

NUMERIČKA KARAKTERIZACIJA GRIN METAMATERIJALA I NJIHOVA POTENCIJALNA PRIMENA NA MIKROTALASNIM I VIŠIM FREKVENCIJAMA

Bratislav Milovanović¹, Nebojša Dončov¹, Branka Jokanović², Tatjana Asenov¹
¹Elektronski fakultet u Nišu, ²Institut za fiziku u Beogradu

Sadržaj – U ovom radu su razmatrani *left-handed metamaterijali (LH MM)* sa posebnim akcentom na kompozitne strukture sa gradijentnim profilom indeksa refrakcije (*GRIN MM*) i njihove moguće primene. Ukazano je na značaj numeričke karakterizacije MM u postupku analize njihovih elektromagnetskih (*EM*) parametara, a za potrebe projektovanja komponenti i sklopova sa poboljšanim karakteristikama u odnosu na konvencionalna rešenja. Ukratko su opisani do sada razvijeni numerički modeli MM, implementirani u okviru TLM metoda, kao jednog od najpopularnijih numeričkih tehnika za analizu složenih EM struktura. Novi TLM model, razvijen od strane autora ovoga rada, omogućava modelovanje kompleksnih EM parametara disperzivnih LH MM u širokom frekvencijskom opsegu. Mogućnosti primene ovog modela za analizu GRIN MM struktura na mikrotalasnim i višim frekvencijama su ilustrovane na nekoliko primera pri čemu je tačnost modela verifikovana poređenjem sa analitičkim rešenjima.

Ključne reči – GRIN metamaterijali, TLM metod, Z transformacija, disperzivni model.

1. Uvod

Veštačke strukture koje su u prvoj deceniji 21. veka izazvale veliko interesovanje inženjera i fizičara nazivaju se metamaterijali (MM). MM su najčešće periodične strukture čije elektromagnetske (EM) osobine zavise od oblika i rasporeda elemenata ubačenih u osnovni material, a ne od hemijskog sastava samog materijala. Ove EM strukture okarakterisane ekstremnim efektivnim vrednostima permitivnosti i permeabilnosti ispoljavaju krajnje neobična svojstva kao što su negativan indeks refrakcije, antiparalelizam između fazne i grupne brzine, zatim “okretanje” zakona klasične fizike (*Snell*-ovog zakona, *Doppler*-ovog efekta, itd) [1]. Metamaterijali, posebno *left-handed* metamaterijali (LH MM) koji se karakterišu istovremeno negativnom permitivnošću i permeabilnošću, ili kako se još nazivaju metamaterijali sa negativnim indeksom refrakcije (*negative refractive index – NRI*), našli su primenu u brojnim oblastima u telekomunikacijama. Brojna istraživanja ukazuju da se primenom MM struktura mogu realizovati mikrotalasne komponente sa poboljšanim karakteristikama i manjim dimenzijama u odnosu na načine njihove realizacije sa konvencionalnim RH (*right-handed*) materijalima koji se mogu naći u prirodi [2,3].

Generalno, praktične primene MM struktura u telekomunikacijama mogu se svrstati u tri kategorije [4]. Prvu kategoriju čine talasovodne aplikacije, drugu zračeće aplikacije dok treća kategorija obuhvata aplikacije bazirane na efektu prelamanja talasa. Talasovodne MM strukture koje su već našle praktičnu primenu su: uređaji sa višestrukim (2x,3x,4x) neharmonijskim propusnim opsezima, komponente sa poboljšanim propusnim opsegom, rezonatori nultog reda, transformatori impedanse, raspodeljeni pojačavači, UWB modulatori kao i brojni uređaji za obradu analognih signala koji koriste prirodna disperzivna svojstva MM struktura. Rezonantne i prorezne antene sa vrlo uskom karakteristikom zračenja, zračeći elementi sa konusnim dijagramom zračenja, antenski nizovi velike usmerenosti, električne i magnetske monopol antene, adaptivni reflektori, inteligentni MIMO sistemi i analizatori spektra u realnom vremenu samo su neki primeri zračećih MM struktura. Koncept refrakcije talasa iskorišćen je za realizaciju sledećih aplikacija: kvazi-optički mikrotalasni sistemi, uključujući raspodeljena NRI sočiva, anizotropne MM površine, antene sa površinskim talasom i dr.

U poslednjih nekoliko godina vrlo su intenzivna teorijska i praktična istraživanja kompozitnih RH/LH struktura sa gradijentnim profilom indeksa refrakcije (*graded index metamaterials* – GRIN MM) [5-13]. Gradijente slojevite strukture realizovane sa prirodnim dielektričnim materijalima ili strukture realizovane kao niz paralelnih metalnih ploča-talasovoda (tkz. veštački dielektrici) već su našle primenu kod sočivo antena za realizaciju tradicionalnih i planarnih sočiva, a u cilju postizanja bolje usmerenosti karakteristike zračenja na radio i mikrotalasnim frekvencijama [14]. Za razliku od njih, GRIN strukture nude još jedan stepen slobode budući da uključuju i gradijentnu promenu permeabilnosti, što omogućava lakše prilagođenje na impedansu u slobodnom prostoru i nudi potencijalno bolje performanse na mikrotalasnim, THz i optičkim frekvencijama.

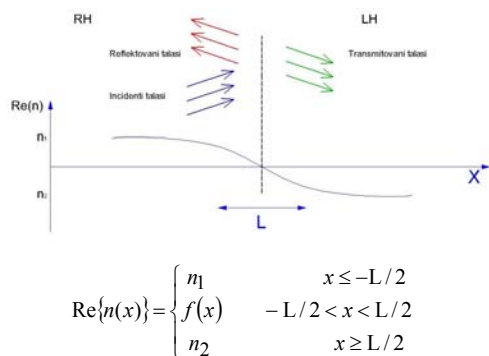
Za potrebe istraživanja fundamentalnih fizičkih principa LH MM i određivanja EM odziva praktičnih MM struktura, a u cilju projektovanja komponenti sa naprednim karakteristikama, brojne integralne i diferencijalne numeričke tehnike su modifikovane kako bi omogućile direktnu specifikaciju EM parametara MM kako u vremenskom tako i u frekvencijskom domenu. Za mnoge praktične probleme, pristup baziran na razvoju i primeni odgovarajućeg numeričkog modela MM omogućava značajno bržu analizu u odnosu na analognu implementaciju MM transmisionih linija u vidu LC ekvivalentne mreže koristeći simulatore električnih kola. Najpoznatije diferencijalne numeričke tehnike u vremenskom domenu su metod konačnih razlika (*Finite Difference Time-Domain, FD-TD*) [15] i metod modelovanja pomoću mreže transmisionih linija (*Transmission Line Matrix, TLM*) [16]. Direktna implementacija EM parametara MM u ovim tehnikama putem odgovarajućih numeričkih modela, omogućila bi traženje vremenskog odziva MM struktura u stacionarnom i prelaznom režimu, a za potrebe analize njihovog disperzivnog ponašanja. FD-TD metod se široko primenjuje za modelovanje interakcije EM talasa sa složenim strukturama i nekoliko tehnika je već primenjeno u okviru ove metode kako bi u vremenskom domenu opisale frekvencijski disperzivne MM strukture. Neke od njih su detaljnije objašnjene i referencirane u [15]. Sličan FD-TD metodu, TLM metod predstavlja numerički model *Maxwell*-ovih EM jednačina baziran na mreži transmisionih (tzv. *link*) linija. Stoga je koncept na kome se bazira TLM metod izuzetno povoljan za MM reprezentaciju u vidu tzv. *host* transmisionih linija periodično opterećenih kondenzatorima u rednim granama i kalemovima u šantnim granama. Koristeći ovaj pristup opterećene transmisione linije, TLM metod je poboljšan u [17,18] odgovarajućim modelima MM koji se zasnivaju na

umetanju reaktivnih stabova u konvencionalnu TLM mrežu *link* linija. Međutim, za razliku od poboljšanog FD-TD metoda za MM modelovanje, TLM modeli opisani u [17,18] su ograničene primene budući da omogućavaju direktnu specifikaciju samo realnih EM karakteristika MM (odnosno MM bez gubitaka) i to samo na jednoj frekvenciji projektovanja, za koju su vrednosti unetih reaktivnih stabova proračunate.

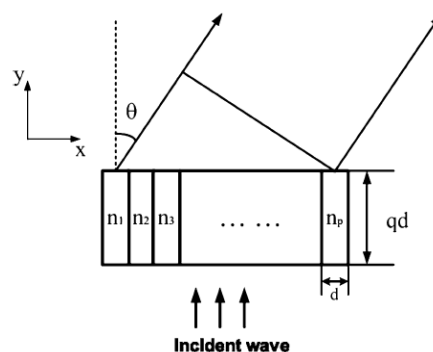
Za korektno modelovanje kompleksnih EM parametara MM u širokom frekvencijskom opsegu, primenom modifikovanog TLM-Z pristupa (TLM metod baziran na Z transformaciji), koji je prethodno u literaturi uspešno verifikovan kroz modelovanje frekvencijski zavisnih anizotropnih, nelinearnih i bi-anizotropnih prirodnih materijala [19], od strane autora ovog rada razvijen je disperzivni model MM koji je detaljno dat u [20,21]. Model koristi *Drude*-ovu funkciju za opisivanje frekvencijski zavisnog ponašanja permitivnosti i permeabilnosti LH MM i bilinearnu Z transformaciju za transfer te frekvencijske zavisnosti u vremenski domen i njenu implementaciju u TLM algoritam. Mogućnosti primene ovakvog modela, ugrađenog u 3D TLMscn-Z softver, koji se razvija duži niz godina u okviru Laboratorije za Mikrotalasnu tehniku i bežične komunikacije na Elektronskom fakultetu u Nišu, za numeričku karakterizaciju GRIN MM struktura i analizu njihovih karakteristika na mikrotalasnim i višim (npr. THz) frekvencijama biće ilustrovane u ovom radu na nekoliko primera na kojima je tačnost modela verifikovana poređenjem sa analitički dostupnim rešenjima.

2. GRIN MM i njihove primene

Poslednjih godina predmet mnogobrojnih istraživanja je jedinstven EM fenomen koji se javlja na graničnoj površini kompozitnih RH/LH struktura sa gradijentnim profilom indeksa refrakcije. Promena realnog dela indeksa refrakcije kod GRIN MM struktura je prikazana na Sl.1.



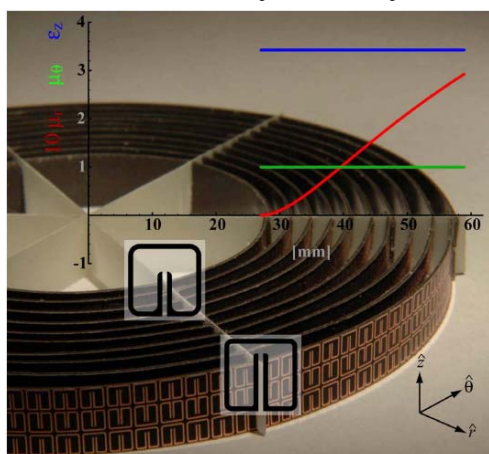
Slika 1. Kompozitna RH/LH struktura sa gradijentnom promenom realnog dela indeksa refrakcije



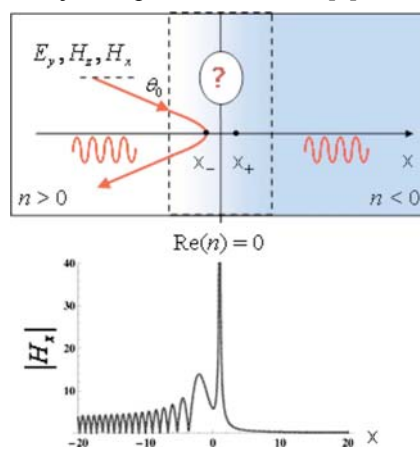
Slika 2. Konfiguracija GRIN MM sočiva za usmeravanje zračenja [3]. Promena indeksa refrakcije je duž x ose, $n_1 < n_2 < \dots < n_p$, tako da postoji konstantni fazni pomeraj između susednih slojeva

Kombinacija različitih gradijentnih profila indeksa refrakcije (funkcija $f(x)$ sa Sl.1) i osobina LH MM struktura nudi mogućnosti za brojne praktične aplikacije kao što su na primer sočiva. Tako je u [5], teorijski analizirano sferno sočivo sa postepenom promenom permitivnosti i permeabilnosti po zakonu $1/r$ (gde je r rastojanje od centra

sfere) za uvećanje slike u zoni bliskog polja zračenja. Sličan, linearan profil indeksa refrakcije analiziran je u [6] pri čemu je jedna takva rezonantna GRIN MM struktura praktično realizovana pomoću periodično ubačenih split ring rezonatora (SRR) sa različitom debljinom supstrata. Pokazano je da sočivo na bazi GRIN MM struktura nudi bolju spregu sa zračećim elementima za razliku od sočiva realizovanog konvencionalnih materijalima usled značajnog smanjenja efekta geometrijske aberacije. Stoga je predloženo da se ovakva sočiva mogu iskoristiti u realizaciji antena sa velikim dobitkom na visokom frekvencijama. Koncept GRIN MM sa SSR iskorišćen je u [7] za praktičnu realizaciju omotača nevidljivosti (*invisibility cloak*) u mikrotalasnom opsegu od 8-10 GHz. Ne-rezonantne GRIN MM realizovane u vidu slojeva zatvorenih prstenastih elemenata primenjene su u [10] za realizaciju mikrotalasnih kvazi-optičkih sočiva koji u opsegu od 8 do 12 GHz omogućavaju fokusiranje ili usmeravanje zračenja. Zahvaljujući mogućoj istovremenoj promeni permitivnosti i permeabilnosti, ove strukture se, za razliku od konvencionalnih sočiva, karakterišu sa malim povratnim gubicima i imaju potencijalnu primenu u širokom opsegu frekvencija. Primena sočiva na bazi GRIN MM za promenu pravca zračenja za ugao θ u odnosu na pravac prostiranja incidentnog talasa je ilustrovana na S1.2 [3], dok je promena oblika jediničnih SSR ćelija u cilju radialne promene indeksa refrakcije i realizacije omotača nevidljivosti prikazana na S1.3 [7].



Slika 3. Primena GRIN MM sa SRR za realizaciju omotača nevidljivosti - prikazane su jedinične SSR ćelije na sloju 1 i 10 [7]



Slika 4. Prostorna raspodela x komponente magnetskog polja za TE polarizovan incidentni talas [8]

Za nekoliko mogućih profila indeksa refrakcije GRIN MM struktura su u literaturi izvedena su rešenja za EM polje u zatvorenom obliku. Tako je u [9,12] dato analitičko rešenje za tangens hiperbolični (\tanh) profil realnog dela indeksa prelamanja koji je vrlo pogodan za analizu budući da obezbeđuje korektne asimptotske vrednosti za permitivnost i permeabilnost na krajevima RH i LH materijala kojima se realizuje GRIN MM struktura. Izvedeno rešenje dozvoljava proizvoljnu frekvencijsku zavisnost EM parametara kompozitne RH/LH strukture [9] i uzima u obzir gubitke [12]. U slučaju linearne i eksponencijalne zavisnosti permitivnosti i permeabilnosti, odgovarajuće analitičko rešenje je dato u [11]. Ipak treba reći da su ova analitički dostupna rešenja donekle ograničene primene budući da je u praksi jako teško realizovati ovakve profile i u širokom opsegu frekvencija.

Analizom prostiranja EM talasa kroz GRIN MM strukture otkriven je fenomen pojačanja EM polja i poboljšanja rezonantne apsorpcije [8,13]. Ovaj fenomen javlja se na graničnoj površini odnosno u prelaznoj oblasti kompozitne RH/LH strukture sa gradijentnom promenom indeksa refrakcije za indeks refrakcije jednak nuli i oštre upadne (incidentne) uglove. Fenomen pojačanja EM polja i poboljšanja rezonantne apsorpcije karakterističan je i za plazmu, ali samo za TM polarizovane talase, dok se kod GRIN MM javlja za obe polarizacije (TM i TE). Na Sl.4 je ilustrovan ovaj efekat za incidentni TE-talas koji pod uglom od $\pi/17$ rad pada na GRIN MM strukturu sa vrlo malim gubicima [8]. U okolini tačke gde je indeks refrakcije jednak nuli dolazi do velikog pojačanje H_x komponente polja. Slična analiza je izvršena i u [13], ali za GRIN strukturu sa gubicima pri čemu je pokazano da faktor pojačanja odgovarajuće komponente polja jako zavisi od polarizacije i širine tranzicionog sloja u odnosu na talasnu dužinu pobudnog talasa. Ovaj efekat može dovesti do brojnih primena MM na mikrotalasnim i višim frekvencijama za realizaciju antena i ostalih uređaja osetljivih na polarizaciju, koncentratora talasa, nelinearnih optičkih uređaja malog intenziteta i dr.

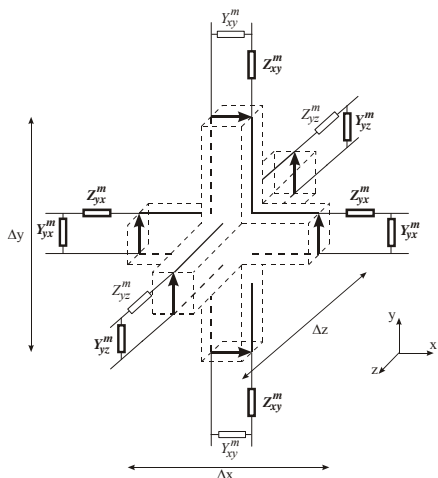
Iako su istraživanja kompozitnih RH/LH struktura sa gradijentnim profilom indeksa refrakcije skorijeg datuma, ona ukazuju da je reč o strukturama sa značajno poboljšanim karakteristikama u odnosu na konvencionalne materijale. Međutim, postoje poteškoće u praktičnoj realizaciji ovih struktura posebno na visokim frekvencijama budući da standardni metodi fabrikacije kao što su foto ili elektron litografija dozvoljavaju fabrikaciju samo planarnih struktura sa ograničenim brojem slojeva. Takođe, kako su MM disperzivne sredine sa velikim gubicima, primenom GRIN struktura moguće je ostvariti samo umerenu promenu indeksa refrakcije što u nekim potencijalnim praktičnim aplikacijama može da limitira efekte koja je moguće postići ovim strukturama.

3. TLM modeli MM

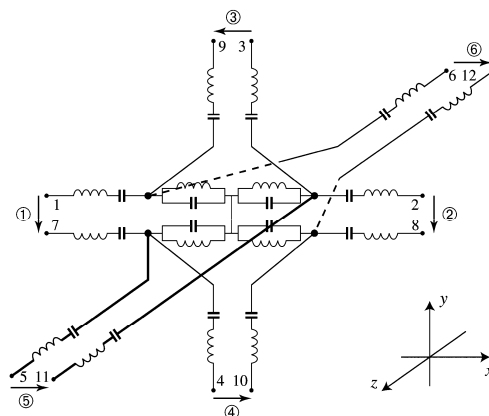
Zbog složene prirode MM, realizacija njihovih ekstremnih EM karakteristika, kao i njihova primena u praksi ne bi bila moguća bez dostupnosti naprednih i specijalizovanih numeričkih alata za njihovo modelovanje. Stoga je numerička analiza vrlo brzo postala jedna od ključnih komponenti u procesu istraživanja i primene MM struktura. Kako MM predstavljaju EM strukture koje se opisuju *Maxwell*-ovim jednačinama, stiče se utisak da se konvencionalne numeričke tehnike bez većih problema mogu koristiti za njihovo projektovanje i analizu. Međutim, brojni izazovi stoje na tom putu kao što: pod-talaska priroda MM struktura, njihova disperzivna priroda koja vrlo često dovodi do korišćenja prevelikog broja diskretnih čvorova koje računarski resursi ne mogu da podrže, naročito ako se radi o 3D strukturama, anomalije koje dovode do singulariteta, nestabilnosti ili pogrešnih rezultata zbog naglih promena indeksa refrakcije, prisustva metala, interfejsa materijala sa pozitivnim i negativnim indeksom refrakcije i sl. Kada je reč o optičkim frekvencijama, softverski alati koji se koriste za modelovanje konvencionalnih optičkih materijala i uređaja, po pravilu ne uzimaju u obzir magnetske karakteristike već pretpostavljaju da je $\mu_r=1$ na optičkim frekvencijama. Stoga su danas vrlo intenzivna istraživanja koja imaju za cilj da se postojeći numerički metodi unaprede kako bi odgovorili na postavljene izazove u postupku efikasne karakterizacije MM na visokim frekvencijama.

Kada je reč o TLM metodu, koncept na kome se bazira je izuzetno pogodan za realizaciju numeričkog modela LH MM ubacivanjem reaktivnih elemenata u TLM mrežu transmisionih linija na način kao što je opisano u [2]. Koristeći ovaj numerički model

reaktivno opterećenih transmisionih linija sa negativnim indeksom refrakcije, u referenci [17] predložen je odgovarajući TLM model LH MM baziran na 3D simetričnom kondenzovanom čvoru (SCN). Ovaj model se bazira na uvođenju dodatne reaktivne mreže na interfejsu između link linija susjednih čvorova koje su istih polarizacija. Na Sl.5 prikazana je realizacija ove međučvorne mreže za modelovanje MM čija je permitivnost u y -smeru $\varepsilon_0 \varepsilon_{ry}^m$ i permeabilnost u z -smeru $\mu_0 \mu_{rz}^m$ na željenoj frekvenciji. Admitansa u paralelnoj grani reaktivne mreže realizuje sa kalemom (tj. kratko-spojenim vodom), a impedansa u rednoj grani reaktivne mreže sa kondenzatorom (tj. otvorenim vodom) budući da su permitivnost i permeabilnost metamaterijala negativne veličine. Na sličan način se ubacuju kalemovi i kondenzatori reaktivnih mreža kojima se modeluje permitivnost i permeabilnost MM duž preostalih koordinatnih osa. Glavni nedostatak ovog pristupa je da su parametri kratko-spojenog i otvorenog staba proračunati tako da numerički model specificira EM karakteristike MM samo na jednoj frekvenciji projektovanja. Takođe, specifikacija se, upravo zbog prirode modela, odnosi samo na realne delove permitivnosti i permeabilnosti što znači da se gubici u MM ne uzimaju u obzir. Slični nedostaci važe i za rotirajući TLM metod, dobijen rotacijom polarizacija standardnog SCN čvora za 45° , koji je iskorišćen za praktičnu realizaciju 3-D izotropne LH MM strukture [18]. Na Sl.6 prikazana je topologija rotirajućeg TLM polučvora pri čemu se pomoću kapacitivnosti u rednom rezonantnom kolu i induktivnosti u paralelnom rezonantnom kolu modeluju EM parametri MM na željenoj frekvenciji.



Slika 5. SCN TLM čvor za međučvornom mrežom za modelovanje permitivnosti i permeabilnosti MM u y - i z -smeru, respektivno [17]



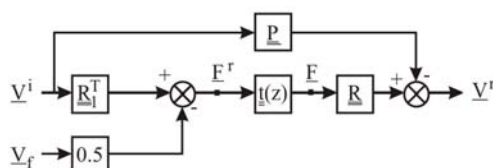
Slika 6. Rotirajući TLM polučvor kojim se opisuju kompozitni RH/LH MM [18]

Disperzivni TLM-Z model LH MM, razvijen primenom TLM metoda sa Z transformacijom [19] i implementiran u 1D [20] i 3D [21] TLM algoritam u vremenskom domenu, omogućio je opisivanje EM parametara disperzivnih metamaterijala sa gubicima u širokom frekvencijskom opsegu. Model je baziran na bilinearnoj Z transformaciji tzv. *Drude*-ove funkcije za opisivanje frekvencijski zavisnog ponašanja kompleksne permitivnosti i permeabilnosti realističnih LH MM struktura:

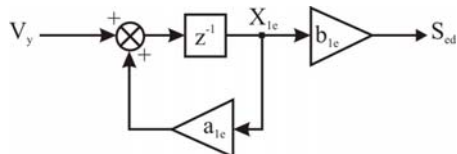
$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \left(\varepsilon_\infty - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 - j\omega\gamma_e} \right), \quad \mu(\omega) = \left(\mu_\infty - \frac{\omega_{pm}^2}{\omega^2 - j\omega\gamma_m} \right) \quad (1)$$

gde parametri *Drude*-ove funkcije $\omega_{pe,m}$ i $\gamma_{e,m}$ predstavljaju električnu i magnetsku plazma frekvenciju i odgovarajuću kolizionu frekvenciju kojom se opisuju gubici u MM.

Algoritam TLM metoda sa Z transformacijom, koji obuhvata proces rasejanja na TLM čvoru i proces povezivanja susednih čvorova, može se generalno predstaviti preko dijagrama toka signala prikazanog na Sl.7. Definicije vektorskih (označenih sa jednom donjom crtom) i matricnih veličina (označenih sa dve donje crte) sa Sl.7 se mogu naći u [19]. Postupak modelovanja kompleksnih EM parametara disperzivnih LH MM struktura u frekvencijskom domenu na bazi *Drude*-ove funkcije i bilinearne Z transformacije za transfer te frekvencijske zavisnosti u vremenski domen obavlja se u bloku $\underline{t}(z)$. Na Sl.8 prikazan je proračun za y komponentu električnog polja koji se realizuju u okviru bloka $\underline{t}(z)$, a na sličan način moguće je dobiti i ostale komponente električnog i magnetskog polja. Način proračuna akumulatora S_{ed} putem bloka $4\bar{\chi}(z)$, kojim se frekvencijska zavisnost EM parametara LH MM, putem parcijalnog razvoja, opisuje kao funkcija vrednosti u prethodnom vremenskom trenutku, detaljnije je prikazan na Sl.9. Izrazi kojima se opisuju veličine sa Sl.8 i 9 su kompletno dati u [20,21].



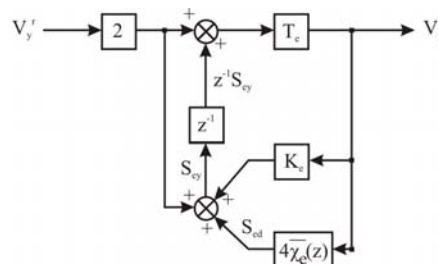
Slika.7. Dijagram toka signala kojim se predstavljaju procesi rasejanja i povezivanja u TLM metodu sa Z transformacijom [18]



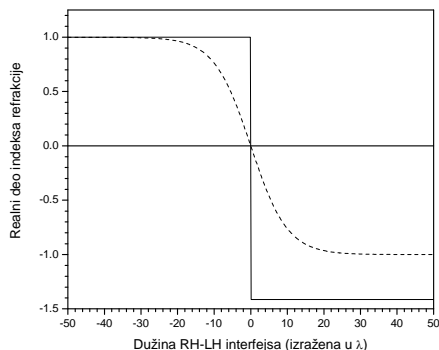
Slika 9. Detaljniji prikaz bloka $4\bar{\chi}(z)$ sa Sl.7

4. Numerički rezultati

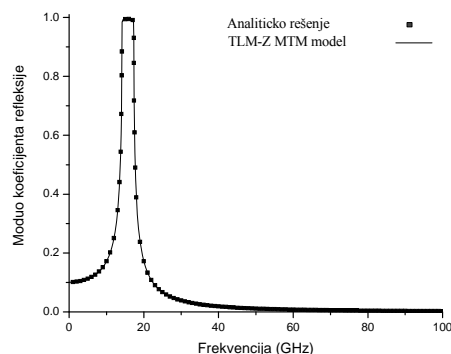
Mogućnosti primene razvijenog disperzivnog modela MM na GRIN strukture najpre je ilustrovana za abrupt (*abrupt*) profil indeksa refrakcije (Sl.1, $L=0$). Za ovaj profil, indeks refrakcije ima konstantnu vrednost u RH i LH materijalu. Kao RH materijal je izabran vazduh ($n=1$), dok su parametri *Drude*-ove funkcije izabrani različito za permitivnost i permeabilnost LH MM tako da je npr. na frekvenciji od $f=10$ GHz: $\varepsilon_r=-2$ i $\mu_r=-1$ ($n = \sqrt{2}$, puna linija na Sl.10), što daje moduo koeficijenta refleksije na razdvojnoj površini vazduh-LH MM od 0.172. Pobuda u vidu *Gauss*-ovog impulsa primenjena je u cilju ubacivanja energije u razmatrani frekvencijski opseg. Numerički proračunat koefijent refleksije na razdvojnoj površini RH/LH strukture slaže se sa analitičkim rešenjem dobijen elementarnom analizom (Sl.11).



Slika 8. Proračun y komponente električnog polja u vremenskom domenu za LH MM – disperzivni TLM-Z model

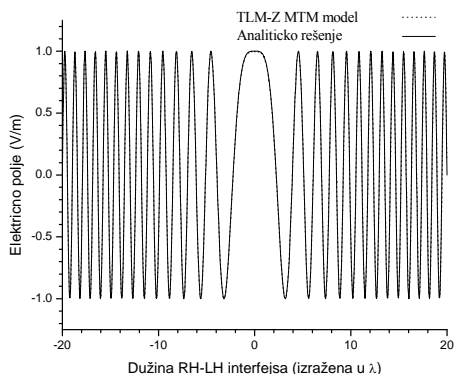


Slika 10. Realni deo indeksa refrakcije:
a) abruptni profil (puna linija), b) tanh profil (isprekidana linija)

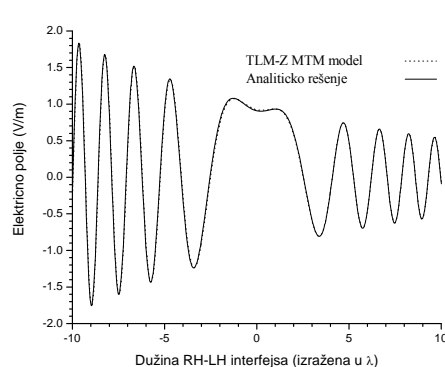


Slika 11. Koefficient refleksije na razdvojnoj površini RH/LH strukture za abruptni profil indeksa refrakcije sa Sl.10

Zatim je disperzivni TLM-Z model iskorišćen za analizu prostiranja EM talasa na razdvojnoj površini RH i LH materijala koji se karakteriše tangens hiperboličnim (tanh) profilom realnog dela indeksa prelamanja. Za ovaj profil je izvedeno analitičko rešenje kako za slučaj GRIN MM strukture bez gubitaka [9] tako i u slučaju gubitaka [12], koje je validno za proizvoljnu frekventijsku zavisnost EM parametara. Stoga je ovo analitičko rešenje iskorišćeno za verifikaciju razvijenog TLM-Z modela na dve različite frekvencije. Za slučaj bez gubitaka, RH/LH interfejs je pobuđen ravanskim talasom frekvencije 30 GHz (tj. $\lambda=1$ cm), dok je u slučaju gubitaka, primenjena pobuda frekvencije 300 THz (tj. $\lambda=1$ μm) i pretpostavljeno je da se imaginarni delovi permitivnosti i permeabilnosti ne menjaju duž interfejsa, da su međusobno jednaki i da iznose 0.01 na pobudnoj frekvenciji. U oba slučaja, tanh profil sa Sl.10 (isprekidana linija), je iskorišćen da opiše promenu realnih delova permitivnosti i permeabilnosti duž interfejsa na pobudnoj frekvenciji. Raspodela električnog polja za GRIN MM strukturu bez gubitaka i sa gubicima, proračunata primenom disperzivnog TLM-Z modela i uniformne mreže od 1000 čvorova, prikazana je na Sl.12 i 13, respektivno. Može se uočiti odlično slaganje rezultata sa analitičkim rešenjima [9,12].



Slika 12. Poređenje analitičkih i numeričkih rezultata za GRIN MM bez gubitaka za tanh profil indeksa refrakcije sa Sl.10



Slika 13. Poređenje analitičkih i numeričkih rezultata za GRIN MM sa gubicima za tanh profil indeksa refrakcije sa Sl.10

5. Zaključak

Kompozitne RH/LH strukture sa gradijentnim profilom indeksa refrakcije (GRIN MM), ukoliko se prevaziđu tehnološka ograničenja u njihovoj realizaciji, imaju potencijalno široku primenu u telekomunikacijama (antene, optika i dr.). Stoga je njihova efikasna numerička karakterizacija jedan od ključnih koraka u postupku analize i projektovanja komponenti i sklopova na bazi GRIN MM. Disperzivni numerički model, razvijen od strane autora ovoga rada i čija je tačnost u modelovanju GRIN MM uspešno verifikovana na mikrotalasnim i THz frekvencijama kroz nekoliko primera, biće u narednom periodu upotrebljen za detaljnije istraživanje efekata koje se mogu postići ovim strukturama. Mogućnosti ovog modela da analizira proizvoljne profile indeksa refrakcije, uz primenu TLM mreže adekvatne rezolucije, kao i da uzima u obzir gubitke u MM, omogućiće da se tokom tih istraživanja realnije sagledaju karakteristike GRIN MM i stepen njihove primenljivosti u praksi.

Zahvalnica

Ovaj rad je delom finansiran sredstvima Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj preko projekta tehnološkog razvoja TR-11009.

Literatura

- [1] G.V. Eleftheriades, K.G. Balmain, *Negative refraction metamaterials*, John Wiley & Sons, 2005.
- [2] C. Caloz, T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission line theory and microwave applications*, John Wiley & Sons, 2006.
- [3] T.J. Cui, D.R. Smith, R. Liu, *Metamaterials - theory, design and applications*, Springer, 2010.
- [4] C. Caloz, "Perspectives on EM metamaterials", *Materials Today*, vol. 12, no. 3, pp. 12-20, 2009.
- [5] S.A. Ramakrishna, J.B. Pendry, "Spherical perfect lens: Solutions of Maxwell's equations for spherical geometry", *Physical Review B*, vol. 69, pp. 115115-1-4, 2004.
- [6] D.R. Smith, J.J. Mock, A.F. Starr, D. Schurig, "A gradient index metamaterial", *Physical Review E*, vol. 71, no. 3, pp. 036609, 2005.
- [7] D. Schurig, J.J. Mock, B.J. Justice, S.A. Cummer, J.B. Pendry, A.F. Starr, D.R. Smith, "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequency", *Science*, vol. 314, pp. 977-980, 2006.
- [8] N.M. Litchinitser, A.I. Maimistov, I.R. Gabitov, R.Z. Sagdeev, V.M. Shalaev, "Metamaterials: Electromagnetic enhancement at zero-index transition", *Optics Letters*, vol. 33, no. 20, pp. 2350-2352, 2008.
- [9] M. Dalarsson, Z. Jakšić, P. Tassin, "Structures containing left-handed metamaterials with refractive index gradient: exact analytical versus numerical treatment", *Microwave Review*, vol. 15, no. 2, pp. 1-5, 2009.
- [10] R. Liu, Q. Cheng, J.Y. Chin, J.J. Mock, T.J. Cui, D.R. Smith, "Broadband gradient index microwave quasi-optical elements based on non-resonant metamaterials", *Optics Express*, vol. 17, no. 23, pp. 21030-21041, 2009.
- [11] P.C. Ingrej, K.I. Hopcraft, E. Jakeman, O.E. French, "Between right- and left-handed media", *Optics Communications*, vol. 282, pp. 1020-1027, 2009.
- [12] M. Dalarsson, M. Norgren, "Exact solution for lossy wave transmission through graded interfaces between RHM and LHM media", *Proceedings of Fourth*

- International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics – Metamaterials 2010*, pp. 854-856, Germany, 2010.
- [13] I. Mozjerin, E.A. Gibson, E.P. Furlani, I.R. Gabitov, N.M. Litchinitser, “Electromagnetic enhancement in lossy optical transition metamaterials”, *Optics Letters*, vol. 35, no. 19, pp. 3240-3242, 2010.
- [14] J.D. Krauss, *Antennas*, McGraw-Hill, Boston, 1988.
- [15] Y. Hao, R. Mitra, *FDTD modeling of metamaterials – theory and applications*, Artech House, 2009.
- [16] C. Christopoulos, *The transmission-line modelling (TLM) method in electromagnetics*, Publication in the Morgan & Claypool Publishers series, 2006.
- [17] P.M. So, H. Du, W.J.R. Hoefer, “Modeling of metamaterials with negative refractive index using 2-D Shunt and 3-D SCN TLM networks”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 4, pp. 1496-1505, 2005.
- [18] M. Zedler, C. Caloz, P. Russer “A 3-D isotropic left-handed metamaterial based on the rotated transmission-line matrix (TLM) scheme”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 55, no. 12, pp. 2930–2941, 2007.
- [19] J. Paul, C. Christopoulos, D.W.P. Thomas, “Generalized Material Models in TLM – Part I: Materials with Frequency-dependent Properties and Part II: Materials with Anisotropic Properties”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 47, no. 10, pp. 1528-1542, 1999.
- [20] N. Dončov, B. Milovanović, T. Asenov, J. Paul, “Application of the TLM method based on Z-transforms to the time-domain simulation of metamaterials”, *Proceedings of Fourth International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics – Metamaterials 2010*, pp. 576-578, Germany, 2010.
- [21] N. Dončov, B. Milovanović, T. Asenov, “Numerički model metamaterijala baziran na TLM metodu sa Z transformacijom”, *CD Zbornik radova 54. konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku*, ETRAN 2010, MT1.3-1-4, Srbija, 2010.

Abstract – In this paper, left-handed metamaterials (LH MM) are discussed with a special attention to composite RH/LH structures with a graded refractive index profile (GRIN MM) and their potential applications. Importance of numerical characterization of MM in the process of their EM parameters analysis and design of components and devices with advanced characteristics in comparison with classical solutions is highlighted. Numerical MM models, developed so far within TLM method, as one of the popular differential numerical techniques in the time-domain for complex EM structures modelling, are briefly described. The novel TLM model, developed from the authors of this paper, allows accurate modelling of complex EM parameters of dispersive LH MM in a wide frequency range. The ability of the model to be efficiently used for GRIN MM analysis at microwave and higher frequencies is illustrated on several examples and its accuracy is verified using analytical solutions.

Keywords – GRIN metamaterials, TLM method, Z transformation, dispersive model.

NUMERICAL CHARACTERIZATION OF GRIN METAMATERIALS AND THEIR POTENTIAL APPLICATIONS AT MICROWAVE AND HIGHER FREQUENCIES

Bratislav Milovanović, Nebojša Dončov, Branka Jokanović, Tatjana Asenov