

Merenje karakteristika mikrotalasnog pasivnog kola korišćenjem NanoVNA V2 Plus4

Nebojša Mrmak
Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu
Beograd, Srbija
nmrmak@gmail.com

Milka Potrebić Ivaniš
Katedra za opštu elektrotehniku
Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu
Beograd, Srbija
milka_potrebic@etf.bg.ac.rs, 0000-0002-4866-6608

Apstrakt — U ovom radu je razmatrana primena nisko budžetnog VNA (Vector Network Analyzer) uređaja za merenje karakteristika prototipa mikrotalasnog pasivnog kola za prijem ADS-B (Automated Dependent Surveillance-Broadcast) signala sa vazduhoplova. Implementiran je prototip filtra sa ukosnicama petog reda u mikrotrakastoj tehnici. Centralna učestanost je 1090 MHz, a širina 3 dB propusnog opsega je 300 MHz. Merenja prototipa su pokazala dobro slaganje između rezultata merenja izvršenih pomoću NanoVNA V2 Plus4 i Agilent PNA N5227A analizatora mreža za parametar S_{21} [dB] u opsegu 50-2600 MHz do -50 dB, dok su se merenja S_{11} [dB] parametra ovim instrumentom pokazala kao nepouzdana ispod -15 dB.

Ključne reči — NanoVNA V2 Plus4, VNA (Vector Network Analyzer), mikrotalasno pasivno kolo, mikrotalasna merenja, filter sa ukosnicama

I. UVOD

Sinteza RF (radio frekvencijskih) filtera je postupak koji se sastoji od nekoliko koraka: specifikacija, aproksimacija, projektovanje šeme sa idealnim i realnim komponentama, optimizacija, prototip i konačno proizvodnja. Kada se radi o hardverskoj realizaciji prototipa filtera, jedan od najkorisnijih alata za karakterizaciju i verifikaciju fizičke izvedbe je VNA (Vector Network Analyzer) [1]. Pomoću ove klase uređaja mogu se izmeriti parametri rasejanja (S -parametri) i u nekim slučajevima odziv u vremenskom domenu.

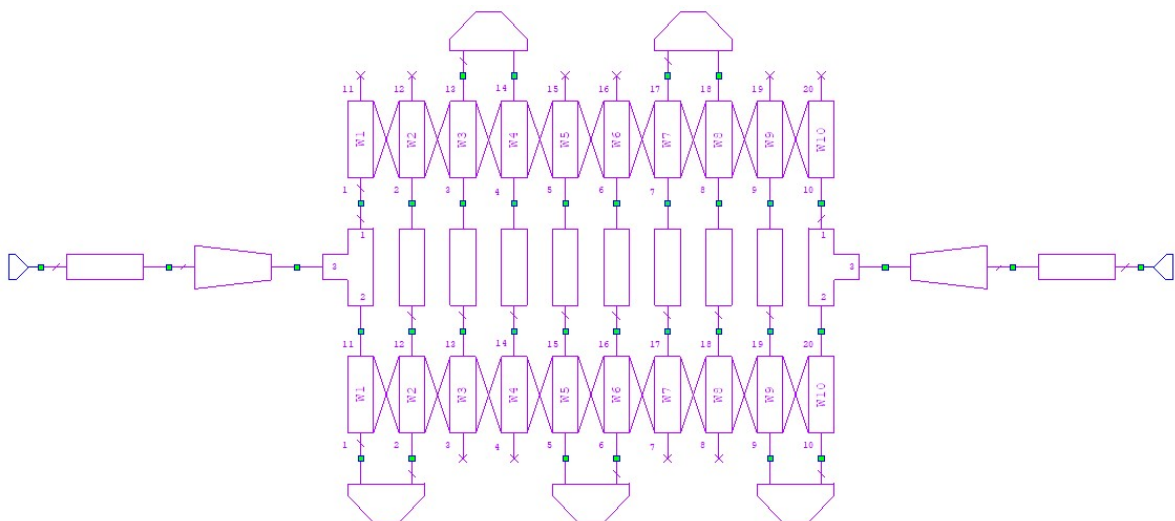
Zbog svoje visoke cene, koja je nekoliko stotina puta veća od cene uređaja koji je tema razmatranja ovog rada, upotreba laboratorijskih VNA je uglavnom nedostupna amaterima, već je primenljiva uglavnom u laboratorijama obrazovnih institucija i u

komercijalnom okruženju [2]. Čak i u akademskom okruženju, studenti u većini slučajeva nemaju priliku da rade direktno sa ovakvom mernom opremom, već osoblje vrši merenja umesto njih. Potencijal za intuitivno razumevanje materije i učenje bi mogao biti daleko veći ukoliko bi se studentima omogućilo iskustvo iz prve ruke.

Doprinos ovog rada je razmatranje praktične primene nisko budžetnog VNA u procesu verifikacije karakteristika prototipa mikrotalasnih kola i uporedno merenje performansi ovakvog mernog uređaja u odnosu na referentni.

Razmotrićemo primenu NanoVNA V2 Plus4 u procesu projektovanja filtra propusnika opsega učestanosti za potrebe prijema ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) poruka koje se koriste u vazduhoplovstvu. ADS-B je tehnologija nadzora vazdušnog saobraćaja koja podrazumeva zemaljsku infrastrukturu i transpondere na strani vazduhoplova [3].

Zemaljske stanice šalju upit vazduhoplovima, koji potom odgovaraju trenutnim podacima o letu kao što su pozivni znak vazduhoplova, visina, brzina u odnosu na vazдушnu masu, magnetni kurs, geografske koordinate i mnoge druge, zavisno od verzije protokola. Podaci koje transponder vazduhoplova odašilje primaju zemaljske stanice, koje iscrtavaju sliku situacije operaterima zemaljske kontrole letenja, kao i drugi vazduhoplovi u okolini, što poboljšava pregled i razumevanje situacije posadama vazduhoplova i omogućava razrešavanje konflikata kroz TCAS (Traffic Collision Avoidance System). Ovi podaci su takođe zanimljivi i entuzijastima za avijaciju na zemlji koji žele da prate vazduhoplove u vazdušnom prostoru i na taj način saznaju više o avijaciji.



Sl. 1 Šema kola mikrotrakastog filtra sa ukosnicama realizovana u AWR Microwave Office

ADS-B transponderi vazduhoplova u većini sveta, pa i kod nas, rade na centralnoj učestanosti od 1090 MHz, propusni opseg signala je 2 MHz, a tip modulacije je PPM (*Pulse Position Modulation*). Najveći praktičan problem pri dekodovanju ovog signala je odnos signala i šuma zbog udaljenosti transpondera od prijemnika, a poseban problem pri prijemu signala za entuzijaste koji koriste softverski-definisane radio prijemnike predstavlja zasićenje prijemnika koje se javlja kao posledica šuma zemaljskog porekla, uglavnom u FM radio i WiFi opsezima učestanosti.

Da bi se omogućio prijem signala od vazduhoplova na velikoj udaljenosti, neophodno je potisnuti šum na ovim frekvencijama pre nego što signal dođe do prijemnika.

II. REALIZACIJA PROTOTIPA FILTRA SA UKOSNICAMA

Projektovani filter ima sledeću specifikaciju: centralna učestanost je 1090 MHz, a širina 3 dB propusnog opsega je 300 MHz. Minimalno slabljenje u FM radio opsegu (88-108 MHz) je 60 dB, dok je minimalno slabljenje u WiFi opsegu (2401-2484 MHz) 40 dB. Impedanse pristupa su 50 Ω .

Izabrana je mikrotrakasta realizacija filtra sa ukosnicama. Filter je implementiran korišćenjem Dišalovog postupka, polazeći od Čebiševljeve aproksimacije petog reda [4]. Na osnovu prototipa filtra, proračunati su koeficijenti sprege, faktor dobrote opterećenih rezonatora, parna i neparna impedansa, a na osnovu toga izračunata polazna geometrija kola.

Šema filtra je prikazana na Sl. 1. Izvršena je simulacija mikrotalasnog kola, a potom EM (*elektromagnetska*) analiza modela u *AWR Microwave Office*. Nakon toga su dimenzije filtra optimizovane u cilju postizanja željenih gabarita. Geometrija sa dimenzijama optimizovanog filtra je prikazana na Sl. 2. Na Sl. 3 su prikazani parametri rasejanja optimizovanog EM modela kola. Na osnovu geometrije filtra napravljena je gerber datoteka i prototip filtra je fabrikovan.

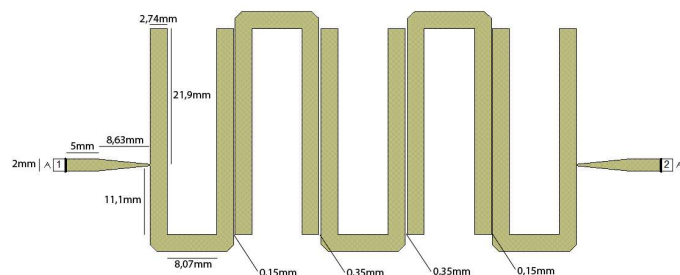
Na Sl. 4 prikazan je prototip filtra. Implementiran je na FR-4 supstratu debljine 1,6 mm sa HASL (*Hot Air Solder Levelling*) završnom obradom. Prisutne su manje nesavršenosti površine u vidu plitkih ogrebotina završnog sloja. Pristupni SMA (*Subminiature Version A*) konektori su nakon fabrikacije ručno zalemljeni na štampanu ploču.

III. DEKLARISANE KARAKTERISTIKE NANO VNA V2 PLUS4 VNA

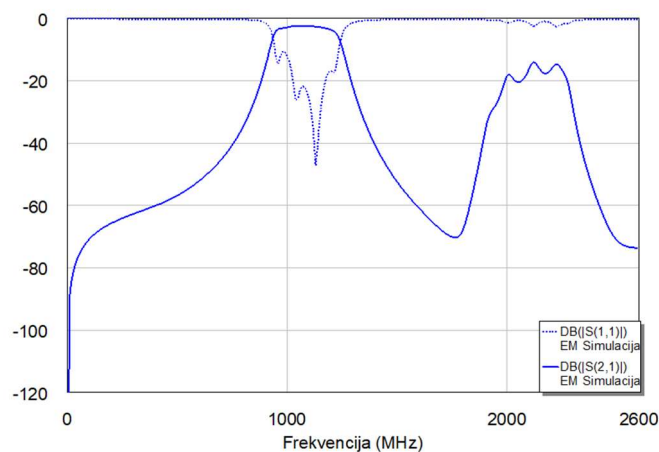
Nominalni frekventijski opseg NanoVNA V2 Plus4, prikazanog na Sl. 5, je od 50 kHz do 4.4 GHz. Najbolja frekventijska rezolucija je 10 kHz. Kalibrisani dinamički opseg je 90 dB, a prag šuma je od -40 dB do -50 dB u zavisnosti od izabranog opsega frekvencija [5]. Podržana je jednoportna kalibracija SOL (*Short-Open-Load*) metodom i dvoportna kaibracija SOLT (*Short-Open-Load-Through*) metodom. NanoVNA V2 Plus4 je opremljen ugrađenim baterijskim napajanjem koje omogućava rad bez računara za merenja na terenu.

Proizvođač uređaja je objavio javno dostupan besplatan grafički interfejs otvorenog koda [6] pomoću kog su izvršena sva merenja na NanoVNA V2 Plus4 prikazana u ovom radu. Pored korišćenja ovog softverskog paketa, moguće je konfigurisati uređaj i vršiti akviziciju podataka preko virtuelnog serijskog porta korišćenjem tekstualnih komandi, što ostavlja mogućnost za automatizaciju merenja pisanjem namenskog softvera za ovu

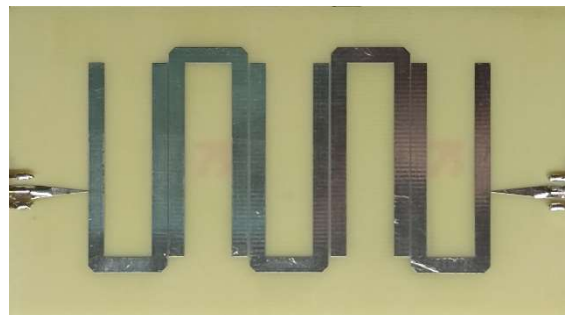
primenu, kao i korišćenje ovog uređaja u virtuelnim laboratorijama u oblasti obrazovanja.



Sl. 2 Layout mikrotrakastog filtra sa prikazanim dimenzijama



Sl. 3 S-parametri filtra dobijeni EM simulacijom modela na nivou mikrotrakastog kola



Sl. 4 Fizička realizacija prototipa filtra



Sl. 5 NanoVNA V2 Plus4

IV. POREĐENJE REZULTATA MERENJA

Rezultati merenja S -parametara dobijenih korišćenjem NanoVNA V2 Plus4 i Agilent PNA Network Analyzer N5227A su snimljeni u $s2p$ formatu. Ove datoteke su uvezene u *AWR Microwave Office* i uporedni grafički prikaz rezultata merenja S -parametara je prikazan na Sl. 6. Zatim su merenja uvezena u *Magic Plot*, gde je rađena dalja statistička i grafička obrada podataka.

Oba merna uređaja su pre merenja kalibrisana u mernom opsegu od 50 MHz do 2600 MHz dvoportnom SOLT metodom. U ovom radu smo poredili vrednosti merenja između referentnog Agilent N5227A uređaja i NanoVNA V2 Plus4.

Usaglašenost merenja između referentnog i opitnog uređaja ispitujemo primenom Bland-Altman metoda [7]. Ovaj metod ne usvaja nikakve pretpostavke u pogledu performansi bilo kog od dva merna instrumenta, već samo statistički poredi slaganje njihovih merenja.

Kao prvi korak, odredili smo vrednosti razlike merenja odvojeno za S_{11} i S_{21} parametre za svaku učestanost na kojoj je uzet odbirak merenja. Potom smo odredili srednju vrednost i standardnu devijaciju razlika merenja i utvrdili interval pouzdanosti merenja sa verovatnoćom od 90% i 95% na opsegu frekvencija od 50 MHz do 2600 MHz.

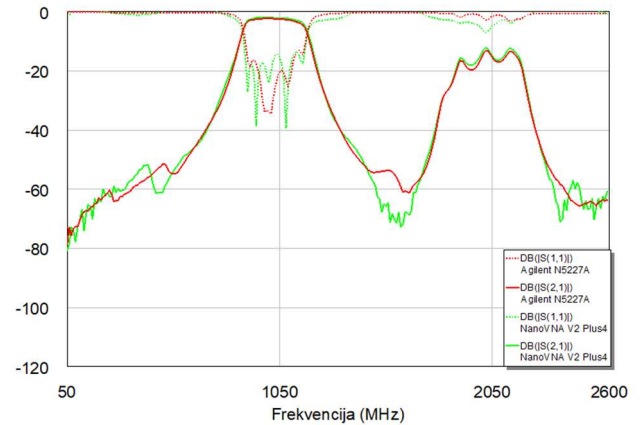
Drugi korak je prikazivanje grafika usaglašenosti merenja. Na Sl. 7 i Sl. 8 su uporedno prikazana merenja parametara rasejanja u decibelima, izvršena pomoću Agilent i NanoVNA instrumenata. Merenja izvršena Agilent instrumentom su prikazana na x -osi, dok su merenja izvršena NanoVNA instrumentom prikazana na y -osi. Dati grafici predstavljaju međusobnu zavisnost tih merenja. Na osnovu ovih prikaza se može uočiti relativno linearan odnos merenja parametra S_{21} , a za S_{11} se može uočiti izražena nelinearnost.

Treći korak je prikazivanje grafika usaglašenosti merenja između dva instrumenta u funkciji izmerene vrednosti parametra rasejanja. Ovi grafici su prikazani na Sl. 9 i Sl. 10. Na x -osi je srednja vrednost merenja, a na y -osi razlika u merenju, i obe ose su date u decibelima. Na graficima su obeležene srednje vrednosti razlika u merenjima, kao i intervali poverenja od 90% i 95%. Na osnovu ovakvih grafika je moguće oceniti slaganje merenja u zavisnosti od vrednosti merene veličine. Ukoliko postoje sistematske greške merenja, poput grešaka pri manjim ili većim vrednostima fizičkih veličina, nelinearnosti i drugo, ova vrsta grafika može na njih ukazati mnogo lakše od statističke korelacije između merenja različitim instrumentima [7].

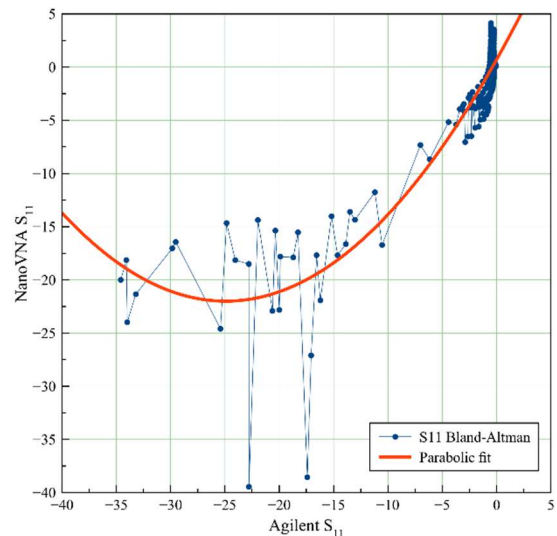
V. ZAKLJUČAK

NanoVNA V2 Plus4 je uređaj koji je svojim dolaskom uveo novinu na tržište analizatora mreža zbog svoje niske cene, koja je nekoliko stotina puta niža od cene laboratorijskih uređaja koji su do sada bili dostupni, i zbog toga je interesantan za amaterske primene.

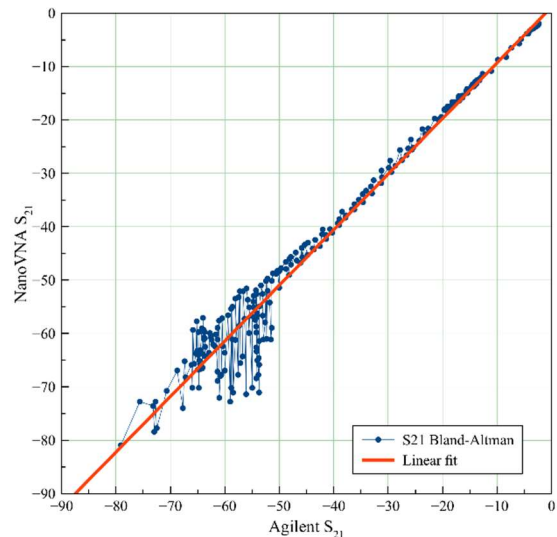
U radu je izvršena uporedna analiza rezultata merenja pomoću NanoVNA V2 Plus4 kao opitnog i Agilent PNA N5227A kao referentnog uređaja. Na osnovu dobijenih merenja zaključujemo da je NanoVNA V2 Plus4 moguće koristiti kao alternativu za primene u merenjima parametara rasejanja pasivnih kola u opsegu od 50 – 2600 MHz uz neka ograničenja. Razmotreno je odvojeno merenje parametara S_{11} i S_{21} .



Sl. 6 S -parametri dobijeni merenjem prototipa mikrotalasnog filtra. Crvenom bojom su označena merenja dobijena pomoću Agilent N5227A, a zelenom bojom merenja dobijena pomoću NanoVNA V2 Plus4



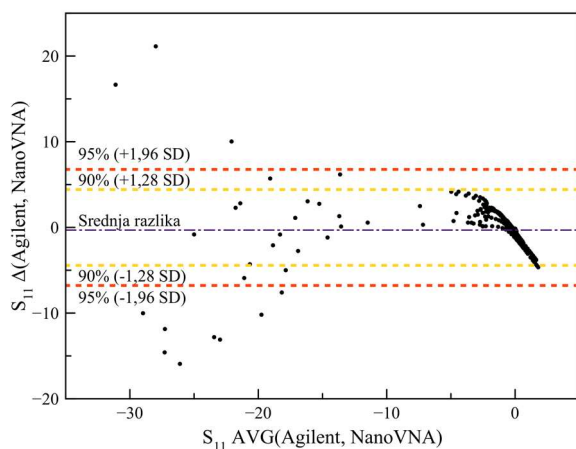
Sl. 7 Poređenje rezultata merenja parametra S_{11} ostvareno pomoću Agilent instrumenta (na x -osi) i NanoVNA instrumenta (na y -osi). Izvršeno je fitovanje paraboličkom krivom



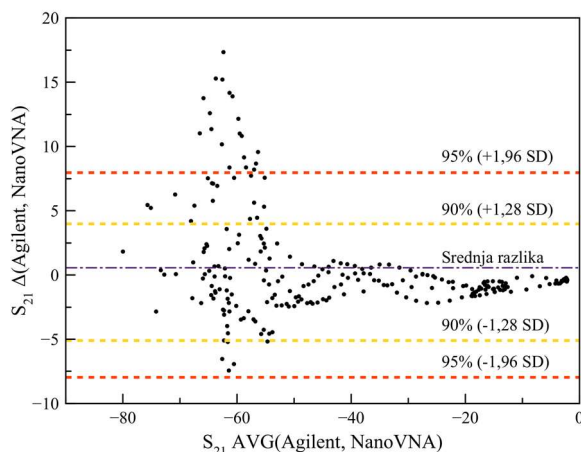
Sl. 8 Poređenje rezultata merenja parametra S_{21} ostvareno pomoću Agilent instrumenta (na x -osi) i NanoVNA instrumenta (na y -osi). Korišćeno je linearno fitovanje

Merenjem pomoću NanoVNA, dobijene su pozitivne vrednosti parametra S_{11} u dB na nekim opsezima učestanosti. Budući da su merenja vršena nad pasivnim kolom, pozitivne vrednosti amplitudske karakteristike parametra S_{11} nemaju fizičkog smisla. Takođe se uočava izraženo nelinearan odnos između merenja parametra S_{11} pomoću NanoVNA i referentnog instrumenta. Odstupanje merenja između opitnog i referentnog uređaja za merene vrednosti parametra S_{11} znatno ograničava polje primene NanoVNA V2 Plus4 kada se radi o merenju reflektovanog signala.

Kod merenja parametra S_{21} , NanoVNA se pokazao znatno bolje. Merenja opitnog i referentnog uređaja pokazuju linearan odnos, i kada se mere vrednosti amplitudske karakteristike parametra S_{21} do -50 dB, razlika u merenju se kreće između -2.23 dB do +1.09 dB, što je za neke primene prihvatljivo odstupanje.



Sl. 9. Bland-Altman grafik kojim se ocenjuje slaganje rezultata merenja parametra S_{11} između uređaja Agilent i NanoVNA. Na x -osi su označene srednje vrednosti merenja (AVG), dok su na y -osi označene razlike u merenju između dva uređaja. Obeležene su vrednosti srednje razlike merenja i intervali pouzdanosti u procentima i vrednostima standardne devijacije (SD)



Sl. 10. Bland-Altman grafik kojim se ocenjuje slaganje rezultata merenja parametra S_{21} između uređaja Agilent i NanoVNA. Na x -osi su označene srednje vrednosti merenja (AVG), dok su na y -osi označene razlike u merenju između dva uređaja. Obeležene su vrednosti srednje razlike merenja i intervali pouzdanosti u procentima i vrednostima standardne devijacije (SD)

Uprkos nesavršenostima, NanoVNA i slični uređaji bi mogli naći svoje mesto u amaterskim primenama, ali i u polju obrazovanja, na primer u sklopu virtualnih učionica ili laboratorija. Glavna motivacija za ovakav zaključak je niska cena instrumenta, koja bi mogla omogućiti studentima pristup i rad na klasi merne opreme sa kojom, do pojave ovakvih niskobudžetnih uređaja na tržištu, nisu imali prilike da se upoznaju, a naročito steknu iskustvo u radu sa njima iz prve ruke.

LITERATURA

- [1] L. F. Jumaa, Y. S. Mezaal, A. A. Al-Hilali, „An experimental study by employing Nano VNA in microwave devices“, *Int. J. Nonlinear Anal. Appl.* 13 (2022) 1, 3917-3928
- [2] R. H. Caverly, „Use of low cost vector network analyzers in undergraduate RF and wireless circuit laboratories“, *Middle Atlantic ASEE Section Spring 2021 Conference*. 2021.
- [3] F. Kunzi, „ADS-B benefits to general aviation and barriers to implementation.“, PhD diss., Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [4] M. Potrebić, D. Tošić, „Projektovanje mikrotalasnih filtara“, Akademska misao, Beograd 2019
- [5] <https://nanorfe.com/nanovna-v2.html>
- [6] <https://nanorfe.com/nanovna-v2-software.html>
- [7] J. M. Bland, D. G. Altman, „Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement“, Department of Clinical Epidemiology and Social Medicine, St. George's Hospital Medical School

ABSTRACT

In this paper, we analyze the application of a low-budget VNA (*Vector Network Analyzer*) device for measuring characteristics of a microwave passive circuit for receiving ADS-B (*Automated Dependent Surveillance-Broadcast*) signals from aircraft. We have implemented a prototype of fifth-order hairpin filter in microstrip technology. The center frequency is 1090 MHz and the 3 dB bandwidth is 300 MHz. Prototype measurements show good agreement between experimental results performed with a NanoVNA V2 Plus4 and Agilent PNA N5227A network analyzers of the S_{21} [dB] parameter in the range 50 - 2600 MHz down to -50 dB, while measurements of the S_{11} [dB] parameter have proven to be unreliable below -15 dB.

Measuring characteristics of microwave passive circuit using NanoVNA V2 Plus4

Nebojša Mrmak, Milka Potrebić Ivaniš