

Merna nesigurnost merenja refleksije skalarnim analizatorom mreže

Miša Markuš, Ivica Milanović, Neda Spasojević, Tehnički opitni centar

Apstrakt — U radu je opisan postupak merenja koeficijenta refleksije skalarnim analizatorom mreže uz detaljan proračun merne nesigurnosti merenja. Opisana metoda koristi se u laboratorijskoj za mikrotalasnu tehniku Tehničkog opitnog centra (TOC), prilikom etaloniranja merne opreme iz oblasti mikrotalasne snage, slabljenja i impedanse.

Ključne reči — etaloniranje; koeficijent stoećeg talasa; merna nesigurnost; refleksija; skalarni analizator mreže;

I. UVOD

Jedna od ključnih veličina koja karakteriše prostiranje signala u mikrotalasnem delu spektra jeste refleksija. Refleksija je neželjena pojava koja nastaje usled diskontinuiteta impedanse u medijumu za prenos i od izuzetnog je značaja što preciznije odrediti njenu veličinu. Parametar kojim opisuјemo refleksiju, koeficijent refleksije Γ , definiše se kao odnos kompleksnih amplituda reflektovanog i incidentnog signala:

$$\Gamma = \frac{V_{ref}}{V_{inc}} \quad (1)$$

U opštem slučaju on poseduje apsolutnu vrednost ρ i fazu φ . U ovom radu bavimo se isključivo skalarnim koeficijentom refleksije, odnosno faza nam nije od interesa. Za opisivanje refleksije, pored već pomenutog koeficijenta refleksije, veoma često se koristi i koeficijent stoećeg talasa (KST). Stoeći talas nastaje superponiranjem signala koji putuju kroz isti medijum za prenos u suprotnim smerovima (incidentni i reflektovani signal). KST predstavlja odnos maksimuma i minimuma anvelope takvog signala. Njegova veza sa koeficijentom refleksije, može se predstaviti sledećom relacijom:

$$KST = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad (2)$$

U nekim primenama praktičan način predstavljanja refleksije je korišćenjem logaritamske skale. Iz tog razloga uvodi se veličina povratnih gubitaka (*return loss*):

$$RL = -20 \log(\rho) \quad (3)$$

Miša Markuš – Tehnički opitni centar, Vojvode Stepe 445, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: markus.misa@gmail.com)

Ivica Milanović – Tehnički opitni centar, Vojvode Stepe 445, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: metrologija@toc.vs.rs).

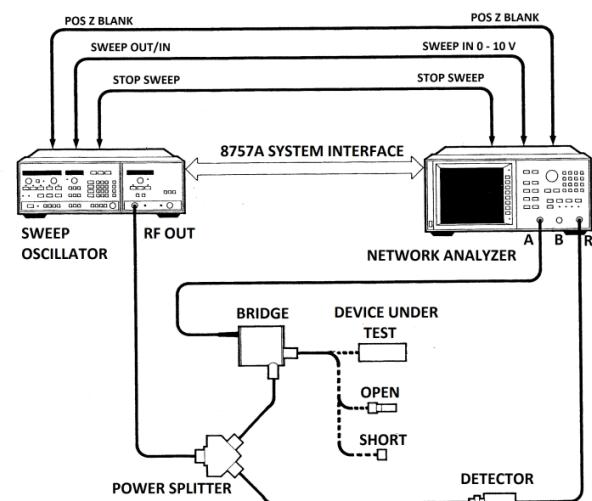
Neda Spasojević – Tehnički opitni centar, Vojvode Stepe 445, 11000 Beograd Srbija (e-mail: metrologija@toc.vs.rs).

Povratni gubici nam govore koliko deciblela je nivo reflektovanog signala ispod nivoa incidentnog signala.

II. MERENJE REFLEKSIJE

U Tehničkom opitnom centru razvijene su dve metode merenja skalarnog koeficijenta refleksije, odnosno koeficijenta stoećeg talasa. Prva metoda, zasnovana na upotrebi prorezanog mernog voda, ne pruža veliki komfor u radu i vremenski je zahtevna, budući da je neophodno vršiti zasebna merenja za svaku frekvenciju od interesa. Ovom metodom je moguće postići najbolju mernu nesigurnost u laboratorijskom TOC-u. Druga, savremenija metoda, podrazumeva korišćenje skalarnog analizatora mreže, dosta je brža i jednostavnija, sa mernim nesigurnostima koje su više nego zadovoljavajuće za ovakva merenja. Predmet ovog rada je upravo upotreba skalarnih analizatora mreže prilikom merenja refleksije, sa akcentom na proračunu merne nesigurnosti merenja.

Pored skalarnog analizatora mreže Agilent E8757D, osnovna komponenta ovog sistema je direkcioni most HP 85027B koji obezbeđuje razdvajanje incidentnog i reflektovanog signala. Most predstavlja referentni etalon laboratorijskog TOC-a za veličinu mikrotalasna impedansa, i sledljivost ostvaruje etaloniranjem u Metas-u (nacionalni metrološki institut Švajcarske). U sklopu ovog sistema nalazi se i koaksijalni detektor Agilent 85037B, signalgenerator Agilent E8257D, razdelnik snage Agilent 11667B i mikrotalasnji završetak APC-3,5 (*short/open*) sa KST-om znatno većim od 100, koji se koristi prilikom kalibracije sistema, a simulira kratku vezu tj. otvoreno kolo. Završeci *short* i *open* reflektuju celokupnu incidentnu snagu i na taj način obezbeđuju pogodnu referentnu vrednost od 0 dB [1].



Sl. 1. Blok šema merenja

Postupak merenja sastoji se iz sledećih koraka:

- Vezati uređaje kao na slici 1.
- Definisati nivo signala i frekvencijski opseg na signalgeneratoru.
- Izvršiti kalibraciju sistema *short/open*
- Na test port direkcionog mosta priključiti komponentu čiji se koeficijent refleksije meri.

Rešavanjem ove dve mreže dobijamo odgovarajuće izraze za S parametre. Od interesa za ovaj rad je isključivo vrednost parametra S_{11A} koji opisuje refleksiju (izraz 5). S parametri koji karakterišu prostiranje signala od porta 1 ka portu 2 (transmisija) nisu predmet ovog rada.

$$S_{11A} = \frac{\left(\frac{S_{11m} - E_D}{E_{RT}}\right)\left(1 + \frac{S_{22m} - E'_D}{E_{RT}} E'_s\right) - E_L \left(\frac{S_{21m} - E_X}{E_{TT}}\right)\left(\frac{S_{12m} - E'_X}{E_{TT}}\right)}{\left(1 + \frac{S_{11m} - E_D}{E_{RT}} E_s\right)\left(1 + \frac{S_{22m} - E'_D}{E_{RT}} E'_s\right) - E_L E'_L \left(\frac{S_{21m} - E_X}{E_{TT}}\right)\left(\frac{S_{12m} - E'_X}{E_{TT}}\right)} \quad (5)$$

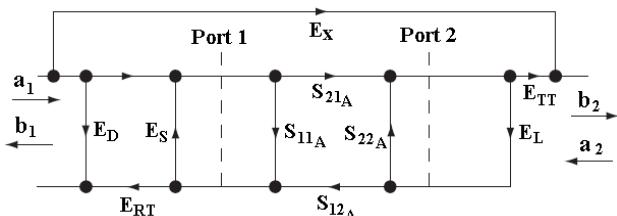
Ukoliko se refleksija meri na uređaju koji ima više od jednog porta, neophodno je preostale portove zatvoriti odgovarajućim završecima, sa što manjim koeficijentom refleksije (HP 909A, Agilent 909D ili sl.). Na ovaj način eliminisemo uticaj refleksije od ovih portova na rezultat merenja.

III. MERNA NESIGURNOST

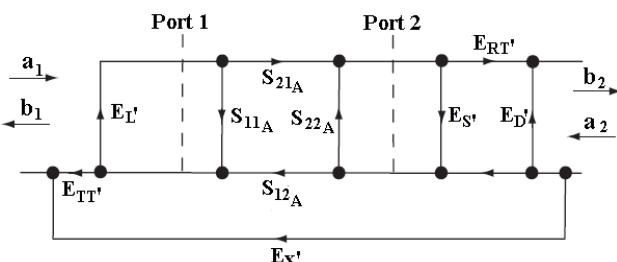
Matematički model proračuna merne nesigurnosti dat je sledećim izrazom:

$$U = U_{sys} + U_{rnd} \quad (4)$$

Sa U_{sys} opisani su sistematski parametri a sa U_{rnd} slučajne veličine koje daju doprinos mernoj nesigurnosti. Prilikom analize merne nesigurnosti merenja usled sistematskih parametara, iskoristili smo model mreže sa dva porta predstavljene svojim S parametrima. Ovakvom mrežom modelujemo sve greške koje se mogu javiti prilikom merenja refleksije. Analizator mreže mora da prebriše (*sweep*) frekvencijski opseg u oba smera (*forward* i *reverse*) kako bi odredio S parametre, shodno tome ćemo mrežu predstaviti u dva modela, direktnom (*forward*) i suprotnom (*reverse*), prikazanim na slikama 2 i 3 respektivno [2].



Sl. 2. *Forward* model mreže sa četiri porta



Sl. 3. *Reverse* model mreže sa četiri porta

Sa $S_{11A}, S_{12A}, S_{21A}, S_{22A}$ označeni su stvarni parametri S mreže, dok su $S_{11m}, S_{21m}, S_{12m}$, i S_{22m} izmerene vrednosti S parametara posmatrane mreže. Preostale veličine su:

- | | |
|----------------------|---|
| E_D i E'_D | - direktivnost u direktnom i suprotnom smeru |
| E_{RT} i E'_{RT} | - simetrija kanala prilikom merenja refleksije u direktnom i suprotnom smeru |
| E_S i E'_S | - prilagođenje izvora u direktnom i suprotnom smeru |
| E_L i E'_L | - prilagođenje opterećenja u direktnom i suprotnom smeru |
| E_{TT} i E'_{TT} | - simetrija kanala prilikom merenja transmisije u direktnom i suprotnom smeru |
| E_X i E'_X | - izolacija u direktnom i suprotnom smeru |

Radi pojednostavljenja ovog izraza prepostavljamo da su vrednosti direktivnosti, prilagođenja izvora i opterećenja približno jednaki nuli, dok su simetrije kanala pri merenju refleksije i transmisije bliske jedinici [3]:

$$\begin{aligned} E_D &\approx 0; E'_D \approx 0; E_L \approx 0; E'_L \approx 0; \\ E_S &\approx 0; E'_S \approx 0; E_{RT} \approx 1; E'_{RT} \approx 1; \\ E_{TT} &\approx 1; E'_{TT} \approx 1; \end{aligned} \quad (6)$$

Mernu nesigurnost usled sistematskih parametara možemo prepostaviti kao funkciju parametara E_D i E'_D , E_{RT} i E'_{RT} , E_S i E'_S , E_L i E'_L , E_{TT} i E'_{TT} , E_X i E'_X . Koeficijenti osetljivosti dobijaju se preko parcijalnih izvoda:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{11}}{\partial E_D} &\approx -1 \frac{\partial S_{11}}{\partial E_S} \approx -S_{11m}^2 \\ \frac{\partial S_{11}}{\partial E_{RT}} &\approx -S_{11m} \quad \frac{\partial S_{11}}{\partial E_L} \approx -S_{21m} S_{12m} \end{aligned} \quad (7)$$

dok su preostali koeficijenti osetljivosti približno jednaki nuli [3]. Imajući ovo u vidu, izraz za mernu nesigurnost (4) dobija sledeći oblik:

$$U = u(E_D) + |S_{11m}|u(E_{RT}) + |S_{11m}|^2 u(E_S) + \dots + |S_{11m}|u(E_{RT}) + |S_{21m} S_{12m}|u(E_L) + U_{rnd} \quad (8)$$

Uz pretpostavku da je $S_{21m}=S_{12m}$, i uz prihvatanje drugačijeg načina obeležavanja $\{S_{11m}=\rho_m, u(E_D)=U_D\}$,

$u(E_S) = U_T, u(E_L) = U_L$ и $u(E_{RT}) = U_{RT}$ } izraz (8) postaje:

$$U = U_D + U_{RT}\rho_m + U_T\rho_m^2 + S_{21m}^2 U_L + U_{rnd} \quad (9)$$

gde je ρ_m izmereni koeficijent refleksije, dok S_{21m} predstavlja slabljenje koje unosi uređaj čiji se koeficijent refleksije meri (*insertion loss*).

U izrazu (9) možemo prepoznati sledeće uticajne veličine:

U_D – direktivnost. Za vrednost ovog parametra uzimamo direktivnost direkcionog mosta HP 85027B. Proizvođač u svojoj dokumentaciji definiše da u frekvenčiskom opsegu 10 MHz do 20 GHz ona iznosi 40 dB, dok u opsegu 20 GHz do 26,5 GHz iznosi 36 dB [4]. Ovom parametru je pridružena U raspodela.

U_{RT} – simetrija kanala A i R (*reflection tracking*) i linearnost skalarnog mrežnog analizatora (*linearity*) prilikom merenja refleksije. *Reflection tracking* predstavlja razliku u frekvenčiskim odzivima ova dva kanala i iznosi 0,4 dB (0,25 dB je maksimalna razlika između dva izlaza razdelnika snage plus 0,15 dB razlike u odzivima kanala A i R skalarnog analizatora mreže) [5]. U ovom proračunu iskorišćena je preporuka EURAMET-a cg-12, u kojoj se navodi da je tipična vrednost linearnosti 0,002 dB/dB [6]. Obe veličine imaju Pravougaonu raspodelu.

U_T – prilagođenje test porta direkcionog mosta HP 85027B. U specifikaciji proizvođača navode se sledeći podaci:

opseg 10 MHz – 8,4 GHz	23 dB
opseg 8,4 GHz – 20 GHz	15 dB
opseg 20 MHz – 26,5 GHz	11 dB

Ovom parametru pridružena je U raspodela.

U_L – prilagođenje mikrotalasnog završetka kojim se zatvara drugi port uređaja čiji se koeficijent refleksije meri. U slučaju završetka HP 909A u specifikaciji proizvođača navode se sledeći podaci:

opseg 0 GHz – 4 GHz	0,024
opseg 4 GHz – 12,4 GHz	0,048
opseg 12,4 GHz – 18 GHz	0,111

Veličine U_D i U_T mogu biti međusobno korelisane. Međutim, radi pojednostavljenja matematičkog modela merenja, EURAMET, u svojoj publikaciji cg-12, preporučuje da se za koeficijent korelacije uzima vrednost 1. To znači da se merne nesigurnosti usled ove dve veličine posmatraju kao jedinstven uticaj na ukupnu mernu nesigurnost (član $U_D + U_T$) [6].

Merna nesigurnost usled slučajnih procesa, U_{rnd} , obuhvata sledeće uticaje:

U_{sr} – ponovljivost sistema. Određuje se eksperimentalno, merenjem standardne devijacije nekoliko uzastopnih merenja, bez raspajanja uređaja koji se etalonira koristeći iste kalibracione podatke. Postupak se sprovodi za nekoliko vrednosti koeficijenata refleksije, na različitim frekvenčijama. Istu proceduru treba sprovesti i u slučaju ponavljanja kalibracije. Tipične vrednosti koje se očekuju su u intervalu 0,001 do 0,01. U ovom proračunu biće uzeta najkritičnija vrednost 0,01. Raspodela je Gausova.

U_{cr} – ponovljivost konektora. Jedan od načina da se izračuna ovaj parametar jeste putem serije merenja na

tipičnom uređaju, raspajanjem i ponovnim spajanjem istog, bez ponavljanja kalibracije ali sa rotacijom u koracima od 120° [6]. Za kvalitetne konektore koji se koriste u metrološkoj laboratoriji Tehničkog opitnog centra, ova vrednost ne prevaziđa 0,01 dB. Raspodela je Gausova.

U_{of} – fleksibilnost kablova. Posledica je promene položaja kabla nakon izvršene kalibracije. Određuje se eksperimentalno, uzastopnim merenjima sa promenom položaja kabla za definisani ugao (npr. savijanjem kabla za ugao od 90° ali isključivo za fleksibilne tipove kablova). Tipična vrednost je 0,004, raspodela je Gausova [6].

U_t – ambijentalni uslovi. Iako se merenja izvode u kontrolisanim ambijentalnim uslovima, ovaj parametar može imati određeni uticaj usled razlika u temperaturama prilikom kalibracije i prilikom samog merenja. U proračunu biće upotrebljena vrednost 0,002, iz preporuke EURAMET cg-12 [6]. U pitanju je Pravougaona raspodela.

A. Merna nesigurnost merenja refleksije na oslabljivaču

U ovom primeru proračunata je merna nesigurnost prilikom merenja refleksije na promenljivom oslabljivaču HP 355B. Koeficijent stoećeg talasa izmeren na frekvenčiji 500 MHz iznosi 1,12 što prema izrazu (2) odgovara koeficijentu refleksije od 0,06. Uneto slabljenje na posmatranoj frekvenčiji iznosi 1,29 dB. Proširena merna nesigurnost predstavljena je tabelom 1. Na osnovu analize merne nesigurnosti, možemo zaključiti da ona u velikoj meri zavisi od prilagođenja mikrotalasnog završetka kojim se zatvara oslabljivač prilikom merenja.

B. Merna nesigurnost merenja refleksije na mikrotalasnem završetku

U ovom primeru proračunata je merna nesigurnost merenja refleksije na mikrotalasnem završetku HP 909A, na frekvenčiji 18 GHz. U tom slučaju, izraz za mernu nesigurnost (9) se pojednostavljuje:

$$U = U_D + U_{RT}\rho_m + U_T\rho_m^2 + U_{rnd} \quad (10)$$

Budući da završetak predstavlja mrežu sa jednim portom, izraz $S_{21m}^2 U_L$ jednak je nuli i može se izostaviti iz relacije (8). Koeficijent stoećeg talasa izmeren na frekvenčiji 18 GHz iznosi 1,15 što odgovara koeficijentu refleksije od 0,07. Budžet merne nesigurnosti dat je tabelom 2. Na osnovu ove tabele zaključujemo da dominantan uticaj na mernu nesigurnost imaju direktivnost mosta i ponovljivost konektora.

IV. ZAKLJUČAK

Merna nesigurnost dobijena opisanom metodom, omogućava etaloniranje etalona i merila visokih zahteva u pogledu koeficijenta refleksije odnosno koeficijenta stoećeg talasa. Provjeru ovih parametara su neizostavne prilikom etaloniranja velikog broja mernih opreme, bilo da se radi o pasivnim komponentama (oslabljivači, završeci...) ili su u pitanju aktivni merni uređaji. U Tehničkom opitnom centru moguće je meriti koeficijent stoećeg talasa u frekvenčiskom opsegu 10 MHz

TABELA I
TABELA BUDŽETA MERNE NESIGURNOSTI U SLUČAJU MERENJA REFLEKSIJE NA OSLABLJIVAČU

Uticajna ulazna veličina X_i	Procena x_i	Standardna nesigurnost $u(x_i)$	Funkcija raspodele verovatnoće	Koeficijent osetljivosti c_i	Doprinos standardnoj nesigurnosti $U_i(y)= c_i u(x_i)$
U_D	40 dB	0,0071	U	1	0,0071
U_T	23 dB	0,05	U	0,0032	0,0002
$U_D + U_T$	-	-	-	-	0,0073
U_{RT}	0,4 dB	0,0064	Pravougaona	0,0566	0,0015
U_{LIN}	0,002 dB/dB	0,0033	Pravougaona	0,0566	0,0002
U_L	0,024	0,017	U	0,743	0,0127
U_{sr}	0,01	0,005	Gausova	0,0032	0,00002
U_{cf}	0,04	0,002	Gausova	0,0032	0,00001
U_{cr}	0,01	0,005	Gausova	1	0,005
U_t	0,002	0,0012	Pravougaona	0,0032	0,000004
U_c	Kombinovana standardna nesigurnost				0,014
U_{uk}	Proširena merna nesigurnost ($k = 2$)				0,03
Rezultat				$0,06 \pm 0,03$	

TABELA II
TABELA BUDŽETA MERNE NESIGURNOSTI U SLUČAJU MERENJA REFLEKSIJE NA MIKROTALASNOM ZAVRŠETKU

Uticajna ulazna veličina X_i	Procena x_i	Standardna nesigurnost $u(x_i)$	Funkcija raspodele verovatnoće	Koeficijent osetljivosti c_i	Doprinos standardnoj nesigurnosti $U_i(y)= c_i u(x_i)$
U_D	40 dB	0,0071	U	1	0,0071
U_T	15 dB	0,1261	U	0,0049	0,0006
$U_D + U_T$	-	-	-	-	0,0077
U_{RT}	0,4 dB	0,0064	Pravougaona	0,0698	0,0018
U_{LIN}	0,002 dB/dB	0,0031	Pravougaona	0,0698	0,0002
U_{sr}	0,01	0,005	Gausova	0,0698	0,0004
U_{cf}	0,04	0,002	Gausova	0,0698	0,0001
U_{cr}	0,01	0,005	Gausova	1	0,005
U_t	0,002	0,0012	Pravougaona	0,0698	0,00008
U_c	Kombinovana standardna nesigurnost				0,009
U_{uk}	Proširena merna nesigurnost ($k = 2$)				0,02
Rezultat				$0,07 \pm 0,02$	

do 26,5 GHz što je više nego dovoljno u pogledu potreba koje imaju ustanove Ministarstva odbrane i jedinice Vojske Srbije ali i preduzeća iz privrede.

Skalarni i vektorski mrežni analizatori postali su, zahvaljujući svojoj praktičnosti i jednostavnosti upotrebe, nezaobilazni deo merne opreme u svim metrološkim laboratorijama. Pored merenja refleksije, skalarni analizatori mreže mogu se koristiti i za merenje drugih parametara, a od velike koristi je njihova primena prilikom merenja koeficijenta transmisije i slabljenja.

LITERATURA

- [1] "Agilent technologies 8757D Scalar Network Analyzer", User's manual, november 2000.
- [2] "Applying error correction to network analyzer measurements", Application note, Keysight technologies, july 2014.
- [3] "VNA error models:Comments on Euramet cg-12/v.01", B.D.Hall, Measurement standard laboratory of New Zealand, 16 june 2010.

- [4] "Agilent 85027A/B/C Directional bridge Operating and Service manual", Agilent technologies, july 1985.
- [5] "Agilent 85037A/B precision detectors Operating and Service manual", Agilent technologies, october 2002.
- [6] "Guidelines on the evalution of vector network analyzers Euramet cg-12", Volume 30, version 2.0, 03/2011.

ABSTRACT

This paper describes reflection measurement with scalar network analyzer and gives detailed calculation of measurement uncertainty. This measurement method is regularly used at Technical test center's laboratory as a part of calibration procedure of different types of measuring equipment.

Scalar Network analyzer reflection measurement uncertainty

Miša Markuš, Ivica Milanović, Neda Spasojević