

ANALÝZA PLANÁRNÍCH STRUKTUR POMOCÍ METODY MOMENTŮ A JEJICH OPTIMALIZACE

J. Láčik, Z. Raida

Ústav radioelektroniky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně

Abstrakt

V tomto příspěvku se zabýváme implementací analýzy planárních struktur metodou momentů a jejich optimalizací PSO algoritmy v prostředí MATLAB. Funkčnost vytvořených programů je demonstrována na planárních mikrovlnných strukturách.

1 Úvod

V současné době v rozvoji elektromagnetismu hrají hlavní roli numerické metody. Ty mohou být klasifikovány podle toho, zda vycházejí z diferenciálního nebo integrálního tvaru Maxwellových rovnic. Pro řešení diferenciálních rovnic se používá metoda konečných diferencí (*finite difference method*, FD) nebo metoda konečných prvků (*finite element method*, FEM). Integrální tvar Maxwellových rovnic se řeší nejčastěji pomocí metody momentů (*method of moments*, MoM).

2 Formulace integrální rovnice ve frekvenční oblasti a metoda momentů

Jak už bylo uvedeno v úvodu, integrální rovnice se řeší pomocí metody momentů. Dříve než se seznámíme s metodou momentů si představíme integrální rovnici pro elektrické pole (*electric field integral equation*, EFIE) ve frekvenční oblasti, která se řeší.

Nechť S označuje povrch naší analyzované, dokonale vodivé, otevřené, nebo uzavřené struktury, na kterou dopadá elektrické pole $E^i(\mathbf{r})$ indukující povrchový proud $\mathbf{J}(\mathbf{r})$. Odražené elektrické pole $E^S(\mathbf{r})$ je dáno [1]

$$\mathbf{E}^S(\mathbf{r}) = -j\omega\mathbf{A}(\mathbf{r}) - \nabla\phi(\mathbf{r}), \quad (1)$$

kde magnetický vektorový potenciál je definován jako

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int_S \frac{\tilde{\mathbf{G}}_A(\mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}')}{R} dS', \quad (2)$$

a skalární potenciál jako

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_S \frac{G_V(\mathbf{r}') q(\mathbf{r}')}{R} dS'. \quad (3)$$

Permitivita resp. permeabilita obklopujícího prostředí je označena ϵ resp. μ , $R=|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|$ je vzdálenost mezi obecně umístěným bodem pozorování \mathbf{r} a zdrojovým bodem \mathbf{r}' na S . Symbol $\tilde{\mathbf{G}}_A$ označuje dyadickou Greenovu funkci a symbol G_V označuje skalární Greenovu funkci. Povrchový náboj o hustotě q je svázán s divergencí povrchového proudu rovnicí kontinuity

$$j\omega q(\mathbf{r}) = -\nabla \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}). \quad (4)$$

Na dokonale vodivém povrchu S pro dopadající a odraženou vlnu platí následující okrajová podmínka:

$$\left[\mathbf{E}^i(\mathbf{r}) + \mathbf{E}^S(\mathbf{r}) \right]_{\text{tan}} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{r} \in S. \quad (5)$$

Teď je možné rovnici (1) po vnučení okrajové podmínky (5) vymizení tečné složky dopadající a odražené intenzity elektrického pole přepsat do tvaru

$$\left[\mathbf{E}^i(\mathbf{r}) \right]_{\text{tan}} = \left[\mathbf{A}(\mathbf{r}) + \nabla\phi(\mathbf{r}) \right]_{\text{tan}}. \quad (6)$$

Rovnice (1) se řeší metodou momentů a úkolem je nalézt rozložení hustoty proudu na analyzované struktuře.

Princip řešení integrálních rovnic metodou momentů je založen na tom, že hledaná neznámá funkce v integrandu integrálu je aproximována vhodně zvolenými bázovými funkcemi a neznámými aproximačními koeficienty. Metodou momentů se tedy integrální rovnice převede na soustavu lineárních algebraických rovnic. Rozložení hustoty proudu může být tedy rozepsáno pomocí prostorových bázových funkcí $\mathbf{f}_n(\mathbf{r})$

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = \sum_{n=1}^{N_s} I_n \mathbf{f}_n(\mathbf{r}), \quad (7)$$

kde je I_n je neznámý koeficient a N_s počet neznámých koeficientů.

Pro popis analyzované struktury je nevhodnější použít trojúhelníkovou diskretizační síť, která může lépe aproximovat povrch struktury. Pro tuto síť se nejčastěji používají RWG (Rao-Wilton-Glison) prostorové bázové funkce. Jedná se o lineární vektorové funkce, definované nad trojúhelníkovým párem [1].

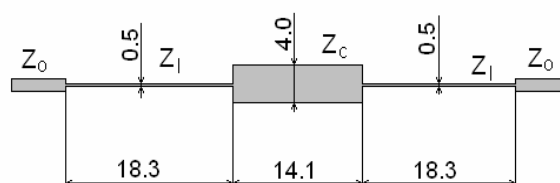
3 Implementace a numerické výsledky

V prostředí MATLAB jsme vytvořili program AMOM, který slouží pro analýzu N -portových planárních mikropáskových obvodů [2] (N označuje počet bran obvodu) ve frekvenční oblasti metodou momentů. Analyzovaná planární struktura je aproximována trojúhelníkovou sítí a RWG funkce jsou použity jako bázové funkce pro aproximaci neznámé. Greenovy funkce vystupující ve vztazích (2) a (3) jsou aproximovány řadou podle [3]. Vzhledem k tomu, že integrály Greenových funkcí nelze vyčíslit analyticky, byl pro jejich vyčíslení použit přístup popsáný v [4].

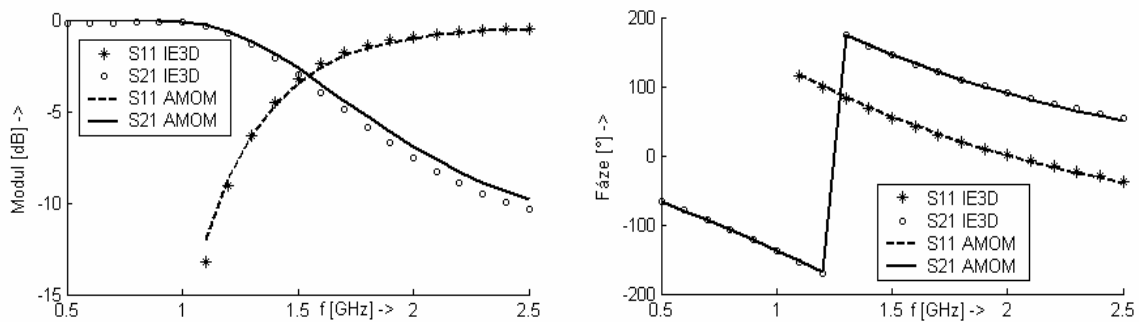
Vstupem programu AMOM jsou textový soubor, ve kterém je analyzovaná struktura popsána polynomy, frekvence, parametry substrátu, počet a typ použitých portů. Výstupem programu jsou S-parametry, které charakterizují analyzovanou strukturu. Tyto S-parametry byly vypočteny z rozložení hustoty proudu.

Použití programu AMOM si ukážeme na dvou příkladech (dvou a jedno portových strukturách) a jeho přesnost bude porovnána s komerčním programem IE3D od firmy ZELAND.

Prvním příkladem je planární filtr (obr. 1). Analyzovaný planární filtr typu dolní propust, který je složen z úseků vedení Z_1 a Z_c , je vložen mezi vedení o charakteristické impedanci Z_0 . Na obr. 2 jsou uvedeny výsledky analýzy programem (AMOM) a analýzy, která byla provedena komerčním programem IE3D od firmy ZELAND. Z vynesných hodnot je vidět, že výsledky obou analýz se velmi dobře shodují.

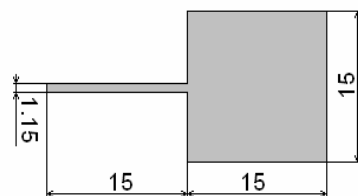


Obr. 1: Analyzovaný planární filtr typu dolní propust. Tloušťka substrátu $t=0,508$ mm a relativní permitivita $\epsilon_r=2,33$.

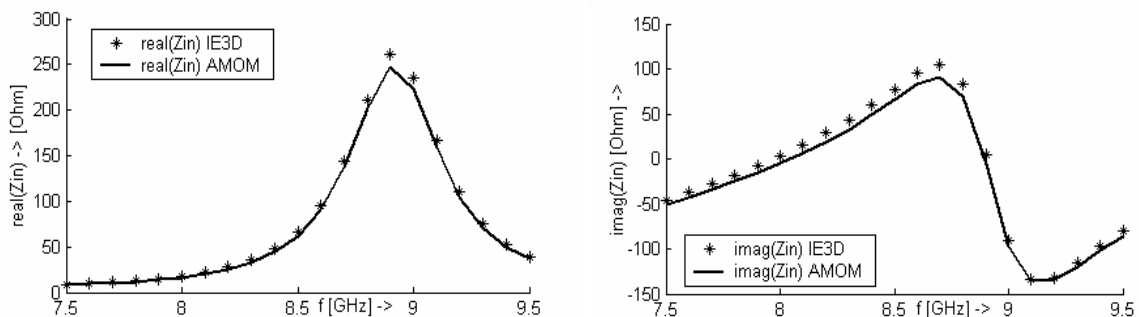


Obr. 2: Porovnání výsledků analýzy planárního filtru z obr. 1.

Druhým příkladem je flíčková anténa, která je umístěna ve výšce 1,5 mm na reflektoru (obr. 3) a je napájena mikropáskovým vedením. Vypočtené hodnoty reálné a imaginární části vstupní impedance jsou zobrazeny na obr. 4. Z obrázku je patrné, že opět vypočtené hodnoty se velmi dobře shodují. Větší odchylky jsou jen v oblasti extrémů reálné nebo imaginární části vstupní impedance.



Obr. 3: Analyzována flíčková anténa umístěná 1.5 mm nad reflektorem, relativní permitivita $\epsilon_r=1$.



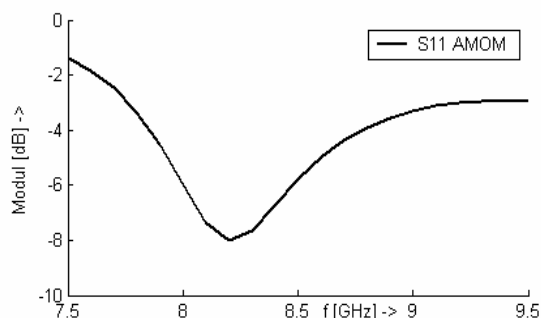
Obr. 4: Reálná a imaginární část vstupní impedance flíčkové antény (obr. 3).

4 Optimalizace

V případě návrhu mikropáskových obvodů nebo antén se používají jen přibližné vztahy (přesné vztahy nejsou známy). Proto je nutné navrženou strukturu analyzovat, např. výše uvedeným programem, pro ověření parametrů. Často se ale stává, díky přibližným návrhovým vztahům, že námi navržená struktura nemá ty parametry, které jsme požadovali. Proto je nutné ji optimalizovat. Proto jsme dále implementovali v prostředí MATLAB globální optimalizační algoritmus PSO (*Particle Swarm Optimization*) [5], který spolupracuje s programem AMOM. Tento algoritmus pracuje na principu včelího roje a je zpravidla efektivnějším nástrojem pro nalezení optima poblíž globálního minima než např. genetické algoritmy.

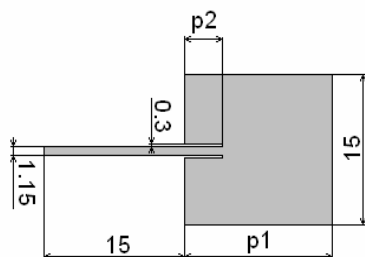
Použití PSO algoritmu předvedeme na optimalizaci flíčkové antény (obr. 3), kterou impedančně přizpůsobíme na kmitočet 8.9 GHz na 50 Ω . Nebudeme ale pracovat přímo s hodnotou vstupní impedance, ale s činitelem odrazu (parametr *S11*). Modul činitele odrazu flíčkové antény z obr. 3 je zobrazen na obr. 5. Jako optimalizační kritérium si zvolíme, aby modul činitele odrazu byl menší než

-25 dB tj. $|S_{11}| < -25$ dB. Impedanční přizpůsobení můžeme dosáhnout vnořením mikropáskového vedení do flíčku antény a následnou změnou délky flíčku, a proto tyto parametry budeme optimalizovat. Délku flíčku označíme proměnou $p1$ a hloubku vnoření mikropáskového vedení proměnou $p2$ (obr. 6). Rovněž si zvolíme, v jakých mezích mohou být tyto parametry měněny. Volíme: $p1 = 13$ až 17 mm, $p2 = 2$ až 6 mm.

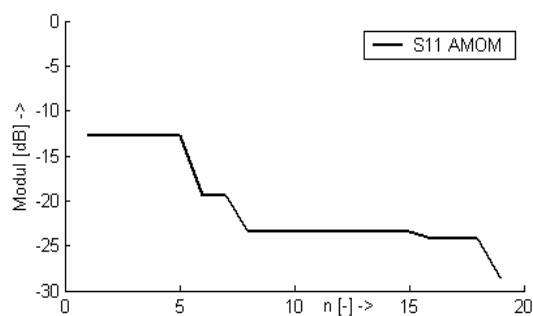


Obr. 5: Činitel odrazu (parametr S_{11}) flíčkové antény z obr. 3.

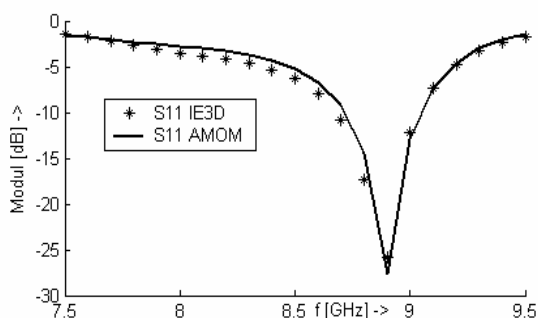
Průběh optimalizace je zachycen na obr. 7, kde můžeme vidět vývoj modulu činitele odrazu nejlepšího jedince v závislosti na počtu běhů n . Optimalizace byla ukončena v 19. běhu, kdy byl splněn náš požadavek $|S_{11}| < -25$ dB na kmitočtu 8.9 GHz. Výsledky optimalizace jsou následující parametry: $p1 = 15,62$ mm a $p2 = 4,41$ mm. Průběh činitele odrazu zoptimalizované struktury (parametr S_{11}) v závislosti na frekvenci je zobrazen na obr. 9.



Obr. 6: Optimalizovaná flíčková anténa.



Obr. 7: Závislost modulu činitele odrazu u nejlepšího jedince optimalizace na n -tém běhu.



Obr. 8: Modul činitele odrazu zoptimalizované flíčkové antény (obr. 6).

5 Závěr

V tomto příspěvku jsme se zabývali implementací analýzy planárních struktur metodou momentů a jejich optimalizací PSO algoritmy v prostředí MATLAB. Funkčnost vytvořených programů byla demonstrována na mikrovlnných obvodech a anténách a jeho přesnost byla porovnána s komerčním programem.

Poděkování

Tato práce byla podporována grantem FRVŠ číslo 2479/2005 a granty GAČR číslo 102/03/H086 a 102/04/1079.

Literatura

- [1] Rao, S. M., Wilton, D. R., Glisson, A. W. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1982, vol. 30, no. 5., p. 409 – 418.
- [2] GUPTA, K. C., HALL, P. S. *Analysis and Design of Integrated Circuit Antenna Modules*, Wiley 1999.
- [3] ČERNOHORSKÝ, D., RAIDA, Z., ŠKVOR, Z., NOVÁČEK Z. *Analýza a optimalizace mikrovlnných struktur*. Brno: VUTIUM Publishing, 1999.
- [4] LÁČÍK, J., RAIDA Z. A Novel Approach to the Efficient Analysis of Antennas and Scatterers, *Radioelektronika 2005*, UREL FEKT VUT v Brně, p. 219-222.
- [5] ROBINSON, J., RAHMAT-SAMII, Y. Particle swarm optimization in electromagnetics. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, vol. 52, no. 2, p. 397 – 407.

Jaroslav Láčik
Ústav radioelektroniky
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně
Purkyňova 118
602 00 Brno
e-mail: xlacik00@stud.feec.vutbr.cz

Zbyněk Raida
Ústav radioelektroniky
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně
Purkyňova 118
602 00 Brno
e-mail: raida@feec.vutbr.cz