

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET



Implementacija i postupak kalibracije skalarnog  
analizatora mreža u opsegu mikrotalasnih učestanosti  
od 300 MHz do 3 GHz

Diplomski rad

Mentor:  
Dr Slobodan Savić, docent

Kandidat:  
Danilo Đokić, 2016/0116

Beograd, Septembar 2020.

# Sadržaj

1	Uvod . . . . .	2
1.1	Mikrotalasna tehnika . . . . .	2
1.2	Mikrotalasna merenja . . . . .	2
2	Karakterizacija mreža na mikrotalasnim učestanostima . . . . .	3
2.1	Prostiranje talasa na vodovima . . . . .	3
2.2	Parametri rasejanja . . . . .	4
3	Analizator mreža . . . . .	6
3.1	Komponente SNA . . . . .	7
3.1.1	Pobudni generator . . . . .	8
3.1.2	Usmereni sprežnjak . . . . .	9
3.1.3	Detektor snage . . . . .	10
3.1.4	Uticaj neprilagođenja u izlazu . . . . .	12
4	Aparatura i metode . . . . .	14
4.1	Opšti pregled sistema . . . . .	14
4.2	Detektori snage . . . . .	15
4.3	Usmereni sprežnjaci . . . . .	16
4.3.1	Profesionalni usmereni sprežnjaci) . . . . .	16
4.3.2	Refleksioni most . . . . .	16
4.4	Arhitektura mernog sistema . . . . .	18
4.4.1	Komunikacija sa Agilent E5062 . . . . .	18
4.4.2	Komunikacija sa mikrokontorlerom . . . . .	19
4.4.3	Karakterizacija detektora snage . . . . .	20
4.4.4	Postupak izračunavanja rezultata merenja . . . . .	20
5	Rezultati i diskusija . . . . .	20
5.1	Ogledi . . . . .	21
5.1.1	Ogled 1 . . . . .	21
5.1.2	Ogled 2 . . . . .	22
5.1.3	Ogled 3 . . . . .	23
5.1.4	Ogled 4 . . . . .	23
5.2	Diskusija i zaključak . . . . .	24
<b>Dodatak</b>		<b>26</b>
1	Kôd implementirane biblioteke . . . . .	26
2	Skripta za prikupljanje merenja . . . . .	30

3	Skripta za obradu rezultata merenja . . . . .	31
---	---	----

# Spisak slika

1	Vod zatvoren linearnim prijemnikom. . . . .	3
2	Uz definiciju parametara rasejanja. . . . .	4
3	Uz merenje parametara rasejanja. . . . .	5
4	Uz merenje analizatorom mreža. . . . .	6
5	Topologija skalarnog analizatora mreža. . . . .	7
6	Oznaka pobudnog generatora. . . . .	8
7	Oznaka usmerenog sprežnjaka. . . . .	9
8	Uz nesavršenost usmerenog sprežnjaka. . . . .	10
9	Uz uticaj neprilagođenja detektora. . . . .	11
10	Uz detektor snage. . . . .	11
11	Uz efekte prilagođenja atenuatorom. . . . .	12
12	Uz uticaj neprilagođenja u izlazu. . . . .	13
13	Kompletan blok dijagram implementiranog analizatora mreža. . . . .	14
14	Blok dijagram komunikacije i upravljanja. . . . .	15
15	Detektor snage. . . . .	15
16	Uz merenja karakteristika detektora snage. . . . .	16
17	HP usmereni sprežnjaci. . . . .	17
18	Refleksioni most. . . . .	18
19	Direktivnost refleksionog mosta, adaptirano i preuzeto iz [5]. . . . .	18
20	Pregled implementiranih klasa i metoda. . . . .	19
21	Postavka karakterizacije detektora snage. . . . .	20
22	Uz interpolaciju karakteristike detektora. . . . .	21
23	Fotografije mernih postavki. . . . .	21
24	Fotografije ispitivanih mreža. . . . .	22
25	Uz ogled 1. . . . .	22
26	Uz ogled 2. . . . .	23
27	Uz ogled 3. . . . .	23
28	Uz ogled 4. . . . .	24

## Sažetak

Analizator mreža je jedan od osnovnih mernih instrumenata za rad u mikrotalasnom području učestanosti. U ovom radu su uvedeni i objašnjeni osnovni principi funkcije tog instrumenta. Realizovana su dva instrumenta radi ilustracije određenih teorijskih rezultata.

Rad je organizovan u pet odeljaka. U uvodu su uvedeni opšti pojmovi koji se odnose na Mikrotalasnu tehniku i merenja. U odeljku „Karakterizacija mreža na mikrotalasnim učestanostima“ uveden je i definisan pojam parametara rasejanja, kao i principi merenja. U odeljku „Analizator mreža“ je definisana osnovna struktura instrumenta i njegove komponente, kao i parametri koji ih definišu. U istom poglavlju su navedeni dobijeni rezultati za kalibraciju senzora nivoa snage koji se koriste u ovom radu i opisana je arhitektura mernog sistema sa strane upravljanja. U odeljku „Rezultati i diskusija“ su navedeni rezultati četiri ogleda koji imaju za cilj demonstraciju rada projektovanog sistema kao i ilustraciju ranije izvedenih teorijskih relacija.

Premisa rada je da je moguće, imajući precizan referentni instrument, odgovarajućim postupkom kalibracije replicirati njegove ključne performanse na značajno pristupačnjem hardveru. U radu je opisana metodologija odabira komponenti koja se može proširiti i na drugačije radne zahteve. Implementirana je i biblioteka u programskom jeziku Python koja komunicira sa uređajima u postavci, čime je korisniku ponuđen jednostavan programski interfejs.

This work is licensed under a Creative Commons  
“Attribution-ShareAlike 4.0 International” license.



Za slaganje najvećeg broja slika u ovom radu korišćena je `Xcircuit` biblioteka dostupna na <http://tnt.etf.rs/~dgrujic/Xcircuit/>, izmenjena i proširena za potrebe rada.

Online repozitorijum sa izvornim kodom dosupan je na <https://github.com/djokicd/ArduinoSNA>.

# 1 Uvod

## 1.1 Mikrotalasna tehnika

Na dovoljno niskim učestanostima kola i komponente se mogu predstaviti modelom mreža sa koncentrisanim parametrima. Takva kola opisuju električne elemente u fizički ograničenom delu prostora između kojih nema elektromagnetske sprege, osim preko kondukcionalih veza provodnicima za povezivanje, koji se modeluju kao idealni kratki spojevi. U takvim kolima se zanemaruju i razni drugi efekti, kao što su efekti prostiranja, a kod idealnih elemenata (otpornik, kalem i kondenzator), smatra se da je izražen samo jedan elektromagnetski fenomen (Džulovi gubici, indukovana elektromotorna sila, odnosno nagomilavanje nanelektrisanja). Ovakva kola su opisana Kirhofovim zakonima, kao i stujno-naponskim karakteristikama pojedinih elemenata koje u opštem slučaju mogu biti nelinearne i nejednoznačne. Električna merenja na ovim učestanostima se, pre svega, usredsređuju na direktna merenja napona i struja.

Mikrotalasna tehnika je oblast elektrotehnike koja se bavi projektovanjem komponenti i kola u opsegu učestanosti od 300 MHz do 300 GHz. Na ovim učestanostima efekti prostiranja dolaze do izražaja, tako da talasna priroda elektromagnetskih pojava dominira, a Kirhofovi zakoni praktično prestaju da važe. Adekvatan opis ovakvih pojava se može izvesti isključivo uz uvažavanje ovih efekata i neposrednu analizu strukture elektromagnetskog polja Maksvelovim jedančinama u opštem slučaju. Procena validnosti pretpostavke o kolu sa raspodeljenim parametrima se može načinti poređenjem sa talasnom dužinom elektromagnetskog talasa koji se prostire u slobodnom prostoru sa najvećom dimenzijom kola. Brzina prostiranja elektromagnetskog talasa u vakuumu je približno  $c_0 \approx 300 \frac{\text{mm}}{\text{ns}}$

pa je talasna dužina  $\lambda_0 = \frac{c_0}{f} \approx \frac{300 \text{ mm/ns}}{f}$ . Ukoliko je talasna dužina mnogo veća od dimenzije uređaja onda se efekti prostiranja praktično mogu zanemariti, a uređaj se, u načelu, može analizirati kao kolo sa koncentrisanim parametrima. U suprotnom, efekti prostiranja su izraženi, a kolo se mora tretirati kao kolo sa raspodeljenim parametrima. U okviru mikrotalasnih učestanosti ove talasne dužine su u opsegu od 1 mm do 1 m, što su ujedno i najčešće dimenzije električnih naprava. Posebno, efekti prostiranja su izraženi u pojedinim sistemima na niskim učestanostima koji su relativno velikih dimenzija, kao što su na primer elektroenergetski vodovi. Suprotno, efekti prostiranja mogu da ne budu izraženi i na visokim učestanostima, reda 10 GHz, na primer u integrisanim kolima koja su malih dimenzija, reda 100 μm. [3, 4]

## 1.2 Mikrotalasna merenja

Klasična električna merenja u elektronici se izvode instrumentima poput osciloskopa, strujnih transformatora ili unimera. U opštem slučaju, za merenje napona je potrebno da merni instrument ostvari kvalitetnu otvorenu vezu (veliku ulaznu impedansu) koja paralelnim vezivanjem na ispitivani element ne remeti značajno topologiju kola; dok je za merenje struja potrebno da merni instrument ostvari kvalitetan kratak spoj (malu ulaznu impedansu) koja rednim vezivanjem na ispitivani element takođe ne remeti topologiju kola. Kolike konkretno treba da budu te impedanse zavisi od prilika u kolu, ali i od odabira mernih opsega odgovarajućih instrumenata. Ostvarivanje takvih kratkih spojeva i otvorenih veza je, u načelu, jednostavno postići u veoma širokom opsegu niskih učestanosti, na primer DC – 1 MHz. Takva merenja uključuju linearne i nelinearne mreže, kao i

jednoznačne i nejednoznačne mreže (npr. merenje histerezisa) [1]. Pri visokim učestanostima (VF), elektronske komponente se mogu dodatno opisati i paraznitnim elementima koji modeluju sekundarne fizičke efekte u komponentama, kućišta uređaja ili same veze između uređaja. Na taj način se, kroz ekvivalentne modele, proširuje opseg učestanosti u kome se i dalje zadovoljavajuće tačno mogu primenjivati Kirhofovi zakoni i klasična teorija električnih kola. Ovaj pristup omogućuje da se karakterišu i kola na znatno višim učestanostima. Ipak, na dovoljno visokim učestanostima, model sa koncentrisanim parametrima prestaje da važi, budući da upravo pretpostavke iz kojih su izvedeni Kirhofovi zakoni prestaju da važe. [2]

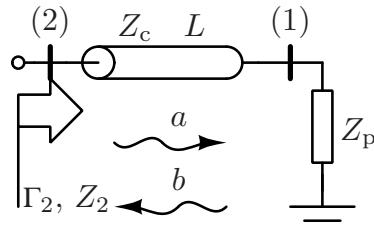
## 2 Karakterizacija mreža na mikrotalasnim učestanostima

### 2.1 Prostiranje talasa na vodovima

Za vodove na visokim učestanostima je neophodna jasna definicija geometrije, što omogućava konkretan opis u elektromagnetskom smislu. Pokazuje se da na cilindričnom vodu konstantnog poprečnog preseka sa homogenim dielektrikom, u prostoperiodičnom režimu, mogu da se prostiru dva transverzalna elektromagnetska talasa u suprotnim smerovima<sup>1</sup> koji su opisani svojim kompleksnim intenzitetima, kao na slici 1. Argumenti kompleksnih intenziteta talasa odgovaraju argumentima kompleksnih predstavnika transverzalnog električnog polja, dok su moduli jednaki korenu srednje snage progresivnog talasa u datom smeru ( $|a| = \sqrt{P_i}$ ,  $|b| = \sqrt{P_r}$ ). Ukoliko se vod zatvori linearnim prijemnikom, zbog posledica graničnog uslova talasne jednačine napona na vodu, uspostavlja se veza između ova dva talasa (Slika 1). U odnosu na prijemnik, talasi se nazivaju incidentnim i reflektovanim, odnosno  $a$  i  $b$  prema slici. Odnos kompleksnih intenziteta incidentnog i reflektovanog talasa se naziva kompleksnim koeficijentom refleksije prijemnika i određen je izrazom

$$\Gamma = \frac{b}{a} = \frac{Z_p - Z_c}{Z_p + Z_c}, \quad (1)$$

gde su  $Z_p$  kompleksna impedansa prijemnika i  $Z_c$  primarni parametar voda i predstavlja njegovu karakterističnu impedansu. Napomenimo da je karakteristična impedansa voda



Slika 1: Vod zatvoren linearnim prijemnikom.

<sup>1</sup>Strogo govoreći, prostiranje transverzalnih elektromagnetskih talasa duž vodova sa nehomogenim dielektrikom nije moguće. Ipak, i u vodovima sa nehomogenim dielektrikom, na nižim mikrotalasnim učestanostima mogu da se prostiru tzv. kvazi-TEM talasi, čije su karakteristike praktično iste kao one kod TEM talasa, pa se te analize ekvivalentiraju. Budući da su takvi vodovi relativno česti u praksi, npr. mikrotrakasti vod, te da ova aproksimacija ne pravi velike greške, u daljem tekstu nećemo razlikovati kvazi-TEM talas od TEM talasa.

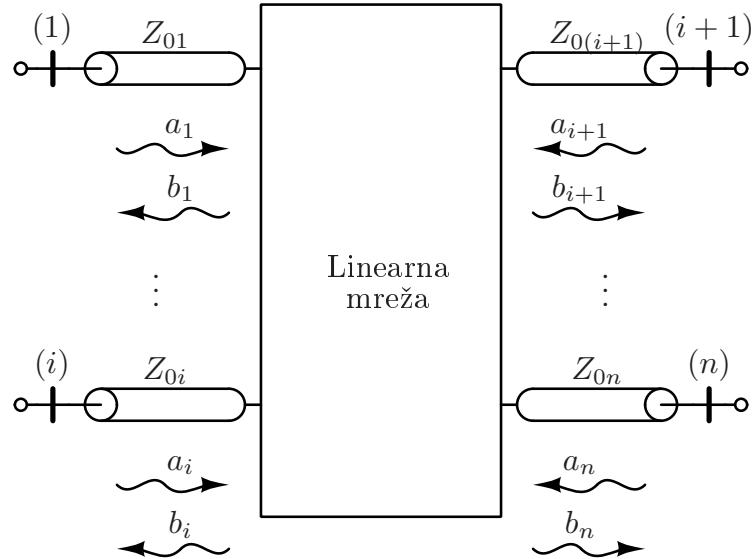
sa gubicima u opštem slučaju kompleksna veličina. Ipak, ukoliko se gubici mogu zanemariti, karakteristična impedansa je praktično realna veličina,  $\text{Im}\{Z_c\} \approx 0$ , pa ćemo zbog toga u nastavku smatrati da je  $Z_c$  čisto realno. Naročito, navedimo da je impedansa  $Z_2$ , u preseku (2), mreže sa slike 1 određena izrazom

$$Z_2 = \frac{Z_p + jZ_c \tan(\beta L)}{Z_c + jZ_p \tan(\beta L)}, \quad (2)$$

gde su  $\beta = \frac{\omega}{c}$  i  $L$  fazni koeficijent i fizička dužina voda, respektivno. Posebno, prijemnik za koji je, prema izrazu (1),  $Z_p = Z_c$ , nema refleksiju ( $\Gamma = 0$ ) i naziva se prilagođenjem. Naglasimo još da su merenja i analiza nelinarnih elemenata u mikrotalasnim kolima značajno složeniji nego na niskim učestanostima i neće biti tema ovog rada.

## 2.2 Parametri rasejanja

Prijemnik opisan u prethodnoj tački se može smatrati za mrežu sa jednim pristupom. U opštem slučaju, mikrotalasne mreže mogu imati i više pristupa, u kom slučaju se koncept koeficijenta refleksije može uopštiti. Na sličan način na koji se definišu impedansni ili admitansni parametri za napone i struje na pristupima, mogu se definisati i parametri rasejanja za intenzitete talasa na pristupima. Posmatrajmo proizvoljnu linearu mrežu, bez generatora, sa  $n$  pristupa prikazanu na slici 2 i usvojimo skup nominalnih impedansi<sup>2</sup>  $Z_{01}, Z_{02}, \dots, Z_{0n}$ . Budući da je mreža linear, veza između vektora  $[\mathbf{b}] = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n]^T$  i  $[\mathbf{a}] = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n]^T$  je linear i može se raspisati matrično kao



Slika 2: Uz definiciju parametara rasejanja.

---

<sup>2</sup>Nominalnim impedansama se može pripisati i fizički smisao. Nominalne impedanse se mogu shvatiti i kao karakteristične impedanse vodova za koje se očekuje da će se koristiti za povezivanje posmatrane mreže u ostatak kola. U tom slučaju, analiza i merenje mreže su značajno jednostavniji nego ako bi se definisao jedan skup nominalnih impedansi, a za merenje koristio drugačiji skup karakterističnih impedansi vodova za povezivanje.

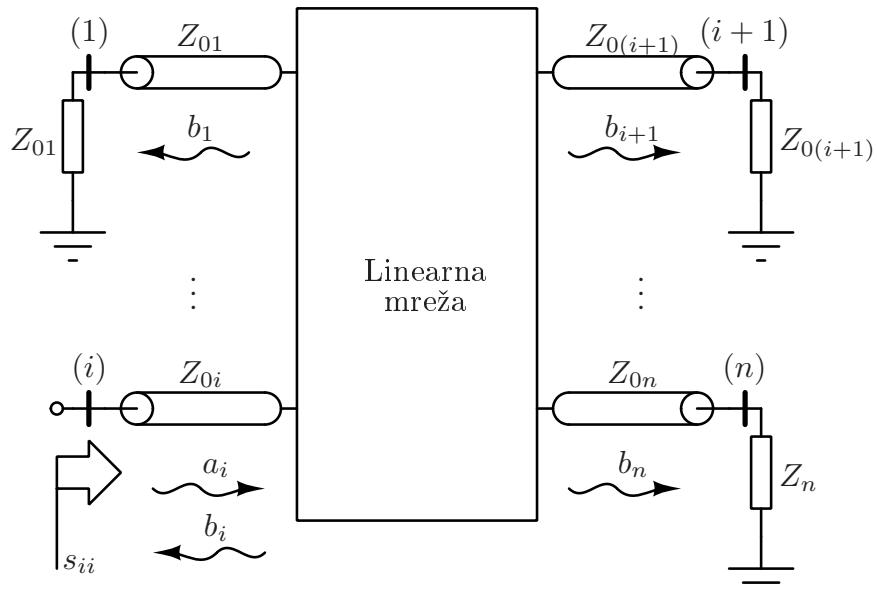
$$[\mathbf{b}] = [\mathbf{S}][\mathbf{a}] \quad \text{gde je} \quad [\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nn} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

gde su  $s_{ij}$  odgovarajući parametri rasejanja. Parametri rasejanja zavise od nominalnih impedansi, tako da je linearna mreža bez nezavisnih generatora opisana u potpunosti matricom rasejanja i odabirom nominalnih impedansi. U praksi je najčešće da su sve nominalne impedanse jednake  $Z_{01} = Z_{02} = \dots = Z_{0n} = Z_0$ , a u mikrotalasnoj tehnici je ustaljena standardna vrednost nominalne impedanse od  $Z_0 = 50\Omega$ , mada ima i drugih standarda.

Postupak merenja parametara rasejanja se izvodi koristeći se obrazloženim principom prilagođenja pristupa (*i*) da bi se anulirao odgovarajući incidentni talas  $a_i$  na svim prilagođenim pristupima. Ovaj postupak je ilustrovan na slici 3. Zamenom  $a_j = 0$  za  $j \neq i$  i  $1 \leq j \leq n$  u izraz (3) dobijaju se veze

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_i \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ a_i \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} b_1 = s_{1i}a_i \\ b_2 = s_{2i}a_i \\ \vdots \\ b_i = s_{ii}a_i \\ \vdots \\ b_n = s_{ni}a_i \end{cases}. \quad (4)$$

Na osnovu dobijenog rezultata parametri  $s_{ki} = \frac{b_k}{a_i}$  ( $k \neq i$ ) predstavljaju parametre prenosa kroz mrežu od  $i$ -tog ka  $k$ -tom pristupu kada su svi ostali pristupi zatvoreni svojim nominalnim impedansama. Prenetu snagu (na osnovu koje je moguće izračunati intenzitet talasa  $b_k$ ) talasa je potrebno premeriti u okviru prijemnika na  $k$ -tom pristupu,

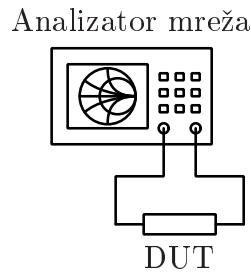


Slika 3: Uz merenje parametara rasejanja.

odnosno, taj prijemnik bi trebalo da bude dobro prilagođen detektor snage<sup>3</sup>. Za parametar  $s_{ii} = \frac{b_i}{a_i}$  je jasno, na osnovu izraza (1), da predstavlja koeficijent refleksije na  $i$ -tom pristupu i potrebno ga je meriti razdvajanjem incidentnog i reflektovanog talasa, o čemu će biti reči kasnije.

Prokomentarišimo još da je karakterizacija mikrotalasnih mreža jednostavnija prema parametrima rasejanja i zbog toga što je tehnička realizacija širokopojasnih prilagođenja jednostavnija nego kratkih spojeva i otvorenih veza. Dodatno, nekada je nemoguće napraviti kvalitetan kratak spoj ili otvorenu vezu. Na primer, kratak spoj u vidu vije na štampanoj ploči, ukoliko je supstrat dovoljno debeo, ili otvoreni kraj talasovoda koji onda i zrači tokom merenja. Takođe, kratak spoj i otvorena veza odgovaraju prijemnicima maksimalnog koeficijenta refleksije što može da poremeti rad ispitivanih aktivnih naprava kao što su, na primer, pojačavači.

### 3 Analizator mreža



Slika 4: Uz merenje analizatorom mreža.

Instrument koji može da meri karakteristike linearnih mikrotalasnih mreža se naziva analizatorom mreža. Najčešće, minimalna funkcionalnost ovih instrumenata uključuje automatsko merenje parametara rasejanja barem dvopristupnih mreža u nekom opsegu učestanosti, mada može uključivati i složeni sistem obrade dobijenih rezultata. Analizator treba da pobuđuje mrežu i da na odgovarajući način prati njen odziv. Mada je principska šema za merenje parametara rasejanja, ilustrovana na slici 3, jednostavna, tehnički detalji ovakvih realizacija, kao i nesavršenosti komponenti, iziskuju složenije topologije u cilju izvođenja i optimizacije merenja. Šema povezivanja instrumenta treba da bude jednostavna i prikazana je na slici 4.

U pogledu složenosti merenja parametara rasejanja analizatori mreža se načelno dele na

- Vektorske analizatore mreža (eng. *Vector Network Analyzer* – VNA) koji imaju mogućnost da mere i modul i argument  $s$ -parametara, time u potpunosti opisujući mrežu; i
- Skalarne analizatore mreža (eng. *Scalar Network Analyzer* – SNA) koji mogu da mere samo modul  $s$ -parametara, čime se mreža delimično opisuje.

---

<sup>3</sup>Ovi detektori snage mogu biti utemeljeni na različitim fizičkim principima. Neki mere zagrevanje na račun disipirane snage u vidu JOULEovih gubitaka, dok su neki zasnovani na aktivnim logaritamskim detektorima. Razlikuju se prema osnovnim karakteristikama, opsegu ulazne snage i preciznosti.

Iako vektorski analizatori u potpunosti opisuju mrežu, njihova složenost, a samim tim i cena, je višestruko veća od skalarnih. Ipak, skalarni analizatori su često dovoljni za karakterizaciju gotovih, najčešće jednopristupnih ili dvopristupnih sistema kao što su antene, filtri ili pojačavači. U tom pogledu se definisu naročiti tehnički nazivi modula parametara rasejanja dvopristupnih mreža, i to

1. Povratni gubici na ulaznom pristupu (eng. *Input Return Loss*),

$$IRL = -20 \log_{10} |s_{11}| [\text{dB}];$$

2. Povratni gubici na izlaznom pristupu (eng. *Output Return Loss*),

$$ORL = -20 \log_{10} |s_{22}| [\text{dB}];$$

3. Uneto slabljenje (eng. *Insertion loss*),

$$IL = -20 \log_{10} |s_{21}| [\text{dB}],$$

za mreže sa gubicima u prenosu; i

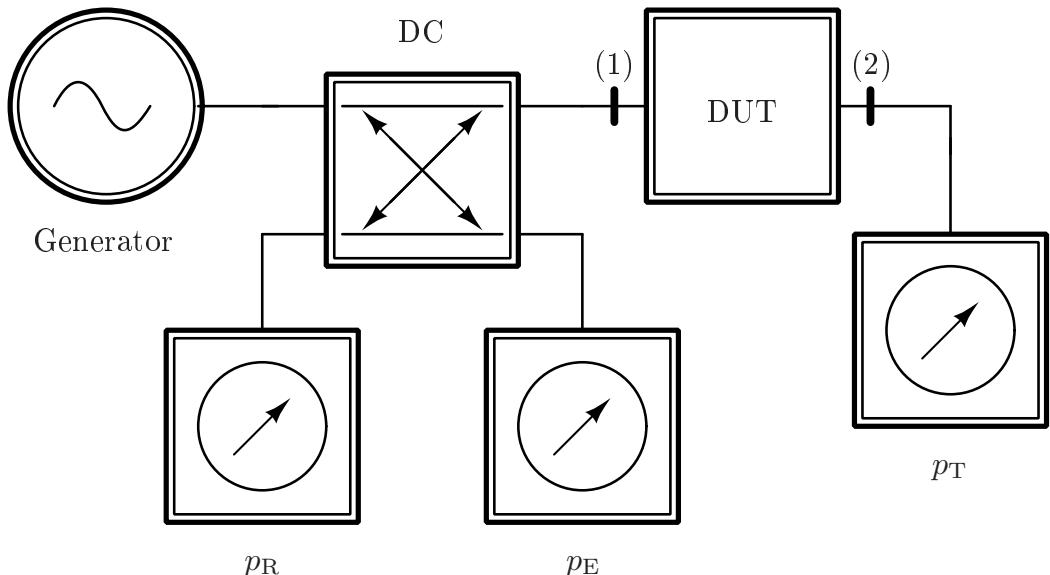
4. Pojačanje snage (eng. *Gain*),

$$G = 20 \log_{10} |s_{21}| [\text{dB}],$$

za mreže koje ostvaruju pojačanje.

### 3.1 Komponente SNA

Blok dijagram osnovnog skalarnog analizatora mreža je prikazan na slici 5. Na slici su prikazani pobudni generator, ispitivani uređaj (eng. *Device Under Test* - DUT), usmereni sprežnjak (obeležen sa DC) i tri detektora nivoa snage  $p_E$ ,  $p_R$  i  $p_T$ . Zadatak usmerenog sprežnjaka je da razdvoji incidentni i reflektovani talas na pristupu (1) ispitivanog uređaja,



Slika 5: Topologija skalarnog analizatora mreža.

dok detektori snage mere incidentnu snagu i treba da budu dobro prilagođeni. Merenja nivoa snaga  $p_E$ ,  $p_R$  i  $p_T$  predstavljaju: jedinični/referentni nivo snage, nivo reflektovane snage i nivo transmitovane snage, respektivno. Na osnovu rezultata merenja ovih snaga se ustanovljavaju parametri rasejanja prema<sup>4</sup>

$$|s_{11}| = \sqrt{\frac{P_R}{P_E}} \Rightarrow s_{11}^{[\text{dB}]} = p_R^{[\text{dBm}]} - p_E^{[\text{dBm}]}, \quad |s_{21}| = \sqrt{\frac{P_T}{P_E}} \Rightarrow s_{21}^{[\text{dB}]} = p_T^{[\text{dBm}]} - p_E^{[\text{dBm}]} \quad (5)$$

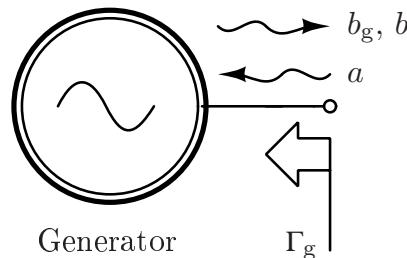
Ova konkretna topologija omogućava merenje povratnih gubitaka i unetog slabljenja, tako da je za merenje sva četiri parametra rasejanja za dvoportne mreže neophodno izvršiti merenje za dve topologije, u kojima se razlikuje pozicija pobudnog generatora i mesta gde se mere nivoi snaga. Ovaj problem principski nije teško rešiti uvođenjem dva poluprovodnička preklopnika, ali ćemo se u ovom radu, radi jednostavnosti, zadržati na ovoj topologiji. U nastavku će detaljno biti opisane karakteristike i ograničenja ovih komponenti koje utiču na rad sistema.

### 3.1.1 Pobudni generator

Pobudni generator treba da bude prilagođeni generator koji pobuđuje incidentan talas na jednoj učestnosti za koju je konfigurisan. Blok simbol generatora je prikazan na slici 6. Generator treba da obezbedi programsko podešavanje učestanosti, dok nivo signala treba da bude dovoljno veliki tako da snaga koja stiže do detektora bude dovoljno velika da premašuje prag osetljivosti. Ukoliko je dodatno potrebno regulisati i izlaz generatora prema snazi, moguće je postaviti i digitalni atenuator, a onda u povratnoj sprezi sa odgovarajućim senzorom podešavati izlaznu snagu (eng. *Automatic Level Control – ALC*). U pogledu intenziteta talasa, ponašanje generatora je opisano izrazom

$$b = b_g + \Gamma_g a. \quad (6)$$

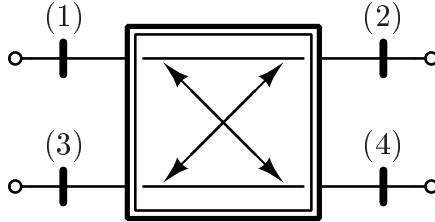
Glavne karakteristike generatora koje ograničavaju njegove performanse su neprilagođenje i fazni šum. Neprilagođenje ograničava dinamički opseg, dok fazni šum, koji predstavlja kratkoročnu nestabilnost učestanosti, predstavlja ograničenje u pogledu rezolucije po učestanosti. U ovom radu se neće detaljno razmatrati uticaji pobudnog generatora i smatraće se da je on savršen.



Slika 6: Oznaka pobudnog generatora.

---

<sup>4</sup>Jedinica dBm je decibel u odnosu na milivat i predstavlja logaritamsku meru nivoa snage definisanu sa  $p = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{1 \text{ mW}} \right) \text{ dBm}$



Slika 7: Oznaka usmerenog sprežnjaka.

### 3.1.2 Usmereni sprežnjak

Usmereni sprežnjak (eng. *Directional Coupler – DC*) je pasivna mreža sa četiri pristupa, čija je uloga da razdvoji incidentni i reflektovani talas na vodu. Njegova oznaka je prikazana na slici 7. Usmereni sprežnjaci pogodni za primenu u analizatorima mreža imaju takvu karakteristiku da su njihovim priključenjem na liniju gde se mere snage incidentnog i reflektovanog talasa praktično „nevidljivi“ u ostatku kola. To podrazumeva da su uloge pristupa određene prema:

1. Ulazni pristup — Talas doveden na ulazni pristup se u najvećoj meri prenosi do izlazanog pristupa;
2. Izlazni pristup — Talas doveden na izlazni pristup se u najvećoj meri prenosi do ulaznog pristupa;
3. Izolovani pristup — Do ovog pristupa **ne** dolazi talas kojim je pobuđen ulazni pristup, ali dolazi deo talasa koji se reflektuje na izlaznom pristupu;
4. Spregnuti pristup — Do ovog pristupa dolazi talas kojim je pobuđen ulazni pristup, ali **ne** dolazi deo talasa koji se reflektuje na izlaznom pristupu.

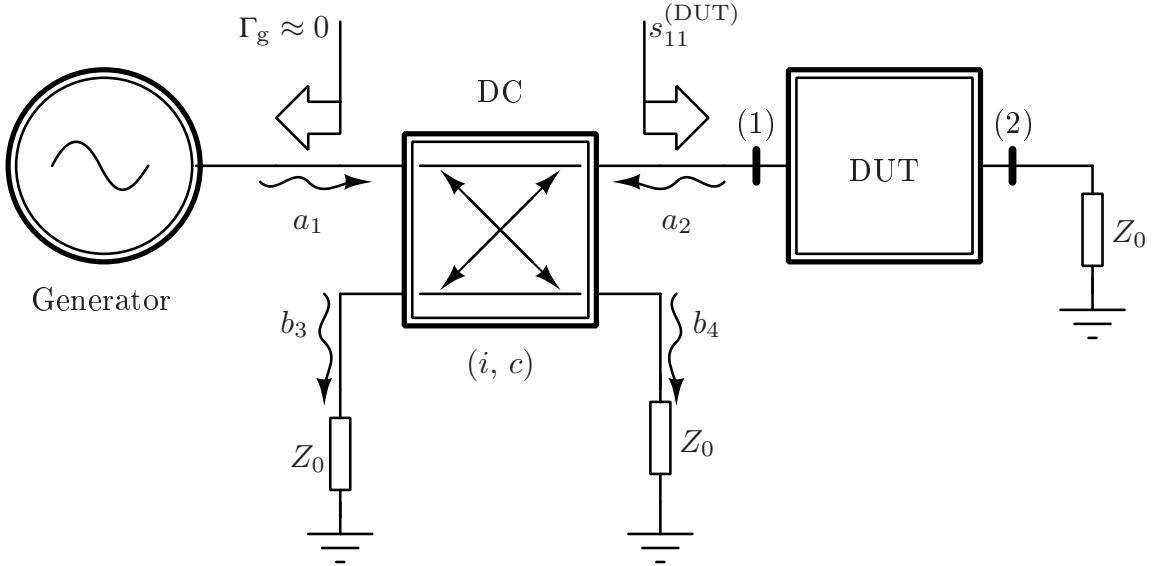
Parametri rasejanja realnog usmerenog sprežnjaka, pod pretpostavkom da su pristupi savršeno prilagođeni, opisani su parametrima  $c$  (eng. *coupling*) i  $i$  (eng. *isolation*) koji kvantizuju u kojoj meri dolazi do navedenih prenosa kao

$$[\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} 0 & \underline{E} & \underline{i} & \underline{c} \\ \underline{E} & 0 & \underline{c} & \underline{i} \\ \underline{i} & \underline{c} & 0 & \underline{E} \\ \underline{c} & \underline{i} & \underline{E} & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Kako je u usmerenim sprežnjacima koji se koriste u okviru analizatora mreža  $1 \gg |\underline{c}| \gg |\underline{i}|$ , to je  $|\underline{E}| \approx 1$ , na osnovu osobine da je  $s$ -matrica pasivne mreže bez gubitaka ortonormalna. Odnos modula parametara sprege i izolacije se naziva direktivnošću usmerenog sprežnjaka i definiše se kao  $D = \frac{|\underline{c}|}{|\underline{i}|}$ .

Osnovna nesavršenost usmerenog sprežnjaka je uzrokovana prenosom talasa sa izolovanog porta ( $i \neq 0$ ). Za određivanje uticaja te nesavršenosti posmatrajmo deo kola prikazan na slici 8, gde su detektori i deo kola desno od ispitivanog uređaja zamenjeni prilagođenjima, a pobudni generator je savršeno prilagođen. Neka su  $a_1$  i  $a_2$  intenziteti incidentnih talasa na pristupima (1) i (2) redom<sup>5</sup>. Tada su granice za intenzitete talasa

<sup>5</sup>U ovoj tački, i u nastavku rada, ispraćena je konvencija da su moduli kompleksnih veličina obeleženi bez podvlačenja, odnosno,  $z = |z|$ ,  $z \in \mathbb{C}$ .



Slika 8: Uz nesavršenost usmerenog sprežnjaka.

koji dolaze do pristupa (3) i (4) određeni izrazima<sup>6</sup>  $b_3 = ca_2 \pm ia_1$  i  $b_4 = ca_1 \pm ia_2$ . Uzveši u obzir topologiju sa slike 5, zaključujemo da su  $a_R = b_3$  i  $a_E = b_4$ , odakle se, imajući u vidu izraz (5), ima rezultat merenja  $s_{11}^{(m)} = \frac{a_R}{a_E} = \frac{ca_2 \pm ia_1}{ca_1 \pm ia_2}$ . Primetimo dodatno da su  $a_2 = Es_{11}^{(\text{DUT})}a_1 \approx s_{11}^{(\text{DUT})}a_1$  i  $ca_1 \gg ia_2$ , odakle se ima

$$s_{11}^{(m)} = \frac{ca_2 \pm ia_1}{ca_1 \pm ia_2} \approx \frac{cs_{11}^{(\text{DUT})}a_1 \pm ia_1}{ca_1} = s_{11}^{(\text{DUT})} \pm \frac{i}{c}, \quad (8)$$

odakle sledi da je granica apsolutne greške merenja određena direktivnošću:

$$\Delta s_{11} = \frac{i}{c} = \frac{1}{D}. \quad (9)$$

### 3.1.3 Detektor snage

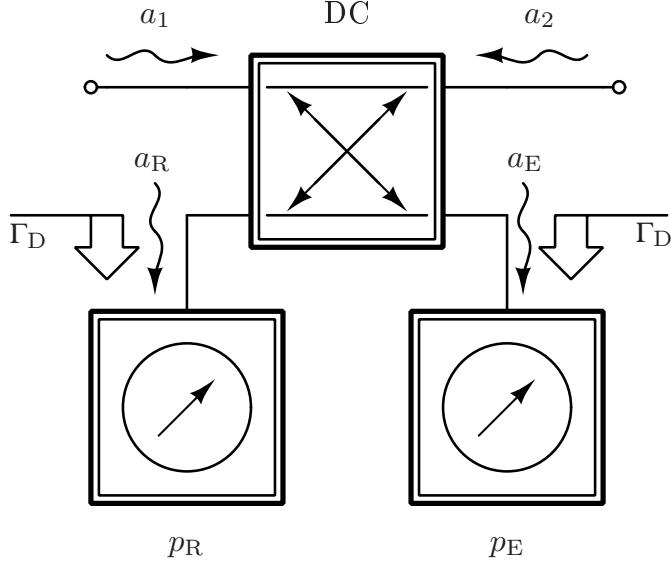
Detektor se u kolu ponaša kao linearni prijemnik čiji koeficijent refleksije može da zavisi od učestanosti,  $\Gamma_D = \Gamma_D(\omega)$ . Detektor generiše stalni napon koji je određen primljrenom snagom prema njegovoj statičkoj karakteristici prenosa koja može biti i nelinearna. Šematski simbol detektora je prikazan na slici 10a.

Osnovna nesavršenost detektora ogleda se u njegovom neprilagođenju. Ukoliko je refleksija na njemu mala, onda se može smatrati da se jednom reflektovani talas praktično ne vraća do detektora. Budući da senzor meri primljenu snagu, pod ovom pretpostavkom se može uspostaviti veza između incidentne snage  $P_i$  i izmerene snage  $P_D$  kao

$$P_i = \frac{P_D}{1 - |\Gamma|^2}, \quad (10)$$

Sekundarna nesavršenost detektora jeste ograničenje mernog opsega nivoa snaga. Osetljivost senzora je određena minimalnim nivoom snage koju senzor pouzdano može da meri  $p_{D,\min 0}$ .

<sup>6</sup>Znakom „±“ se označava uticaj izolovanog signala koji je mali i koji se u dva granična slučaja sabira i oduzima po intenzitetu. Ekvivalentno je  $a - b \leq |a + b| \leq a + b$ , za  $|b| < |a|$ .



Slika 9: Uz uticaj neprilagođenja detektora.

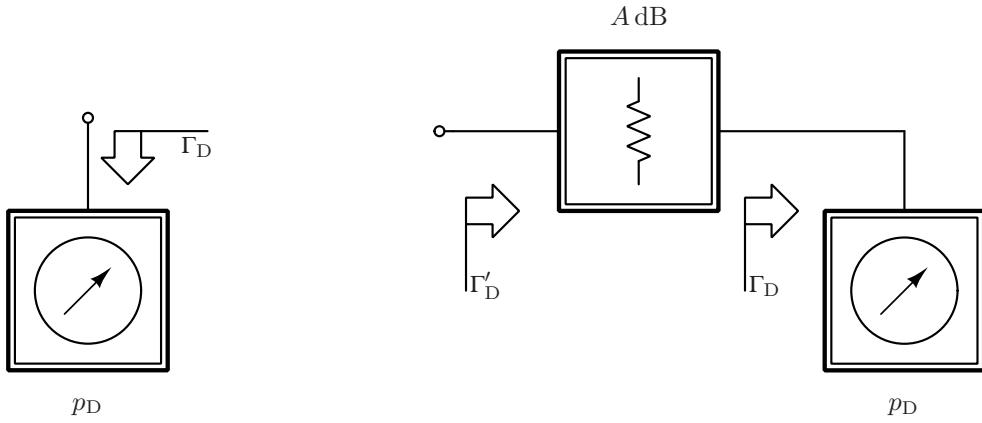
Uticaj neprilagođenja detektora se može ustanoviti postupkom analognim onome izvedenom u prethodnoj tački. Razmotramo deo kola sa slike 9. Za intenzitete incidentnih talasa detektora, ponovno usvojivši  $a_2 \approx s_{11}^{(\text{DUT})} a_1$ , mogu se pisati veze

$$\begin{aligned} a_R &= c s_{11}^{(\text{DUT})} a_1 \pm i a_1 + \Gamma_D a_E, \\ a_E &= c a_1 \pm i s_{11}^{(\text{DUT})} a_1 + \Gamma_D a_R. \end{aligned} \quad (11)$$

Rešavanjem ovog sistema jednačina po  $a_R$  i  $a_E$  se može odrediti veza<sup>7</sup>

$$\frac{a_R}{a_E} = \frac{\pm i(1 + s_{11}^{(\text{DUT})}\Gamma_D) + c(s_{11}^{(\text{DUT})} + \Gamma_D)}{c(1 + s_{11}^{(\text{DUT})}\Gamma_D) \pm i(s_{11}^{(\text{DUT})} + \Gamma_D)} \approx \frac{s_{11}^{(\text{DUT})} + \Gamma_D}{1 + s_{11}^{(\text{DUT})}\Gamma_D} \pm \frac{1}{D}. \quad (12)$$

Na osnovu ovog izraza, greška merenja je  $\Delta s_{11} = \frac{s_{11}^{(\text{DUT})} + \Gamma_D}{1 + s_{11}^{(\text{DUT})}\Gamma_D} \pm \frac{1}{D} - s_{11}^{(\text{DUT})}$ , sređivanjem



Slika 10: Uz detektor snage.

<sup>7</sup>Znak „±“ treba tretirati na isti način kao u pređašnjem izvođenju

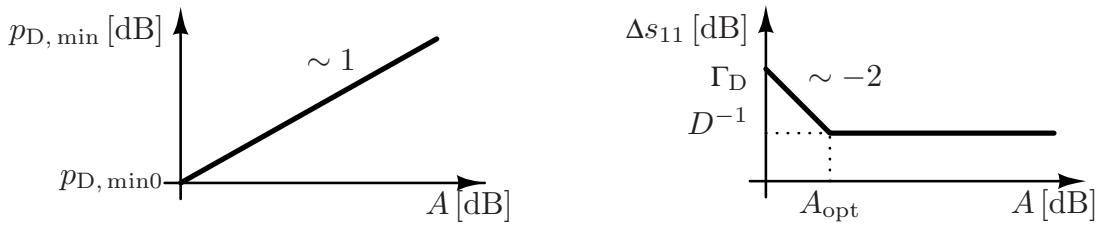
se dobija  $\Delta s_{11} = \Gamma_D \frac{1 - s_{11}^{(\text{DUT})}}{1 + \Gamma_D s_{11}^{(\text{DUT})}} \pm \frac{1}{D}$ . U najgorem slučaju ( $s_{11}^{(\text{DUT})} = 0$ ), nalazi se granica greške merenja je  $\Delta s_{11} = \frac{1}{D} + \Gamma_D$ , odakle se zaključuje da prilagođenje detektora treba da bude istog reda veličine kao direktivnost usmerenog sprežnjaka, inače direktivnost ima ograničavajući uticaj, a dalja poboljšanja prilagođenja neće imati značajan doprinos.

Prilagođenje detektora se može pobošljati povezivanjem atenuatora kao na slici 10b. Pokazuje se da se na ovaj način prilagođenje poboljšava za dvostruko slabljenje atenuatora (izraženo u decibelima),

$$\Gamma'_D[\text{dB}] = \Gamma_D[\text{dB}] - 2A[\text{dB}]. \quad (13)$$

Ovakvo prilagođenje je pogodno za ovaku primenu pre svega zbog njegove širikopojanosti. Ipak, budući da ono unosi gubitke, minimalna snaga koju detektor može da izmeri postaje veća. Zbog toga ovakvo prilagođenje predstavlja kompromis između dinamičkog opsega i efektivne osetljivosti detektora. Optimalno prilagođenje je na osnovu pređašnje diskusije ono za koje je apsolutna greška merenja najmanja, pri čemu je dinamički opseg maksimalan. Ovaj kompromis je aproksimativno ilustrovan graficima sa slike 11. Ukoliko je prilagođenje detektora veoma loše  $\Gamma_D \approx 0 \text{ dB}$ , onda je optimalna atenuacija

$$A_{\text{opt}}^{[\text{dB}]} = \frac{1}{2}D^{[\text{dB}]} \quad (14)$$



(a) Uticaj na prag osetljivost detektora. (b) Uticaj na apsolutnu grešku merenja.

Slika 11: Uz efekte prilagođenja atenuatorom.

### 3.1.4 Uticaj neprilagođenja u izlazu

Ukoliko je drugi pristup ispitivane mreže zatvoren nesavršenim prilagođenjem koeficijenta refleksije  $\Gamma \neq 0$  kao na slici 12, onda se može pokazati da je ulazni koeficijent refleksije mreže određen izrazom

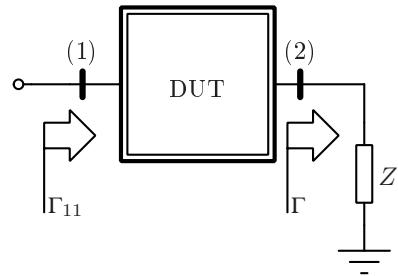
$$\Gamma_{11} = s_{11}^{(\text{DUT})} + \frac{s_{12}^{(\text{DUT})} \Gamma s_{21}^{(\text{DUT})}}{1 - \Gamma s_{22}^{(\text{DUT})}}. \quad (15)$$

Zamenom dobijenog rezultata u (8), usvojivši da je  $1 \gg \Gamma s_{22}^{(\text{DUT})}$ , ima se

$$s_{11}^{(\text{m})} = s_{11}^{(\text{DUT})} \pm (D^{-1} + s_{12}^{(\text{DUT})} s_{21}^{(\text{DUT})} \Gamma). \quad (16)$$

U najgorem slučaju, za pasivne mreže ( $s_{21}^{(\text{DUT})} s_{12}^{(\text{DUT})} = 1$ ), granica apsolutne greške merenja je  $\Delta s_{11} = \frac{1}{D} + \Gamma$ , što postavlja praktičnu granicu na kvalitet prilagođenja. Prilagođenje treba da bude istog reda veličine kao i direktivnost, inače direktivnost ima ograničavajući

uticaj, a dalja poboljašanja prilagođenja neće imati značajan doprinos. Sa druge strane, treba imati u vidu da, za razliku od prilagođenja detektora, prilagođenje na izlazu nije stvar kompromisa i može biti po želji dobro. U ovom radu je usvojeno da je to prilagođenje veoma kvalitetno.



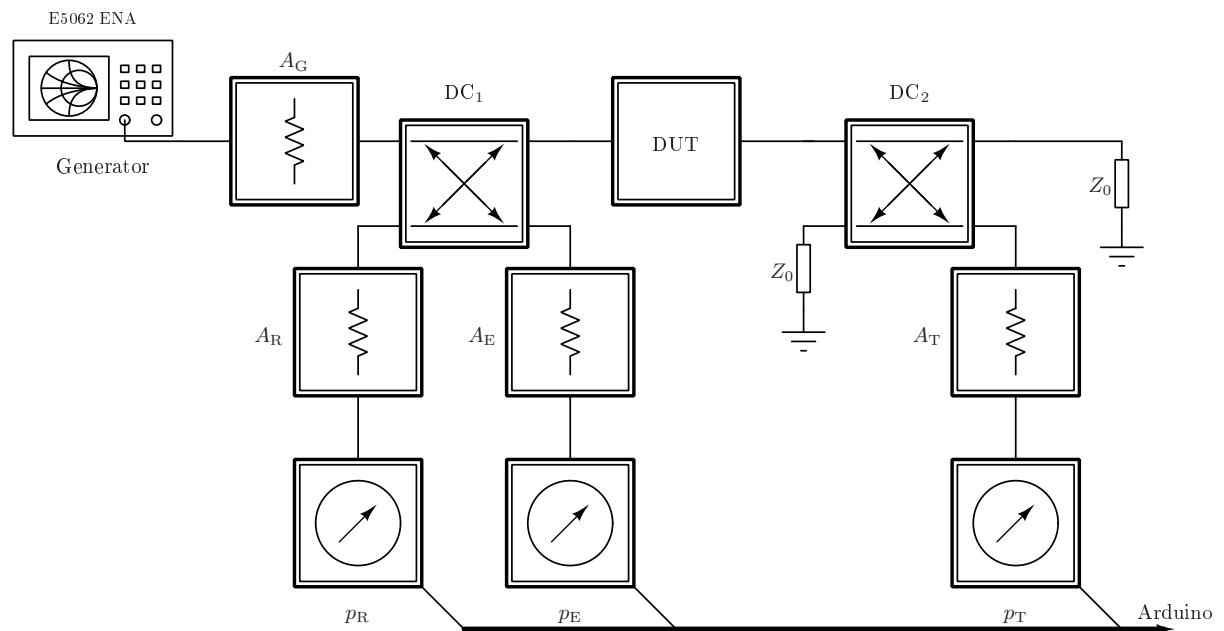
Slika 12: Uz uticaj neprilagodenja u izlazu.

## 4 Aparatura i metode

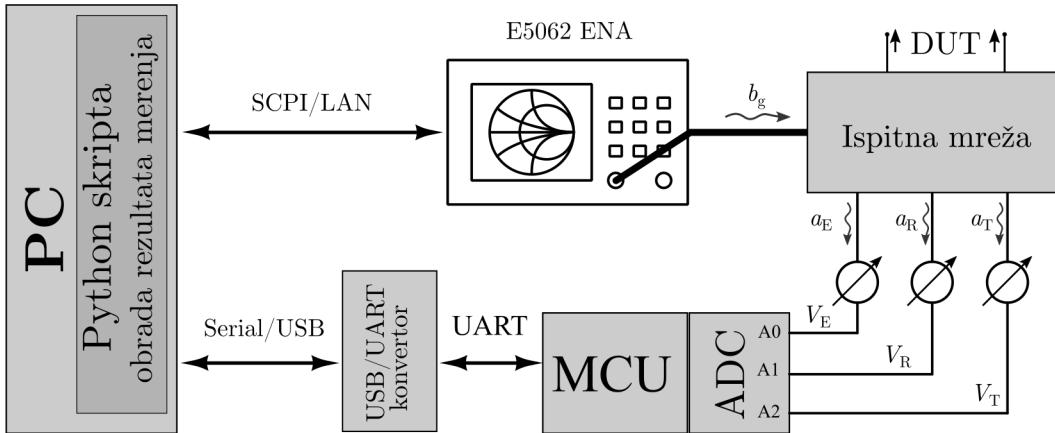
### 4.1 Opšti pregled sistema

Blok šema implementiranog sistema je prikazana na slici 13. Kolo za merenje refleksije ispitivane mreže (DUT) se sastoji iz generatora pobudnog signala, usmerenog sprežnjaka  $DC_1$  i detektora snage reflektovanog i referentnog talasa  $p_R$  i  $p_E$  respektivno. Na izlaznoj strani, kolo za merenje transmisije se sastoji od usmerenog sprežnjaka  $DC_2$ , detektora snage transmitovanog talasa  $p_T$  kao i dva prilagođenja u kojima se u idealnom slučaju disipira većina energije transmitovanog talasa. Na izlaznom kolu za merenje transmisije je postavljen drugi usmereni sprežnjak da bi snaga koju meri detektor  $p_T$  bila uskladena sa nivoom referentnog signala bez dodatnog nepoznatog koeficijenta. Detektori koji su korišćeni su zasnovani na komercijalno dosupnom logaritamskom detektoru *Analog Devices AD8318* [9]. Detektor ima analogni naponski izlaz čiji je naponski nivo određen snagom koja se disipira u senzoru. Opseg nivoa snaga koje ovaj senzor može pouzdano da meri je nominalno između  $-60 \text{ dBm}$  i  $5 \text{ dBm}$ , dok je odgovarajući napon na izlazu senzora između  $0,6 \text{ V}$  i  $2,0 \text{ V}$  i praktično je monotan sa ulaznom snagom. Sva tri detektora su implementirana pomoću ovog senzora, a njihova merenja napona  $V_E$ ,  $V_R$  i  $V_T$  se koriste kao ulazi algoritma koji određuje parametre ispitivane mreže.

Kao generator signala se koristi prvi pristup (CH1) analizatora mreža *Agilent E5062 ENA* digitalno upravljan pomoću računara, od koga dobija naredbe preko LAN mreže koristeći SCPI protokol (eng. *Standard Commands for Programmable Instruments*) koji je realizovan pomoću odgovarajuće skripte u programskom jeziku Python. Na slici 14 je prikazana blok šema komunikacije i signala koje se koriste u sistemu. Mikrokontroler (MCU) koji se koristi je *Arduino UNO* koji na svom internom A/D konvertoru očitava analogne napone  $V_E$ ,  $V_R$  i  $V_T$  sa fizičkom rezolucijom od 10 b. Mikrokontroler dalje komunicira sa računarom putem *USB/Serial* protokola a obrada sirovih odbiraka napona se vrši dalje na računaru u okviru implementirane biblioteke.



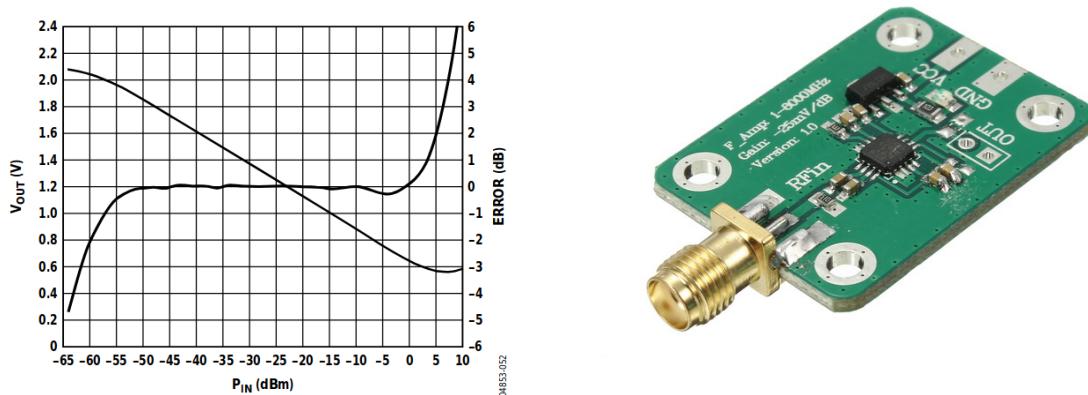
Slika 13: Kompletan blok dijagram implementiranog analizatora mreža.



Slika 14: Blok dijagram komunikacije i upravljanja.

## 4.2 Detektori snage

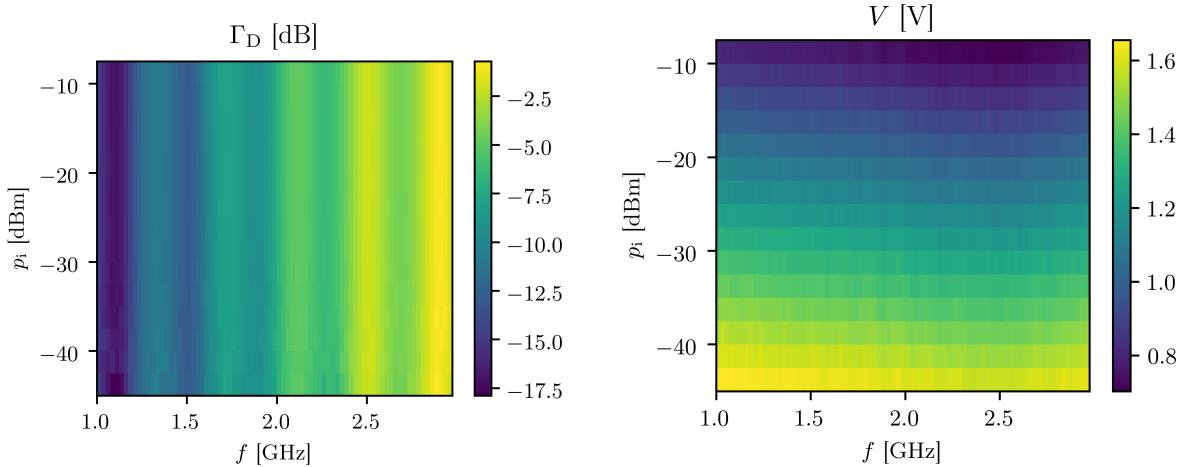
Na slici 15a je prikazan dijagram statičke karakteristike senzora koji se nalazi u dokumentaciji proizvođača [9]. Budući da je korišćeni senzor nepoznatim postupkom implementiran na razvojnoj pločici čija fotografija je prikazana na slici 15b, najverovatnije je da optimalne performanse u pogledu dinamičkog opsega, kao i opsega radnih učestanosti, nisu omogućene usled ograničenja dizajna same štampane počice. Radi određivanja ovih ograničenja, kao i verifikacije rada, njegova prenosna karakteristika je izmerena detaljno u zavisnosti od incidentne snage i učestanosti,  $V = V(P, f)$ , što je prikazano na slici 16b. Može se primetiti da karakteristika, pored incidentne snage detektora, značajno zavisi i od učestanosti. Delimični razlog za to je i jaka zavisnost koeficijenta refleksije od učestanosti, čime se incidentna snaga i izmerena snaga na senzoru razlikuju, a prema izrazu (10). Iz ovog razloga će kalibracioni metod uzimati u obzir i izmerenu incidentnu snagu i učestnost na kojoj se meri. U cilju karakterizacije senzora u smislu mikrotalasnog prijemnika izmeren je i koeficijent refleksije senzora u zavisnosti od učestanosti i incidentne snage,  $\Gamma_D = \Gamma_D(P, f)$  što je prikazano na slici 16a. Oba merenja su obavljena automatizovano



(a) Statička karakteristika senzora iz dokumentacije [9].

(b) Fotografija.

Slika 15: Detektor snage.



(a) Zavisnost koeficijenta refleksije od napona i učestanosti.  
(b) Zavisnost napona od snage i učestanosti.

Slika 16: Uz merenja karakteristika detektor-a snage.

na analizatoru mreža Agilent E5062 ENA koji je upravljan računarom prema postupku koji je opisan u odeljku 4.4.3. Na slici 16a se može primetiti da je talasnost koeficijenta refleksije po učestanosti značajna, a da je prilagođenje na višim učestanostima naročito loše. Ovaj problem se rešava na način opisan u odeljku 3.1.3.

### 4.3 Usmereni sprežnjaci

Korišćene su dve postavke usmerenih sprežnjaka čije karakteristike su u nastavku opisane.

#### 4.3.1 Profesionalni usmereni sprežnjaci)

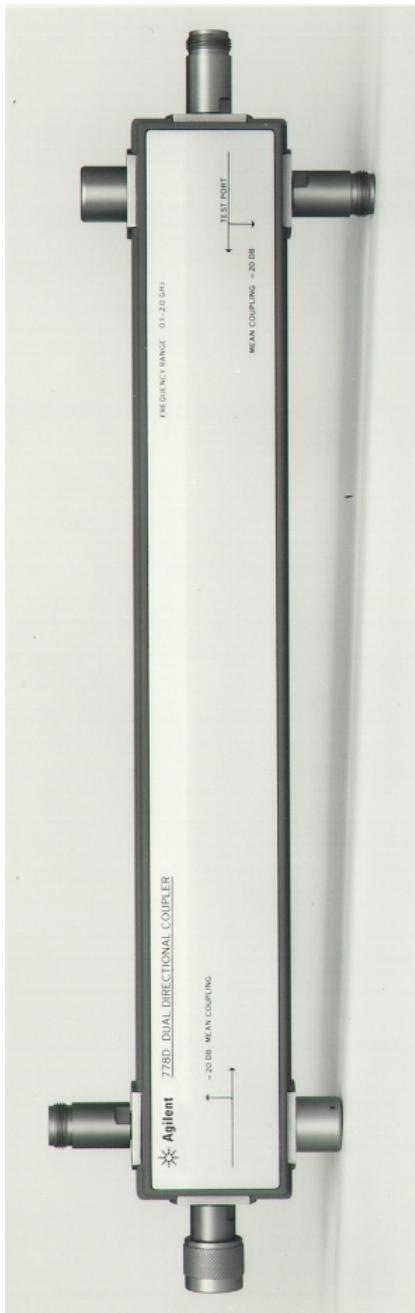
Usmereni sprežnjaci, čije su oznake modela 778D i 796D, proizvođača Hewlett-Packard, su prikazani na slikama 17a i 17b. Usmereni sprežnjak 778D radi u opsegu učestanosti 960—2110 MHz, dok sprežnjak 796D radi u opsegu 100—2000 MHz. Sprega oba sprežnjaka iznosi približno  $c \approx 20$  dB, dok su im direktivnosti  $D \approx 30$  dB navedene u dokumentaciji [6, 7]. Važno je naglasiti da sprežnjak 778D ima četiri pristupa čime odgovara opisu iz poglavљa 3.1.2, dok uređaj 796D ima jedno ugrađeno prilagođenje na pristupu (3) sa slike 7, čime je pogodan da se koristi kao uređaj DC<sub>2</sub> sa slike 13. Oba usmerena sprežnjaka su realizovana u mikrotrikastoj tehnici.

#### 4.3.2 Refleksioni most

Model refleksionog mosta koji je korišćen je prikazan na slici 18a. Ovaj usmereni sprežnjak se realizuje kao mreža sa koncetrisanim parametrima čija pincipska šema je prikazana na slici 18b. Performanse mreže dominantno ograničavaju efekti uzrokovani feritnim simetrizatorom (balunom). Nominalni opseg učestanosti u kome radi most je 0,1—3000 MHz. Direktivnost sprežnjaka je bolja u nižem opsegu učestanosti, kao što je prikazano i na karakteristici sa slike 19. Sa te karakteristike se može komentarisati da je ovaj model mosta primenjiv za kvalitetna merenja u opsegu do oko 2,5 GHz i za indika-

tivna merenja dalje do 3 GHz. Tehnike poboljšanja karakteristika sistema opisane u 3.1.3 mogu doprineti radu, posebno pri primeni ovog modela usmerenog sprežnjaka.

Jedan od nedostataka ovog uređaja je nedostatak pristupa koji izoluje talas incidentan na ulaznom (IN) pristupu čime nije moguće direktno dobiti referentni signal, što se inače izvodi izdvajanjem dela pobudnog signala pomoću prilagođenog rezistivnog razdelnika snage. Ovakva topologija sprežnjaka se koristi u analizatorima mreža budući da se njegove kvalitetne realizacije mogu učiniti veoma širokopojasnim [8].



(a) HP 778D.

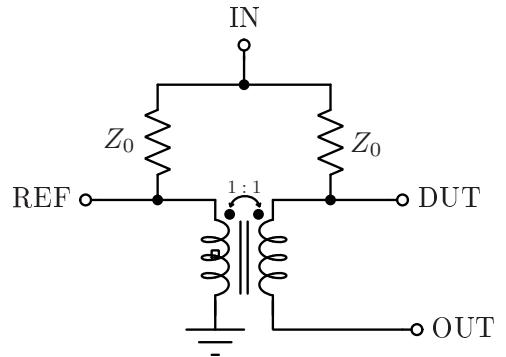


(b) HP 796D.

Slika 17: HP usmereni sprežnjaci.

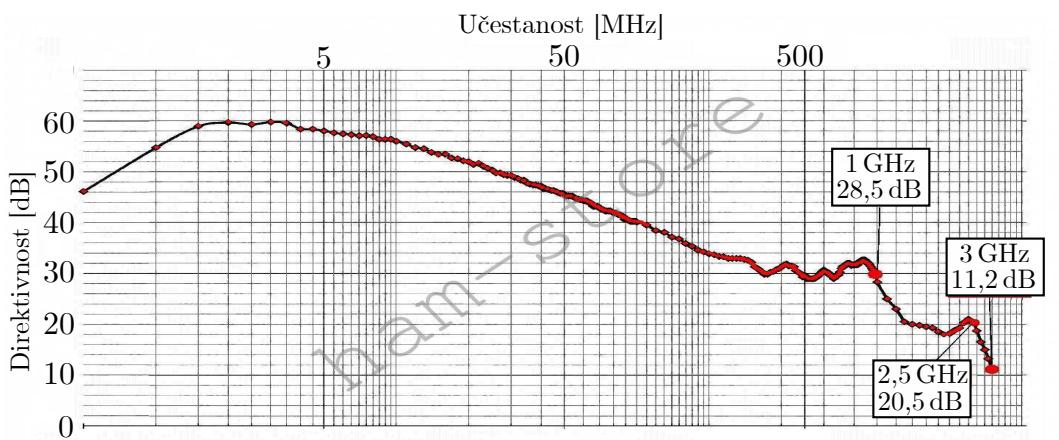


(a) Fotografija.



(b) principska šema sa koncentrisanim parametrima.

Slika 18: Refleksioni most.



Slika 19: Direktivnost refleksionog mosta, adaptirano i preuzeto iz [5].

## 4.4 Arhitektura mernog sistema

Softver mernog sistema implementiran je kao Python biblioteka `ArduinoSNA` čiji kod je u celosti dat u dodatku 1. Biblioteka implementira klase sa pridruženim metodama koje su prikazane na slici 20. Klase `INetworkAnalyzerE5062` i `IArduino` predstavljaju interfejsne klase koje komuniciraju sa pobudnim generatorom i mikrokontrolerom. Klasa `INetworkAnalyzerE5062` je zadužena za kompletну karakterizaciju karakteristika detektora snage, kao i programabilni generator signala. Klasa `IArduino` implementira dvo-smernu komunikaciju za dobavljanje izmerenih odbiraka napona na analognim ulaznim pinovima. Konačno, klasa `Sensor` obavlja estimaciju snaga koje mere senzori na osnovu kalibracionih površi  $\Gamma_D(f, P)$  i  $V(f, P)$ .

### 4.4.1 Komunikacija sa Agilent E5062

Komunikacija se obavlja preko LAN mreže. Računar koji pokreće merni sistem je konfigurisan sa statičkom IP adresom, dok je Analizatoru dodeljena statička IP adresa 192.168.1.3. Adresa uređaja se definiše u konstruktoru klase `INetworkAnalyzerE5062`, nakon čega metoda `connect()` uspostavlja vezu sa Analizatorom koristeći se bibliotekom `vxi11` [10], nakon čega se SCPI naredbama [11]

<sup>1</sup> `CALC1:PAR1:DEF S11`

INetworkAnalyzerE5062	IArduino	Sensor
<pre>--init__(address) connect() command(cmd) setSafetyParams(...) powerInBounds(P) ask(command) calculateAttenuation(P) setAttenuator(P) setPower(P) setFrequency(f) getS11()</pre>	<pre>--init__(dev, baud, timeo) connect() command(cmd) setSafetyParams(...) read()</pre>	<pre>--init__(filename) estimatePower(f) measure(f, V) setSafetyParams(...) read()</pre>

Slika 20: Pregled implementiranih klasa i metoda.

## 2 CALC1:FORM MLOG

definiše Analizatoru da se u merenjima meri parametar  $s_{11}$  u logaritamskoj skali (po magnitudi). Nakon toga analizator je konfigurisan za dalju upotrebu. Snaga na izlazu generatora se postavlja metodom **setPower** koja prethodno proverava stanje atenuatora metodom **powerInBounds**, a po potrebi postavlja potrebnu vrednost atenuacije metodom **setAttenuator**. Izbor atenuatora određen je tabelom 1.

Atenuacija [dB]	Opseg snaga [dBm]
0	-5 ... 10
10	-15 ... 0
20	-25 ... -10
30	-35 ... -20
40	-45 ... -30

Tabela 1: Podešavanje atenuacije.

SCPI naredbe koje postavljaju snagu, učestanost, atenuaciju, centralnu učestanost i span učestanosti su

```
1 SOUR1:POW <x>
2 SOUR1:POW:ATT <x>
3 SENS1:FREQ:CENT <x>
4 SENS1:FREQ:SPAN <x>
```

gde su **<x>** vrednosti koje treba postaviti. Vrednost izmerenog parametra  $s_{11}$ , koja se doprema kao string sa vrednostima odvojenim zarezima, se dobija SCPI upitom oblika

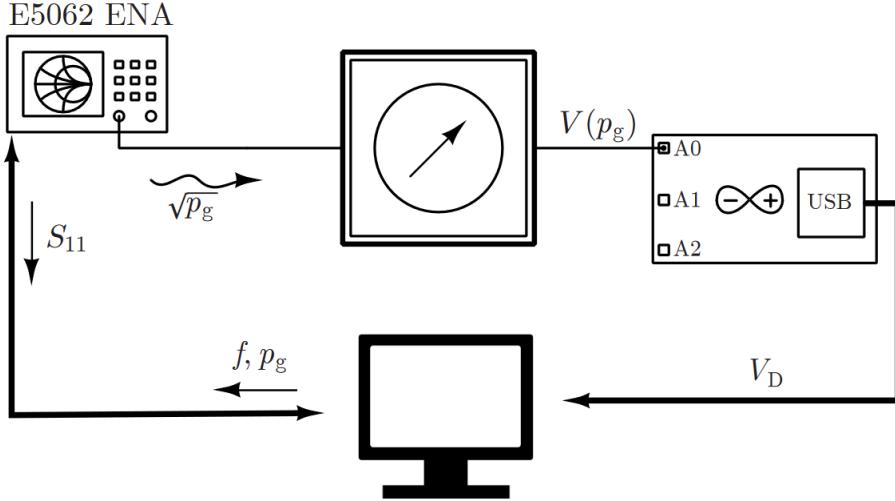
## 1 CALC1:DATA:FDAT?

### 4.4.2 Komunikacija sa mikrokontorlerom

Arduino se u ovom projektu koristi kao akvizicioni uređaj koji na sebi ima odgovarajuće AD konvertore. Komunicira sa računarcem preko istog USB kabla kojim se napaja i programira. Na mikrokontroleru se koristi biblioteka **Serial** za čitanje i pisanje. Komunikacija se obavlja brzinom (eng. *baud rate*) od 9600 bps. Analogni pinovi koji se koriste su A0, A1 i A2, sa kojih napone računar dobija slanjem upita u vidu stringova '**SAMPLE0**', '**SAMPLE1**' i '**SAMPLE2**' redom. Arduino šalje napon izražen u voltima sa fizičkom rezolucijom od 10 b, što približno odgovara rezoluciji po snazi  $\Delta p \approx 20 \text{ m} \text{dBm}$ .

#### 4.4.3 Karakterizacija detektora snage

Karakterizacija detektora snage se obavlja metodom tačku–po–tačku. Snaga se menjala u opsegu  $[-45, 5]$  dBm sa korakom od  $2,5$  dBm, dok se učestanost menja u opsegu  $[1, 3]$  GHz sa korakom  $25$  MHz. Za svaku od tačaka, generatoru se šalju snaga i učesta-



Slika 21: Postavka karakterizacije detektora snage.

nost, nakon čega se sa Arduina očitava izmereni napon. Između dva očitavanja čeka se vreme koje se definiše pomoću metode `setSafetyParams`. Dobijeni podaci se pakuju u `numpy` matricu čiji je format jednog reda  $[F, P, V, S11]$  i čuvaju kao `*.npz` fajl koji se kasnije prosledjuje pri inicijalizaciji instance senzora.

#### 4.4.4 Postupak izračunavanja rezultata merenja

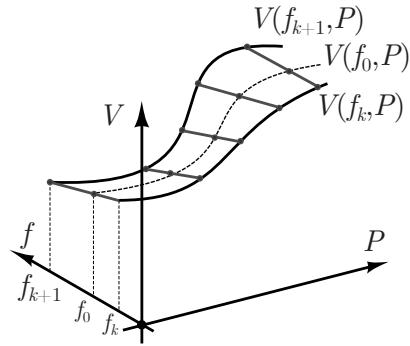
Merenje ispitivanog uređaja se radi povezivanjem u mernu postavku sa slike 5, pri čemu su svi detektori snage prethodno kalibrirani na način opisan u prethodnoj tački. Fajlovi u kojima su opisane karakteristike detektora su `sensi_char.npz` ( $i = 1, 2, 3$ ). Kompletna skripta za izvođenje merenja je navedena u dodatku 2. Merenje se obavlja tačku–po–tačku po učestanosti u opsegu  $300\text{MHz} \leq f \leq 3\text{GHz}$  sa korakom od  $\Delta f = 10\text{MHz}$ . Važno je naglasiti da učestnost  $f_0$  za koju se odrađuje merenje ne mora biti među učestanostima za koje je rađena kalibracija. Prepostavimo da je  $f_k < f_0 < f_{k+1}$ . Onda se statička karakteristika detektora na učestanosti  $f$  može proceniti na osnovu karakteristika  $V(f_k, P)$  i  $V(f_{k+1}, P)$ , koristeći se linearnom interpolacijom

$$V_{f_0}(P) = V(f_0, P) = \frac{V(f_k, P)(f_{k+1} - f_0) + V(f_{k+1}, P)(f_0 - f_k)}{f_{k+1} - f_k}. \quad (17)$$

Grafička predstava ove interpolacije je prikazana na slici 22. Nakon određenja odgovarajuće karakteristike,  $V = V_{f_0}(P)$ , interpolacijom odgovarajuće inverzne funkcije  $P = P_{f_0}(V)$  određuje se konačni rezultat incidentne snage.

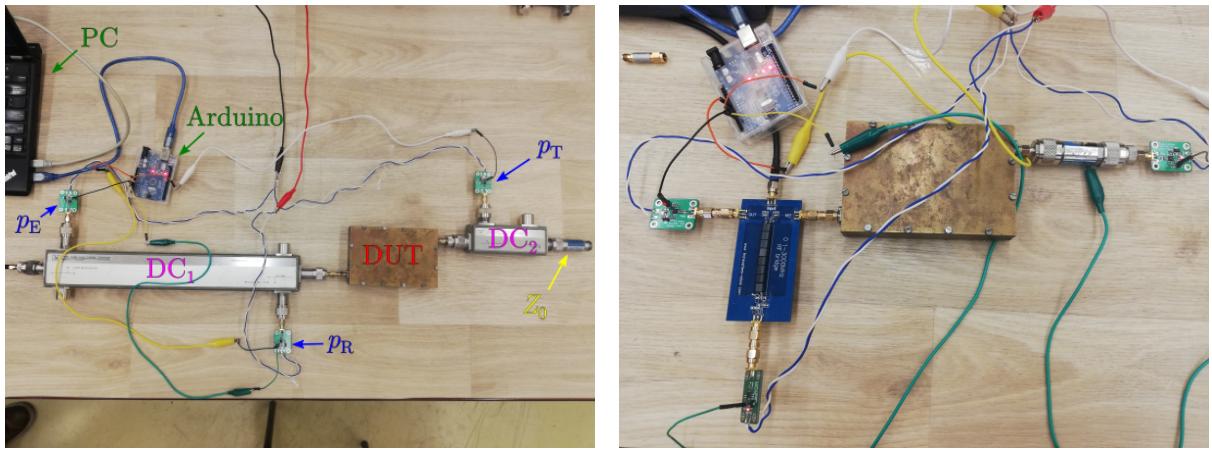
## 5 Rezultati i diskusija

Obavljeni su merenja postavki realizovanih od različitih kombinacija prethodno opisanih uređaja, a u cilju ilustracije izvedenih relacija. Formirane su dve merne konfiguracije:



Slika 22: Uz interpolaciju karakteristike detektora.

- (K1) Profesionalni usmereni sprežnjaci, sa i bez atenuatora na detektorima, prikazana na slici 23a
- (K2) Refleksioni most na ulazu, sa i bez atenuatora na detektorima, prikazana na slici 23b



(a) Postavka (1).

(b) Postavka (2).

Slika 23: Fotografije mernih postavki.

Merenja su obavljena za dva uređaja koji su:

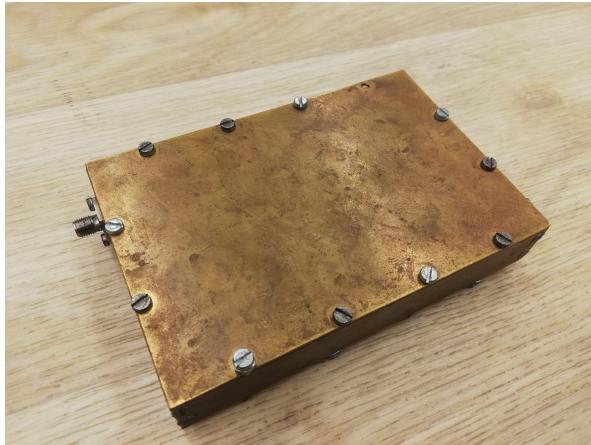
- (U1) Filtar propusnik opsega učestanosti, čija je centralna učestanost oko 1,8 GHz, koji ima pristupe sa ženskim SMA konektorima, prikazan na slici 24a
- (U2) Atenuator slabljenja 10 dB, čiji je propusni opseg do 12 GHz, proizvođača *Hewlett-Packard*, koji ima N konektore, prikazan na slici 24b.

Prelazi sa N konektora na SMA konektore i obratno će se u nastavku, za potrebe ovog rada, smatrati savršenim. U svim ogledima snaga pobudnog generatora je podešena na vrednost 10 dBm.

## 5.1 Ogledi

### 5.1.1 Ogled 1

Mereni su parametri rasejanja uređaja (U1) konfiguracijom (K1) bez upotrebe atenuatora ispred detektora snage. Rezultati su upoređeni sa referentnim merenjem sa Analiza-



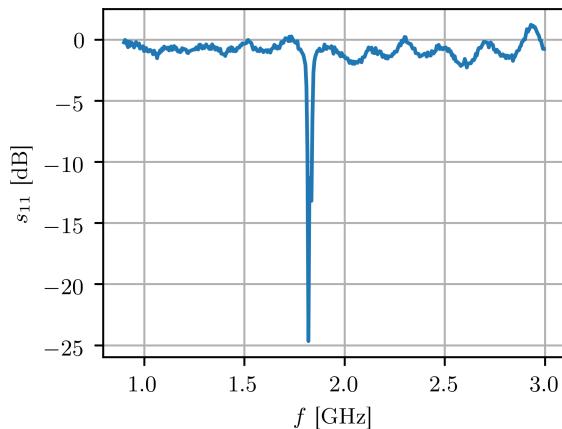
(a) Filtar propusnik opsega učestanosti.



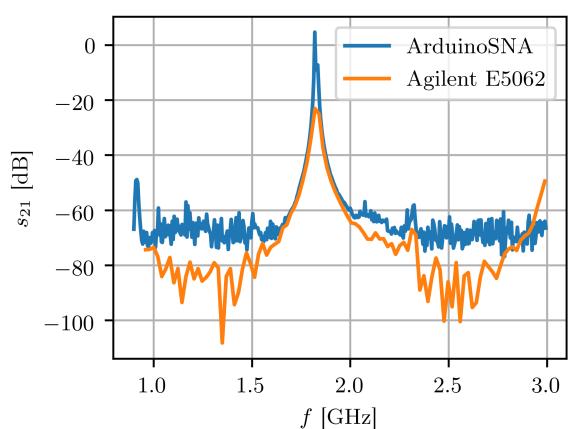
(b) Atenuator.

Slika 24: Fotografije ispitivanih mreža.

tora mreža na slici 25. Rezultati pokazuju dobro poklapanje sa referentnim instrumentom. Prag osetljivosti određen je minimalnom snagom koju detektori snage mogu pouzdano da



(a) Rezultati merenja refleksije na ulaznom pristupu.



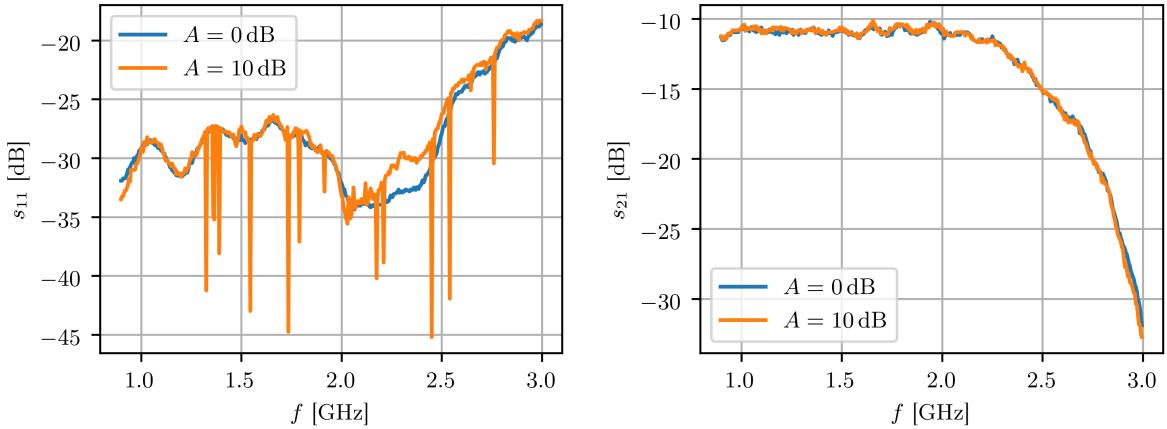
(b) Poređenje rezultata merenja sa referentnim instrumentom.

Slika 25: Uz ogled 1.

mere, koja iznosi približno  $-60$  dBm, što se jasno i vidi u dobijenim rezultatima. Činjenica da je poklapanje sa referentnim instrumentom dobro sve do praga osetljivosti detektora ukazuje na to da je ograničavajući faktor osetljivost detektora, a ne prilagođenja u mreži, usled čega se performanse ove konfiguracije ne mogu značajno unaprediti dodavanjem atenuatora.

### 5.1.2 Ogled 2

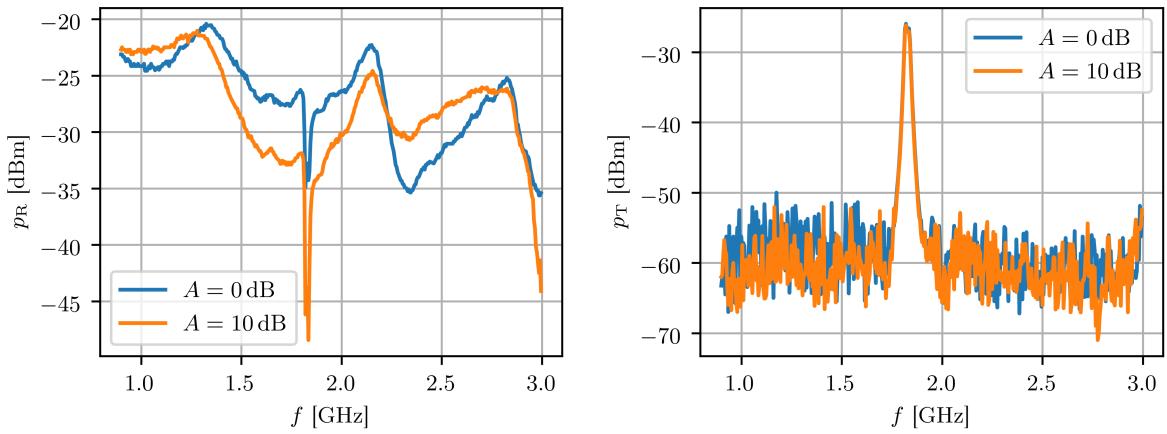
Mereni su parametri rasejanja uređaja (U1) konfiguracijom (K1) sa i bez upotrebe atenuatora od  $10$  dB ispred detektora snage, a dobijeni rezultati su prikazani na slici 26. Kao što je komentarisano u rezultatu ogleda 1, dodavanje atenuatora ne doprinosi funkciji ove konfiguracije. Brz propad karakteristike nakon učestnosti oko  $2$  GHz se može objasniti tehnikom izrade sprežnjaka.



(a) Merenja parametra refleksije.

(b) Merenja parametra transmisijske.

Slika 26: Uz ogled 2.



(a) Merenje nivoa reflektovane snage.

(b) Merenje nivoa transmitovane snage.

Slika 27: Uz ogled 3.

### 5.1.3 Ogled 3

Mereni su parametri rasejanja uređaja (U1) konfiguracijom (K2) sa i bez upotrebe atenuatora ispred detektora reflektovanog nivoa snage  $A_R = 10 \text{ dB}$ , a dobijeni rezultati prikazani su na slici 27. Budući da ova konfiguracija nema referentno merenje, nacrtana je izmerena snaga reflektovanog talasa. Važno je posebno naglasiti da se uticaj atenuatora kvalitativno razlikuje u slučaju željenog signala i u slučaju izobličenja uzrkovanih nesavršenošću instrumenta, što se može videti na slici 27a. To se posebno može uočiti na višim učestanostima gde je neprilagođenje detektora loše. U pogledu merenja transmitovane snage, sa slike 27b, očekivano se ne uočava značajan doprinos dodatnog atenuatora.

### 5.1.4 Ogled 4

Mereni su parametri rasejanja uređaja (U1) konfiguracijom (K2), povećavajući vrednost atenuacije u odnosu na prethodnu tačku na  $A_R = 40 \text{ dB}$ . Rezultati merenja refleksije prikazani su na slici 28. Odsecanje signala uzrokovan je osetljivošću senzora budući da je taj nivo podignut za atenuaciju radi diskusije. Može se primetiti da se oblik smetnji

u okolini učestanosti 2,5 GHz nije značajno potisnuo povećanjem atenuacije do 40 dB. U ovom ugledu, uticaj atenuacije je kvalitativno drugačiji u odnosu na pređašnji ogled. Nije ustanovljena kvalitativna razlika između dejstva na signal i na smetnju odakle se može tvrditi da je slabljenje od 10 dB zaista blizu optimalnog što je u skladu sa rezultatom iz jednačine (14), imajući u vidu da je na osnovu osnovu grafika sa slike 19, direktivnost usmerenog sprežnjaka  $D(2,5 \text{ GHz}) \approx 20 \text{ dB}$ .

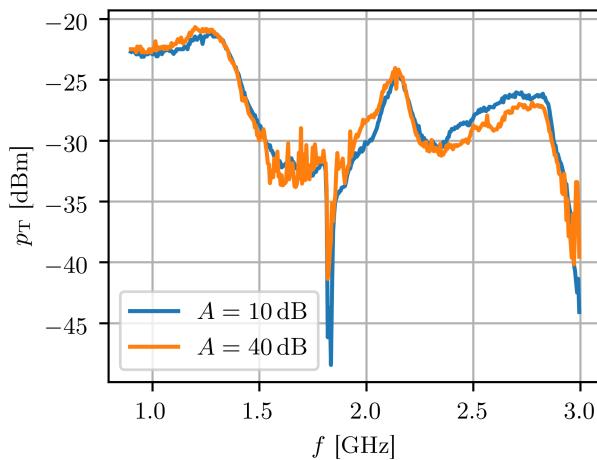
## 5.2 Diskusija i zaključak

U ovom radu je izložen opšti postupak projektovanja skalarnog analizatora mreža polazeći od pristupačnih uređaja i njihovom integracijom u kompletan sistem. Tom prilikom je u odeljku 3.1.3 izvedena veza za optimalno slabljenje atenuatora za prilagođenje detektora snage, koja je i dokazana na osnovu rezultata ogleda 3 i 4. Na osnovu rezultata ogleda 1 se može tvrditi da su postupak kalibracije detektora snage, kao i kompletan *end-to-end* sistem ispravni i funkcionišu u skladu sa očekivanjima. Takođe treba da naglasiti da je opseg učestanosti 300 MHz—3 GHz određen prvenstveno karakteristikama upotrebljenog izvora signala, te da se on može proširiti koristeći se sličnim komponentama, a zadržavajući istu metodologiju projektovanja.

Na osnovu rezultata izvedenih ogleda, a imajući u vidu teorijske rezultate navedene u odeljku 3, može se zaključiti da načelno obe ispitane konfiguracije funkcionišu u skladu sa očekivanjima.

Implementirana biblioteka u ovom radu se može iskoristiti i za softversku podršku za naprednije sisteme, budući da su korišćeni protokoli standardizovani i praktično isti nad raznim uređajima raznih proizvođača. Specifičnosti bi se u tom pogledu odnosile pre svega na rečnik naredbi koji za svaki instrument može biti specificiran, ali je naveden u odgovarajućem uputstvu za programere (eng. *Programmers' manual*).

Dalji rad na ovom projektu mogao bi se odnositi na kvalitetniju realizaciju mreža za prilagođenje detektora snage, čime bi se ostvario širi opseg učestanosti u kome je njegovo prilagođenje prihvatljivo. Takođe, potrebno je ispitati rad sistema sa pristupačnjim programabilnim generatorima signala, koji eventualno rade u širem opsegu učestanosti.



Slika 28: Uz ogled 4.

## Literatura

- [1] P. Pejović, „Princip rada i primena osciloskopa“, Beograd 2016, dostupno na <https://zenodo.org/record/1311555#.X0QuahFS8pg>, poslednji put pristupljeno 12. septembar 2022.
- [2] R. J. Collier and A. D. Skinner, „Microwave Measurements 3rd Edition“, The Institution of Engineering and Technology, 2007.
- [3] A. Đorđević, D. Tošić, „Mikrotalasna tehnika“, 1. izdanje, Akademска misao, Beograd, 2006.
- [4] D. Pozar, „Microwave Engineering“, J. Wiley, New York, 2012.
- [5] *Transverters-Store, RF bridge*, dostupno na [https://transverters-store.com/rf\\_bridge/rf\\_bridge.html](https://transverters-store.com/rf_bridge/rf_bridge.html)
- [6] Proizvođačka dokumentacija *Hewlett Packard 778D*, dostupna na <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5952-8133.pdf>, poslednji put pristupljeno 12. septembar 2022.
- [7] Proizvođačka dokumentacija, *Hewlett Packard 796D*, dostupna na [https://testequipment.center/Product\\_Documents/Agilent-796D-Specifications-99658.pdf](https://testequipment.center/Product_Documents/Agilent-796D-Specifications-99658.pdf), poslednji put pristupljeno 12. septembar 2022.
- [8] V. Petrović, D. Tošić, A. Đorđević „Mikrotalasna pasivna kola“, Beograd, 2010, slobodno dostupano na [https://www.etf.bg.ac.rs/uploads/files/udzbenici/MPK\\_2010.pdf](https://www.etf.bg.ac.rs/uploads/files/udzbenici/MPK_2010.pdf), poslednji put pristupljeno 12. septembar 2022.
- [9] Proizvođačka dokumentacija *Analog Devices AD8318*, dostupna na <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad8318.pdf>, poslednji put pristupljeno 12. septembar 2022.
- [10] Python paket *vxi11*, dostupno na <https://pypi.org/project/python-vxi11/>, poslednju put pristupljeno 12. septembar 2022.
- [11] *Agilent E5061A/E5062A ENA SeriesENA Series RF Network Analyzers Programmer's Guide*, dostupno na <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/E5061-90042.pdf>, poslednji put pristupljeno 12. septembar 2022.

# Dodatak

## 1 Kôd implementirane biblioteke

```
1 from pylab import plt, np
2 from scipy import interpolate
3 import vxi11
4 import serial
5 import time
6
7 class INetworkAnalyzerE5062:
8     """
9         Network Analyzer E5062 interface class
10    """
11    powSyntax = "SOUR1:POW"
12    attSyntax = "SOUR1:POW:ATT"
13    freqSyntax = "SENS1:FREQ:CENT"
14    spanSyntax = "SENS1:FREQ:SPAN"
15    currentAttenuation = None
16    currentSpan = None
17
18    S11 = None
19
20    def __init__(self, address):
21        self.ip = address
22        print("Defined NA at ", self.ip)
23
24    def setSafetyParams(self, delay = 0.1, Pmax = 5, Pmin = -45):
25        self.commandDelay = delay
26        self.Pmin = Pmin
27        self.Pmax = Pmax
28
29    def powerInBounds(self, P):
30        if ( P >= self.Pmin and P <= self.Pmax):
31            return True
32        else:
33            return False
34
35    def ask(self, command):
36        return( self.NA.ask(command) )
37
38    def connect(self):
39        self.NA = vxi11.Instrument( self.ip )
40        print("Testing connection to NA...")
41        print(self.ask("*IDN?"))
42        self.command("CALC1:PAR1:DEF S11")
43        self.command("CALC1:FORM MLOG")
```

```

45     def calculateAttenuation(self, P): # P - power [dBm]
46         if (P > 5 or P < -45):
47             raise ValueError('Power out of range!')
48         if (-45 <= P and P < -30):
49             return 40
50         elif(-35 <= P and P < -20):
51             return 30
52         elif(-25 <= P and P < -10):
53             return 20
54         elif(-15 <= P and P < 0):
55             return 10
56         elif (-5 <= P and P < 10):
57             return 0
58
59     def setAttenuator(self, P):
60         Px = self.calculateAttenuation(P)
61
62         if (Px != self.currentAttenuation):
63             self.currentAttenuation = Px
64             self.command(self.attSyntax + " " + str(Px))
65
66     def setPower(self, P):
67         self.setAttenuator(P)
68         if (self.powerInBounds(P)):
69             self.command(self.powSyntax + " " + str(P))
70         else:
71             print('Power out of range!')
72         return
73
74     def setFrequency(self, F):
75         if (self.currentSpan is None):
76             self.currentSpan = 0
77             self.command(self.spanSyntax + " 0")
78
79         if ( F >= 3e5 and F <= 3e9 ):
80             self.command(self.freqSyntax + " " + str(F))
81         else:
82             print("Frequency out of range!")
83         return
84
85     def getS11(self):
86         self.S11 = str( self.ask("CALC1:DATA:FDAT?") )
87         self.S11 = float(self.S11.split(",")[0])
88         return self.S11
89
90     def command(self, command="*IDN?"):
91         print ("To NA: " + command)
92         self.NA.write(command)
93         time.sleep(self.commandDelay)
94         return
95
96 class IArduino:
97
98     def __init__(self, dev, baudRate, timeout):
99         self.dev = dev
100        self.baud = baudRate
101        self.timeout = timeout
102        print("Defined Arduino at ", self.dev,

```

```

103     ", using baud rate ", self.baud,
104     ", with timeout ", self.timeout)
105
106     def __del__(self):
107         self.ser.close()
108         print("Closed Arduino connection.")
109
110     def connect(self):
111         self.ser = serial.Serial(self.dev, self.baud, timeout = self.
112         timeout)
113
114         print("Waiting for bootloader and clearing buffer")
115
116         time.sleep(2.00)
117         self.command("INIT")
118         self.ser.reset_input_buffer()
119         self.ser.reset_output_buffer()
120
121         self.command("SAMPLE0")
122         self.read()
123
124         self.ser.reset_input_buffer()
125         self.ser.reset_output_buffer()
126
127     def setSafetyDelay(self, delay = 0.1):
128         self.commandDelay = delay
129
130     def command(self, command): # giving out command to Arduino
131         print ("To Arduino: " + command)
132         self.ser.write( str.encode(command + "\n") )
133         self.ser.flush()
134         time.sleep(self.commandDelay)
135         return
136
137     def read(self):
138         print("Reading arduino...")
139         V = 0
140
141         while(self.ser.inWaiting()):
142             V = self.ser.readline()
143
144             self.ser.reset_input_buffer();
145
146             V = float(V)
147             print("From Arduino: " + str(V))
148             return V
149
150 class Sensor:
151     """
152     Sensor behaviour is defined using
153     .npz file
154     """
155     def __init__(self, filename):
156         print(filename)
157         d = np.load(filename)
158         self.data = d
159         self.Fmin = d["F"].min()

```

```

160         self.Fmax = d["F"].max()
161         self.Pmin = d["P"].min()
162         self.Pmax = d["P"].max()
163         print("Sensor params defined for:",
164             self.Fmin/1e9, " < f[GHz] < ", self.Fmax/1e9, "; ",
165             self.Pmin, " < P[dBm] < ", self.Pmax, ".")
166
167     def estimatePower(self, f0, plot = False):
168         """
169             Estimate sensor characteristic using
170             linear interpolation for given frequency
171             - returns: FUNCTION V = V(P)
172         """
173         freq_values = self.data["F"][0]
174         pow_values = np.transpose(self.data["P"])[0]
175         print(pow_values)
176
177         n = 0
178         fractj = 0.00
179
180         if (f0 < self.Fmin):
181             n = 0
182         elif(f0 > self.Fmax):
183             n = -1
184         else:
185             freq_idxs = np.arange(0, len(freq_values))
186             value_to_index = interpolate.interp1d(freq_values, freq_idxs,
187             kind='linear')
188             j = value_to_index(f0)
189             fractj = j-int(j)
190             n = int(j)
191             print(n)
192             if (fractj == 0.00):
193                 V = np.transpose(self.data["V"])[n]
194             else:
195                 V = np.transpose(self.data["V"])[n] * (1-fractj) + np.transpose
196                 (self.data["V"])[n+1] * (fractj)
197
198             if (plot == True):
199                 plt.figure()
200                 plt.plot(V, pow_values)
201                 plt.xlabel("Voltage [V]")
202                 plt.ylabel("Power [dBm]")
203                 plt.show()
204
205             estimator = interpolate.interp1d(V, pow_values, fill_value="
206             extrapolate")
207             return estimator
208
209     def measure(self, freqs, V):
210         """
211             Return power-freqs vector from voltage-freqs
212             vector
213         """
214         P = np.zeros(np.shape(V))
215         j = 0
216         for f in freqs:
217             print(f)

```

```

215     estP = self.estimatePower(f)
216     P[j] = estP(V[j])
217     j += 1
218
219     return freqs, P

```

## 2 Skripta za prikupljanje merenja

```

1
2 from pylab import np, plt
3 from arduinosna import *
4
5 NA = INetworkAnalyzerE5062('192.168.1.3')
6 NA.setSafetyParams(delay = 0.2, Pmax = 5, Pmin = -45)
7 NA.connect()
8
9 ARD = IArduino(dev = '/dev/ttyUSB0', baudRate = 9600, timeout = 2.00)
10 ARD.setSafetyDelay(0.1)
11 ARD.connect()
12
13 # Input - power
14 freq_v = np.arange( 900e6, 3e9, 10e6 )
15 print (freq_v)
16
17 # Output - measurements
18 V0_vector = np.zeros(np.size(freq_v))
19 V1_vector = np.zeros(np.size(freq_v))
20 V2_vector = np.zeros(np.size(freq_v))
21 S11_vector = np.zeros(np.size(freq_v))
22
23 j = 0
24
25 for f in freq_v:
26     NA.setFrequency(f)
27     ARD.command("SAMPLE0")
28     V0_vector[j] = ARD.read()
29
30     ARD.command("SAMPLE1")
31     V1_vector[j] = ARD.read()
32
33     ARD.command("SAMPLE2")
34     V2_vector[j] = ARD.read()
35
36     j+=1
37
38 np.savez("Filtar_Characteristics_2.npz",
39           f = freq_v, V0 = V0_vector, V1 = V1_vector, V2 = V2_vector)

```

### 3 Skripta za obradu rezultata merenja

```
1 d = np.load("Filtar_Characteristics_2.npz")
2 f = d["f"]
3 V0 = d["V0"]
4 V1 = d["V1"]
5 V2 = d["V2"]
6
7 R_sens = Sensor("data/sens1_char.npz")
8 E_sens = Sensor("data/sens2_char.npz")
9 T_sens = Sensor("data/sens3_char.npz")
10
11 _, PR = R_sens.measure(f, V0)
12 _, PE = E_sens.measure(f, V2)
13 _, PT = T_sens.measure(f, V1)
14
15 plt.figure(1)
16 plt.plot(f/1e9, PR)
17 plt.plot(f/1e9, PE)
18 plt.plot(f/1e9, PT)
19 legend(["R", "E", "T"])
20 plt.xlabel(u"$f$ [GHz]")
21 plt.ylabel(u"$P$ [dBm]")
22 plt.grid()
23
24 S21 = PT-PE
25 S11 = PR-PE # Odredjivanje S parametara
26
27 ## Extract refference value
28 ref_data = np.genfromtxt('../S21.CSV', delimiter=',', skip_header=3)
29 print(ref_data[:,0]/1e9)
30
31 plt.figure(2)
32 plt.plot(f/1e9, S21)
33 plt.plot(f/1e9, S21)
34 plt.xlabel(u"f [GHz]")
35 plt.ylabel(r"$S_{21}$, $S_{11}$ [dB]")
36 plt.grid()
37
38 plt.show()
```