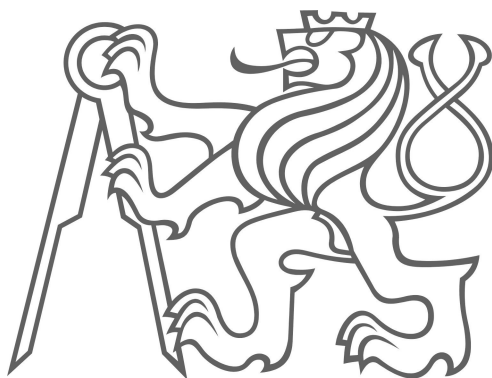


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Václav Kotlan

**ANALÝZA OTEVŘENÝCH PLANÁRNÍCH VEDENÍ
BUZENÝCH REÁLNÝM ZDROJEM**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Radioelektronika

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, září 2011

OBSAH

1 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....	5
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	9
3 METODY ZPRACOVÁNÍ	9
4 VÝSLEDKY.....	10
4.1 Štěrbínové vedení	10
4.2 Přeslech mezi štěrbinovými vedeními	11
4.3 Štěrbínové vedení se spodní metalizací a jeho přeslech	12
5 ZÁVĚR.....	13
6 Seznam v tezích použité literatury	14
7 Seznam prací disertanta	18
SUMMARY	20
RESUMÉ	20

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Planární mikrovlnná vedení jsou nezbytnou součástí dnešních mikrovlnných obvodů, ty tvoří základní část většiny vysokofrekvenčních zařízení. Jedna z prvních prací, která se věnovala analýze páskového vedení (mikropáskového) a vytvoření jeho náhradního obvodu byla publikována již v roce 1955 [1].

Díky dalšímu rozvoji mikrovlnné techniky se začaly postupně uplatňovat i další typy vedení, např. štěrbínové [2, 3]. Zanedlouho poté ukázala další publikace možnost výpočtu dispersních charakteristik na štěrbínovém vedení pomocí Galerkinovy metody aplikované ve spektrální oblasti, teoreticky s libovolným počtem básových funkcí [4].

V roce 1971 byl v práci [5] ukázán nový způsob výpočtu dispersních charakteristik pro stíněné mikropáskové vedení. V roce 1978 byla publikována práce [6], ve které se autor detailně věnuje studiu mikropáskového vedení. Výsledkem byl popis jednotlivých vázaných vidů, jejich dispersních charakteristik a rozložení elektrického pole na tomto mikropáskovém vedení. V jeho práci byl v dispersních charakteristikách vymezen tzv. region vyzařování, tedy kmitočtová oblast, ve které nedochází pouze k vedení vlny ve formě vázaných vidů, ale i k jejímu vyzařování. V roce 1979 pak vyšla souhrnná kniha s názvem „Microstrip Lines and Slotlines“ [7], která uceleně předkládala dosavadní znalosti o mikropáskovém a štěrbínovém vedení.

V roce 1986 další autoři ve své práci [8] již detailněji zaměřují na fyzikální popis vyzařování a zmiňují se o nefyzikálnosti některých matematických řešení. Nefyzikální řešení byla definována jako taková, která mají sice teoretická matematická řešení, ale která nesplňují podmínky, které by umožnily existenci těchto vln.

Důležité poznatky především o spektrální metodě, která se začala běžně používat pro analýzu planárních vedení, byly shrnuty i v následujících monografiích C. A. Balanise [9], T. Itoha [10] a R. E. Collina [11].

Od počátku devadesátých let dvacátého století se začaly objevovat práce zabývající se výpočtem celkového elektromagnetického pole na daném vedení. Bylo potřeba určit velikosti jednotlivých vázaných, ale i vytékajících vidů, aby jejich superpozicí mohl vzniknout přesný obraz pole na vedení. Jedna z prvních prací, která neukazovala pouze na výskyt vytékajících vidů, ale rovněž experimentálně ověřila celkové pole na vedení, byla publikována již v roce 1988 [12].

Do této doby se autoři zabývali pouze idealizovanou strukturou vedení. Později se v některých dalších pracích již začaly ve výpočtech

uvažovat i ztráty ve vodiči a v dielektriku na daných vedeních a jejich vliv na šíření vln na vedení [13], [14].

Vytékající vlny byly dále analyzovány několika výzkumnými skupinami z celého světa a během devadesátých let vznikla řada prací ukazujících nové poznatky v oboru, byly zdokonaleny numerické metody řešení a díky rozvoji počítačů bylo možné řešit i úlohy, které neměly analytické řešení a svou náročností byly dříve neřešitelné. Velmi hojně se využívala Galerkinova metoda (momentová metoda aplikovaná ve spektrální oblasti s totožnými báзовými a testovacími funkcemi) [15, 16]. Díky této metodě bylo možné, při znalosti Greenových funkcí, určit dispersní charakteristiky planárních vedení a podrobit je detailnímu výzkumu [17] nebo určovat vzájemnou závislost jednotlivých vidů [18 - 20]. Důležité bylo zjištění, že se za určitých podmínek může na většině typů vedení šířit vázaná vlna společně s vytékající [21], což bylo v řadě případů ověřováno i jednoduchým ručním měřením intenzity elektrického pole v určitých bodech na vedení [22]. Další práce z roku 1998 pak definuje horní mezní kmitočety pro vázaný vid a prezentuje novou vytékající vlnu nalezenou na šterbinovém vedení [23].

Některé publikace se danými planárními vedeními zabývaly z pohledu obvodového a analyzovaly je jako vedení s otevřeným nebo zkratovaným koncem, jako například práce [24], která touto cestou analyzuje šterbinové vedení.

Nedílnou a podstatnou částí výzkumu otevřených planárních vedení byly i Greenovy funkce [11]. Greenovy funkce jsou nezbytné pro výpočet rozložení elektromagnetického pole na planárních vedeních. Ve své podstatě reprezentují odezvu na Dirackův impuls a tedy vztah mezi zdrojem a výsledným polem, které tento zdroj vybudí. Vznikaly proto práce, které se primárně těmito funkcemi zabývaly [25], [26] a snažily se najít nová jednoduchá analytická vyjádření či způsoby řešení [27]. Později byly Greenovy funkce pro šterbinové vedení s homogenním substrátem odvozeny v uzavřené formě [28].

V roce 1998 byla prezentována nová metoda výpočtu, která zahrnuje všechny vidy na vedení včetně výpočtu pole, které je způsobeno přímým vyzařováním zdroje, tzv. full-wave metoda [29]. Prakticky jde o řešení vlnové rovnice s nenulovou stranou reprezentující zdroj, tedy zahrnující zdroj přímo do výpočtu. Díky tomuto přístupu bylo možné určit samostatně pole způsobené jednotlivými vidy, ale i celkové pole, které vznikne na vedení po zapnutí zdroje.

Od roku 1999 následovala řada prací používající tuto metodu především na mikropáskovém vedení. Nejprve se autoři zabývali způsobem

výpočtů jednotlivých vidů a reziduálního vyzařování zdroje [30, 31] a aplikací tohoto výpočtu. Poté provedli vlastní výpočet vlny na vedení (proudu tekoucím mikropáskem) [32]. Podobná analýza byla udělána i na různých modifikacích mikropáskového vedení jako je například stíněné mikropáskové vedení [33 - 35], vedení s vrstveným dielektrikem [29, 36] a páskové stíněné vedení s dvojím dielektrikem a se vzduchovou mezerou [37]. Vývojem jednotlivých vidů na zmíněném mikropáskovém vedení s rostoucí frekvencí se detailně zabývala práce [38], kde byly popsány přechody mezi vázanou vlnou a mezi vlnami vytékajícími do prostoru i do substrátu. Dále byl ukázán podstatný vliv šířky mikropásku na chování proudu excitovaného zdrojem do takového vedení [39, 40]. Ve stejném roce (2002) byly prezentovány výsledky výpočtu celkového elektrického pole v substrátu stíněného mikropáskového vedení [41].

Souhrnná práce zabývající se základními efekty vytékajících vln na mikropáskovém vedení a jejich popisem byla publikována v roce 2003 [42]. Pro analýzu byla použita full-wave metoda a pomocí numerických výpočtů bylo zobrazeno elektrické pole na vedení. Vliv vyzařování byl podrobně zkoumán a výsledky byly podloženy i výpočty pomocí geometrické optiky. Výsledkem pak byly i vyzařovací charakteristiky mikropáskového vedení.

O rok později byla prezentována autory z Katedry elektromagnetického pole ČVUT v Praze práce týkající se plně stíněného štěrbínového vedení se spodním pokovením [43]. V této publikaci byl ukázán princip výpočtu dispersních charakteristik pro dané vedení, včetně zobrazení elektrického pole uvnitř tohoto stíněného vlnovodu. Byly publikovány dispersní charakteristiky vázaného vidu a třech vyšších sudých vidů včetně výpočtu charakteristické impedance pro zkoumané frekvenční pásmo. Ve stejném roce se stejní autoři podobnou formou zabývají štěrbínovým vedením a štěrbínovým vedením se spodním pokovením [44]. V této době byla publikována disertační práce [45], ve které autor detailně rozebírá výpočty šíření vln nejen na různých typech štěrbínových vedení, ale i na dvěma typech vedení mikropáskových. Celkem autor uvažuje 18 typů vedení, pro které jsou odvozeny Greenovy funkce a sestaven software pro výpočty dispersních charakteristik, rozložení intenzity elektrického pole a charakteristických impedancí za pomoci spektrální momentové metody.

Další vývoj z oblasti planárních vedení byl prezentován v konferenčním příspěvku [46], kde se autoři zabývali sestavením náhradního obvodu mikropáskového vedení platného i na velmi vysokých kmitočtech, kde, jak je známo, ztrácí standardní teorie přenosových vedení [16] svou přesnost. Naopak v příspěvku prezentovaný náhradní obvod zahrnuje jak tzv. delta-gap zdroj, tak i vliv vytékání na vysokých kmitočtech. Autoři

dokonce uvádějí, že právě na těchto vyšších kmitočtech má daný náhradní obvod vyšší přesnost než na nižších frekvencích. Kompletní náhradní obvod mikropáskového vedení a podrobnou analýzou byl publikován až v roce 2006 [49].

Dalším krokem v analýze planárních obvodů byl výpočet pomocí již známe full-wave metody na dvou paralelních mikropáskových vedeních. Cílem prací [48], [49] byl výpočet přeslechu z jednoho pásku na druhý díky jejich vzájemné vazbě na mikrovlnných kmitočtech. Na těchto kmitočtech již standardní teorie přenosových vedení [16] není zcela platná, protože neuvažuje vliv vytékající a residuální vlny. V daných pracích byly odvozeny vztahy pro výpočet pole (proudu tekoucího v pásku) konfigurace dvou paralelních mikropáskových vedení. Jedním, které je napájeno zdrojem a slouží samostatně k přenosu. Druhým, do kterého se indukují proud z prvního vedení díky jeho blízkosti. Numerické výsledky ukázaly, že přeslech má na fungování spoje velmi podstatný vliv a může mít až destruktivní účinky pro přenos dat, nebo může zvětšovat chybovost při digitálním přenosu.

Většímu přiblížení k reálnému použití přispěla práce, která bere v úvahu fyzické parametry napájecího konektoru pro mikropáskové vedení [50]. Napájecí konektor je zde modelován v podobě koaxiálního kabelu, který má střední vodič připojen spodem přes dielektrikum kolmo k pásku. Stínění je spojeno se spodním pokovením tak, jak tomu obvykle v praxi bývá při napájení koaxiálním kabelem. Výsledky uvedené v této práci ukazují na naprostou shodu v chování vln s vlnami buzenými teoretickým delta-gap zdrojem, který byl dosud používán.

Dalším podstatným krokem k poznání všech zákonitostí vedení vln na planárních vedeních bylo publikování následujícího konferenčního příspěvku [51] v roce 2006. Autoři zde prezentují výsledky full-wave analýzy na mikropáskovém vedení s uvažováním ztrát ve vodiči, ale i v dielektriku. Ukázalo se, že i přiměřené ztráty, které nutně musí mít každé vyrobené vedení mají vliv na vedenou vlnu.

Ve stejném roce byl publikován příspěvek zabývající se šířením signálu po mikropáskovém a stíněném mikropáskovém vedení v časové oblasti [52]. Šlo především o výzkum vlivu daných vedení na přenášené pulsy o délce stovek piko sekund. Protože takto krátký puls se skládá z velkého množství frekvenčních složek a většinou obsahuje i kmitočty, na kterých existují výrazné residuální a vytékající vlny, dochází k deformaci pulsu na vedení.

Všechny dosud popsané práce používající full-wave analýzu se zabývaly pouze aplikací na standardní typ mikropáskového vedení. V roce 2007 byl ovšem prezentován příspěvek [53], který se zabývá excitací zdroje

do periodicky přerušovaného mikropáskového vedení a to i stíněného. Práce, která se touto problematikou zabývá detailně vyšla od stejných autorů v roce 2009 [54]. Od té doby vznikla řada prací na téma periodicky upravených vedení. Takovéto struktury nacházejí řadu uplatnění při návrhu planárních filtrů nebo antén s vytékající vlnou.

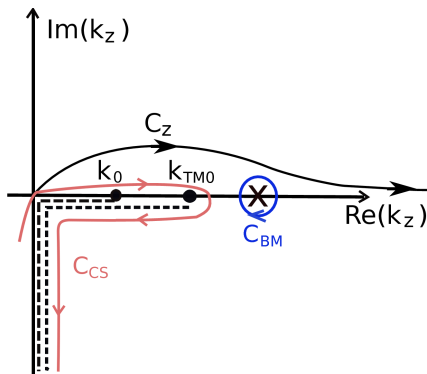
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem této práce je modifikovat full-wave analýzu, která vychází z momentové (Galerkinovy) metody tak, abychom mohli analyzovat chování elektromagnetické vlny na vedeních štěrbinového typu a doplnit tak dosavadní výsledky, které jsou dosud získávány zejména řešením homogenní vlnové rovnice (beze zdroje). Takto můžeme získat řešení popisující jednotlivé vidy a ostatní složky pole i v blízkosti zdroje. Protože v inženýrské praxi jsou planární vedení používána pro přenos na poměrně krátké vzdálenosti, hraje přítomnost zdroje signálu podstatnou roli. Znalost chování vln v blízkosti zdroje je důležitá nejen pro vlastní návrh daných vedení, ale i pro rozšíření obecného poznání v oblasti buzení vln na planárních vedeních.

3. METODY ZPRACOVÁNÍ

Jádrem přístupu, který byl zvolen pro studium a popis vedení v této práci, je metoda momentů ve spektrální oblasti s využitím stejných bázeových a testovacích funkcí – Galerkinova metoda [10]. Za pomoci nového full-wave přístupu, který tuto metodu využívá, jsme schopni změnou integrační dráhy ve spektrální oblasti (např. viz obr. 3.1) vypočítat jednotlivé složky pole (vázané vidy, spojité spektrum, vidy vytékající do substrátu, vidy vytékající do prostoru, residuální vlny) na vedení, případně celkovou vlnu. Dále je možné najít i nefyzikální matematická řešení některých vidů a parametricky lze pozorovat mechanismus jejich vzniku, tedy získání fyzikálního významu.

Nejprve byl analyticky odvozen full-wave matematický model pro popis daných vedení. Tento model byl následně naprogramován v jazyce Python. Pro konkrétní parametry vedení je takto možné vypočítat elektrické pole (resp. napětí) celkové vlny, případně její jednotlivé složky, podél vedení. Takto získané výsledky byly ověřovány simulátorem elektromagnetického pole, porovnáním s výsledky vypočtenými jiným přístupem, případně proovnaný s výsledky na jiných typech vedení. Teoretický výpočet byl rovněž ověřen měřením.

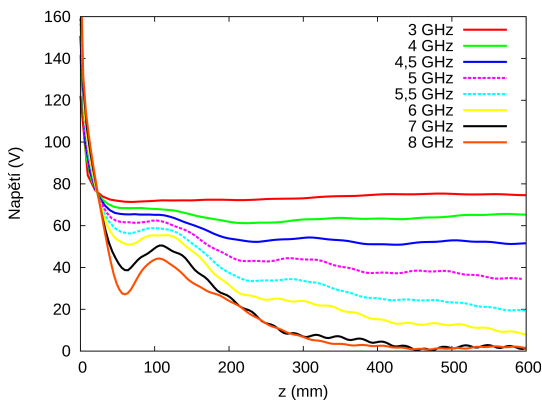


Obrázek 3.1 Příklad integračních drah pro výpočet ve spektrální oblasti (konstanty šíření). C_z je základní drahou pro výpočet celkového elektrického pole na vedení, integrační dráha C_{BM} pro výpočet pole vázaného vidu a integrační dráha C_{CS} naznačující výpočet spojitého spektra, které zahrnuje vytékající vidy a residuální vlnu.

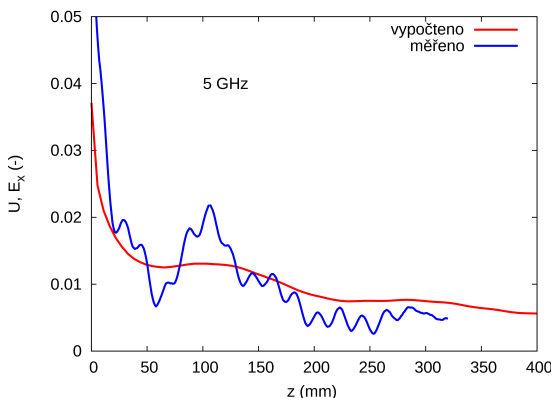
4. VÝSLEDKY

4.1 Štěrbínové vedení

V této části jsme názorně ukázali full-wave výpočet vlny na štěrbinovém vedení Galerkinovou metodou. Zvolili jsme vhodné báze funkce a ukázali odvození Greenových funkcí včetně nástinu metody pro snadnější a přesnější numerický výpočet. Ukázali jsme chování vlny na daném vedení. Vedení jsme studovali parametricky pro různé rozměry a relativní permitivitu substrátu [J2]. Jako první jsme prezentovali, jak se chová vlna v tzv. spektrální mezeře [C2], a dále porovnali s mikropáskovým vedením, které spektrální mezeru nemá [C3]. Popsali jsme, že jde o chování přirozeně spojité a nikoliv diskrétní, jak by se dalo usuzovat z dispersních charakteristik (např. obr. 4.1). Značný vliv na tvar vlny v tomto pásmu má spojité spektrum, resp. residuální vlna. Naše výsledky jsme ověřili porovnáním charakteristických impedancí spočítaném jinou metodou s napětím vázané vlny. Část výsledků byla rovněž porovnána se simulátorem CST Microwave studio. Dále bylo provedeno ověřující měření (např. obr. 4.2), včetně měření nad celým substrátem štěrbinového [C4], ale i mikropáskového vedení [C1]. Ukázali jsme, že měření nad celým substrátem je vhodné pouze u mikropáskového vedení nikoliv však pro vedení štěrbinové.



Obrázek 4.1 Příklad vypočteného napětí podél štěrbinový vedení při různých kmitočtech pro vedení s parametry: $w = 5,6$ mm, $h = 14,6$ mm, $\epsilon_r = 9,9$.

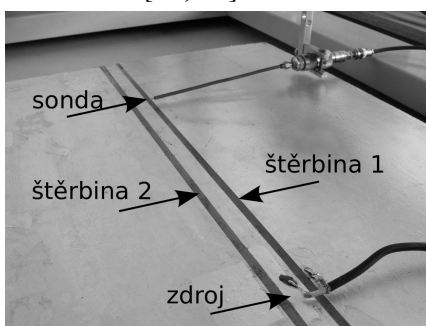


Obrázek 4.2 Normalizované naměřené elektrického pole a vypočtené napětí podél štěrbinového vedení definovaného v obr. 4.1 při kmitočtu $f = 5$ GHz.

4.2 Přeslech mezi štěrbinovými vedeními

V této části se zabýváme způsobem výpočtu přeslechu mezi dvěma paralelními štěrbinovými vedeními full-wave Galerkinovou metodou. Tato metoda umožňuje zahrnout všechny složky pole na vedení, vázané vidy i spojité spektrum, a jejich případnou dekompozici. Byly zvoleny vhodné báze funkce, Greenovy funkce byly ponechány stejné jako v předchozí kapitole. Kromě analytického odvození dané úlohy byl nastíněn i princip numerického výpočtu. Ukázali jsme chování vlny na obou paralelních vedeních. Chování vlny jsme popsali pro dvě typická vedení (s vysokou a nízkou permitivitou substrátu).

Vazbu mezi vedeními jsme studovali pro různé pracovní režimy specifikovanými danými frekvencemi. Nejzajímavější chování bylo pozorováno pro režim, kdy na vedení existoval samostatný vázaný vid. Bylo ukázáno, že do určité vzájemné vzdálenosti štěrbin se obě vedení chovají jako jedna společná přenosová cesta, neboli koplanární vedení. Ve větší vzdálenosti se pak vedení stávají samostatnými bez vzájemného vlivu. Výpočet, provedený naší metodou byl ověřen měřením (viz obr. 4.3) a komerčním simulátorem. Dále bylo provedeno rozložení do jednotlivých vidů MPM/GPOF (Matrix Pencil Method) metodou a následně porovnáno s výsledky získanými řešením homogenní vlnové rovnice. Zde popisovaná analýza přeslechů včetně výsledků a závěrů byla poprvé publikována námi v časopise [J3] a na konferencích [C5, C6].



Obrázek 4.3 Automatické měřicí zařízení včetně měřené konfigurace dvou paralelních štěrbin. Na obrázku je znázorněn zdroj ve štěrbině č. 1 a měřicí sonda.

4.3 Štěrbinové vedení se spodní metalizací a jeho přeslech

V této části byl ukázán způsob výpočtu elektromagnetické vlny excitované zdrojem na štěrbinovém vedení se spodní metalizací. Rovněž byl popsán výpočet pro přeslech mezi dvěma štěrbinovými vedeními se spodní metalizací. Bylo popsáno určení pole v aktivní i pasivní štěrbině, postup se shoduje s tím který byl ukázán v předcházející kapitole. Lze využít totožné báze funkce jako v případě štěrbinového vedení bez spodní metalizace. Greenovy funkce byly odvozeny pro danou strukturu včetně rozšíření na tři nebo vícevrstvý dielektrický substrát. Dále byly prezentovány některé numerické výsledky pro samostatné vedení i přeslech mezi dvěma paralelními. Ověření správnosti bylo provedeno rozložením do jednotlivých vidů MPM/GPOF metodou a následným porovnáním s hodnotami získanými řešením homogenní vlnové rovnice. Některá měření, provedená na štěrbinovém vedení se spodní metalizací, byla publikována v časopise [J1].

5 ZÁVĚR

V práci byla použita full-wave Galerkinova metoda k výpočtu vln na vedení. Tento nový přístup ve výpočtu vln na planárních vedeních byl námi modifikován a vůbec poprvé použit na vedení šterbinové, šterbinové se spodní metalizací a v obou případech na úlohu popisující přeslech mezi dvěma paralelními šterbinovými vedeními. V práci byl předveden i způsob výpočtu pro vícevrstvá dielektrika v substrátu daných vedení. Veškerý teoretický popis zmíněný v této práci byl implementován do počítačového kódu v jazyce Python. Numerické výsledky byly analyzovány a staly se podkladem pro stanovení dílčích závěrů. Popsaná vedení byla rovněž prakticky realizována a teoretické výsledky byly ověřeny měřením ať již podél vedení nebo nad, pod, i podél hrany substrátu. Některé výsledky byly porovnány s výsledky z komerčního simulátoru elektromagnetických polí.

Ukázali jsme, že na všech studovaných vedeních se elektromagnetická vlna v závislosti na frekvenci vyvíjí spojitě a ne tak, jak by se dalo usuzovat z dispersních charakteristik. Ty naznačují skokové změny v místech, kde nové vidy vznikají nebo zanikají. Důvodem pro analyzování šterbinového vedení je i jeho podstatný rozdíl od vedení mikropáskového z hlediska chování vln. U mikropáskového vedení existuje vázaný vid v celém frekvenčním spektru. Oproti tomu vázaný vid u šterbinového vedení má svůj horní mezní kmitočet a v určitém pásmu na něm nemusí existovat ani vázaný ani vytékající vid, který se objeví až na vyšším kmitočtu. Pomocí parametrických studií jsme ovšem ukázali, že ani v této tzv. spektrální mezeře nedochází ke skokové změně úrovně napětí, ale vlivem residuální vlny dochází k jeho spojitému poklesu. V krajním případě by na určitou vzdálenost bylo možné toto vedení využít pro komunikaci i na kmitočtu vyšším, než je horní mezní kmitočet vázaného vidu. Na šterbinovém vedení se spodní metalizací dokonce neexistuje vázaný vid vůbec. Vlivem vidů vytékajících i residuální vlny lze ovšem opět na vedení pozorovat spojitý pokles celkové vlny směrem od zdroje.

Poprvé jsme uveřejnili i tzv. full-wave model pro výpočet přeslechu mezi dvěma paralelními šterbinovými vedeními, opět se schopností dekompozice do jednotlivých složek vlny. Tento způsob plně nahrazuje jednoduchý obvodový model, který ztrácí svou přesnost i platnost na vyšších kmitočtech, kde se začínají více uplatňovat i jiné než vázané vidy. V případě šterbinového vedení se spodní metalizací je tento přístup, kvůli neexistenci vázaného vidu, jediný možný. Byly provedeny parametrické studie pro vzdálenost mezi dvěma vedeními a bylo ukázáno, že pro velmi blízké šterbiny se obě chovají jako jedno dvoušterbinové vedení, ačkoliv je napájen

umístěno nesymetricky pouze v jedné z nich. Pro velké vzdálenosti jsou obě vedení nezávislá.

Závěry a metody představené v této disertační práci rozšiřují teoretické znalosti o principech šíření vln na otevřených planárních vedeních. Kromě toho jsou některé závěry podstatné i pro inženýrskou praxi. Práce poukazuje na fenomény, se kterými se mohou setkávat návrháři mikrovlnných obvodů při realizaci těchto typů vedení. Zkoumaná vedení lze rovněž za určitých okolností využít jako antény, díky vidu vytékajícímu do prostoru, případně jako napájení dalších prvků na stejném substrátu díky vyvedení energie videm vytékajícím do substrátu. O významu zde prezentovaných výsledků svědčí i to, že základní části byly publikovány v odborných časopisech, dílčí části pak na prestižních zahraničních konferencích, i na domácích konferencích a seminářích.

Seznam v tezích použité literatury

- [1] A. A. Oliner, "Equivalent Circuits for Discontinuities in Balance Strip Transmission Line," *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 3, no. 2, 134-143, March 1955.
- [2] S. B. Cohn, "Slot Line on a Dielectric Substrate," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 17, no. 10, 768-778, April 1969.
- [3] E. A. Mariani, C. P. Heinzman, J. P. Agrios, and S. B. Cohn, "Slot Line Characteristics," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 17, no. 12, pp.1091-1096, December 1969.
- [4] T. Itoh and R. Mittra, "Dispersion Characteristics of Slotline," *Electronics Letters*, vol. 7, no. 13, pp. 364-365, July 1971.
- [5] R. Mittra and T. Itoh, "A New Technique for the Analysis of the Dispersion Characteristics of Microstrip Lines," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 19, no. 1, pp. 47-56, January 1971.
- [6] H. Ermert, "Guiding Characteristics and Radiation Characteristics of Planar Waveguides," *8th European Microwave Conference*, pp. 94-98, October 1978.
- [7] K. C. Gupta, R. Garg, and I. J. Bahl, *Microstrip Lines and Slotlines*, Artech House, Dedham, 1979.
- [8] A. A. Oliner and K. S. Lee, "The Nature of the Leakage from Higher Modes on Microstrip Line," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 1986*, vol. 86, pp. 57-60, June 1986.
- [9] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons Inc., 1989.
- [10] T. Itoh, *Numerical Techniques For Microwave And Millimeter-Wave Passive Structures*, John Wiley & Sons Inc, 1989.
- [11] R. E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, 2nd ed., IEEE Press, New York, 1991.

- [12] H. Shigesawa, M. Tsjui, and A. A. Oliner, "Conductor-backed slot line and coplanar waveguide: dangers and full-wave analyses," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 1988*, vol. 1, pp. 199-202, May 1988.
- [13] T. Rozzi, F. Moglie, A. Morini, E. Marchionna, and M. Politi, "Hybrid modes, substrate leakage, and losses of slotline at millimeter-wave frequencies," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 38, no. 8, pp. 1069-1078, August 1990.
- [14] T. Ching-Cheng, C.-K. C. Tzuang, and S. T. Peng, "Effects of metal thickness and finite substrate width on leaky waves in coupled microstrip lines," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 1992*, vol. 1, pp. 499-502, June 1992.
- [15] R.F. Harrington, *Field Computation by a moment Methods*, New York, Macmillan, 1968.
- [16] D. M. Pozar, *Microwave Engineering 3rd ed.*, Wiley, 2005.
- [17] A. A. Oliner, "New leakage effects and new dominant modes in millimeter-wave printed circuits," *23rd European Microwave Conference*, pp. 49-51, October 1993.
- [18] M. Tsuji, H. Shigesawa, and A.A. Oliner, "Simultaneous propagation of both bound and leaky dominant modes on conductor-backed coplanar strips," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 1993*, vol. 3, pp. 1295-1298, June 1993.
- [19] D. Mirshekar-Syahkal and J. Danneel, "Criteria for single mode operation of packaged coplanar waveguide circuits," *IEE Colloquium Digest on Modelling, Design and Application of MMIC's*, London, UK, June 1994.
- [20] R. Marques, F. Mesa, and N. K. Das, "Comments on the 'Criterion of leakage from printed circuit transmission lines'," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 43, no. 1, pp. 242-243, January 1995.
- [21] H. Shigesawa, M. Tsuji, and A. A. Oliner, "Simultaneous propagation of bound and leaky dominant modes on printed-circuit lines: a new general effect," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 43, no. 12, pp. 3007-3019, December 1995.
- [22] D. Nghiem, J. T. Williams, D. R. Jackson, A. A. Oliner, "Existence of a leaky dominant mode on microstrip line with an isotropic substrate: theory and measurements," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 10, pp. 1710-1715, October 1996.
- [23] J. Zehentner, J. Macháč, and M. Migliozi, "Upper cut-off frequency of the bound wave and new leaky wave on the slotline," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 46, no. 4, 378-386, April 1998.
- [24] J. Macháč, J. Zehentner, and W. Menzel, "Short and open circuited slotline," *IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference 1995*, July 1995.
- [25] F. Mesa, R. Marques, and M. Horno, "A general algorithm for computing the bidimensional spectral Green's dyad in multilayered complex bianisotropic media: theequivalent boundary method," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 39, no. 9, pp. 1640-1649, September 1991.
- [26] F. Mesa, R. Marques, and M. Horno, "An efficient numerical spectral domain method to analyze a large class of nonreciprocal planar transmission lines," *IEEE*

Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 40, no. 8, pp. 1630-1641, August 1992.

[27] F. Mesa and R. Marques, "Integral representation of spatial Green's function and spectral domain analysis of leaky covered strip-like lines," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 43, no. 4, pp. 828-837, April 1995.

[28] A. Neto and S. Maci, "Green's function for an infinite slot printed between two homogeneous dielectrics-Part I: Magnetic currents," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 7, pp. 1572-1581, July 2003.

[29] C. Di Nallo, F. Mesa, and D. R. Jackson, "Excitation of leaky modes on multilayer stripline structures," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 46, no. 8, pp. 1062-1071, August 1998.

[30] F. Mesa, C. Di Nallo, and D. R. Jackson, "The theory of surface-wave and space-wave leaky-mode excitation on microstrip lines," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 2, pp. 207-215, February 1999.

[31] D. R. Jackson, F. Mesa, M. J. Freire, D. P. Nyquist, and C. Di Nallo, "An excitation theory for bound modes, leaky modes, and residual-wave currents on stripline structures," *Radio Science*, vol. 35, no. 2, pp. 495-510, March 2000.

[32] F. Mesa, D. R. Jackson, and M. Freire, "High frequency leaky-mode excitation on microstrip line," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 12, pp. 2206-2215, December 2001.

[33] M. J. Freire, F. Mesa, C. Di Nallo, D. R. Jackson, and A.A. Oliner, "Spurious transmission effects due to the excitation of the bound mode and the continuous spectrum on stripline with an air gap," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 12, pp. 2493-2502, December 1999.

[34] F. Mesa, A. A. Oliner, D. R. Jackson, and M. Freire, "The influence of a top cover on the leakage from microstrip line," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, no. 12, pp. 2240-2248, December 2000.

[35] W. L. Langston, J. T. Williams, D. R. Jackson, and F. Mesa, "Spurious radiation from a practical source on a leaky covered microstrip line," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2001*, vol. 2, pp. 875-878, May 2001.

[36] J. Bernal, F. Mesa, F. Medina, "Analysis of leakage in multilayered microstrip lines using complex images," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2001, vol. 2, pp. 580 - 583, July 2001.

[37] F. J. Villegas, D. R. Jackson, J. T. Williams, and A. A. Oliner, "Leakage fields from planar semi-infinite transmission lines," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 4, pp. 443-454, April 1999.

[38] F. Mesa, D. R. Jackson, and M. Freire, "Evolution of leaky modes on printed-circuit lines," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 1, pp. 94-104, January 2002.

[39] F. Mesa and D.R. Jackson, "The danger of high-frequency spurious effects on wide microstrip line," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 12, pp. 2679-2689, December 2002.

[40] F. Mesa and D. R. Jackson, "The danger of high-frequency spurious effects on wide microstrip line," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2002*, vol. 2, pp. 945-948, June 2002.

- [41] W. L. Langston, J. T. Williams, D.R. Jackson, and F. Mesa, "Frequency dependent characteristics of radiation from a voltage source on a covered microstrip line," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2002*, vol. 2, pp. 949-952, June 2002.
- [42] W. L. Langston, J. T. Williams, D. R. Jackson, and F. Mesa, "Fundamental properties of radiation from a leaky mode excited on a planar transmission line," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 12, pp. 2366-2377, December 2003.
- [43] J. Zehentner, J. Macháč, and J. Mrkvica, "Dispersion characteristics of the dominant mode on a completely shielded conductor-backed slotline," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2004*, vol. 2, pp. 507-510, June 2004.
- [44] J. Macháč, J. Zehentner, and J. Mrkvica, "Visualization of leaky waves on planar transmission lines," *Mikon 2004, XV International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications*, Warszawa, Poland, vol. 3, pp. 820-823, May 2004.
- [45] J. Mrkvica, *Šíření vln na modifikovaných štěrbinových a koplánárních vedeních*, Disertační práce, ČVUT FEL, 2004.
- [46] F. Mesa, D. R. Jackson, and R. Rodriguez-Berral, "A high-frequency equivalent circuit for a gap source on a microstrip line," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2004*, vol. 2, pp. 503-506, June 2004.
- [47] R. Rodriguez-Berral, F. Mesa, and D. R. Jackson, "A high-frequency circuit model for the gap excitation of a microstrip line," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 12, pp. 4100-4110, December 2006.
- [48] J. Bernal, F. Mesa, R. Rodriguez-Berral, and D. R. Jackson, "High frequency crosstalk between two microstrip lines," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2003*, vol. 2, pp. 813-816, June 2003.
- [49] J. Bernal, F. Mesa, and D. R. Jackson, "Crosstalk between two microstrip lines excited by a gap voltage source," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 8, pp. 1770 - 1780, August 2004.
- [50] R. Rodriguez-Berral, F. Mesa, and D. R. Jackson, "High-frequency excitation of a microstrip line by a probe," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2005*, pp. 1897-1900, June 2005.
- [51] J. Bernal, F. Mesa, and D. R. Jackson, "Effects of dielectric and conductor losses on the current spectrum excited by a gap voltage source on a printed-circuit line," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2006*, pp. 1307-1310, June 2006.
- [52] W. L. Langston, J. T. Williams, D. R. Jackson, and F. Mesa, "Time-Domain Pulse Propagation on a Microstrip Transmission Line Excited by a Gap Voltage Source," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2006*, pp. 1311-1314, June 2006.
- [53] R. Rodriguez-Berral, G. Valerio, F. Mesa, P. Baccarelli, P. Burghignoli, and A. Galli, "Full-wave analysis of periodic microstrip lines excited by an aperiodic delta-gap source," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2007*, pp. 1667-1670, June 2007.
- [54] R. Rodriguez-Berral, F. Mesa, P. Baccarelli, and P. Burghignoli, "Excitation of a periodic microstrip line by an aperiodic delta-gap source," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 641-644, 2009.

Seznam prací disertanta - Práce vztahující se k disertaci

Publikace v časopisech:

[J1] J. Macháč, V. Kotlan, and M. Šnajdr, “Modes on a Conductor-Backed Slotline,” *Progress In Electromagnetics Research B* [online], Cambridge, MA, USA, vol. 9, pp. 151-164, 2008. (podíl 33%)

[J2] V. Kotlan, F. Mesa, and J. Macháč, “Numerical and Experimental Study of the Voltage Excited Along a Slotline by a Current Source,” *Radio Science*, 45, RS1004, January 2010. (podíl 33%)

[J3] V. Kotlan and J. Macháč, “High-frequency Crosstalk Between Two Parallel Slotlines,” *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Volume 4, Issue 12, p.2240–2246, December 2010. (podíl 50%)

Publikace na konferencích:

[C1] M. Houska, V. Kotlan, and J. Macháč, “Experimental verification of leaky waves on a microstrip line,” *19th International Conference Radioelektronika 2009*, Bratislava, Slovakia, pp. 157-159, April 2009. (podíl 33%)

[C2] V. Kotlan, J. Macháč, and F. Mesa, “Slotline operating within a wide frequency band: Excitation of waves by a real source,” *IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2009*, Boston, USA, pp. 137-140, June 2009. (podíl 33%)

[C3] V. Kotlan, J. Macháč, and F. Mesa, „Comparative analysis of the dispersion characteristics of a slotline and a microstrip line,“ *Asia-Pacific Microwave Conference 2009*, Singapore, December 2009. (podíl 33%)

[C4] V. Kotlan and J. Macháč, “Limitations in Measurement of Leaky Waves on Open Planar Transmission Lines,” In *Proceedings of 15th Conference on Microwave Techniques COMITE 2010*, Brno: University of Technology, Slovakia, pp. 167-169, 2010. (podíl 50%)

[C5] V. Kotlan, J. Macháč, F. Mesa, and R. Rodriguez-Berral, “Crosstalk in Parallel Slotlines,” In *Proceedings of the 2010 Asia Pacific Microwave Conference*, Yokohama, Japan, pp. 1605-1608, 2010. (podíl 25%)

[C6] V. Kotlan, J. Macháč, F. Mesa, and R. Rodriguez-Berral, “Full-wave Analysis of Two Parallel Slotlines on a Common Substrate,” *PIERS 2011*, Suzhou, China, September 2011. (podíl 25%)

[C7] V. Kotlan, “Analýza štěrbínového vedení buzeného reálným zdrojem,” In *Scientific Seminars - Proceedings from year 2007/2008*, Vol. VII., Praha: IEEE Czechoslovakia Section, 2008, str. 37-40. ISBN 80-86582-22-1. (podíl 100%)

[C8] V. Kotlan, “Analýza štěrbínového vedení buzeného reálným zdrojem,” *Příspěvek ve sborníku konference IEEE Zvůle 2008*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, str. 103–106, 2008, ISBN: 978-80-214-3709-8. (podíl 100%)

[C9] V. Kotlan, “Visualization and Measurement of Leaky Waves on a Microstrip Line,” In *Sborník příspěvků konference IEEE Králíky 2009*, Brno: VUT v Brně, FEKT, 2009, pp. 149-152. ISBN 978-80-214-3938-2. (podíl 100%)

[C10] V. Kotlan, “Measurement of Leaky Waves on Slotlines,” In *Proceedings of 8th International Conference Králíky 2010*, Brno: University of Technology, FEKT, 2010, ISBN 978-80-214-3939-2. (podíl 100%)

[C11] V. Kotlan, “Waves on Planar Transmission Lines,” In *Proceedings of 9th International Conference Vsacký Cáb 2011*, Brno: University of Technology, FEKT, 2011, ISBN 978-80-214-4319-8. (podíl 100%)

Ohlasy

Dle vědomí autora, práce dosud nebyly citovány.

SUMMARY

This thesis applies full-wave Galerkin's method for calculating of an electromagnetic field of microwave open planar transmission waveguides. This method was used by researches to calculate microstrip lines (and its modifications) only, until nowadays. However, here we show for the first time using that method to analyze slotline-type planar transmission lines. An important goal of this work is to show mathematical analysis of the slotline, conductor backed slotline including their modifications and crosstalk of two parallel lines. The way how to create a computer code according mentioned mathematical theory is also indicated.

The concrete computer code for calculation of numerical results is included to this thesis. Many of here presented theoretical results are verified experimentally. Some general conclusions about slotlines are determined from our results.

Main core of this work is divided into few chapters. Each of these chapters completely describes one specific line, including method, theoretical and measured results.

RESUMÉ

Práce aplikuje „full-wave“ Galerkinovu metodu na výpočet elektromagnetického pole na planárních mikrovlnných vedeních. Tento přístup, který byl ve světě dosud použit pouze na vedení mikropáskovém (nebo na jeho modifikacích), je zde upraven a využit pro výpočet vln na vedeních štěrbinového typu. V práci je provedena původní matematická analýza štěrbinového vedení, štěrbinového vedení se spodní metalizací včetně modifikací a rovněž vzájemného přeslechu mezi dvěma blízko sebe umístěnými vedeními. Kromě zmíněného matematického odvození jsou ukázány i vhodné postupy pro získání konkrétních výsledků převedením úlohy do strojového kódu.

Přílohou předložené práce je i počítačový program, pomocí kterého lze získat numerické výsledky. Řada výsledků je ověřena experimentálně. Z vypočtených a naměřených hodnot jsou stanoveny některé obecné závěry.

Jádro práce je rozděleno do několika kapitol, každá z nich tvoří ucelený popis daného vedení zmíněnou metodou včetně původních výsledků a závěrů.