

TUNELOVANJE POLJA KROZ UZAK KANAL I NJEGOVA PRIMENA ZA PROJEKTOVANJE MINIJATURNIH ANTENA

Miranda Mitrović, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, miranda.mitrovic@gmail.com
Branka Jokanović, Institut za fiziku u Zemunu, brankaj@ipb.ac.rs

Nagrađeni rad mladog istraživača

Sadržaj – Ispitivani su uslovi tunelovanja polja kroz uzak kanal koji je dobijen smanjenjem visine pravougaonog talasovoda. Pokazano je da se tunelovanje dešava na frekvenciji za koju efektivna dielektrična konstanta u kanalu postaje jednaka nuli, što znači da se ova struktura može tretirati kao ENZ (epsilon-near-zero) metamaterijal. Ispitivan je uticaj geometrije kanala, kao i dielektrične konstante materijala u talasovodima, na transmisiju i povećanje gustine polja u kanalu. Na kraju je pokazano kako se može realizovati antena malih dimenzija pravljenjem otvora u ENZ kanalu. Antena čije su dimenzije 50x50mm ima direktivnost 5.44 dBi na učestanosti 3GHz.

1. UVOD

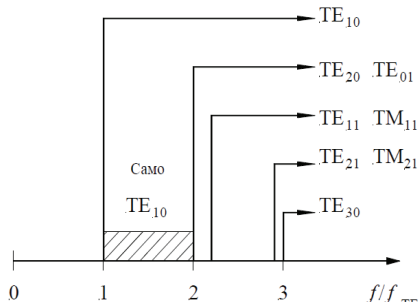
Tokom protekle decenije razvilo se veliko interesovanje za metamaterijale čija je relativna permitivnost ϵ_r bliska nuli (epsilon-near-zero, ENZ). Ovakvi materijali se mogu dizajnirati primenom već poznatih tehnika, kao što su *split-ring* rezonatori [1], a za oponašanje ENZ metamaterijala može se iskoristiti i disperziona karakteristika pravougaonog talasovoda u blizini granične učestanosti osnovnog moda [2]. Primene ovakvih materijala su raznovrsne – od *cloaking* naprava [3], preko konfiniranja energije na jako malom prostoru (tj. ispod difrakcionog limita) [4], sprežanja talasovoda uskim kanalom bez gubitaka [2], do konstruisanja jako usmerenih antena malih dimenzija [5]. U ovom radu biće razmatran slučaj tunelovanja polja kroz uzak kanal, kao i njegova primena u konstrukciji jako usmerenih minijaturnih antena.

2. TEORIJSKA ANALIZA

Pravougaoni talasovod širine a i visine b (pri čemu se uzima da je $a > b$) podržava prostiranje TE i TM modova. Granična učestanost iznad koje se pojedini modovi javljaju određena je formulom:

$$f_{c(m,n)} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}, \quad (1)$$

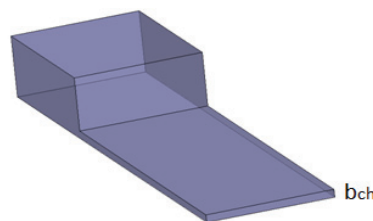
gde je a širina, b visina talasovoda, a ϵ_r relativna dielektrična konstanta materijala kojim je ispunjen talasovod.



Sl. 1 Raspored modova u pravougaonom talasovodu kod koga je $b=a/2$

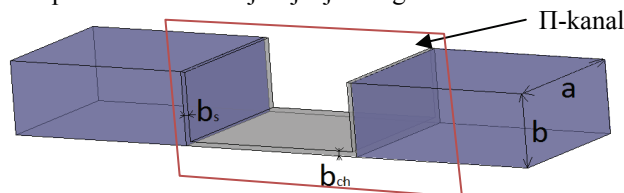
U slučaju kada je visina talasovoda $b=a/2$, redosled kojim se modovi javljaju prikazan je na Sl. 1. Jasno se vidi da je osnovni mod pravougaonog talasovoda TE_{10} , a prvi sledeći TE_{20} . Opseg frekvencija između graničnih učestanosti ova dva moda se uzima kao propusni opseg pravougaonog talasovoda. Naglašavamo da smanjenje visine talasovoda b ne utiče na propusni opseg talasovoda, jer granične učestanosti modova TE_{10} i TE_{20} ne zavise od b . Sa smanjenjem b , granične učestanosti ostalih modova kod kojih je $n \neq 0$, pomeraju se ka višim frekvencijama.

Ako smanjujemo visinu talasovoda (Sl. 2), intuitivno je jasno da će se na tom mestu javljati sve veća refleksija, te se polje neće prostirati kroz jako uzak kanal.



Sl. 2 Uticaj smanjenja visine talasovoda b na prostiranje

Ako, umesto toga, razmatramo strukturu prikazanu na Sl. 3, videćemo da je transmisija moguća u jednom uskom opsegu frekvencija, ukoliko se formira Π -kanal dielektrične konstante različite od one u ulaznim talasovodima. U daljem tekstu posvetićemo se objašnjenju ovog fenomena.



Sl. 3 Formiranje kanala čija je visina $b_{ch} \ll b$

Prema [2] moguće je posmatrati prostiranje TE_{10} moda u pravougaonom talasovodu kod koga je $b \ll a$, kao prostiranje TEM moda u *parallel-plate* talasovodu sa efektivnom permitivnošću ϵ_{eff} :

$$\beta_{TE10} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} = \beta_{TEM} = \frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c}, \quad (2a)$$

$$\text{gde je } k = \frac{2\pi f \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}{c}. \quad (2b)$$

Oдавde se može izvesti:

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_r - \frac{c^2}{4f^2 a^2}. \quad (3)$$

Ovde je c brzina svetlosti u vakuumu, a ϵ_r dielektrična konstanta u kanalu. Lako se vidi da je ϵ_{eff} jednako 0 na graničnoj učestanosti $f_{c(10)} = c/(2a\sqrt{\epsilon_r})$. Zbog toga se ovakva

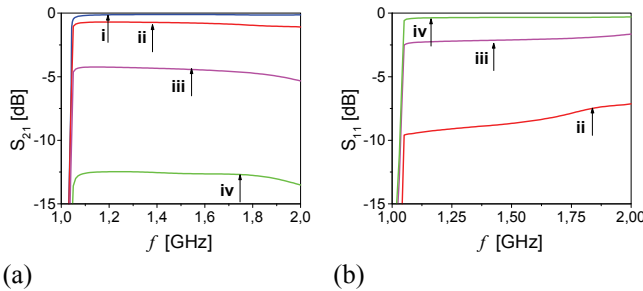
struktura može posmatrati kao ENZ materijal u okolini frekvencije $f_{c(10)}$.

Struktura prikazana na Sl. 3 predstavlja dva pravougaona talasovoda povezana uskim kanalom. Permitivnost dielektrika u ulaznim talasovodima mora da bude veća od permitivnosti dielektrika u kanalu, kako bi se obezbedilo prilagođenje na mestu gde se menja visina talasovoda, a i da bi se učestanost tunelovanja podesila da bude u propusnom opsegu ulaznih talasovoda. Budući da je ε_{reff} u kanalu blisko nuli u okolini granične učestanosti, koja je različita od nule, talasni vektor β je takođe približno nula, što znači da talasna dužina teži beskonačnosti. Ovakvo ponašanje odgovara balansnom slučaju kod left-handed (LH) metamaterijala, odnosno rezonansi nultog reda (zeroth-order resonance, ZOR) [6]. Prenos energije kroz kanal se vrši sa relativno malim gubicima, pri čemu se u samom kanalu postiže velika gustina polja (srazmerna odnosu visine talasovoda i kanala), koja je duž kanala konstantna.

3. REZULTATI SIMULACIJA ZA ENZ KANAL

Sve simulacije su vršene u programskom paketu HFSS.

Prvo smo u razmatranje uzeli strukturu prikazanu na Sl. 2, pri čemu je $a=101.6$ mm (širina talasovoda), $b=a/2=50.4$ mm (visina talasovoda), a za b_{ch} smo uzimali vrednosti $b_{ch1}=b$, $b_{ch2}=b/2=25.4$ mm, $b_{ch3}=b/8=6.35$ mm i $b_{ch4}=b/64=0.8$ mm. Rezultati simulacije za koeficijente transmisije i refleksije prikazani su na Sl.4 (a) i (b), respektivno:

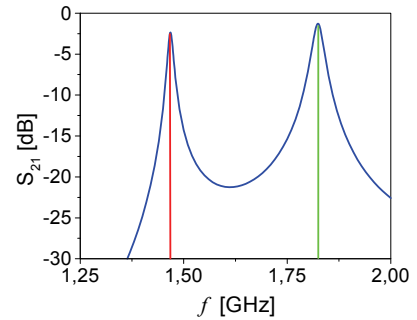


Sl. 4 Koeficijent transmisije (a) i refleksije (b) za različite vrednosti b_{ch} : (i) $b_{ch1}=b=50.8$ mm, (ii) $b_{ch2}=25.4$ mm, (iii) $b_{ch3}=6.35$ mm, (iv) $b_{ch4}=0.8$ mm

Budući da smo za dielektrik uzeli $\varepsilon_r=2$, granična učestanost za TE₁₀ mod se nalazi na 1.044 GHz, a za TE₂₀ mod na frekvenciji duplo većoj od ove. Kao što se može sa grafika videti, čak i ako na određenom mestu visinu talasovoda smanjimo za pola, i dalje ćemo imati neznatno smanjen koeficijent transmisije. Do značajnog smanjenja transmisije, usled jako povećane refleksije na diskontinuitetu, dolazi tek kad se visina kanala smanji ispod $b_{ch3}=b/8$.

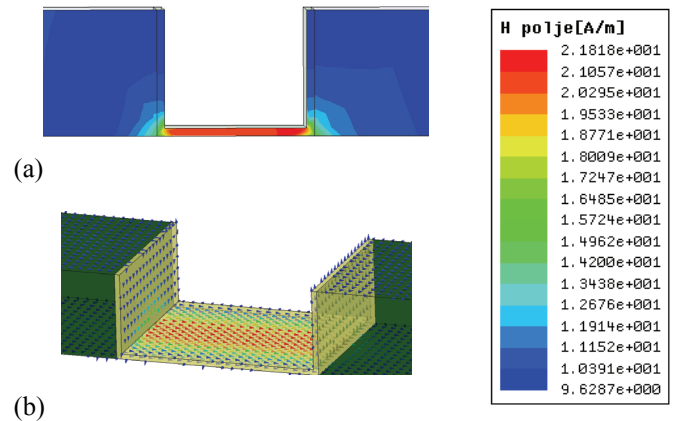
Da bi se kompenzovao uticaj diskontinuiteta na spoju kanal-talasovod (koji se ponaša kao ekvivalentna kapacitivnost), treba izvršiti prilagođenje impedansi. Ovo postizemo tako što na mestu diskontinuiteta dodajemo dielektrik određene debljine (prelazna oblast), tako da se formira Π -kanal. U tom cilju koristimo strukturu prikazanu na Sl. 3, pri čemu zadržavamo iste dimenzije za a i b . U oblasti Π -kanala je $\varepsilon_{rch}=1$ (vazduh), a u talasovodima sa strane je $\varepsilon_r=2$. Na Sl. 5 je prikazan koeficijent transmisije kada je $b_{ch}=0.8$ mm i $b_s=b_{ch}$. Prvi transmisioni vrh se javlja na frekvenciji bliskoj graničnoj učestanosti prvog TE₁₀ moda za vazduh (1.476 GHz) i odgovara rezonansi nultog reda, ZOR. Upravo je to i frekvencija na kojoj se odvija tunelovanje polja, jer je tada u kanalu efektivna permitivnost jednaka nuli.

Drugi transmisioni vrh predstavlja posledicu *Fabry-Perot*-ove rezonanse i njegova pozicija jako zavisi od dužine kanala, što nije slučaj za ZOR (prva rezonansa), sve dok je poprečni presek kanala $b_{ch} \ll a$. [7]



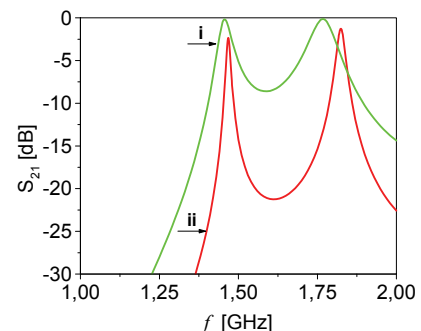
Sl. 5 Koeficijent transmisije

Na Sl. 6(a) je prikazana raspodela polja u ENZ kanalu, a na Sl. 6(b) realni deo *Pointing*-ovog vektora:



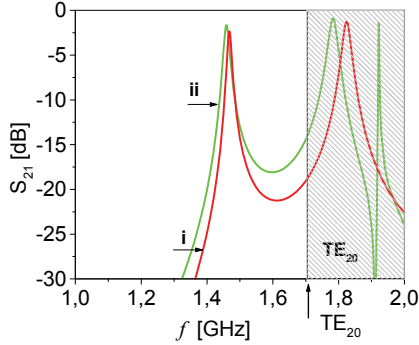
Sl. 6 (a) Raspodela H-polja u uskom kanalu; (b) Realni deo *Pointing*-ovog vektora

Sledeće što smo hteli da uradimo je da ispitamo kako promena pojedinih parametara strukture utiče na ove dve rezonanse. Prvo smo isitali kako promena visine kanala utiče na transmisiju kroz ENZ kanal. U aproksimaciji kad su metalni zidovi i dielektrik talasovoda idealni, pokazuje se da što je kanal už, gustina polja u kanalu je veća, kao i transmisija. U realnosti je gustina polja u kanalu ograničena probijem u dielektriku, a javljaju se i gubici zbog konačne provodnosti metalnih zidova. Rezultati simulacije za $b_{ch1}=b/16=3.18$ mm i $b_{ch2}=b/64=0.8$ mm su prikazani na Sl. 7. Za metal je uzet bakar provodnosti $\sigma=58$ MS/m. Možemo videti da transmisioni vrhovi postaju už, a slabljenje između njih veće, dok je nedostatak veće uneseno slabljenje. Sa grafika se vidi da je za $b_{ch2}=b/64=0.8$ mm slabljenje oko -2.2 dB na prvog rezonansi.



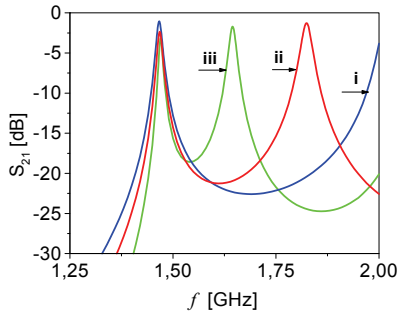
Sl. 7 Koeficijent transmisije za različite vrednosti visine kanala b_{ch} : (i) $b_{ch1}=3.18$ mm, (ii) $b_{ch2}=0.8$ mm

Ako želimo da u propusnom opsegu talasovoda zadržimo samo transmisioni vrh koji je posledica tunelovanja kroz ENZ kanal, a drugi transmisioni vrh koji je posledica *Fabry-Perot*-ove rezonanse da pomerimo van propusnog opsega, to možemo uraditi na više načina. Za početak, u ulaznim talasovodima možemo koristiti dielektrik čije je $\epsilon_r=3$ umesto $\epsilon_r=2$. Na taj način je propusni opseg talasovoda pomeren ($f_{c10}=0.852$, $f_{c20}=1.705$ GHz za $\epsilon_r=3$), tako da drugi transmisioni vrh pada van ovog opsega (Sl.8). Simulacija je vršena za $b_{ch}=b/64=0.8$ mm.



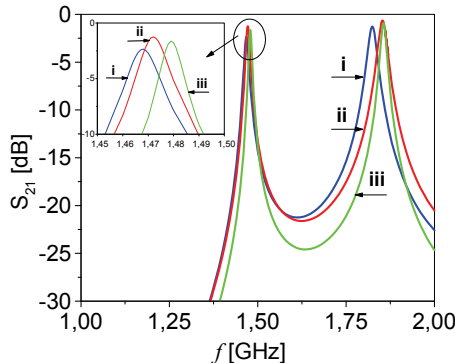
Sl. 8 Koeficijent transmisije za različite vrednosti dielektricne konstante u kanalu ϵ_r : (i) $\epsilon_{r1}=2$, (ii) $\epsilon_{r2}=3$

Drugi način da ovo postignemo je da menjamo dužinu samog ENZ kanala, budući da prvi transmisioni vrh ne bi trebalo da je osetljiv na ovu promenu, dok drugi jako zavisi od dužine kanala. To smo u simulaciji i pokazali (Sl. 9). Dimenzije kanala su: $b_{ch}=b/64=0.8$ mm, $L_1=95.25$ mm, $L_2=127$ mm i $L_3=190.5$ mm.



Sl. 9 Promena frekvencije drugog transmisionog vrha za različite dužine uskog kanala: (i) $L_1=95.25$ mm, (ii) $L_2=127$ mm, (iii) $L_3=190.5$ mm

Još jedna stvar koju smo želeli da ispitamo je uticaj širine prelaznih oblasti b_s na ENZ transmisiju. Pored početnog slučaja $b_{s1}=b_{ch}=0.8$ mm, vršili smo simulacije i za $b_{s2}=8b_{ch}=6.35$ mm i $b_{s3}=24b_{ch}=19.1$ mm.

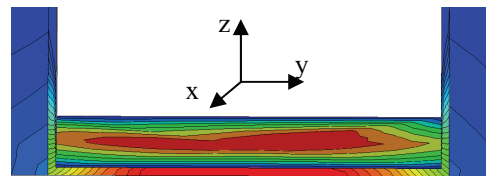


Sl. 10 Promena u koeficijentu transmisije usled menjanja širine prelazne oblasti b_s : (i) $b_{s1}=0.8$ mm, (ii) $b_{s2}=6.35$ mm, (iii) $b_{s3}=19.1$ mm

Primitili smo da sa povećanjem širine prelazne oblasti transmisioni vrhovi postaju uži, a slabljenje između njih veće. Došli smo do zaključka da se vrednost maksimuma koeficijenta transmisije sa promenom širine prelazne oblasti menja, tako da smo za slučaj $b_{s2}=6.35$ mm dobili maksimalan koeficijent transmisije od -1.2 dB. Na ovaj način možemo da izvršimo prilagođenje između talasovoda i kanala, tako da dobijemo optimalni koeficijent transmisije kroz kanal. Rezultati za koeficijente transmisije u ova tri slučaja su prikazani na Sl. 10.

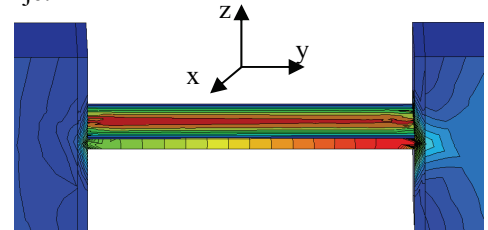
4. REZULTATI SIMULACIJA ZA MINIJATURNU ANTENU

Tokom simulacija, primitili smo da se raspodela polja u kanalu, u konfiguraciji prikazanoj na Sl. 3, razlikuje na donjoj i gornjoj površini kanala. Da bismo pravili minijaturne antene pomoću proreza na široj strani kanala, potrebno je da imamo što simetričniju raspodelu polja, kako bismo dobili simetričan dijagram zračenja. Prikaz ove nesimetričnosti polja dat je na Sl. 11:



Sl. 11 Nesimetrična raspodela polja u ENZ kanalu na dnu

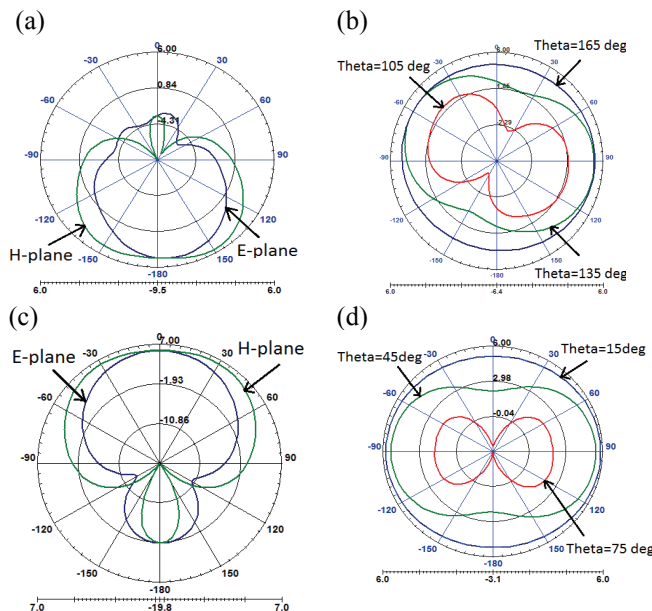
Međutim, ako umesto konfiguracije na Sl. 3 upotrebimo konfiguraciju na Sl. 12, polje u kanalu će biti mnogo simetričnije:



Sl. 12 Simetrična raspodela polja u ENZ kanalu na sredini

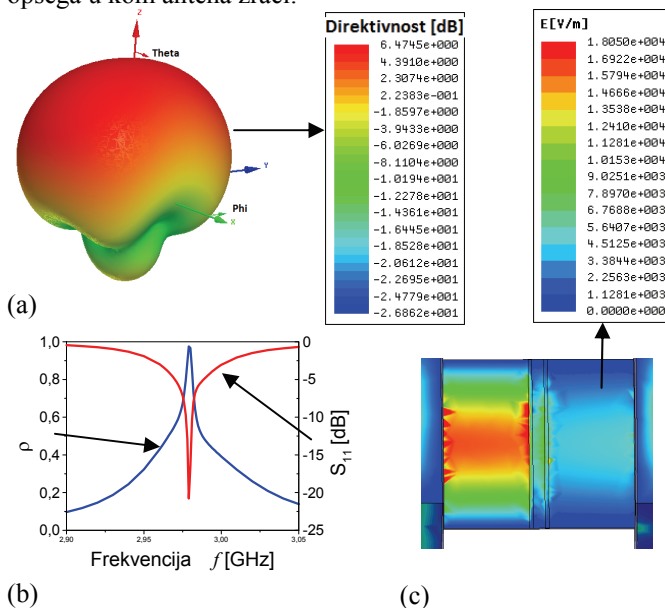
U daljem radu je zato korišćena ova struktura. Zračenje karakteristično za antene se može postići postavljanjem jednog ili više proreza na širem zidu kanala duž ose prostiranja talasa, ili pak, normalno na ovaj pravac. Ako se prorezi postavljaju duž ose prostiranja, potrebno je da budu na nekom rastojanju od središnje uzdužne ose talasovoda, jer u protivnom neće doći do značajnijeg zračenja kroz prorez. Mnogo bolje zračenje se postiže ako su prorezi postavljeni normalno u odnosu na pravac prostiranja. U nastavku će biti prikazani rezultati za dva proreza normalna na osu prostiranja, postavljena simetrično oko sredine kanala. Kanal je dimenzija 50x50 mm, prorezi su dimenzija 1x50 mm, a razmak između njih je 3 mm.

Na Sl. 13 su prikazani dijagrami zračenja po ϕ i po θ u slučaju kada se poprečni otvori prave na kanalu koji se nalazi na dnu (Sl. 13 (a) i (b)), odnosno na kanalu koji se nalazi u sredini ispitivane strukture (Sl. 13 (c) i (d)). Možemo videti da su dijagrami zračenja u ovom slučaju izrazito nepravilni, iako su otvori na kanalu postavljeni simetrično, dok je zračenje u slučaju kanala na sredini pravilno. 3D dijagram zračenja za slučaj kanala u sredini prikazan je na Sl. 14 (a), a na Sl. 14 (b) je prikazana izračena snaga i koeficijent refleksije.



Sl. 13 Dijagram zračenja za $\varphi=0^\circ$ (E-plane) i $\varphi=90^\circ$ (H-plane) za kanal (a) na dnu i (c) u sredini; Dijagram zračenja za $\theta=15^\circ$, $\theta=45^\circ$ i $\theta=75^\circ$ za kanal (b) na dnu i (d) u sredini;

Sa Sl. 13 (c) i (d) i Sl.14 (a) možemo videti da je ova antena jako usmerena: 3dB-širina snopa u H-ravni je $\theta_{H3dB}=139.7^\circ$, dok je E-ravni $\theta_{E3dB}=84.3^\circ$, tako da je direktivnost 5.44 dBi. Nedostatak je to što antena zrači u uskom opsegu frekvencija, kao što se može videti sa slike 14 (b), koja preko ρ prikazuje izračenu snagu, jer se radi o anteni sa progresivnim talasom. U daljem radu želimo da se usmerimo na ispitivanje mogućnosti korišćenja slotova manjih dimenzija za projektovanje antene, kao i na proširenje opsega u kom antena zrači.



Sl. 14(a) 3D dijagram zračenja; (b) Prikaz izračene snage $\rho = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ i koeficijenta refleksije S_{11} ; (c) Prikaz E-polja u strukturi sa dva zračeća slota na sredini kanala.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu smo pokazali kako menjanjem geometrijskih parametara možemo uticati na tunelovanje polja kroz uzak kanal u pravougaonom talasovodu. Što je kanal uži, imamo veće konfiniranje energije, ali je zato refleksija veća, a opseg frekvencija na kom se tunelovanje dešava se sužava. Ako želimo da u propusnom opsegu

izbegnemo pojavu Fabry-Perot-ove rezonanse, ovaj transmisioni vrh možemo pomeriti menjanjem dužine kanala. Prilagođenje između talasovoda i kanala možemo izvršiti tako što menjamo širinu prelazne oblasti koja je ispunjena drugačijim dielektrikom u odnosu na dielektrik u talasovodima. Na kraju smo pokazali kako se pomoću prereza na široj strani kanala može napraviti minjatura antena direktivnosti od oko 5.44 dBi.

ZAHVALNICA

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

LITERATURA

- [1] R. Liu, Q. Cheng, T. Hand, J. J. Mock, T. J. Cui, S. A. Cummer, and D. R. Smith, "Experimental demonstration of electromagnetic tunneling through an epsilon-near-zero metamaterial at microwave frequencies", *Physical Review Letters*, vol. 100, January 2008.
- [2] B. Edwards, A. Alù, M. E. Young, M. G. Silveirinha, and N. Engheta, "Experimental verification of epsilon-near-zero metamaterial coupling and energy squeezing using a microwave waveguide", *Physical Review Letters*, vol. 100, January 2008.
- [3] M. G. Silveirinha, A. Alù, and N. Engheta, "Parallel-plate metamaterials for cloaking structures", *Physical Review E*, vol. 75, March 2007.
- [4] M. G. Silveirinha and N. Engheta, "Tunneling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using ϵ -near-zero materials", *Physical Review Letters*, vol. 97, October 2006.
- [5] S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabouroux, N. Guérin, and P. Vincent, "A metamaterial for directive emission", *Physical Review Letters*, vol. 89, November 2002.
- [6] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*, New Jersey: Wiley, 2006.
- [7] M. G. Silveirinha and N. Engheta, "Theory of supercoupling, squeezing wave energy, and field confinement in narrow channels and tight bends using ϵ -near-zero metamaterials", *Physical Review B*, vol. 76, December 2007.

Abstract – We investigate the conditions required for field tunneling through a narrow channel obtained by reducing the height of a rectangular waveguide. It was shown that the field tunneling can be obtained at the frequency for which the effective dielectric constant in the channel becomes zero, which means that this structure can be treated as ENZ (epsilon-near-zero) metamaterial. The influence of channel geometry and dielectric constant of rectangular waveguides on the transmission and field density in the channel is also investigated. At the end, we present design of a small antenna realized using two transversal slots in ENZ channel. The size of antenna is 50x50 mm, and it shows directivity of 5.44 dBi at frequency of 3GHz.

FIELD TUNNELING THROUGH NARROW WAVEGUIDE CHANNEL AND APPLICATION IN DESIGN OF SMALL ANTENNAS

Miranda Mitrović, Branka Jokanović