

## Мерна метода за екстракцију ефективних параметара стереометаматеријала

**Руководилац пројекта:** др Бранка Јокановић

**Одговорно лице:** др Бранка Јокановић

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

**Пројекат:** ТР-11009 „Дуал-банд и три-банд микроталасна кола и антене базирани на метаматеријалима за комуникационе системе нове генерације“

**Година:** 2010.

**Примена:** 15. 9. 2010.

### Кратак опис

Развијена је мерна метода која омогућава карактеризацију једнодимензионалних периодичних структура на водовима. Метода се базира на замени те структуре са водом у хомогеном ефективном диелектрику. Параметри тог диелектрика, односно његова пермитивност и пермеабилност – називамо их још и ефективни параметри – су такви да су вод и почетна структура еквивалентни и вредности напона и струја, као и s-параметри ће бити једнаки. Ефективни параметри се екстрахују на основу измерених s-параметара јединичне ћелије, која је у нашем случају била секција микрострип вода спрегнута с резонаторима инспирисаним стереометаматеријалима, односно сплит-ринг резонаторима код којих је угао између процепа произвољан (не мора бити  $180^\circ$ ). Услов да бисмо извршили овакву замену је да дужина ћелије буде много мања од таласне дужине вођеног таласа на воду. Основни проблем при екстракцији ефективних параметара на основу мерних резултата је што се за екстракцију не користе директно измерени s-параметри, већ мора да се уради прецизан декембединг на одређену референтну раван. При томе је тачност методе директно зависна од прецизности декембедроване фазе s-параметара.

### Техничке карактеристике:

- Метода захтева конструкцију TRL калибрационог сета који зависи од опсега учестаности у коме се врши мерење и од параметара микрострип вода.
- За методу је неопходан векторски анализатор мреже који подржава TRL калибрацију
- Тачност методе, фреквенцијски опсег у коме ради зависе од прецизности TRL калибрационог кита и од самог алгорита за екстракцију ефективних параметара.
- Мерни опсег за наш калибрациони кит је од 4 GHz до 10 GHz;
- Метода може да се тестира тако што ће се екстраховани параметри преклопити са  $s_{21}$  кривом и у опсегу учестаности где су и реални делови пермитивности и пермеабилности негативни ту би требао да буде пропусни опсег.

### Техничке могућности:

Применом методе добијају се ефективни електромагнетски параметри на основу мерења јединичне ћелије. Може се применити на све ћелије чија је дужина много мања од таласне дужине, и на све типове водова за које је могуће направити TRL калибрациони сет.

**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)

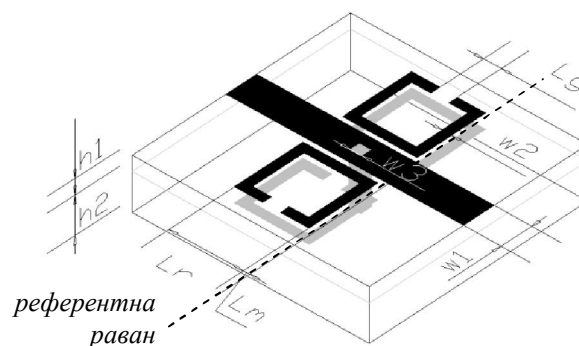
**Стање у свету**

Стереометаматеријали су први пут предложени као нови концепт у фотоници од стране N. Liu и других [1]. Инспирирани су постојањем стереоизомера у хемији, односно једињења која имају исту хемијску формулу, састављена су од истих атома, али с другачијим просторним распоредом услед чега имају другачије особине. Идеја се састоји у томе да, коришћењем идентичних елемената, али променом њиховог релативног положаја у простору, утичемо на њихову електричну и магнетску интеракцију, и тиме омогућимо већу слободу у пројектовању структура с жељеним одзивом.

Ми смо концепт стереометаматеријала применили за пројектовање и израду LH вода у микроталасном опсегу [2]. Понашање оваквог вода погодно је за описивање помоћу ефективних параметара, а њихово мерење је неопходно за проверу полазних прорачуна.

**Поступак мерења параметара**

На слици 1. је приказан изглед јединичне ћелије метаматеријала која се састоји од 2 пара бочно спрегнутих сплит-ринг резонатора (*broadside-coupled*) који су спрегнути са микрострип водом. Микрострип вод је уземљен вијом ширине  $w_3$  на средини између сплит-ринг резонатора. Супстрат се састоји од два диелектрика који су различите висине и диелектричне константе.



Слика 1. Јединична ћелија:  $h_1=0,635mm$ ,  $h_2=1,5748mm$ ,  $\epsilon_{r1}=10,2$ ,  $\epsilon_{r2}=2,2$ ,  $L_r=3,15mm$ ,  $L_m=0,25mm$ ,  $L_g=0,75mm$ ,  $W_1=1,4mm$ ,  $W_2=0,4mm$ ,  $W_3=0,5mm$ ,  $S=0,2mm$ . Референтна раван означена је испрекиданом линијом (са супротне стране на истом одстојању је друга реф. раван). Укупна дужина ћелије је  $L_r + 2L_m = 3,65mm$ .

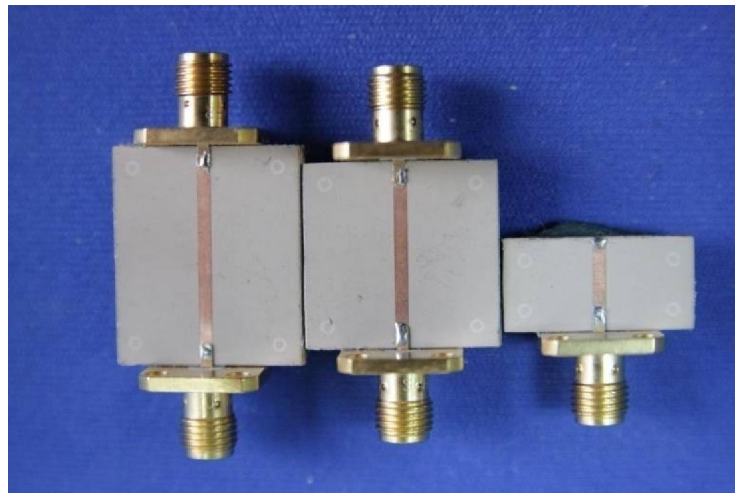
Поступак мерења почиње одређивањем  $s$ -параметара јединичне ћелије (слика 1) на референтним равнима. У ту сврху се користи векторски анализатор мрежа Agilent PNA E8364A, који подржава TRL метод калибрације. Овај метод омогућава деембедовање  $s$ -параметара помоћу 3 одговарајућа стандарда, приказана на слици 2.

#### *Конструкција TRL калибрационог кита*

Прецизност мерења на анализатору мрежа може се значајно повећати коришћењем калибрације, чиме се отклањају систематске грешке. Класични поступци калибрације, као што је SOLT (short-open-load-thru), међутим, срећу се с проблемима када се не ради о коаксијалним мерењима. Наиме, тешко је произвести прецизно карактерисане стандарде који су потребни. У микрострип технологији, кратки спојеви су индуктивни, отворена кола зраче, и тешко је направити квалитетно чисто резистивно оптерећење. TRL калибрација омогућава превазилажење ових проблема коришћењем лако реализибилних стандарда [3].

Овај метод се ослања на водове уместо на дискретне стандарде, што има неколико кључних предности, између осталог:

- водови су један од елемената који се најлакше реализују;
- импеданса вода може се прецизно израчунати на основу његових димензија и карактеристика материјала.



Слика 2. TRL калибрациони стандарди.

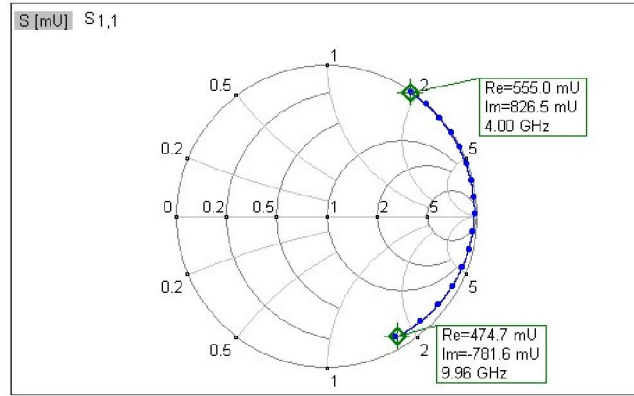
Стандарди се израђују на истом супстрату као и ЛН вод (или било који други елемент који желимо да меримо), и чине их:

- *thru* – повезивање портова, директно или кратким водом;
- *reflect* – једнопортни елемент који има велики коефицијент рефлексије;
- *line* – кратак вод који се убацује између портова, обавезно различите дужине од thru;

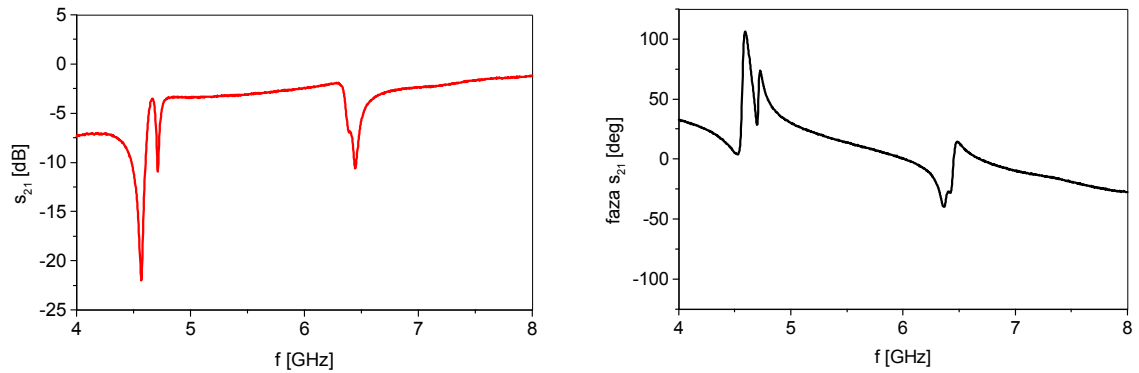
по којима је метод калибрације добио име. Једино што је потребно прецизно знати је импеданса водова и њихове електричне дужине.

Са једним *line* елементом можемо покрити опсег од једне октаве, а услов за оптималан избор његове дужине је да разлика електричних дужина *line* и *thru* буде једнака  $\lambda/4$  на геометријској средини опсега.

У нашем случају, проблем је била конструкција рефлективног елемента. Због велике висине супстрата, вод завршен са вијом није имао довољно висок коефицијент рефлексије на крају опсега. Зато смо прибегли изради вода на чијем је крају залемљена попречна метална плочица једнаке ширине као микрострип вод. Симулација у програму WIPL-D је показала да он има задовољавајуће карактеристике у траженом опсегу (слика 3). Пример измерених s-параметара дат је на слици 4.



Слика 3. Коефицијент рефлексије стандарда reflect.



Слика 4. Пример измерене амплитуде и фазе s-параметара

Када располажемо са s-параметрима, користећи теорију ефективног медијума (пошто је таласна дужина много већа од димензија ћелије), можемо заменити предложене водове еквивалентним микрострип водом, који има исту висину, дужину и ширину траке, али на хомогеном диелектрику параметара  $\epsilon_{eff}$  и  $\mu_{eff}$ . Параметри еквивалентног вода, коефицијент рефлексије на споју,  $\Gamma$ , и коефицијент простирања,  $\gamma$ , везани су са s-параметрима преко следећих релација, познатих као Nicolson-Ross-Weir извођење:

$$\Gamma = k \pm \sqrt{k^2 - 1}, \quad k = \frac{s_{11}^2 - s_{21}^2 + 1}{2s_{11}}; \quad (1)$$

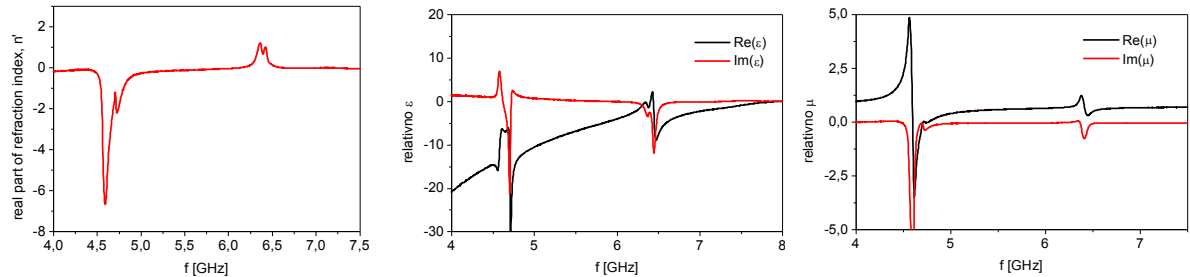
$$\gamma = \pm \frac{1}{L} \cosh^{-1} \frac{1 - s_{11}^2 + s_{21}^2}{2s_{21}}. \quad (2)$$

Када знамо ове вредности, параметре ефективног диелектрика вода можемо одредити преко веза:

$$n = -j \frac{c}{\omega} \gamma, \quad Z_C = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} Z_{Nom} \quad (3)$$

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}, \quad Z_c = Z_0 \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (4)$$

где су  $Z_c$  карактеристична импеданса еквивалентног вода,  $Z_{Nom}$  номинална импеданса порта, односно карактеристична импеданса уводника,  $Z_0$  импеданса вода у ваздуху, а  $n$  индекс рефракције. Из релација (4) можемо одредити пермитивност и пермеабилност. Пример екстрахованих ефективних параметара дат је на слици 5.



Слика 5. Екстраховани ефективни параметри.

## Примена

Метода је применљива за експериментално добијање ефективних параметара код свих структура које се могу напајати водом, а јединична ћелија је много мања од таласне дужине. Уколико се промени супстрат (висина, пермитивност), потребно је поново направити калибрационе стандарде, међутим, предност TRL калибрације је што су стандарди крајње једноставни за израду и применљива је за некоаксијална мерења. Мерење и обрада измерених резултата је неизоставни део сваког пројекта, и ова метода је корисна не само за карактеризацију метаматеријала, већ уопште било којих структура на које се може применити теорија ефективног медијума. Метода се може модификовати и за мерење структура које се не напајају вођеним таласом.

## Литература

- [1] N. Liu, H. Liu, S. Zhu and H. Giessen, „Stereometamaterials“, *Nature Photonics*, 2009, vol. 3, 157-162.
- [2] V. Milošević, B. Jokanović, B. Kolundžija: „Mikrotalasni stereometamaterijali: elektromagnetske osobine i rekonfigurabilnost“, *Zbornik 54. Konferencije za ETRAN*, Donji Milanovac, 7-10. juna 2010.
- [3] Agilent Technologies' Product Note 8510-8A, „Agilent Network Analysis Applying the 8510 TRL Calibration for Non-Coaxial Measurements“, 2001.