

Karakteristike materijala za štampane antene u opsegu 65-110 GHz

Nikola Bošković i Miloš Radovanović

Apstrakt—Izbor materijala igra presudnu ulogu u karakteristikama štampanih antena. Ovo je naročito kritično na W- opsegu, gde je mehanizam gubitaka značajno izmenjen, zbog čega veoma mali broj standardnih dielektrika može biti korišćen. Radi suzbijanja parazitnih modova i površinskih talasa, debljina dielektrika mora biti veoma mala u odnosu na učestanost, što dovodi do toga da efekat površinske hrapavosti bakarne provodne folije ima dominantan uticaj na gubitke. U ovom radu je prikazan značaj izbora odgovarajuće folije kao i njen uticaj. Zaključci su praćeni simulacijama i merenjima.

Ključne reči—Balansni mikrostrip, gubici u materijalu, štampana tehnologija, štampane antene.

I. UVOD

Štampane antene su klasa antena koje se tipično sastoji od provodnika koji je najčešće u vidu tanke bakarne folije, i dielektrika na kome se provodna folija nalazi. Sama antena se može sastojati od više slojeva, kako dielektrika tako i provodnika. Neke od primarnih karakteristika štampanih antena su mala cena, mogućnost masovne proizvodnje, lako formiranje antenskih nizova u više prostornih dimenzija. Sa antenskim nizovima moguće je postići veliki dobitak, i proizvoljnu širinu glavnog snopa zračenja.

Izbor materijala na kome će biti napravljena antena ima presudan uticaj na fundamentalne parametre antene: radni opseg, učestanost, dobitak, dimenzije. Veliki uticaj materijala je svakako na efikasnost antene, tj. gubitke. Gubici zavise od mnogih faktora, i menjaju se sa frekvencijom tako da je željena radna učestanost početni uslov za izbor odgovarajućeg materijala.

Gubici u mikrostripu mogu tipično biti podeljeni na: gubitke u dielektriku, gubitke u metalu, gubitke usled neželjenog zračenja i gubitke usled procesa izrade (tolerancija). Gubici usled neželjenog zračenja mogu biti izuzetno kompleksni, jer mogu poticati od više različitih izvora: parazitni modovi, površinski talasi, zračenje od strane napojne mreže, itd. Za antenu ovo može biti naročito problematično, jer pored smanjenja efikasnosti može prilično degradirati dijagram zračenja antene. Da bi se minimizovalo neželjeno zračenje opšti princip je korišćenje tankog dielektrika u odnosu na radnu učestanost i uskih vodova. U tankim dielektricima sa malim gubicima izraženim preko tanđ koji je definisan kao odnos imaginarnog i realnog dela

kompleksne permitivnosti (1), gubici u metalu postaju dominantni.

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r = \varepsilon'_r(1 - \tan\delta) \quad (1)$$

Na učestanostima oko 2.4 GHz i niže pretežno se koristi FR-4, zbog veoma niske cene i lake dostupnosti, na višim učestanostima koristi se znatno skuplji dielektrici poput Rogers 3000, 4000 ili 5000 serije. Na nižim učestanostima gubici u dielektriku su dominantni, pa se zbog toga gubici u dielektriku uzimaju kao primaran parametar za računanje gubitaka. Kod štampanih antena dielektrik pored toga što razdvaja provodne delove antene, se ponaša kao nosač provodnika. Na GSM opsegu se mogu koristiti znatno deblje folije od tipičnih 17 mikrona. U ovom slučaju kao dielektrik se može koristiti vazduh, jer se debela folija neće deformisati pod svojom težinom. Vazduh ima dielektrične osobine slične vakuumu. Sa tanjom folijom kao dielektrične podloge moguće je koristiti penaste materijale poput Rohacell-a koji imaju malu dielektričnu konstantu $\varepsilon_r \approx 1.05$ ($\tan\delta \approx 0.0002$).

Debljina folije koja će biti korišćena je određena na osnovu skin efekta, po kome će se struja sa rastom učestanosti koncentrisati u veoma tankom sloju po površini provodnika, [1]. Ovo je osnovni razlog zašto je moguće koristiti veoma tanke folije kao provodnike na visokim učestanostima. Drugi veoma bitan razlog za korišćenje tankih folija na visokim učestanostima je površinska hrapavost folije, koja je ovde primaran uzrok gubitaka. Gubici u metalu tj. foliji postaju veoma izraženi i za dielektrik sa niskim tanđ postaju dominantni. Deblja folija će tipično imati veću hrapavost.

Dielektrična konstanta kao elementarna osobina dielektrika, primarno utiče na dimenzije antene. Za veći ε_r dimenzije antene će biti manje, ali takođe efekat površinskih talasa i neželjenog zračenja biće znatno više izražen. Vakuum ili vazduh bi za mnoge slučajeve bio idealan dielektrik. ε_r je disperzivan parametar. Za komercijalne dielektrike ε_r je tipično data kao prosečna numerička vrednost na 10 GHz, dobijena sa serije uzoraka korišćenjem određene metode, [2].

Kod mikrostripa linije električnog polja antene putuju između dva medijuma: dielektrika i vazduha. Za analizu se koristi koncept efektivnog dielektrika dielektrične konstante ε_{eff} . Po tome umesto nehomogene sredine uzima se da linije električnog polja prostiru kroz ekvivalentni homogeni dielektrik. ε_{eff} ima ogromni značaj, jer se može direktno odrediti merenjima, a relacija (2) između ε_{eff} i ε_r je dobro poznata, [1],

Nikola Bošković – Institut za fiziku, Univerzitet u Beogradu, Pregrevica 118, 11080 Zemun, Srbija (e-mail: nikolab@ipb.ac.rs).

Miloš Radovanović – Institut za fiziku, Univerzitet u Beogradu, Pregrevica 118, 11080 Zemun, Srbija (e-mail: rmlilos@ipb.ac.rs).

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \quad (2)$$

gde su h i w , debljina dielektrika i širina mikrostrip voda. Postoje još preciznije relacije koje uzimaju u obzir debljinu bakarne folije. Svaka relacije ima određenu grešku kao i uslove pod kojima je primenjiva. U ovom radu precizna korelacija između ε_{eff} i ε_r je određena na osnovu simulacionog modela.

Površinska hrapavost folije ne utiče samo na povećanje gubitaka u metalu sa rastom učestanosti, već takođe utiče na promenu faze prostiranja talasa, tj. utiče na promenu ε_{eff} , tako da na osnovu toga dva identična dielektrika sa različitim profilima bakarne folije mogu imati dosta drugačiju ε_{eff} , [3].

U ovom radu je prikazana širokopojasna analiza dielektrika Rogers 3003, debljine $h = 0.127$ mm, $\tan\delta = 0.001$, $\varepsilon_r \approx 3$.

II. ANALIZA I MERENJA

Jedan od najbitnijih faktora za dobijanje prototipa štampane antene koji se slaže sa proračunima i simulacijama je korišćenje tačnih parametara materijala. Ovo u praksi znači da korišćenjem parametara definisanih od strane proizvođača koji u većoj ili manjoj meri mogu odstupati od konkretnog primerka dielektrika, u startu unosi određenu grešku. Takođe različite metode za merenje dielektrične konstante neće nužno dati identične rezultate, [2]. Dobra praksa je da se pre izrade štampane antene izvrši procena dielektrične konstante na opsegu od interesa korišćenjem identičnog proizvodnog procesa kao za izradu same antene.

Za procenu dielektrične konstante u ovom radu korišćena je metoda faznih razlika, [4]. Ova metoda podrazumeva korišćenje vodova različitih dužina i poznatom razlikom u dužinama. Na osnovu merenja S-parametara oba voda, dobija se korelacija (3), između ε_{eff} , električne (ΔEL) i fizičke dužine (Δl) na posmatranoj frekvenciji f kao

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \left(\frac{\Delta EL \cdot c}{360^\circ \cdot f \cdot \Delta l} \right)^2 \quad (3)$$

gde je c brzina svetlosti u vakuumu. Fizičke dimenzije korišćenih vodova su: širina voda $w = 0.2$ mm, dužine vodova su 20 mm i 30 mm, tj. razlika je $\Delta l = 10$ mm. Za merenje je korišćen Anritsu VectorStar ME7838A VNA. Meren je opseg od 65-110 GHz, sa korakom od 10 MHz. Konektori su kalibrisani sa Triple-Offset-Short-Through (SSST) kalibracijom. Preciznost izrade vodova je oko 0.01 mm. Dimenzije vodova su merene pod mikroskopom.

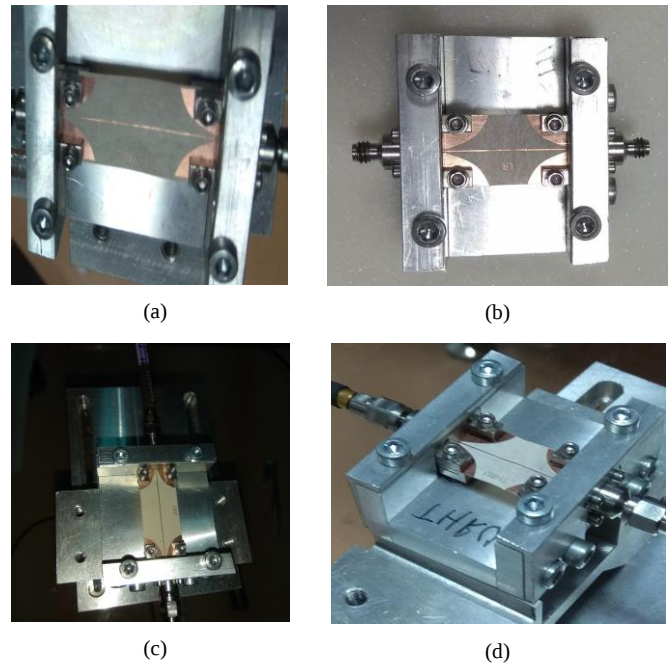
Velika prednost ove metode je što se vrlo lako može dobiti širokopojasna karakteristika ε_r . Tačnost ove metode veoma zavisi od tačnosti izmerene razlike faza od datih vodova. Potrebno je koristiti veoma kvalitetne širokopojasne konektore, bez lemljenja. Ovde su korišćeni Southwest Microwave 1 mm koaksijalni konektori za W-opseg, deklarirani za rad od 0 do 110 GHz.



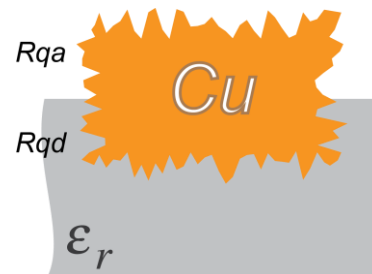
Sl. 1. Balasni mikrostrip vod od bakarne folije na dielektriku.

U datom slučaju vršena su merenja i procena za dva različita slučaja bakarne folije. Za slučaj ED (elektrodeponovanog) bakra i za slučaj rolovanog bakarne folije. Od interesa je utvrđivanje parametara za balasni mikrostrip [5], Sl. 1. Kao što se vidi za razliku od mikrostripa kod koga je jedan vod (masa) znatno širi od drugog voda, kod balasnog mikrostripa oba voda su iste širine. Ovo u praksi znači da će balasni vod biti delikatniji za fizičku obradu, jer oba voda moraju da se fizički obrade na odgovarajuće dimenzije.

Aparatura za merenje je prikazana na Sl. 2. Kako je dielektrik veoma tanak, napravljeni su metalni nosači koji drže dielektrik i konektore tokom merenja.

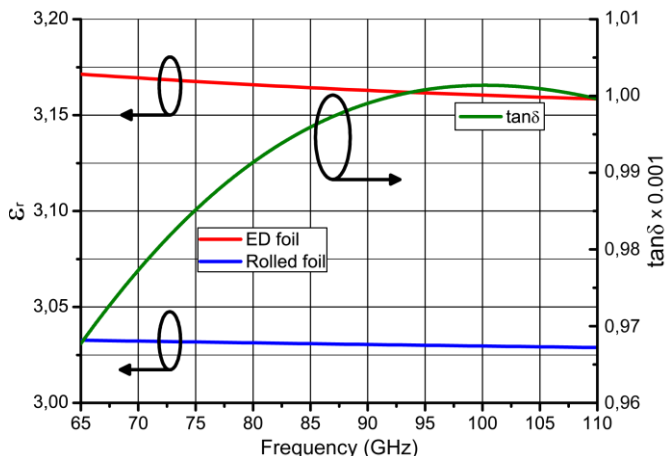


Sl. 2. Vodovi različitih dužina na aparaturi za merenje S-parametara. Modeli sa rolovanom folijom (a-b) i ED folijom (c-d). Duži vodovi su dati pod (a) i (c).



Sl. 3. Prikaz poprečnog preseka bakarnog voda uronjenog u dielektrik sa prikazanom hrapavosti između vazduha i folije ($Rqqa$) i hrapavosti između folije i dielektrika ($Rqdd$).

Hrapavost se tipično predstavlja preko srednjeg kvadratnog korena hrapavosti, R_q [6]. Za slučaj bakarne folije za dielektrike daju se dve, tipično različite vrednosti. Jedna za površinu okrenutu ka vazduhu (R_{qa}), a druga za površinu okrenutu ka dielektriku (R_{qd}), Sl. 3. R_{qd} će uglavnom imati značajno veću vrednost i za neke slučajeve se čak veštački uvećava kako bi se omogućila što čvršća veza između folije i dielektrika. U ovom slučaju za rolovanu foliju vrednosti R_{qd} i R_{qa} su $0.4 \mu\text{m}$ i $0.3 \mu\text{m}$, dok za ED vrednosti su redom $2 \mu\text{m}$ i $0.4 \mu\text{m}$. Simulirana širokopojasna karakteristika $\tan\delta$ je dobijena na osnovu Debajevog modela višeg reda [7]. U korišćenom modelu uticaj $\tan\delta$ je značajano manji u odnosu na uticaj gubitaka u metalu.



Sl. 4. Vrednosti ϵ_r dobijene na osnovu merenja i aproksimacija $\tan\delta$.

Sa Sl. 4 se vidi da na osnovu merenja ϵ_{eff} odgovarajuće vrednosti ϵ_r se značajno razlikuju, iako je u pitanju isti dielektrik. Takođe se vidi da za slučaj rolované bakarne folije dielektrična konstanta je veoma slična deklarisanim vrednostima na 10 GHz, gde je uticaj hrapavosti daleko manji. Sa grubljim profilima bakarne folije razlika postaje značajna [3]. Kako su grublji profili daleko jeftiniji njihova upotreba je znatno veća. Samim tim je jasno da u većini slučajeva deklarirani parametri dielektrika neće dati realističan elektromagnetni model, već vrednosti dobijene na ovaj način treba da budu ulazni parametri odgovarajućeg modela.

Druga velika razlika će biti naravno u pogledu gubitaka. Totalni gubici po jedinici dužine se mogu dobiti takođe merenjem prototipa sa Sl. 2, iz vrednosti magnitude S_{12} . Za uračunavanje gubitka u metalu često se koristi koncept efektivne provodnosti metala σ_{eff} , po kome se umesto 58 MS/m za provodnost bakra, uzima manja vrednost dok gubici u modelu ne postanu jednaki stvarnim gubicima. Ovaj model je odličan za brze proračune, međutim on je veoma uskopojasan. Postoji veliki broj znatno naprednijih modela, od kojih većina zahteva veliki broj parametara za kvalitetnu procenu.

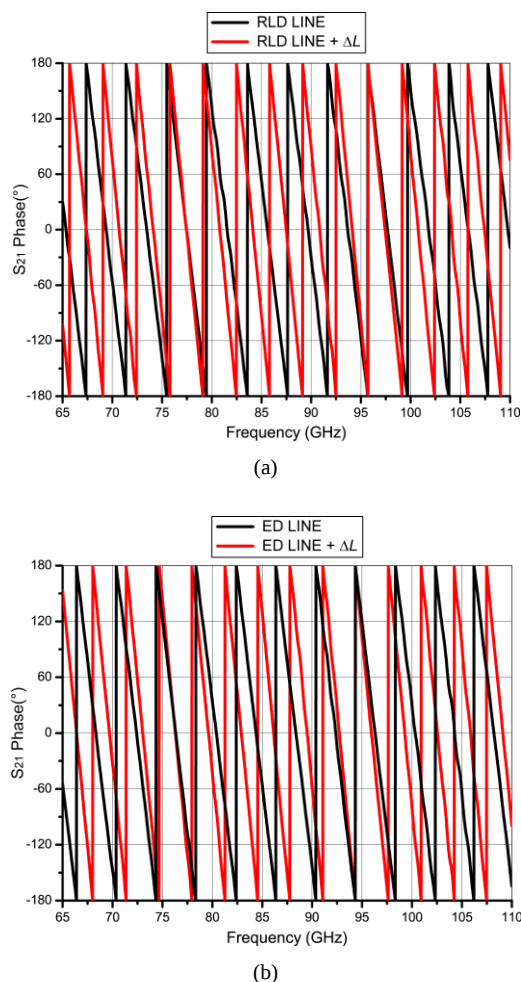
Uporedo sa empirijskim razvijani su i simulacioni 3D modeli. Ono što je posebno problematično kod ovog pristupa je što zbog veoma malih dimenzija hrapavosti, čak i veoma mali modeli dimenzija 1 mm bi imali ogroman broj nepoznatih. Takođe i postavka samih modela se često zasniva na posmatranju površine kao fraktalne strukture. U praksi

hrapavost je neuređena tj. svaki pik ili dolina imaće nešto drugačiju vrednost. Za primenu u polju mikrotalasne tehnike potreban je model, koji može na osnovu dostupnih parametara, da precizno proceni uticaj hrapavosti na prostiranje elektromagnetskih talasa.

Posebno zgodan je gradijentni model [8], po kome je moguće dobiti širokopojasnu procenu uticaja hrapavosti samo na osnovu R_q . Osnova ovog modela je da se umesto konstante vrednosti σ_{eff} , uzima vrednost dobijena na osnovu statističke kumulativne funkcije raspodele kao (4)

$$\sigma(x) = \sigma_{\text{Cu}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{u^2}{2R_q^2}\right) du \quad (4)$$

σ se posmatra kao funkcija rastojanja x u pravcu normalnom na površinu gde se nalazi bakarna folija. U ovom opsegu funkcija može imati sve moguće vrednosti od nule do provodnosti bakra bez hrapavosti σ_{Cu} .

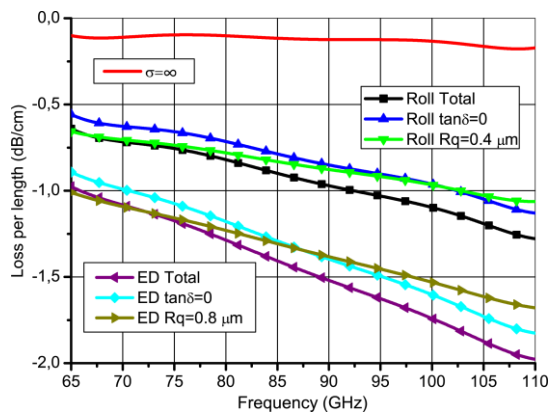


Sl. 5. (a) Merena faza kraćeg (crno) i dužeg voda (crveno) za slučaj rolované bakarne folije, (b) merena faza kraćeg i dužeg voda za slučaj ED folije.

Merene fazne karakteristike vodova za različite tipove folija je data na Sl. 5, $\Delta L = 10 \text{ mm}$.

Procena doprinosa gubitaka od dielektrika je dobijena zamenom modela bakarne folije sa idealnim električnim

provodnikom $\sigma = \infty$, Sl. 6. Dok se uticaj gubitaka u metalu može dobiti uzimanjem da je $\tan\delta = 0$. Po ovome modelu sa Sl. 6 se vidi da je uticaj gubitaka u dielektriku daleko manji nego u metalu. Vidi se da gradijentni model može dosta dobro da isprati promenu gubitaka sa frekvencijom. Očekivano, gubici su znatno veći za ED bakarnu foliju.



Sl. 6. Mereni totalni gubici za slučaj sa rolovano bakarnom folijom (Roll Total) i ED folijom (ED total), procena uticaja gubitaka u metalu i dielektriku za date folije, i poređenje sa odgovarajućim gradijentnim modelom.

III. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan je značaj merenja parametara materijala pre izrade samog prototipa antene. Deklarisani parametri materijala na 10 GHz nisu pouzdani za više učestanosti, naročito u pogledu promena karakteristika samog materijala na velikom opsegu učestanosti. Za tačan model potrebno je proceniti parametre materijala preko merenja u opsegu od interesa.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za finansiranje istraživanja.

LITERATURA

- [1] D. M. Pozar, "Microwave Engineering", 4th ed., Wiley, 2011.
- [2] J. Coonrod and A. F. Horn III, "Understanding Dielectric Constant for Microwave PCB Materials," *High Frequency Electronics*, July 2011.
- [3] A. F. Horn III *et al.*, "Effect of conductor profile on the insertion loss, phase constant, and dispersion in thin high frequency transmission lines", *DesignCon 2010*, Santa Clara, February 2010.
- [4] N. K. Das, S. M. Voda and D. M. Pozar, "Two Methods for the Measurement of Substrate Dielectric Constant," in *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 35, no. 7, pp. 636-642, Jul 1987.
- [5] N. Boskovic *et al.*, "Printed Frequency Scanning Antenna Arrays With Enhanced Frequency Sensitivity and Sidelobe Suppression," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 4, pp. 1757-1764, April 2017.
- [6] Rogers Corporation, "Copper Foils for High Frequency Materials", *Data Sheet*, 2015.
- [7] F. Maradei, H. Ke and T. H. Hubing, "Full-Wave Model of Frequency-Dispersive Media With Debye Dispersion Relation by Circuit-Oriented FEM," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 2, pp. 312-319, May 2009.
- [8] G. Gold and K. Helmreich, "A physical model for skin effect in rough surfaces," *2012 42nd European Microwave Conference*, Amsterdam, 2012, pp. 1011-1014.

ABSTRACT

Choice of the material play crucial role in the printed antenna design. This is especially critical on the W-band, where the loss mechanism is significantly enhanced, which is why a very small number of standard dielectrics can be used. To suppress parasite modes and surface waves, dielectric thickness must be very small relative to the frequency. Here, the effect of surface roughness of the copper conductor foil has a dominant impact on losses. This paper presents the importance of choosing an appropriate foil and following consequences. The conclusions are accompanied by simulations and measurements.

Material Characteristics for Printed Antenna Applications at 65-110 GHz

Nikola Boskovic and Milos Radovanovic