

Dr. sc. Ivan Vilović

Docent

Sveučilište u Dubrovniku

E-mail: ivan.vilovic@unidu.hr

ULOGA LABORATORIJA ZA TELEKOMUNIKACIJE U POTICANJU ISTRAŽIVAČKOG INTERESA STUDENATA NA SVEUČILIŠTU U DUBROVNIKU

UDK / UDC: 621.39(076.5)

JEL klasifikacija / JEL classification: L96, I20

Stručni rad / Professional paper

Primljeno / Received: 29. lipnja 2015. / June 29, 2015

Prihvaćeno za tisak / Accepted for publishing: 17. studenog 2015. / November 17, 2015

*„Entuzijazam nastavnika, i pošten, uljudan i
prijateljski odnos prema studentima,
bitne su značajke uspješnog poučavanja.*

*[s matematičkim problemom]
Učini što možeš..“*

prof. dr. sc. Sibe Mardešić (1927.)

Sažetak

Značajan se napredak, u nastavi elektromagnetizma i bežičnih komunikacija na Sveučilištu u Dubrovniku postigao uvođenjem modernih, profesionalnih mjernih instrumenata i suvremene programske podrške. Iako je laboratorij tek započeo svoju obrazovnu i znanstvenu misiju, već se vide rezultati u kvaliteti i stečenim vještinama studenata Odjela za elektrotehniku i računarstvo. Laboratorij telekomunikacijskih tehnologija s posebnim naglaskom na radiofrekvencijske i mikrovalne komunikacije, uz maštovito osmišljene i kreativne eksperimente osnažuje i proširuje znanje stečeno na teorijskim predavanjima. Temeljna misija laboratorija nije samo osposobiti za eksperimentalne vještine i proširiti znanja već i motiviranost studenata za eksperimentalna istraživanja, koja ih mogu

uvesti u sferu znanstvenog rada. Pokazan je pritom obrazovni pristup temeljem laboratorijskih eksperimenata kako bi se povećala učinkovitost cjelokupnoga obrazovnog procesa, ali i podizala motiviranost studenata. Rezultati ovakva pristupa su vidljivi u sve većem sudjelovanju studenata u raznim eksperimentalnim postupcima (ne samo obveznim). Raste broj onih koji objavljuju znanstvene radove u suradnji s nastavnicima. Razvijeni eksperimenti sastoje se od simulacijskih (računalom modeliranih) eksperimenata i mjernih postupaka na mikrovalnim komponentama i sklopovima. Simulacijski softver je u potpunosti izrađen na Odjelu za elektrotehniku i računarstvo Sveučilišta, kao i većina komponenta kojima se koristi u mjernim postupcima. Jedan dio eksperimenata je povezan s raspoloživim edukacijskim sklopovima u kitu. Poseban dio kreativnog rada odnosi se na različite projekte u kojima studenti pokazuju svoje istraživačke sposobnosti i s pomoću njih izrađuju svoje završne i/ili diplomske radove.

Ključne riječi: radiofrekvencijska i mikrovalna tehnologija, mikrovalna mjerenja, vektorski analizator mreže, generator signala, analizator spektra, mikrotrakasti sklopovi, neuronske mreže.

1. UVOD

U novije vrijeme svjedoci smo ne samo snažnog razvoja računalnih sustava i pripadajućeg softvera, već i izuzetno brzog rasta tehničkih i ljudskih potreba u području bežičnih telekomunikacija, gdje mikrovalovi zauzimaju temeljno mjesto. Značenje mikrovalnih komunikacija nije samo u uskoj komunikacijskoj sferi već se ovim tehnikama koristi u industriji, medicini, prometu, trgovini... Raznovrsni sustavi bežične identifikacije (RFID) još nisu obuhvatili sva područja moguće primjene. Treba naglasiti posebno dojmljiv razvoj pokretnih komunikacija, kojih eksponencijalni rast još nije ni blizu kraja. Područje komunikacija na ljudskom tijelu (*body centric*) tek treba pokazati svoje prave vrijednosti. Jasno je da iz rečenog proizlazi rastuće značenje područja elektromagnetizma, a posebno mikrovalne tehnike.

Takav razvoj dovodi nastavni program i poučavanje u potpuno novu situaciju, gdje se elektromagnetizam ne može poučavati kao matematička znanost bez (ili s vrlo malo) vlastitoga eksperimentalnog iskustva. Kolegiji iz primijenjenog elektromagnetizma i mikrovalne elektronike općenito se smatraju najslabijim dijelom u nastavnom programu cijele elektrotehnike. Studenti često vrlo brzo gube i ono malo interesa kada složena matematička analiza zamagli fizikalnu sliku pojava u mikrovalnom svijetu. Razlozi nisu samo u složenosti matematičke analize već i u konzervativnom načinu izlaganja predmetnoga gradiva. S jedne strane, fizikalna i matematička složenost problema i potreba eksperimentalnog pristupa i vizualizacije problema a, s druge strane, povećanom motiviranošću studenata, čine pravi izazov za nastavnika. Elektromagnetske principe, kao što je primjerice rasprostiranje elektromagnetskih valova, vrlo je teško predočiti i objasniti usmenim izlaganjem uz samo projicirane slajdove, te kedu i tablu. Tu laboratorijski eksperimenti mogu pomoći praktičnom predodžbom ponašanja električnih veličina na vrlo visokim frekvencijama. Nedostatak laboratorijskog pristupa je u potrebi za vrlo skupim instrumentima i velikim brojem prateće opreme, a također rad na vježbama ne može biti potpuno samostalan zbog nepostojanja više primjeraka instrumenata i opreme. Sve češće smo svjedocima uvođenja naprednih računalskih alata poradi vizualizacije elektromagnetskih pojava i ponašanja sklopova i uređaja na visokim frekvencijama. Čak je postojala namjera da se laboratorijski eksperimenti potpuno nadomjeste virtualnim eksperimentima, koji su rezultat izuzetnog razvoja simulacijskog softvera [1]. Računalskim (virtualnim) eksperimentima pokušava se predočiti fizikalni fenomen elektromagnetizma, što bi bilo teško postići laboratorijskim pristupom, pogotovo kada je skupa oprema u pitanju. Naše je stajalište da virtualni eksperimenti, sasvim sigurno, imaju svoje mjesto u poučavanju, ali oni ne mogu zamijeniti osobno iskustvo koje daju napredna laboratorijska mjerenja.

Iskustvo stečeno na Odjelu za elektrotehniku i računarstvo (u daljnjem tekstu Odjel) pokazuje da simulacijski softver i razne eksperimentalne računalske aplikacije imaju dragocjenu ulogu u ilustraciji principa radiokomunikacija. Koristeći se nekim eksperimentalnim aplikacijama na laboratorijskim vježbama

uočili smo oduševljenost studenata virtualnim, ali istovremeno gubitak bitnog praktičkog iskustva. Studenti moraju dobiti poduku iz moderne mikrovalne mjerne tehnologije jer inženjerska praksa ne može bez mjerenja, kako u području održavanja, tako i u projektiranju mikrovalnih sustava. Potrebno je postići pravilnu ravnotežu u primjeni virtualnih i realnih eksperimentalnih tehnologija, što su uočile i druge visokoobrazovne institucije suočene s istim problemom [2]. Skupa oprema pritom može biti ozbiljna prepreka kvalitetnih mjerenja. Moguće je uključiti samo nekoliko najpotrebnijih instrumenata, kao signal generator, analizator spektra i vektorski analizator mreže (VNA), pa usto mjerenja temeljiti na opremi koja je rezultat studentskih diplomskih radova, kao što su: lijevak i mikrotrakaste antene, prijenosne linije, rezonatori, filtri, razdjelnici i slično. Temeljni ciljevi laboratorijskih eksperimenata postavljenih na Odjelu su:

- proširiti i ilustrirati principe i tehnike iznesene na predavanjima
- omogućiti osobno iskustvo rada s modernim mjernim instrumentima
- omogućiti jeftine i kreativne eksperimente s modernim sklopovima
- povećati motiviranost studenata s većim njihovim sudjelovanjem
- učiniti nastavu mikrovalnih komunikacija užitzkom
- potaknuti studente na istraživanja kao uvod u znanstveni rad.

Laboratorijski eksperimenti kombinirani su s računalnim eksperimentima u vlastitoj izradbi, gdje su upotrijebljeni moderni softverski alati. Dobivena je dobra povratna informacija od studenata, iz koje se vidi koliko je postignuto povećano značenje visokofrekvencijskog fenomena u inženjerskoj praksi. Studenti dobro prihvaćaju istraživačke poticaje i rado sudjeluju u istraživačkim projektima.

2. DOPRINOS NASTAVI IZ RADIOFREKVENCIJSKIH I MIKROVALNIH TEHNOLOGIJA LABORATORIJSKIM EKSPERIMENTIRANJEM

Kako je već spomenuto, bitna uloga mikrovalnog laboratorija je proširenje teorijskih znanja izlaganih tijekom redovitih predavanja. Laboratorijsko vježbanje i eksperimentiranje pokriva područja rasprostiranja elektromagnetskih valova, prijenosnih linija (valovoda) i mikrovalnih mreža, što je povezano s količinom i raznolikošću laboratorijske opreme. Mjerenja uključuju raspršne parametre, reflektometriju u vremenskoj domeni, spektralnu analizu i karakterizaciju komponenti u frekvencijskoj domeni.

Problematika rasprostiranja elektromagnetskih valova u slobodnom prostoru, prijenosnoj liniji ili valovodu traži poseban način vizualizacije, eksperimenta. Potrebno je pokazati kako se određeni mod rasprostire valovodom, kako se reflektira (refraktira) na diskontinuitetu ili kako vođeni val prelazi u zračenje. Utjecaj vodljivosti medija i dielektričkih materijala na

uvjete rasprostiranja pri određenim frekvencijama važan je dio laboratorijskog eksperimentiranja. Vježbe iz ovog područja izvode se kombinirano kao računalske simulacije i kao mjerenja na stvarnim linijama koristeći se vektorskim analizatorom mreže ili kombinacijom generatora signala i spektralnog analizatora. Ovom skupinom vježbi studenti stječu određenu samostalnost u uporabi osnovnih instrumenata preko osnovnih mjerenja. Eksperimenti s prijenosnim linijama prvenstveno imaju svrhu učvrstiti osnovne principe koji su već predstavljeni na predavanjima, kao što su grupna i fazna brzina, koeficijent refleksije i odnos stojnih valova, uz pojave refleksija na teretu.

Vektorski analizator mreže (VNA) temeljni je instrument za najveći broj vježbi i eksperimenata, pa je jedan od bitnih ciljeva laboratorijske nastave naučiti studente da se ispravno služe ovim vrlo važnim mikrovalnim instrumentom. Nemoguće je osigurati veći broj njegovih primjeraka, zbog izuzetno visoke cijene, pa se mjerenja obavljaju uz pomoći i nadzor nastavnika, što limitira samostalnost studenata. Ovakav je instrument od nemjerljive vrijednosti u stjecanju znanja mikrovalnog inženjera, pa je nabava više primjeraka od ključne važnosti. Nije nužno da frekvencijsko područje bude vrlo visoko (više od 10 GHz), već su, za dostatno dobre obrazovne rezultate, povoljni i uređaji do nekoliko GHz, što znatno smanjuje vrijednost investicije. Trošak se smanjuje i upotrebom jeftinijih spojnih kabela i ostale spojne opreme. Skupa kalibracijska oprema može se izbjeći upotrebom prenosivih VNA (napr. Agilent FieldFox N9914A [3]), koji uključuju i radiofrekvencijski mjerač snage. Takvi uređaji nalaze široku primjenu u postavljanju i održavanju radiofrekvencijskih sustava, što značajno pridonosi njihovoj važnosti u radiofrekvencijskoj praksi. Naknadna obrada izmjerenih podataka omogućena je povezivanjem s računalom, što mu bitno proširuje mogućnosti. Jezik kojim «govori» VNA jezik je raspršnih parametara (S-parametri), koji se najprije obrađuju teorijski, kako bi stvarno bili shvaćeni tijekom laboratorijskih mjerenja. Mikrovalnu mrežu u potpunosti karakteriziraju raspršni parametri, koji se mjere VNA, i to kao kompleksne fazorske veličine.

Poznato je da prijam i prijenos slabih signala u pojačavačke stupnjeve sustava, kao i prijenos snažnih signala na teret zahtjeva posebnu skrb za minimiziranje gubitaka, tj. smanjenje refleksija poradi prilagodbe impedancija. Prilagodba impedancije pripada temeljnim znanjima mikrovalnog inženjera. Uz teorijski (matematički) prikaz prilagodbe impedancije, potpuno znanje o ovom problemu postiže se praktičkim laboratorijskim pristupom. Spomenuti VNA ovdje je nezaobilazan instrument, koji mjeri S11 parametar. Za uspješno razumijevanje problema prilagodbe potrebna je familijarnost studenata sa Smithovim dijagramom, koje VNA prikazuje za razne načine prilagodbe. Karakterizacija materijala, poglavito dielektričkih, tvori posebnu skupinu u laboratorijskom eksperimentiranju. Važnosti poznavanja dielektričnog materijala za radiofrekvencijske sustave nije potrebno posebno naglašavati. Na mikrovalnim frekvencijama dielektrična svojstva materijala opisuju se kompleksnom dielektričnom konstantom. Uz različita mjerenja i postupke studenti istražuju

utjecaj dielektrika na svekolike elektromagnetske karakteristike elementa ili uređaja (prijenosne linije, antene i sl.). Dielektrička se konstanta utvrđuje mjerenjem koeficijenta refleksije, pa je potreban dodatni matematički postupak za dobivanje konačnog rezultata, koji se izvodi računalskim programom.

Bežični komunikacijski sustavi pokrivaju široko područje komunikacija – od bežičnih računalnih mreža preko mobilnih komunikacijskih uređaja do satelitskih i radarskih komunikacija. Temeljni elementi takvih sustava uključeni su u laboratorij, i to poglavito poradi istraživanja maksimalne udaljenosti rasprostiranja korisnog signala, kao i karakteristika važnih komponenti sustava. Prijenosne karakteristike (S_{21}) ilustriraju pojedine komponente sustava: pojačala, miješala i filtri. Da bi jedan te isti problem bio što šire obuhvaćen i raznolikije predstavljen, rabi se više mjernih uređaja: analizator spektra, VNA i osciloskop. Posebno je ilustrativan prikaz prijenosa radiofrekvencijske snage kroz cijeli sustav odašiljač prijamnik. Potrebno se za ove vježbe koristiti gotovim edukacijskim proizvodima odašiljača i prijammnika kao što su u našem primjeru *DreamCatcher* proizvodi [4].

Za poboljšanje učinkovitosti usmenih predavanja i postignuće ciljeva učenja, kako bi studenti uložili maksimum napora i sposobnosti, treba povećati njihovo zanimanje, uz pobuđivanu znatiželju i kreativnost. Glavnu okosnicu podizanja studentske motivacije čine različiti laboratorijski projekti koje studenti izrađuju uz pomoć i nadzor nastavnika. Projekti pred studenete postavljaju problem praktične primjene stečenih znanja i eksperimentalnih vještina. Na osnovi šireg eksperimentiranja oni mogu samostalno izvoditi zaključke, a pretpostavke izravno provjeravati eksperimentom, što već prelazi u područje znanstvenog rada. Nastavnici dio svojega znanstvenog istraživačkog rada mogu prenijeti na studente koji su pokazali određene vještine u vlastitom eksperimentiranju. Da bi sve to bilo ostvarivo, primarni projekti moraju biti jednostavni i lagani u izradbi. Većina se takvih projekata bazira na mikrotrakastoj tehnologiji upravo zbog lake izradbe, a kvalitetno ilustrira ponašanje elektromagnetskih veličina na mikrovalnim frekvencijama. Studenti tijekom svojih seminarskih, završnih i/ili diplomskih radova izrađuju raznovrsne mikrovalne elemente i sklopove, koji upotpunjavaju laboratorij i proširuju mogućnosti eksperimentiranja. To su poglavito antene i antenski nizovi u raznim mikrotrakastim oblicima, ali i drugi povezni i razdjelni elementi (djelila snage, sprežnici i sl.), te mikrovalni filtri i rezonatori. Poseban dio eksperimentiranja povezan je s računalnim modeliranjem i simuliranjem. Moderni softverski alati omogućuju izradu modela radiokomunikacijskih i mikrovalnih sklopova i sustava, koji služe za ugađanje i parametriziranje različitih sklopovskih rješenja. Posebno se studenti potiču da kroz Erasmus program razmjene studenata na stranim visokim učilištima upisuju kolegije koji će im omogućiti eksperimentalni rad, i da tako stječu istraživačka iskustva u okviru stranih programa, koja mogu biti primijenjena i na našem Sveučilištu.

Glavni dio instrumentacijske opreme Laboratorija telekomunikacijskih tehnologija Odjela čine instrumenti tvrtke Agilent (danas *Keysight Technologies*), kako je to sistematizirano u tablici 1. Svi su instrumenti povezani s računalima poradi korištenja upravljačkim softverom i brze naknadne obrade izmjerenih podataka (slika 1).

Tablica 1.

Glavni instrumenti i oprema mikrovalnog laboratorija

Mjerni instrument	Tip
Vektorski analizator spektra	Agilent FieldFox RF Analyzer N9912A 20 MHz – 4 GHz
Generator signala	Agilent RF Signal Generator N9310A 9 kHz – 3 GHz
Analizator spektra	Agilent Spectrum Analyzer N9320B 9 kHz – 3 GHz
Osciloskop	Agilent Digital Storage Oscilloscope DSO-X 2012 A 100 MHz
Odašiljač/prijamnik	DreamCatcher ME1000 RF training kit



Slika 1. Mikrovalni laboratorij

3. KARAKTERISTIČNI LABORATORIJSKI EKSPERIMENTI I PROJEKTI

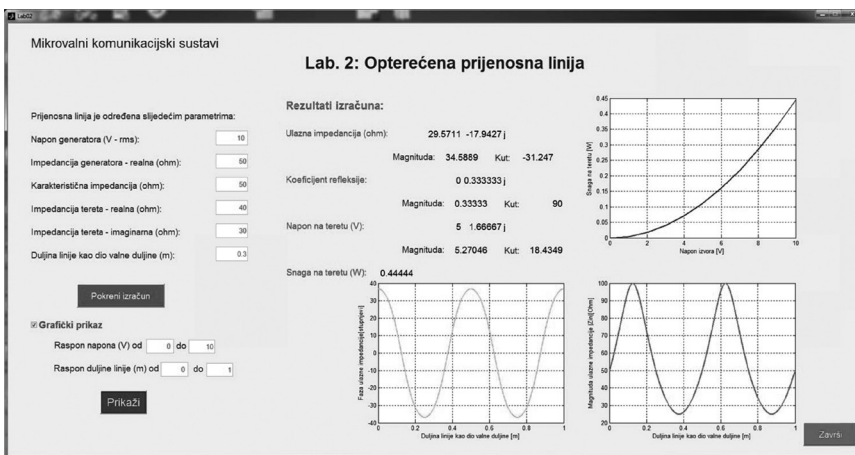
Prvu skupinu eksperimenata čine simulacijske vježbe; one se izvode na računalu temeljem odgovarajućeg programa izrađenoga u Matlab-u. Sve simulacije imaju interaktivni način komuniciranja što omogućuje više varijata eksperimenata, a za korištenje nisu potrebne posebne detaljne upute.

Na samom početku analizira se i eksperimentira s reaktancijama (induktivitet i kapacitet) na vrlo visokim frekvencijama. Preko odgovarajuće računalske simulacije istražuje se ponašanje induktivne i kapacitivne reaktancije, kao i omskih otpornika na vrlo visokim frekvencijama. Značajno je upoznavanje s pojavom i utjecajem parazitnih kapacitivnosti i induktivnosti.

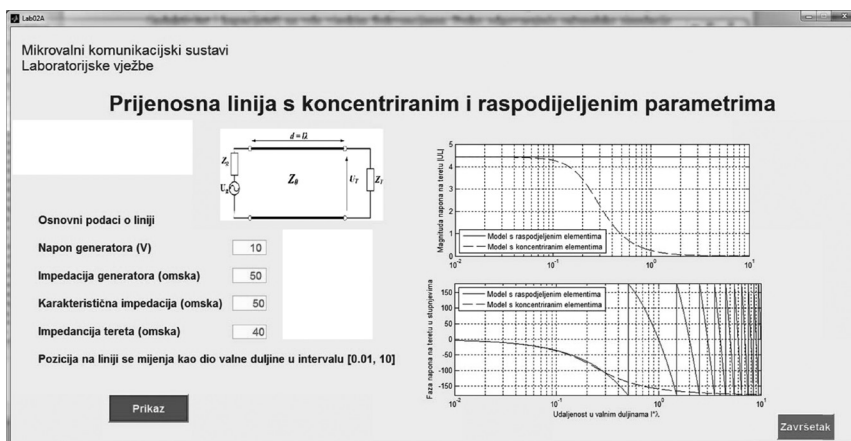
Oснаživanje i proširenje znanja dobivenoga na redovitim predavanjima iz područja prijenosnih linija postiže se simulacijskim i mjernim eksperimentima. Simulacijom opterećene prijenosne linije istražuju se promjene magnitude i faze ulazne impedancije uzduž linije (slika 2.). Simulacijski eksperiment obuhvaća različite temeljne parametre linije (karakterističnu impedanciju, parametre izvora i tereta, dimenzije linije). Manje i više prilagođeno stanje linije pokazuje koeficijent refleksije, predstavljen u kompleksnom, tj. fazorskom obliku, kao i ostale veličine (slika 2.). Pritom se mogu sami studenti poticati da izrađuju računalske programe za proračun i analizu raznovrsnih prijenosnih linija, što može biti dio, već spomenutih, projekata.

Posebno se analizira linija dizajnirana s koncentriranim i raspodijeljenim parametrima [5]. Promatra se promjena magnitude i faze napona na teretu ovisno o duljini linije za oba njezina modela. Rezultat pokazuje neodrživost upotrebe koncentriranih parametara (slika 3.).

Prije prvog eksperimenta studenti dobivaju kratki prikaz samoga mikrovalnog laboratorija. Očekuje se da nemaju iskustva s mikrovalnom opremom, pa zato i nužnost upoznavanja s instrumentima s obzirom na njihovu osjetljivost i visoku vrijednost. Uz upoznavanje s osnovnim korištenjem i kalibriranjem instrumenata, posebna se pozornost poklanja pojedinim vrstama konektora i njihovu pravilnom korištenju.



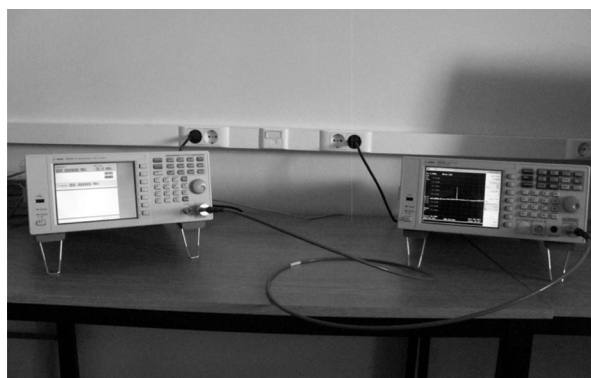
Slika 2. Simulacija opterećene prijenosne linije



Slika 3. Usporedba modela linije kreiranoga s koncentriranim i raspodijeljenim parametrima

Instrumentacijski dio vježbi počinje dvije vježbe iz područja prijenosnih linija i refleksije elektromagnetskih valova. Eksperimenti su oblikovani tako da studenti dobiju fizikalnu sliku djelovanja prijenosnih linija koristeći se znanjem stečenim na predavanjima. Ove vježbe, također, služe bližem upoznavanju studenata s pojedinim instrumentima (VNA, analizator spektra, generator signala) i komponentama koje će poslužiti u sljedećim vježbama. Prvim se eksperimentom mjeri snaga i gubici u suosnom kabelu, uz uporabu generatora signala i analizatora spektra. Eksperimentiranjem se uočava promjena razine gubitaka s frekvencijom i raznovrsnim kabelima. Također, analizira se spektrogram za različite širine rezolucijskog filtra analizatora spektra (slika 4.).

Isto se ponavlja za mikrotrakastu prijenosnu liniju. Studenti stječu prva iskustva o prijenosu signala linijama i potencijalnim problemima.



Slika 4. Mjerenje gubitaka u kabelu analizatorom spektra

U drugoj vježbi iz prvog ciklusa koristi se VNA za mjerenja na suosnim kabelima. Mjeri se povratni gubitak (koeficijent refleksije) za razne vrste tereta i kabele: otvoren kabel, kratko spojen kabel i opterećen s impedancijom od 50 W (slika 5.). Ovim eksperimentom dobiva se fizikalni uvid u ponašanje linije koje je teoretski izvedeno na predavanjima. Uspoređuju se razne vrste suosnih kabela, koji se selektiraju po kvaliteti. Studenti detaljnije upoznaju VNA: postavljaju referentnu razinu, odabiru odgovarajuću skalu (podiok/dB), koriste se markerom za označavanje karakterističnih točaka, te unutarnju memoriju instrumenta za usporedbu dvaju različitih mjerenja na jednom zaslonu (*Trace-funkciju*). Mjereći koeficijent refleksije za kabel s otvorenim krajem utvrđuje se povratna snaga signala, pa se zaključuje da je jedan dio snage apsorbirao kabel, i to je gubitak u samom kabelu. Razlučuju se vrste gubitaka u kabelu na mikrovalnim frekvencijama: omski, dielektrični gubici, gubici radijacije. Iako su dominantni gubici u dielektriku, poznavajući karakteristike pojedinog kabela (otpor po jedinici duljine ili gušenje po jedinici duljine) moguće je razlučiti gubitke u vodičima. Za kabel s otvorenim krajem, jedan dio gubitaka stvara i zračenje elektromagnetskog signala na kraju kabela (kabel djeluje kao antena). Prva dva gubitka (omski i dielektrični) izražavaju se po jedinici duljine kabela, dok je izračeni gubitak, jednostavno, razlika ukupnih gubitaka i sume omskih i dielektričnih gubitaka. Koristeći se posebnom funkcijom VNA instrumenta (*Distance to fault*) mjeri se duljina kabela s otvorenim krajem. Ta je vrsta mjerenja dobra ilustracija kako se otkrivaju pogreške u kabelima koje se mogu pojaviti u praksi.

U drugom ciklusu vježba mjere se raspršni parametri suosnih linija i antena (S-parametri). Najčešće se elementi sustava mogu prikazati kao dvoprolazne mreže s jednim ulazom i jednim izlazom. Dvoprolazne mreže mogu biti sasvim jednostavne, kao komad kabela, ili tako složene kao cjeloviti sustav odašiljač – prijamnik. Promatra se izlaz na ulaznu referentnu pobudu ovisno o frekvenciji.

Prvi dio ovih vježba služi za dobivanje predodžbe o S_{11} i S_{21} parametrima usporedivim s povratnim gubitkom iz prethodnih mjerenja. U tu se svrhu koristi suosnim kabelom, kao i u vježbama iz prvog ciklusa. Najprije se mjeri S_{11} parametar kabela jednim krajem spojenoga na izlaz, a drugim na ulaz VNA, i to preko širokoga frekvencijskog područja (20kHz – 4GHz). Isto se mjerenje ponavlja s kabelom opterećenim s 50 Ω . Prikaz na zaslonu trebao bi biti 0 dB, ali, kako nema idealnog prilagođenja niti idealnih konektora, primjetan je mali iznos S_{11} parametra (koeficijenta refleksije). Sljedeće je mjerenje S_{21} parametra na jednak način. Prikaz je vrlo blizu 0 dB (sva se emitirana snaga prenosi na prijamnu stranu), osim na višim frekvencijama, kao posljedica porasta gubitaka u kabelu.



Slika 5. Mjerenje povratnog gubitka na suosnom kabelu s VNA

Slijedi prikaz S parametara (S_{11} , S_{21}) Smithovim dijagramom. Kako je raspon frekvencija vrlo velik, prikazuje se velik broj petlja oko ishodišta, pa radi jasnoće prikaza treba smanjiti frekvencijski interval (napr. 50 - 150 MHz). Promjenom formata prikaza dobiva se prikaz faznog kuta u ovisnosti o frekvenciji za oba S-parametra. Korištenjem markera pronalazi se frekvencija na kojoj S_{21} parametar ima fazu točno -90° . Na ovoj frekvenciji suosni je kabel točno dug $1/4$ valne duljine. Podatak o četvrtvalnoj duljini kabela može poslužiti za mjerenje vremena kašnjenja kroz kabel. Kako su poznate faza i duljina kabela, koja odgovara $1/4$ valne duljine, na poznatoj frekvenciji f vrijeme kašnjenja se može izraziti kao

$$\Delta t = \frac{1}{4f} \quad (1)$$

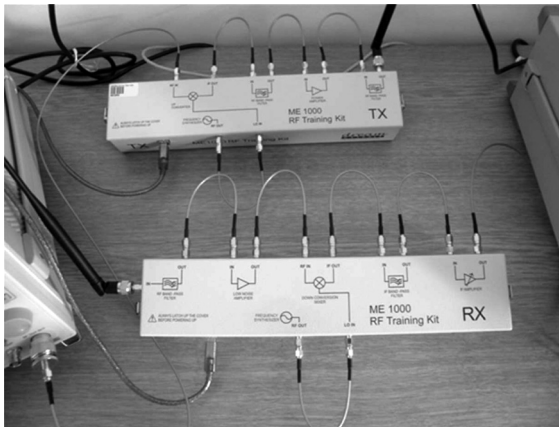
Najopćenitije se vrijeme kašnjenja može dobiti kao

$$\Delta t = \frac{\angle S_{21}}{360 \cdot f} \quad (2)$$

Prikazana metoda mjerenja vremenskog kašnjenja ne zahtijeva duljinu kabela, što je čini jednostavnijom, a mjerenje faznog kuta VNA instrumentom vrlo je točno. Ista se mjerenja mogu ponoviti s pomoću mikrotrakaste prijenosne linije. Korisno je usporediti rezultate dobivene uporabom kabela i mikrotrakaste linije. Antene su između ostaloga karakterizirane parametrom S_{11} , pa je takvo mjerenje uključeno u ovaj ciklus mjerenja. Mjeri se S_{11} parametar neusmjerene štapne antene i mikrotrakaste antene napajane preko prijenosne linije, koja je rezultat studentova diplomskog rada (slika 6.).

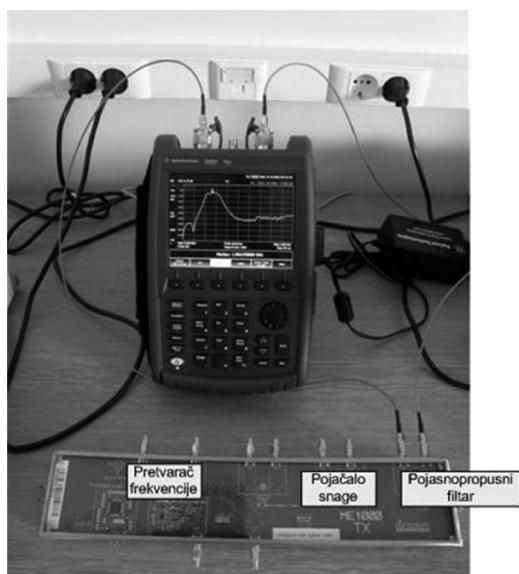


Slika 6. Mjerenje S11 parametra mikrotrakaste antene VNA instrumentom



Slika 7. Edukacijski kit DreamCatcher (odašiljač, prijammik)

Iz praktičkih razloga za jedan ciklus vježba koristi se edukacijskim kitom odašiljač-prijamnik s pripadnim softverom tvrtke Keysight DreamCatcher [4] (slika 7.). Ovom opremom vrlo živo se predstavlja odašiljanje i prijam signala, uz detaljniji prikaz pojedinačnih dijelova sustava, kao što su pojačala, filtri i miješala.



Slika 8. Mjerenje prijenosne karakteristike pojasnopropusnog filtra odašiljačke jedinice s VNA

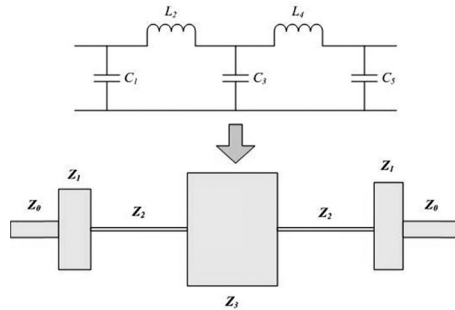
Jedna skupina eksperimenata uključuje mjerenje prijenosnih karakteristika različitih sklopova, kao napr. mjerenje karakteristike pojasnopropusnog filtra odašiljačke jedinice vektorskim analizatorom spektra. Mjeri se S_{21} parametar pojasnopropusnog filtra s VNA, prema slici 8. Mjerenje se obavlja u rasponu od 2MHz do 4 GHz. Koristeći se markerima određuju se sljedeće vrijednosti: donja i gornja granična frekvencija (na kojima je signal za 3dB niži od maksimalnoga), širina pojasa propuštanja i središnja frekvencija. Također se mjeri i refleksijski parametar S_{11} , i to njegova vrijednost u području propuštanja, kao i u području zapiranja, iz čega se može zaključiti kvaliteta prilagođenja, tj. razgođenja. Preko Smithova dijagrama i jednadžbe

$$Z_{ul} = Z_0 \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}, \quad (3)$$

dobiva se ulazna impedancija filtra, koju treba utvrditi za područja propuštanja i zapiranja.

Naznačenim primjerima eksperimenata unapređuje se nastava iz radiofrekvencijskih i mikrovalnih komunikacija, ali oni nisu dostatni za jaču motivaciju studenata prema vlastitom istraživanju. Iskustvo na našem Odjelu pokazalo je da se glavni poticaj vlastitome eksperimentiranju postiže s pomoću projekata. Dobro poznavanje osnova elektrotehnike i elektronike budućih mikrovalnih inženjera može se iskoristiti za razumijevnje problema povezanih s rapodjeljenim parametrima mikrovalnih sklopova. Vrlo ilustrativan primjer je

mikrovalni filtar. Parametri mu se mogu prikazati koncentriranim elementima koji se u izvedbi transformiraju u odsječke mikrotrakastih linija. Odgovarajućim računalskim programom proračuna se filtar, i pritom se odrede svi njegovi elementi (induktiviteti i kapaciteti) da bi se u izvedbi oni predstavili odsječcima prijenosne linije s malim i velikim karakterističnim impedancijama (slika 9.). Realizaciju filtra iz danog primjera moguće je ostvariti tijekom istraživačkoga studentskog rada [6].



Slika 9. Mreža prototipa niskopropusnog filtra i izgled mikrotrakaste izvedbe [7]

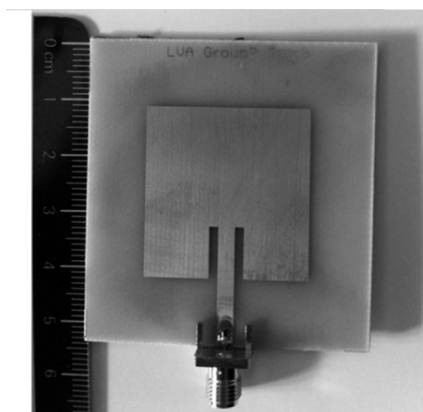
Mikrotrakaste antene, kao otvoreni rezonatori, također su široko područje za istraživanje i eksperimentiranje, što se može realizirati različitim studentskim projektima. Izrada mikrotrakaste antene napajane preko prijenosne linije omogućuje da se istraži duljina napojne linije i dubine utora poradi prilagodbe ulazne impedancije. Dubina utora određuje dodani kapacitet kojim se ugađa ulazna impedancija (slika 10.a). U taj se projekt uključuje izrada softvera za dizajn antene a rezultate prikazuje slika 10.b. Istraživački postupak može biti samo eksperimentalan, temeljen na mjerenju S_{11} raspršnog parametra s VNA (slika 10.c). Drugom skupinom eksperimenata ustanovljuje se dobitak (uz postojanje antene s poznatim dobitkom) i dijagram zračenja mikrotrakaste antene [8]. Moguće je u ovaj projekt uvesti i druge softverske alate za dizajn antene (kao CST), bilo radi eksperimentiranja, bilo za usporedbu s vlastitom računalskom aplikacijom i izmjerenim parametrima.

Upotreba računala omogućuje da se uvode nove metode i tehnike u analizu mikrovalnih mreža i sklopova. Zanimljiv je primjer projekta u kojemu se izrađuje model rasprostiranja u zatvorenom prostoru uz korištenje neuronskom mrežom. Prethodno naučena mreža prepoznaje ponašanje elektromagnetskog polja u zadanom prostoru. Model je samo softverski i daje sliku elektromagnetskog polja u zadanom prostoru, čime se omogućuje jednostavno lociranje pristupnih točaka kako bi se prostor učinkovito pokrio zadovoljavajućim signalom bežične mreže. Za bilo koji položaj pristupne točke dobiva se vizualni prikaz rasprostiranja signala (slika 11.).

Projekt ima sve značajke istraživačkoga jer izrada modela neuronske mreže uključuje ugađanje dosta velikog broja parametara poradi smanjenja i pogreške učenja i pogreške simulacije rasprostiranja. Poseban je istraživački dio optimizacija

pristupne točke u lokalnoj bežičnoj mreži, što u konačnici ima vrijednost znanstvenog rada i sve to uz aktivno sudjelovanje studenata [9]. Rezultati dobiveni neuronskim modelom lako su usporedivi mjerenjem, iz čega izlazi i svrhovitost ovakva modela.

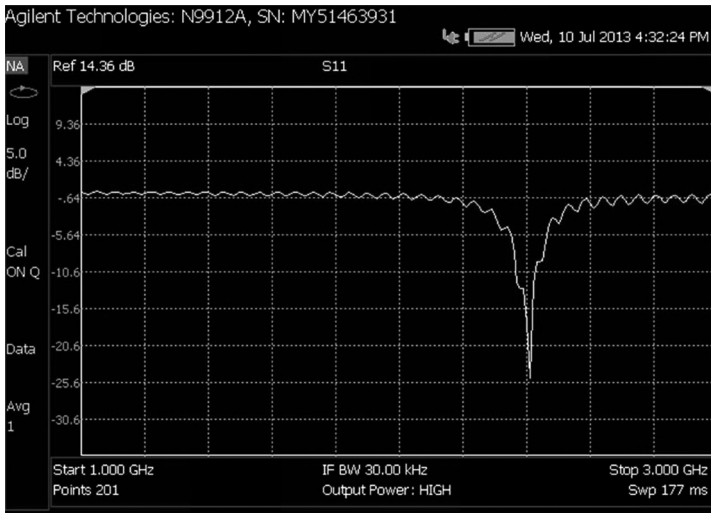
Postupak optimizacije položaja pristupne točke također je istraživački postupak. Pritom se mogu istraživati rezultati dobiveni primjenom različitim metoda optimizacije, od kojih su posebno zanimljive one temeljene na ponašanju živih organizama, kao optimizacijske metode roja čestica (PSO), mravlje kolonije (ACO) i/ili genetskog algoritma (GA).



(a)

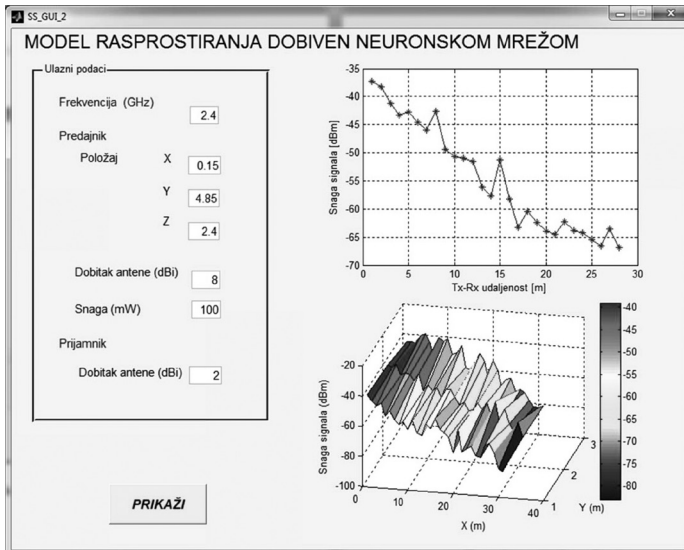


(b)



(c)

Slika 10. a) Mikrotrakasta antena napajana prijenosnom linijom, b) Rezultati proračuna (softwareski model), c) S11 parametar ovisno o frekvenciji izmjeren s VNA



Slika 11. Model rasprostiranja signala u zatvorenom prostoru

4. ZAKLJUČAK

U prethodnim poglavljima ukratko je opisan Laboratorij telekomunikacijskih tehnologija Odjela za elektrotehniku i računarstvo Sveučilišta u Dubrovniku, s posebnim naglaskom na područje radiofrekvencijske i mikrovalne tehnologije. Osnovna mu je svrha uz proširivanje teorijskih znanja, razvijanje i poticanje zanimanja studenata za ovo područje i stjecanje iskustva u uporabi modernih mjernih instrumenata kao razvijanje motivacije za istraživački rad. Laboratorijski rad uključuje jednostavno postavljene eksperimente, koji su ujedno dobra ilustracija teorijske nastave.

Oprema je skromna po kvaliteti i količini, ali stalnim dopunjavanjem i novih pasivnih i aktivnih mjernih komponenata i kreativnih novih eksperimenata nastoji se povećati entuzijizam studenata. Nastoji se „iskra upaljena“ kod studenata u laboratorijskom eksperimentiranju iskoristiti u izradbi zanimljivih istraživačkih projekata u završnim i diplomskim radovima. Na taj se način teži k obogaćivanju opreme, a s njom i kvalitete samih eksperimenata. Svi opisani eksperimenti i projekti nisu strogi dio propisanog kurikuluma, već su njegovo unapređenje i proširenje.

Vidljivo je da ovakav eksperimentalni pristup potiče studente i na znanstveni rad, čemu u prilog govore znanstveni radovi objavljeni s nastavnicima (ref. [6], [9] i [10]). U planu su projekti u izradbi antena za mjerne svrhe (lijevak antene), različiti razdjelnici, spreznici, filtri i rezonatori. Posebno znatan porast motivacije studenata za istraživački rad očekuje se uvođenjem eksperimentiranja u području optičkih komunikacija. Za sada postoji dobra reakcija studenata, a broj i kvaliteta njihovih primjedaba upućuju na stvarno zanimanje.

LITERATURA

- [1] W. J. R. Hoefler and P. P. M. So, *A Time-Domain Virtual Electromagnetics Laboratory for Microwave Engineering Educatio*, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., MTT-51, April 2003, pp. 1318-1315.
- [2] S. V. Hum and M. Okoniewski, *A Low-Cost Hands-On Laboratory for an Undergraduate Microwave Courses*, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 49, No.3, June 2007, pp. 175-184.
- [3] Keysight Technologies, *Introduction to the FieldFox RF Analyzer*, www.keysight.com/find/fieldfox
- [4] <http://dreamcather.asia.cw>
- [5] S. M. Wentworth, *Matlab Demonstration of Transmission Line Phenomena in Electromagnetics*, American Society for Engineering Education, 2012.

- [6] A. Konjuh (student), N. Burum, I. Vilović, *Insertion Loss Method and Particle Swarm Optimization Alogirithm in Filter Design*, Naše more br. 3-4, str. 130-137, 2009.
- [7] J. Bartolić, *Mikrovalna elektronika*, Graphis, Zagreb, 2008.
- [8] M. Brailo, *Pravokutne mikrotrakaste antene*, diplomski rad, 2013.
- [9] I. Vilović, N. Burum, I. Ćendo (student), *Optimal Location of Transmitter for Indoor Communications*, Proceedings of ELMAR-2011, Zadar
- [10] I. Vilović, N. Burum, Đ. Milić (student), *Using Particle Swarm Optimization in Traninig Neural Network for Indoor Fiekd Strength Prediction*, Proceedings of ELMAR-2009., Zadar

Ivan Vilović, PhD

Assistant professor
University of Dubrovnik
E-mail: ivan.vilovic@unidu.hr

THE ROLE OF TELECOMMUNICATION LABORATORY IN STIMULATING RESEARCH INTEREST IN STUDENTS AT THE UNIVERSITY OF DUBROVNIK

Teacher's enthusiasm, and fair, polite and friendly relationship towards students, are crucial characteristics of successful teaching.

*[with mathematical problem]
Do what you can....*

prof. Sibe Mardešić, PhD (1927)

Abstract

Significant improvement is achieved by introducing modern and professional measurement instruments and updated software in teaching of electromagnetics and wireless communications at the University of Dubrovnik. The results in quality and acquired skills of students of the Department of Electrical Engineering and Computing are obvious, although the laboratory has just been opened. The Laboratory of communication technologies empowers and extends knowledge acquired at the ordinary lecture through imaginative and creative experiments. Basic mission of the Laboratory is acquiring experimental skills and extension of knowledge, but also increasing the interest of students for experimental research, which can lead them toward scientific work. Educational approach through experiments is shown so as to increase the efficiency of educational process as well as to increase the motivation of students. The results show the increased number of students who participate in different experimental processes (not only the mandatory ones). The numbers of students who publish scientific articles with professor's cooperation are growing. The experiments which are developed in the Laboratory consist of computer simulations and measurement procedures of microwave

components and circuits. Simulation software is completely developed at the Department of electrical engineering and computing, as most of microwave elements that are used in measurement procedures. Part of experiments used circuits fabricated for educational purposes. One part of creative laboratory work originates from various projects through which students show their research capabilities and make their graduation thesis.

Key words: Microwave circuits, microwave measurements, vector network analyzer, signal generator, spectrum analyzer, microstrip devices, neural networks

JEL classification: L96, I20