

Validacija ekstrahovanih parametara za asimetrične jedinične ćelije metamaterijala

Vojislav Milošević, Branka Jokanović, *Member, IEEE*, i Radovan Bojanić

Apstrakt—U ovom radu je prikazana originalna metoda za ekstrakciju bianizotropnih parametara za slučaj asimetričnih jediničnih ćelija metamaterijala koji se pobuđuju vodovima. Metoda bianizotropne ekstrakcije je primenjena na jediničnu ćeliju sa ivično spregnutim (edge-coupled) split ring rezonatorima (SRR) koja u opsegu oko rezonanse ima asimetričan odziv i rezultati su upoređeni sa standardnom Nicolson-Ros-Weir metodom (NRW). Validacija ekstrahovanih efektivnih parametara dobijenih korišćenjem obe metode urađena je pomoću nezavisne simulacije homogenog medijuma sa dobijenim efektivnim parametrima i pokazala je prednost nove metode koje daje kompletne S-parametre originalne strukture, što nije slučaj sa NRW metodom.

Ključne reči—Uneti ključne reči ili fraze, razdvojene tačkapetom.

I. UVOD

METAMATERIJALI se najčešće karakterišu pomoću efektivnih elektromagnetskih parametara, permitivnosti i permeabilnosti, koji se mogu dobiti pomoću Nicolson-Ros-Weir (NRW) procedure, bazirane na inverziji parametara rasejanja (S-parametara) [1]. Ova procedura je primenljiva kako i na 2D i 3D prostorne metamaterijale, tako i na metamaterijale koji se pobuđuju vodovima [2]. Uprkos njenoj širokoj primeni, ova procedura ima nekoliko nedostataka, između ostalog ne može da se primeni na asimetrične jedinične ćelije. Usled toga, više autora je predložilo uvođenje bianizotropnih parametara za opis medijuma, kao i procedure za njihovu ekstrakciju [3]. Ipak, prema našim saznanjima, ova procedura nije bila primenjena na slučaj metamaterijala koji se pobuđuju vodovima.

Detaljno izvođenje predložene procedure dato je u našem neobjavljenom radu [4]. Ovde je dovoljno reći da je model korišćen za homogenizaciju vod uronjen u dielektrik karakterisan, osim standardnih parametara ϵ i μ , dodatnim bianizotropnim parametrom u , koji ukazuje na prisustvo sprege između električnih i magnetskih dipola. Pod određenim uslovima, ovakav vod imaće istu konstantu propagacije u oba smera, ali različite karakteristične impedanse, zbog čega može tačno da modeluje asimetrični odziv.

II. POSTUPAK EKSTRAKCIJE

Formule koje se koriste za ekstrakciju najlakše je izraziti

Vojislav Milošević, Branka Jokanović, Radovan Bojanić – Institut za fiziku, Univerzitet u Beogradu, Pregrevica 118, 11080 Pregrevica, Srbija (e-mail: vojislav@ipb.ac.rs; brankaj@ipb.ac.rs; radovan@ipb.ac.rs).

pomoću ABCD parametara, koji se jednoznačno mogu konvertovati u S-parametre, i obrnuto. Obeležimo sa γ konstantu propagacije na vodu, a sa $Z_{c1,2}$ karakterističnu impedansu za incidentni i reflektovani talas, respektivno. Vezu između ukupnog napona i struje, i napona incidentnog i reflektovanog talasa, u proizvoljnoj tački voda, možemo izraziti u matričnom obliku na sledeći način:

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{Z_{c1}} & -\frac{1}{Z_{c2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^+ \\ V^- \end{bmatrix} = Q \begin{bmatrix} V^+ \\ V^- \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Ukoliko posmatramo sekciju voda dužine l kao mrežu sa dva pristupa, relacija između napona incidentnih i reflektovanih talasa na pristupima 1 i 2, u matričnom obliku, biće:

$$\begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_1^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{\gamma l} & 0 \\ 0 & e^{-\gamma l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2^+ \\ V_2^- \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Kombinovanjem relacija (1) i (2) dobija se ABCD matrica sekcije voda:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = Q \begin{bmatrix} e^{\gamma l} & 0 \\ 0 & e^{-\gamma l} \end{bmatrix} Q^{-1} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = ABCD \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Sređivanjem jednačine (3) dolazimo do sledećih relacija:

$$\gamma = \pm \cosh^{-1} \frac{A+D}{2}, \quad Z_{c1,2} = \frac{\sinh \gamma l \pm (A-D)/2}{C}, \quad (4)$$

koje povezuju parametre voda sa ABCD (ili S) parametrima, koje obično dobijamo kao rezultat merenja ili simulacije. Indeks prelamanja efektivnog dielektrika, i normalizovanu impedansu (impedansu sredine) dobijamo kao:

$$n = -j \frac{C}{\omega}, \quad z_{1,2} = Z_{c1,2} / Z_{air} \quad (5)$$

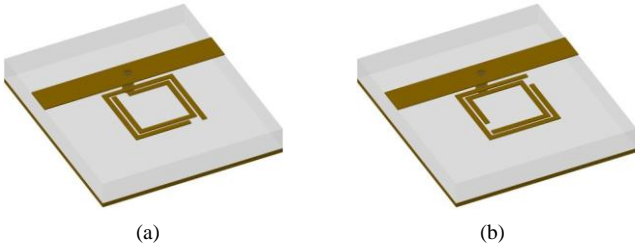
i, naposljetku, efektivne elektromagnetske parametre dielektrika kao:

$$\varepsilon = \frac{2n}{z_1 + z_2}; \quad \mu = 2n \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2}; \quad u = -jn \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2}. \quad (6)$$

III. ASIMETRIČNE JEDINIČNE ČELIJE

Jedinična ćelija koju smo razmatrali sastoji se od mikrostrip voda spregnutog sa ivično-spregnutim SRR rezonatorima (Sl. 1). Procepi na prstenovima pomereni su simetrično u odnosu na centar, na suprotne strane. Ispitujemo dve konfiguracije, u zavisnosti od toga da li su procepi paralelni (Sl. 1a) ili normalni (Sl. 1b) u odnosu na vod.

Na S -parametre ove strukture, koje smo dobili simulacijom, primenili smo dva postupka ekstrakcije: metodu predloženu u ovom radu, i standardnu NRW metodu, za koju se u slučaju asimetričnih ćelija koristi srednja vrednost koeficijenta refleksije: $S_{1\text{avg}} = \sqrt{S_{11}S_{22}}$.



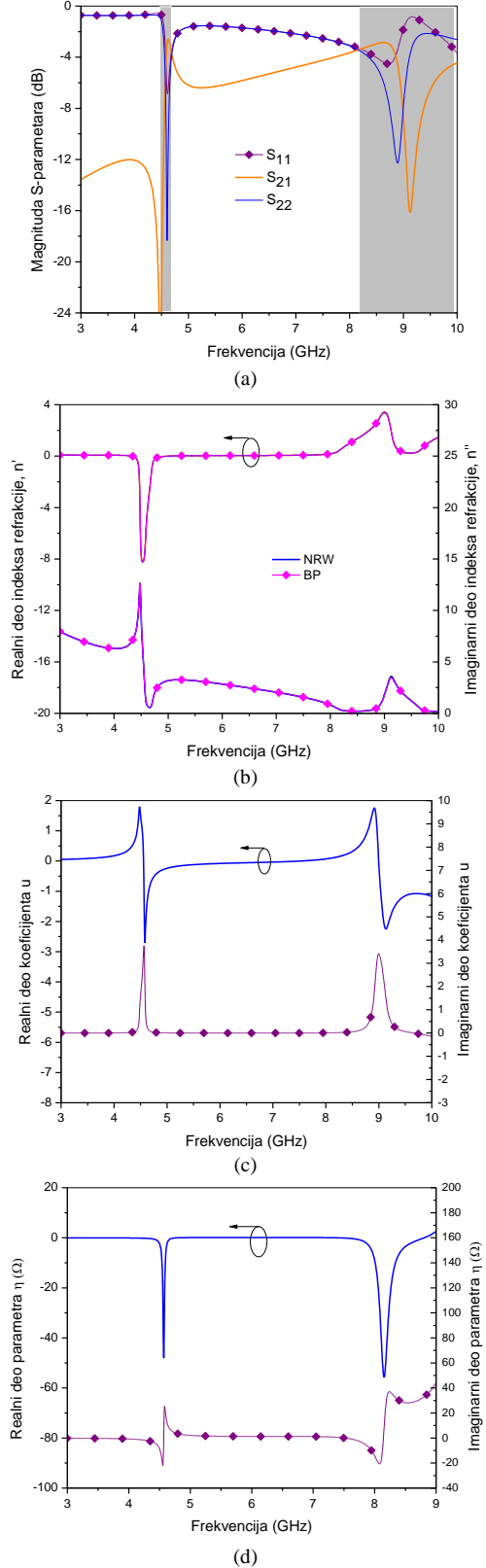
Sl. 1. Asimetrične jedinične ćelije sa procepima suprotno pomerenim u odnosu na sredinu ivice prstena: (a) procepi paralelni sa vodom (b) procepi normalni u odnosu na vod.

A. Jedinična ćelija sa procepima paralelnim sa vodom

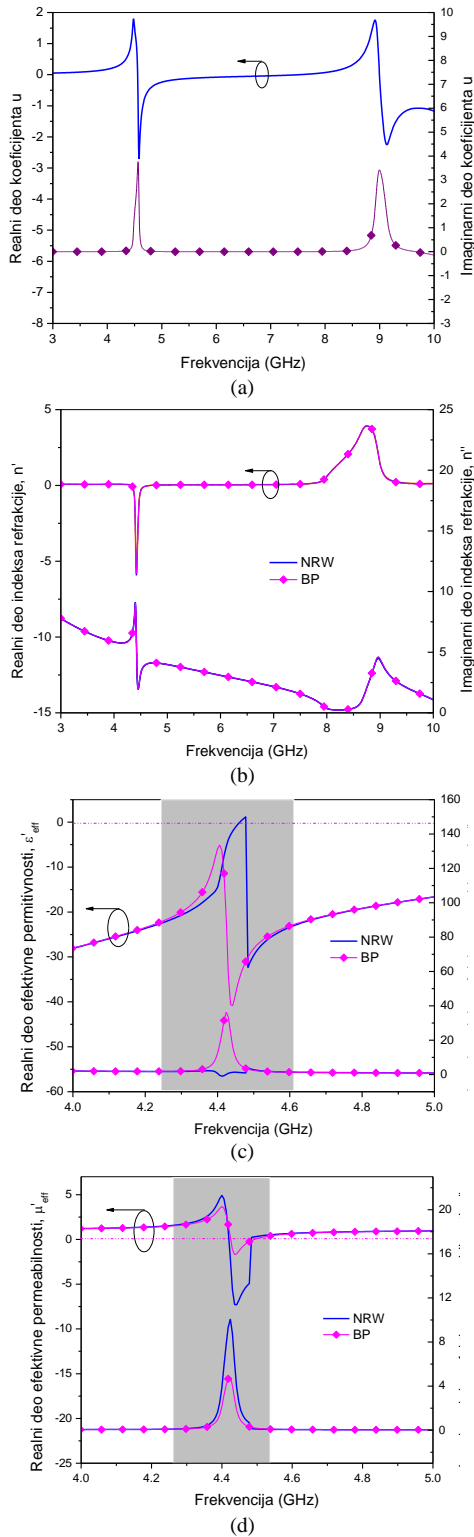
Magnitude S -parametara za jediničnu ćeliju sa procepima paralelnim sa vodom prikazane su na Sl. 2(a). Može se videti da je $S_{11} \neq S_{22}$ samo u okolini rezonansi SRR-a. Ekstrahovani indeks refrakcije pomoću NRW metode i bianizotropne procedure (BP) prikazan je na Sl. 2(b). Može se videti da obe procedure daju isti indeks, koji je negativan samo oko prve rezonanse. Mera asimetrije ćelije – parametar u i razlika karakterističnih impedansi $\eta = (Z_{c1} - Z_{c2})/2$ prikazani su na Sl. 2c-d, odakle se takođe može videti da nesimetrija postoji samo oko prve rezonanse. Maksimalna vrednost parametra u je oko 1.8, a η oko -48Ω .

B. Jedinična ćelija sa procepima normalnim u odnosu na vod

Simulirani S -parametri i ekstrahovani efektivni parametri korišćenjem dve različite metode prikazani su na Sl. 3. Može se videti da NRW i BP daju značajno različite vrednosti ε i μ oko prve rezonanse (osenačeni delovi na Sl. 3c-d). Maksimalna vrednost parametra u u ovom slučaju je oko 8 (grafik nije prikazan ovde). Na osnovu toga zaključujemo da je asimetrija ovde izraženija nego u slučaju sa paralelnim procepima. Može se videti da NRW kao aproksimativna procedura za asimetrične jedinične ćelije daje pogrešne rezultate.



Sl. 2. Jedinična ćelija sa gepovima paralelnim sa vodom: (a) S -parametri, (b) ekstrahovani indeks refrakcije, (c) bianizotropni parametar u , (d) razlika karakterističnih impedansi za dva pravca prostiranja, η .



Sl. 3. Jedinična ćelija sa procepima normalnim u odnosu na vod: (a) S -parametri, (b) ekstrahovani indeks refrakcije, (c) ekstrahovana efektivna permitivnost, (d) ekstrahovana efektivna permeabilnost.

IV. VALIDACIJA EKSTRAHOVANIH PARAMETARA

Da bismo izvršili validaciju predložene metode, možemo koristiti nezavisnu simulaciju mikrostrip voda uronjenog u homogeni materijal sa ekstrahovanim efektivnim

parametrima, kao što je prikazano na Sl. 4. Dok se ovaj postupak može primeniti direktno za slučaj NRW ekstrakcije, koja koristi izotropni medijum opisan samo sa ε i μ , autorima nije poznat elektromagnetski softver koji podržava bianizotropne medijume. Zbog toga predlažemo sledeći postupak: simuliramo dva efektivna medijuma sa parametrima koje ćemo obeležiti sa GA_1 i GA_2 , definisanih na sledeći način:

$$\varepsilon_{1,2} = n/z_{1,2}, \quad \mu_{1,2} = nz_{1,2}. \quad (7)$$

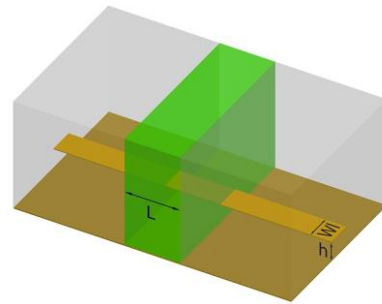
Na osnovu (3) i (5) zaključujemo da se $ABCD$ matrice u ova dva slučaja mogu predstaviti kao:

$$ABCD_{1,2} = Q_{1,2} \begin{bmatrix} e^{\gamma} & 0 \\ 0 & e^{-\gamma} \end{bmatrix} Q_{1,2}^{-1} \quad (8)$$

Gde je:

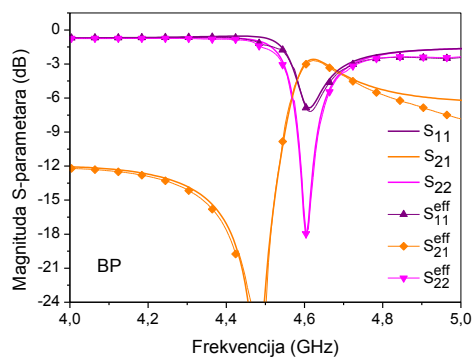
$$Q_{1,2} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1/Z_{c1,2} & -1/Z_{c1,2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

respektivno. Oblik matrice (8) predstavlja ono što je u linearnoj algebri poznato kao *spektralna dekompozicija*, i može se lako dobiti korišćenjem softverskih paketa kao što je Matlab. Kada dobijemo vrednosti za $Q_{1,2}$, preostaje nam da ih iskombinujemo i izračunamo krajnje $ABCD$ parametre u skladu sa relacijom (3).

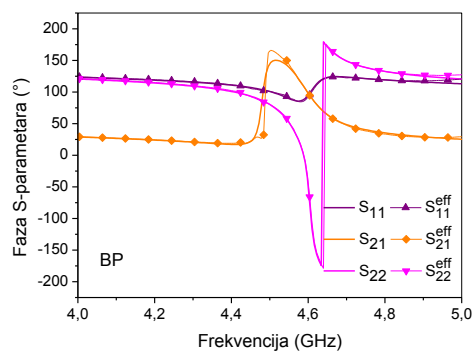


Sl. 4. Mikrostrip vod uronjen u efektivni medijum

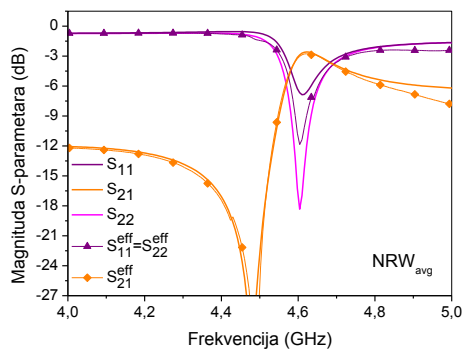
Rezultantni S -parametri predloženog postupka validacije za jediničnu ćeliju sa procepima paralelnim sa vodom prikazani su na Sl. 5, a za jediničnu ćeliju sa procepima normalnim u odnosu na vod na Sl. 6, za BP i NRW metode, upoređeni sa S -parametrima originalne strukture. NRW metoda (Sl. 5c-d i Sl. 6c-d) rezultira simetričnim odzivom (zato je samo jedan koeficijent refleksije $S_{11}^{eff} = S_{22}^{eff}$ rekonstruisan), i očigledno ne uspeva da reprodukuje refleksiju u delovima opsega gde je izražena asimetrija. Ovo je najvidljivije u fazi, gde se dobijena vrednost ponaša približno kao sredina između originalnih vrednosti (ovo je očekivano zbog korišćene procedure usrednjavanja).



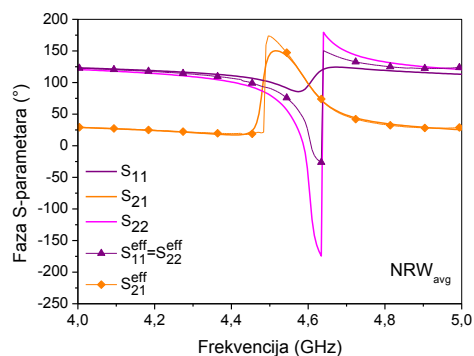
(a)



(b)

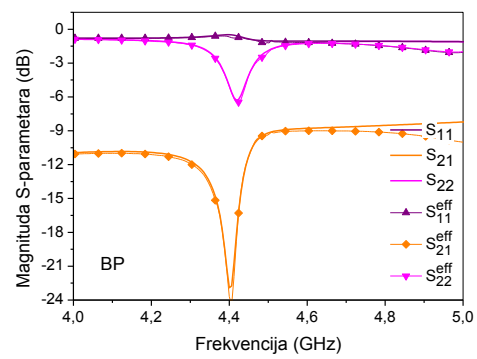


(c)

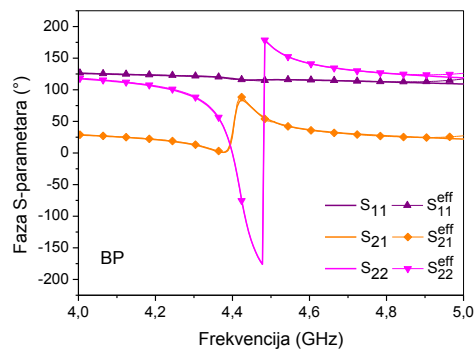


(d)

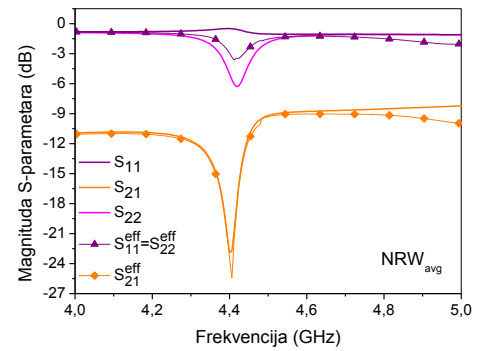
Sl. 5. Jedinčna ćelija sa procepima paralelnim sa vodom: (a) BP magnituda, (b) BP faza, (c) NRW magnituda, (d) NRW faza.



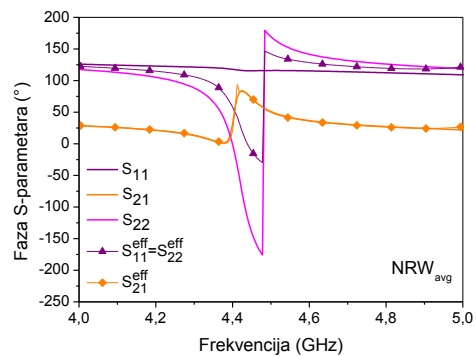
(a)



(b)



(c)



(d)

Sl. 6. Jedinčna ćelija sa procepima paralelnim sa vodom: (a) BP magnituda, (b) BP faza, (c) NRW magnituda, (d) NRW faza.

BP metoda (Sl. 5a-b i Sl. 6a-b), s druge strane, jasno razlikuje dva koeficijenta refleksije koji su veoma blizu originalnih vrednosti. Jasno se vidi da efektivni parametri ekstrahovani BP metodom omogućavaju povratak svih S-parametara, što nije slučaj sa parametrima ekstrahovanim NRW metodom, koji omogućavaju samo povratak S21, ali ne i S11 i S22 u delovima opsega gde je prisutna asimetrija. Postoje manja neslaganja u magnitudi dobijenih parametara, koja se jednako pojavljuju u obe metode.

V. ZAKLJUČAK

U radu je predložena nova metoda za ekstrakciju parametara metamaterijala pobuđenih vodovima, koja se zasniva na modelu bianizotropnog dielektrika, i uvodi novi parametar u koji karakteriše asimetriju. Na primeru asimetričnih jediničnih ćelija pokazano je da metoda daje iste parametre kao i široko prihvaćena NRW metoda u simetričnom slučaju, a razlike postaju sve izraženije kako je asimetrija veća. Na kraju je prikazan postupak validacije, koji prema našim saznanjima nije primenjivan ranije, koji nedvosmisleno pokazuje prednost naše metode, koja je sposobna da povrati sve originalne S-parametre.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansiran sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja preko projekta tehnološkog razvoja TR-32024 i projekta integralnih i interdisciplinarnih istraživanja III 45016.

Zahvaljujemo se firmi WIPL-D d.o.o. iz Beograda na korišćenju softverskih licenci.

LITERATURA

- [1] D. R. Smith, S. Schultz, P. Markos, and C. M. Soukoulis, "Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients," *Phys.Rev. B*, vol. 65, p. 195104, Apr 2002.
- [2] V. Milosevic, B. Jokanovic and B. Kolundzija, "Microwave stereometamaterials and parameter extraction", in Proc. Of Metamaterials'2010, pp. 474-477, Karlsruhe, Germany, 13-16 September 2010.
- [3] A. Kildishev, J. Borneman, X. Ni, V. Shalaev, and V. Drachev, "Bianisotropic effective parameters of optical metamagnetics and negative index materials," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 10, pp. 1691 –1700, 2011.
- [4] V. Milosevic, B. Jokanovic and R. Bojanic, "Effective Electromagnetic Parameters of Metamaterial Transmission Line Loaded with Asymmetric Unit Cells", submitted to *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*

ABSTRACT

In this paper we present original method for extraction of effective bianisotropic parameters for the case of asymmetric unit cells of transmission line metamaterials. Bianisotropic extraction method is applied on the unit cell with edge-coupled split-ring resonators which has asymmetric response around the resonance, and the results are compared with the standard Nicolson-Ross-Weir (NRW) method. Validation of the extracted effective parameters of both methods is performed using independent simulation of homogeneous medium with the obtained effective parameters, and it has demonstrated advantage of the new method, which gives all S-parameters of the original structure, unlike the NRW method.

Validation of extracted effective parameters for asymmetric metamaterial unit cell

Vojislav Milošević
Branka Jokanović
Radovan Bojanić