Mr Aljoša Božiković,
potpukovnik, dipl. inž.

Rezultati istraživanja mogućnosti proizvodnje mikrovalnog dijela protivradarske glave

Uvod

Zadatak ovog izvorno znanstvenog istraživanja je bio realizirati odabrano rješenje mikrovalnog dijela protivradarske glave na osnovu rezultata datih u [1], koristeći profesionalne sklopove, te istražiti mogućnost proizvodnje odabranih sklopova. Za realizaciju je odabrano rješenje protivradarske glave s monoimpulsnim koordinatorom.

Pod mikrovalnim dijelom protivradarske glave u odabranom rješenju podrazumijevaju se četiri ulaza od antenskog sistema komparator, mješač, oscilator i međufrekventni izlazi. U ovom radu se razmatra samo komparator.

Izvršeno je mjerenje i analiza karakteristika širokopojasnog komparatora PN 2960-6025-00, i širokopojasnog hibrida 3 dB/180° PN 2031-6339-00 firme Omni Spectra.

Radi ispitivanja mogućnosti proizvodnje razvijen je uskopojasni hibrid 3 dB/180° za frekvencijski opseg od 8,4 do 9,6 GHz za formiranje komparatora. Za razvoj je odabran uskopojasni sklop zbog jednostavnijeg projektiranja i lakše realizacije. Za razvoj su korištene raspoložive metode CAD/CAM u mikrovalnoj tehnici (programi COMPACT i MCAP), te vlastiti razvijeni programi. Vrednovanje realiziranih sklopova izvršeno je mjerenjem odabranih karakteristika sklopova i njihovom uspored-

bom s karakteristikama profesionalnih sklopova. Za vrednovanje raspoložive tehnologije korištena je analiza efekata tolerancije realiziranih mikrotrakastih vodova.

Monoimpulсни komparator

Monoimpulсни komparator je mikrovalni sklop, koji ima zadatak da od signala sa četiri antene formira signale pomoću kojih se može odrediti položaj izvora mikrovalnog zračenja.

Monopulсни komparator se sastoji od tri ili četiri hibridna spreznika 3 dB/180°, koji su spojeni tako da daju tri izlazna signala. Ti signali su signal razlike u azimutnoj ravnini, signal razlike u ravnini elevacije, te signali sume u azimutnoj ravnini i ravnini elevacije. Kod komparatora sa četiri hibrida u formiranju signala razlike učestvuju sve četiri antene, a kod komparatora sa tri hibrida samo po dvije. Na taj način, komparator sa četiri hibrida ima osjetljivije karakteristike po kanalima razlike.

1. Monoimpulсни komparator PN 2960-6025-00

Prema podacima proizvođača Omni spectra, monoimpulсни komparator PN 2960-6025-00 je sastavljen od tri hibri-

dna sprežnika 3 dB/180° i radi u frekvencijskom opsegu 8,0—12,4 GHz.

Proizvođač za navedeni frekvencijski opseg daje slijedeće karakteristike:

kanal razlike:

- gubici 0,8 dB,
- odstupanje amplitude $\pm 0,5$ dB,
- odstupanje faze $\pm 6^\circ$,

Kanal sume:

- gubici 1,7 dB,
- odstupanje amplitude $\pm 0,9$ dB,
- odstupanje faze $\pm 7^\circ$.

Izolacija:

- minimum 15 dB.

Polazeći od namjene komparatora, dati podaci nisu dovoljni za procjenu valjanosti sklopa. Stoga je provedeno mjerenje osjetljivosti oba kanala razlike u ovisnosti o promjeni faze signala na ulazu sklopa. Mjerenje je izvedeno prema spoju na slici 1.

Sl: 1 Spoj za mjerenje osjetljivosti kanala razlike

Kako se nije mogla ostvariti istovremena kontrolirana promjena faze za sva četiri ulaza komparatora, provedena su dva mjerenja. U prvom mjerenju dovedeni su signali na ulaze A i B, a mjeren je signal na izlazu razlike $\nabla(A - B)$ u ovisnosti o promjeni faze

signala na ulazu, uz prilagođenje na ostalim prolazima. Promjena faze je ostvarena promjenom dužine voda u sekciji za mjerenje transmisije i refleksije HP 8743A. Drugo mjerenje je provedeno tako da su signali dovedeni na ulaze C i D, a mjeren je signal na izlazu razlike $\nabla(C - D)$ u ovisnosti o promjeni faze signala na ulazu, uz prilagođenje na ostalim prolazima. Mjerenje je provedeno na više diskretnih frekvencija iz radnog opsega za promjenu faze signala na ulazu od -180° do $+180^\circ$ [2].

Od komparatora se očekuje da za provedeno mjerenje na izlazima razlike ima veliku dinamiku signala. Iz rezultata se vidi da komparator ne daje željene rezultate, jer je dinamika neujednačena po frekvenciji i po izlazima. Tako, na primjer, na frekvenciji 8,5 GHz pri promjeni faze signala između -180° i 180° na ulazu A—B, signal na izlazu razlike $\nabla(A - B)$ je između 0 i -20 dB (dinamika 20 dB). Uz iste uvjete na ulazu C—D, na izlazu razlike $\nabla(C - D)$ signal je između -6 i -9 dB (dinamika 3 dB). Bolji rezultati, kako po dinamici, tako i po ujednačenosti izlaznog signala, pri datim uvjetima na ulazu, ima izlaz $\nabla(A - B)$ (dinamika od 25 dB na 11,5 GHz, do 8 dB na 12,5 GHz) od izlaza $\nabla(C - D)$ (maksimalna dinamika 4 dB na 10,5 i 11,5 GHz).

Dobijeni rezultati pokazuju da ovaj monopulzni komparator nema tražene karakteristike.

Cijena ovog komparatora je reda 2000 \$.

2. Hibridni sprežnik 3 dB/180° PN 2031-6339-00

Prema podacima proizvođača, hibridni sprežnik 3 dB/180° PN 2960-6025-00 radi u frekvencijskom opsegu 7,0—18,0 GHz. Za ovaj frekvencijski opseg proizvođač daje slijedeće podatke:

- odstupanje amplitude $\pm 0,6$ dB,
- unešeno slabljenje 1,2 dB,
- izolacija minimalno 12 dB,

— koeficijent stojnih valova (KSV) maksimalno 1,7,

— odstupanje faze $\pm 8^\circ$.

Na raspolaganju je bilo pet ovakvih hibridnih sprežnika. Prije sklapanja monoimpulsnog komparatora izmjerene su prenosne karakteristike svih pet hibridnih sprežnika [2]. Iz rezultata se može vidjeti da su karakteristike četiri hibridna sprežnika u granicama koje daje proizvođač, osim za sprežnik PN 2031-6339-00 [7], koji daje fazni zakret od 90° , umjesto 180° , što ga čini nepotrebljivim za formiranje monoimpulsnog komparatora.

Cijena jednog ovakvog hibridnog sprežnika je reda 500\$.

3. Monoimpulsni komparator od tri hibridna sprežnika 3 dB/180° PN 2031-6339-00

Od tri hibridna sprežnika 3 dB/180° PN 2031-6339-00 sastavljen je monoimpulsni komparator, na kojem je provedeno mjerenje osjetljivosti oba kanala razlike u ovisnosti o promjeni faze signala na ulazu sklopa prema spoju na slici 1. Proveden je isti postupak kao i pri mjerenju monoimpulsnog komparatora PN 2960-6025-00. Mjerenja su provedena na nizu diskretnih frekvencija u opsegu od 7 do 12 GHz za promjenu faze signala na ulazu od -180° do 180° [2].

Iz rezultata se vidi da je dinamika ovog komparatora ujednačena, kako po frekvenciji, tako i po izlazima. Može se reći da je dinamika po oba kanala i skoro u cijelom frekvencijskom opsegu reda 30 dB, što znači da ovakav komparator ima dobre karakteristike.

4. Monoimpulsni komparator sa četiri hibridna sprežnika 3 dB/180° PN 2031-6339-00

Od četiri hibridna sprežnika 3 dB/180° PN 2031-6339-00 sastavljen je monoimpulsni komparator. Proveden je isti postupak kao i pri mjerenju prethodnih monoimpulsnih komparatora.

Rezultati pokazuju da je dinamika po oba kanala i skoro u cijelom frekvencijskom opsegu reda 30 dB, što znači da ovakav komparator ima dobre karakteristike.

Projektovanje hibridnog prstena 3 dB/180°

Hibridni prsten je element za dijeljenje snage koji ima osobine da su mu dva izlaza međusobno izolirana, a ulaz prilagođen, dok je četvrti izlaz zaključen karakterističnom, impedancijom. Konfiguracija hibridnog prstena je prikazana na slici 2.

Sl. 2 Konfiguracija hibridnog prstena 3 dB/180°

Karakteristične admitancije četiri prolaza su Y_0 . Promjenljive admitancije Y_1 i Y_2 predstavljaju karakteristične admitancije dva voda prstena. One određuju stupanj sprege izlaznih prolaza i uvjete prilagođenja ulaza, tako da je odnos signala na izlazima proporcionalan odnosu karakterističnih admitancija (ili impedancija) prenosnih vodova koji čine prsten [3].

Da bi hibridni prsten podjednako dijelio signale s jednog ulaza na dva izlaza, potreban je uvjet [4, 5] $Z_1 = Z_2 = 70,7107 \Omega$ ako je $Z_0 = 50 \Omega$.

Za projektiranje hibridnog prstena odabrana je tehnika mikrotrakastih vodova na laminatu Cu Clad K-6098 tip Lx-1001, koji ima dielektričnu konstantu 2,48, visinu dielektrika 0,256 mm i debljinu vodiča 0,03556 mm. Na osnovu

zahtjeva, koji definiraju osnovne parametre hibridnog prstena i parametara odabranog laminata, izvršena je analiza projektiranog sklopa pomoću računarskog programa COMPACT [6]. Rezultati su dati u [2]. Na osnovu rezultata može se zaključiti:

a) u razmatranom frekvencijskom opsegu prilagođenje na svakom od prolaza je dobro; $|S_{11}|$ i $|S_{22}|$ je između 0,0 i 0,03;

b) prenos sa ulaza na dva susjedna izlaza je u razmatranom frekvencijskom opsegu od $-2,98$ do $-3,05$ dB, uz izolaciju na četvrtom prolazu od -32 do -166 dB;

c) fazni pomak izlaznih signala pri napajanju prolaza sume je 0° , a pri napajanju prolaza razlike je 180° .

Uticaj diskontinuiteta mikrotrake strukture je razmotren analizom hibridnog prstena pomoću računarskog programa MCAP [7] u frekvencijskom opsegu 8,6 do 9,4 GHz [2]. Iz rezultata se može zaključiti da u slučaju kada se uticaj diskontinuiteta razmatra:

a) u razmatranom frekvencijskom opsegu prilagođenje prolaza je dobro; KSV se kreće od 1,01296 na centralnoj frekvenciji do 1,05159 na krajevima opsega;

b) prenos sa ulaza na dva susjedna izlaza kreće se između $-3,07$ i $-2,95$ dB;

c) fazni pomak između izlaznih signala pri napajanju prolaza sume je reda 0° , a pri napajanju prolaza razlike je reda 180° .

Na osnovu ovih rezultata se može reći da, u ovom frekvencijskom opsegu, prisustvo diskontinuiteta neznatno utiče na prilagođenje i prenos snage.

Na osnovu izračunatih dužina i širina vodova nacrtana je maska hibridnog prstena. Da bi se smanjile pogreške u crtanju, nacrtana je deset puta uvećana maska, na podlozi koja ima male promjene dimenzija pod uticajem promjene temperature i vlažnosti okoline. Nakon smanjenja crteža maske izrađen

je hibridni prsten. Karakteristike izrađenog sklopa mjerene su reflektometrom u vremenskoj domeni i analizatorom mrežnih parametara [2]. Rezultati pokazuju:

a) KSV na sva četiri prolaza u frekvencijskom opsegu od 8,4 do 9,6 GHz je manji od 1,5;

b) prenos snage sa ulaza na izlaze je u granicama -3 dB, uz odstupanje do 0,5 dB;

c) izolacija je od -28 do bolje od -30 dB;

d) fazni odnos signala na izlazima, pri napajanju prolaza sume, je 0° , uz maksimalno odstupanje od 10° , a pri napajanju prolaza razlike fazni odnos je 180° , uz maksimalno odstupanje od 10° .

Da bi se ispitala ponovljivost izrade sklopa, izrađena su četiri hibridna prstena i istim postupkom izmjerene karakteristike [2]. Rezultati pokazuju da je ponovljivost sklopa dobra, jer je odstupanje izmjerenih parametara neznatno. Ni jedan od prolaza nema KSV lošiji od 1,5, ali rezultati prilagođenja ovise o preciznosti montiranja konektora. Prenosne karakteristike pokazuju vrlo dobro slaganje i prenos snage se ostvaruje s -3 dB uz odstupanje od 0,5 dB. Izolacija pokazuje veće odstupanje, tako da je minimalna reda -24 dB. Fazni odnosi pri napajanju kanala sume ili razlike sačuvani su uz odstupanje do 10° .

Radi ispitivanja primjenljivosti, ovako realizirana četiri hibridna prstena su spojena u monoimpulzni komparator. Ispitana je osjetljivost oba kanala razlike u funkciji promjene faze na ulazima u frekvencijskom opsegu od 8,4 do 9,6 GHz. Rezultati mjerenja pokazuju da se za promjenu faze signala na dva ulaza na kanalima razlike dobije signal između -3 dB do bolje od -30 dB, što se u potpunosti slaže s rezultatima dobijenim za komparator sastavljen od četiri hibridna spreznika 3 dB/180° PN 2031-6339-00.

Analiza uticaja tolerancija

Karakteristike mikrotrakastog voda, karakteristična impedancija Z_0 i efektivna dielektrična konstanta ϵ_{re} prvenstveno su funkcija širine trake voda w i parametara supstrata — relativna dielektrična konstanta ϵ_r i visina supstrata h . Prisutni su još uticaj faktora kao što je debljina trake, radna frekvencija, oklapanje, itd. Bilo kakva promjena vrijednosti w , ϵ_r ili h daje odgovarajuće promjene Z_0 i ϵ_{re} .

Svojstva supstrata, kao što su obrada površine, debljina metalizacije, način proizvodnje, i dr., određuju tačnost izrade širine trake. Pored tačnosti izrade širine trake, debljina i dielektrična konstanta supstrata imaju neku toleranciju u proizvodnji. Svi ovi faktori imaju uticaja na promjenu Z_0 i ϵ_{re} mikrotrakaste strukture. Međutim, za razliku od parametara, kao što su disperzija, debljina trake, itd., efekt tolerancije se ne može ugraditi egzaktno zbog nepouzdanosti Z_0 i ϵ_{re} , koja proizilazi iz tolerancija.

Efekt tolerancija na karakteristike mikrotrakaste strukture može se analizirati koristeći pristup preko osjetljivosti. Ovakav pristup je najjednostavnija metoda predviđanja najgoreg slučaja koji pripada datom skupu tolerancija i ne zahtjeva stvarnu statističku distribuciju tolerancija, već je potrebna samo njihova maksimalna apsolutna vrijednost [8]. Analiza osjetljivosti je primjenljiva u situacijama gdje se odstupanje parametara može smatrati inkrementnim. To znači da će karakteristika sklopa biti sporo promjenljiva funkcija u domeni promjene parametara oko stvarne vrijednosti parametara [9].

Osjetljivost parametara može se koristiti za određivanje promjena karakteristika sklopa za date tolerancije parametara. Karakteristike sklopa mogu biti KSV, unešeno slabljenje, izolacija, i drugo. Obično se daje promjena karakteristične impedancije ∇Z_0 u funkciji KSV, koji se dobije kada se vod spoji na prenosni vod tačnih dimenzija.

Prednost se daje predstavljanju ∇Z_0 preko KSV, jer su tolerancije tako predstavljene u Z_0 .

U [2] je napravljen program koji za date karakteristike prenosne strukture računa pojedine osjetljivosti, a za date tolerancije računa maksimalni koeficijent stojnog vala.

Za odabrani laminat proizvođač daje slijedeće karakteristike i tolerancije:

$$— \epsilon_r = 2,48 \pm 0,05;$$

$$— h = 0,256 \text{ mm} \pm 0,02286 \text{ mm}.$$

Tačnost izrade mikrotrakaste strukture ovisi o tačnosti izrade maske i o postupku jetkanja. Kako crtalo ima mogućnost najmanjeg koraka 0,025 mm i ponovljivost zauzimanja iste koordinate 0,1 mm, to je maksimalna pogreška u crtanju $\pm 0,125$ mm. Kako je crtež maske povećan deset puta, pogreška nakon smanjenja je $\pm 0,125$ mm. U postupku jetkanja, ovisno o stanju kupke, može se postići tačnost $\pm 0,05$ mm. Prema tome, širina trake može se napraviti s tolerancijom od $\pm 0,0625$ mm.

Rezultati pokazuju da veličina KSV_{max} , koja ovisi o tolerancijama prenosne strukture, za vod karakteristične impedancije 50 Ω iznosi 1,14, a za vod karakteristične impedancije 70,71 Ω iznosi 1,158, što nije zanemarivo, pa prema tome utiče na prilagođenje prolaza sklopa.

Zaključak

Rezultati pokazuju da se uspješno može realizirati hibridni sprežnik 3 dB/180° s karakteristikama koje odgovaraju karakteristikama profesionalnog hibrida. Realizirani hibrid u frekvencijskom opsegu od 8,4 do 9,6 GHz ima karakteristike prenosa koje odstupaju od projektiranih do 0,5 dB po amplitudi i do 10° po fazi, a ostvareno je prilagođenje koje daje KSV na svim prolazima

bolji od 1,5. Monoimpulsni komparator sastavljen od četiri ovakva hibrida ima minimum u kanalima razlike koji je vrlo dubok i prelazi —30 dB.

Analiza profesionalnih hibrida i komparatora pokazuje da je moguće dobiti i sklop s karakteristikama koje znatno odstupaju od onih koje je dao proizvođač.

Analiza efekata tolerancije mikrotrakastih vodova pokazuje da se za laminat datih karakteristika i tolerancija raspoloživom tehnologijom mogu dobiti takve tačnosti izrade da za vod karakteristične impedancije od 50 Ω KSV iznosi 1,14, a za vod karakteristične impedancije od 70 Ω 1,158.

Literatura:

- [1] Bogdanović M.: »Izbor glave protivradarske rakete«, Izvještaj NIR zadatak 480F, CVTŠ, Zagreb 1989.
- [2] Božiković A.: »Razvoj monoimpulsnog komparatora«, Izvještaj, NIR zadatak 480F, CVTŠ, Zagreb 1989.
- [3] Hamadallah M.: »Microstrip Power Dividers at mm-Wave Frequencies«, Microwave Journal, July 1988., pp. 115—127.
- [4] Edwards T. C.: »Foundation for Microstrip Circuit Design«, John Wiley, 1981.
- [5] Agrowal A. K., Mihucki G. F.: »A printed circuit Hybrid Ring Directional Coupler for Arbitrary Power Divisions«, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-34, No. 12, December 1986., pp. 1401—1407.
- [6] »COMPACT«, uputstvo za rad.
- [7] Gupta K. C., ...: »Computer Aided Design of Microwave circuits«, Artech H., 1981.
- [8] Gupta K. C., ...: »Microstrip Lines and slotlines«, Artech H., 1979.
- [9] Garg R.: »The Effect of Tolerances on Microstripline and Slotline Performances«, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-26, No. 1, Jan., 1978., pp 66—19.