

## Нова метода за одређивање резонантне учестаности сплит-ринг резонатора у зависности од угла између прореза

**Руководилац пројекта:** др Бранка Јокановић

**Одговорно лице:** др Бранка Јокановић

**Аутори:** Војислав Милошевић, Бранка Јокановић, Институт за физику Београд

**Развијено:** у оквиру пројекта технолошког развоја ТР-11009

**Година:** 2010.

**Примена:** 01.02. 2011.

### Кратак опис

Развијена је метода за одређивање резонантне учестаности сплит-ринг резонатора. Метода се заснива на еквивалентном моделу који користи вишепроводничке водове. На основу модела резонантна учестаност се може прорачунати помоћу аналитичких израза за вишепроводничке водове, или коришћењем неког од програмских пакета за решавање микроталасних кола (нпр. Microwave Office). Могуће је моделовати различите углове између процепа у два прстена који чине резонатор (најчешће је угао између процепа  $180^\circ$ ).

#### Техничке карактеристике:

У модел је потребно унети дужину вода и његове примарне параметре, односно  $[L]$  и  $[C]$  матрице (уколико не разматрамо губитке). Ови параметри одређени су геометријом вода и могу се добити из програма за квазистатичку анализу као што је LINPAR [1]. Такође је могуће урачунати капацитивности на процепима. Тачност модела зависи од односа растојања између проводника резонатора (у једном попречном пресеку) и његовог пречника, и у нашим испитивањима добили смо релативну грешку резонантне учестаности мању од 3% када је пречник пет пута већи.

#### Техничке могућности:

Предложени метод могуће је користити за одређивање резонантних учестаности за разне углове између процепа код broadside-coupled као и edge-coupled сплит-ринг резонатора. Потенцијално је могуће и применити га на вишеструке сплит-ринг резонаторе, који се састоје од више од два прстена.

**Реализатори:** Институт за физику, Београд.

#### Корисници

Институт за физику, Београд.

#### Подтип решења:

Прототип, нова метода, софтвер, стандардизован или атестиран инструмент, нова генетска проба, микроорганизми (уз доказ) (M85)

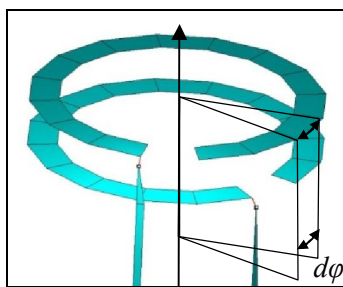
Сплит-ринг резонатор је један од најкоришћенијих елемената у метаматеријалима. Показано је да је помоћу њих могуће добити материјал с ефективном негативном пермеабилношћу у околини резонантне учестаности [2]. Због тога је познавање тих учестаности битно за пројектовање. Сплит-ринг резонатори били су употребљени за прве експерименталне реализације медијума с негативним индексом рефракције. Поред оваквих примена, сплит-ринг је могуће користити и као обичан микроталасни резонатор, нпр. у пројектовању филтара са смањеним димензијама [3].

Из свега наведеног следи да нам је аналитички модел сплит-ринга потребан у циљу лакшег пројектовања, оптимизације, као и бољег разумевања особина метаматеријала и других структура у којима се он користи. У литератури се као еквивалентни модел најчешће спомиње резонантно LC коло, међутим он није довољно добар када таласна дужина постане упоредива с обимом прстена, а експериментални резултати показују да се то дешава већ на првој резонанси – обим прстена тада је приближно једнак половини таласне дужине.

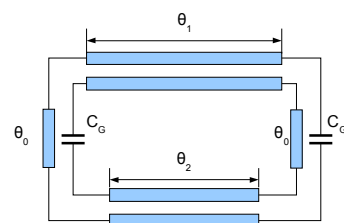
### Модел сплит-ринг резонатора помоћу водова

На слици 1а приказан је изглед broadside-coupled сплит-ринг резонатора у програму за нумеричко решавање електромагнетских проблема WIPL-D, који смо користили за поређење са резултатима нашег модела. Постоји такође и проводна равна испод целе структуре, која је на слици изостављена зарад јасноће.

Ако посматрамо сегмент који одговара елементарном углу  $d\varphi$ , приметићемо да се он састоји од два проводника и масе испод, и према томе је идентичан сегменту двопроводничког микрострип вода. На основу тога закључујемо да се цео сплит-ринг резонатор може представити као коло које се састоји од два одсечка двопроводничког вода одговарајућих параметара и електричних дужина  $\theta_1$  и  $\theta_2$  (које зависе од угла између процепа), капацитивности које моделују процепе, и обичних водова дужине  $\theta_0$  који компензују дужину процепа на другом прстену (слика 1б).



(а)



(б)

Слика 1. (а) Сплит-ринг резонатор (проводна равна изостављена са слике)  
(б) Еквивалентно коло

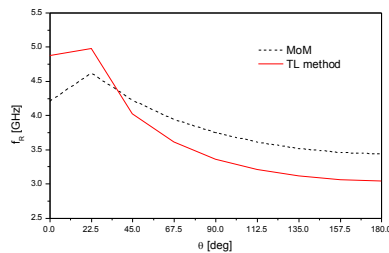
Простирање таласа на воду у квазистатичкој апроксимацији одређено је његовим примарним параметрима, што су у случају двопроводничког вода без губитака  $[L]$  и  $[C]$  матрице. За прорачун ових вредности користили смо програм LINPAR. Добијене вредности искористили смо за прорачун кола са слике 1б у програму Microwave Office.

Треба напоменути да је овај модел, у суштини, аналитички, јер се заснива на познатим изразима за двопроводничке водове, и по потреби би могао бити обављен и ручно. Ограничења модела произилазе из ограничења квазистатичког приступа анализи водова. Наиме, узима се у обзир само спрега која постоји између суседних секција вода, другим речима, не разматра се утицај једне секције на другу која се налази, нпр. на супротној страни прстена. Уколико су димензије попречног пресека једне секције, односно растојање између прстенова и висина изнад проводне равни довољно мали у односу на полупречник, сматрамо да је оваква апроксимација оправдана зато што ће поменуте спреге између несуседних елемената бити занемарљиве.

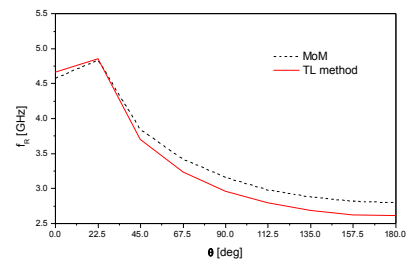
## Резултати

Применили смо модел за одређивање резонантне учестаности сплит-ринга у зависности од угла између процепа, у корацима од  $22,5^\circ$ . Резултати су поређени са нумеричком симулацијом у програмском пакету WIPL-D.

Почели смо са broadside-coupled сплит-рингом пречника  $d=3.35\text{mm}$ , на двослојном супстрату пермитивности и дебљине  $\epsilon_1=2.2$ ,  $h_1=1.5748\text{mm}$  и  $\epsilon_2=10.2$ ,  $h_2=0.635\text{mm}$  ( $h=h_1+h_2=2.21\text{mm}$ ). Ове вредности не задовољавају услов мале висине у односу на полупречник, али одговарају параметрима коришћеним у нашем претходном раду. Резултати су приказани на слици 2а. Иако постоји значајно неслагање, облици крива су слични, па смо наставили са тањим супстратом, висине  $h_1=0.762\text{mm}$  и  $h_2=0.254\text{mm}$  ( $h=1.01\text{mm}$ ), приказаним на слици 2б. Видимо да је слагање драстично боље, што подржава нашу дискусију о ограничењима модела.

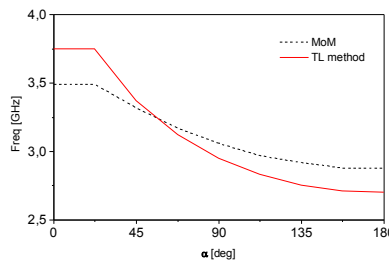


(a)

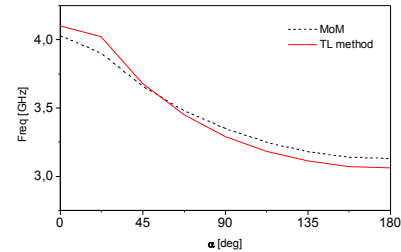


(b)

Слика 2: Broadside-coupled сплит-ринг: (a) дебљи супстрат ( $h=2.21\text{mm}$ ) и (b) тањи супстрат ( $h=1.01\text{mm}$ ).



(a)



(b)

Слика 3: Edge-coupled сплит-ринг: (a) тањи супстрат ( $h=2.21\text{mm}$ ) и (b) дебљи супстрат ( $h=1.01\text{mm}$ ).

Такође смо тестирали наш модел за edge-coupled сплит-ринг, користећи исте супstrate као раније, са ширинама проводника  $w_1=w_2=0.3\text{mm}$  и међусобним растојањем  $s=0.1\text{mm}$  (оба прстена су на горњем слоју супстрата). Резултати су приказани на слици 3. За овај случај, слагање се такође побољшава на тањем супстрату, а генерално је боље него у претходном случају.

### Примена

Предложени модел може се применити у пројектовању метаматеријала, као и микроталасних кола која користе сплит-ринг резонаторе. Предност у односу на 3D електромагнетску симулацију, чије време извршавања се мери у сатима или чак данима, је у далеко мањој захтевности израчунавања, па се резултати добијају практично тренутно. Осим одређивања резонантних учестаности, метода нам даје увид у понашање сплит-ринга у широком опсегу учестаности, што омогућава боље разумевање, као и лакше пројектовање и оптимизацију кола која користе овакве резонаторе.

Метода је применљива на све врсте сплит-ринг резонатора који имају два прстена, без обзира на њихов међусобни положај и начин спреге, што нам обезбеђује велику флексибилност у њеној примени.

### Литература

- [1] A.R. Djordjevic, M.B. Bazdar, T.K. Sarkar and R.F. Harrington, *LINPAR for Windows: Matrix Parameters for Multiconductor Transmission Lines, Software and User's Manual*, Norwood, USA: Artech House, 1995.
- [2] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robins and W.J. Stuart, Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 47, p. 2075, 1999.
- [3] A. Garcia-Lamperez and M. Salazar-Palma, Dual band filter with split-ring resonators, *Microwave Symposium Digest, 2006. IEEE MTT-S International*, 11-16 June 2006.