

REKONFIGURABILNE LINIJE ZA KAŠNJENJE SA SPLIT-RING REZONATORIMA

Radovan Bojanić, Institut za Fiziku Beograd, radovan@ipb.ac.rsBranka Jokanović, Institut za Fiziku Beograd, brankaj@ipb.ac.rsVojislav Milošević, Institut za Fiziku Beograd, vojislav@ipb.ac.rs

Sadržaj – U radu su prikazani numerički i eksperimentalni rezultati efektivnih elektromagnetskih parametara i grupnog kašnjenja za različite strukture, koje se sastoje od mikrostrip voda spregnutog sa split-ring rezonatorima, čiji su procepi međusobno rotirani. Pokazano je da se međusobnom promenom položaja procepa, grupno kašnjenje menja više od 4 puta u opsegu od 0.75ns do 3.1ns u slučaju jedne jedinične ćelije. Uočeno je da strukture kod kojih su split-ring rezonatori postavljeni simetrično u odnosu na mikrostrip vod imaju znatno manje grupno kašnjenje nego u slučaju male nesimetrije, tj. kada su oba donja ili oba gornja okrenuta za po 90 stepeni. Dobijeni eksperimentalni rezultati se veoma dobro slažu sa simulacijama.

1. UVOD

Linije za kašnjenje predstavljaju važan sklop u današnjim mikrotalasnim kolima i antenama. Glavni cilj jednog takvog sklopa jeste da pomeri fazu signala i samim tim zakasni signal, a da se amplituda pri tome što manje izobliči i oslabi. Tehnike u kojima se izrađuju linije za kašnjenje su mnogobrojne, počev od standardnih dvožičnih i koaksijalnih vodova, preko raznih stampanih struktura, pa sve do optičkih linija za kašnjenje. Specifikacija koju treba da zadovolji jedan ovakav sklop nameće i samu tehniku u kojoj se izrađuje, a to su pre svega okruženje u kome će da radi, frekvencijski opseg od interesa, zahtevani nivo usporavanja kao i granice variranja istog u zadatom opsegu. U radu su korišćeni modeli izrađeni u tehnici višeslojne štampe, jer su tražene vrednosti grupnog kašnjenja velike. Korišćeni su spregnuti split-ring rezonatori koji su poznati kao jedinične ćelije metamaterijala sa negativnom magnetskom permeabilnošću

Metamaterijali kod kojih je indeks refrakcije negativan poznati su pod nazivom *left-handed* materijali (LHM), pri čemu taj naziv potiče od činjenice da se energija talasa prostire unazad, to jest suprotno od talasnog vektora, po pravilu leve orijentacije (ruke) u odnosu na vektore \mathbf{E} , \mathbf{H} i \mathbf{k} .

Rad je inspirisan sličnim istraživanjima u fotonici [1], gde je uveden pojam stereometamaterijala po analogiji sa stereoisomerima u hemiji gde postoje jedinjenja koja imaju istu hemijsku formulu, a samim tim su sastavljena od istih atoma, ali zbog različitog rasporeda atoma u prostoru imaju različite osobine. Slično tome uočeno je da međusobni položaj split-ring rezonatora u prostoru definiše električnu i magnetnu interakciju između njih, a samim menjanjem položaja utičemo na promenu interakcija što dovodi do variranja u odziva. U radu [2] je teorijski pokazano da se međusobnim rotiranjem split-ring rezonatora može menjati širina opsega u kome je indeks refrakcije negativan, dok se učestanost samog opsega može pomerati i do 66% u odnosu na osnovni slučaj.

U ovom radu je teorijski i eksperimentalno ispitivan uticaj promene međusobnog položaja split-ring rezonatora na karakteristiku grupnog kašnjenja u mikrotalasnom opsegu.

2. EFEKTIVNI PARAMETRI

Kao što smo već napomenuli, LHM predstavljaju jednu podvrstu metamaterijala, kod kojih je indeks refrakcije negativan. Kada kažemo da je indeks refrakcije negativan

mislimo na njegov realni deo, jer on direktno ulazi u izraz za fazni koeficijent, i tako utiče na grupni indeks refrakcije i grupno kašnjenje, jer je kompleksni koeficijent prostiranja definisan kao:

$$\gamma = jn \frac{\omega}{c}; \gamma = \alpha + j\beta, \quad (1)$$

gde je ω kružna učestanost, c brzina svetlosti u vakuumu, a n indeks refrakcije za koji važi:

$$n = n' - jn'', \quad (2)$$

Tako dobijamo direktnu vezi između faznog koeficijenta β i realnog dela indeksa refrakcije n' :

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} = \frac{2\pi f}{v_g} = \frac{\omega}{c} n', \quad (3)$$

gde v_g predstavlja faznu brzinu talasa koji se prostire kroz efektivni medijum.

Na osnovu (3) se direktno nameće zaključak da je za poznavanje osnovnih parametara koji definišu jednu liniju za kašnjenje, a to su grupni indeks refrakcije i grupno kašnjenje, neophodno poznavati indeks refrakcije, a relacije koje daju jasniju sliku o tome su sledeće:

$$n_g = \frac{c}{v_g} = \frac{c}{\frac{d\omega}{dk}} = c \frac{d(\frac{\omega \cdot n}{c})}{d\omega} = n + \omega \frac{dn}{d\omega}, \quad (4)$$

$$\tau_g = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega}, \quad (5)$$

gde je n_g grupni indeks refrakcije, v_g grupna brzina, τ_g grupno kašnjenje, $\phi(\omega)$ argument S_{21} parametra signala koji se prenosi kroz posmatranu strukturu. Važno je napomenuti da između relacija (4) i (5) postoji linearna zavisnost u slučaju kada je disperzija mala.

Sada se samo postavlja pitanje kako odrediti indeks refrakcije, što je detaljno objašnjeno u [3] i [4], a mi ćemo ovde prikazati samo nekoliko osnovnih koraka. Naime, da bismo mogli odrediti indeks refrakcije neke strukture potreban nam je kompleksni koeficijent prostiranja γ što se može videti iz (1), a da bismo u potpunosti mogli opisati neku strukturu moramo da znamo još i karakterističnu impedansu sredine Z_{eff} , na osnovu koje određujemo ekvivalentne efektivne parametre ϵ_{eff} i μ_{eff} . Kompleksni koeficijent prostiranja se računa na sledeći način:

$$\gamma = \pm \frac{1}{L} \cosh^{-1} \frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}} = \pm j \frac{\omega}{c} n, \quad (6)$$

pri čemu znak biramo na osnovu uslova da je $n'' > 0$, a koji nam govori da je struktura pasivna. Formula za izračunavanje karakteristične impedanse sredine je:

$$Z_{eff} = \sqrt{\frac{\mu_{eff}}{\epsilon_{eff}}} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \cdot \frac{Z_a^{TL}}{Z_a^{TL}}, \quad (7)$$

gde su Z_a^{TL} i Z_b^{TL} karakteristične impedanse mikrostrip voda i odgovarajućeg mikrostrip voda kada se umesto dielektrika ubaci vakuum, a Γ koeficijent refleksije na prelazu sa referentnog voda na strukturu:

$$\Gamma = \frac{Z^M - Z_a^{TL}}{Z^M + Z_a^{TL}}, \quad (8)$$

gde je Z^M karakteristična impedansa ekvivalentne mikrostrip strukture koja se analizira.

Najzad, poslednja formula koja nam treba da bismo mogli da izračunamo ϵ_{eff} i μ_{eff} je i njihova direktna veza sa indeksom refrakcije:

$$n = \sqrt{\mu_{eff} \epsilon_{eff}}, \quad (9)$$

a iz jednačina (7) i (9) sledi da je:

$$\mu_{eff} = Z_{eff} \cdot n; \quad \epsilon_{eff} = \frac{n}{Z_{eff}}. \quad (10)$$

Što se tiče indeksa refrakcije, važno je napomenuti još nekoliko njegovih osobina sa kojima se nismo susretali do sad. Naime, pored toga što treba da bude ispunjen uslov da je razmatrana struktura pasivna, tj. da je $n'' > 0$, što sledi iz:

$$\alpha = \frac{\omega}{c} n'', \quad (11)$$

gde je α koeficijent slabljenja koji mora da bude pozitivan da bismo imali strukturu kroz koju talas eksponencionalno slabi, ne mora da važi teorija za koju se dugo smatralo da je tačna, a to je da realni deo indeksa refrakcije ima negativnu vrednost samo pod uslovom da su istovremeno negativni ϵ i μ , već samo da važi uslov da je:

$$\epsilon' \mu'' + \epsilon'' \mu' < 0. \quad (12)$$

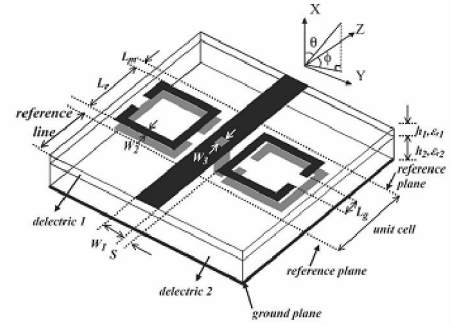
pri čemu su vrednosti iz formule (12) definisane na sledeći način:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''; \quad \mu = \mu' - j\mu''. \quad (13)$$

Ovo nas dovodi do zaključka da situacija kada imamo negativan indeks refrakcije ne znači da imamo LHM, već postoji verovatnoća da se struktura ponaša kao *single negative* (SNG), gde je samo jedan od parametara ϵ ili μ negativan. Inače, kroz SNG materijale se prostiru samo evanescentni modovi tj. talas eksponencionalno slabi, pa praktično i nema prostiranja. Frekvencijski opseg gde struktura prelazi iz SNG u DNG (*double negative*) je opseg od interesa, jer se tu javljaju efekti koji su nam od značaja, a o kojima će biti nešto kasnije više rečeno.

3. ANALIZA STRUKTURE

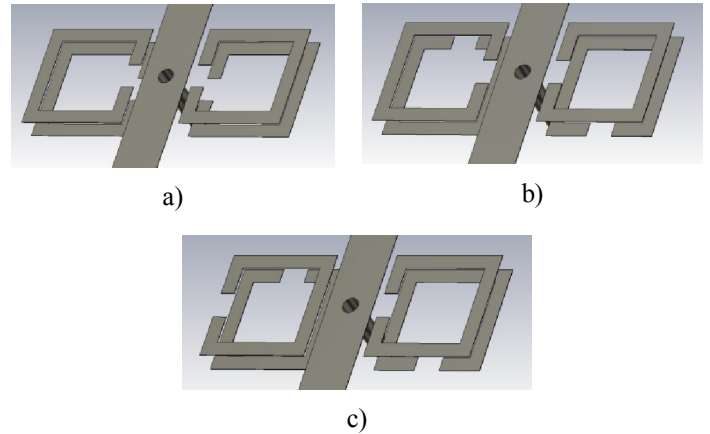
Naš model (slika 1) se sastoji iz četiri split-ring rezonatora (SRR), koji su postavljeni u paru (dva po dva), sa jedne i druge strane uvodnika čija je glavna uloga da napaja strukturu. SRR-ovi su zarotirani za 90 ili 180 stepeni jedni u odnosu na druge i u odnosu na uvodnik. Sivom bojom su označeni oni SRR-ovi koji su između dva dielektrika, dok je crnom označeno ono što je sa gornje strane dielektrika. Kroz uvodnik je probušena vija, na sredini strukture gledano odozgo, i na taj način je uvodnik spojen sa masom. Ceo taj sklop predstavlja jediničnu ćeliju koja mora da se periodično ponavlja i da je mnogo manji od talasne dužine signala da bismo mogli da ga posmatramo kao matamaterijal.



Slika 1. Izgled jedinične ćelije ($h_1=0,635mm$, $h_2=1,5748mm$, $\epsilon_{r1}=10,2$, $\epsilon_{r2}=2,2$, $L_r=3,15mm$, $L_m=0,25mm$, $L_g=0,75mm$, $W_1=1,4mm$, $W_2=0,4mm$, $W_3=0,5mm$, $S=0,2mm$).

U zavisnosti od izbora veličine SRR-a, vije, debljine dielektrika zavise i mesta u frekvencijskom spektru na kojima se javljaju rezonanse i usporavanje, pa na taj način možemo da prilagodimo strukturu za rad u raznim sistemima koji koriste različite frekvencijske opsege. Što se tiče položaja SRR-a, njihovim okretanjem utičemo na broj rezonansi i vrednosti usporavanja koja mogu da se nađu u spektru.

Zapravo, glavna ideja o svemu ovome je potekla od formule (4) u kojoj možemo da vidimo da grupni indeks refrakcije zavisi od indeksa refrakcije preko dva člana. Prvi je linearan, a drugi zavisi od promene samog indeksa po učestanosti. Jasno je da vrednost indeksa refrakcije ne možemo mnogo da menjamo i da dostižemo jako visoke vrednosti, tako da nam ostaje samo da pokušamo da te promene napravimo u što užem frekvencijskom opsegu, što će povećati vrednost drugog člana u izrazu (4). Jedan od načina da povećamo nelinearnost indeksa refrakcije jeste da to isto učinimo sa S parametrima, jer iz formule (6) vidimo da indeks refrakcije direktno zavisi od S parametara. Rešenje koje se samo nameće jeste da iskoristimo zonu u kojoj struktura prelazi iz nepropusnog u propusni opseg, odnosno iz SNG u DNG materijal i obrnuto, jer su tu promene S parametara velike.

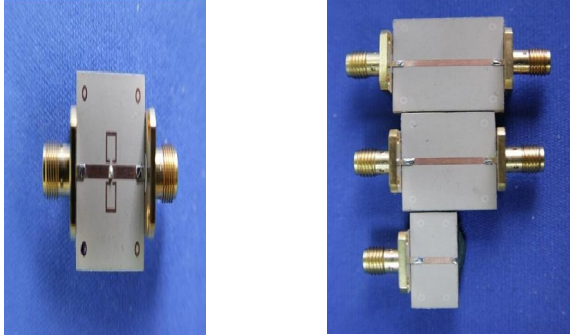


Slika 2. Analizirane strukture nastale rotiranjem SRR-a: a) model pod 0° , b) model pod 90° , c) translirani model pod 90° .

Sve strukture prikazane na slici 2 u određenom frekvencijskom opsegu zadovoljavaju uslov DNG materijala, kod kojih je izraženo grupno kašnjenje zbog nelinearnosti fazne karakteristike. Tačnije, osobine vije su da je njena relativna dielektrična konstanta (ϵ) negativno u širokom opsegu, a SRR-ovi imaju negativnu relativnu permeabilnost (μ) u uskom opsegu, pa gledajući strukturu u celini imamo materijal koji je DNG u jednom delu spektra.

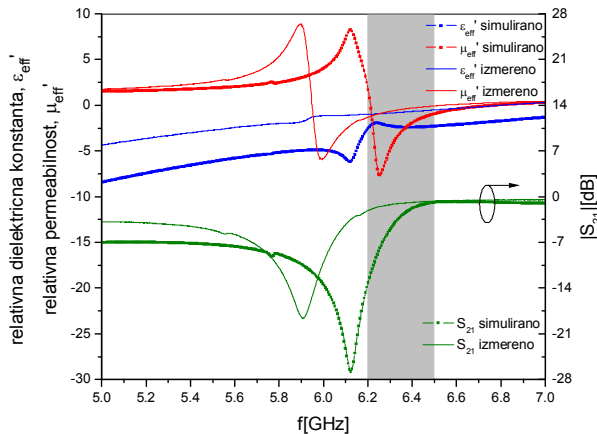
4. SIMULIRANI I EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Rezultati priloženi u nastavku su poređenje simulacije u softverskom paketu CST 2010 i merenja na analizatoru mreža Agilent PNA E8364A. Laboratorijski modeli, na kojima je vršeno merenje, (slika 3) izrađeni su na osnovu dimenzija i šema sa slika 1, 2a i 2b. Što se tiče modela sa slike 2c, uz njega prilažemo samo rezultate simulacije bez eksperimentalne potvrde validnosti rezultata.

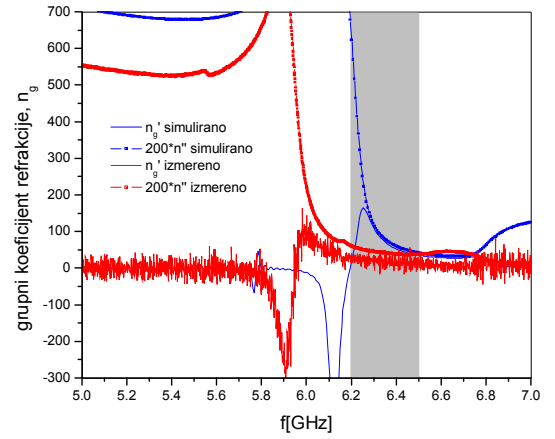


Slika 3. Laboratorijski modeli: SRR-i okrenuti pod 0 stepeni (levo), standardi za TRL kalibraciju (desno).

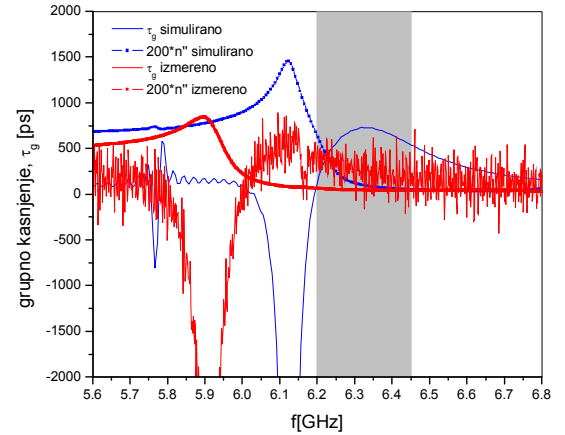
Model pod 0 stepeni je karakterističan, jer ima najmanje usporavanje i samo jedan opseg gde se to dešava. Tačnije, svi SRR-ovi su okrenuti na istu stranu i to sa procepom ka uvodniku (slika 2a), što ima za rezultat da svi oni imaju rezonansu na istoj učestanosti, pa ta pojava postaje širokopojasnija nego kada bismo imali samo jedan SRR. Širenje u spektru utiče na rezultat tako da što je opseg širi to je usporavanje manje, jer se promena i nagib indeksa refrakcije smanjuje. To se sve dešava u opsegu gde metamaterijal prelazi iz SNG u DNG, a to je na graficima predstavljeno zatamljenim pravougaonikom u slučaju simulacija (slike 4, 5, 6). Vrednosti kašnjenja u ovom slučaju su oko 0.75ns (slika 6). Treba zapaziti da se su izmerene krive translirane ka nižim učestanostima za oko 150MHz, zbog tolerancije dielektrične konstante gornjeg dielektrika ($\epsilon_r = 10,2 \pm 0.3$).



Slika 4. Realni delovi efektivnih parametara (ϵ_{eff}' i μ_{eff}') sa S_{21} parametrom za model pod 0 stepeni.

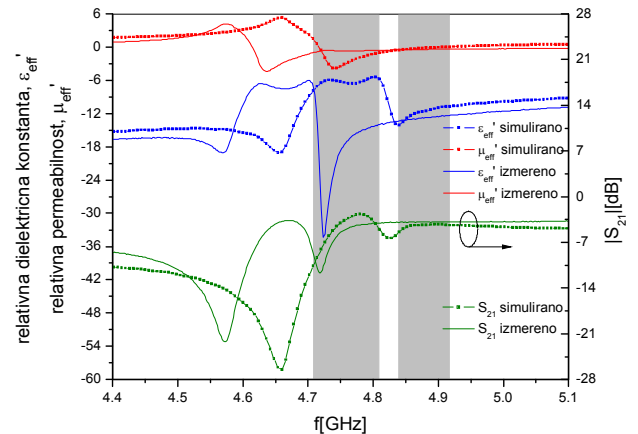


Slika 5. Grupni indeks refrakcije za model pod 0 stepeni.

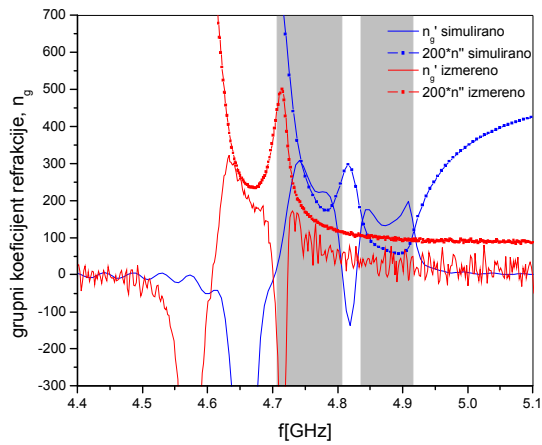


Slika 6. Grupno kašnjenje za modela pod 0 stepeni.

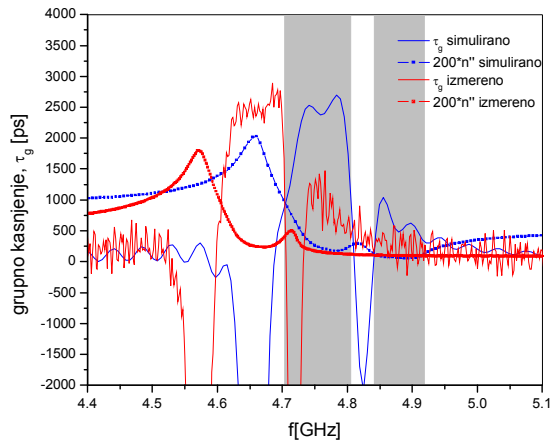
Na slikama 7, 8 i 9 su prikazani rezultati analize modela pod 90 stepeni. U ovom slučaju imamo tri opsega od interesa u kojima dolazi do usporavanja talasa, pri čemu su prva dva dosta izraženije, jer su nelinearnosti i skokovi u S parametrima znatno izraženije nego na trećem, pa taj treći nije prikazan. Veća strmina je postignutao tako što su donji SRR-ovi zarotirani za 90° , što znači da im rezonansa nije na istom mestu kao i kod gornjih SRR-ova, pa je pojava uskopojasnija, a pored toga obe rezonanse su veoma blizu, pa dodatno povećavaju nelinearnost. Vrednost grupnog kašnjenja u ovom slučaju dostiže vrednosti i do 2.8ns (slika 9).



Slika 7. Realni delovi efektivnih parametara (ϵ_{eff}' i μ_{eff}') sa S_{21} parametrom za model pod 90 stepeni.

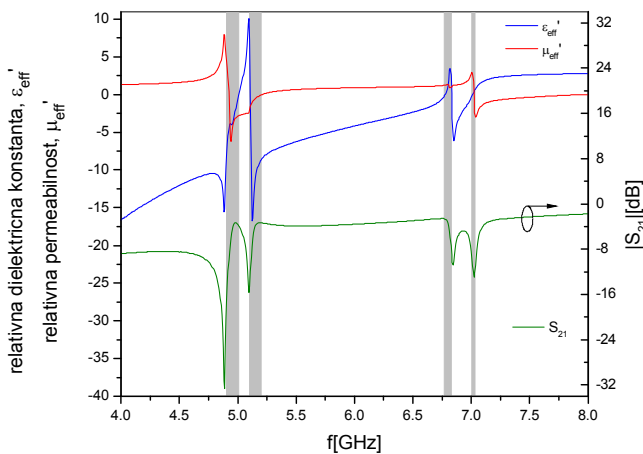


Slika 8. Grupni indeks refrakcije za model pod 90 stepeni.

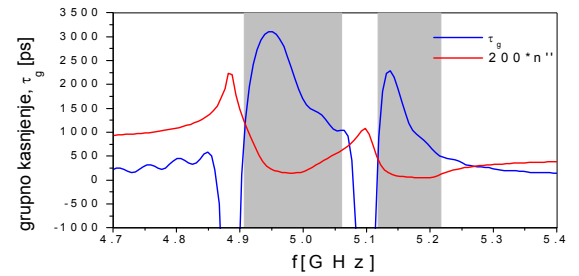


Slika 9. Grupno kašnjenje za model pod 90 stepeni.

Što se tiče transliranog modela pod 90 stepeni, on predstavlja zaključak svega ovoga, jer su svi SRR-ovi zarotirani za različitu vrednost ugla u odnosu na uvodnik, pa imamo četiri opsega od interesa (slika 10), pri čemu je kašnjenje značajno samo u prva dva opsega, pa ćemo u nastavku prikazati samo te opsege (slika 11). Kašnjenje ima najveće vrednosti od sva tri slučaja, kada posmatramo najdominantniji (prvi) opseg, a ta vrednost ide i do 3.1ns (slika 11). Opsezi od interesa su označeni sivim pravougaonicima.



Slika 10. Realni delovi efektivnih parametara (ϵ_{eff}' i μ_{eff}') sa S_{21} parametrom za translirani model pod 90 stepeni.



Slika 11. Grupno kašnjenje za translirani model pod 90 stepeni.

5. ZAKLJUČAK

U radu su predstavljene modeli linija za kašnjenje, koji rade u mikrotalasnom opsegu, koji su i praćeni simuliranim i eksperimentalnim rezultatima. Pokazano je da kašnjenje može da varira u opsegu od 0.75ns do 3.1ns u zavisnosti od položaja SRR-ova, pri čemu se dimenzije strukture ne menja. Uočeno je da se najveće kašnjenje javlja na mestima prelaska iz nepropusnog opsega (SNG metamaterijal) u propusni (DNG metamaterijal) opseg.

SRR-ovi korišćeni u ovom izlaganju su kvadratni zbog veće sprege sa uvodnicima, pri čemu jedan od sledećih izazova mogu da budu kružni SRR-ovi koji omogućavaju kontinualno podešavanje grupnog kašnjenja kontinualnom promenom ugla između SRR-ova.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansiran sredstvima Ministarstva prosvete i nauke preko projekta tehnološkog razvoja TR-32024.

LITERATURA

- [1] N. Liu, H. Liu, S. Zhu and H. Giessen, „Stereometamaterials“, *Nature Photonics*, vol. 3, pp. 157-162, 2009.
- [2] V. Milošević, B. Jakanović, B. Kolundžija „Mikrotalasni stereometamaterijali: Elektromagnetske osobine i rekonfigurabilnost“, *Zbornik radova LIV konferencije ETRAN-a*, Donji Milanovac, 2010.
- [3] P. Tassin, Lei Zhang, Th. Koschny, E. N. Economou and C. M. Soukoulis, „Low-Loss Metamaterials Based on Classical Electromagnetically Induced Transparency“, *Phy. Rev. Lett.*, 2009, 053901.
- [4] Shau-Gang Mao, Shiou-Li Chen and Chen-Wei Huang, „Effective Electromagnetic Parameters of Novel Distributed Left-Handed Microstrip Lines“, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, vol. 53, pp. 1515-1521, 2005.

Abstract – The paper presents numerical and experimental results of the effective electromagnetic parameters and group delay for different structures, which consist of microstrip line coupled with split-ring resonators. It is shown that with changing mutual position of split-ring resonators, group delay changes more than 4 times in the range from 0.75ns to 3.1ns in case of one unit cell. It is noticeable that the structure with split-ring resonators placed symmetrically in respect to the microstrip line has group delay much smaller than in case if a small asymmetry is introduced. The experimental results agree very well with simulations.

RECONFIGURABLE DELAY LINES WITH SPLIT-RING RESONATORS

Radovan Bojanić, Branka Jakanović, Vojislav Milošević