená ze vztahů (2.2) a (2.3) kompenzuje odrazy na přechodech vedení. Navíc první čtvrtvlnné vedení na vstupu zmenšuje impedanční skok a napomáhá zvětšení šířky pásma.

$$Z_{0V1} = \frac{1}{\sqrt[4]{2}} Z_{0V}, \quad Z_{0V2} = \sqrt[4]{2} Z_{0V}, \quad (2.2), (2.3)$$

$$R = 2Z_{0V}. \quad (2.4)$$

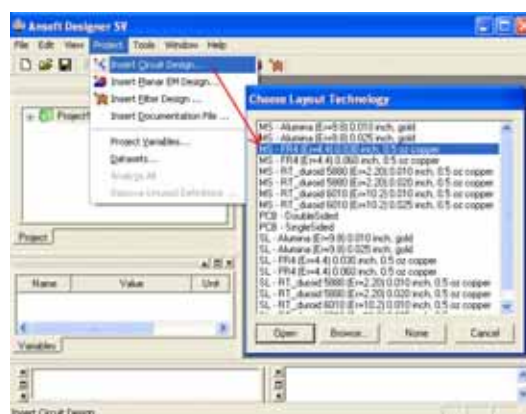
Charakteristická impedance Z_{0V} představuje impedanci vedení, které bude použito při buzení. R udává hodnotu odporu zapojeného mezi výstupy pro dosažení větší izolace mezi bránami. Signál putující z brány 2 (3) se cestou přes odpor R dostane k výstupní bráně 3 (2) a navíc se šíří přes oba úseky vedení zapojené do kaskády o délce $\lambda_g/2$. Na bráně 3 (2) se tyto signály sčítají v protifázi a celkový příspěvek je nulový. Principiální schéma navrhnutého děliče je na obrázku obr. 2. 16.



Obr. 2.16 Principiální schéma planárního děliče výkonu.

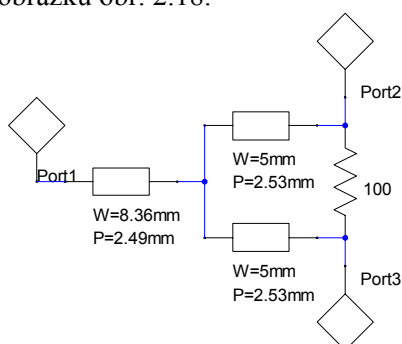
Koncepčně navrhnutý dělič výkonu nyní odsimulujeme v programu Ansoft Designer SV2. Obdržené výsledky následně porovnáme s předchozí kapitolou. Pro seznámení uvedme, že prostředí programu Ansoft Designer SV2 (studentská verze) nabízí tři základní typy analýzy. První *Circuit Design* slouží k obvodovému modelování mikrovlnných obvodů. Druhým typem je *Planar EM Design*. V tomto profilu je možné provést návrh námi nadefinované struktury. Poslední možností je *Filter Design* sloužící k simulaci různých druhů filtrů. Pro naše potřeby lze využít prvé dva typy analýzy. Avšak ze zkušeností získaných konkrétním řešením v *Planar EM Design* jsme zjistili, že studentská verze není dostačující pro navrženou strukturu a výsledky analýzy nelze získat. Z tohoto důvodu bude dostačující první typ modulu.

Po spuštění programu vybereme z nabídky hlavního menu záložku *Project* → *Insert Circuit Design*. V následujícím okně zvolíme technologii a substrát, který chceme použít. Pro vytvoření srovnatelného modelu s předchozí kapitolou vybereme mikropáskové vedení (MS) se substrátem FR4 (viz obr. 2. 17).



Obr. 2.17 Výběr typu analýzy v programu Ansoft Designer SV.

Prostředí programu Ansoft Designer je rozděleno do tří sekcí. V pravé části se nachází okno pro kreslení schémat a zobrazování charakteristik. V levé horní části je složka s naším projektem a jednotlivými záložkami. Zde si snadno můžeme přepínat mezi výsledky analýz, nastavováním parametrů či výběrem nových prvků. Poslední významné okno se nachází vlevo dole. Zobrazují se zde nastavené parametry vybraného prvku. Prvním krokem návrhu bude úprava substrátu. Rozkliknutím složky *Project* (jméno je defaultně nastaveno, dokud si projekt neuložíme), *Circuit1*, *Data* vybereme položku FR4. V novém okně vybereme položku *Edit* v části *Dielectric*. Zpřístupní se nám editace všech parametrů mikropáskového vedení. Nastavíme relativní primitivitu na hodnotu 4,3 a výšku substrátu H na 2,5 mm. Na závěr potvrdíme OK. Po správně definovaném substrátu se přepneme do záložky *Components* (záložka se nachází mezi dvěma okny na levé straně). Z nabízených prvků si vybereme nejprve knihovnu *Microstrip* → *Transmission Lines* a první položku *MS Trans. Line, Physical Length*. Kliknutím levým tlačítkem myši a přetáhnutím do pravého okna se zobrazí dialog o propojení vrstev, který potvrdíme a můžeme vložit součástku mikropáskového vedení. V našem případě vložíme tři vedení. Nyní mezi knihovnami vybereme součástky se soustředěnými parametry *Lumped* → *Resistors* a druhou položku *RES: Rezistor*. Poslední součástí schématu je port. Slouží k definování vstupních a výstupních bran. Nalezneme jej v hlavním menu *Draw* → *Interface Port*. Celkové schéma je nakreslené na obrázku obr. 2.18.

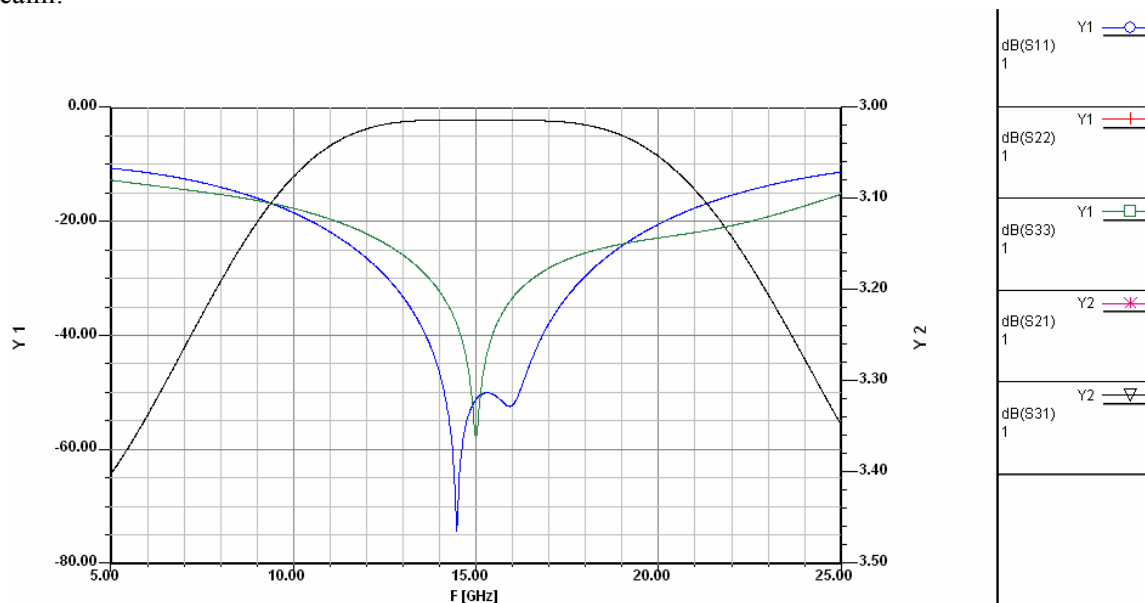


Obr. 2.18 Obvodové schéma planárního děliče výkonu v programu Ansoft Designer SV2.

Nastavení velikostí jednotlivých mikropáskových vedení provedeme v levém dolním okně pod položkou *TRL* (musíme mít označené vedení). Zobrazí se dialogové okno, kde zvolíme charakteristickou impedanci Z_0 podle vztahů (2.2) a (2.3). Dále nastavíme elektrickou délku na 90° , což odpovídá délce čtvrtvlnného vedení. Dělič budeme navrhovat pro centrální frekvenci 15 GHz a vstupní impedanci $Z_{0V} = 50 \Omega$. Spuštěním syntézy tlačítkem *Synthesi* se provedou interní výpočty. Shodným způsobem definujeme zbylé mikropáskové vedení.

V tuto chvíli je analyzovaný dělič výkonu plně zadán. Zbývá určit parametry analýzy. V levém horním okně klikneme pravým tlačítkem myši na složku *Analysis* a z nabídky vybereme položku *Add Solution Setup*. Pomocí tlačítka přidat v dialogovém oknu *Sweep Variables* nastavíme počáteční, konečnou frekvenci a krok. Analýzu spustíme výběrem položky z menu *Circuit* → *Analyze*. Posledním krokem je vykreslení výsledků. Opět z menu vybereme *Circuit* → *Create Report*. V prvním dialogu zvolíme typ grafu. V našem případě ponecháme standardní kartézský (*Rectangular Plot*). V následujícím dialogu si vybere veličiny a jednotky, v nichž má být veličina vynesena do grafu. Potvrzením *Add Trace* přeneseme vykreslované křivky do horního okna, kde lze dodefinovat případné rozložení veličin pod jednotlivé osy. Zadávání dokončíme stiskem tlačítka *Done*.

Vykreslení rozptylových parametrů mikrovlnného děliče výkonu je ukázáno na obrázku obr. 2.19. Činitelé přenosu S_{21} a S_{31} mají shodnou velikost (jedná se o symetrický dělič) a jsou zobrazeny černou čarou s hodnotami na ose Y2. Vložný útlum je těsně pod 3 dB a příliš se nemění. Činitelé odrazu pro výstupní brány S_{22} a S_{33} jsou v obrázku reprezentovány zelenou křivkou s hodnotami na ose Y1. Při centrální frekvenci dosahuje vynikajících -55 dB. Nedochází tedy k žádným odrazům. Činitel odrazu S_{11} (modrý průběh) na vstupu děliče se mírně liší, protože se jedná o jinak definovaný mikropásek. Nicméně jeho hodnota je též vynikající. Výsledky simulace jsou téměř ideální.



Obr. 2.19 Výsledky simulace mikrovlnného děliče výkonu v programu Ansoft Designer SV2.

Dosažené výsledky u děliče výkonu realizovaného EBG strukturou (viz obr. 2. 15) jsou kvalitativně horší než získané planární metodou. EBG struktura vykazuje vyšší vložný útlum: průměrná hodnota je -6,8 dB v kmitočtovém rozsahu 14 až 20 GHz při zvlnění $\pm 1,3$ dB. Na kmitočtu 15 GHz vykazuje útlum -5,4 dB. Planární metoda se jeví jako více širokopásmová s vložným útlumem -3 dB.

Parametr S_{11} se však liší podstatně. U EBG struktury je průměrná hodnota činitel odrazu ve stanoveném rozsahu rovna -4 dB se zvlněním maximálně $\pm 1,5$ dB. Na kmitočtu 15 GHz má hodnotu -5,3 dB. Dělič tedy vykazuje vyšší nepřizpůsobení než planární řešení, kde je i mimo navrhované pásmo hodnota činitele odrazu menší jak -10 dB.

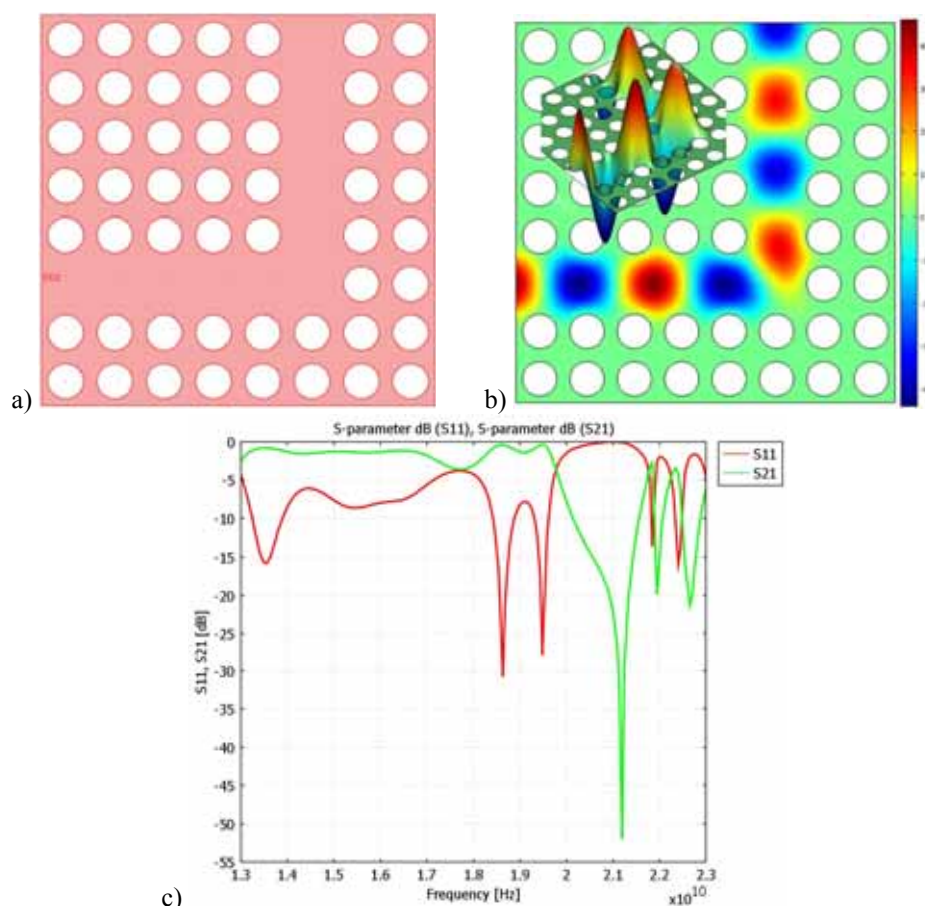
2.4 Návrh EBG struktury zahnutého vlnovodu

Třetí struktura, kterou se budeme analyzovat s pomocí programu Comsol Multiphysics, je planární zahnutý vlnovod. Jak jsme již předvedli v předchozích kapitolách, při správném definování parametrů a lineárních defektů v periodické mřížce se vstupní vlna šíří dále strukturou bez výraznějšího útlumu. Jedním z možných využití, které se nabízí, je právě konstrukce planárních vlnovodů. U klasických vlnovodů se ohyb realizuje například použitím kolen, pro která je přesně vypočten poloměr zahnutí, aby se nezpůsobovala degradace a přídavný útlum procházející vlny. V této kapitole si předvedeme, jak velký vliv má ohyb cesty na vložný útlum u dvou typů EBG struktur.

2.4.1 Návrh modelu zahnutého vlnovodu strukturou EBG

Ohyb cesty šíření pod úhlem 90°

Při návrhu planárního vlnovodu v programu Comsol Multiphysics s pracovním kmitočtem okolo 15 GHz využijeme dříve zjištěných parametrů. Ponecháme substrát s relativní permitivitou $\epsilon_r = 4,3$ (odpovídající dielektrickému materiálu FR4) i poměr mřížkové konstanty k poloměru prvku $r/a = 0,3609$. Šířka vlnovodové trasy bude odpovídat jedné vynechané řadě periodicit. Zkoumaný model je zobrazen na následujícím obrázku obr. 2. 20a. Při jeho sestavení jsme postupovali obdobně jako v kapitole 2.3.1. Struktura je buzená z levé boční stěny. Rozložení pole elektrické vlny pro navrhovaný kmitočet 15 GHz je ukázáno na obr. 2. 20b.

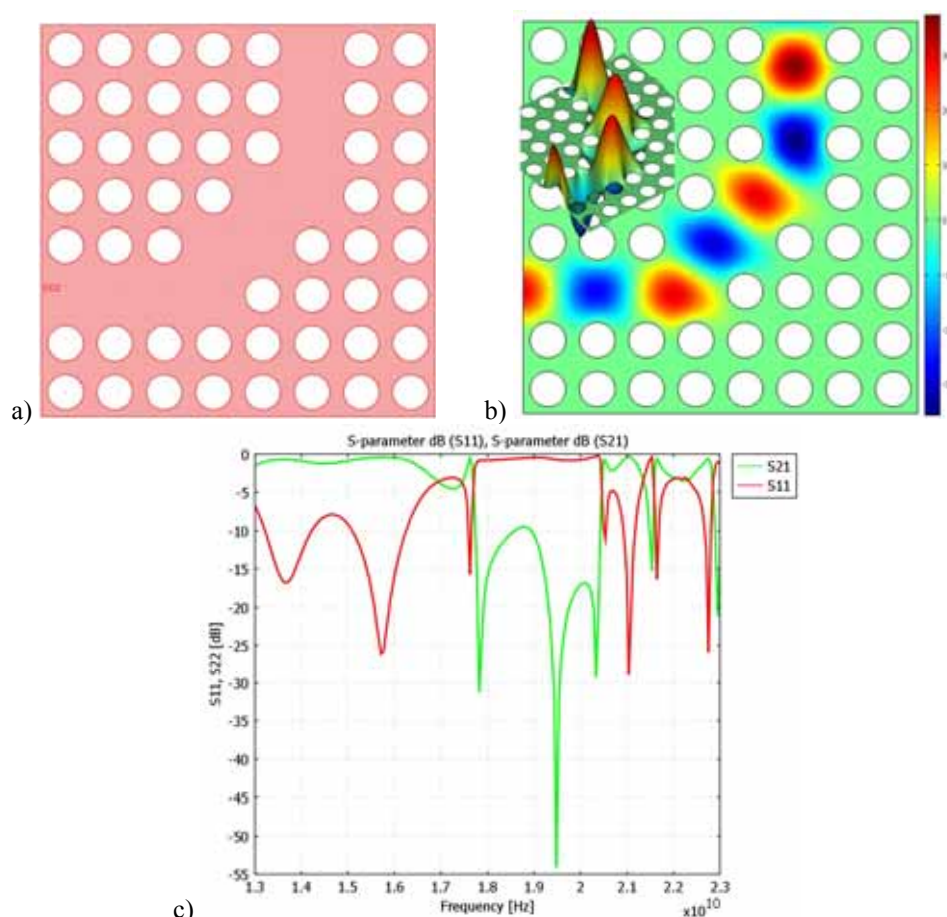


Obr. 2.20 Zahnutý vlnovod (90°) ve struktuře EBG: a) výsledný model, b) rozložení pole na 2D a 3D modelu, c) rozptylové parametry.

Z výsledků zobrazených rozptylových parametrů vidíme, že činitel přenosu S_{21} vymezuje šířku pásma 7 GHz s vložným útlumem -2 dB při zvlnění $\pm 1,5$ dB. Omezením frekvenčního rozsahu na kmitočty 14 GHz až 17 GHz je vložný útlum pouze -1,4 dB se zvlněním $\pm 0,2$ dB. Činitel odrazu S_{11} se pro toto pásmo pohybuje od -8,5 dB do -6,5 dB.

Ohyb cesty šíření pod úhlem 45°

Z důvodů objektivního porovnání ponecháme shodné všechny parametry s kolmým ohybem. Jedinou změnou oproti předchozímu řešení bude nahrazení kolmého zlomu cesty úsekem pod úhlem 45° (periodická mřížka ani jiný typ úkosu nedovoluje). Postupný lom cesty by se měl chovat šetrněji k šířící se vlně a umožňovat jí snazší průchod strukturou bez velkých odrazů. Musíme ale mít na paměti, že se jedná o periodickou strukturu a jednotlivé stěny nejsou homogenní (celistvé). Při ohybu cesty bude vlna elektrického pole kopírovat její směr, avšak při dostatečné mezeře mezi periodicitami bude mít vlna tendenci šířit se i do substrátu. Přitom dochází k nechtěným odrazům a interferencím, a to se negativně projeví na zlepšeném průchodu EBG strukturou. V následujícím obrázku obr. 2. 21 je zobrazen model struktury společně s rozložením pole pro kmitočet 15 GHz a rozptylovými parametry.



Obr. 2.21 Zahnutý vlnovod (45°) ve struktuře EBG: a) výsledný model, b) rozložení pole na 2D a 3D modelu, c) rozptylové parametry.

Postupný lom přináší podle dosažených výsledků menší šířku pásma, pouze 3,5 GHz. Pro vyšší kmitočty vznikají v ohybu destruktivní interference vln a energie postupující vlny klesá. V propustném pásmu 13 GHz až 16,5 GHz je průměrná hodnota činitele přenosu S_{21} -0,9 dB se zvlněním maximálně $\pm 0,5$ dB. Hodnota činitele odrazu S_{11} je nižší než -7 dB.

2.4.2 Návrh planárního modelu zahnutého vlnovodu

Srovnání modelu EBG struktury z předchozí kapitoly provedeme s dvourozměrným modelem klasického vlnovodu. V programu Comsol Multiphysics je mezi ukázkovými tutoriály obdobný případ. Ohnutí je však provedeno plynule pod určitým rádiusem (v EBG struktuře jej nelze realizovat pro malé poloměry ohybu). S ohledem na naši EBG strukturu si model upravíme dle potřeby, aby se co nejvíce odpovídal předešlému řešení.

V programu Comsol Multiphysics si klasicky spustíme simulaci rovinných, příčně elektrických vln a následně harmonické šíření. Abychom dodrželi podmínky shodné s EBG strukturou, šířka

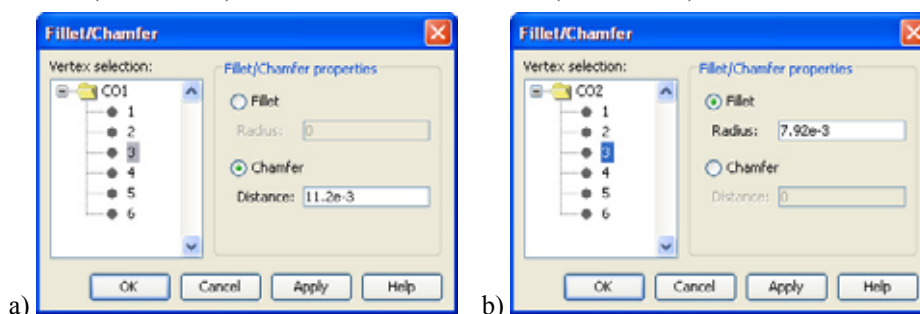
vlnovodu bude odpovídat šíří vzniklého defektu (průměr periodicity plus dvakrát vzdálenost $[a - 2r]$). Délka odpovídá šesti opakovaním periody. Při zkoseném rohu jsou jednotlivé úseky shodně rozděleny a odpovídají třem periodám v mřížce. Pro úplnost je doplněn i ohyb zaoblením s rádiusem $R \sim 2a$.

Sestavení prvního modelu na obr. 2. 23a se nejrychleji provede za pomoci nakreslení dvou obdélníků a následným vytvořením kompozitního objektu (sloučením). Při slučování je zbytečné ponechávat vnitřní hranice struktur, proto odškrtneme možnost *Keep interior boundaries*. Přesné rozměry jsou uvedeny v tab. 2. 3. Relativní permitivita vlnovodu bude totožná s předchozí ($\epsilon_r = 4,3$). Změna nastane při definování okrajových podmínek. Podélné stěny budou tvořeny z dokonalého elektrického vodiče (*Perfect electric conductor*).

obdélník 1	šířka	výška	pozice x	pozice y	umístění
	$2,76 \cdot 10^{-2}$	$5,88 \cdot 10^{-3}$	0	0	roh
obdélník 2	šířka	výška	pozice x	pozice y	umístění
	$5,88 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$21,72 \cdot 10^{-3}$	$5,88 \cdot 10^{-3}$	roh

Tab. 2.3 Rozměry prvního modelu planárního vlnovodu.

Při návrhu druhého modelu na obr. 2. 23b postupujeme shodným způsobem jako u prvního. Po vytvoření kompozitního objektu si dvoj-klikem vyvoláme tabulku s jednotlivými úseky. Pro využití funkce zkosení či zaoblení je podstatné, aby upravovaná hrana byla jednotná. V našem případě se jedná o pravou svislou stěnu, která se skládá z úseku 6 a 7. Nejjednodušší varianta je jednu úsečku vymazat a u zbývajících předdefinovat koncový bod. Poté v programu vybereme *Fillet / Chamfer* roletového menu *Draw* nebo pomocí ikony . Zde vybereme vrcholový bod rohu, který chceme nahradit zkosením (obr. 2. 22a) nebo zaoblením rádiusem (obr. 2. 22b).

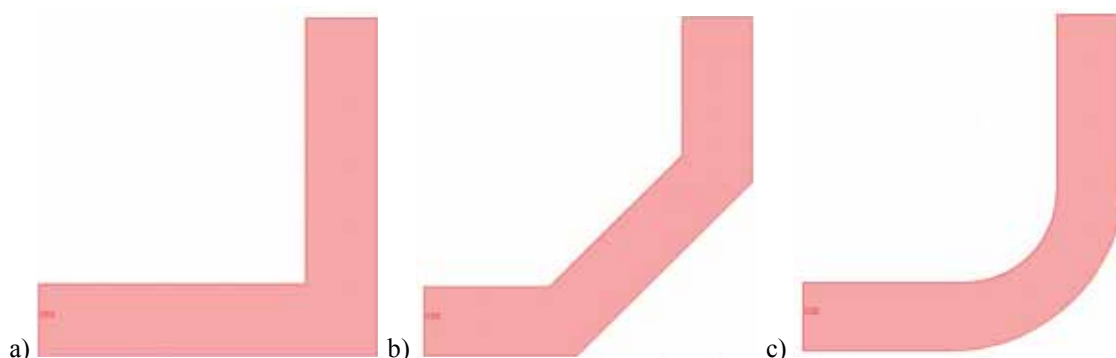


Obr. 2.22 Definice zkosení a zaoblení pro druhý a třetí model.

Třetí model se od druhého liší právě ve způsobu zkosení. Postup je identický s předchozím. Jednotlivé velikosti zkosených a zaoblených hran jsou uvedeny v následující přehledové tabulce tab. 2. 4. Podotkněme, že nejprve je nutné upravovat horní stěnu modelu, jinak může dojít k překřížení čar a program ohlásí chybovou hlášku.

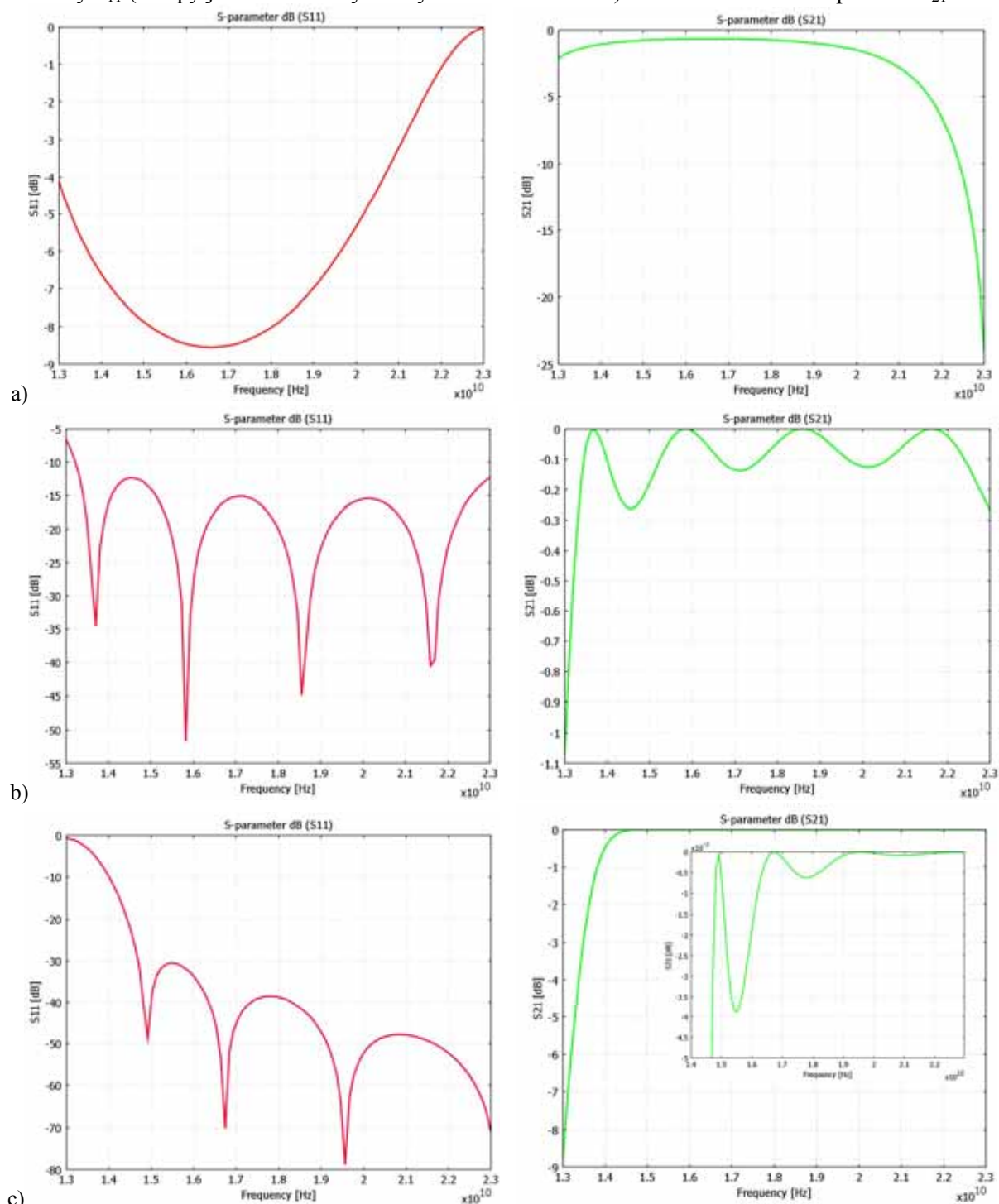
úkos	horní úkos	spodní úkos
	$11,20 \cdot 10^{-3}$	$14,82 \cdot 10^{-3}$
rádius	horní rádius	spodní rádius
	$7,92 \cdot 10^{-3}$	$15,08 \cdot 10^{-2}$

Tab. 2.4 Rozměry zkosení a rádius pro druhý a třetí model.



Obr. 2.23 Modely planárních vlnovodů.

Na dalších obrázcích můžeme porovnat výsledné rozptylové parametry jednotlivých modelů. Pro jejich značnou rozdílnost v hodnotách jsou zobrazeny samostatně činitele odrazu na vstupu struktury S_{11} (vstupy jsou definovány v levých bočních stěnách) a samostatně činitele přenosu S_{21} .



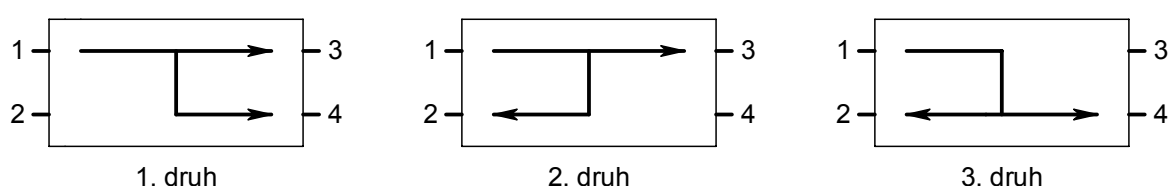
Obr. 2.24 Rozptylové parametry modelu: a) kolmý, b) zkosený, c) zaoblený.

Z charakteristik činitele přenosu S_{21} je patrné, že s pozvolnějším přechodem vložný útlum klesá. U kolmého přechodu je šířka pásma 8 GHz bez zvlnění. Vložný útlum na střední frekvenci je -0,7 dB. Postupné přechody vykazují vyšší kritický kmitočet, avšak vložný útlum je minimální a u zaobleného přechodu dokonce zanedbatelný. Těmto poznatkům odpovídají činitele odrazu S_{11} . U kvalitního přenosu energie vlny nastává minimální odraz.

2.5 Návrh EBG struktury směrové odbočnice

Ve vysokofrekvenční a mikrovlnné technice se často požaduje odbočení nebo sloučení části mikrovlnného výkonu. Přitom se vyžaduje, aby odbočení výkonu nevznášelo přídavné odrazy či velký vložný útlum. Strukturám splňujícím tyto kritéria se říká směrové vazební členy. Dle přenášeného výkonu a konstrukčního uspořádání se rozlišují různé typy odbočnic. Pro malé výkony se v mikrovlnné oblasti hojně využívají planární směrové odbočnice. Jejich podoba je různá, často se vyskytují čtvercové, kruhové, interdigitální nebo mikropáskové, využívající například vázaných mikropáskových vedení a další. Jednotlivé typy se liší kromě tvaru i vazebním útlumem a šířkou pásma. Z hlediska způsobu dosažení směrových vlastností lze odbočnice též rozdělit na dvě skupiny. První je realizována jediným vazebním otvorem ve vlnovodu. Druhá skupina směrových vlastností dosahuje skládáním vzájemně fázově posunutých vln [16].

Směrové vazební členy, jakožto čtyřbrany, mohou vykazovat tři typy směrovosti. Každý druh směrovosti má svoji charakteristickou rozptylovou matici, která definuje jeho vlastnosti. Na obrázku obr. 2. 25 jsou směry postupujících výkonů pro jednotlivé typy směrovosti.



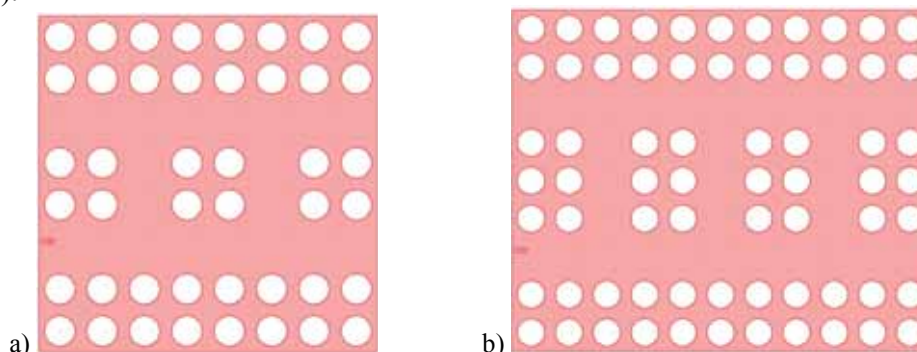
Obr. 2.25 Typy směrovosti vazebních členů [15].

Pro úplnost uvedme, že základní technické parametry jako vložný útlum, vazební útlum, izolace, směrovost a zpětný útlum jsou uvedeny v literatuře [15] nebo [16].

2.5.1 EBG model v programu Comsol Multiphysics

Námi navržený model EBG struktury bude vycházet z vlastností druhé skupiny vazebních členů. Pokusíme se vytvořit čtvercovou odbočnici s vhodnou délkou struktury pro zachování požadovaných vlastností a se směrovostí prvního druhu. Konkrétní vztahy pro návrh struktury s využitím EBG neexistují a postup bude čistě empirický.

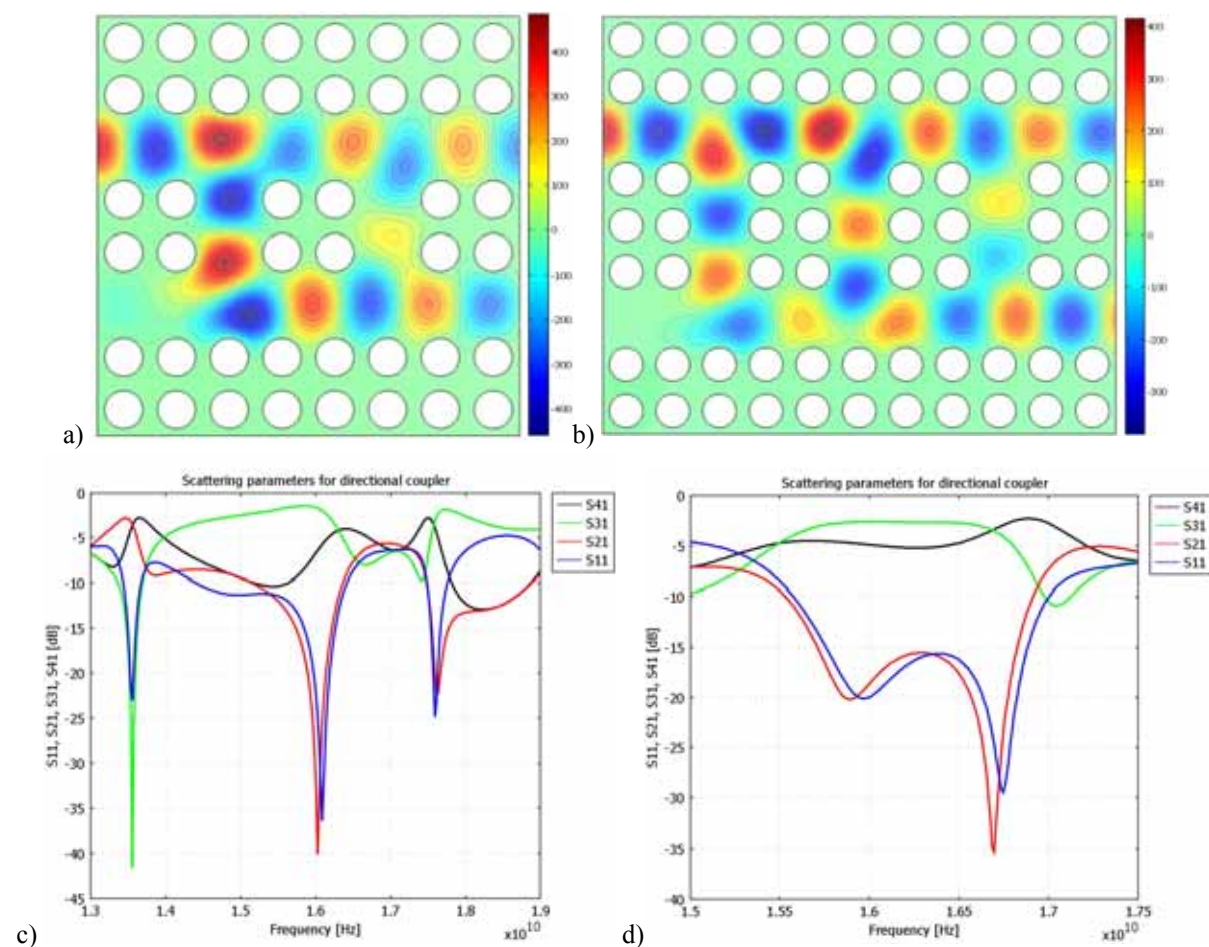
Základním rozměrem je délka odpovídající čtvrtvlnnému vedení. Pomocí vztahu (2.1) si vypočteme, čemu se rovná délka vlny v našem substrátu. Pro kmitočet 17 GHz je délka vlny 8,5 mm. Čtvrtvlnné vedení mající délku cca 2,13 mm nelze realizovat pomocí dosud navržených EBG struktur. Chceme-li strukturu zachovat, musíme počítat s lichým násobkem této délky. První přípustný násobek je $3/4 \lambda_g$. Tomu odpovídá vzdálenost třetí řady periodicit. Struktura takto navržená je na obr. 2. 26a. Pro snížení vazebního útlumu a zvětšení šířky pásma se využívá v mikrovlnných odbočnicích znásobení vazebních otvorů. Tohoto poznatku jsme využili při konstrukci druhé struktury (obr. 2. 26b).



Obr. 2.26 Model směrové odbočnice: a) základní, b) upravený.

Při simulování modelů v širokém frekvenčním rozsahu jsme zjistili, že se vyskytují oblasti s téměř identickými vlastnostmi. Rozhodli jsme se pro vykreslení pásma s nejlepšími výsledky. Ona shodnost je dána násobností čtvrtvlnné délky vlny. Při poměru $3/4 \lambda_g$ i $5/4 \lambda_g$ se vlna dokáže šířit

strukturou. Pro kmitočty, kterým délka vlny odpovídá délce k místu defektu, pak vykazují požadované směrové vlastnosti. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny rozptylové parametry pro jednotlivé brány. Porty obou modelů jsou značeny ve shodě s obr. 2. 25.



Obr. 2.27 Směrová odbočnice: a) rozložení pole u základního modelu pro $f = 17,6$ GHz, b) rozložení pole u modifikovaného modelu pro $f = 16,7$ GHz, c) rozptylové parametry základního modelu, d) rozptylové parametry modifikovaného modelu.

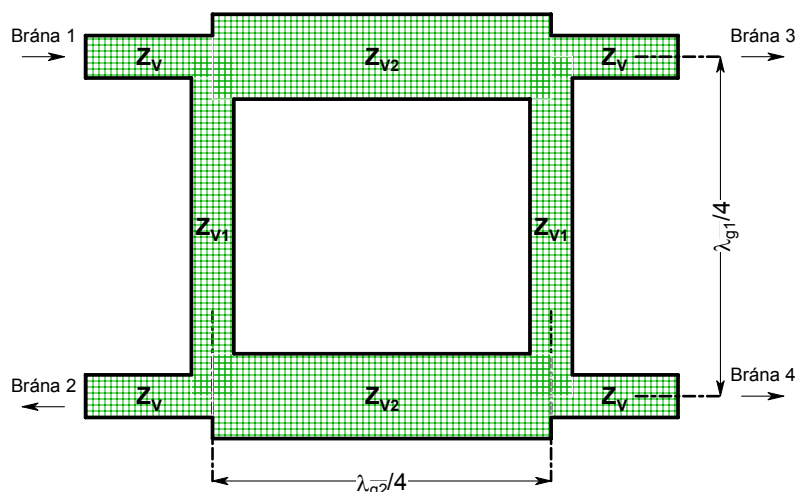
Rozptylové parametry pro základní model krásně ukazují, při jakých kmitočtech lze EBG strukturu použít jako vazební člen. Na kmitočtu 17,6 GHz lze využít úzkého pásma. Odbočená energie vlny se rozdělí ve shodném poměru mezi brány 3 a 4. Okolo kmitočtu 16 GHz dosazujeme nízkého vložného útlumu a výborné směrovosti i zpětného útlumu. Oproti tomu kmitočet 13,5 GHz vykazuje dobré výsledky pro vazební člen se směrovostí 2. druhu.

U modifikovaného modelu jsme díky jedné přidané vazební cestě docílili vyrovnanějšího průběhu pro parametry činitelů přenosu do bran 3 a 4. Zejména se snížil vazební útlum. Vazební cesta pro odbočování energie byla navíc o jednu periodu rozšířena. Dochází tak k lepšímu vedení vlny.

Nyní navrhnutý model směrové odbočnice porovnáme s klasickým planárním řešením používaným v mikrovlnné technice.

2.5.2 Návrh modelu směrové odbočnice v programu Ansoft Designer SV2

Pro návrh odbočnice využijeme literatury [15] a provedeme ruční návrh, který nám pomůže objasnit problematiku a usplňovat návrh v programu. Vycházet budeme opět z mikropáskového vedení nakresleného na obrázku obr. 2. 28. Délku mikropásku zvolíme $\lambda_g/4$ a směrových vlastností dosáhneme skládáním vzájemně fázově posunutých vln. Při buzení vstupu (brána 1) se bude energie šířit do výstupní brány 3 přes čtvrtvlnný úsek vedení. Do brány 4 se vlna dostane přes úsek vedení délky $\lambda_g/2$. Výstupní brána 2 je buzena jednak přes úsek $\lambda_g/4$, a též přes úsek $3/4\lambda_g$. Vlny se tedy sčítají v protifázi a buzení brány je minimální.

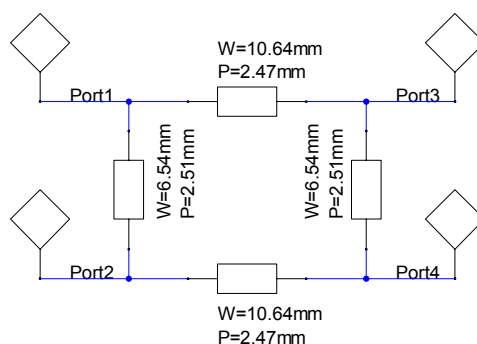


Obr. 2.28 Principiální schéma příčkové směrové odbočnice.

Návrhové vztahy dvouprůřkových vazebních členů pro impedanci mikropáskových vedení s 3 dB vazebním útlumem jsou převzaty z [15].

$$Z_{v1} = Z_v, \quad Z_{v2} = \frac{Z_v}{\sqrt{2}}. \quad (2.5)$$

V programu Ansoft Designer SV2 si po otevření nové projektu v obvodovém návrhu opětně zvolíme mikropáskové vedení MS se substrátem FR4. V dalších krocích postupujeme zcela shodně s návrhem v kapitole 2.3.2. Střední kmitočet, pro který budeme odbočnici navrhovat, si stanovíme 15 GHz. Výsledné schéma je na obrázku obr. 2. 29. Impedanci Z_{v1} je shodná s uvažovanou vstupní impedancí vedení a je rovna 50 Ω . Ze vztahu (2.5) plyne, že impedance druhého vedení Z_{v2} je rovna 35 Ω . Označení vstup/výstupních portů je ve shodě s literaturou i předchozím řešením.



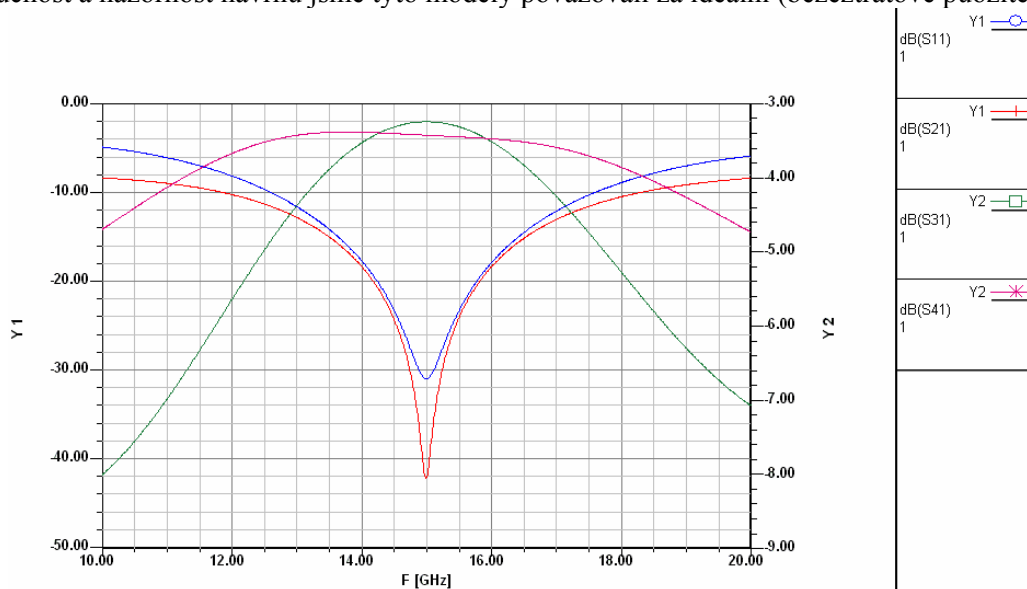
Obr. 2.29 Obvodové schéma směrové odbočnice v programu Ansoft Designer SV2.

Nastavení analýzy i vykreslení charakteristik proběhne stejným způsobem dle kapitoly 2.3.2. Výsledky zobrazuje obrázek obr. 2. 30. Na ose Y1 je vykreslen činitel odrazu S_{11} (zelený průběh) a činitel přenosu do druhé brány S_{21} (červený průběh). Na ose Y2 jsou vyneseny činitelé přenosu S_{31} na výstupní bránu 3 (zelený průběh) a S_{41} na odbočený výstup 4 (fialový průběh).

Charakteristické průběhy jsou bezmála ideální. Odrazy vln na vstupu odbočnice pro navrhovaný kmitočet dosahují hodnoty -31 dB. Odpovídající poměr stojatých vln, vypočtený vztahem (2.6) z [17], je roven 1,06 (ideální případ je $\sigma = 1$). Izolace druhé brány dosahuje též bravurní hodnoty -42 dB.

$$\sigma = PSV = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|}. \quad (2.6)$$

Tyto ideální hodnoty jsou z velké míry pouze teoretické a při realizaci by došlo ke zhoršení parametrů. Projevily by se parazitní vlastnosti prvků či ztráty v dielektrickém materiálu. Pro jednoduchost a názornost návrhu jsme tyto modely považovali za ideální (bezeztrátové puožité prvky).



Obr. 2.30 Výsledky simulace směrové odbočnice v programu Ansoft Designer SV2.

2.6 Shrnutí druhé kapitoly

Druhá kapitola pojednává o návrhu modelů známých planárních obvodů řešených na základě EBG materiálů v programu Comsol Multiphysics. Po důkladně provedeném popisu postupu návrhu jednoduché struktury planárního vlnovodu navazuje analýza parametrů s cílem objasnit vlivy jednotlivých parametrů na celkové chování struktury. S využitím získaných poznatků byly dále navrženy obvody děliče výkonu, zahnutého vlnovodu a směrového vazebního členu. Každý z modelů byl doplněn simulacemi v klasickém mikrovlnném řešení pro možnost srovnání výsledků.

3 GLOBÁLNÍ OPTIMALIZACE

V třetí kapitole se budeme zabývat optimalizací první zkoumané struktury - EBG vlnovodu. Jedná se o nejjednodušší model ze zkoumaných obvodů, vhodný jak pro optimalizaci, tak pro případnou realizaci na ověření simulovaných vlastností. Ostatní zkoumané obvody je možné též optimalizovat pomocí níže uvedených algoritmů, pouze by se změnila část kódu s kritériální funkcí a okrajové podmínky.

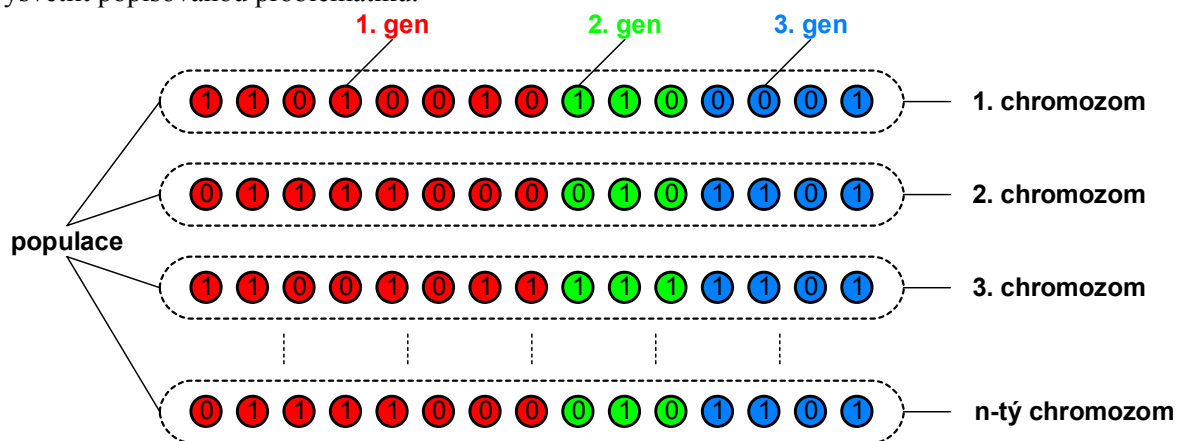
3.1 Metoda genetických algoritmů

Genetické algoritmy patří mezi stochastické optimalizační metody a spadají do oblasti metod kombinatorické optimalizace zvané evoluční algoritmy [18]. Jde o heuristický postup, který se snaží aplikováním evolučních procesů nalézt řešení složitých problémů, pro které neexistuje exaktní algoritmus. Jinými slovy jejich charakteristickým rysem je, že způsob, kterým se metoda přibližuje k hledanému optimu, je inspirován přirozeným výběrem ve vývoji biologických druhů, v případě genetických algoritmů potom speciálně mutacemi a křížením chromozomů. Vzhledem k této biologické inspiraci je princip genetických algoritmů snadno srozumitelný i nematematickům, a právě díky tomu se v průběhu posledních pár let velmi rychle rozšířilo jejich používání při řešení optimalizačních úloh.

Genetické algoritmy ne vždy najdou přesně matematicky definované optimum dané úlohy (dosažení maxima či minima funkce). Zato jsou schopny vyhledat velmi blízké řešení v celém oboru možných stavů a to i u funkcí, u kterých zpočátku nedokážeme říci, jak se na dané množině chová, zda-li je spojitá či má v daném bodě gradient.

3.1.1 Princip metody GA

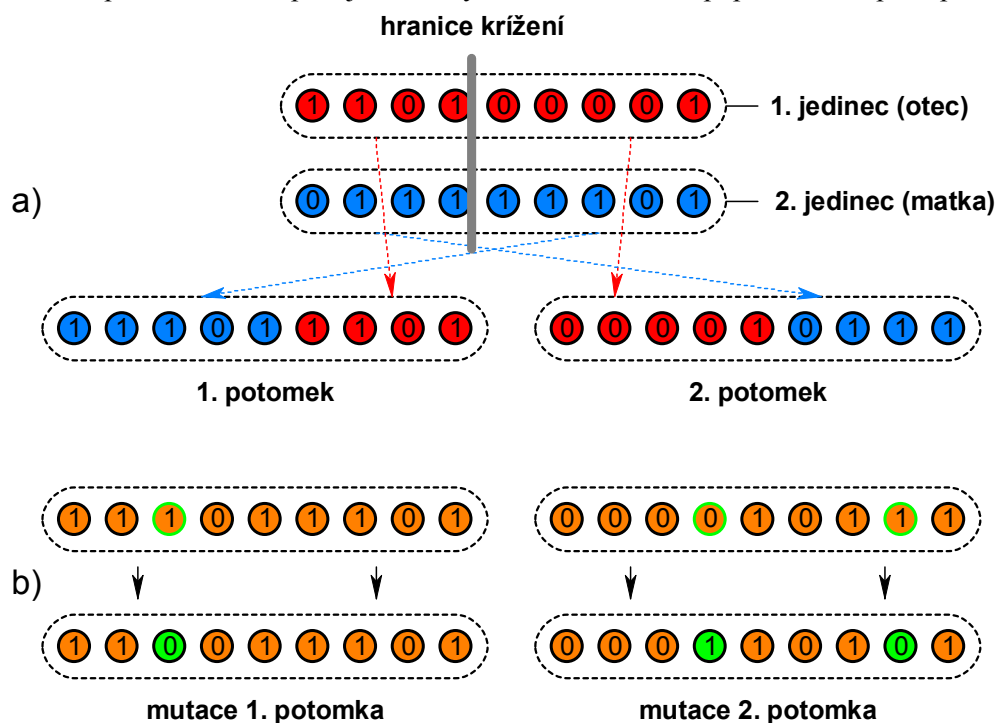
Metoda genetických algoritmů nepracuje přímo se stavovými parametry, ale s tzv. chromozomy. Jedná se o zakódované hodnoty stavových parametrů (genů), nejčastěji vyjádřené binárním kódem (možná reprezentace i pomocí stromu, pole, matice...). Počet bitů binárního kódu následně odpovídá počtu úrovní jednotlivých parametrů. Chromozom de facto představuje jedno konkrétní řešení optimalizační úlohy, i když třeba nedokonalé. Následující obrázek obr. 3. 1 pomáhá vysvětlit popisovanou problematiku.



Obr. 3.1 Popis jedné generace u genetického algoritmu.

Množina chromozomů tvoří tzv. populaci. První populace je nejčastěji náhodně generována a její velikost udává počet jedinců (chromozomů). Velikost populace se většinou nemění, ale v přechodu do nové generace se obměňují jednotliví jedinci. Modifikace spočívá v tzv. mutaci nebo křížení. Křížením rozumíme výběr dvou chromozomů (otce a matky), ze kterých se vytvoří jeden či více nových jedinců (potomků), viz obr. 3.2a. Část genetické informace dostanou z chromozomu matky a

zbytek doplní geny otce. Jako nejvhodnější křížení se ukázalo při náhodném výběru místa spojení a následné překřížení jednotlivých částí (genů). U takto vzniklých jedinců (potomků) lze s určitou pravděpodobností aplikovat následnou mutaci. Jde o náhodnou genetickou změnu právě vytvořeného potomka, viz obr. 3. 2b. Mutace se využívá v algoritmu proto, aby řešení neuvázlo v lokálním optimu. Jen připomeňme, že křížení i mutaci chromozomů lze měnit v libovolném rozsahu 0 až 100% (tedy od identické nové populace při 0% křížení a 0% mutaci až po stav, kdy každý nový jedinec bude stvořen pomocí křížení -100% a zároveň bude pozměněn mutací -100%). Tímto způsobem tedy vzniká nová populace. Postup se iterativně opakuje, čímž by se kvalita řešení v populaci měla postupně vylepšovat.



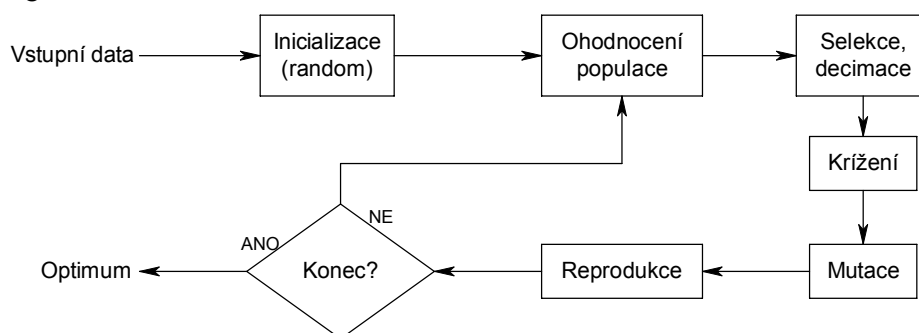
Obr. 3.2 Příklad křížení a mutace u genetického algoritmu.

Aby se populace zlepšovala, je nutné mezi přechody do nové generace jednotlivé jedince ohodnotit. Z toho vyplývá, že hodnocení má velký vliv na to, které chromozomy zůstanou v populaci. Určování kvality jedinců lze provést několika způsoby. Nejjednodušší ohodnocení spočívá v seřazení jedinců podle velikosti kritériální funkce. Vhodnější část populace se ponechá a horší se zruší (decimuje).

Decimace populace se dá provést opět několika způsoby. Například uvedme metody jako ruletové kolo, rozřídění nejlepších, Elitismus, ...[19].

3.1.2 Vývojový diagram GA

Postup řešení výpočtu optimalizačního programu lze zjednodušeně popsat následujícím blokovým diagramem.



Obr. 3.3 Vývojový diagram genetického algoritmu.

Inicializace

Jedná se o počáteční nastavení vektorů reprezentující dané jedince. Ve většině případů se nastavení provádí generováním náhodných hodnot.

Ohodnocení populace

Jde o výpočet kvality jedince. Binární reprezentace genů se zpět převede do dekadické podoby a ohodnotí se například za pomoci kritériální funkce.

Selekce

Přenesení jedinců do nové populace podle kvality. Poté se horší část odebere a nahradí novými potomky.

Křížení

Vzniká ze dvou nebo více zvolených jedinců nový jedinec (potomek). Vlastnosti potomka vzniknou kombinací vlastností rodičů.

Mutace

Jde o náhodnou změnu genů u vybraných potomků. Napomáhá zabránění ustálení algoritmu v lokálním extrému.

Reprodukce

Promítnutí výsledků křížení do nové generace, tedy přidání potomků do populace.

3.1.3 Výhody a nevýhody GA

Mezi výhodné vlastnosti genetických algoritmů patří jejich odolnost vůči sklouznutí do lokálního optima, ani nevyžadují žádné speciální znalosti o cílové funkci. Vykazují velmi dobré výsledky u problémů s rozsáhlými množinami přípustných řešení a mohou být použity pro nejrozmanitější optimalizační problémy.

Hlavní nevýhody genetických algoritmů jsou především: problematické nalezení přesného optima, požadavek na velké množství vyhodnocování cílové funkce (delší doba výpočtu) a nepřímocnost implementace [20].

3.2 Aplikace genetických algoritmů v programu Matlab

Jak jsme uvedli na začátku kapitoly, vybranou strukturou pro optimalizování bude EBG vlnovod, podrobně popsany v kapitole 2. Vlnovod jsme optimalizovali z hlediska rozptylových parametrů, především činitele odrazu na vstupu vlnovodu S_{11} a činitele přenosu ze vstupu na výstup S_{21} . Od struktury byly požadovány následující vlastnosti:

- minimální vložený útlum ($S_{21} = 0$ dB),
- minimální činitel odrazu na vstupu ($S_{11} < -15$ dB),
- širokopásmovost¹.

Optimalizační proces měl za úkol minimalizovat kritériální funkci popisující odchylky rozptylových parametrů vypočtených pomocnou funkcí WG od parametrů požadovaných v zadaném kmitočtovém rozsahu. Jednotlivé optimalizované varianty se vzájemně lišily průměrem děr (periodicit) a též vzájemnou vzdáleností. Z kapitoly 2.2.3 víme, že se jedná o významný parametr r/a ovlivňující vlastnosti a chování celé struktury.

¹ Šířka propustného pásma EBG vlnovodu se volila při spouštění samotného optimalizačního skriptu, viz dále.

Před popisem vlastního skriptu řešícího optimalizační proces metodou genetického algoritmu si nejprve popíšeme pomocnou výpočetní funkci WG , kterou využívá kritériální funkce.

3.2.1 Pomocná výpočetní funkce rozptylových parametrů

Označení WG nemá hlubšího významu a je to pouze zkratka anglického slova waveguide. Jak již bylo zmíněno výše, funkce slouží pro výpočet přesných hodnot rozptylových parametrů EBG vlnovodu na stanovených frekvencích. Aby funkce přesně popisovala simulovaný obvod, máme na výběr dvě možnosti.

Zprvė vytvoříme složitý skript popisující matematické chování a rozložení elektrické vlny v zadaném obvodu. Za cenu značné složitosti (přesahující rámec této práce) získáme skript s výpočtem poměrně přesné hodnoty rozptylových parametrů a mírně nižším výpočetním nárokem na procesor než u druhého způsobu řešení.

Druhou možností je využití exportování dat z programu Comsol Multiphysics, kde si zmíněný vlnovod nakreslíme (viz kapitola 2) a po proběhnutí analýzy uložíme přes volbu *File* → *Save as*. Avšak nutností je změna přípony na *.m* odpovídající skriptu programu Matlab. Touto cestou jsme schopni z vytvořeného skriptu dodatečným upravením vyextrahovat potřebné hodnoty. Důležité je si uvědomit, že strojově vytvořený skript obsahuje i části kódu, které jsou pro samotný výpočet rozptylových parametrů nepotřebné a nadbytečné. V důsledku toho narůstá výpočetní čas pro jednotlivá řešení. Pro náš případ není rozhodující výpočetní náročnost metody na procesor a můžeme druhou variantu dále aplikovat v řešení.

Úpravy vygenerovaného skriptu

Při řešení popisovaného problému jsme zjistili, že program Comsol Multiphysics si „pamatuje“ různé provedené úpravy během kreslení (vlození nového objektu, smazání objektu, posun,...) a vše zobrazí ve vygenerovaném skriptu. Při spuštění takového skriptu by se postupně (řádkově) provedly zadané operace a ve finálním stádiu by se správně zobrazil i výsledek. Časový interval výpočtu se ale zbytečně prodlouží (například se nadbytečně alokují místa v paměti pro neexistující prvky struktury). Z těchto důvodů je vhodné si otevřít v programu Comsol Multiphysics nový soubor a zde nakreslit a analyzovat vybranou strukturu s minimem oprav. Dosáhneme tím jednoduchosti generovaného skriptu.

Následné korekce nově vytvořeného skriptu jsou zřejmé. Musíme jej předefinovat na funkci, která při zvolených vstupních parametrech (kmitočet, poloměr periodicity a vzdálenost periodicity) bude vracet odpovídající výstupní rozptylové parametry (činitel odrazu na vstupu S_{11} a činitel přenosu S_{21}). Doposud vytvořený skript pouze zobrazí průběh rozložení elektrického pole na simulovaném obvodu. Aby námi vytvořená funkce počítala rozptylové parametry pro zadané vstupní parametry, musíme z fixně daných hodnot všech rozměrů vytvořit proměnné, definované vstupními parametry funkce. Pro názornější pochopení je zde uvedena část zdrojového kódu:

```
% Geometry
g2=ellip2(r,r,'base','center','pos',{ '0','0' }, 'rot','0');
garr=geomarrayr(g2,a,a,22,6);
g136=rect2(22*a,6*a,'base','corner','pos',{ -a/2,-a/2 }, 'rot','0');
```

První řádek pouze uvozuje význam zbylé části kódu. Pro pochopení nás nyní nezajímají významy jednotlivých funkcí *ellip2*, *geomarrayr*, *rect2*, ale povšimněme si jen jejich vstupních parametrů. Na místa číselných hodnot jsme dosadili naše nové proměnné r , a , případně odpovídající výrazy. V obdobném duchu byly vyhledány a nahrazeny údaje o kmitočtovém rozsahu v části *Solve problem*.

```
% Solve problem
fem.sol=femstatic(fem, ...
    'solcomp',{ 'Ez' }, ...
    'outcomp',{ 'Ez' }, ...
    'pname','freq', ...
    'plist',[ linspace(fmin,fmax,fnum) ], ...
    'oldcomp',{ });
```

Výše popsanými postupy jsme definovali vstupní parametry pomocné funkce. Výstupní hodnoty (rozptylové parametry) skript již automaticky počítá. Úkolem je pouze „odhalit“ příslušnou vnitřní funkci a její proměnné, ve které se požadovaná data nacházejí. Postupným krokováním skriptu a následným vnořením do jednotlivých vnitřních funkcí skriptu jsme zjistili, že rozptylové parametry jsou kompaktně uloženy v matici *pline*. Tato matice slouží jako jeden z parametrů pro vykreslovací funkci *postcrossplot*. Nadefinováním matice jako globální proměnné jsme zpřístupnili rozptylové parametry pro celý skript (ne jen pro vnitřní funkci *postcrossplot*). Posledním úkolem byl pouze přesný výpis dat a uložení modifikovaného skriptu jako funkce. Hlavička funkce je pro ukázkou uvedena zde:

```
function [out_S11, out_S21] = WG(fmin, fmax, fnum, r, a)
```

3.2.2 Vlastní řešení genetického algoritmu

Vytvořený program pro optimalizační výpočet je složen z několika skriptů (z důvodů přehlednosti). Hlavní částí je skript nazvaný *optim_GA*. Je tvořený jako funkce, kde při zadání vstupních parametrů nalezne optimální rozložení periodicit a velikosti struktury. Vstupní parametry jsou:

```
function x = optim_GA( G, I, pc, pm, fmin, fmax, fnum)
```

- počet generací G ,
- počet jedinců I ,
- pravděpodobnost křížení p_c ,
- pravděpodobnost mutace p_m ,
- minimální optimalizovaný kmitočet $f_{\min}$,
- maximální optimalizovaný kmitočet $f_{\max}$,
- počet zkoumaných kmitočtů v daném rozsahu f_{num} .

Program po zadání výše uvedených údajů nejprve utvoří vektor odpovídající délce jednoho chromozomu a následně za pomoci tohoto vektoru zhotoví matici, která obsahuje data o první náhodně vygenerované generaci.

U dalších generací se postupuje v cyklu. Pro jednotlivé generace se na začátku provede převod binárních chromozomů na racionální hodnoty odpovídající parametrům r a a . Převodní funkce je nazvána *decode* a zde je uvedena část jejího kódu:

```
function X = decode( bit, gen, I)
pos(1) = bit(1);
pos(2) = pos(1) + bit(2);
X(:,1) = (5.0 + 25.0 * weig(1, pos(1), 1, gen, bit))*1e-4;
X(:,2) = 2.25*(X(:,1)) + 0.01 * weig(pos(1)+1, pos(2), 2, gen, bit);
for n=1:I
    if X(n, 2) < 5.5*1e-3, X(n, 2) = 5.5*1e-3; end
end
```

Výstupem funkce je dvousloupcová matice X , kde první sloupec odpovídá hodnotám poloměru periodicit r a druhý sloupec koresponduje se vzájemnou vzdáleností periodicit a . Prvé dva řádky kódů popisují pozice posledních bitů v chromozomu a slouží jako vstupní parametry funkci *weig* (jedná se o váhovací funkci). Výstupní parametry (matice X) se nemohou měnit zcela libovolně. Například vzájemná vzdálenost periodicit musí být větší než dvojnásobek poloměru periodicity. Druhou omezující podmínkou je zde minimální velikost díry. Z praktického hlediska umíme vytvořit pouze jistou světlost děr ve spojitosti s danou technologií výroby. Z těchto důvodů byl minimální poloměr nastaven na hodnotu 0,5 mm a maximální na 3 mm.

Při kompilaci programu však docházelo k chybovým hlášením. Ta byla způsobena nekompatibilní velikostí struktury (počítanou výše zmíněnou pomocnou funkcí *WG*) u požadovaných frekvencí. Výsledkem byl pád programu při výpočtu rozptylových parametrů. Zabránění tomuto kolapsu řeší právě cyklus *for*. Po vytvoření výstupní matice X zkoumá jednotlivé prvky druhého

sloupce (vzdálenost periodicit a), a je-li hodnota menší než 5,5 mm, změní ji na tuto mez. Mezní hranice 5,5 mm byla experimentálně zvolena pro minimální optimalizovaný kmitočet 5 GHz a relativní permitivitu substrátu 3,38. Kdyby byla požadována nižší hodnota relativní permitivity a nebo menší kmitočet, musela by se hodnota korigovat směrem k vyšším hodnotám. Naopak s vyššími kmitočty či permitivitou lze rozhodovací podmínku zmírnit.

Další částí programového kódu je kritériální funkce tvořená jednoduchým *for* cyklem. Z matice X se postupně vyčítají řádky, které slouží jako vstupní data pomocné funkci WG pro výpočet rozptylových parametrů. V následujícím kroku se provede výpočet hodnoty chybové funkce dle následujícího vztahu:

$$E = (S_{11VYP} - S_{11POZ})^2 + (S_{21VYP} - S_{21POZ})^2, \quad (3.1)$$

kde S_{11VYP} , S_{21VYP} jsou hodnoty rozptylových parametrů vypočtené pomocnou funkcí WG a S_{11POZ} , S_{21POZ} jsou hodnoty požadovaných rozptylových parametrů. Kvadrát dílčích reziduí zamezuje případné kompenzace chyb (sečtení odchylek se zápornou a kladnou hodnotou). Výše popsaná část zdrojového kódu je zde:

```
for n=1:I
    r = X(n, 1); a = X(n, 2);
    [S11,S21] = WG( fmin, fmax, fnum, r, a);
    gen( n, geb) = ((S11-s11)*(S11-s11)' + (S21-s21)*(S21-s21)');
end
```

Matice *gen* obsahující informace o první generaci nyní navíc obsahuje i údaj v posledním sloupci o velikosti rezidua. V dalších krocích se poté hledá index jedince s nejmenší chybou a navíc se hodnota této chyby ukládá do zvláštní proměnné, abychom si na konci optimalizačního programu mohli nechat vykreslit průběh chybové funkce. Po nalezení parametrů jedince s nejmenší hodnotou rezidua uložíme jeho parametry jako výstup funkce. Než-li se celý hlavní cyklus ukončí a začne se totožným způsobem procházet znovu pro další generace, provede se rození nových jedinců metodou decimace populace.

Opět pro přehlednost je operace řešena samostatným skriptem ve tvaru funkce *decim*, kterou volá hlavní program. Funkce nejprve provede seřazení jedinců podle kvality (velikosti hodnoty rezidua). Za pomoci cyklu prochází jednotlivé řádky matice *gen* a dle posledního sloupce přefazuje jedince do nové matice *par* tak, že jedinec s nejmenší chybou je na prvním místě.

```
function out = decim( gen, pc, pm, I, geb)
for n=1:coup
    [val,ind] = min( gen( :,geb)); % jedinec s min. účelovou funkcí
    par( n,:) = gen( ind, :);
    gen( ind, geb) = 1e+20; % vyřazení jedince
end
```

U rozmnožování jedinců je praktikován princip elitismu. To znamená, že první nový jedinec (dítě) je shodný s nejlepším chromozomem předešlé generace. Ostatní jedinci jsou určeni na základě pravděpodobnosti křížení. Z lepší poloviny generace (s chromozomy s nejnižší chybovou funkcí) se náhodně vyberou dva jedinci (rodiče). Pomocí rozhodovací funkce *if* podmíněné pravděpodobností křížení je dítě vytvořeno z genů obou rodičů s náhodným prahem dělení a nebo jsou děti identickými potomky rodičů.

```
coup = round( I/2); % počet rodičovských párů
doup = coup - 1;
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);
```

```

else
    chld( ind+0,1:geb) = par( ind0,1:geb);    % geny nezkříženy
    chld( ind+1,1:geb) = par( ind1,1:geb);
end;

```

Poslední částí skriptu je výpočet mutace jedince. Zde se porovnává pomocná konstanta *mut* (vypočtená na základě pravděpodobnosti a náhodně vygenerovaného čísla) s délkou chromozomu. Rozhodovací funkcí *if* určí, zda-li se provede mutace. Zmutování nového jedince je provedeno inverzí jeho genů vyjádřených v binárním tvaru.

```

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

```

Ukončením tvorby nové generace a návratem do hlavního programu se celý výpočet několikrát zopakuje. Nově vytvořené generace by se stále více měly blížit optimálnímu řešení úlohy. Po projití zadaného počtu opakování se vypíše jedinec s doposud nejmenší chybou kritériální funkce a též se zobrazí průběh chybové funkce během výpočtu.

Abychom měli přehled o správnosti dosaženého výsledku (jak moc je vyhovující), je dobré spustit optimalizační proceduru vícekrát. Jednotlivé vstupní parametry přitom ponecháme shodně nastavené. Nejlepší řešení lze poté jednoduše odhadnout například pomocí velikosti chybové funkce. Obecně lze říci, že výsledek bude tím lepší, čím více generací s dostatečným počtem jedinců zvolíme (prozkoumává se více možných stavů řešení). V tabulce tab. 3. 1 jsou pro přehled ukázány výsledky optimalizace EBG vlnovodu pro nastavené parametry:

- počet generací $G = 15$,
- počet jedinců v generaci $I = 10$,
- pravděpodobnost křížení a mutace $p_c = p_m = 0,4$,
- kmitočtový rozsah $f_{\min} = 5$ GHz, $f_{\max} = 16$ GHz, $f_{\text{num}} = 32$,
- permitivita substrátu $\varepsilon_r = 3,38$.

řešení	poloměr r [mm]	vzdálenost a [mm]	poměr r/a [-]	chyba [-]
první	1,1	7,4	0,149	1113
druhé	1,8	8,2	0,220	1061
třetí	0,6	5,5	0,109	909
čtvrté	1,2	6,1	0,197	1430

Tab. 3.1 Výsledky optimalizace EBG vlnovodu metodou GA.

Z tabulky vyplývá, že při třetím řešení bylo dosaženo nejnižší chyby. Můžeme tedy usuzovat na nejlepší splnění zadaných požadavků (minimální vložný útlum a minimální činitel odrazu na vstupu vlnovodu) v požadovaném kmitočtovém rozsahu. Dále je důležité si uvědomit, že pro dosažení shodnějších výsledků mezi jednotlivými řešeními by bylo třeba výrazněji zvýšit počet generací. Bohužel, v našem případě výpočetní náročnost (zejména pomocné funkce *WG*) je dosti zdlouhavá a při iteracích v řádu tisících až desetitisíců je celkové řešení úlohy otázkou desítek hodin. Pro přehled jsou tyto údaje více než dostačující. V následující kapitole je podrobněji prostudujeme a vyvodíme patřičné závěry.

3.3 Metoda roje částic

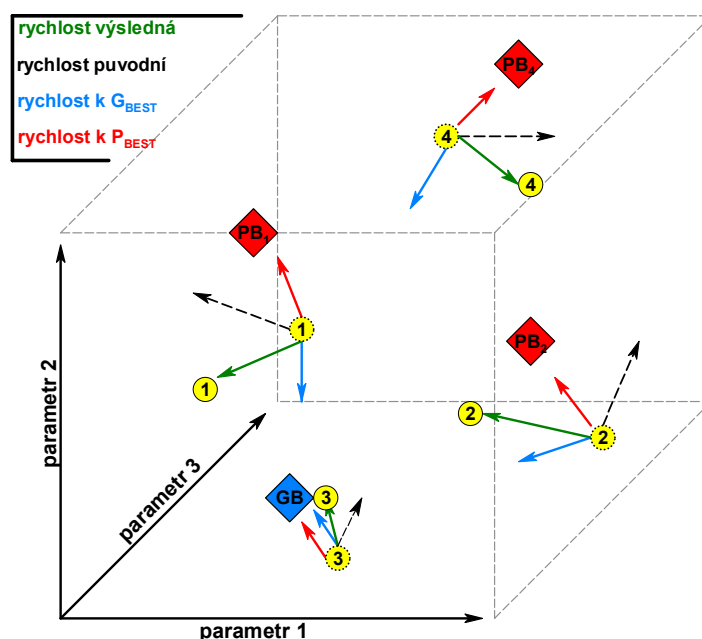
Patří k moderním metodám umělé inteligence sloužící k prohledávání prostoru. Metoda roje částic (*Particle Swarm Optimization*, PSO) je příbuznou metodou genetických algoritmů. Podobnost s genetickými algoritmy spočívá ve vytvoření počáteční populace náhodných řešení a optimum se hledá aktualizací generace. Na rozdíl od GA však metoda PSO nepoužívá evoluční operátory typu křížení, mutace, apod. V principu se jedná o stochastickou optimalizační techniku vycházející z odvětví „umělý život“ [21].

Algoritmy PSO vycházejí z existence určité populace částic, která tvoří roj či hejno směřující ke globálnímu extrému. Jednotlivé částice se pohybují prohledávaným prostorem a představují potenciální řešení. Celý roj se pak pohybuje určitým nenáhodným směrem a ten je dán v každém iteračním kroku principiálně dvěma složkami.

3.3.1 Princip metody PSO

Metoda roje částic je nejčastěji popisována rojem včel, hejnem ryb či ptáků. Zůstaneme-li například u roje včel, pak princip metody spočívá v hledání místa na louce s největší hustotou květin vhodných pro opylení. Obdobně jako u GA začnou včely bez znalosti lokality náhodně prohledávat louku s různou rychlostí. Každá včela si pamatuje dvě věci. Dosavadní nejlepší místo svého nálezu, kde objevila největší koncentraci květin a údaj o místě, kde se nachází maximum doposud nalezených květin (porovnají se osobní úspěchy všech včel v roji). S pomocí těchto údajů se jednotlivé včely pohybují mezi místy louky, které jsou pro ně osobně přitažlivé (našli zde svá nejlepší místa k opylování), a místem s doposud nejlepší koncentrací květin.

Přelétáváním z místa na místo prozkoumávají další nová vhodná místa s výskytem květin. Najde-li některý jedinec při své cestě místo s doposud nejvyšší hustotou květů (přitom se nemusí jednat o nejvyšší koncentraci na celé louce), zapamatuje si nové místo a změní se i jeho trajektorie letu. Tímto způsobem se prohledává celá louka. Pokud žádná ze včel po delší době neobjeví nové lepší místo, než je doposud celkové nejlepší, začne se nad tímto místem roj pomalu shlukovat. To svědčí o nalezení globálního maxima květin na dané louce [22].



Obr. 3.4 Příklad pohybu roje částic v 3D prostoru.

Analogicky tedy můžeme popsat optimalizaci technických problémů. Dle literatury [22] lze algoritmus shrnout do několika bodů. Nejprve je nutné definovat prostor, nad kterým se budou částice pohybovat. Dimenze prostoru obecně N -rozměrného je spřažena s odpovídajícím počtem

optimalizovaných parametrů. Například při optimalizaci velikosti kvádrů (neřešme z jakého důvodu) budou měnící se parametry tři: délka, šířka, výška. Částice se tedy bude pohybovat ve 3D prostoru. Soubor souřadnic $[x_i, y_i, z_i]$ bude reprezentovat aktuální řešení tohoto problému v prostoru.

Nad celým prohledávaným prostorem se definuje kritériální funkce. Obdobně jako u GA slouží pro ohodnocení nalezeného řešení na dané pozici v prostoru. Nejlepší nalezená pozice řešení pro jednotlivé částice se označuje jako p_{BEST} (*particle best*). V každém následujícím bodě trajektorie se srovnává nově vypočtená hodnota kritériální funkce s nejlepší doposud nalezenou. Je-li aktuální hodnota kritériální funkce lepší, je p_{BEST} nahrazeno aktuálním umístěním agenta. Protože je každá částice informována o objevech zbytku roje, dokáže si vyhodnotit doposud nalezené nejlepší řešení celého roje označené jako g_{BEST} (*global best*). Všechny částice se potom pohybují mezi aktuálním g_{BEST} a svým osobním p_{BEST} . Obrázek obr. 3. 4 napomáhá objasnění problému.

Velice důležitým parametrem optimalizace je rychlost pohybu jednotlivých částic roje. Z [22] víme, že lze vypočítat z následujícího vztahu:

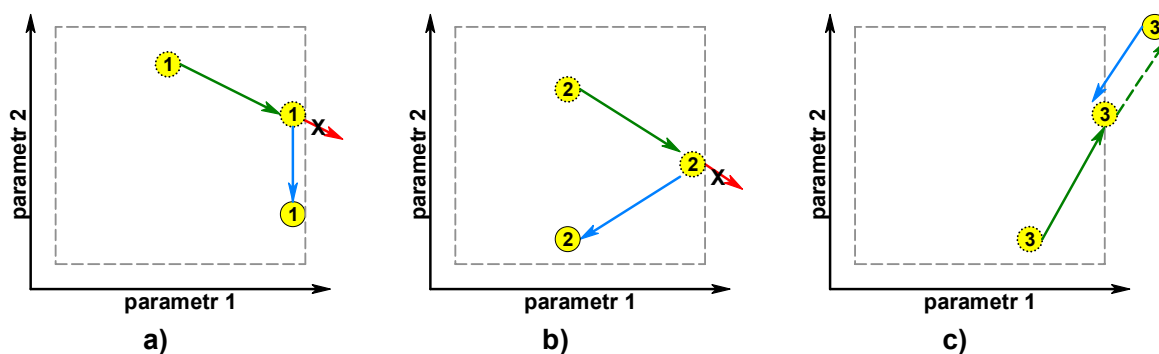
$$v_n = w \cdot v_n + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (p_{\text{BEST},n} - x_n) + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (g_{\text{BEST},n} - x_n), \quad (3.2)$$

kde v_n je rychlost částice v n -té dimenzi a x_n je souřadnice částice v n -té dimenzi. Výpočet se provádí pro každou dimenzi u N -dimenzionální optimalizace. Váhový faktor w určuje, jak velkou část původní rychlosti převezme částice do dalšího časového kroku, tedy jak moc se nechá ovlivnit „tahem“ k p_{BEST} a g_{BEST} . Koeficienty c_1 a c_2 jsou mírou příspěvku „tahu“ směrem k p_{BEST} respektive k g_{BEST} . S rostoucím faktorem c_1 povzbudíme částici v prozkoumávání prostoru v okolí vlastního p_{BEST} . Zvýšíme-li faktor c_2 , částice budou povzbuzovány k prohledávání okolí u údajného globálního maxima. Funkce rand představuje náhodné číslo v intervalu $<0;1>$ a má za cíl simulovat nepředvídatelnost část chování částice [22]. Známe-li výslednou rychlost částice v_v a délku časového kroku odpovídající jedné iteraci Δt , můžeme vypočítat nové souřadnice částice x_n podle vzatu (3.3) z [22]:

$$x_n = x_n + \Delta t \cdot v_v. \quad (3.3)$$

Celý postup se opakuje tak dlouho, dokud není vyčerpán počet kroků optimalizace nebo dosaženo zadaného minima chyby.

Z matematického hlediska nemusí mít algoritmus PSO žádné omezující podmínky. Obdobně jako u GA se může stát, že nalezené matematické řešení nemá adekvátní řešení ve skutečnosti. Proto byly navíc zavedeny tři typy okrajových podmínek pro udržení řešení problému uvnitř zadaného prostoru. Jejich princip při dvojrozměrné optimalizaci je uveden na obrázku obr. 3. 5.



Obr. 3.5 Okrajové podmínky PSO: a) Absorbing Walls, b) Reflecting Walls, c) Invisible Walls.

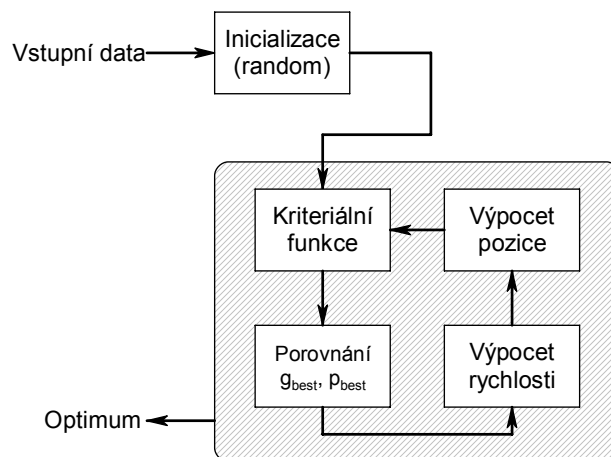
Omezení prostoru absorpční zdi (*Absorbing Walls*) je založeno na principu nulování vektoru rychlosti směřujícího ven z definovaného prostoru. Zdi absorbují energii částic snažících se opustit prostor řešení a částice bude poté přitahována zpět, viz obr. 3. 5a.

Druhá technika se nazývá odrazné zdi (*Reflecting Walls*). Částice směřující opět ven z definovaného prostoru narazí do zdi a poté je odražena zpět. Vektoru rychlosti se změní znaménko, tedy dojde ke změně směru rychlosti, viz obr. 3. 5b.

Posledním způsobem jsou tzv. neviditelné stěny (*Invisible Walls*), obr. 3. 5c. Částice roje směřjí vylétnout z definovaného prostoru libovolným směrem. Pro částice, které opustí oblast řešení, se dále nepočítá hodnota kritériální funkce. Z toho plyne, že hodnota p_{BEST} se pořád nachází pro danou částici uvnitř oblasti řešení. Částice se tedy po chvíli obrátí a letí nazpět. Jakmile se ocitne uvnitř definovaného prostoru, opět se začne počítat hodnota kritériální funkce [22].

3.3.2 Vývojový diagram PSO

Nalezení optimálního řešení zadaného problému lze popsat následujícím blokovým diagramem.



Obr. 3.6 Vývojový diagram algoritmu PSO.

Inicializace

Nastavení počátečních pozic a vektorů rychlosti jednotlivých částic v řešeném prostoru.

Kritériální funkce

Ohodnocení dané pozice agenta (částice).

Porovnání

Částice srovnají svá nejlepší maxima s nově vypočtenou hodnotou kritériální funkce. Vychází-li nová pozice lépe, přepíše se hodnota p_{BEST} . Identickým způsobem se postupuje u g_{BEST} . Nová hodnota globálního maxima se dále oznámí ostatním částicím.

Výpočet rychlosti

Pomocí výše uvedeného vztahu (3.2) se vypočte nová rychlost částice.

Výpočet pozice

Vztahem (3.3) dopočteme polohu částice v prostoru. Pro novou pozici opět vypočteme hodnotu kritériální funkce a proces řešení se opakuje.

3.3.3 Výhody a nevýhody PSO

Mezi výhodné vlastnosti algoritmu PSO patří snadná implementace algoritmu. Výhodou může být malý počet parametrů. Naopak nevýhoda je vyšší náročnost na výkon paměti i procesoru [21]. Malý počet částí snižuje výpočetní složitost, ale zároveň i možnost nalézt optimum. Velký počet částic vede k opačným výhodám a nevýhodám.

Optimalizační metodu PSO lze využít ve všech případech, kde lze použít metodu GA. Toto platí i obráceně. Pouze si uvědomme, že výsledky nemusí být totožné.

3.4 Aplikace metody roje částic v programu Matlab

Popisovaný skript bude řešit shodnou úlohu jako v případě metody genetického algoritmu. Díky tomu budeme moci v závěru kapitoly jednotlivé metody zhodnotit a porovnat. Řešení požadovalo opět minimální vložný útlum S_{21} , nejlépe 0 dB, a z toho plynoucí minimální činitel odrazu S_{11} alespoň -15 dB. Optimalizační proces minimalizoval kritériální funkci popisující odchylky rozptylových parametrů vypočtených pomocnou funkcí WG od parametrů chtěných v žádaném kmitočtovém rozsahu. Jednotlivé optimalizované varianty se vzájemně lišily průměrem děr (periodicit) a též vzájemnou vzdáleností.

Pomocná funkce WG je podrobně popsána v kapitole 3.2.1. Protože optimalizujeme identickou strukturu, není důvod vytvářet nový nebo jinak pozměňovat stávající model výpočtové funkce.

3.4.1 Vlastní řešení metody roje částic

Celý optimalizační program je popsán v jediném skriptu nazvaném *optim_PSO*. Funkce vyžaduje méně vstupních parametrů než GA. Pro příklad uveďme hlavičku naší funkce:

```
function out = optim_PSO( G, I, fmin, fmax, fnum)
```

Význam jednotlivých zkratk je podobný nebo identický s předešlou metodou. Parametr G představuje počet iterací celého cyklu. Daná částice se tedy od svého prvního náhodného umístění přesune přesně G -krát. Je vhodné volit dostatečný počet cyklů, aby bylo globální optimum nalezeno. Parametr I reprezentuje jednotlivé částice (agenty, včely...). Vyšší počet částic zvětšuje pravděpodobnost nalezení globálního optima. Kmitočtové parametry $f_{\min}$, $f_{\max}$, f_{num} jsou vstupní parametry pomocné funkce WG a mají shodný význam jako u GA.

Za hlavičkou funkce jsou definovány požadované hodnoty rozptylových parametrů, délka časového kroku Δt a koeficienty c_1 a c_2 potřebné pro výpočet vektoru rychlosti částice. Velikost koeficientů se volí v intervalu $\langle 1; 2 \rangle$. V našem případě jsme zvolili u obou faktorů hodnotu 1,49. Dále jsou vygenerovány počáteční vektory rychlosti agentů a nastaveny potřebné vektory pro další výpočty.

Rozmístění jednotlivých částic je náhodné a zprostředkované pomocí cyklu *for*. Do matice x se v prvním sloupci ukládají náhodně zvolená čísla, reprezentující velikost poloměru periodicit r . Náhodnost je realizována funkcí *rand*. Velikost poloměru díry jsme omezili na 0,1 mm až 3 mm. Není přitom problém rozsah dodatečně upravit. Do druhého sloupce matice x se vkládají opět náhodně vygenerované hodnoty kladných čísel, představující vzájemnou vzdálenost periodicit a . Omezující podmínky jsou zde stejné jako u GA. Vzájemná vzdálenost děr musí být minimálně dvojnásobkem jejich poloměru. A z důvodů stability výpočtu nesmí klesnout pod hodnotu 5,5 mm (viz kapitola 3.2.2). Protože se jedná o první rozdělení částic, kdy není vypočtená hodnota kritériální funkce, je osobní maximum každé částice rovno startovní pozici.

```
for n=1:I
    x(n, 1) = (1.0 + 29.0*rand())*1e-4; p(n,1) = x(n,1);
    x(n, 2) = (2*(x(n,1)) + 0.01*rand());
    if x(n, 2) < 5.5*1e-3, x(n, 2) = 5.5*1e-3; end
    p(n,2) = x(n,2);
    p(n,3) = 1e+7;
end
```

Hlavní cyklus začíná výpočtem váhovacího faktoru w . Faktor postupem iterace slábne a dovoluje částici se více odpoutat od původního směru. Následujícím úkonem je výpočet rozptylových parametrů pomocnou funkcí WG a vyhodnocení kritériální funkce.

```
for m=1:G
    w = 0.5*(G-m)/G + 0.4; % váhovací faktor
    for n=1:I
        r = x(n, 1); a = x(n, 2);
        [S11,S21] = WG( fmin, fmax, fnum, r, a);
        x( n, 3) = ((S11-s11)*(S11-s11)' + (S21-s21)*(S21-s21)');
    end
```

Nalezení celkově nejlepšího dosavadního výsledku je naprogramováno jednoduchým porovnáním velikosti chyby. Po výpočtu kritériální funkce se vyhledá nejlepší řešení (dosažené minimum) a tato hodnota se srovná s hodnotou vybranou v předchozí iteraci. Pro první iteraci se chyba porovnává s hodnotou předvolenou.

```
e(1) = 1e+7;
[e(m+1),ind] = min( x( :,3));           % nejmenší chyba a její index
    if e(m+1)<e(m)
        g = x( ind, 1:2);               % doposud nejlepší
    end
```

Změna osobního maxima každé částice se počítá v následujícím cyklu. Nejprve se porovnají dosavadní osobní nejlepší výsledky s aktuálními. Je-li aktuální pozice částice vyhodnocena s menší chybou, nahradí se osobní maximum touto pozicí. Dalším krokem je výpočet nové polohy agentů pro následující iteraci. Přes všechny dimenze se vypočte výsledný vektor rychlosti (pro jednotlivé agenty). Nová poloha částice je pak dána vztahem (3.3).

Posledním bodem cyklu je udržení částic v definovaném prostoru řešení. Je zvolena okrajová podmínka z obrázku obr. 3. 5a) absorpční zdi. Nová pozice částice, která opustí prostor řešení, je opět „stažena“ zpět na maximálně povolenou hodnotu.

```
for n=1:I
    if x(n,3)<p(n,3)                     % osobní maximum
        p(n,:) = x(n,:);
    end
    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));
    x(n,1:2) = x(n,1:2) + dt*v(n,:);
    if x(n,1) > 30.0*1e-4, x(n,1) = 30.0*1e-4; end % okrajová podmínka
    if x(n,2) > 12.0*1e-3, x(n,2) = 12.0*1e-3; end
end
end
```

Obdobně jako u GA se po projití všech iterací na konci skriptu vypíše hodnota nejlepšího dosaženého výsledku a též průběh chybové funkce.

Pro srovnání správnosti výsledků jsme provedli několik optimalizačních procedur EBG vlnovodu. Výsledky jsou uvedeny v tabulce tab. 3. 2. Vstupní parametry jsme volili shodně s GA:

- počet iterací $G = 15$,
- počet částic $I = 10$,
- kmitočtový rozsah $f_{\min} = 5$ GHz, $f_{\max} = 15$ GHz, $f_{\text{num}} = 32$,
- permitivita substrátu $\varepsilon_r = 3,38$.

řešení	poloměr r [mm]	vzdálenost a [mm]	poměr r/a [-]	chyba [-]
první	0,7	5,6	0,125	850
druhé	0,8	5,8	0,138	821
třetí	0,9	6,2	0,145	791
čtvrté	0,5	5,2	0,096	537

Tab. 3.2 Výsledky optimalizace EBG vlnovodu metodou PSO.

Rozptyl hodnot dosažených metodou PSO je nižší než u genetického algoritmu. Velikost chybové funkce je též menší. Lze tedy usuzovat, že metoda roje částic je mírně vhodnějším algoritmem pro řešení struktury EBG vlnovodu. Protože se však v obou případech jedná o stochastické metody, je zapotřebí mnohonásobně více výsledků pro korektnost tohoto tvrzení. Navíc by se mělo v obou případech vycházet z většího počtu jedinců a počtu iterací.

3.5 Shrnutí kapitoly

Ve třetí kapitole jsme si detailně představili dvě techniky globální optimalizace - metodu genetických algoritmů a metodu roje částic. Pro obě metody jsme vysvětlili princip funkce algoritmu i předvedli a popsali konkrétní skript vytvořený v programu Matlab. Z dosažených výsledků jsme vyvodili patřičné závěry, které využijeme v následující kapitole.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Pro získání jistého přehledu nad výsledky optimalizovaného EBG vlnovodu se zaměříme na chybovou funkci. Číselná hodnota sama o sobě nic nevypovídá. Při porovnání s ostatními řešeními už člověk dostává představu o relativně lepším či horším optimu. Pro metodu roje částic (PSO) se jako počáteční chyba volí 10^7 . Jedná se o schválně vysoký „nástřel“, který nesmí být překonán, aby metoda správně fungovala. Z vlastního kompilování však víme, že pro první náhodné rozdělení může velikost chyby dosahovat okolo $5 \cdot 10^5$. V tomto srovnání se jeví všechny výsledky jako dobré (jsou 500-krát až 1000-krát lepší než první odhad).

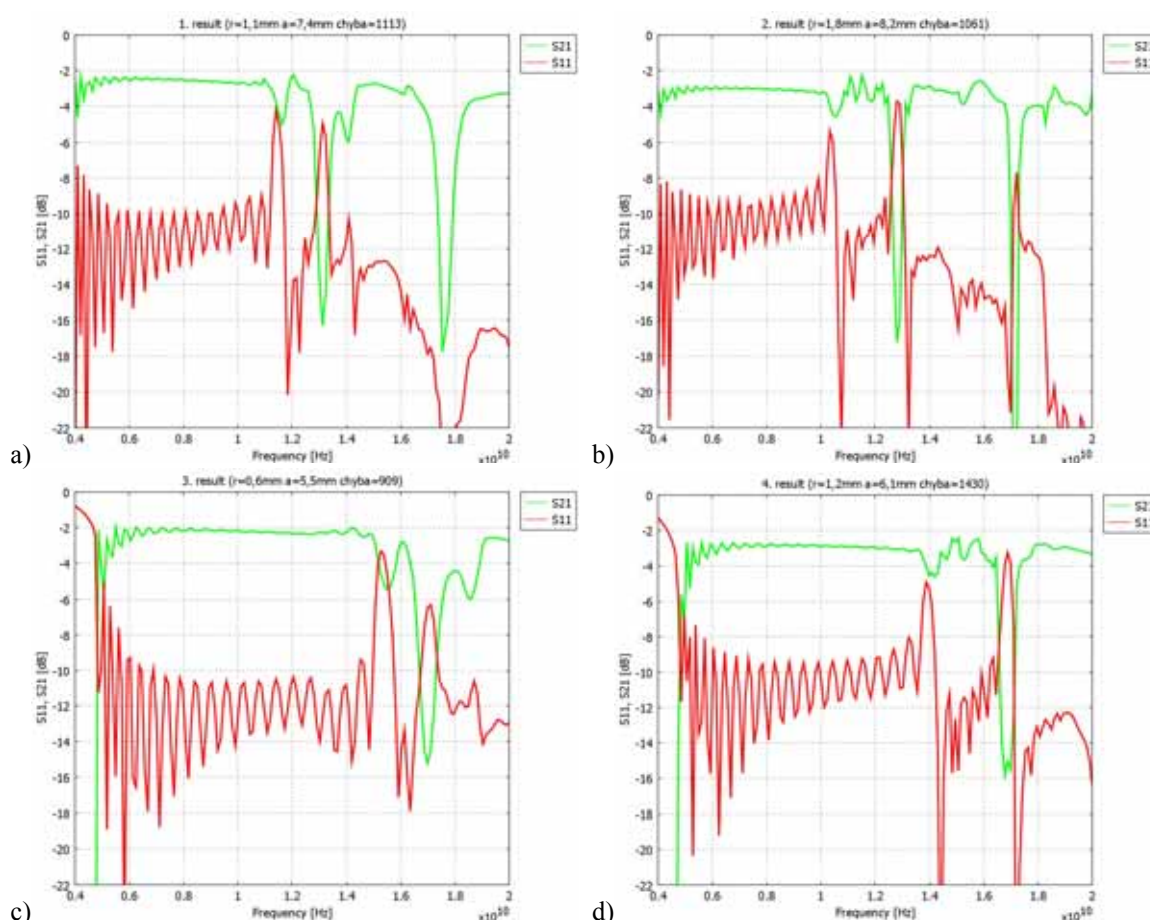
Kdybychom vyžadovali preciznější výsledek, bylo by vhodné oba algoritmy skombinovat. V literatuře se uvádí, že nejefektivnějšího dosažení výsledku je při použití metody genetických algoritmů pro získání „hrubého“ výsledku. A tento výsledek poté použijeme jako jeden ze vstupních dat metody roje částic. I při relativně nízkých počtech iterací dostaneme přesný výsledek.

Z číselného vyjádření výsledné chyby nejsme schopni určit odlišnosti mezi výsledky z hlediska kmitočtových vlastností modulů rozptylových parametrů. Proto pro další posouzení vhodnosti optimalizovaného výsledku si jednotlivá řešení odsimulujeme.

4.1 Srovnání výsledku optimalizačních metod

Jednotlivé průběhy rozptylových parametrů vypočteme v programu Comsol Multiphysics. Postup návrhu je identický s kapitolou 2. Rozměry pro modely jsou brány z tabulek tab. 3.1 a tab. 3.2.

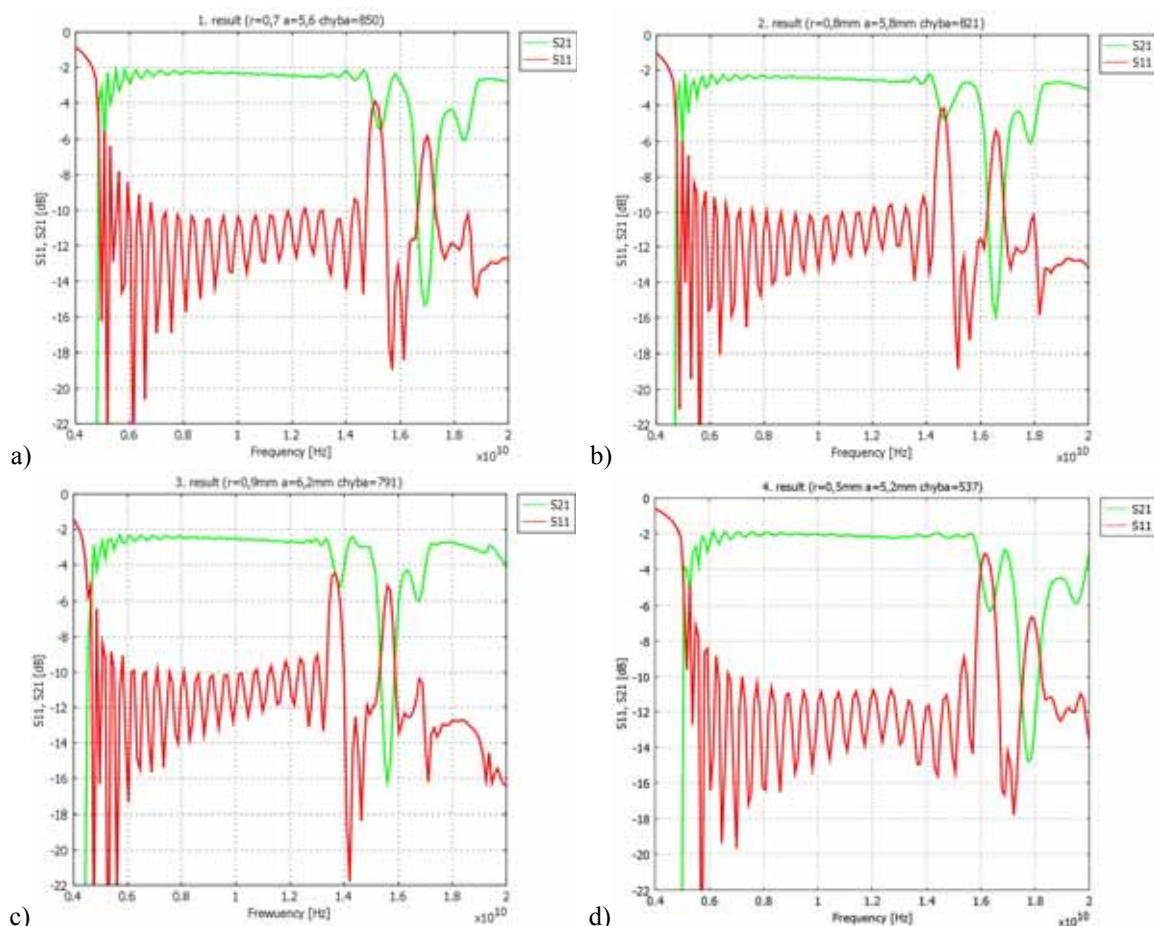
4.1.1 Metoda GA



Obr. 4.1 Optimalizovaný EBG vlnovod metodou GA.

Na uvedených průbězích vidíme, že optimalizovaný algoritmus se pokoušel kompromisně dodržet požadované parametry. Činitel odrazu na vstupu S_{11} je vyšší než -15 dB (červený průběh), stejně tak činitel přenosu S_{21} se pohybuje na hranici -3 dB (zelený průběh). Pro případnou realizaci bychom vybrali třetí sadu parametrů, obr. 4.1c. Dosahuje nejširšího pásma propustnosti při konstantním přenosu. Ze všech simulací má i nejmenší vložné ztráty.

4.1.2 Metoda PSO



Obr. 4.2 Optimalizovaný EBG vlnovod metodou PSO.

Výsledky metody roje částic jsou výrazně shodnější. Liší se především hladkostí průběhu činitele přenosu S_{21} a kmitočtovým rozsahem. Nejlepší výsledky jsou vidět na obrázku obr. 4.2d. Model vyniká nejnižším vložným útlumem a zachovává si konstantní vlastnosti až do kmitočtu 16 GHz. Ze všech dosavadních výsledků se jeví jako nejvhodnější kandidát pro zkušební realizaci.

Upozorníme na skutečnost, že zobrazené průběhy jsou simulovány ve větším rozsahu, než byly zadane parametry optimalizovány. Lze si tedy povšimnout, že průběh funkčních hodnot od kmitočtu 15 GHz již není optimální pro využití. Při požadavku na používání vlnovodu na těchto vyšších kmitočtech by se musela provést nová optimalizace s patřičnými úpravami vstupních parametrů.

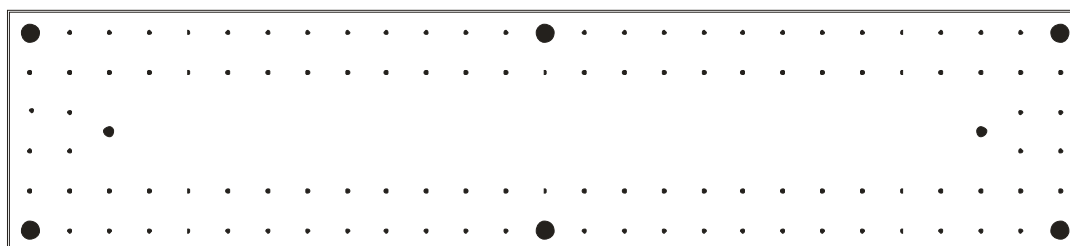
4.2 Realizace optimalizovaného EBG vlnovodu

4.2.1 Postup návrhu

Samotný návrh obvodu byl převzat z optimalizovaného řešení. Po ověření průběhů rozptylových parametrů v programu Comsol jsme mohli model nechat vyrobit. Jako výchozí dielektrický materiál byl zvolen ARLON 25N s relativní permitivitou $\epsilon_r = 3,38$ a tloušťkou desky 1,52 mm. Po dohodě s vedoucím práce jsme zvolili výšku celé struktury 6 mm odpovídající čtyřem vrstvám dielektrika. Vnitřní dvě vrstvy vlnovodu vyrobíme čistě dielektrické. Deska horní a deska spodní bude z vnějších stran potažena vodivou fólií a vzájemně vodivě propojena. Naopak vnitřní strany okrajových destiček budou tvořeny čistě dielektrickou vrstvou.

Spojení jednotlivých vrstev není možno provést lepením. Nanesená vrstva lepidla by změnila vlastnosti celé struktury (došlo by ke změně relativní permitivity materiálu). Jedinou možností je dané vrstvy mechanicky spojit šroubem. Šrouby představují též narušení elektromagnetického pole vybuzeného ve struktuře. Proto musíme volit s rozvahou jejich umístění. Protože jednotlivé díry vyvrtané v substrátu jsou při simulaci považovány za dokonalý elektrický vodič (ve shodě s [14]), využijeme některých okrajových děr pro mechanické spojení. Ostatní díry budou obsahovat měděné piny vodivě spojené se zemní deskou struktury. Tímto řešením docílíme minimálního ovlivnění elektromagnetického pole realizovaného EBG vlnovodu.

Podklady pro vyleptání desky jsme provedli v kreslicím programu Corel Draw. Při kreslení v tomto programu lze přesně nadefinovat rozměry jednotlivých entit a docílit tak vysoké přesnosti návrhu. Ukázka vrchního motivu desky ve skutečné velikosti je na následujícím obrázku obr. 4. 3.



Obr. 4.3 Motiv horní strany desky pro leptání EBG vlnovodu.

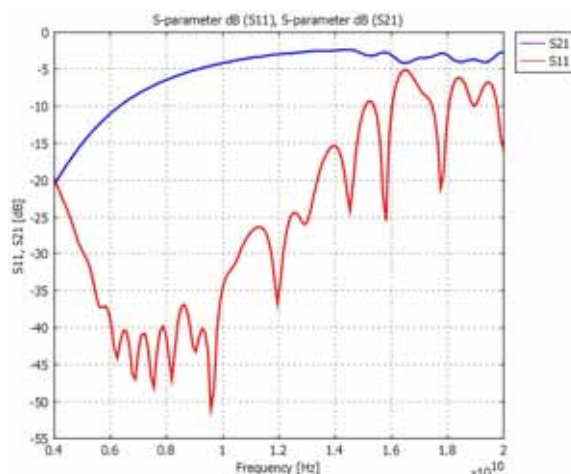
Černou barvou označujeme místa pro odleptání. V našem případě jsme toho využili pro naznačení pozic jednotlivých děr. Široké otvory ukazují vybraná místa pro spojení šroubem. V podélné ose struktury jsou zvýrazněny místa pro umístění SMA konektorů.

Samotná konstrukce výrobku byla dosti náročná na přesnost. Nejprve se pomocí svorek vystříhlé desky sepnuly a vyvrtaly do kříže otvory pro šrouby. Po zafixování celé struktury jsme dále vyvrtali zbylé otvory. Pouze díry pro zapuštění živých vodičů SMA konektorů jsme neprovrtávali skrz celou strukturu. Takto zhotovený výrobek jsme podrobili zkušebnímu měření (pro možnost následného porovnání dat). Posledními konstrukčními úpravami bylo vyrobení vodivého spojení jednotlivých zemních desek ve vyvrtaných dírách. Z technických důvodů nebylo možné provést prokovení ve školní dílně. Vodivé propojení tedy je reprezentováno měděnými kousky drátků připájených k jedné straně desky.

4.3 Parallel-plate vlnovod

Účelem této podkapitoly je pouze porovnání vlastností mezi vyrobeným EBG vlnovodem a rovinným vlnovodem. Nebudeme se zabývat popisem teoretických vlastností, jen uvedeme nutná specifikata. Parallel-plate vlnovod je v našem případě tvořen horní a spodní pokovenou vrstvou a boční strany jsou „holé“. V prostoru mezi krajními vrstvami se nachází dielektrikum.

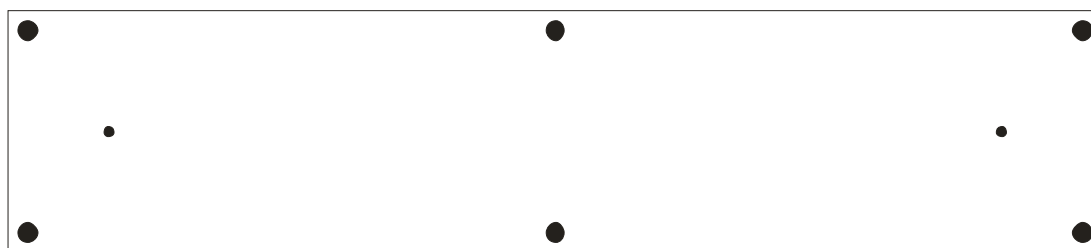
Pomocí shodných návrhových postupů jako u EBG vlnovodu jsme odsimulovali dvojrozměrný model parallel-plate vlnovodu. Přehled jeho rozptylových parametrů je na obrázku obr.4. 4.



Obr. 4.4 Rozptylové parametry modelu parallel-plate vlnovodu.

Velikost struktury je totožná s velikostí EBG vlnovodu. Činitel přenosu parallel-plate vlnovodu má pozvolnější náběh než námi navržený EBG vlnovod. Též vložený útlum dosahuje vyšší hodnoty -3,5 dB se zvlněním ± 1 dB. Simulace shodně navrženého parallel-plate vlnovodu tedy ukazuje, že pro dané parametry modelu vykazuje lepší vlastnosti EBG vlnovod.

Celý postup realizace je identický, pouze se změní vrchní motiv desky, jak je ukázáno na obrázku obr. 4. 5 níže. Struktura nebude obsahovat žádné periodicity a vytvořené dielektrické desky budou pouze mechanicky spojeny šrouby ve stejných místech jako EBG vlnovod. Buzení je provedeno opět SMA konektory v podélné ose struktury.



Obr. 4.5 Motiv horní strany desky pro leptání parallel-plate vlnovodu.

4.3.1 Změřená data

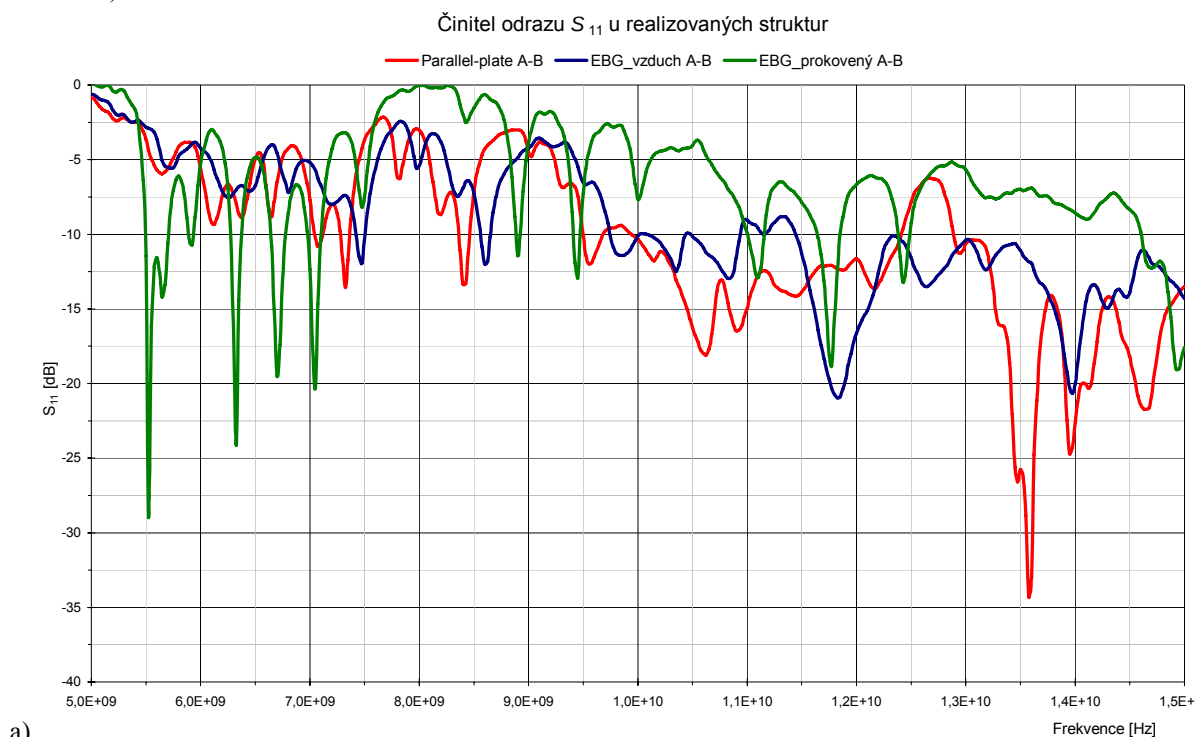
EBG vlnovod jsme měřili ve školní laboratoři na skalárním obvodovém analyzátoru Anritsu 54147A. Analyzátor je schopen měřit až do kmitočtu 20 GHz. Před samotným měřením dat jsme provedli kalibraci přístroje. Změřené průběhy rozptylových parametrů jsou na následujících obrázcích obr. 4. 6a a obr. 4. 6b.

Rozptylové parametry jsou pro dané realizace shodně barevně označeny, aby byla zachována přehlednost. Protože se jedná o symetrické struktury, které nemají nikterak definovaný vstup či výstup, měřili jsme vždy každý parametr dvakrát. Prohození vstupu a výstupu je symbolicky označeno písmeny $A-B$ resp. $B-A$. V ideálním případě bychom měli dostat vždy dva identické průběhy. Činitel přenosu S_{21} se při prohození bran choval téměř shodně. Oproti tomu se činitel odrazu na vstupu brány A chová odlišněji než na vstupu brány B . Z toho lze usuzovat na odlišné podmínky v okolí budících sond. Samotný problém může představovat i rozdílně připájený konektor. Z důvodů přehlednosti grafu jsou zobrazeny pouze charakteristiky v jednom směru (a v příloze je doplněn rozdílný průběh).

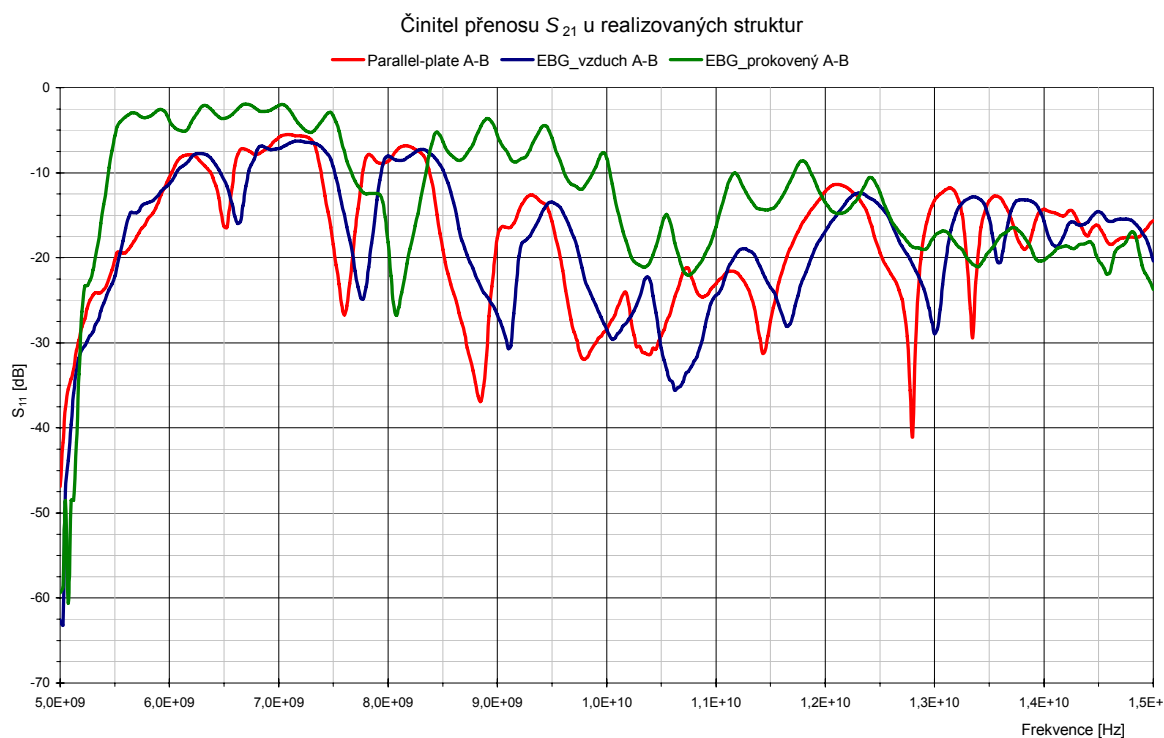
Samotný tvar průběhu činitele přenosu u EBG vlnovodu je zcela odlišný od předpokládaného průběhu v simulaci (obr. 4. 2d). Přenos by měl být v zobrazeném pásmu konstantní s minimálním zvlněním a útlumem. Při měření vlnovodu se vzduchovými dírami na obrázku obr. 4. 6b (modré křivky) je vidět, že nedochází k vhodnému vedení vlny. Periodicky vyvrtané díry neovlivňují (nebo zcela minimálně) postupující elektromagnetickou vlnu, která se šíří v dielektriku všemi směry. Na

nerovnostech při okrajích struktury, způsobené výrobou desek, vzniká rozptylové pole, jenž se negativně podílí na zhoršování parametrů. Degradaci zajisté způsobuje i nehomogenita struktury. Přes náležité dotažení všech spojovacích šroubů se vyskytují místa se vzduchovými mezipřehledy. Tato tvrzení byla podložena porovnáním výsledků s parallel-plate vlnovodem.

Naměřené výsledky, vykreslené červeně, ukazují obdobné průběhy jako EBG vlnovod bez realizovaných prokovení. Rozptylové parametry jsou oproti sobě vzájemně frekvenčně posunuty (viz obr. 4. 6b).



a)



b)

Obr. 4.6 Rozptylové parametry realizovaných vlnovodů: a) činitel odrazu S_{11} , b) činitel přenosu S_{21} .

Po zavedení měděných pinů realizovaných kousky měděného drátu jsme provedli vodivé spojení po obou stranách struktury. Změřené parametry jsou vykresleny zeleně. Činitel přenosu na

nízkých kmitočtech (do cca 5 GHz) je minimální. To odpovídá pouze šíření evanescentních vidů. Od kmitočtu 5,5 GHz začíná EBG vlnovod požadovaným způsobem vést elektromagnetickou vlnu ve shodě se simulací. Propustné pásmo je pouze do kmitočtu 7,5 GHz. Oproti simulaci je propustné pásmo značně menší a zvlněné. Činitel odrazu svým tvarem připomíná přenosovou charakteristiku hřebenového filtru a v maximálních hodnotách svého průběhu dosahuje pro propustné pásmo -4 dB. Nízkou hodnotu tohoto parametru nejspíše způsobují parazitní přechody mezi rozhraními, vzduch a dielektrikum.

V okolí 8 GHz dochází k výraznému poklesu činitele přenosu. Protože se tento pokles objevuje i v dalších simulacích (pouze drobně frekvenčně posunutý), lze usuzovat, že rozměry struktury pro danou frekvenci nevyhovují a vybuzené elektromagnetické pole nenabývá v místě sondy svého maxima.

Směrem k vyšším kmitočtům se parametry struktury zhoršují. Hodnota činitele odrazu postupně klesá a mírně roste jeho zvlnění. Zmenšující se vlnová délka více reaguje na nepřesnosti a parazitní vlivy způsobené ruční výrobou. Od 10 GHz se struktury přestávají chovat definovaným způsobem a převládají parazitní vlivy. Nepochybné zlepšení parametrů by jistě přinesla aplikace strojních postupů (využití vyražení shodného tvaru všech desek - v ideálním případě pouze jedné tlusté desky, vyvrtání děr na souřadnicové vrtačce nebo profesionální prokovení). Při srovnávání modelu a realizované struktury mějme na paměti, že simulované průběhy jsou ideální! U návrhu se neuvažovaly žádné ztráty. Proto bychom nikdy nedosáhli identického výsledku a vždy se k němu jen přibližujeme.

4.4 Shrnutí kapitoly

Ve čtvrté kapitole jsme provedli srovnání dosažených výsledků z optimalizačních algoritmů u předchozí kapitoly. Po vybrání nejlepších parametrů jsme optimalizovanou strukturu EBG vlnovodu zadali k realizaci. Uveden byl postup výroby i rozbor dosažených výsledků měřením. Získané zkušenosti, popsané v této kapitole s první realizací, můžeme s výhodou dále zužitkovat při dalším návrhu EBG struktury vlnovodu či jiného typu.

5 ZÁVĚR

V diplomové práci jsme se zaměřili na studii struktur s elektromagnetickým zádržným pásmem. Tyto konstrukčně velmi primitivní periodické struktury lze využívat k zadržení nebo naopak k vedení elektromagnetické vlny. Za pomoci jednoduchých defektů v jejich periodické mřížce můžeme docílit požadovaného vedení elektromagnetické vlny. Obecně se struktury s elektromagnetickými zádržnými pásmy svými parametry a vlastnostmi vedení povrchové vlny blíží klasickým kvalitním mikrovlnným elementům nebo jsou s nimi srovnatelné. Uplatnění nalézají v jednoduchých aplikacích pro vylepšení stávajících vlastností (například v anténní technice) a nespornou výhodou je i jejich snadná realizace.

V první části práce byla věnována pozornost stručnému teoretickému úvodu pro objasnění základních používaných veličin a problematiky periodických struktur se zaměřením na popis elementárního prvku periodické struktury.

V druhé části práce jsme se zaměřili na numerické modelování EBG struktur. S využitím prostředí programu Comsol Multiphysics jsme nejprve uvedli podrobný popis postupu návrhu takového modelu a následně i jeho analýzu parametrů. Z těchto poznatků jsme dále vycházeli při navrhování zbylých modelů. Mezi základními zkoumanými elementy byly: dělič výkonu, zahnutý vlnovod a směrový vazební člen. U jednotlivých analyzovaných prvků řešených modelem EBG byly porovnány simulace s výsledky modelů řešených klasickou planární technologií.

První struktura - dělič výkonu realizovaný EBG modelem vykazoval vyšší vložný útlum než model planární. Při správném rozložení defektů byl s mírným poklesem vložný útlum cca -7 dB a šířka pásma 6 GHz. Přestože dělič řešený EBG strukturou nedosahuje takových kvalit, koncepční jednoduchost je jeho velkou výhodou. Porovnání technologií u modelování zahnutého vlnovodu opět vyznívá lépe ve prospěch klasické planární struktury. EBG model se vyznačoval vyšším útlumem a nižší šířkou pásma především v porovnání se zaobleným planárním vlnovodem. Srovnání s pravoúhlým ohybem se vlastnosti shodují až na širokopásmovost. U realizace zkosení hrany v EBG materiálech navíc dochází k interferencím v ohybu pro vyšší frekvence, které negativně ovlivňují výslednou šířku pásma. Posledním zkoumaným elementem byla směrová odbočnice. Zaměřili jsme se na směrovost druhého druhu. Výsledný EBG model vykazoval jistá pásma kmitočtů se shodnými vlastnostmi. Tento faktor byl zapříčiněn násobností čtvrtvlnné délky vlny, která vyhovovala dané velikosti a rozmístění defektů ve struktuře. Úpravou modelu za pomoci přidání jedné vazební cesty jsme docílili vyrovnanějšího průběhu pro parametry činitelů přenosu do výstupních bran. V porovnání s modelem řešeným klasickou mikrovlnnou technologií dosahujeme srovnatelných výsledků. Z těchto poznatků plyne, že ne všechny mikrovlnné elementy lze s výhodou realizovat pomocí struktur se zádržným pásmem. A pokud se tak rozhodneme, je nutné správně určit základní parametry struktury pro dosažení nejvýhodnějších vlastností.

Pro určení vhodných počátečních parametrů EBG struktury se využívá globálních optimalizačních metod, popsanych v další části práce. Po vysvětlení principu a funkce metod GA a PSO jsme na základě dříve popsanych vlastností aplikovali optimalizační algoritmy na EBG vlnovod. Jedná se o jedinou strukturu, u které jsou uvedeny podklady pro možnost srovnání s literaturou. Principiálně lze tímto způsobem optimalizovat jakýkoliv prezentovaný model. Při srovnání dosažených výsledků vychází metoda roje částic jako vhodnější nástroj pro optimalizaci struktur se zádržnými pásmy. Musíme ale uvážit, že vycházíme z malého počtu simulací. Též jednotlivé simulace by vyžadovaly vyšší hodnoty parametrů, jako je například počet jedinců a generací. Všechny tyto okolnosti nepříznivě ovlivňují výsledek optimalizovaného řešení, který by mohl nabýt přesnější hodnoty. Jedná se o kompromis mezi výpočetní náročností metody a precizností výsledného řešení.

V poslední části diplomové práce jsme se zabývali realizací optimalizovaného řešení EBG vlnovodu. Zhotovení výrobku bylo uskutečněno pomocí školní dílny. Výška vlnovodu byla zvolena po dohodě s vedoucím práce na 6 mm. Naměřené výsledky se výrazně lišily od simulovaných dvourozměrných modelů. Proto byl realizován pomocný paralel-plate vlnovod pro zjištění příčin těchto nesrovnalostí. Shoda s výsledky simulace byla pouze na začátku zkoumaného kmitočtového pásma (5 GHz až 7,5 GHz). Změřené výsledky vykazovaly mírně zhoršené vlastnosti vlivem parazitních jevů (nepřesností výroby, ztrátami v dielektriku a na přechodech konektorů). Pro vyšší

kmitočty začínají parazitní vlastnosti převládat a strukturu nelze jako vlnovod využít. Nejedná se však o chybně navrhnutý výpočetní aparát. Nesoulad výsledků je dán omezenou přesností metody výroby a preciznosti zhotovení. Určení přesného vzniku parazitních vlastností přesahoval rámec této práce a byl by hoden dalšího podrobného prozkoumání v jiné práci.

6 SEZNAMY

6.1 Seznam použité literatury

- [1] CHANG, K., BAHL, I., NAIR, V. *RF and Microwave Circuit and Component Design for Wireless Systems*. New York: J. Wiley and Sons, 2001.
- [2] DE MAAGT, P., GONZALO, R., VARDAXOGLU, Y. C., BARACCO, J. M. Electromagnetic bandgap antennas and components for microwave and (sub)millimeter wave applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003. vol. 51, no. 10, p. 2667 to 2677.
- [3] HANUS, S., *Skriptum Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika*. Brno: FEKT VUT, 2000. 92s. ISBN: 80-214-1765
- [4] *Comsol Multiphysics Help* [počítačový program]. Ver. 3.3.0.405. USA, 2006.
- [5] CHAPPELL, W. J., GONG, X., Wide Band Composite EBG Substrates. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2003. vol. 51, no. 10. p. 2744 to 2750
- [6] L. BRILLOUIN, *Wave Propagation in Periodic Structures*. New York: Dover, 1946.
- [7] E. YABLONOVITCH, Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 20, p. 2059–2062, May 1987.
- [8] SZCZEPAŃSKI, P., *Photonic Crystals* [powerpointová prezentace]. Warszawa, 2005.
- [9] *Elektronika polovodivů* [online]. Poslední revize 2006-12 [cit 2008-04-13]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/34EPO/prednasky/epo1_cz_kryst1.pdf>
- [10] *Brillouin zone, Wikikédie the free encyclopedia* [online]. Poslední revize 2008-03-16 [cit 2008-04-13]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Brillouin_zone>
- [11] STRATTON, J. A., *Electromagnetic Theory*. Piscataway: IEEE Press, 2007.
- [12] LUCKI, M., *Mikrostrukturní vlákna*. [online] Poslední revize 2007-12-18 [cit 2008-04-14]. Dostupné z: <<http://www.comtel.cz/files/download.php?id=3530>>
- [13] GONZALO, R., DE MAAGT, P., SOROLLA, M. Enhanced patch-antenna performance by suppressing surface waves using photonic-bandgap substrates. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1999, vol. 47, no. 11, p. 2131 to 2138.
- [14] SIMOSON, J.J., TAFLOVE, A., MIX, J. A., HECK, H., Computational and Experimental Study of Microwave Electromagnetic Bandgap Structure With Waveguiding Defect for Potential Use as a Bandpass Wireless Interconnect. *IEEE Microwave and wireless components letters*, 2004. vol. 14, no. 7, p. 343 to 345.
- [15] HOFFMANN, K., *Skriptum Planární mikrovlnné obvody*. Praha: ČVUT, 2000. 145s. ISBN: 80-01-02115-7
- [16] SVAČINA, J., HANUS, S., *Skriptum Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika*. Brno: VUT, 2002. 208s. ISBN: 80-214-17765-X
- [17] NOVÁČEK, Z., *Skriptum Elektromagnetické vlny, antény a vedení*. Brno: VUT, 2006. 133s. ISBN: 80-214-3301-9
- [18] BLAŽEK, J., HABIBBALA H., PAVLISKA, V., *Vybrané heuristiky pro globální optimalizaci a jejich implementace v Matlabu* [online]. Poslední revize 2005-05-11 [cit 2009-05-01]. Dostupné z: <<http://www.volny.cz/habiballa/publ/matlab05.pdf>>
- [19] *Genetic Algorithms* [online]. Poslední revize 1998-09 [cit 2009-05-1]. Dostupné z: <<http://cs.felk.cvut.cz/~xobitko/ga/>>
- [20] *Jemný úvod do genetických algoritmů* [online]. [cit 2009-05-01]. Dostupné z: <<http://cgg.mff.cuni.cz/~pepca/prg022/luner.html>>

- [21] HŘEBÍČEK, J., ŽIŽKA, J., Vědecké výpočty v biologii a biomedicině. *Multimediální podpora výuky klinických a zdravotnických oborů :: Portál Lékařské fakulty Masarykovy univerzity* [online]. Poslední revize 2008-04-02 [cit 2009-05-01]. Dostupné z: <<http://portal.med.muni.cz/clanek-455-vedecke-vypocty-v-biologii-a-biomedicine.html>>
- [22] ROBINSIN, J., RAHMAT-SAMII, Y., Particle Swarm Optimazation in Electromagnetics. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004. vol. 52, no. 2, p. 397 to 407.
- [23] *Optimalizace v elektrotechnice* [online]. [cit 2009-05-01]. Dostupné z: <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/optimalizace/index.htm>>

6.2 Seznam obrázků

OBR. 1.1	DVOUROZMĚRNÁ PERIODICKÁ STRUKTURA DEMONSTRUJÍCÍ LINEÁRNÍ DEFEKT (ZNAČENO ČERVENĚ) NEBO BODOVOU PORUCHU (OZNAČENO ŽLTĚ) [8].	9
OBR. 1.2	NEDĚLITELNĚ BRILLOUINOVY ZÓNY PRO ČTVERCOVOU A HEXAGONÁLNÍ PERIODICITU [10].	9
OBR. 1.3	PERIODICKÁ STRUKTURA BUZENÁ ROVINNOU ELEKTROMAGNETICKOU VLNOU [12].	10
OBR. 1.4	UKÁZKA DISPERZNÍCH DIAGRAMŮ SE ZÁDRŽNÝMI PÁSMY PRO ROZDÍLNÉ STRUKTURY [8].	10
OBR. 1.5	A) PŘÍKLADY PERIODICIT. B) PŘÍPUSTNÉ TYPY 2D MŘÍŽEK.	11
OBR. 1.6	PŘÍKLAD DEFEKTU V PERIODICKÉ STRUKTUŘE: A) BODOVÝ, B) LINEÁRNÍ.	11
OBR. 1.7	PŘÍKLADY LINEÁRNÍCH PORUCH ZMĚNOU PRŮMĚRU MIKROSTRUKTURY: A) POLOVIČNÍ POLOMĚR, B) DVOJNÁSOBNÝ POLOMĚR.	11
OBR. 2.1	VÝBĚR SIMULAČNÍ ANALÝZY.	13
OBR. 2.2	MODELOVANÁ EBG STRUKTURA V PROGRAMU COMSOL MULTIPHYSICS.	13
OBR. 2.3	NASTAVENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ: A) FR4 DIELEKTRIKA, B) MĚDĚNÝCH VÁLEČKŮ.	14
OBR. 2.4	NASTAVENÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK: A) VSTUPU, B) PODÉLNÝCH STRAN.	15
OBR. 2.5	ZMĚNA NASTAVENÍ PARAMETRU KROKOVÁNÍ.	15
OBR. 2.6	NASTAVENÍ ROZSAHU A PŘESNOSTI VÝPOČTU.	16
OBR. 2.7	ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZY: A) 2D GRAF, B) 3D GRAF, C) VEKTOROVÝ GRAF, D) KONTUROVÝ GRAF.	16
OBR. 2.8	VÝBĚR ROZPTYLOVÉHO PARAMETRU: A) NASTAVENÍ, B) ZOBRAZENÍ.	17
OBR. 2.9	VLNOVODOVÁ STRUKTURA [14]: A) PŘENOSOVÉ CHARAKTERISTIKY, B) FINÁLNÍ TESTOVANÝ VÝROBEK.	17
OBR. 2.10	ROZLOŽENÍ ELEKTRICKÉHO POLE VE STRUKTUŘE PRO: A) 6x22, B) 8x22, C) 10x22.	18
OBR. 2.11	ROZLOŽENÍ ELEKTRICKÉHO POLE VE STRUKTUŘE PRO: A) $\epsilon_r = 2,15$, B) $\epsilon_r = 4,3$, C) $\epsilon_r = 8,6$.	19
OBR. 2.12	ROZLOŽENÍ ELEKTRICKÉHO POLE VE STRUKTUŘE PRO: A) $R = 415 \mu\text{m}$, B) $R = 830 \mu\text{m}$, C) $R = 1245 \mu\text{m}$.	19
OBR. 2.13	WILKINSONOVA STRUKTURA DĚLIČE VÝKONU [15].	20
OBR. 2.14	NÁVRH MODELU VÝKONOVÉHO DĚLIČE V PROGRAMU COMSOL MULTIPHYSICS: A) VÝSLEDNÁ STRUKTURA, B) DEFINICE OKRAJE MODELU, C) VYTVOŘENÍ JEDNOTNÉHO OBJEKTU.	21
OBR. 2.15	VÝKONOVÝ DĚLIČ: A) ROZPTYLOVÉ PARAMETRY, B) ROZLOŽENÍ POLE NA 2D A 3D MODELU.	22
OBR. 2.16	PRINCIPIELNÍ SCHÉMA PLANÁRNÍHO DĚLIČE VÝKONU.	22
OBR. 2.17	VÝBĚR TYPU ANALÝZY V PROGRAMU ANSOFT DESIGNER SV.	23
OBR. 2.18	OBVODOVÉ SCHÉMA PLANÁRNÍHO DĚLIČE VÝKONU V PROGRAMU ANSOFT DESIGNER SV2.	23
OBR. 2.19	VÝSLEDKY SIMULACE MIKROVLNNÉHO DĚLIČE VÝKONU V PROGRAMU ANSOFT DESIGNER SV2.	24
OBR. 2.20	ZAHNUTÝ VLNOVOD (90°) VE STRUKTUŘE EBG: A) VÝSLEDNÝ MODEL, B) ROZLOŽENÍ POLE NA 2D A 3D MODELU, C) ROZPTYLOVÉ PARAMETRY.	25
OBR. 2.21	ZAHNUTÝ VLNOVOD (45°) VE STRUKTUŘE EBG: A) VÝSLEDNÝ MODEL, B) ROZLOŽENÍ POLE NA 2D A 3D MODELU, C) ROZPTYLOVÉ PARAMETRY.	26
OBR. 2.22	DEFINICE ZKOSENÍ A ZAOBLENÍ PRO DRUHÝ A TŘETÍ MODEL.	27
OBR. 2.23	MODEL Y PLANÁRNÍCH VLNOVODŮ.	27
OBR. 2.24	ROZPTYLOVÉ PARAMETRY MODELU: A) KOLMÝ, B) ZKOSENÝ, C) ZAOBLENÝ.	28
OBR. 2.25	TYPY SMĚROVOSTÍ VAZEBNÍCH ČLENŮ [15].	29
OBR. 2.26	MODEL SMĚROVÉ ODBOČNICE: A) ZÁKLADNÍ, B) UPRAVENÝ.	29
OBR. 2.27	SMĚROVÁ ODBOČNICE: A) ROZLOŽENÍ POLE U ZÁKLADNÍHO MODELU PRO $F = 17,6 \text{ GHz}$, B) ROZLOŽENÍ POLE U MODIFIKOVANÉHO MODELU PRO $F = 16,7 \text{ GHz}$, C) ROZPTYLOVÉ PARAMETRY ZÁKLADNÍHO MODELU, D) ROZPTYLOVÉ PARAMETRY MODIFIKOVANÉHO MODELU.	30
OBR. 2.28	PRINCIPIELNÍ SCHÉMA PŘÍČKOVÉ SMĚROVÉ ODBOČNICE.	31
OBR. 2.29	OBVODOVÉ SCHÉMA SMĚROVÉ ODBOČNICE V PROGRAMU ANSOFT DESIGNER SV2.	31
OBR. 2.30	VÝSLEDKY SIMULACE SMĚROVÉ ODBOČNICE V PROGRAMU ANSOFT DESIGNER SV2.	32
OBR. 3.1	POPIS JEDNÉ GENERACE U GENETICKÉHO ALGORITMU.	33
OBR. 3.2	PŘÍKLAD KŘÍŽENÍ A MUTACE U GENETICKÉHO ALGORITMU.	34
OBR. 3.3	VÝVOJOVÝ DIAGRAM GENETICKÉHO ALGORITMU.	34

OBR. 3.4	<i>PŘÍKLAD POHYBU ROJE ČÁSTIC V 3D PROSTORU.</i>	40
OBR. 3.5	<i>OKRAJOVÉ PODMÍNKY PSO: A) ABSORBING WALLS, B) REFLECTING WALLS, C) INVISIBLE WALLS.</i>	41
OBR. 3.6	<i>VÝVOJOVÝ DIAGRAM ALGORITMU PSO.</i>	42
OBR. 4.1	<i>OPTIMALIZOVANÝ EBG VLNOVOD METODOU GA.</i>	46
OBR. 4.2	<i>OPTIMALIZOVANÝ EBG VLNOVOD METODOU PSO.</i>	47
OBR. 4.3	<i>MOTIV HORNÍ STRANY DESKY PRO LEPTÁNÍ EBG VLNOVODU.</i>	48
OBR. 4.4	<i>ROZPTYLOVÉ PARAMETRY MODELU PARALLEL-PLATE VLNOVODU.</i>	49
OBR. 4.5	<i>MOTIV HORNÍ STRANY DESKY PRO LEPTÁNÍ PARALLEL-PLATE VLNOVODU.</i>	49
OBR. 4.6	<i>ROZPTYLOVÉ PARAMETRY REALIZOVANÝCH VLNOVODŮ: A) ČINITEL ODRAZU S_{11}, B) ČINITEL PŘENOSU S_{21}.</i>	50
OBR. 7.1	<i>ROZPTYLOVÉ PARAMETRY REALIZOVANÝCH STRUKTUR MĚŘENÉ V OBOU SMĚRECH: A) ČINITEL ODRAZU S_{11}, B) ČINITEL PŘENOSU S_{21}.</i>	57

6.3 Seznam tabulek

TAB. 2.1	<i>ROZMĚRY DÍLČÍCH ČÁSTÍ MODELU EBG STRUKTURY.</i>	14
TAB. 2.2	<i>ROZMĚRY DÍLČÍCH ČÁSTÍ MODELU VÝKONOVÉHO DĚLIČE.</i>	21
TAB. 2.3	<i>ROZMĚRY PRVNÍHO MODELU PLANÁRNÍHO VLNOVODU.</i>	27
TAB. 2.4	<i>ROZMĚRY ZKOSENÍ A RÁDIUS PRO DRUHÝ A TŘETÍ MODEL.</i>	27
TAB. 3.1	<i>VÝSLEDKY OPTIMALIZACE EBG VLNOVODU METODOU GA.</i>	39
TAB. 3.2	<i>VÝSLEDKY OPTIMALIZACE EBG VLNOVODU METODOU PSO.</i>	44

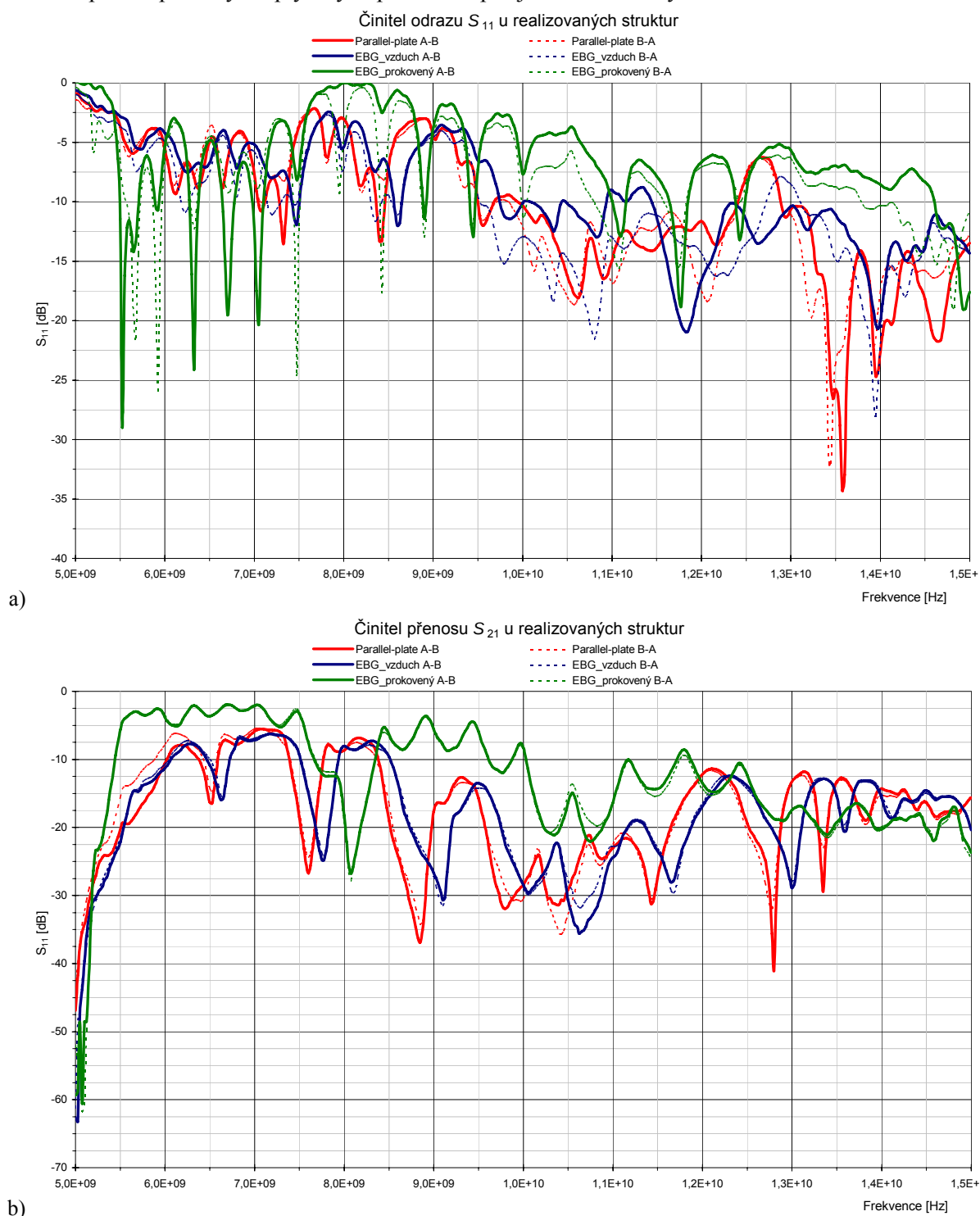
6.4 Seznam použitých zkratek a symbolů

S_{11}	rozptylový parametr - činitel odrazu na vstupu dvojbranu,
S_{21}	rozptylový parametr - činitel přenosu dvojbranu ze vstupu na výstup,
S_{22}	rozptylový parametr - činitel odrazu na výstupu dvojbranu,
E	intenzita elektrického pole,
$P_{\text{port}}^{\text{bw (fw)}}$	výkon elektromagnetické odražené (dopadající) vlny,
EBG	materiál s elektromagnetickým zádržným pásmem,
Q	činitel jakosti,
k	vlnové číslo,
ω	úhlový kmitočet,
λ	vlnová délka,
λ_g	délka vlny v substrátu,
$\mathbf{G}$	mřížkový vektor,
TE	transverzálně elektrická vlna (příčně elektrická),
TM	transverzálně magnetická vlna (příčně magnetická),
r/a	poměr velikosti poloměru kruhových defektů ke vzdálenosti jejich středů,
FDFE	metoda konečných prvků v kmitočtové oblasti,
TDFE	metoda konečných prvků v časové oblasti,
ϵ_r	relativní permitivita,
μ_r	relativní permeabilita,
PSV	poměr stojatých vln
GA	genetické algoritmy,
PSO	metoda roje částic.

7 PŘÍLOHA

7.1 Změřené rozptylové parametry realizovaných struktur

Doplněné průběhy rozptylových parametrů pro jednotlivé směry buzení.



Obr. 7.1 Rozptylové parametry realizovaných struktur měřené v obou směrech: a) činitel odrazu S_{11} , b) činitel přenosu S_{21} .