

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 3351

**SUBVALNO TUNELIRANJE
ELEKTROMAGNETSKE ENERGIJE
TEMELJENO NA AKTIVNOM
NE-FOSTEROVOM ENZ METAMATERIJALU**

Petar Kolar

Zagreb, lipanj 2013.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD MODULA**

Zagreb, 15. ožujka 2013.

ZAVRŠNI ZADATAK br. 3351

Pristupnik: **Petar Kolar**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Modul: Radiokomunikacije

Zadatak: **Subvalno tuneliranje elektromagnetske energije temeljeno na aktivnom ne-Fosterovom ENZ metamaterijalu**

Opis zadatka:

Načiniti kritički pregled literature o tuneliraju elektromagnetske energije u subvalnom valovodu, temeljenu na ENZ metamaterijalu. Posebno ispitati mogućnost zamjene pasivnog rezonantnog ENZ metamaterijala s aktivnim ne-Fosterovim metamaterijalom u cilju povećanja širine frekvencijskog pojasa tuneliranja. Predložiti građu jednostavnog jednodimenzionalnog eksperimenta u radiofrekvencijskom području pomoću kojega bi se mogao istražiti fenomen tuneliranja pomoću aktivnog ENZ. Načiniti modela eksperimenta u komercijalnom programu za punovalnu elektromagnetsku analizu "CST Microwave" Studio i ispitati utjecaj geometrijskih parametara i parametara ne-Fosterovog ENZ metamaterijala na tuneliranje. Pronaći optimalnu konstrukciju eksperimenta koja bi omogućila jasno uočavanje širokopojasnog fenomena tuneliranja. Ako raspoloživo vrijeme dozvoli, načiniti eksperimentalni prototip aktivne 1D strukture RF području (do 40 MHz) i mjeranjima verificirati zaključke numeričke analize.

Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2013.

Rok za predaju rada: 14. lipnja 2013.

Mentor:

Prof.dr.sc. Silvio Hrabar

Djelovođa:

Prof.dr.sc. Silvio Hrabar

Predsjednik odbora za
završni rad modula:

Zvonimir Šipuš

Prof.dr.sc. Zvonimir Šipuš

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Općenito o metamaterijalima.....	2
2.1. Teoretski prikaz.....	2
2.2. Konstrukcija metamaterijala.....	6
3. Poboljšani prijenos elektromagnetskih valova kroz otvore nalik SRR strukturama...10	
3.1. Uvod.....	10
3.2. Dizajn i proizvodnja struktura s otvorom puno manjim od valne duljine.....	11
4. Aktivni metamaterijali.....	17
4.1. Zašto aktivni metamaterijali?.....	17
4.2. Metamaterijali bazirani na prijenosnim linijama.....	19
4.3. Izvedba aktivnih metamaterijala pomoću NIC – eva.....	21
5. Subvalno tuneliranje elektromagnetske energije.....	27
5.1. Teoretski prikaz.....	27
5.2. Subvalno tuneliranje EM energije pomoću pasivnih metamaterijala.....	28
5.3. Ideja subvalnog tuneliranja EM energije pomoću aktivnih metamaterijala....	34
6. Zaključak.....	35
7. Literatura.....	36
8. Sažetak.....	37
9. Summary.....	38
Prilog 1: Neuobičajeni efekti prijenosa primijećeni kod simulacija.....	39

1. Uvod

Čovjek je maštovito biće. Biće koje mnogo puta sanja o sposobnostima koje inače nema. Jedna od sposobnosti koja je ljudska tisućljetna „tiha patnja“ je svakako nevidljivost. Kroz povijest možemo pronaći razne legende, pripovijetke, pa i filmove gdje se ona spominje: od grčke mitologije i Hadove kacige nevidljivosti, preko rimske mitologije (koja je preslika grčke mitologije), preko plašta nevidljivosti Nibelunga, Jedinstvenog Prstena iz trilogije „Gospodara prstenova“ (koji između ostalog daje moć nevidljivosti), do plašta nevidljivosti Harryja Pottera.

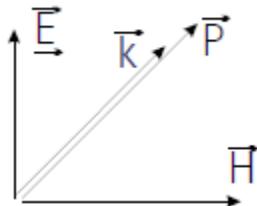
Čovjek je također vrlo znatiželjno i vrlo inatljivo biće. Vjerujem da nema tog fizikalnog zakona kojeg čovjek nije pokušao negirati i osporiti! Jedan fizikalni zakon tako govori kako je kroz neki otvor nemoguće „progurati“ nešto što je dimenzijama puno veće od tog otvora. Taj zakon je u relativno bliskoj prošlosti osporen!

Zašto to govorim? Zato jer je potencijalno sredstvo za ostvarenje navedene tisućljetne želje i sredstvo koje je osporilo navedeni fizikalni zakon zapravo isto sredstvo pod nazivom metamaterijal! Metamaterijali su umjetno stvorene strukture kojima se mogu postići elektromagnetska svojstva kakva prirodni materijali nemaju. U ovome radu sam zadao sam sebi zadatak da čitatelju najprije pokušam približiti pojам metamaterijala i njihovu građu, zatim da napravim uvid u tzv. efekt pojačanog optičkog prijenosa, koji je pobjio zakon spomenut u odjeljku iznad, pa preko opisa aktivnih metamaterijala razložim našu ideju „guranja“ elektromagnetske energije kroz otvor puno manji od valne duljine elektromagnetskog vala, u kojoj se, između ostalog, koriste i aktivni metamaterijali. U ovom radu, nažalost, neće biti govora o postizanju nevidljivosti, ali se nadam da će unatoč tome čitateljeva znatiželja za ovaj rad biti dovoljno velika da ga barem „prolista“, te da barem shvati građu metamaterijala, pomoću kojih je planirano izraditi plašt nevidljivosti.

2. Općenito o metamaterijalima

2.1. Teoretski prikaz

Metamaterijali (grč. *meta*=iznad) su umjetno stvorene strukture kojima se mogu postići elektromagnetska svojstva kakva prirodni materijali nemaju. Uzmemo li neko prirodno sredstvo, za nj vrijede neki zakoni poput Snellovog zakona, Dopplerovog efekta i sl., a indeks loma je veći od 1. Ukoliko kroz to sredstvo „putuje“ elektromagnetski val, fazna i grupna brzina su jednakom usmjerene, i to u smjeru propagacije vala. Takav val se naziva direktni val, a odnos vektora takvog vala je prikazan na slici 2.1.:



Slika 2.1. Direktni val

(preuzeto iz [8])

E predstavlja vektor električnog polja, **H** vektor magnetskog polja, **P** je vektor koji pokazuje smjer širenja energije vala (tzv. Poyntingov vektor), a **k** je vektor koji pokazuje smjer širenja vala, odnosno smjer promjene faze vala. Njihov matematički zapis je prikazan jednadžbama (J2.1.) do (J2.3.):

$$\vec{E} = A e^{-j\vec{k}\vec{r}} \quad (\text{J2.1.})$$

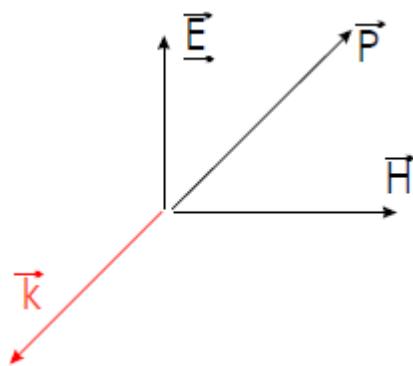
$$\vec{k} = \vec{u}_0 \omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad (\text{J2.2.})$$

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (\text{J2.3.})$$

Vektor **u₀** predstavlja jedinični vektor smjera (**i**, **j**, **k** ili njihova linearne kombinacija), **r** je vektor koji pokazuje smjer titranja električnog polja, ω je kružna frekvencija vala, ϵ je permitivnost sredstva, a μ permeabilnost sredstva kroz koje se val širi.

Treba uočiti da jednadžba (J2.2.) u sebi sadrži korijen, pa prema tome, ona ima dvostruko rješenje, s time da se u obzir uzima ono pozitivno rješenje. Ali što ako uzmemo i negativno rješenje u obzir?

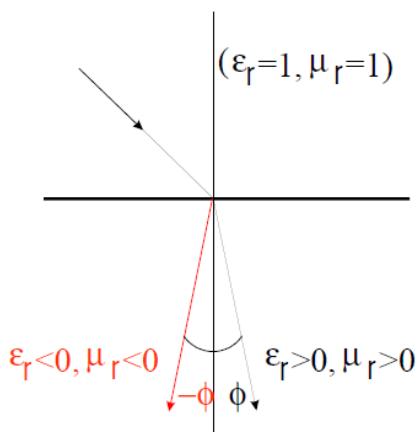
To pitanje si je 1968. godine postavio ruski matematičar Viktor Veselago, a nakon pomnog matematičkog razmatranja uočio je da i negativno rješenje „zadovoljava“ Maxwellove jednadžbe, a razlika u odnosu na direktni val je ta da da smjer promjene faze vala više nije jednak smjeru širenja energije vala, već je on suprotan! Takav val se naziva povratni val, a prikazan je na slici 2.2.:



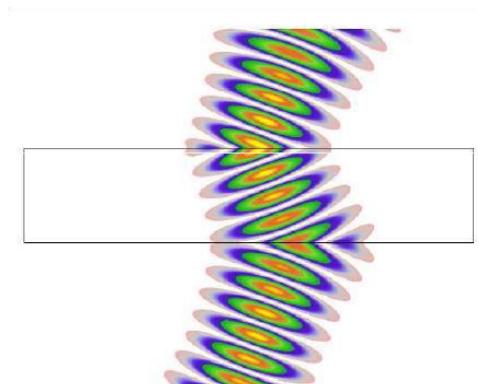
Slika 2.2. Povratni val

(preuzeto iz [8])

Za takav val više ne vrijede „klasični“ zakoni poput Snellovog zakona ili Dopplerovog efekta, već su oni inverzni (vidi slike 2.3. i 2.4.)!

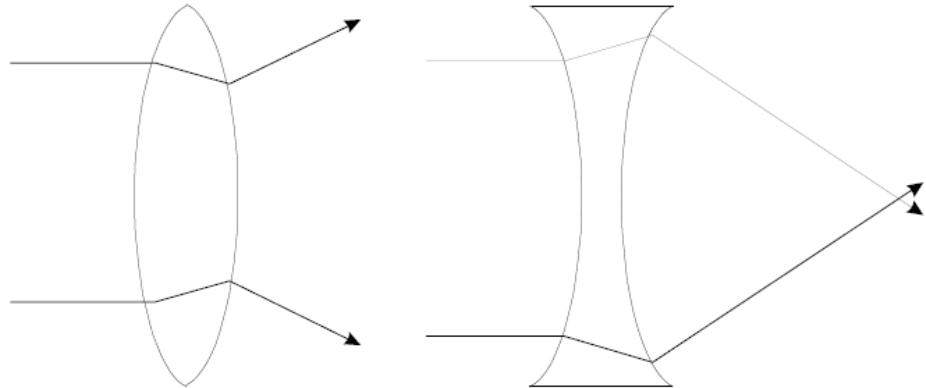


Slika 2.3. Snellov zakon za direktni val
(crna lomna zraka) i
povratni val (crvena lomna zraka)
(preuzeto iz [8])



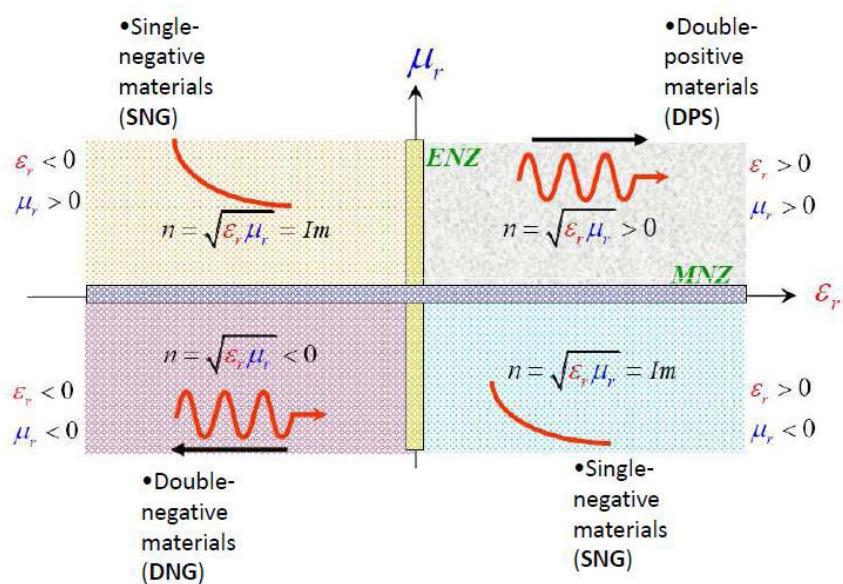
Slika 2.4. Refrakcija vala na planparalelnoj
ploči indeksa loma $n=-1$ (antivakuum)
(preuzeto iz [1])

Kada bismo izradili leće od materijala s negativnim indeksom loma, tada bi se one „zamijenile“, odnosno konvergentna leća bi se ponašala kao divergentna i obratno (vidi sliku 2.5.):



Slika 2.5. Konvergentna i divergentna leća izrađene od materijala s negativnim indeksom loma
(preuzeto iz [8])

Sama ideja metamaterijala leži na svojstvima povratnog vala! Naime, ideja je da se konstruira neka struktura koja bi imala neuobičajena elektromagnetska svojstva, a to se postiže tako da se strukturi „naštima“ neuobičajeni indeks loma (negativni indeks loma ili indeks loma između 0 i 1). Pošto indeks loma ovisi o permitivnosti i permeabilnosti sredstva (vidi sliku 2.6.), potrebno je mijenjati relativnu permitivnost i permeabilnost. S obzirom na vrijednosti relativne permitivnosti i permeabilnosti, materijale dijelimo na sljedeći način:



Slika 2.6. Podjela materijala (preuzeto iz [8])

U prvom kvadrantu su i ϵ_r i μ_r pozitivni, pa je rješenje korijena u (J2.2.) realan broj i za rješenje uzimamo pozitivan predznak jer se obje vrijednosti nalaze u prvom kvadrantu. Uvrsti li se pozitivno rješenje u (J2.3.), pa u (J2.2.), vidi se da je rješenje (J2.2.) kompleksna eksponencijala, odnosno da postoji titranje, što znači da se energija širi prostorom, i to u smjeru promjene faze vala! Takvi materijali se nazivaju *Double-positive materials*, odnosno dvostruko pozitivni materijali, jer su i ϵ_r i μ_r pozitivni. *Double-positive materials* su zapravo klasični materijali kakvi se mogu naći u prirodi.

U drugom i četvrtom kvadrantu jedna od vrijednosti je negativna, pa je rješenje korijena u (J2.2.) kompleksan broj. Uvrsti li se to rješenje u (J2.3.), pa u (J2.2.), vidi se da je rješenje (J2.2.) obična eksponencijala, te dolazi do pojave tzv. evanescentnog vala (vala koji ne prenosi energiju). Takvi materijali se nazivaju *Single-negative materials*, odnosno jednostruko negativni materijali, jer je samo jedna od vrijednosti negativna.

U trećem kvadrantu su obje vrijednosti pod korijenom negativne, pa je rješenje korijena realan broj, a za rješenje uzimamo negativan predznak jer se obje vrijednosti nalaze u trećem kvadrantu. Uvrsti li se negativno rješenje u (J2.3.), pa u (J2.2.), vidi se da je rješenje kompleksna eksponencijala, što znači da se energija širi prostorom, ali u suprotnom smjeru od smjera promjene faze! Takvi materijali se nazivaju *Double-negative materials*, odnosno dvostruko negativni materijali, jer su obje vrijednosti pod korijenom negativne.

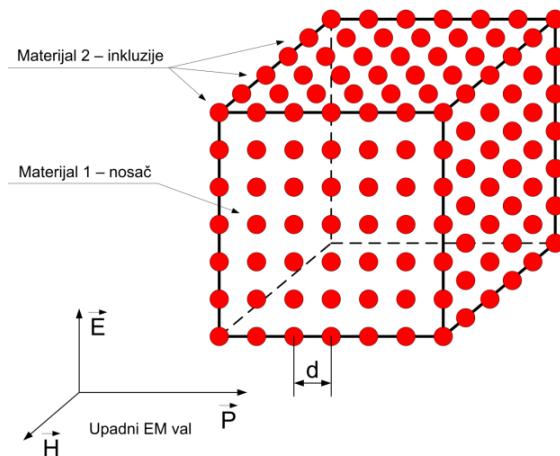
Postoje još tzv. ENZ (*Epsilon Near Zero*), MNZ (*Mue Near Zero*) i EMNZ (*Epsilon and Mue Near Zero*) materijali, a to su materijali kojima su vrijednosti ϵ_r i μ_r istodobno ili svaka pojedinačno blizu nule (blizu koordinatnim osima na grafu sa slike 2.6.).

Ukoliko je potrebno konstruirati metamaterijal s negativnim indeksom loma, taj metamaterijal će se nalaziti u trećem kvadrantu, a ukoliko je potrebno konstruirati metamaterijal s indeksom loma između 0 i 1, taj metamaterijal će se nalaziti u prvom kvadrantu blizu koordinatnih osi.

2.2. Konstrukcija metamaterijala

Odziv neke strukture na koju djeluju elektromagnetski valovi ovisi o njenim svojstvima i njenoj građi. Elektromagnetski materijali obično se fizikalno opisuju pomoću permitivnosti (ϵ) i permeabilnosti (μ), odnosno pomoću indeksa loma ($n = \sqrt{\epsilon\mu}$) i te vrijednosti su kod materijala nađenih u prirodi uvijek veće ili jednake od 1 (najmanje vrijednosti u prirodi ima vakuum). S obzirom na vrijednosti ϵ_r i μ_r , materijale dijelimo na dielektrične ($\epsilon_r > 1$), paramagnetične ($\mu_r > 1$) i feromagnetične (također $\mu_r > 1$).

Ovakva podjela materijala vrijeti i za strukture koje se sastoje od više materijala ako su one homogene i na najvišoj promatranoj frekvenciji. Takve strukture se sastoje od materijala domaćina u kojem se nalaze drugi materijali (raspršivači – inkluzije) koji su raspoređeni u pravilnu rešetku, te su međusobno udaljeni za d (vidi sliku 2.7.).

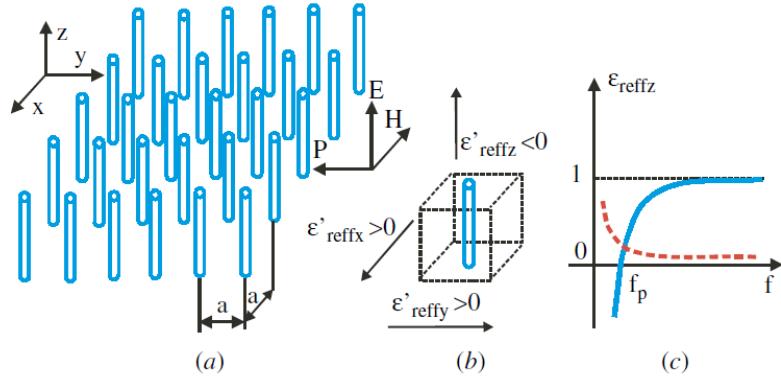


Slika 2.7. 3D prikaz strukture metamaterijala

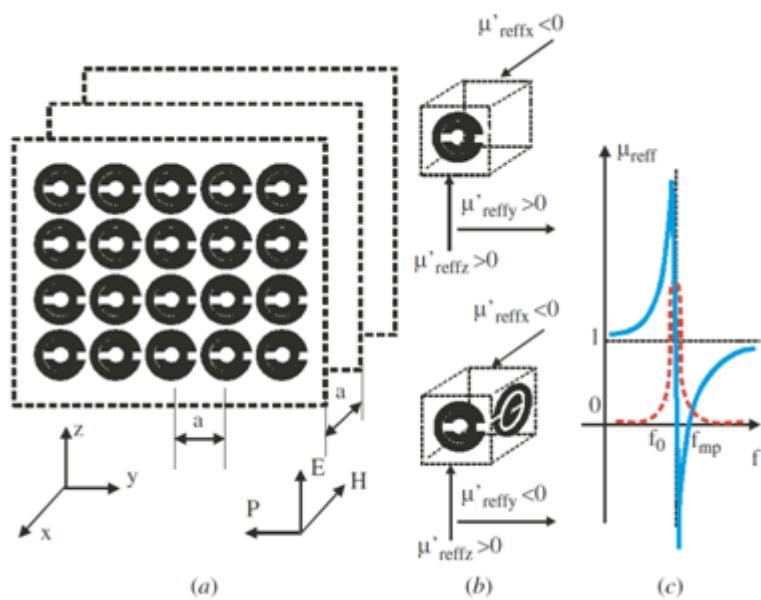
(preuzeto iz [6])

Ukoliko je udaljenost d puno manja od valne duljine upadnog elektromagnetskog vala, fazni pomak unutar jedne celije je toliko mali da se efekt difrakcije zanemaruje, a struktura se ponaša kao neki kontinuirani materijal s makroskopskim parametrima različitim i od parametara domaćina i od parametara raspršivača. Na ovaj način je moguće konstruirati strukture s vrijednostima efektivnih makroskopskih parametara kakvi se ne mogu naći u prirodi, a takve strukture nazivamo metamaterijalima (engl. *metamaterials*, kratica MTM).

Praktično gledano, metamaterijali su „simbioza“ žičanih plazmolikih struktura kod kojih se ϵ_r mijenja po Drudeovom disperzijskom modelu i struktura sa SRR - ovima kod kojih se μ_r mijenja po Lorentzovom disperzijskom modelu (slike 2.8. i 2.9.).

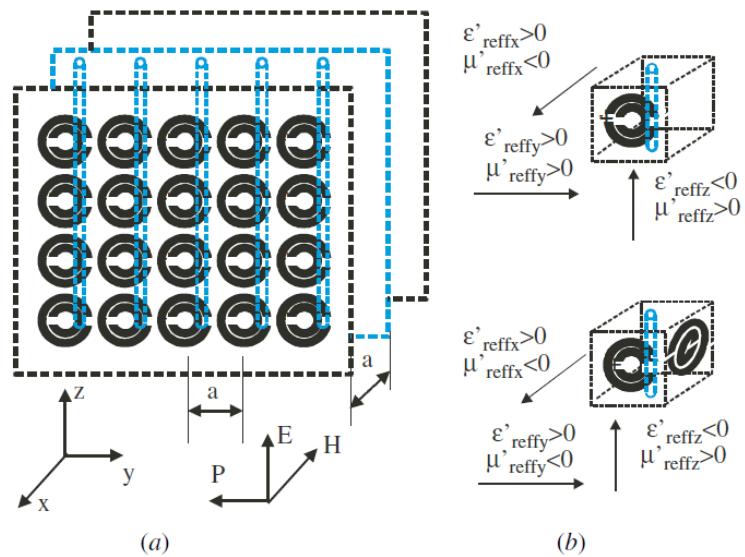


Slika 2.8. a) Žičana plazmolika struktura; b) Jedna čelija;
c) Efektivna permitivnost strukture: plava crta – realni dio, crvena crta – imaginarni dio
(preuzeto iz [1])



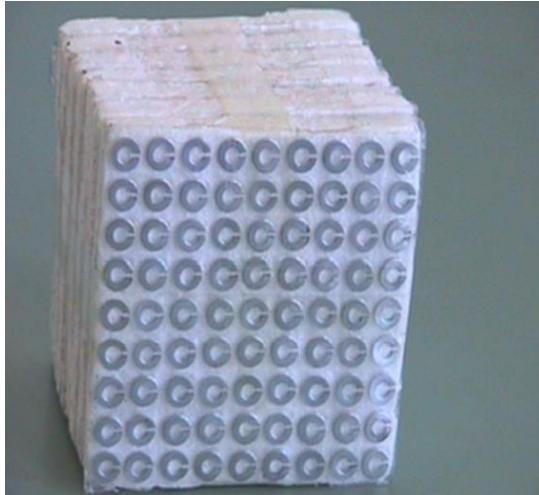
Slika 2.9. a) Struktura sa SRR-ovima; b) Jedna čelija: gore – 1D, dolje – 2D;
c) Efektivna permeabilnost strukture: plava crta – realni dio, crvena crta – imaginarni dio
(preuzeto iz [1])

Prvi prijavljeni metamaterijal koji podržava povratni val datira tek iz 2000. godine (iako su takvi metamaterijali teorijski analizirani prije 40-ak godina), a prijavio ga je David R. Smith u svoje ime i u ime svojeg istraživačkog tima sa *University of California, San Diego* (slika 2.10.).

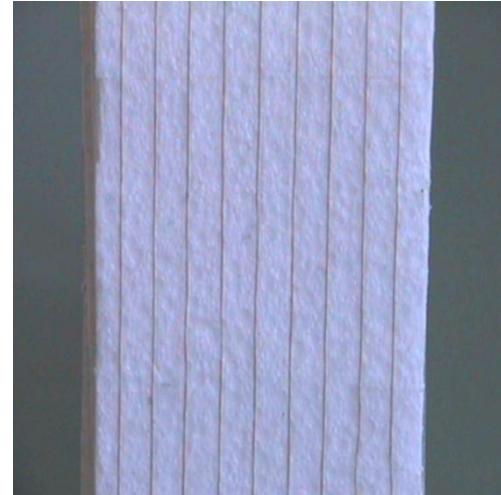


Slika 2.10. a) DNG metamaterijal; b) Jedna ćelija: gore – 1D, dolje – 2D
(preuzeto iz [1])

Treba napomenuti da sljedeći prijavljeni metamaterijal dolazi s Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, a konstruirali su ga prof. dr. sc. Silvio Hrabar i njegov tadašnji student Renato Barbarić. Izgled tog metamaterijala se može vidjeti na slikama 2.11. i 2.12.

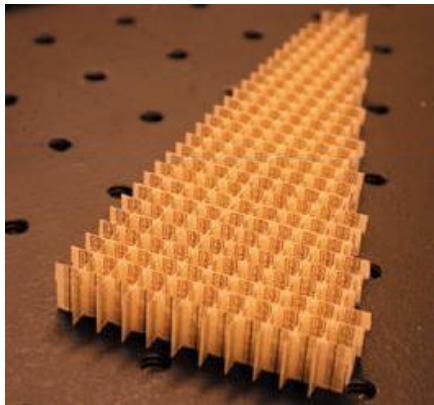


Slika 2.11. Struktura pomoću koje se mijenja μ_r
(preuzeto iz [8])

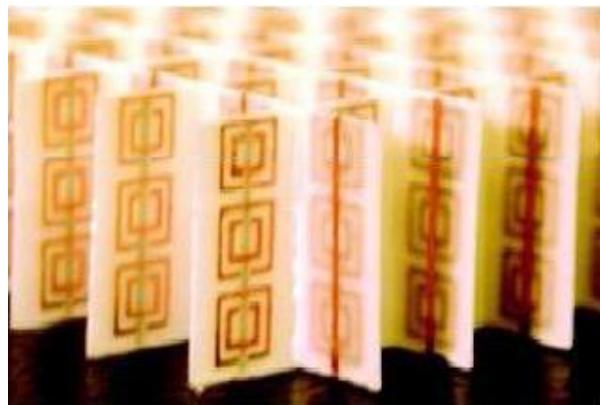


Slika 2.12. Struktura pomoću koje se mijenja ϵ_r
(preuzeto iz [8])

Današnji metamaterijali su ipak nešto razvijeniji i „ugodniji za oko“, a njihov izgled se može vidjeti na slikama 2.13. i 2.14.



Slika 2.13. Mrežasta struktura metamaterijala
(preuzeto iz [8])



Slika 2.14. Mrežasta struktura – uvećano
(preuzeto iz [8])

Potencijalne primjene metamaterijala uključuju minijaturizaciju i nove vrste antena i valovoda, strukture puno manje od valne duljine koje efikasno vode elektromagnetske valove, izradu leća razlučivosti veće od difrakcijskog ograničenja itd. Međutim, unatoč velikom broju izdanih publikacija o teoriji metamaterijala i potencijalnim primjenama, još uvijek postoji vrlo malo eksperimentalno realiziranih metamaterijala i struktura koje ih koriste. Razlog tome je kompleksnost njihove građe, velika osjetljivost elektromagnetskih svojstava s obzirom na dimenzije i preciznost izrade, te ograničenost realnih materijala koji se u njih ugrađuju. Potrebna tehnologija za izradu nekih metamaterijala je vrlo kompleksna i skupa, a često i ne postoji.

3. Poboljšani prijenos elektromagnetskih valova kroz otvore nalik SRR (split-ring resonator) strukturama

3.1. Uvod

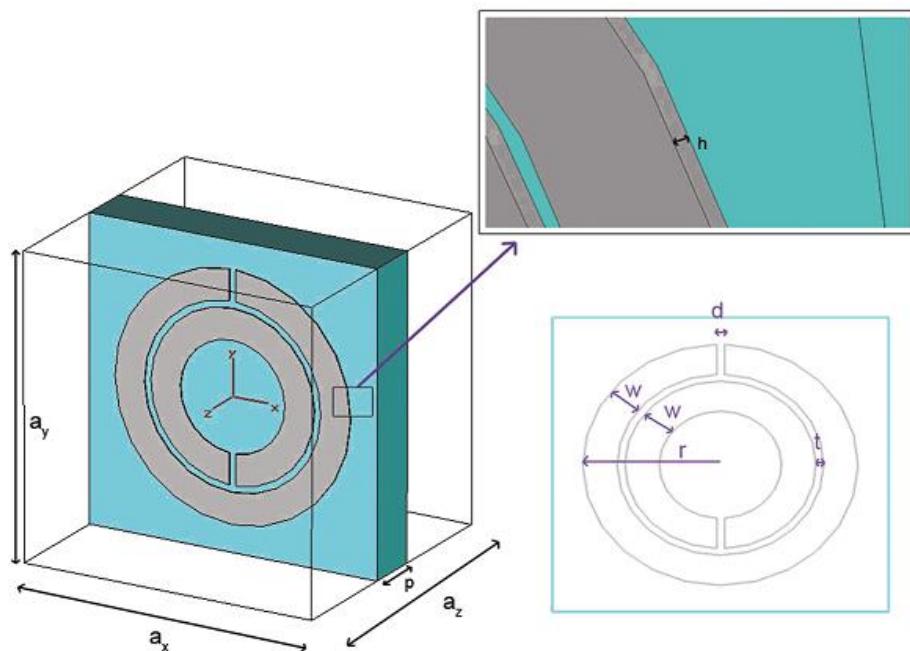
Kroz povijest se vodilo mnogo studija i rasprava o prijenosu elektromagnetskih valova kroz otvore u nekom sredstvu. Sredinom 17. stoljeća Grimaldi je opisao ogib svjetlosti oko kružnog otvora, što danas čini temelje klasične optike u fizici. Međutim, Grimaldi je samo opisao ogib oko kružnog otvora i to za veličine otvora puno veće od valne duljine. 1944. godine Bethe je teoretski opisao prijenos elektromagnetskog vala kroz kružni otvor u savršenom metalu, nulte debljine, te širine otvora puno manje od valne duljine. Zaključio je da je amplituda prenesenog vala proporcionalna kvadratu područja oko otvora sa $k \cdot (r/\lambda)^4$, gdje je polumjer otvora (r) puno manji od valne duljine incidentnog elektromagnetskog vala (λ). Betheova teorija vrijedi samo za idealizirane situacije i idealne materijale, što u stvarnom svijetu ne postoji.

Razvoj proizvodnih tehnologija omogućio je rad na smanjenju neželjenog velikog gubitka prilikom prijenosa i ogiba svjetlosti oko otvora puno manjih od valne duljine. 1998. godine otkriven je efekt pojačanog optičkog prijenosa („*extraordinary optical transmission*“ – EOT). Ovaj fenomen je pobio Betheovu teoriju, jer je došlo do pojačanog prijenosa svjetlosti kroz otvore puno manje od valne duljine incidentnog vala. Efekt EOT-a i novije tehnologije proizvodnje i obrade otvorile su brojne mogućnosti za proučavanje i razvoj novih aplikacija, kao što su sonde za optički mikroskop za promatranje bliskog polja (*scanning near-field optical microscope* – SNOM), optičko proučavanje bliskog polja, razvoj nanotehnologije, ultrabrzti minijaturni fotodetektori, nove, unaprijeđene mikrotrakaste linije, te kompaktni valovodni filtri.

3.2. Dizajn i proizvodnja struktura s otvorom puno manjim od valne duljine

Studije su pokazale da dolazi do pojačanog prijenosa za određene polarizacije incidentnog elektromagnetskog vala ukoliko je otvor pravokutan ili eliptičan. Također je teoretski i eksperimentalno pokazan pojačani prijenos kroz otvore nalik SRR strukturama puno manjim od valne duljine. Očito bi bilo dobro pokušati izvesti pojačani prijenos na različitim, ali dovoljno sličnim oblicima otvora.

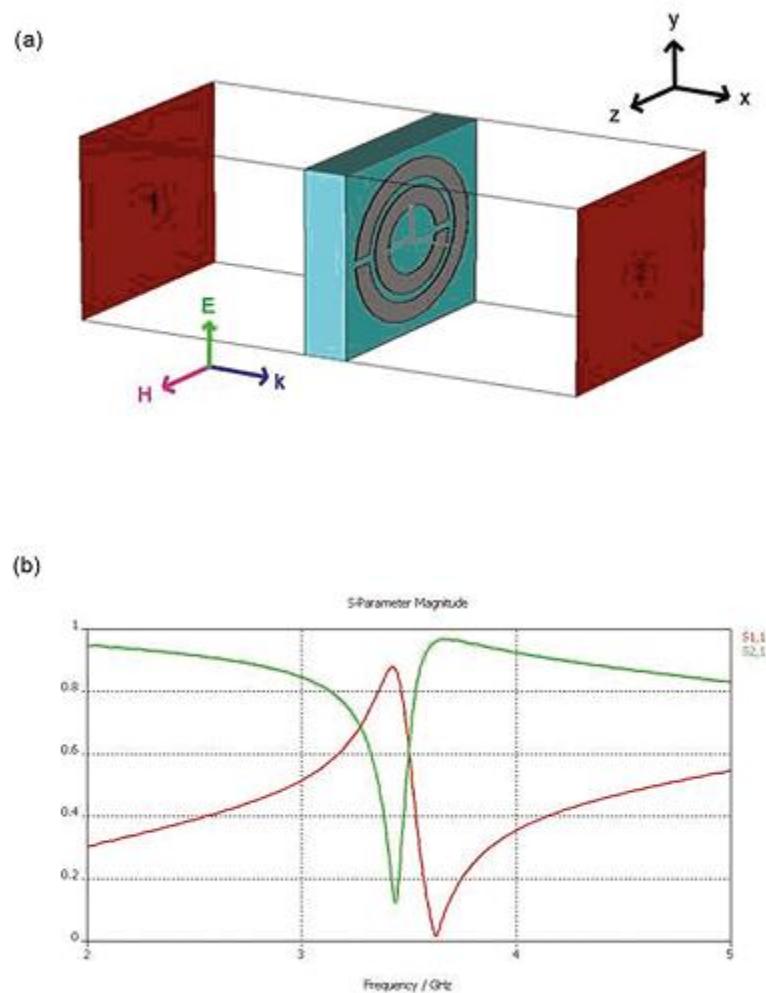
Prvi pokus, odnosno simulacija, je izvedena na SRR strukturi koja se sastoji od dva bakrena prstena s prorezima na suprotnim stranama (slika 3.1.):



Slika 3.1. Jedna čelija SRR strukture

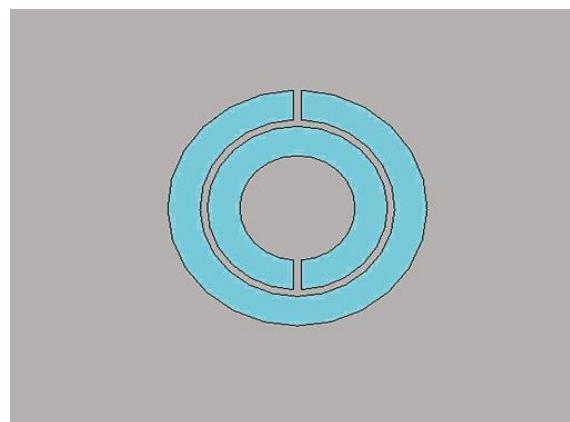
(preuzeto iz [5])

Razmak između 2 prstena (t) i širina prozora (d) iznose 0.2 mm, širina prstena (w) iznosi 0.9 mm, a vanjski polumjer SRR strukture (r) iznosi 3.6 mm. Debljina dielektrične ploče na kojoj je otisnut SRR je 1.6 mm. Simulacija je provedena u CST Microwave Studiju, korišteni su valovodni portovi, a rubni uvjeti su podešeni na sljedeći način: otvoreni rubni uvjeti u $+x$ i $-x$ smjeru, električni ($E_t=0$) u $+y$ i $-y$ smjeru, te magnetski ($H_t=0$) u $+z$ i $-z$ smjeru. Na slici 3.2. je shema simulacije te rezultati simulacije.



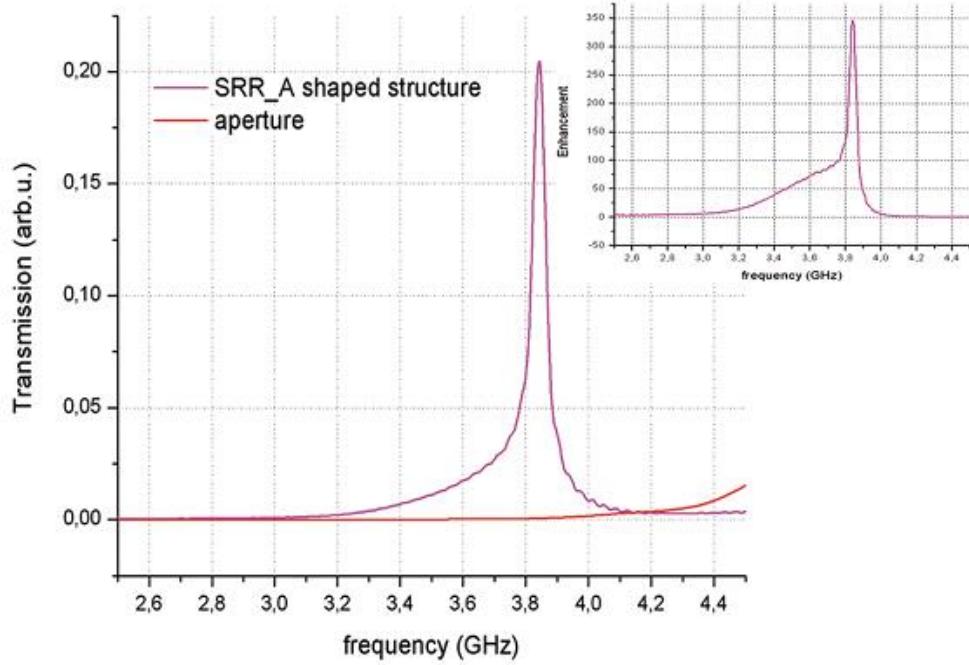
Slika 3.2. Shema koja je simulirana i rezultati simulacije (S_{11} – crveno; S_{21} – zeleno) (preuzeto iz [5])

Nakon što su simulacije pokazale željene rezultate, napravljena je simulacija suprotna po dualnosti, odnosno, ovaj put je napravljen otvor u obliku SRR ćelije na metalu (slika 3.3.).



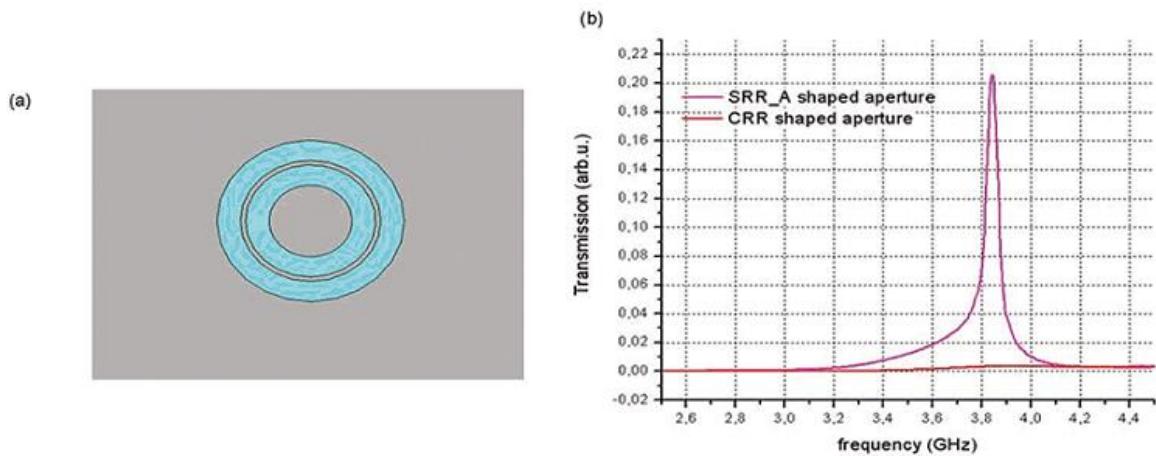
Slika 3.3. Otvor u obliku SRR ćelije (sivo – metalna ploča; plavo – otvor)
(preuzeto iz [5])

Simulacije opet pokazuju pojačani prijenos, kao i u prethodnom slučaju (slika 3.4.):



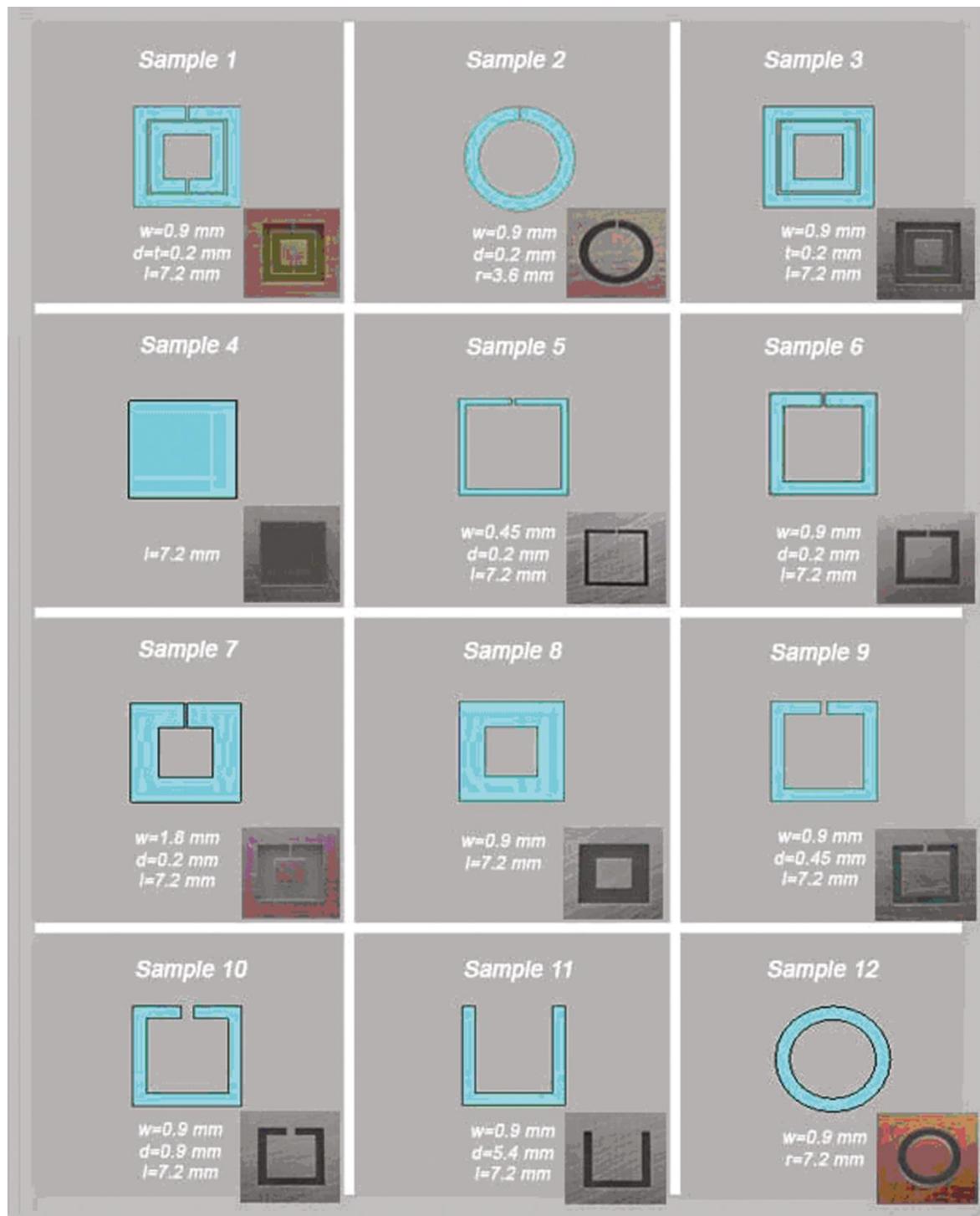
Slika 3.4. Rezultati simulacije SRR otvora (ljubičasto – SRR otvor; crveno – obični otvor)
(preuzeto iz [5])

Sljedeći pokušaj je bio sa *closed ring* rezonatorima (CRR-ovima), odnosno sa otvorom u obliku CRR strukture. Slika 3.5. pokazuje takav otvor, te rezultate simulacije takvog otvora.

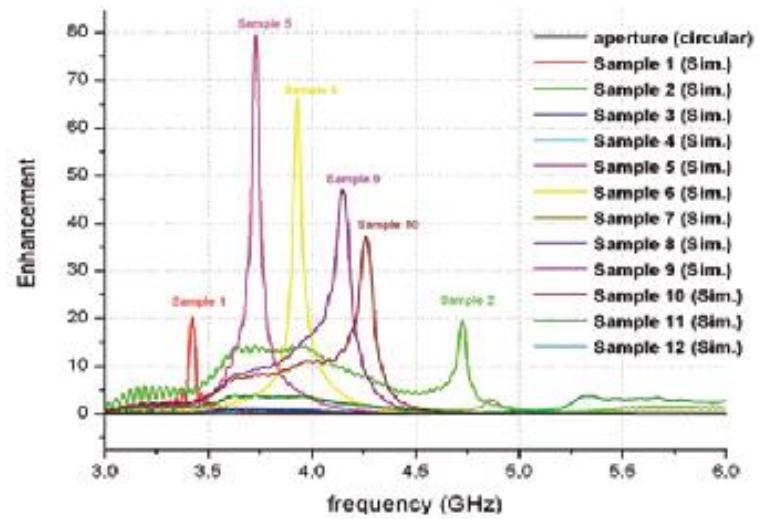
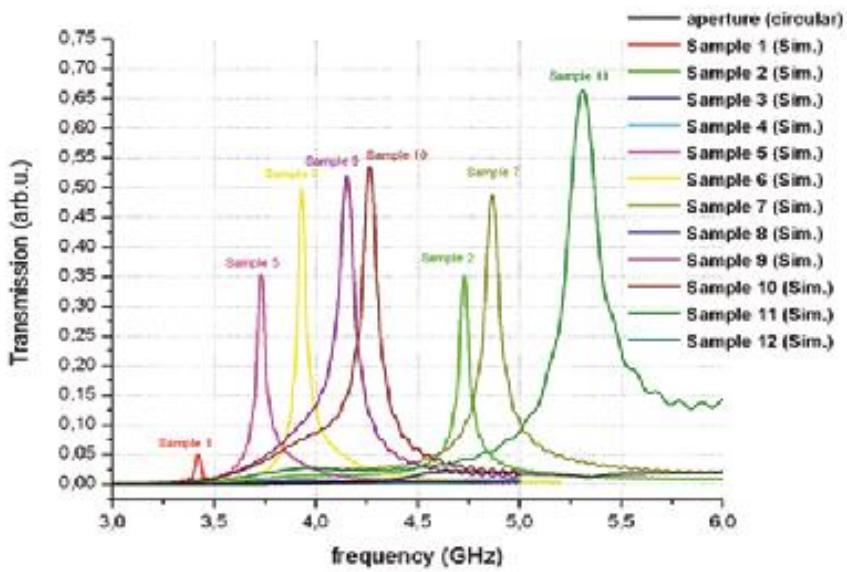


Slika 3.5. a) Otvor u obliku CRR strukture; b) Rezultati simulacije
(preuzeto iz [5])

Nakon što je i takav otvor pokazao željene rezultate, simulirano je još 12 različitih oblika koji su također manje-više pokazali željene rezultate. Slika 3.6. pokazuje te oblike, a slika 3.7. pokazuje rezultate simulacija.



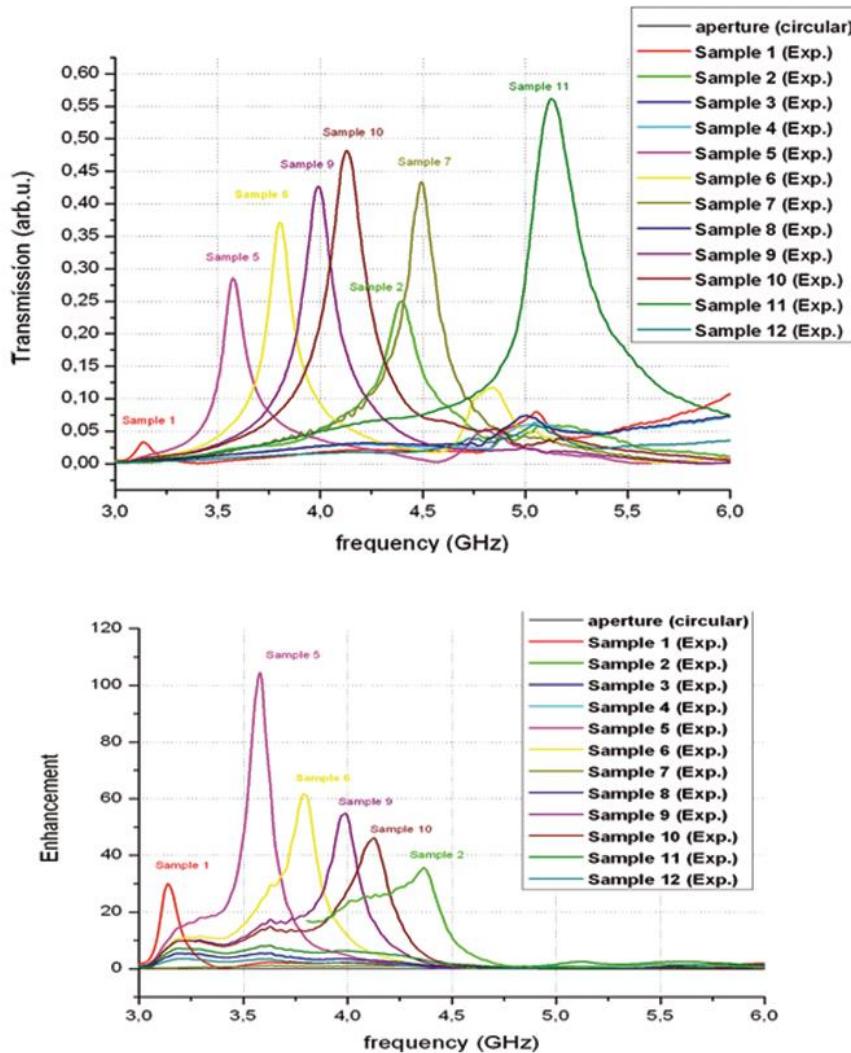
Slika 3.6. Oblici otvora nad kojima su izvršene simulacije
(preuzeto iz [5])



Slika 3.7. Rezultati simulacija

(preuzeto iz [5])

Nakon simulacija, ti otvori su napravljeni u stvarnosti i nad njima su vršena mjerena. Mjerenja su potvrdila simulacije, a rezultati mjerenja su vidljivi na slici 3.8.



Slika 3.8. Rezultati mjerenja nad otvorima

(preuzeto iz [5])

U mjerjenjima je kao referentni uzorak uzet uzorak broj 4. Pošto otvori puno manji od valne duljine zrače vrlo slabo i difraktiraju elektromagnetsko zračenje u svim smjerovima, svi su uzorci urezani u ploče dimenzija 20 cm x 20 cm, kako bi se odaslani val čim više „prikupio“, te kako bi se incidentni i odaslani val čim bolje odijelili.

Rezultati pokazuju da sa smanjenjem širine prstena raste frekvencija maksimalnog prijenosa i maksimalnog obogaćenja. Također, s povećanjem širine proreza prstena pada obogaćenje, a rezonantna frekvencija raste. Ovaj efekt je jako bitan za optičke frekvencije. Pošto je uzorak broj 11 najjednostavniji od proizvedenih, jednostavnije ga je koristiti na višim frekvencijama, kad su dimenzije manje. Treba primjetiti i poboljšanje prijenosa ako usporedimo CRR i SRR strukturu (uzorak broj 12 i uzorak broj 2).

4. Aktivni metamaterijali

4.1. Zašto aktivni metamaterijali? (pričak osnovnih fizikalnih ograničenja pasivnih metamaterijala)

Dva osnovna ograničenja pasivnih metamaterijala su njihova uskopojasnost i gubici. Pošto moderni radiofrekvencijski sustavi koriste složene modulacijske postupke ili impulsne signale čiji je frekvencijski spektar vrlo širok, frekvencijska širina pojasa jako onemogućuje rad s takvim pobudama, te se zbog toga metamaterijali vrlo rijetko koriste.

Iako se u teoriji krugova uglavnom uzima da su relativna permitivnost i permeabilnost neovisne o frekvenciji, to nije točno. One su uvijek ovisne o frekvenciji, s time da je ta ovisnost kod prirodnih materijala vrlo slaba. Kod metamaterijala je ta ovisnost vrlo velika, a razlog tome je disperzija. U svrhu analize disperzije iskoristit će izraz za uskladištenu reaktivnu energiju unutar nekog volumena (J4.1.):

$$E_{uk} = E_e + E_m = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 + \frac{1}{2} \mu_0 \mu_r H^2 \quad (\text{J4.1.})$$

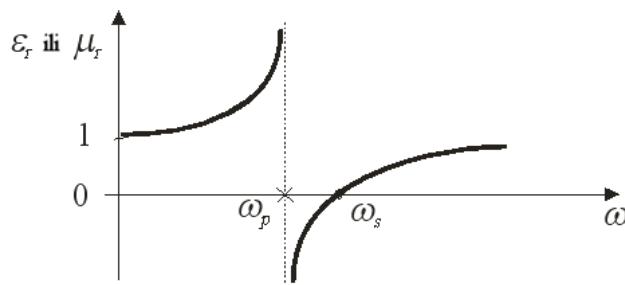
E predstavlja vrijednost električnog polja, H predstavlja vrijednost magnetskog polja, umnožak $\varepsilon_0 \varepsilon_r$ predstavlja permitivnost sredstva, a umnožak $\mu_0 \mu_r$ permeabilnost sredstva. Ukoliko ε_r i μ_r iznose 1, tada se promatra uskladištena energija u vakuumu. Stavlji se neki pasivni materijal bez gubitaka sa iznosima ε_r i μ_r većim od 1 u taj isti volumen, ukupna uskladištena energija će biti veća od one u vakuumu. To je tako zbog toga što je za polarizaciju materijala potrebno potrošiti neki rad. Ukoliko se stavi neki materijal s iznosima ε_r i μ_r manjim od 1 i pokuša ga se opisati pomoću (J4.1.), dođe se do zaključka da je uskladištena energija u tom materijalu manja od one u vakuumu, što nije točno. Očito je da se u obzir mora uzeti utjecaj frekvencijske ovisnosti, odnosno disperzija, te je pravi izraz za analizu metamaterijala (J4.2.):

$$E_{uk} = E_e + E_m = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \frac{\partial(\omega \varepsilon_r)}{\partial \omega} E^2 + \frac{1}{2} \mu_0 \frac{\partial(\omega \mu_r)}{\partial \omega} H^2 \quad (\text{J4.2.})$$

S obzirom da je energija kod pasivnih materijala pozitivna, članovi koji opisuju disperziju su pozitivni (J4.3.):

$$\frac{\partial(\omega\epsilon_r)}{\partial\omega} > 0, \quad \frac{\partial(\omega\mu_r)}{\partial\omega} > 0 \quad (\text{J4.3.)})$$

Kod pasivnih metamaterijala ovi izrazi su zadovoljeni, ali ukazuju na rezonantno ponašanje. Matematički model koji opisuje rezonantno ponašanje pasivnih metamaterijala je Lorentzov disperzijski model, koji opisuje permitivnost ili permeabilnost pasivnih metamaterijala (slika 4.1.).



Slika 4.1. Lorentzov disperzijski model (frekvencijska ovisnost ϵ_r ili μ_r)
(preuzeto iz [6])

Pasivni metamaterijali kakvi se mogu naći u literaturi imaju rezonantna svojstva, a $\epsilon_r < 1$ i $\mu_r < 1$ se postiže u uskom frekvencijskom opsegu. Frekvencija na kojoj se određeni metamaterijali koriste određena je geometrijskim veličinama, a nalazi se u blizini rezonantne frekvencije ω_s .

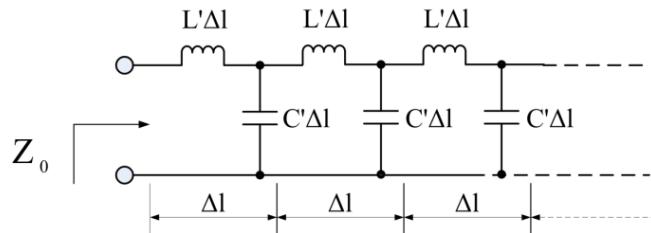
4.2. Metamaterijali bazirani na prijenosnim linijama

Metamaterijali bazirani na prijenosnim linijama (engl. *Transmission line metamaterials*) su metamaterijali koji se sastoje od kombinacije prijenosnih linija i koncentriranih elemenata (otpora, induktiviteta i kapaciteta), mogu se opisati Lorentzovim disperzijskim modelom, te podliježu Fosterovom teoremu.

Fosterov reaktancijski teorem opisuje ponašanje reaktancije i susceptancije mreža koje se sastoje od pasivnih koncentriranih elemenata (J4.4.), te predstavlja analogiju izrazima prikazanim u (J4.3.) ((J4.2.) u 3D predstavlja isto što i Fosterov teorem u 1D).

$$\frac{\partial(X(\omega))}{\partial\omega} > 0, \quad \frac{\partial(B(\omega))}{\partial\omega} > 0 \quad (\text{J4.4.})$$

Prijenosna linija bez gubitaka se može prikazati kao niz kratkih odsječaka duljine $\Delta l \ll \lambda$ koji se sastoje od raspodijeljenih kapaciteta i induktiviteta linije C' i L' (slika 4.2.).



Slika 4.2. Model prijenosne linije bez gubitaka

(preuzeto iz [6])

Za analizu prijenosnih linija iskoristit će izraze za karakterističnu impedanciju linije bez gubitaka (J4.5.), valni broj (J4.6.) i faznu brzinu (J4.7.).

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (\text{J4.5.})$$

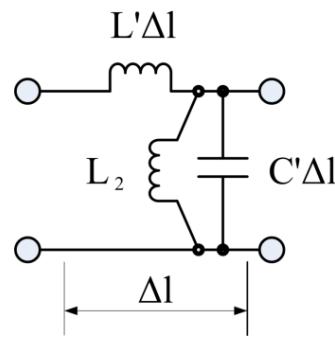
$$\beta = \omega \sqrt{L'C'} \quad (\text{J4.6.})$$

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} = \frac{\omega}{\beta} \quad (\text{J4.7.})$$

Iz teorije elektromagnetskih valova vrijedi da je $\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$, iz čega slijedi da je umnožak $L'C' = \mu\epsilon$ za sve prijenosne linije. Uz $\epsilon_r = 1$ i $\mu_r = 1$ fazna brzina će biti jednaka:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Konstanta μ_0 predstavlja permeabilnost vakuma i iznosi $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$, a ϵ_0 predstavlja permitivnost vakuma i iznosi $8.854 \cdot 10^{-7} \text{ F/m}$. Da bi se postigla fazna brzina veća od brzine svjetlosti moramo promijeniti C' i/ili L' tako da $0 < C' < \epsilon_0$ i $0 < L' < \mu_0$, a to se postiže tako da se na jednoj frekvenciji na svaki odsječak linije dodaje koncentrirani element (kapacitet i induktivitet). Na taj način se može konstruirati 1D metamaterijal sa željenim parametrima. Konstrukciju najjednostavnijeg ENZ metamaterijala pokazat ću na primjeru dodavanja dodatnog induktiviteta na zračnu prijenosnu liniju (slika 4.3.):



Slika 4.3. ENZ metamaterijal
(preuzeto iz [6])

Admitancija paralelnog spoja C' i L_2 iznosi (J4.8.):

$$Y = j\omega C' - j\frac{1}{\omega L_2} = j\omega \left(C' - \frac{1}{\omega^2 L_2} \right) = j\omega C_{ef} \quad (\text{J4.8.})$$

Interpretira li se ukupna admitancija u (J4.8.) kao neki novi efektivni kapacitet, raspodijeljeni efektivni kapacitet C_{ef}' tada iznosi (J4.9.):

$$C_{ef}' = \frac{C'}{\Delta\ell} = \frac{C' - \frac{1}{\omega^2 L_2}}{\Delta\ell} = \epsilon_0 - \frac{1}{\omega^2 L_2 \Delta\ell} [\text{F/m}] \quad (\text{J4.9.})$$

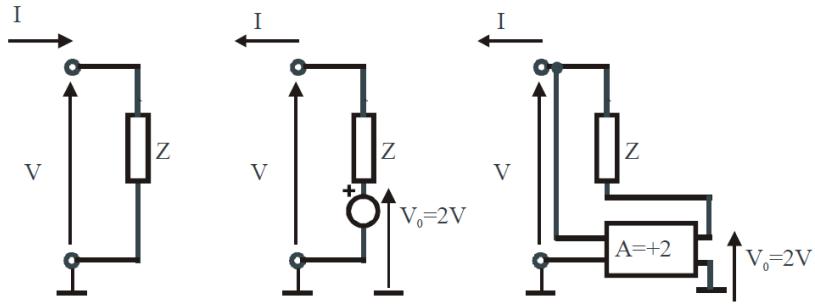
U (J4.9.) se vidi da je C_{ef}' manji od onoga za samu zračnu liniju, što znači da će ovakva prijenosna linija imati svojstva ENZ metamaterijala.

4.3. Izvedba aktivnih metamaterijala: ne – Fosterovi sklopovi izvedeni pomoću negativnih pretvornika impedancije (engl. *negative impedance converter* – NIC)

Kao što je već spomenuto u potpoglavlju 4.1. ovog poglavlja, frekvencijski pojas pasivnih metamaterijala je veoma uzak zbog disperzije unutar materijala koju je nemoguće izbjegći. Promatraju li se pasivni metamaterijali pomoću prijenosnih linija (1D metamaterijali), tu disperziju vidimo preko Fosterovog teorema. Jedini način na koji se može postići ENG, MNG, ENZ ili MNZ ponašanje je redistribucija energije između električnog i magnetskog polja. Gledano sa stajališta teorije linija, redistribuciju energije je moguće postići pomoću reaktivnih mreža ulazne impedancije koja se ponaša poput disperzivnog negativnog kondenzatora ili disperzivne zavojnice.

Pošto Fosterov teorem vrijedi samo za pasivne materijale, ne postoje čak niti teoretska ograničenja širine frekvencijskog pojasa aktivnih metamaterijala! Zbog toga je napredak metamaterijala krenuo i u „aktivnom smjeru“. U dosadašnjim studijama teoretski su analizirani kratki dipoli i male opterećene petlje. Pokazano je da kratki dipoli opterećeni negativnim kapacitetom pokazuju ENG svojstva, te da male petlje opterećene negativnim induktivitetom pokazuju MNG svojstva. Kad bi se metamaterijali realizirali pomoću ovakvih antena, širina njihovog frekvencijskog pojasa bi ovisila jedino o širini frekvencijskog pojasa aktivnih elemenata. Jedini uvjet da metamaterijal bude stabilan je da ukupni reaktivni otpor mora biti pozitivan!

Način na koji bi se izveo negativni reaktivni element je taj da se u granu s običnim reaktivnim elementom kojeg želimo „pretvoriti“ u negativan spoji zavisni naponski izvor dvotruko većeg napona od napona mreže prema elementu, ali suprotnog polariteta, tako da bi zapravo napon na elementu bio suprotnog predznaka, a struja bi ostala istog smjera! Zavisni naponski izvor bi se mogao izvesti pomoću naponskog pojačala s naponskim pojačanjem $A_V = 2$ (slika 4.4.).

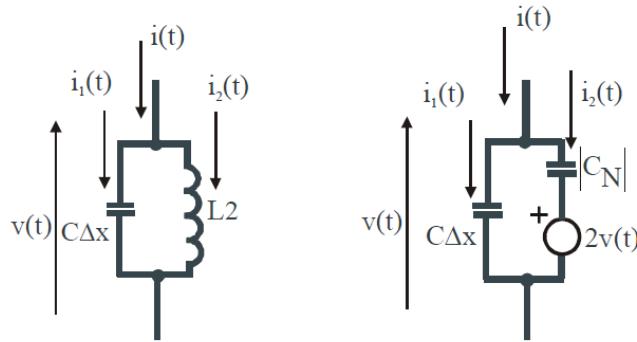


Slika 4.4. Izvedba negativnog reaktivnog elementa

(preuzeto iz [4])

Ovako se mijenja polaritet napona na elementu. No pitanje je: mijenja li se samo polaritet napona na reaktivnom elementu ili se mijenja još nešto?

Kao primjer će usporediti obični paralelni LC titrajni krug i aktivni CC_N strujni krug (slika 4.5.):



Slika 4.5. Lijevo: paralelni LC titrajni krug, desno: aktivni CC_N titrajni krug

(preuzeto iz [4])

C i L_2 su „obični“ kondenzator i zavojnica, dok je C_N negativni kondenzator. Napajamo li titrajni krug signalom oblika $v(t) = V_0 \cos(\omega t)$, tada su struje pojedinih grana u mreži jednake (J4.10.):

$$i_1(t) = C\Delta x \frac{d[v(t)]}{dt} = -V_0 \omega C \Delta x \sin(\omega t), \quad i_2(t) = \frac{1}{L_2} \int v(t) dt = \frac{V_0}{\omega L_2} \sin(\omega t) \quad (\text{J4.10.})$$

Ukupna reaktivna snaga titrajnog kruga jednaka je (J4.11.):

$$p(t) = v(t)[i_1(t) + i_2(t)] = \left(-\frac{V_0^2 \omega C}{2} + \frac{V_0^2}{2\omega L_2} \right) \sin(2\omega t) = -\frac{V_0^2}{2} \left(\omega C + \frac{1}{\omega L_2} \right) \sin(2\omega t) \quad (\text{J4.11.})$$

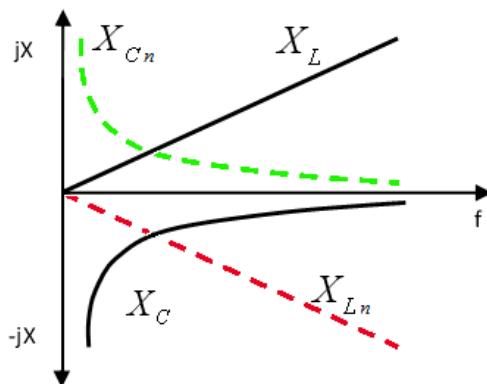
Zamijeni li se zavojnica L_2 negativnim kondenzatorom C_N , situacija se promjeni (J4.12.):

$$i_1(t) = C\Delta x \frac{d[v(t)]}{dt} = -V_0\omega C\Delta x \sin(\omega t), \quad i_2(t) = |C_N| \frac{d[-v(t)]}{dt} = V_0\omega |C_N| \sin(\omega t) \quad (\text{J4.12.})$$

Tada je izraz za ukupnu reaktivnu snagu kruga jednak (J4.13.):

$$p(t) = v(t)[i_1(t) + i_2(t)] = -\frac{V_0^2}{2}\omega(C - |C_N|) \sin(2\omega t) \quad (\text{J4.13.})$$

Iz izraza (J4.11.) i (J4.13.) se vidi da se negativni kondenzator C_N ponaša kao zavojnica, ali frekvencijska karakteristika je istog oblika kao i kod „običnih“ kondenzatora! Za negativnu zavojnicu vrijedi analogija: ponašat će se kao kondenzator, ali frekvencijske karakteristike istog oblika kao i kod „običnih zavojnica“ (slika 4.6.).

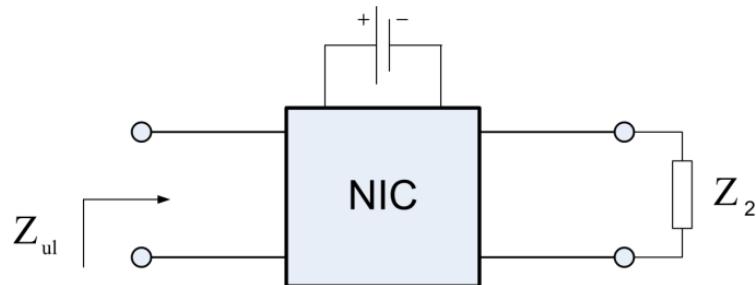


Slika 4.6. Frekvencijske karakteristike reaktivnih elemenata
(puna crta – pozitivni elementi, crtkano – negativni elementi)
(preuzeto iz [6])

Treba uočiti da se spajanjem negativnog kondenzatora u strujni krug u taj isti strujni krug dodaje dodatni izvor napajanja u vidu napajanja pojačala (slika 4.4.), zbog toga Fosterov reaktancijski teorem više ne vrijedi, i to je razlog zašto se ovakvi elementi nazivaju ne – Fosterovi elementi.

Praktično gledano, za izvedbu negativnih reaktivnih elemenata su potrebni tzv. negativni pretvornici impedancije (NIC – evi). To su sklopovi koji imaju svojstvo pretvaranja impedancije spojene na izlaz (Z_2) u impedanciju suprotnog predznaka pomnoženu s faktorom konverzije k koja se vidi na ulazu (Z_{ul}) (J4.14.).

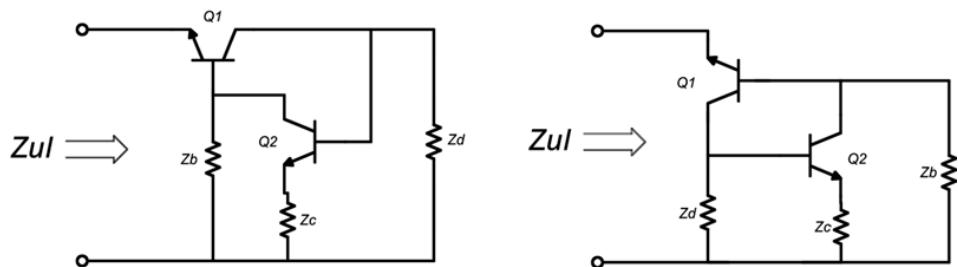
$$Z_{ul} = -k \cdot Z_2 \quad (\text{J4.14.})$$



Slika 4.7. Negativni pretvornik impedancije – NIC

(preuzeto iz [4])

NIC – evi u sebi sadrže pozitivnu povratnu vezu, što ih čini ekstremno osjetljivima na neželjene pomake u fazi i parazitne kapacitete i induktivitete. Zbog toga ima samo nekoliko objavljenih uspješnih realizacija NIC – eva: Linvill – Yanagisawa NIC u bipolarnoj tehnologiji (slika 4.8.), Meunier – Kolev NIC u FET tehnologiji (slika 4.9.), te NIC izведен pomoću operacijskog pojačala (slika 4.10.).

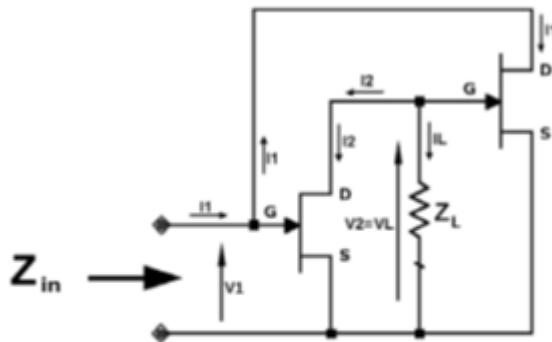


$$Z_{ul} = - (Zb/Zc) Zd$$

$$Z_{ul} = - (Zd/Zc) Zb$$

Slika 4.8. Lijevo – Linvillov NIC, desno – Yanagisawin NIC

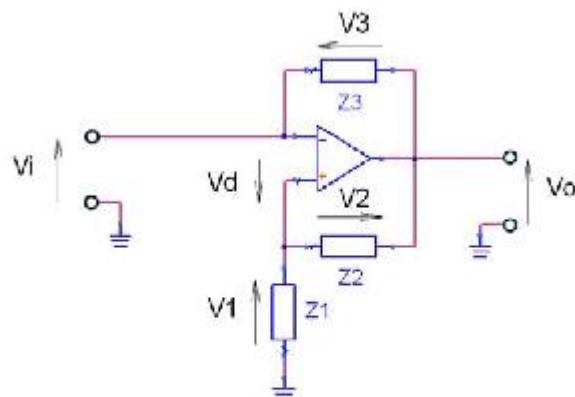
(preuzeto iz [4])



$$Z_{in} = -\frac{1}{g_m g_m Z_L}$$

Slika 4.9. Meunierov NIC

(preuzeto iz [4])



$$Z_{in} = -\frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2}$$

Slika 4.10. NIC izveden pomoću operacijskog pojačala

(preuzeto iz [4])

Tablica 4.1. Usporedba tehnologija

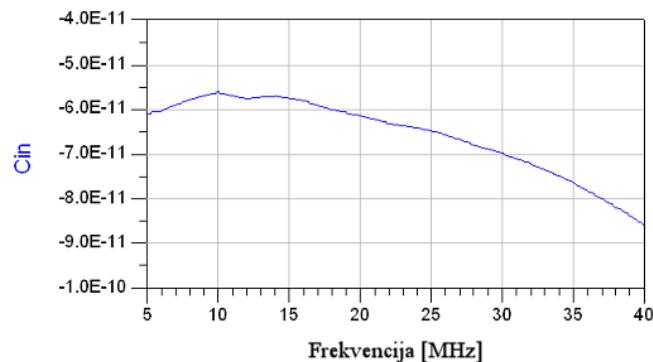
Tehnologija	Složenost izrade	Maksimalna radna frekvencija		Mogućnost ručne izrade
		Diskretno	Integrirano	
Bipolarna	visoka	~100 MHz	-	vrlo složeno
FET	srednja	~2 GHz	5 GHz	složeno
Operacijska pojačala	niska	~50 MHz	-	jednostavno

S obzirom da je najlakše izvesti NIC pomoću operacijskih pojačala, ta se tehnologija češće koristi za izradu metamaterijala. Jedini njezin nedostatak u odnosu na preostale tehnologije je lošiji odnos signal – šum.

Zasad je objavljeno nekoliko prototipova negativnih kondenzatora (2 MHz – 40 MHz izveden pomoću operacijskih pojačala, 50 MHz – 100 MHz izveden FET tehnologijom i 1 GHz – 2 GHz također izveden FET tehnologijom), dok prototipova negativnih zavojnica još uvijek nema. Na slikama 4.11. do 4.13. su prikazani prototipovi negativnih kondenzatora, dok slika 4.14. prikazuje izmjereni iznos negativnog kapaciteta sklopa sa slike 4.13.



Slike 4.11. – 4.13. Prototipovi negativnih kondenzatora (lijevo i u sredini – FET tehnologija, desno – izvedeno pomoću operacijskih pojačala)
(preuzeto iz [4])

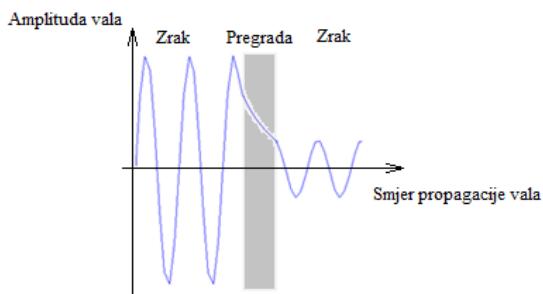


Slika 4.14. Izmjereni iznos negativnog kapaciteta za sklop sa slike 4.13.
(preuzeto iz [6])

5. Subvalno tuneliranje elektromagnetske energije

5.1. Teoretski prikaz

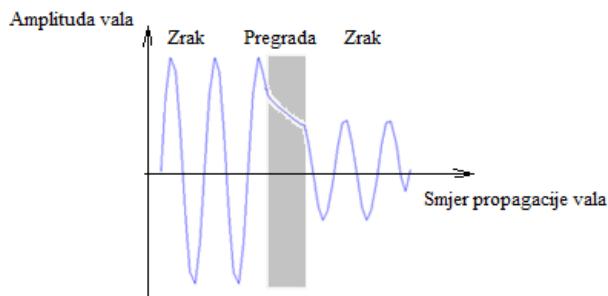
Ideja ovog rada je da se iskoristi efekt EOT – a u svrhu povećanja prijenosa elektromagnetske energije i frekvencijskog radnog područja metamaterijala. Naime, kada elektromagnetski val najđe na prepreku s otvorom čije su dimenzijsne pune manje od valne duljine vala, dolazi do jake refleksije, a kroz otvor se širi tzv. evanescentni val čija amplituda eksponencijalno pada s udaljenošću. Ukoliko amplituda bude dovoljno velika na izlazu prepreke, dio energije vala će se nastaviti širiti i iza prepreke (slika 5.1.). To je zapravo princip tuneliranja elektromagnetske energije.



Slika 5.1. Propagacija elektromagnetskog vala

(Lijevo: prije pregrade, sredina: kroz otvor u pregradi, desno: nakon pregrade)

Stavi li se antena u otvor, pretpostavka je da će evanescentni val sporije „trnuti“ u nulu, odnosno veći dio energije će biti prenesen u odnosu na prethodni slučaj (slika 5.2.).



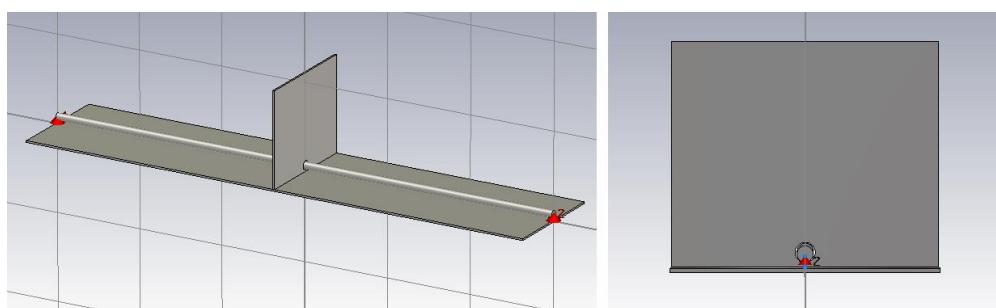
Slika 5.2. Propagacija elektromagnetskog vala sa antenom u otvoru

(Lijevo: prije pregrade, sredina: kroz otvor u pregradi, desno: nakon pregrade)

5.2. Subvalno tuneliranje elektromagnetske energije pomoću pasivnih metamaterijala

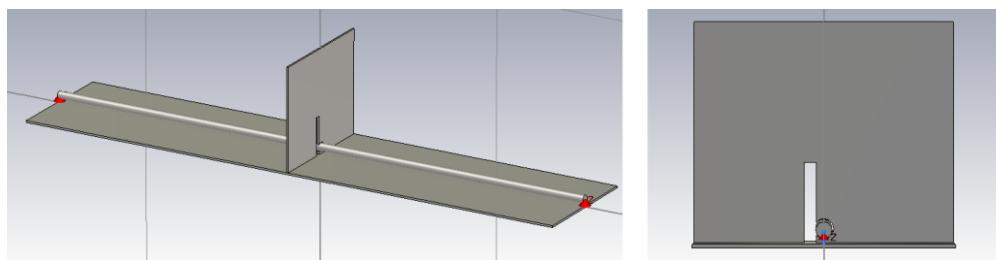
Da bi se postigao ovakav efekt razmatrano je nekoliko struktura za koje je pretpostavljeno da će podržavati ovakav oblik tuneliranja.

Prva struktura se sastojala od metalne pločice u kojoj je probušen otvor puno manji od valne duljine promatranog elektromagnetskog zračenja (frekvencijsko područje oko 200 MHz) i prijenosne linije na čiju uzemljenu ploču je probušena pločica fiksirana (Slika 5.3.).



Slika 5.3. Struktura (lijevo – izometrija, desno – bokocrt) (naša simulacija)

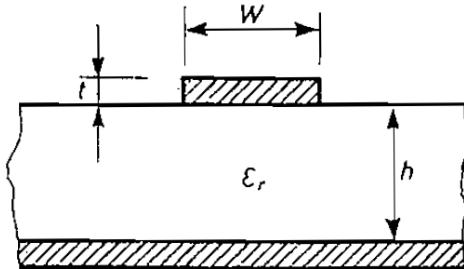
Napravljena je i struktura sa pločicom koja, uz probušen otvor, ima i prorez za antenu (slika 5.4.).



Slika 5.4. Struktura s prorezom za antenu (lijevo – izometrija, desno – bokocrt) (naša simulacija)

Nad ovim strukturama su izvršene simulacije i mjerena stvarnih modela. Nažalost, rezultati nisu ispunili naša očekivanja. Smatramo da je razlog tome koncentriranost električnog polja vrlo blizu vodiču i pad polja s kvadratom udaljenosti od vodiča. To nas navodi na zaključak da otvor treba biti neznatno širi od vodiča, što onemogućuje ikakva mjerena antenom zbog tehnološke neizvedivosti. Zbog toga smo odustali od dalnjih mjerena i simulacija ove ideje.

Kod sljedeće strukture iskorištena je nesimetrična trakasta linija (Slika 5.5.). Prednost trakastih linija je veća koncentriranost električnog polja između trake i ploče za odslikavanje, što omogućuje točnija mjerjenja čak i sa nepreciznijim instrumentarijem.

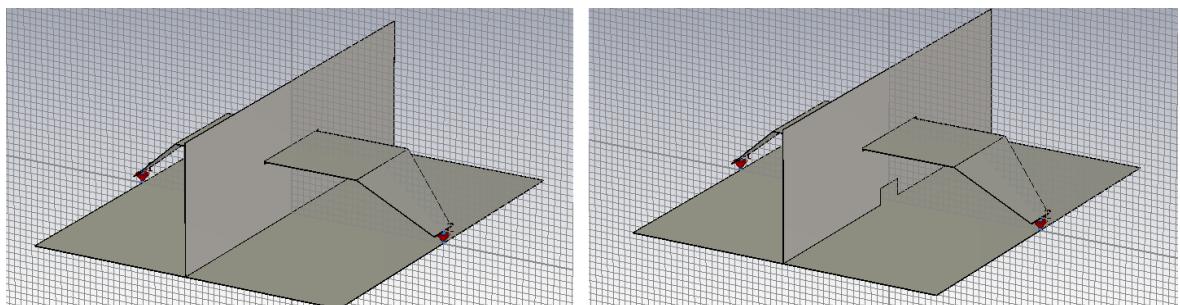


Slika 5.5. Nesimetrična trakasta linija
(preuzeto iz [2])

Formula za izračun impedancije nesimetrične trakaste linije glasi (J5.1.):

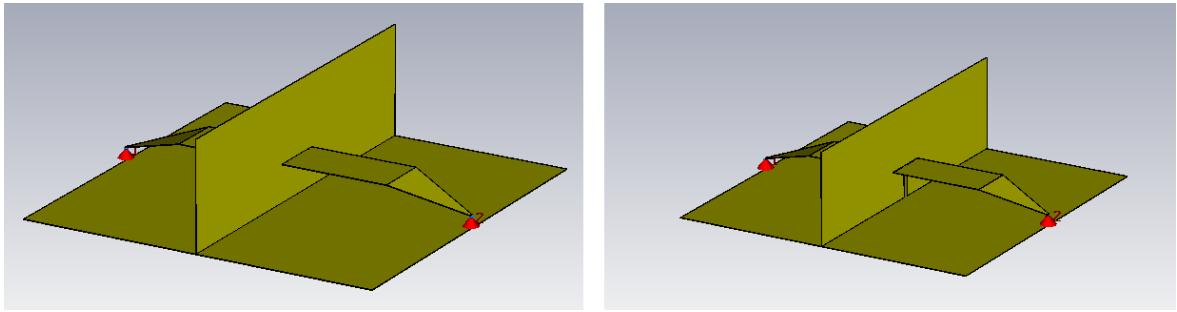
$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}} \ln \left(\frac{5,98h}{0,8w+t} \right) \quad (\text{J5.1.})$$

uz uvjet $h < 0,8w$. Zbog činjenice da unutrašnja impedancija generatora iznosi 50Ω , potrebno je impedanciju trakaste linije prilagoditi na taj iznos. Na sredinu linije se stavi metalna ploča te se u njoj načini otvor za antenu. Izgled prvih struktura nacrtanih u CST Microwave Studiju može se vidjeti na slici 5.6.



Slika 5.6. Strukture sa nesimetričnom trakastom linijom (naša simulacija)

Nakon nekoliko provedenih simulacija ustanovaljeno je da struktura ima mnogo nedostataka. Zbog toga je napravljeno nekoliko modifikacija: smanjena je širina trakaste linije kako bi se smanjilo zračenje izvan strukture, traka je približena ploči za odslikavanje kako bi koncentracija polja bila veća, povećan je otvor kako bi u nj stala veća, a time i efikasnija antena, a umjesto savršenog električnog vodiča korišten je bakar koji ima gubitke radi realnosti rezultata. Konačni izgled strukture vidljiv je na slici 5.7.



Slika 5.7. Konačni izgled strukture (naša simulacija)

Širina i dužina ploče za odslikavanje iznosi 50 cm, visina pregrade iznosi 15 cm, razmak između ploče i trakaste linije iznosi 5 cm, širina linije iznosi 7.5 cm, duljina linije iznosi 30 cm a debljina svih limova je 1 mm. Otvor kroz koji prolazi trakasta linija načinjen je tako da razmak između linije i pregrade sa svih strana iznosi 0.5 mm, dok je širina otvora predviđenog za antenu 5 mm.

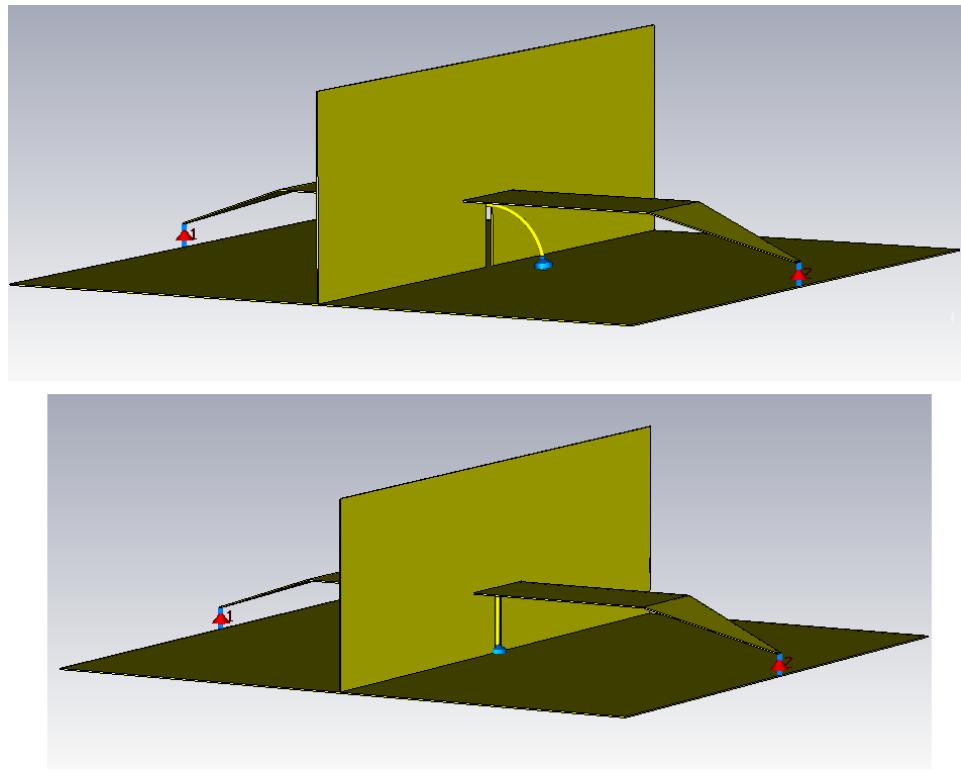
Sljedeći korak je ubacivanje antena u otvor. Izračun reaktivnih impedancija antena prikazan je izrazima (J5.2.) (kapacitivna reaktancija unipola) i (J5.3.) (induktivna reaktancija petlje):

$$X_C = \frac{60}{tg(\beta H)} \left[\ln\left(\frac{H}{a}\right) - 1 \right] \quad (\text{J5.2.})$$

$$X_L = 2\pi f \mu a \left[\ln\left(\frac{8a}{p}\right) - 1.75 \right] \quad (\text{J5.3.})$$

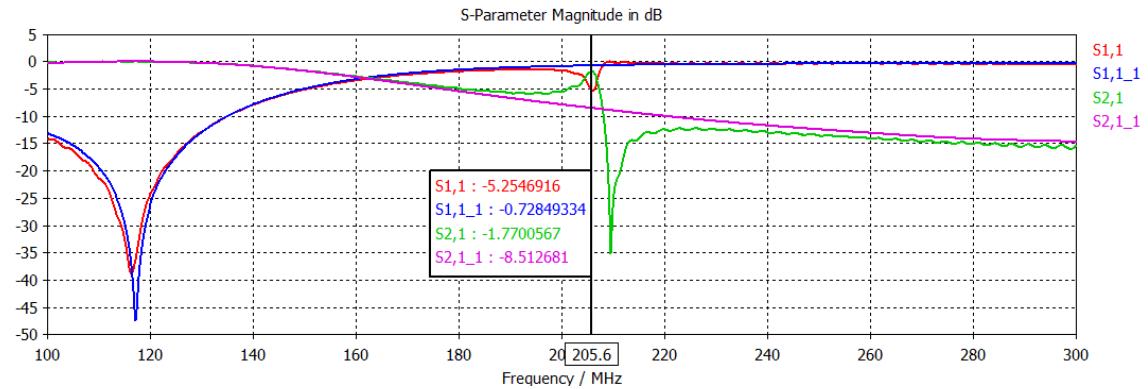
U izrazu (J5.2.) H predstavlja visinu antene, a predstavlja polumjer antene dok β predstavlja valni broj. Uzeta je visina antene 4 cm i njen polumjer 1.5 mm, a reaktivna kapacitivna impedancija antene na radnoj frekvenciji od 230 MHz iznosi 702.22 Ω . Izračunata vrijednost kompenzirajućeg induktiviteta iznosi 486 nH, ali zbog raznih međuutjecaja antene i strukture uzeta je vrijednost od 425 nH.

Kod izraza (J5.3.) a predstavlja polumjer petlje, p predstavlja polumjer žice a μ predstavlja permeabilnost sredstva kroz koji se širi val. Uzet je polumjer petlje 4.5 cm, a polumjer žice 1.5 mm, pa reaktivna induktivna impedancija iznosi 305 Ω . Kad se uzme u obzir međuutjecaj antene i strukture vrijednost kompenzirajućeg kapaciteta na radnoj frekvenciji 230 MHz iznosi 4.54 pF. Izgled struktura sa ubaćenim antenama prikazan je na slici 5.8.

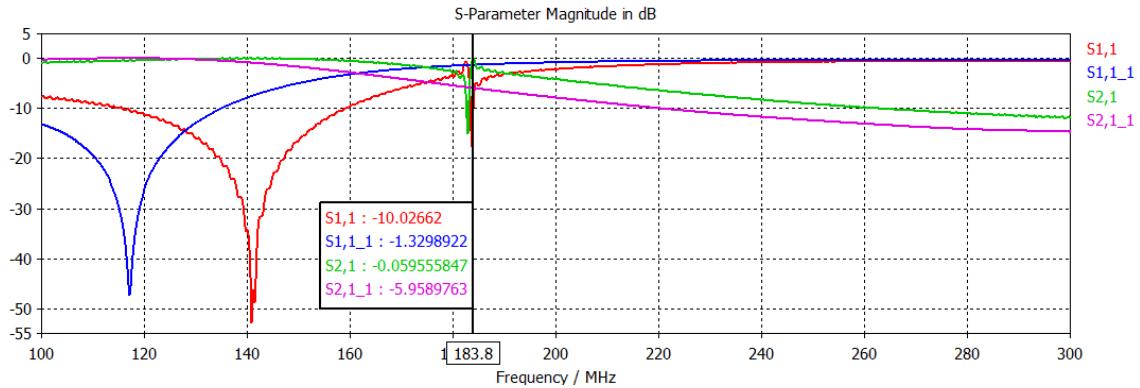


Slika 5.8. Struktura s antenama u otvoru (gore – petlja, dolje – unipol)
(naša simulacija)

Nakon što su antene s kompenziranoj reaktivnom impedancijom ubačene u strukture i nakon što su simulirane dobiveni su sljedeći rezultati (slika 5.9. i slika 5.10.):

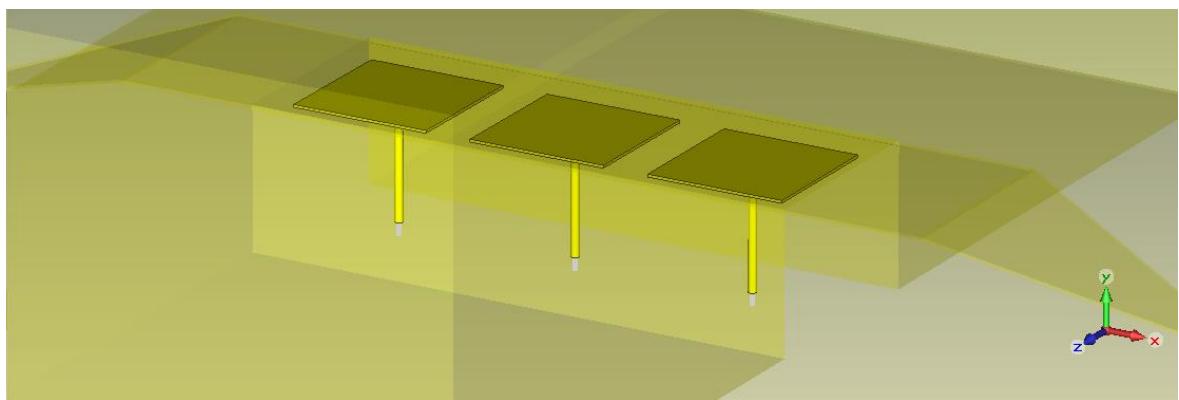


Slika 5.9. Prijenosni parametri strukture s petljom u otvoru (plavo – S_{11} parametar strukture s otvorom, ljubičasto – S_{21} parametar strukture s otvorom, crveno – S_{11} parametar s petljom u otvoru, zeleno – S_{21} parametar s petljom u otvoru)
(naša simulacija)

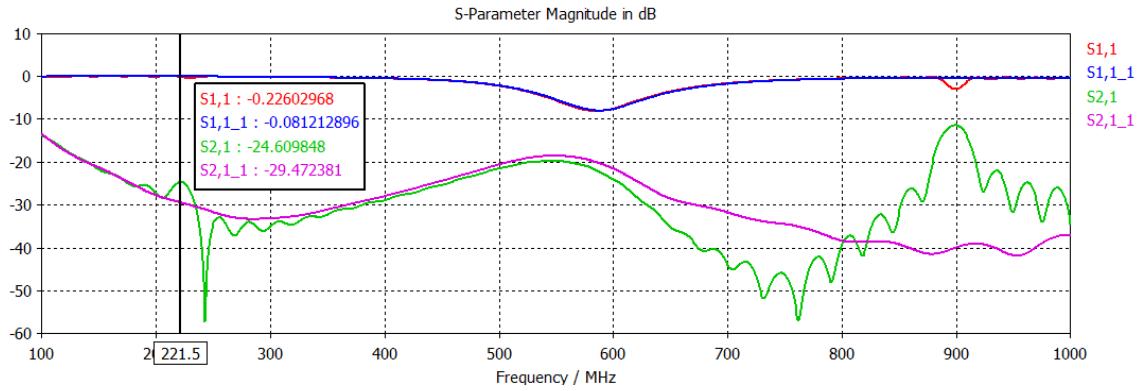


Slika 5.10. Prijenosni parametri strukture s unipolom u otvoru (plavo – S11 parametar strukture s otvorom, ljubičasto – S21 parametar strukture s otvorom, crveno – S11 parametar s unipolom u otvoru, zeleno – S21 parametar s unipolom u otvoru)
(naša simulacija)

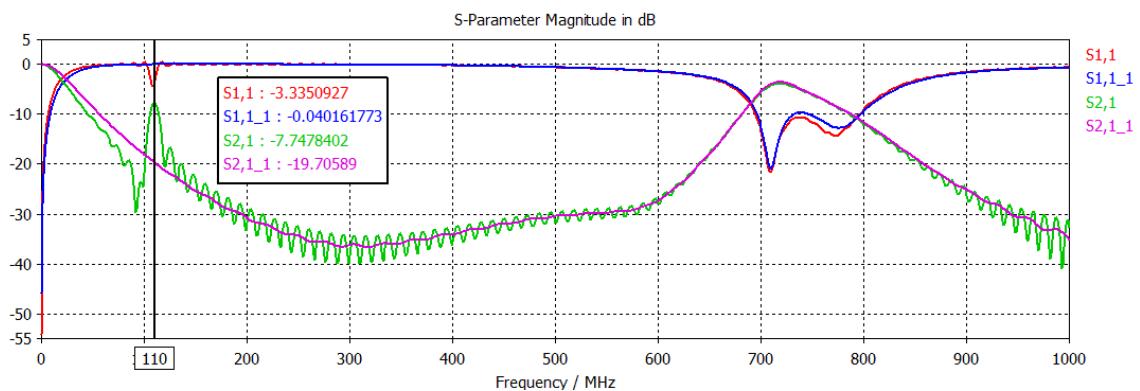
Na slici 5.9. vidljivo je poboljšanje prijenosa strukture s petljom u odnosu na samu strukturu od oko 7 dB na frekvenciji 205 MHz, dok je na slici 5.10. vidljivo poboljšanje prijenosa od oko 5 dB na frekvenciji 184 MHz. Da bismo bili sigurni da je dobiveno poboljšanje rezultat efekta tuneliranja, povećana je debljina pregrade na 10 cm kod strukture s petljom, a 20 cm kod strukture s unipolom, širina otvora je povećana na 7.5 cm, te je struktura ponovo simulirana. Još jedna razlika u odnosu na simulaciju sa slike xx10. je ta da su u strukturu stavljeni 3 unipola umjesto jednog, te su na vrhove unipola stavljeni male pločice koje predstavljaju vezne kondenzatore, sve u svrhu poboljšanja zračenja antene i povećanja kapacitivne veze strukture i antene (slika 5.11.). Rezultati simulacija su prikazani na slikama 5.12. i 5.13.



Slika 5.11. Prikaz unipola s veznim kondenzatorima
(naša simulacija)



Slika 5.12. Prijenosni parametri strukture s debljom pregradom s petljom u otvoru (plavo – S11 parametar strukture s otvorom, ljubičasto – S21 parametar strukture s otvorom, crveno – S11 parametar s petljom u otvoru, zeleno – S21 parametar s petljom u otvoru)
 (naša simulacija)



Slika 5.13. Prijenosni parametri strukture s debljom pregradom s 3 unipola u otvoru (plavo – S11 parametar strukture s otvorom, ljubičasto – S21 parametar strukture s otvorom, crveno – S11 parametar s unipolima u otvoru, zeleno – S21 parametar s unipolima u otvoru)
 (naša simulacija)

Nakon što su i ove simulacije pokazale željeni efekt tuneliranja, može se doći do zaključka da je pomoću ovakve strukture moguće ostvariti taj efekt, a poboljšanje efekta ostavljamo za buduće radove. Potrebno je napomenuti da treba zanemariti rezonantne pojave na visokim frekvencijama na slikama 5.12. i 5.13. jer te pojave nisu rezultat efekta tuneliranja, već su na tim frekvencijama dimenzije struktura srazmjerne s $n \cdot \lambda / 2$ upadnog elektromagnetskog vala.

5.3. Ideja subvalnog tuneliranja elektromagnetske energije pomoću aktivnih metamaterijala

Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju (potpoglavlje 4.3., str. 21) kratki dipoli opterećeni negativnim kapacitetom pokazuju ENG svojstva, a male petlje opterećene negativnim induktivitetom pokazuju MNG svojstva. Kad bi se takve antene „ubacile“ u našu strukturu, širina frekvencijskog pojasa bi ovisila jedino o širini frekvencijskog pojasa aktivnih elemenata (uz uvjet da ukupni reaktivni otpor bude pozitivan).

Konkretno za našu strukturu, procjena je da, ukoliko se želi postići rezonantno ponašanje i efekt EOT – a, umjesto induktivitetom iznosa 425 nH, unipol treba opteretiti negativnim kapacitetom apsolutnog iznosa kapaciteta oko 1.1 pF dok bi petlju, umjesto kapacitetom iznosa 4.54 pF, trebalo opteretiti negativnom zavojnicom apsolutnog iznosa induktiviteta oko 105 nH. Tada bi trebalo doći do rezonantnog ponašanja koje bi, dakle, bilo širokopojasnije od rezonantnog ponašanja kod struktura sa antenama opterećenim pasivnim i pozitivnim reaktivnim elementima.

Zbog složenosti simulacija negativnih reaktivnih elemenata (potrebno je pomoću Matlaba ubacivati vrijednosti negativnih kapaciteta i induktiviteta u CST Microwave Studio, i to različite vrijednosti za pojedine frekvencije), simulacije struktura s antenama opterećenim aktivnim i negativnim reaktivnim elementima nisu izvršene. Te simulacije, te mjerjenja ukoliko simulacije pokažu željene rezultate, ostavljene su za buduće radove.

6. Zaključak

Za kraj, jedan kratak osvrt na sadržaj ovog rada. Nakon analize efekta EOT – a, utvrđeno je da su dosadašnje simulacije i mjerena pokazivale taj efekt na visokim frekvencijama (par GHz), što je previsoko za izbor radne frekvencije naše strukture, jer nismo na raspolaganju imali negativne kondenzatore sa radnim frekvencijskim područjem na tako visokim frekvencijama. Stoga je bilo potrebno pokušati ostvariti efekt EOT – a na nešto nižim frekvencijama (dvjestotinjak MHz).

Nakon što smo uspjeli u tom naumu, trebalo je proračunati reaktivne impedancije unipola i petlji koje su planirane za postavljanje unutar otvora pregrade strukture i samu reaktivnu vrijednost (kapacitet ili induktivitet) antene, te proračunati vrijednosti kompenzirajućih elemenata s ciljem postizanja rezonantnog ponašanja.

Tada su te antene, sada opterećene s kompenzirajućim reaktivnim elementima, stavljene unutar strukture, te su strukture odsimulirane. Rezultati simulacija su ukazali na obogaćeni prijenos elektromagnetske energije na radnoj frekvenciji, odnosno pokazano je da je postignut efekt subvalnog tuneliranja elektromagnetske energije.

Iako taj efekt zasad nije jako izražen, on je postignut, što znači da se isplati nastaviti istraživanje u tom smjeru. Nadam se da će u nekim budućim radovima biti opisani postignuti izraženiji efekti subvalnog tuneliranja elektromagnetske energije, da će se izvesti i simulacije sa antenama opterećenim aktivnim ne – Fosterovim ENZ metamaterijalima (negativnim kondenzatorom i negativnom zavojnicom), te da ovo istraživanje neće stati samo na simulacijama, već da će se takve strukture konstruirati i da će se nad njima vršiti stvarna mjerena.

Petar Kolar

7. Literatura

1. Grupa autora (uredili Nader Engheta i Richard W. Ziolkowski): Electromagnetic Metamaterials: Physics and Engineering Explorations, John Wiley and IEEE, U.S.A., 2006.
2. Zlatko Smrkić: Mikrovalna Elektronika, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
3. Ervin Zentner: Antene i radiosustavi, Graphis, Zagreb, 2001.
4. Silvio Hrabar, Igor Krois, Ivan Bonić, Aleksandar Kiričenko, Eduardo Ugarte Muñoz: Broadband Epsilon-Near-Zero (ENZ) and Mu-Near-Zero (MNZ) Active Metamaterial, Final report for contract FA8655-10-1-3030, FER, Zagreb, 2011.
5. Levent Sahin, Koray Aydin, Gonul Turhan Sayan, Ekmel Ozbay: Enhanced transmission of electromagnetic waves through split-ring resonator-shaped apertures, Journal of Nanophotonics, paper 11010SSRR, 2011.
6. Ivan Bonić: Širokopojasni elektromagnetski metamaterijali bazirani na prijenosnim linijama s ne-Fosterovim inkruzijama,
http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/KDI_Ivan_Bonic.pdf
7. Antenna-Theory.com: Small Loop Antenna,
<http://www.antenna-theory.com/antennas/smallLoop.php>
8. Prof. dr. sc. Silvio Hrabar: Negativan svijet metamaterijala ili kako je dvoznačnost kvadratnog korijena okrenula elektromagnetizam naglavačke,
http://www.matematika.hr/_download/repository/PMF-2011-FINAL3_%5BCompatibility_Mode%5D.pdf

8. Sažetak

Metamaterijali su umjetno stvorene strukture kojima se mogu postići elektromagnetska svojstva kakva prirodni materijali nemaju. Praktično gledano, metamaterijali su „simbioza“ plazmolikih struktura kod kojih se ϵ_r mijenja po Drudeovom disperzijskom modelu i struktura sa SRR - ovima kod kojih se μ_r mijenja po Lorentzovom disperzijskom modelu.

Efekt EOT – a je fenomen kod kojeg dolazi do obogaćenog prijenosa elektromagnetskog vala kroz otvore puno manje od valne duljine incidentnog vala.

Aktivni metamaterijali su metamaterijali za koje ne vrijedi Fosterov teorem o reaktancijama, a njihova glavna prednost u odnosu na pasivne metamaterijale jest širi frekvencijski pojas i smanjeni gubici. Izvode se pomoću negativnih pretvornika impedancije (NIC); sklopova koji u sebi sadrže pozitivnu povratnu vezu. Zbog pozitivne povratne veze aktivni metamaterijali su vrlo osjetljivi na neželjene pomake u fazi i parazitne kapacitete i induktivitete.

Studije su pokazale da kratki dipoli opterećeni negativnim kapacitetom pokazuju ENG svojstva, te da male petlje opterećene negativnim induktivitetom pokazuju MNG svojstva. Kada bi se metamaterijali realizirali pomoću ovakvih antena, širina njihovog frekvencijskog pojasa bi ovisila jedino o širini frekvencijskog pojasa aktivnih elemenata (uz uvjet da ukupni reaktivni otpor mora biti pozitivan).

Konstruirana je struktura u koju su ubačeni ili unipol opterećen kompenzirajućim induktivitetom ili petlja opterećena kompenzirajućim kapacitetom. Rezultati simulacije ukazuju na postojanje efekta EOT – a.

Prilikom simuliranja su primijećeni neuobičajenu efekti prijenosa, a njihovo shvaćanje zahtjeva daljnja istraživanja.

Naslov rada: Subvalno tuneliranje elektromagnetske energije temeljeno na aktivnom ne-Fosterovom ENZ metamaterijalu

Ključne riječi: metamaterijali, EOT, pasivno, aktivno, negativno, NIC, širokopojasnost, ENG, MNG, unipol, dipol, petlja, Foster, ne-Fosterovi, kompenzirajući, reaktivni

9. Summary

Metamaterials are artificial structures, engineered to provide unusual electromagnetic properties not found in naturally occurring materials. Metamaterials basically are "symbiotic" structures comprised of thin wire plasma-like structures (whose ϵ_r changes by Drude's dispersion model) and SRR (split-ring resonator) based structures (whose μ_r changes by Lorentz' dispersion model).

EOT effect (extraordinary optical transmission) is a phenomenon that shows enhanced transmission through subwavelength apertures.

Active metamaterials are metamaterials that cannot be described with Foster's reactance theorem. Their main advantages are broader bandwidth and smaller losses than in passive metamaterials. Active metamaterials can be achieved by NIC (negative impedance converter) circuits. Due to the internal construction with positive feedback, all NIC circuits are extremely sensitive to unwanted phase shifts and parasitic capacitances and inductances.

Previous studies have shown analytically that a loading of a short dipole with a negative capacitance should lead to the broadband dispersionless ENG behavior. Similarly, the loading of a small loop with a negative inductance should lead to the broadband dispersionless MNG behavior. In this case, the bandwidth would be limited only by the bandwidth of realized non-Foster element (but only if total reactant impedance would stay positive!).

The structure has been constructed and loaded with antennas with compensated reactant impedance. The results of simulations show the existence of the EOT effect.

Some unusual transmission effects have been noticed during our simulations. In order to find out their cause, we will continue with further researching.

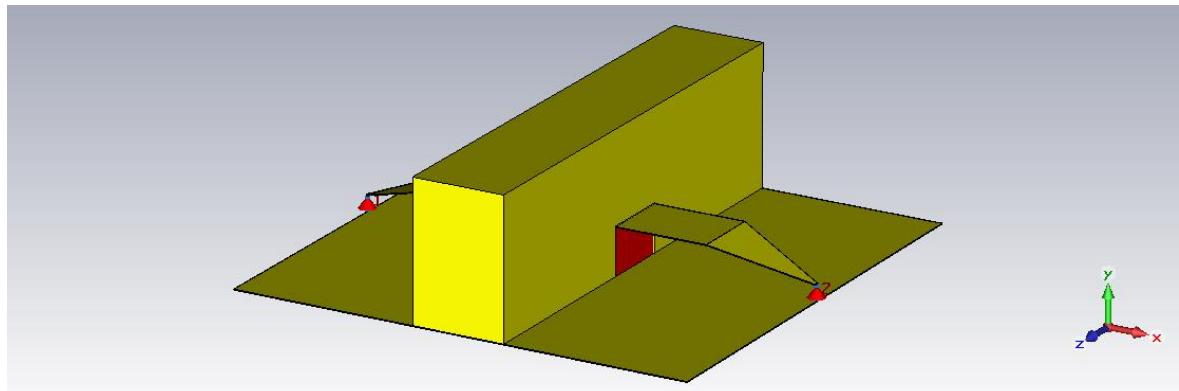
The title: Subwavelength Tunneling of EM Energy based on Active Non-Foster ENZ Metamaterial

Key words: metamaterials, EOT, passive, active, negative, NIC, broadband, ENG, MNG, unipole, dipole, loop, Foster, non-Foster, compensating, reactive

Prilog 1: Neuobičajeni efekti prijenosa primijećeni kod simulacija

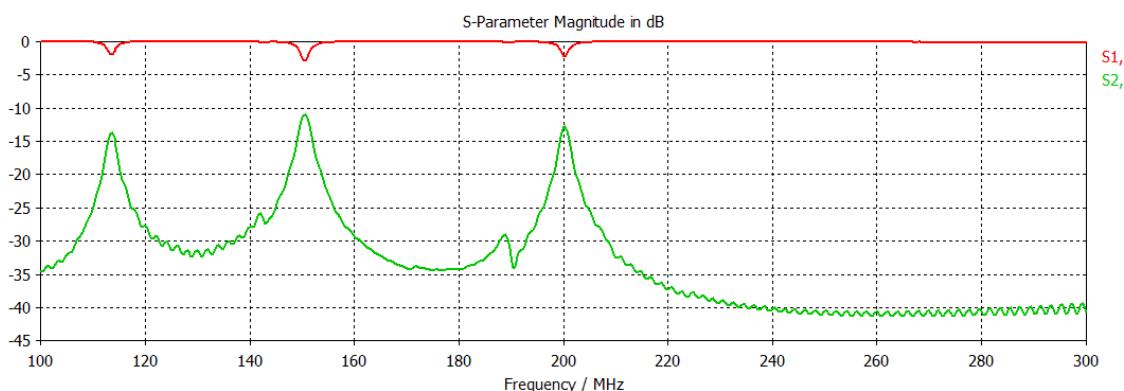
Želeći se uvjeriti da je poboljšani prijenos unutar analizirane strukture posljedica efekta tuneliranja, napravljeno je nekoliko simulacija u kojima je otvor u pregradi, predviđen za antene, popunjen umjetnim (isprogramiranim) savršenim materijalom kod kojeg se permitivnost i permeabilnost mijenjaju po Drudeovom disperzijskom modelu.

Vrijednosti su namještene tako da ili permitivnost ili permeabilnost iznose 0 na radnoj frekvenciji od 230 MHz, ali samo u smjeru u kojem se treba širiti željeno polje. Dakle, umjesto unipola je stavljen materijal čija permitivnost iznosi 0 u smjeru širenja električnog polja (x smjer), dok je umjesto petlje stavljen materijal čija permeabilnost iznosi 0 u smjeru širenja magnetskog polja (z smjer) (slika P1.1.).



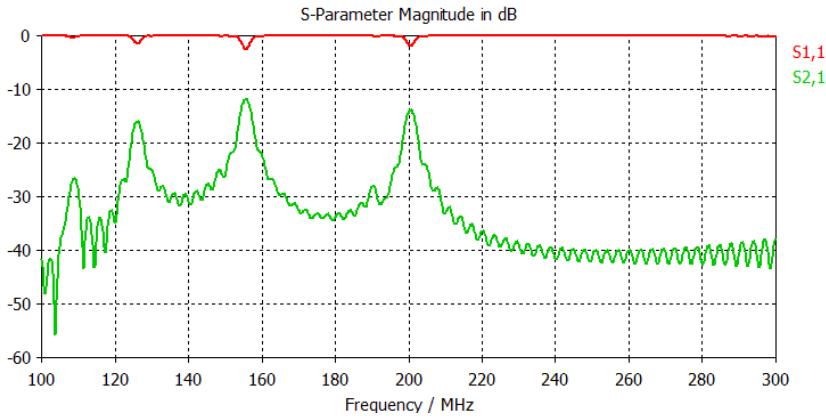
Slika P1.1. Struktura i orientacija koordinatnih osi u odnosu na strukturu (naša simulacija)

Na rezultatima simulacija su, osim željenih obogaćenih prijenosa postignutih efektom tuneliranja, vidljivi neobjašnjivi obogaćeni prijenosi (slika P1.2.)

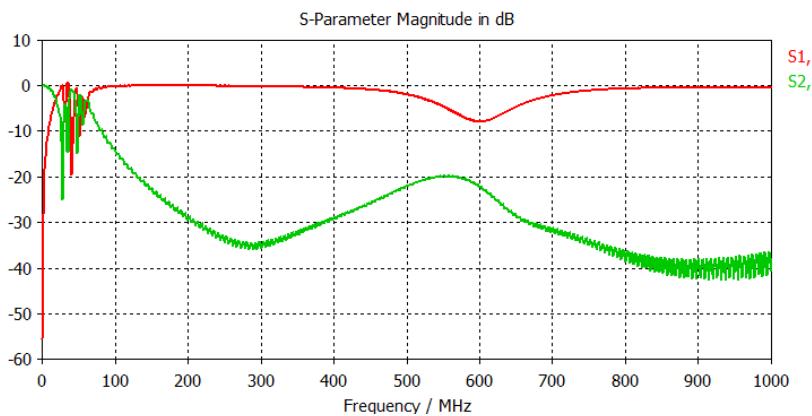


Slika P1.2. Struktura s materijalom kod kojeg je permeabilnost 0 (nadomještena petlja)
(naša simulacija)

Pošto nismo znali kako interpretirati dodatne modove širenja, osim eventualne pogreške kod programskog računanja, smanjeni su materijali, tako da „lebde“ unutar otvora. Međutim, rezultati pokazuju isti efekt (slike P1.3. i P1.4.):

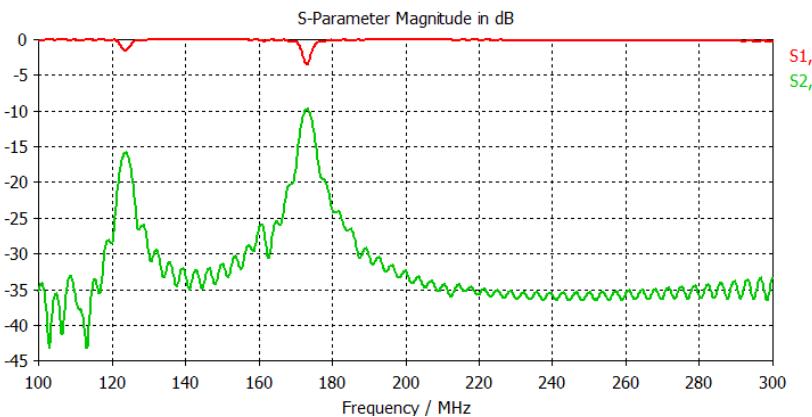


Slika P1.3. Struktura s materijalom kod kojeg je permeabilnost 0 (nadomještena petlja) (naša simulacija)

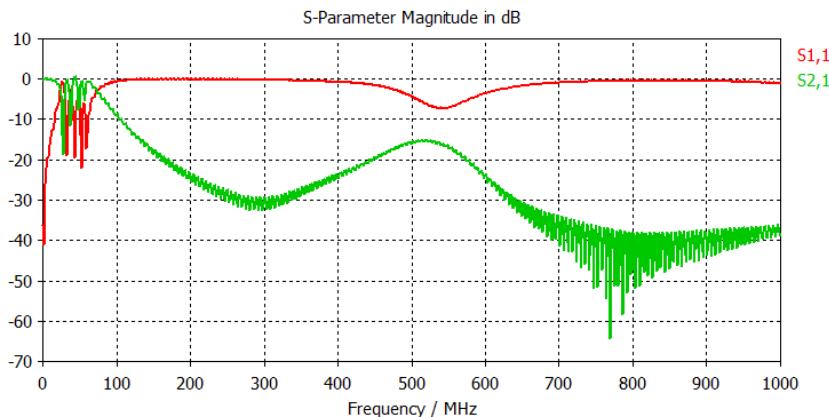


Slika P1.4. Struktura s materijalom kod kojeg je permitivnost 0 (nadomješten unipol) (potrebno promatrati efekt na niskim frekvencijama – ispod 100 MHz) (naša simulacija)

Da bismo bili sigurni da taj efekt nije posljedica pogreške, smanjena je debljina pregrade, ali rezultati i dalje pokazuju iste neobjašnjive prijenose (slike P1.5. i P1.6.):

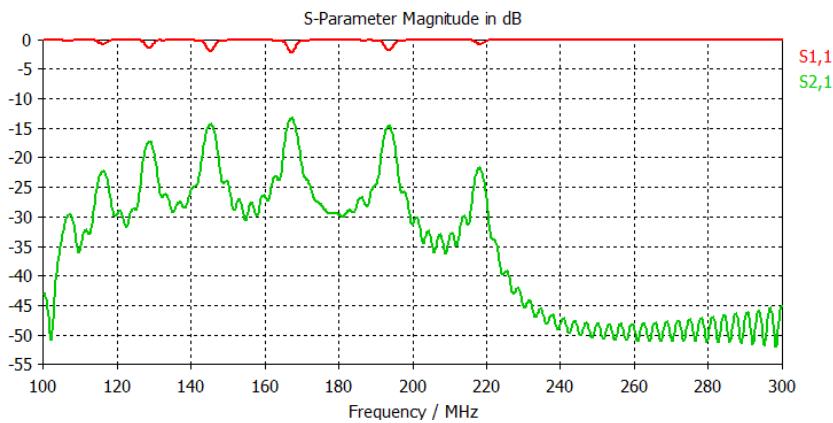


Slika P1.5. Struktura s tanjom pregradom i materijalom koji nadomješta petlju (naša simulacija)

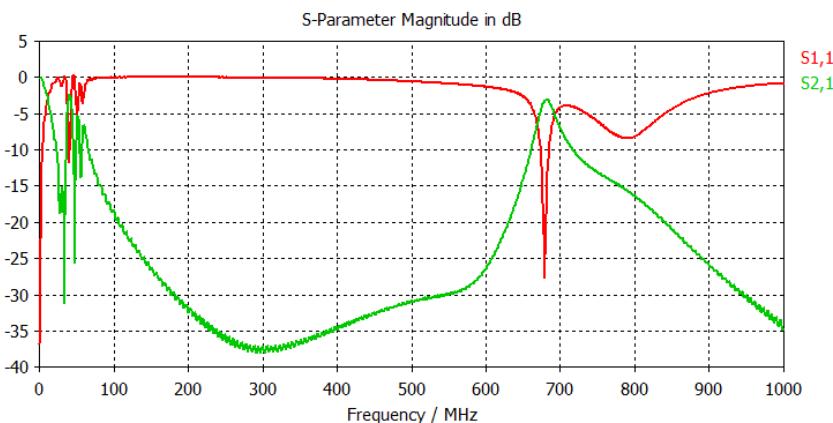


Slika P1.6. Struktura s tanjom pregradom i materijalom koji nadomješta unipol (naša simulacija)

Na kraju je i povećana širina pregrade, ali rezultati i dalje pokazuju isti efekt (slike P1.7. i P1.8.):



Slika P1.7. Struktura s debljom pregradom i materijalom koji nadomješta petlju (naša simulacija)



Slika P1.8. Struktura s debljom pregradom i materijalom koji nadomješta unipol (naša simulacija)

Nakon izvedenih simulacija, nameće se zaključak da je greška (ako je ima) negdje drugdje. Drugo objašnjenje je pojava nekog novog fenomena kojega zasad nismo shvatili, a njegovo shvaćanje zahtjeva daljnja istraživanja.