

Modelovanje mikrotalasnih sklopova na bazi cilindričnog rezonatora sa spregnutim probama

Jugoslav J. Joković, Bratislav D. Milovanović

Sadržaj — U radu su prezentovani rezultati modelovanja cilindričnog rezonatora sa spregnutim električnim probama. Numerički rezultati koeficijenta transmisije između žičanih probi dobijeni primenom 3D TLM metoda verifikovani su poređenjem sa merenim vrednostima. Na primeru delitelja snage realizovanog pomoću linearnih električnih probi u cilindričnom metalnom rezonatoru, razmatran je uticaj dužine probi u cilju određivanja uslova za maksimalni transfer snage. Pokazano je da rezultati primene TLM metoda, u poređenju sa Metodom momenata, pokazuju znatno bolje slaganje sa eksperimentalnim rezultatima.

Ključne reči — Delitelj snage, proba, TLM metod, transmisija, rezonator

I. UVOD

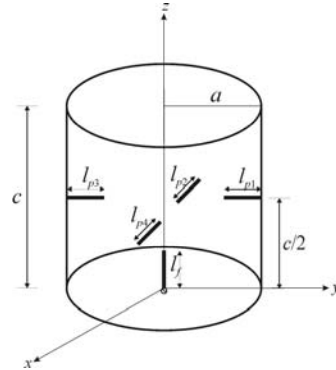
KOMUNIKACIONI sistemi (televizija, radio i sistemi mobilnih komunikacija), koji imaju kontinuiran i ekstenzivan razvoj, zasnivaju se na distribuciji informacija u odgovarajućem frekvencijskom opsegu servisa [1]. Veoma pogodna struktura u praksi je antena koja obezbeđuje unidirekcionalni dijagram zračenja, a koja se zasniva na cilindričnom rezonatoru sa pobudom preko električne probe (sonde) [2]. Dakle, cilindrični metalni rezonatori predstavljaju veoma pogodnu konfiguraciju za modelovanje različitih struktura u telekomunikacijama (delitelji snage [3], filtri), ali i u industriji (mikrotalasni aplikatori za zagrevanje i sušenje dielektrika [4]). Poznavanje ponašanja odabranog modela pod realnim uslovima ima veliki značaj i znatno olakšava postupak projektovanja navedenih mikrotalasnih sklopova.

Za analizu rezonatora koriste se S parametri. Koeficijent refleksije (S_{11}) je parametar koji daje informacije o frekvencijama na kojima se ostvaruje transfer energije u rezonator sa odgovarajućim prilagođenjem. Sa druge strane, za dobijanje potpune slike o raspodeli polja pobuđenih modova u rezonatoru može poslužiti karakteristika transmisije (S_{21}). Takođe, u sistemima gde se podrazumeva prenos snage, kao što su na primer delitelji snage i filtri, parametar S_{21} , služi kao kriterijum za optimizaciju u cilju obezbeđivanja maksimalnog transfera energije.

Ovaj rad prezentuje rezultate modelovanja i analize delitelja snage sa probama spregnutim unutar provodnog

cilindričnog rezonatora. Razmatrani delitelj snage sastoji se od provodnog cilindričnog rezonatora poluprečnika r i visine c . Na sredini zida rezonatora postavljena je pobudna proba orijentisana u z pravcu. Dužina pobudne probe je l_p , dok dužina razvodnih probi iznosi l_r . Razvodne probe su smeštene na visini $c/2$ od dna rezonatora, orijentisane su u r pravcu, a ugao između dve susedne probe iznosi 90 stepeni. Struktura cilindričnog delitelja snage prikazana je na Sl. 1. S obzirom na značaj određivanja uslova pod kojima se obezbeđuje efikasan transfer energije između probi, ovaj rad se fokusira na analizu zavisnosti odgovarajućih S parametara od dužine probi u rezonatoru.

Rezultati modelovanja dobijeni primenom numeričkog TLM (Transmission Line Matrix) modela koji obezbeđuje modelovanje žičanih elemenata i njihovu interakciju sa poljem u prostoru, upoređeni su sa rezultatima dobijenim primenom Metoda momenata (MoM). U cilju verifikacije modela dobijeni rezultati su upoređeni i sa odgovarajućim eksperimentalnim vrednostima.



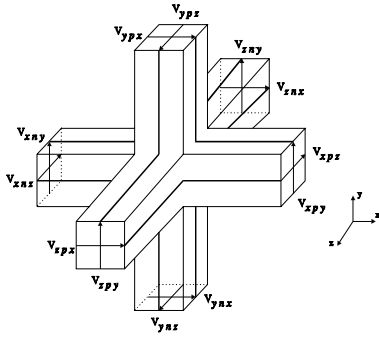
Sl. 1. Model delitelja snage sa spregnutim probama.

II. TLM METODOLOGIJA

U TLM metodu, raspodela elektromagnetskog polja u tri dimenzije, za odgovarajući mod oscilovanja u pravougaonom metalnom rezonatoru, modeluje se ispunjavajući prostor rezonatora mrežom transmissionnih linija i pobuđujući odgovarajuću komponentu polja u mreži [5]. Elektromagnetske karakteristike medijuma u rezonatoru se modeluju mrežom međusobno povezanih TLM čvorova. Tipična struktura TLM čvora, poznata kao simetrični kondenzovani čvor (Symmetrical Condensed Node - SCN), prikazana je na Sl. 2. Svaki čvor predstavlja deo medijuma u obliku kocke ili kružnog isečka u zavisnosti od primenjenog koordinatnog sistema (pravougaonog/cilindričnog).

Jugoslav Joković, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija; (e-mail: jugoslav@elfak.ni.ac.yu).

Bratislav Milovanović, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija; (e-mail: bata@elfak.ni.ac.yu).



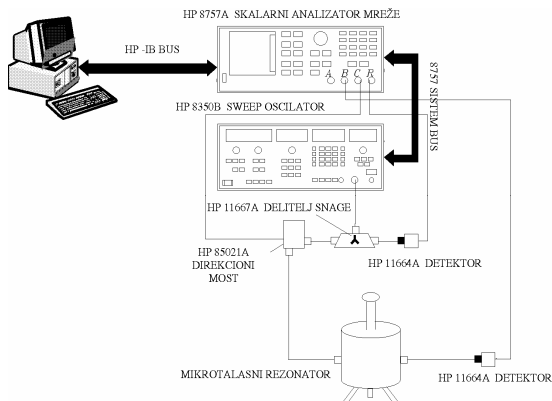
Sl. 2. Simetrični kondenzovani čvor

Kod žičanog *TLM* čvora, žičane strukture se tretiraju kao novi elementi u mreži koji povećavaju kapacitivnost i induktivnost sredine u kojoj se nalaze [6]. Žičana mreža se formira od dodatnih električnih vodova i stabova čiji su parametri izabrani tako da modeluju rast kapacitivnosti i induktivnosti prouzrokovan prisustvom žice, održavajući u isto vreme sinhronizaciju sa drugim delom *TLM* mreže. Konfiguracija žičane mreže za slučaj pravog žičanog segmenta koji se pruža u *i* smeru obezbeđuje koezistentnost sa ostalim delom *TLM* mreže jer se novi elementi predstavljaju u obliku dodatne mreže *TLM* vodova i stabova.

III. REZULTATI I ANALIZA

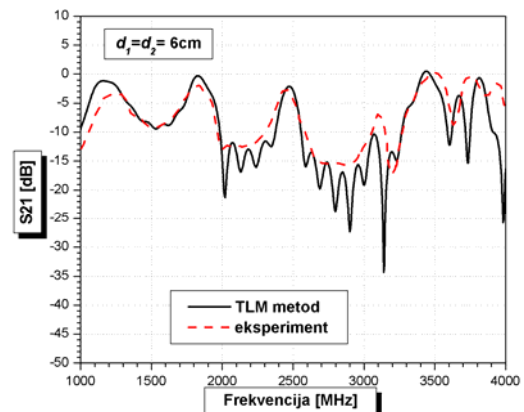
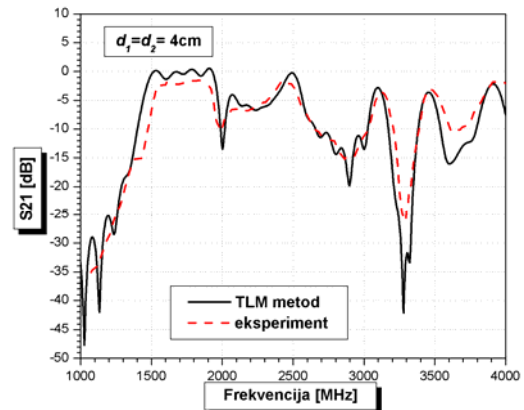
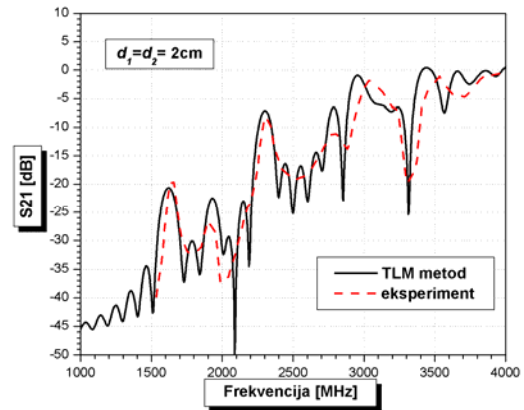
A. Eksperimentalna verifikacija

Numerički rezultati modelovanja cilindričnog rezonatora sa spregnutim električnim probama za različite vrednosti dužine pobudne i prijemne probe, dobijeni primenom *TLM* simulatora upoređeni su sa odgovarajućim eksperimentalnim rezultatima. Dimenzije analiziranog cilindričnog rezonatora su $2a = 14$ cm i $c = 14.25$ cm. Pobudna i prijemna proba, u obliku pravog žičanog provodnika, postavljene su na visini $l = 7.4$ cm od dna rezonatora, u radijalnom pravcu, jedna nasuprot druge. Poluprečnik probe iznosi $r = 0.5$ mm a dužina d je promenljiva. Za modelovanje rezonatora korišćena je uniformna *TLM* mreža dimenzija $43 \times 43 \times 35$ čvorova. Verifikacija dobijenih rezultata izvršena je eksperimentalnim merenjima korišćenjem merne aparature prikazane na Sl. 3.



Sl. 3. Merna aparatura za eksperimentalnu verifikaciju postupka transmisije kod metalnog rezonatora

U cilju eksperimentalne verifikacije numeričkih *TLM* rezultata modelovanja rezonatora sa spregnutim probama, na Sl. 4. dat je uporedni prikaz karakteristika transmisije dobijenih eksperimentalnim putem i primenom *TLM* metoda sa pobudnom i prijemnom probom, čije su dužine menjane u opsegu $d = [2 \div 6]$ cm. Kao što se može uočiti sa slike, slaganje rezultata je veoma dobro i kada se odnosi na rezonantne frekvencije i na nivo polja. Razlike u obliku krivih (eksperimentalne su glatke, a numeričke imaju oscilacije) predstavljaju rezultat numeričkog modelovanja koje pretpostavlja da su zidovi rezonatora savršeno provodni.



Sl. 4. Poređenje eksperimentalnih i numeričkih *TLM* rezultata karakteristike transmisije

B. Analiza delitelja snage

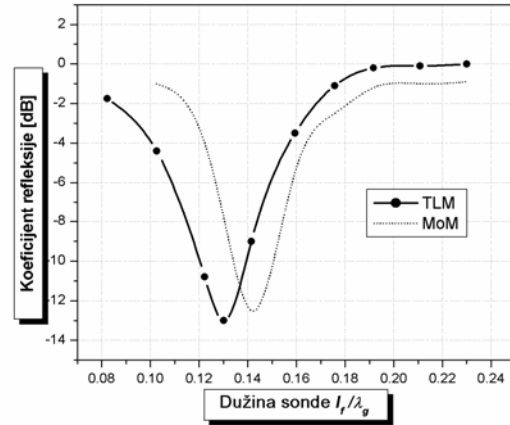
Dimenzije analiziranog cilindričnog delitelja snage su $2a = 9.25$ cm i $c = 7.25$ cm. Pobudna proba, dužine l_f , postavljena je na sredini donjeg zida rezonatora, duž z ose, a četiri razvodne probe su smeštene u horizontalnoj ravni, na visini $c/2$ od dna rezonatora, i imaju dužinu l_{pi} ($i = 1,2,3,4$). Na osnovu Slike 1 može se uočiti da položaj pobudne probe obezbeđuje uspostavljanje TM_{mnp} modova, dok, sa druge strane, razvodne probe mogu detektovati TM_{mnp} modove sa neparnim indeksom p . Prečnik probi je izabran da bude $r = 0.5$ mm, pri čemu je dužina probi menjana sa ciljem da se obezbedi efikasan transfer energije. Za modelovanje rezonatora korišćena je uniformna TLM mreža dimenzija $37 \times 37 \times 29$ čvorova. Tokom numeričke analize pretpostavljeno je da su zidovi rezonatora i električne probe sastavljeni od idealno provodnog materijala.

U cilju optimizacije dužine pobudne probe, analiza je izvršena za dužine pobudne probe u opsegu $l_f = (0.08 \div 0.25)\lambda_g$ na radnoj frekvenciji f_g , koja odgovara TM_{111} modu oscilovanja ($f_{rez} = 2.469$ GHz). Uvedena normalizacija dužine probe preko talasne dužine ima za cilj da generalizuje dobijene zaključke i za ostale modove koji su uspostavljeni na opisani način.

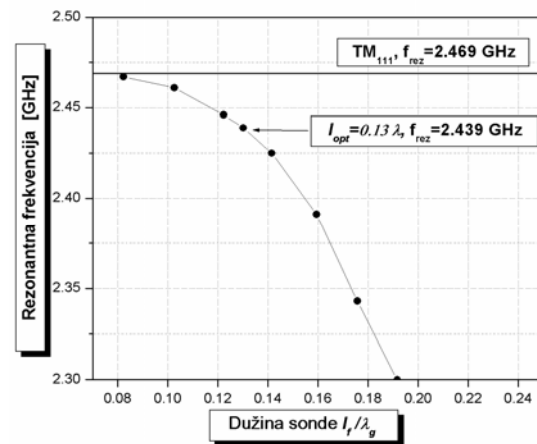
Na Sl. 5 dato je poređenje numeričkih rezultata dobijenih primenom TLM metoda i MoM , pri čemu je za osnovnu funkciju izabrana *Green*-ova funkcija [3]. Može se uočiti veoma dobro slaganje dobijenih vrednosti koeficijenta refleksije u zavisnosti od dužine probe. Primenom TLM metoda, minimalni nivo koeficijenta refleksije $S_{11} = -13$ dB, kome odgovara koeficijent stojećeg talasa $KST = 1.58$, postignut je za dužinu pobudne probe $l_{f,opt} = 0.13 \lambda_g$. Sa druge strane, kod MoM , optimalna vrednost koeficijenta refleksije $S_{11} = -12.5$ dB, kome odgovara koeficijent stojećeg talasa $KST = 1.62$, ostvarena je za dužinu probe $l_{f,opt} = 0.14 \lambda_g$.

Ovo odstupanje optimalne dužine pobudne probe može se objasniti činjenicom da je u modelu delitelja na bazi MoM , korišćenjem *Green*-ova funkcija zanemarena debljina probi [3], odnosno žičane probe su smatrane beskonačno tankim. Sa druge strane, TLM metod omogućava modelovanje žičanih struktura realnog poluprečnika, pa je u razmatranom slučaju uzeta vrednost za prečnik probi $r = 0.5$ mm. Realna žica, kapacitivnog karaktera ulazne impedanse, ubačena u rezonator dovodi do pomeranja rezonantnih frekvencija ka nižim vrednostima [7]. Dakle, u TLM analizi, za razliku od MoM , uzima se u obzir promena rezonantnih frekvencija. Na Sl. 6. data je zavisnost rezonante frekvencije TM_{111} moda od dužine pobudne probe, gde se može videti da optimalna dužina probe, za dati poluprečnik, uzrokuje pomeranje rezonantne frekvencije od teorijske vrednosti 2.469 GHz na vrednost 2.439 GHz.

Dakle, na osnovu prikazanih rezultata, može se zaključiti da dužina pobudne probe $l_{f,opt} = 0.13 \lambda_g$ daje optimalni transfer energije u rezonator, ali se prilikom projektovanja delitelja snage mora uzeti u obzir uticaj probe na smanjenje radne frekvencije.



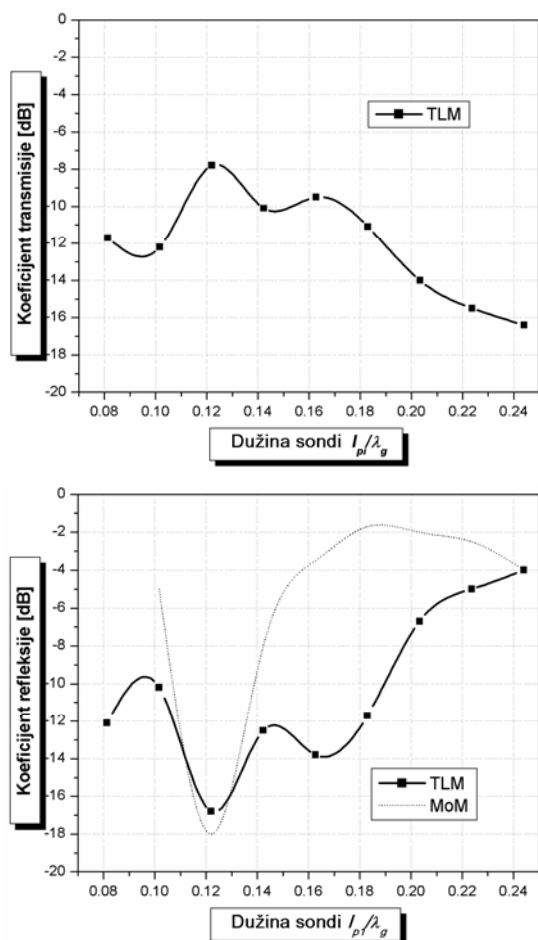
Sl. 5. Koefficient refleksije u zavisnosti od dužine pobudne probe



Sl. 6. Zavisnost rezonante frekvencije TM_{111} moda od dužine pobudne probe

Sledeći korak analize predstavlja optimizacija dužine razvodnih probi. U tom cilju, za optimalnu dužine pobudne probe, TLM simulacija je izvršena za dužine razvodnih probi u opsegu $l_p = (0.07 \div 0.25)\lambda_g$. Na Sl. 7 prikazana je najpre karakteristika transmisije u posmatranom opsegu dužina razvodnih probi. Uočava se da je maksimalni nivo koeficijenta transmisije dobijen za dužinu razvodnih probi $l_p = 0.12 \lambda_g$. Numerički rezultati su isti za sve razvodne probe zbog simetrične strukture provodnog cilindričnog rezonatora.

Uopredni TLM i MoM rezultati koji ilustruju uticaj dužine razvodnih probi na koeficijent refleksije prikazani su takođe na Sl. 7. Kao što se može videti, poređenjem vrednosti koeficijenata refleksije dobijenih primenom TLM metoda i Metoda Momenata pokazano je da je postignuto dobro slaganje. Primenom TLM metoda optimalni nivo koeficijenta refleksije, ($S_{22} = -16.8$ dB, $KST = 1.34$) dobijen je za dužinu razvodnih probi $l_{p,opt} = 0.12 \lambda_g$. Kod metoda momenata, optimalna vrednost koeficijenta refleksije ($S_{22} = -18.0$ dB, $KST = 1.28$), ostvarena je takođe za dužinu probe $l_{p,opt} = 0.12 \lambda_g$. Može se pokazati da u ovom slučaju, promena dužine razvodnih probi ne utiče značajno na vrednost rezonantne frekvencije TM_{111} moda [7].



Sl. 4. Koeficijenti transmisije i refleksije, u zavisnosti od dužine razvodnih probi

U Tabeli 1 prikazane su merene vrednosti koeficijent stojećeg talasa (KST) pobudne i razvodne probe. Vrednosti koje odgovaraju optimalnim dužinama probi su $KST = 1.85$, za pobudnu probu, i $KST = 1.40$, za razvodne probe. Na osnovu poređenja sa eksperimentalnim rezultatima [3], uočava se da TLM rezultati pokazuju bolje slaganje sa merenim vrednostima u odnosu na MoM gde je zanemarena debljina probi, što TLM metod, s obzirom da omogućava modelovanje žičanih struktura realnog poluprečnika, čini pogodnijim za projektovanje delitelja snage.

TABELA 1: POREĐENJE NUMERIČKIH REZULTATA SA MERENIM PARAMETRIMA DELITELJA SNAGE.

Proba	MoM	TLM	Eksp.	
<i>Pobudna</i>	$l_{f\ opt}(\lambda_g)$	0.14	0.13	0.13
	KST	1.62	1.58	1.85
<i>Razvodna</i>	$l_{p\ opt}(\lambda_g)$	0.12	0.12	0.12
	KST	1.28	1.34	1.40

IV. ZAKLJUČAK

Ovaj rad prezentuje rezultate eksperimentalne verifikacije TLM modela cilindričnog rezonatora sa spregnutim probama, kao i analizu karakteristika delitelja snage realizovanog pomoću linearnih električnih probi u metalnom rezonatoru. Delitelj snage sa jednom pobudnom i četiri razvodne probe je analiziran pomoću TLM pristupa uključujući model žičanog čvora za modelovanje probi. $3D\ TLM$ program je primenjen za analizu uticaja dužine probi u cilju određivanja uslova za maksimalni transfer snage u praktičnim aplikacijama. Dobijeni numerički rezultati upoređeni su sa rezultatima dobijenim primenom Metoda momenata, kao i sa eksperimentalnim vrednostima. Pokazano je da je TLM metod, u poređenju sa MoM , pogodniji za modelovanje delitelja snage jer omogućava modelovanje žičanih struktura realne debljine. Zahvaljujući tome, TLM metod predstavlja veoma koristan alat za projektovanje mikrotalasnih sklopova kod kojih se ostvaruje sprega elektromagnetnog polja sa žičanim elementima.

LITERATURA

- [1] H. Holma, A. Toskala, "WCDMA for UMTS", New York: John Wiley and Sons, 2000
- [2] R. Wongsan, C. Phongcharoenpanich, M. Krairiksh, "Analysis of input impedance of a sectorial cylindrical cavity-backed slot antenna fed by probe", Proceeding of International Symposium on Antenna and Propagation, Fukuoka, 2000, pp. 613-616.
- [3] S. Amnartpluk, C. Phongcharoenpanich, S. Kosulvit, M. Krairiksh, "A power divider using linear electric probes coupling inside conducting cylindrical cavity", Circuits and Systems, Proceedings of the 2003 International Symposium on ISCAS '03, Volume 3, 2003, pp. 419-422.
- [4] T.V.C.T. Chan, H. C. Reader, "Understanding Microwave Heating Cavities", Artech House, Boston, London, 2000.
- [5] C. Christopoulos, "The Transmission-Line Modelling Method", IEE/OUP Press, 1995.
- [6] V. Trenkić, A.J. Włodarczyk, R.A. Scaramuzza, "Modelling of Coupling Between Transient Electromagnetic Field and Complex Wire Structures", International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, Vol.12, No.4, 1999, pp.257-273
- [7] J. Jokovic, B. Milovanovic, N. Doncov, "TLM Analysis of a Cylindrical Metallic Cavity Excited with a Real-Feed Probe", International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, John Wiley, USA, Vol.16, No.4, 2006, pp.346-354.

ABSTRACT

In this paper, results of modelling of cylindrical cavity with coupled electric probes are presented. Numerical results of transmission coefficient between wire probes obtained using 3D TLM method are experimentally verified. Power divider using electric probes coupling inside metallic cavity is analysed regarding to probe length influence on conditions of energy transfer. As against Method of Moments, TLM results show better agreement with experimental ones.

MODELLING OF MICROWAVE DEVICES BASED ON CYLINDRICAL CAVITY WITH COUPLED PROBES

Jugoslav Joković, Bratislav Milovanović