

# Primena jednačina digitalnog modela eliptičke strukture na model T-rezonatora

Biljana P. Stošić, *Member, IEEE*

**Sadržaj** — U ovom radu, prikazan je postupak određivanja parametara rasejanja talasnog digitalnog modela mikrostrip eliptičke strukture (strukture sa rednom vezom voda i otvorenog staba u paralelnoj grani). Parametri rasejanja talasne digitalne mreže u  $z$ -domenu se izražavaju preko talasnih prenosnih parametara. Takođe, date su aproksimacije koje su potrebne kako bi se iste talasne prenosne matrice iskoristile i za slučaj strukture sa stabovima koje su ranije analizirane, a u cilju smanjenja različitih tipova talasnih digitalnih mreža koje se analiziraju, kao i opštosti primene do sada razvijenih algoritama.

**Ključne reči** — Eliptički filter, mikrostrip struktura, talasna digitalna mreža, T-rezonator,  $z$ -domen funkcije

## I. UVOD

Do sada je pokazano da teorija talasnih digitalnih filtera koju je uveo A. Fettweis [1], [2] predstavlja veoma moćan alat za modeliranje planarnih mikrotalasnih struktura pomoću talasnih elemenata. Efikasno se može primeniti za analizu struktura različitih geometrija u vremenskom i frekvencijskom domenu [3]-[14].

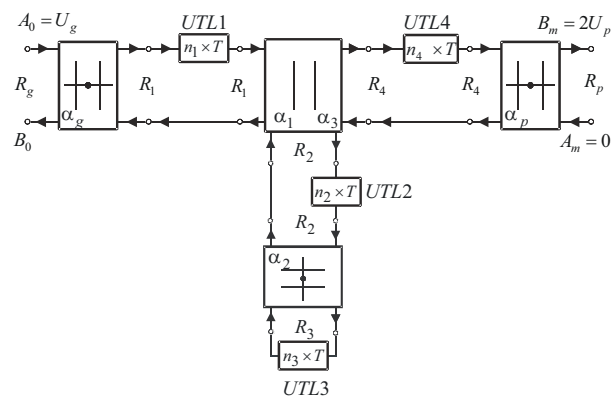
Ključni element talasnog pristupa je uvođenje talasnih promenljivih  $A$  i  $B$ , jer one omogućavaju pronalaženje odziva u talasnim digitalnim mrežama (TDM). Izgled jednodimenzionalne TDM zavisi bitno od geometrije same posmatrane planarne strukture. Tako dolazi do formiranja različitih tipova mreža koje odgovaraju: strukturama sa kaskadno-povezanim segmentima [6]-[8], strukturama sa stabovima [9]-[12], kao i eliptičkim strukturama sa rednom vezom dva voda u paralelnoj grani [14]. U njima se razlikuje način povezivanja modela uniformnih segmenata koji su predstavljeni kaskadnom vezom više jediničnih elemenata (JE).

U ovom radu je pokazano da se jednačine izvedene u radu [14] za TDM eliptičke strukture (strukture sa rednom vezom dva voda u paralelnoj grani) mogu pod određenim uslovima primeniti i za izračunavanje odziva u mrežama sa stabovima. To znači da se određene geometrije planarnih struktura koje poseduju sličnosti mogu modelirati i analizirati korišćenjem jedne te iste TDM. Na taj način se smanjuje broj različitih tipova TDM za strukture koje se javljaju u praksi. Time se dalje pojednostavljuje implementacija programa u MATLAB okruženje kako bi se ostvarila željena analiza.

Da bi se pokazala tačnost primenjenog pristupa, rezultati kompjuterske simulacije se porede sa rezultatima drugih autoru dostupnih softverskih aplikacija.

## II. PARAMETRI TALASNE DIGITALNE MREŽE

Posmatra se TDM koja predstavlja digitalni model eliptičke strukture, a sadrži tri tipa sastavnih blokova (JE, dvoprilazne i troprilazne adaptore), Slika 1. Blokovi  $n_k \times T$  predstavljaju modele uniformnih segmenata (UTL $k$ ) planarne strukture, tj. kaskadnu vezu  $n_k$  sekcija (tj. JE),  $k = 1, 2, 3, 4$ . Svaki JE opisan je kašnjenjem  $T_k$  i otpornošću prilaza  $R_k$  na svakom od prilaza. Otpornost prilaza JE jednaka je karakterističnoj impedansi homogene transmisione linije,  $R_k = Z_{ck}$ . JE se mogu direktno kaskadno povezivati.



Sl. 1. TDM strukture eliptičkog tipa.

Analizira se mreža koja sadrži ukupno  $n_u = \sum_{k=1}^4 n_k$  jediničnih elemenata, jedan troprilazni adapter i tri dvoprilazna adaptera. Simulacija veze između tri modela uniformnih segmenata, od kojih jedan predstavlja model redne veze dva voda, ostvaruje se pomoću troprilaznog paralelnog adaptera sa jednim zavisnim prilazom. Direktni talas  $A_0$  je jednak naponu izvora  $U_g$ , a reflektovani talas  $B_m$  je jednak naponu  $2U_p$  na opterećenju.

Izračunavanje odziva u TDM može se ostvariti direktno u frekvencijskom ili u vremenskom domenu na osnovu njenih funkcija u  $z$ -domenu. Funkcija mreže se dobija korišćenjem talasnih  $S$  i  $T$  matrica. Izloženi su postupci za formiranje funkcija za prenosne parametre  $S_{21}$  i  $S_{12}$ , kao i parametre refleksije  $S_{11}$  i  $S_{22}$ . Sve funkcije su oblika količnika dva polinoma, pri čemu se koeficijenti polinoma izračunavaju jednostavnim algoritmima. Analiza je efikasna jer se zahteva mali memorijski prostor, a vreme izračunavanja odziva je kratko.

Parametri rasejanja u  $z$ -domenu mreže mogu se izraziti preko talasnih prenosnih parametara [4]. Mreža se može

Biljana P. Stošić, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (telefon: 381-18-529303; e-mail: biljana.stosic@elfak.ni.ac.rs).

posmatrati kao kombinacija višeprilaznih podmreža. To znači da se TDM može analizirati kroz sledeće korake: 1. pronalaženje prenosnih  $T$  matrica pojedinih sastavnih delova mreže (dvoprilaznih i troprilaznih podmreža), 2. množenje  $T$  matrica pojedinačnih podmreža u cilju izračunavanja matrice cele mreže i 3. konvertovanje  $T$  matrice u  $S$  matricu. Ceo postupak je opisan nadalje.

*A. Talasne prenosne matrice pojedinih sastavnih delova mreže, tj. podmreža*

**Talasna prenosna matrica  $k$ -tog dvoprilaznog serijskog adaptera je**

$$\mathbf{T}_{\alpha_k} = \frac{1}{\alpha_k - 1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_k \\ -\alpha_k & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

gde je koeficijent adaptera

$$\alpha_k = \frac{R_k - R_{k+1}}{R_k + R_{k+1}}, \quad k = 0, 2, 4, \quad (2)$$

a  $R_0 = R_g$  i  $R_5 = R_p$  su otpornosti generatora i potrošača, respektivno. Ostale otpornosti su otpornosti prilaza kod  $JE$ . Za koeficijente važi da je  $\alpha_0 = \alpha_g$  i  $\alpha_4 = \alpha_p$ .

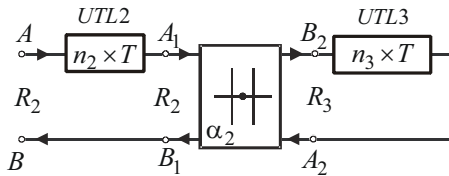
Talasna prenosna matrica jednog  $JE$  glasi

$$\mathbf{T}_{JE} = \frac{1}{z^{-1}} \cdot \begin{bmatrix} z^{-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

pa je **talasna prenosna matrica uniformnog segmenta modeliranog sa  $n_k$  kaskadno-povezanih  $JE$**

$$\mathbf{T}_{JE}^{n_k} = \underbrace{\mathbf{T}_{JE} \times \mathbf{T}_{JE} \times \dots \times \mathbf{T}_{JE}}_{n_k} = \frac{1}{z^{-n_k}} \cdot \begin{bmatrix} z^{-n_k} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Sada se posebno posmatra deo mreže sa Slike 1, odnosno jednoprilazna mreža prikazana na Slici 2 koja predstavlja talasni digitalni model veze voda i otvorenog staba. Dokaz ove činjenice je dat u radu [14]. Segment  $UTL2$  koji odgovara vodu je predstavljen kaskadnom vezom od  $n_2$   $JE$ , a segment  $UTL3$  koji odgovara stabu je predstavljen vezom od  $n_3$   $JE$ . Međusobna veza ovih segmenata je ostvarena dvoprilaznim serijskim adapterom koji je simbolički predstavljen na Slici 2 i karakterisan svojim koeficijentom  $\alpha_2$ .



Sl. 2. TDM kaskadne veze voda i staba.

Posmatra se generalno slučaj kada su otpornosti prilaza međusobno različite  $R_2 \neq R_3$ , kao i broj sekcija ( $JE$ ) kojima se modeliraju vod i stab,  $n_2 \neq n_3$ . Tada je reč o kaskadnoj vezi voda i otvorenog staba različitih karakterističnih impedansi i različitog broja  $JE$ . Za levi deo kola važe sledeće relacije

$$A_1 = z^{-n_2} \cdot A, \quad (5)$$

$$B = B_1. \quad (6)$$

Polazeći od jednačina za dvoprilazni serijski adapter

$$B_1 = -A_2 - \alpha_2 \cdot (A_1 + A_2), \quad (7)$$

$$B_2 = -A_1 + \alpha_2 \cdot (A_1 + A_2),$$

gde koeficijent adaptera ima vrednost datu izrazom (2), i uz korišćenje jednačina (5) i (6), kao i činjenice da je na njegovom desnom kraju vezan stab  $UTL3$  za koji važi

$$A_2 = z^{-n_3} \cdot B_2, \quad (8)$$

pronalaži se veza između talasnih promenljivih na ulazu mreže

$$B = \frac{z^{-n_2} \cdot (z^{-n_3} - \alpha_2)}{1 - \alpha_2 \cdot z^{-n_3}} \cdot A. \quad (9)$$

Potrebno je sada pronaći **talasnu prenosnu matricu troprilaznog paralelnog adaptera na čijem je zavisnom prilazu model kaskadne veze voda i staba**, centralni deo Slike 1. Jednačine za troprilazni paralelni adapter sa zavisnim prilazom 2 su

$$B_1 = B_2 + A_2 - A_1,$$

$$B_4 = B_2 + A_2 - A_4, \quad (10)$$

$$B_2 = A_2 + \alpha_1(A_1 - A_2) + \alpha_3(A_4 - A_2),$$

gde se za koeficijente njegovih množača na osnovu odvodnosti prilaza može pisati

$$\alpha_1 = \frac{2 \cdot G_1}{G_1 + G_2 + G_4} \quad \text{i} \quad \alpha_3 = \frac{2 \cdot G_4}{G_1 + G_2 + G_4}. \quad (11)$$

Konačno, talasna prenosna matrica posmatrane podmreže dobija se na osnovu relacija (5)-(10) nakon uvođenja određenih smena poput  $B_2 = A$  i  $A_2 = B$  i ima oblik

$$\mathbf{T}_{\alpha_1 \alpha_3}^{n_2, n_3} = \frac{1}{W(z)} \cdot \begin{bmatrix} Q_{11}(z) & Q_{12}(z) \\ Q_{21}(z) & Q_{22}(z) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Elementi matrice su količnici dva polinoma u funkciji od  $z^{-1}$  i to

$$Q_{11}(z) = -\alpha - \alpha_2 \cdot z^{-n_2} + \alpha \cdot \alpha_2 \cdot z^{-n_3} + z^{-(n_2+n_3)}, \quad (13)$$

$$Q_{12}(z) = \alpha_1 - 1 + \alpha_2 \cdot (\alpha_3 - 1) \cdot z^{-n_2} + \alpha_2 \cdot (1 - \alpha_1) \cdot z^{-n_3} + (1 - \alpha_3) \cdot z^{-(n_2+n_3)}, \quad (14)$$

$$Q_{21}(z) = 1 - \alpha_3 + \alpha_2 \cdot (1 - \alpha_1) \cdot z^{-n_2} + \alpha_2 \cdot (\alpha_3 - 1) \cdot z^{-n_3} + (\alpha_1 - 1) \cdot z^{-(n_2+n_3)}, \quad (15)$$

$$Q_{22}(z) = 1 + \alpha \cdot \alpha_2 \cdot z^{-n_2} - \alpha_2 \cdot z^{-n_3} - \alpha \cdot z^{-(n_2+n_3)}, \quad (16)$$

$$W(z) = \alpha_1 \cdot (1 - \alpha_2 \cdot z^{-n_2} - \alpha_2 \cdot z^{-n_3} + z^{-(n_2+n_3)}) \quad (17)$$

i

$$\alpha = 1 - \alpha_1 - \alpha_3. \quad (18)$$

Redosled koeficijenata u prethodnim polinomima, odgovara slučaju kada je  $n_2 < n_3$ .

*B. Modifikacija određenih talasnih prenosnih matrica za slučaj mreže sa otvorenim stabom*

U slučaju da otpornost prilaza  $R_3 \rightarrow \infty$  (Slika 2), onda ta mreža odgovara otvorenom stabu  $UTL2$ . Koeficijent dvoprilaznog adaptera dat jednačinom (2) je u tom slučaju

$$\alpha_2 = -1. \quad (19)$$

Smenom činjenice (19) u prvu jednačinu datu u (7), dobija se relacija za talasne promenljive sa Slike 2  $A_1 = B_1$ , što dalje daje vezu

$$B = z^{-n_2} \cdot A. \quad (20)$$

Polazeći od relacija (13)-(17) i činjenice (19), uz pretpostavku da je  $z^{-n_3} = 0$  (blok  $n_3 \times T$  nema elemenata), dobijaju se polinomi elemenata talasne prenosne matrice  $T_{\alpha_1 \alpha_3}^{n_2, n_3}$  troprilaznog adaptera na čijem je zavisnom prilazu vezan model otvorenog staba

$$Q_{11}(z) = -\alpha + z^{-n_2}, \quad (21)$$

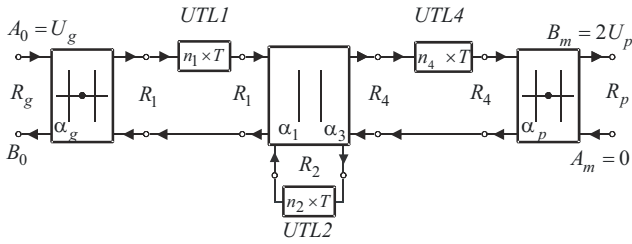
$$Q_{12}(z) = \alpha_1 - 1 + (1 - \alpha_3) \cdot z^{-n_2}, \quad (22)$$

$$Q_{21}(z) = 1 - \alpha_3 + (\alpha_1 - 1) \cdot z^{-n_2}, \quad (23)$$

$$Q_{22}(z) = 1 - \alpha \cdot z^{-n_2} \quad \text{i} \quad (24)$$

$$W(z) = \alpha_1 \cdot (1 + z^{-n_2}). \quad (25)$$

Ovi elementi talasne matrice odgovaraju u potpunosti elementima matrice  $T_{\alpha_1 \alpha_3}^{n_2}$  datim u [10]-[12], što je bio i očekivan rezultat. TDM sa Slike 1 modifikovana za slučaj otvorenog staba u paralelnoj grani je prikazana na Slici 3.



Sl. 3. TDM sa Sl.1 modifikovana za slučaj otvorenog staba u paralelnoj grani.

### C. Talasna prenosna matrica cele analizirane mreže

Talasna prenosna matrica  $T$  kompletne analizirane mreže se izračunava kao proizvod talasnih prenosnih matrica sastavnih blokova mreže, tj. podmreža

$$T = T_{\alpha_g} \times T_{JE}^{n_1} \times T_{\alpha_1 \alpha_3}^{n_2, n_3} \times T_{JE}^{n_4} \times T_{\alpha_p}. \quad (26)$$

Sistem jednačina za kompletnu mrežu sa Slike 1 je

$$B_0 = T_{11} \cdot A_m + T_{12} \cdot B_m, \quad (27)$$

$$A_0 = T_{21} \cdot A_m + T_{22} \cdot B_m, \quad (28)$$

pri čemu se talasna prenosna matrica može izraziti u formi polinoma

$$T = \begin{bmatrix} T_{11}(z) & T_{12}(z) \\ T_{21}(z) & T_{22}(z) \end{bmatrix} = \frac{1}{R(z)} \cdot \begin{bmatrix} F_{11}(z) & F_{12}(z) \\ F_{21}(z) & F_{22}(z) \end{bmatrix}. \quad (29)$$

Elementi talasne matrice su racionalne funkcije, tj. količnici dva polinoma u funkciji od  $z^{-1}$ .

Odnos elemenata talasne matrice određuje funkcije mreže koje se mogu izračunati

- koeficijent refleksije na prilazu 1 kada je prilaz 2 prilagođen

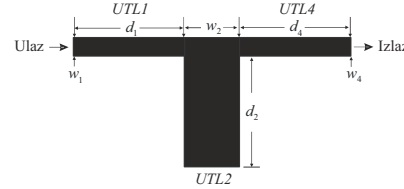
$$\Gamma_0 = S_{11} = \left. \frac{B_0}{A_0} \right|_{A_m=0} = \frac{T_{12}(z)}{T_{22}(z)} = \frac{F_{12}(z)}{F_{22}(z)}, \quad (30)$$

- koeficijent transmisije talasa od prilaza 1 ka prilazu 2 kada je prilaz 2 prilagođen

$$S_{21} = \left. \frac{B_m}{A_0} \right|_{A_m=0} = \frac{1}{T_{22}(z)} = \frac{R(z)}{F_{22}(z)}. \quad (31)$$

### III. REZULTAT SIMULACIJE

Posmatra se mikrostrip struktura prikazana na Slici 4. Materijal substrata je relativne dielektrične konstante  $\epsilon_r = 2.32$  i visine  $h = 1.58 \text{ mm}$ .



Sl. 4. Layout T-rezonatora.

Parametri uniformnih segmenata bez i sa uračunatim efektima diskontinuiteta dati su u Tabelama 1 i 2. Kada se primenjuju formule koje su izvedene za mrežu sa rednom vezom dva voda u paralelnoj grani, onda se uzima da treći uniformni segment  $UTL3$  ne postoji i koriste se određene aproksimacije koje su napred navedene.

TABELA 1: PARAMETRI SEGMENTA BEZ EFEKATA DISKONT.

nv	d [mm]	w [mm]	Zc [Ohm]	Tv [ps]
1	30.0000	4.7100	50.2540	139.8003
2	30.0000	15.7600	20.0016	145.0746
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	30.0000	4.7100	50.2540	139.8003

TABELA 2: PARAMETRI SEGMENTA SA EFEKTIMA DISKONT.

nv	d [mm]	w [mm]	Zc [Ohm]	Tv [ps]
1	22.1200	4.7100	50.2540	103.0794
2	28.4681	15.7600	20.0016	137.6665
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	22.1200	4.7100	50.2540	103.0794

Kako bi se postupak modeliranja što više automatizovao, minimalan broj sekcija za pojedine uniformne segmente se određuje na osnovu unapred zadate relativne greške kašnjenja [7], [8]. Za karakterizaciju diskontinuiteta se koriste odgovarajući teorijski modeli [6]-[12] i [15].

Za slučaj greške od 0.01%, prva relativna greška kašnjenja sa apsolutnom vrednošću manjom od zadate se javlja za parametar umnožavanja  $q = 134$ . Ukupan broj

sekcija u celoj TDM je  $n_u = \sum_{k=1}^3 n_k = 447$ . Broj

sekcija u individualnim segmentima je 134, 179, 0 i 134, respektivno. Parametri analize su: ukupno kašnjenje dig. modela  $T_u = n_u \cdot T_{\min} / q = 343.8254 \text{ ps}$  za min.

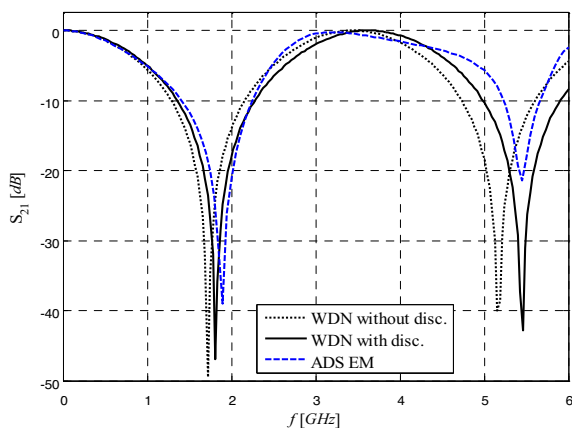
kašnjenje  $T_{\min} = \min\{T_1, T_2, T_4\} = 103.0794 \text{ ps}$  i ukupno

kašnjenje strukture  $T_{\Sigma} = \sum_{k=1}^4 T_k = 343.8544 \text{ ps}$ .

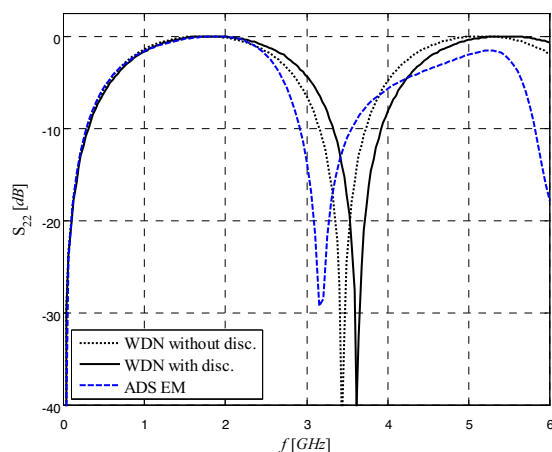
Frekvencija odabiranja digitalnog modela je  $F_s = n_u / T_u = 1299.9687 \text{ GHz}$ . Relativna greška kašnjenja

je tada  $gr = \frac{T_{\Sigma} - T_u}{T_{\Sigma}} \cdot 100\% = -0.008457\%$ . Koeficijenti adaptera u TDM sa Slike 1 imaju vrednosti:  $\alpha_g = -\alpha_p = -0.0025$ ,  $\alpha_1 = \alpha_3 = 0.4432$  i  $\alpha_2 = -1$ .

Frekvencijski odzivi dobijeni analizom TDM u MATLAB-u, kao i poznatim softverom za analizu ADS (Advanced Design Software), prikazani su na Slikama 5 i 6. Krive na graficima pokazuju istu zavisnost. Manja ili veća odstupanja rezultata su posledica izraženih efekata diskontinuiteta. Pобољшanje se može postići tačnijim uzimanjem u obzir efekata diskontinuiteta koji se pojavljuju u ovoj strukturi. Takođe, nisu uračunati gubici u metalu i dielektriku. Dobijene krive se poklapaju sa krivim dobijenim analizom mreže preko funkcija za mrežu sa stabovima [10]-[12].



Sl. 5. Frekvencijski odziv  $S_{21}$ .



Sl. 6. Frekvencijski odziv  $S_{22}$ .

Koeficijent transmisije  $S_{21}$  i refleksije  $S_{11}$ , jednačine (31) i (30), imaju polinome u brojiocu

$$R(z) = 0.4432 + 0.4432 \cdot z^{-179},$$

$$F_{12}(z) = 0.0025 - 0.5568 \cdot z^{-134} - 0.0003 \cdot z^{-179} + 0.0003 \cdot z^{-268} + 0.5568 \cdot z^{-313} - 0.0025 \cdot z^{-447},$$

i polinom u imeniocu

$$F_{22}(z) = 1 - 0.0028 \cdot z^{-134} - 0.1136 \cdot z^{-179} + 7.2890 \cdot 10^{-7} \cdot z^{-268} + 0.0028 \cdot z^{-313} - 6.4180 \cdot 10^{-6} \cdot z^{-447}.$$

#### IV. ZAKLJUČAK

Talasne prenosne matrice mreže sa vezom voda i otvorenog staba u paralelnoj grani koje su ranije izvedene, odgovaraju različitim slučajevima što se tiče otpornosti prilaza i broja sekcija. Ti izrazi se mogu pod određenim uslovima primeniti i na slučaj mreže samo sa otvorenim stabom u paralelnoj grani. To doprinosi smanjenju ukupnog broja različitih TDM koje treba analizirati, kao i opštosti softvera kojim se problem modelovanja i analize rešava.

Na osnovu poznatih elemenata talasne prenosne matrice kompletne mreže, kao i bibliotečkih funkcija softvera MATLAB, može se odrediti odziv direktno u frekvencijskom ili u vremenskom domenu. Formirane funkcije mreže u z-domenu mogu se kasnije koristiti kao ulazni podaci prilikom nekih drugih simulacija.

#### ZAHVALNICA

Rad je podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Srbije, projekat TR-11033.

#### LITERATURA

- [1] A. Fettweis, "Digital Circuits and Systems", *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. CAS-31, No.1, January, 1984, pp. 31-48.
- [2] A. Fettweis, "Wave Digital Filters: Theory and Practice", *Proc. IEEE*, Vol. 74, 1986, pp. 270-327.
- [3] W.K. Chen, *The Circuits and Filters Handbook*, CRC Press, 1995 (Wave Digital Filters, pp. 2634-2661).
- [4] M.V. Gmitrović, *Microwave and Wave Digital Filters*, Faculty of Electronic Engineering, Niš, 2007.
- [5] B.P. Stošić, *Analysis of Planar Microwave Structures Modeled by Wave Digital Elements*, Doctoral thesis, Faculty of Electronic Engineering, University of Niš, Niš, September 2008.
- [6] B.P. Stošić and M.V. Gmitrović, "Implementation of Wave Digital Model in Analysis of Arbitrary Nonuniform Transmission Lines", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 49, No. 9, September 2007, pp. 2150-2153.
- [7] B.P. Stošić and M.V. Gmitrović, "Direct Analysis of Wave Digital Network of Microstrip Structure with Step Discontinuities", *The 7th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering - ICOSSSE'08*, Italy, Venice, November 21-23, 2008, pp. 25-29.
- [8] B.P. Stošić and M.V. Gmitrović, "Wave Digital Approach - Different Procedures for Modeling of Microstrip Step Discontinuities", *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, Issue 3, Volume 2, 2008, pp. 209-218.
- [9] B.P. Stošić and M.V. Gmitrović, "Block-based Analysis of Microstrip Structures with Stubs by use of 1D Wave Digital Approach", *XLIV Intern. Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies - ICEST 2009*, Bulgaria, Veliko Tarnovo, June 25-27, 2009, pp. 23-26.
- [10] B.P. Stošić and M.V. Gmitrović, "A Wave Digital Approach in Obtaining z-domain Functions for Microstrip Stub-line Structures", *The 9th Intern. Conference on Telecom. in Modern Cable, Satellite and Broadcasting Services - TELSIS 2009*, Serbia, Niš, October 7-9, 2009, Vol. 1, pp. 193-197.
- [11] B.P. Stošić and M.V. Gmitrović, "Wave-based Modeling and Analysis of Microstrip Stub-line Structures", *17th Telecom. forum TELFOR 2009*, Serbia, Belgrade, Nov. 24-26, 2009, pp. 533-539.
- [12] B.P. Stošić, "Using z-variable Functions for the Analysis of Wave-based Model of Microstrip Stub-line Structure", *Microwave Review*, December 2009, Serbia, pp. 6-11.
- [13] F. Maggioni, "Time Domain Electrical Simulation using Equivalent Digital Wave Networks in ADS", *ADS User Group Meeting*, Rome, May 13, 2009.
- [14] B.P. Stošić, "T-matrica digitalnog modela strukture sa kaskadnom vezom voda i otvorenog staba u paralelnoj grani", *54 Konferencija ETRAN-a*, Srbija, Donji Milanovac, 07-11. jun 2010, MT1.1-1-4.
- [15] P.F. Combes, J. Graffeuil and J.-F. Sautereau, *Microwave Components, Devices and Active Circuits*, John Wiley & Sons, New York, 1987.