



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
NOVI SAD



**MIKROTALASNI SENZORI
VLAŽNOSTI ZEMLJIŠTA
ZASNOVANI NA KOMPONENTAMA
SA DISTRIBUIRANIM PARAMETRIMA**

doktorska disertacija

Kandidat:

Goran Kitić, MSc

Mentori:

dr Goran Stojanović
dr Vesna Crnojević Bengin

Novi Sad, 2016.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:	
Идентификациони број, ИБР:	
Тип документације, ТД:	Монографска документација
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација
Аутор, АУ:	Горан Китић
Ментор, МН:	Проф. др Горан Стојановић и проф. др Весна Црнојевић Бенгин
Наслов рада, НР:	Микроталасни сензори влажности земљишта засновани на компонентама са дистрибуираним параметрима
Језик публикације, ЈП:	српски
Језик извода, ЈИ:	српски/енглески
Земља публикавања, ЗП:	Србија
Уже географско подручје, УГП:	
Година, ГО:	2015
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	
Физички опис рада, ФО: <small>(поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)</small>	9 поглавља/150 страна/112 референци/11 табела/96 слике
Научна област, НО:	Електротехничко и рачунарско инжењерство
Научна дисциплина, НД:	Електроника
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Сензор влажности узорака земљишта у непоремећеном стању, минијатурни сензори влажности, ЛТЦЦ технологија
УДК	Монографска документација
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука, Универзитет у Новом Саду
Важна напомена, ВН:	



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Извод, ИЗ:	<p>Сензори влажности земљишта су од кључног значаја за системе за наводњавање којима је могуће увећати приносе у просеку за 79%. У оквиру ове дисертације развијена су два сензорска решења за мерење влажности земљишта. Први сензор је намењен одређивању влажности узорака земљишта у непоремећеном стању. Решење је настало надоградњом стандардне опреме за узорковање земљишта. За поменути сензор конструисана је калибрациона крива којом је могуће одредити влажност земљишта са релативном грешком не већом од 2.5%. Друго сензорско решење је фабриковано у ЛТЦЦ технологији, малих је димензија и намењено је примени на терену. Главна предност овог сензора је да на њега не утиче проводност земљишта која је уско повезана са типом земљишта. Предложени сензор је тестиран на два узорка земљишта различитог хемијског састава. Резултати мерења су показали да тип земљишта нема утицај на одзив сензора. Остварена релативна грешка у односу на пун мерни опсег износи 5.36%.</p>		
Датум прихватања теме, ДП:	22. октобар 2015.		
Датум одбране, ДО:			
Чланови	Председник:	Проф. др Вера Марковић	
	Члан:	др Васа Радонић	
	Члан:	др Николина Јанковић	
	Ментор:	Проф. др Горан Стојановић	
	Ментор:	Проф. др Весна Црнојевић Бенгин	
			Потпис



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	Monograph documentation
Type of record, TR :	Textual printed material
Contents code, CC :	PhD thesis
Author, AU :	Goran Kitić
Mentor, MN :	Goran Stojanović, PhD, Vesna Crnojević Bengin, PhD
Title, TI :	Microwave soil moisture sensors based on distributed elements
Language of text, LT :	English
Language of abstract, LA :	Serbian/English
Country of publication, CP :	Serbia
Locality of publication, LP :	
Publication year, PY :	2015
Publisher, PB :	Author reprint
Publication place, PP :	
Physical description, PD :	9 chapters/150 pages/111 references/11 tables/96 figures
Scientific field, SF :	Electrical and Computer Engineering
Scientific discipline, SD :	Electronics
Subject/Key words, S/KW :	Soil moisture sensor of undisturbed samples, Miniature soil moisture sensor, LTCC technology
UC	
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad
Note, N :	



KEY WORDS DOCUMENTATION

Abstract, A:	<p>Soil moisture sensors are of great importance for the irrigation systems that are able to increase the yield on average of 79%. Within this thesis two sensor solutions have been developed. The first sensor, which is intended for laboratory use, has been designed by upgrading existing sampling equipment. The constructed calibration curve for this type of sensor that can be used for soil moisture determination with relative error not larger than 2.5% with respect to full scale output. The second sensor solution is designed to be used in the field. It is fabricated in LTCC technology and it is characterized by small overall dimensions. The main advantage of this sensor is that it is immune to the soil electrical conductivity which is closely related to the soil type. Proposed sensor is tested on two soil samples of different chemical composition and the results have shown that the type of soil does not influence the sensor response. The relative error with respect to full scale output was only 5.36 %.</p>		
Accepted by the Scientific Board on, ASB:	October 22nd, 2015		
Defended on, DE:			
Defended	President:	Vera Marković, PhD	Menthor's sign
	Member:	Vasa Radonić, PhD	
	Member:	Nikolina Janković, PhD	
	Member, Mentor:	Goran Stojanović, PhD	
	Member, Mentor:	Vesna Crnojević Bengin, PhD	

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Zemljište i voda	5
2.1	Tekstura zemljišta	6
2.2	Struktura zemljišta	8
2.3	Poroznost zemljišta i veličina pora	9
2.4	Voda u zemljištu	9
2.5	Dinamika vode u zemljištu	11
2.6	Uticaj vode na električne karakteristike zemljišta	13
2.7	Zaključak.....	17
3	Metode za merenje vlažnosti zemljišta.....	19
3.1	Neutronska metoda.....	20
3.2	Metoda slabljenja gama zraka.....	21
3.3	Tenziometrijske metode	22
3.4	Elektromagnetske metode	24
3.4.1	Rezistivni senzori	24
3.4.2	Dielektrične metode	26
3.4.3	Daljinsko merenje vlažnosti zemljišta	31
3.5	Zaključak.....	34
4	Senzor za merenje vlažnosti uzoraka zemljišta u neporemećenom stanju	36
4.1	Projektovanje senzora	37
4.2	Merenje permitivnosti i uticaj gubitaka	47
4.3	Kalibracija i testiranje	49

4.4	Primena projektovanog senzora za karakterizaciju nikel-manganitnog praha na visokim učestanostima.....	58
4.4.1	Priprema praha	58
4.4.2	Ekvivalentni električni model	59
4.4.3	Rezultati merenja.....	61
4.5	Zaključak.....	64
5	Teorijske osnove minijaturnog senzora vlažnosti zemljišta.....	66
5.1	Metoda faznog kašnjenja.....	66
5.2	Arhitektura voda i princip rada senzora	68
5.3	Efektivna permitivnost mikrostrip linije	70
5.4	Opseg faznog kašnjenja.....	83
5.5	Zaključak.....	86
6	Projektovanje i fabrikacija senzorskog elementa u tehnologiji štampanih ploča	88
6.1	Projektovanje i fabrikacija senzorskog elementa.....	88
6.2	Validacija metode faznog kašnjenja.....	93
6.3	Zanemarivanje uticaja provodnosti	95
6.4	Nedostaci senzorskog elementa fabrikovanog u tehnologiji štampanih ploča.....	97
6.5	Zaključak.....	99
7	Električno kolo za merenje faznog kašnjenja	101
7.1	Koncept električnog kola za merenje faznog kašnjenja	101
7.2	Oscilator	104
7.3	Pomerač faze	107
7.4	Kompletno kolo za merenje faznog pomeraja	111
7.5	Zaključak.....	115
8	Projektovanje i fabrikacija senzora u LTCC tehnologiji	116

8.1	LTCC tehnologija fabrikacije	118
8.2	Električne karakteristike keramičkog supstrata i granularne matrice	119
8.3	Projektovanje senzorskog elementa	122
8.4	Fabrikacija predloženog senzorskog elementa.....	127
8.5	Fabrikacija sonde senzora vlažnosti zemljišta	131
8.6	Merenje vlažnosti zemljišta.....	132
8.7	Planirana istraživanja	135
8.8	Zaključak.....	136
9	Zaključak	138
	Literatura.....	141

Spisak slika

Slika 2.1: Zemljište i njegove faze: A - gasna faza, B - čvrsta faza, C - tečna faza [6].....	5
Slika 2.2: Teksturni trougao zemljišta prikazuje 12 osnovnih klasa tekstura definisana od strane USDA.....	7
Slika 2.3: Struktura zemljišta: a) laminarna b) prizmatična c) kuboidna d) granularna.	8
Slika 2.4: Sadržaj vode i kapilarni potencijal prilikom saturacije zemljišta, poljskog vodnog kapaciteta i vlažnosti venjenja.	11
Slika 2.5: Retenciona kriva za glinu, ilovaču i pesak [12].....	12
Slika 2.6: Opsezi učestanosti na kojima se javljaju određeni mehanizmi polarizacije [20].	17
Slika 3.1: Neutronska proba: e – emiter, d – detektor, b – oklop, c – brojač [24].....	20
Slika 3.2: Metoda slabljenja gama zraka.	22
Slika 3.3: Sastavni delovi tenziometra [29].....	23
Slika 3.4: Rezistivni senzor sa gipsanim blokom [32].....	25
Slika 3.5: Watermark senzor model 200SS.	26
Slika 3.6: Primeri TDR proba: a) FieldScout TDR 100 b) Stevens Hydra Probe.	27
Slika 3.7: Kapacitivne sonde a) realizovane provodnim šipkama [38] b) pločasti tip [39] c) ivična kapacitivnost [41].....	29
Slika 3.8: Merenje vlažnosti metodom električne impedanse a) postupak merenja b) model virtuelnog voda [45].....	30
Slika 3.9: Senzor zasnovan na metodi merenja impedanse [47].....	31
Slika 3.10: Mapa vlažnosti zemljišta nastala koristeći SMOS podatke koja pokazuje vrednosti vlažnosti zemljišta centralne Evrope 3.1 maja 2013. kad su obilne padavine izazvale poplave u Nemačkoj, Austriji, Češkoj Republici i Slovačkoj [50].	32
Slika 3.11: Mapa volumetrijskog udela vode, jedan piksel odgovara površini od 250 m ² [51]. ..	33
Slika 3.12: Primer vremensko-prostornog GPR profila zemljišta koje se nalazi na prelazu šume i travnjaka [55].	34
Slika 4.1: Poprečni presek Kopecki koaksijalnog voda deo senzora u kom je smešten uzorak zemljišta.	38
Slika 4.2: Adapter: a) poprečni presek b) fotografija dva sastavna dela adaptera.	39
Slika 4.3: Predloženi senzor (desno) i njegovi sastavni delovi.....	40

Slika 4.4: Vodovima modelovan senzor. Dužine vodova su $l_c = H_c = 44 \text{ mm}$, $l_a = 24.5 \text{ mm}$, i vična kapacitivnost $C_f = 0.51 \text{ pF}$.	42
Slika 4.5: Električno kratka sekcija voda bez gubitaka modelovana elementima sa koncentrisanim parametrima.	42
Slika 4.6: Predloženi senzor modelovan elementima sa koncentrisanim parametrima.	43
Slika 4.7: Poređenje između izmerene ulazne reaktanse i ulazne reaktanse modelovane	46
Slika 4.8: Izmerene permitivnosti raznih uzoraka, koje pokazuju da se uređaj može koristiti nezavisno od tipa materijala koji se testira.	47
Slika 4.9: Vidljiva permitivnost proračunata na osnovu 19 rezultata merenja ritske crnice uzoraka poznatog sadržaja vode. Strelica pokazuje smer porasta vlažnosti zemljišta.	50
Slika 4.10: Kalibraciona kriva konstruisana za ritsku crnicu.	52
Slika 4.11: Kalibraciona kriva konstruisana za karbonatni černoziem.	53
Slika 4.12: Električni model senzora za određivanje kompleksne permitivnosti uzorka.	53
Slika 4.13: Kompleksna permitivnost vazduha: a) realni deo b) imaginarni deo.	56
Slika 4.14: Kompleksna permitivnost ritske crnice a) realni deo b) imaginarni deo.	57
Slika 4.15: SEM mikrografi niki manganitnog praha mleveni u vremenskim	59
Slika 4.16: Kopecki koaksijali vod delimično ispunjen NTC uzorkom.	60
Slika 4.17: Ekvivalentni električni model senzora za električnu karakterizaciju NTC praha.	60
Slika 4.18: Relativna permitivnost NTC prahova mleveni u različitim intervalima.	62
Slika 4.19: Termovizijske slike mernog uređaja za različite temperature	63
Slika 4.20: Relativna permitivnost u zavisnosti od učestanosti i temperature.	64
Slika 5.1: Poprečni presek mikrostripa postavljenog u zemljište	69
Slika 5.2: Poprečni presek beskonačno duge mikrostrip linije	71
Slika 5.3: Relativna greška proračunate efektivne permitivnosti u odnosu na simularinu vrednost za različite širine mikrostrip linije a) $w = 0.5 \text{ mm}$ b) $w = 1.0 \text{ mm}$ c) $w = 1.5 \text{ mm}$ d) $w = 2.0 \text{ mm}$	82
Slika 5.4: Poređenje izraza za efektivnu permitivnost.	83
Slika 5.5: Uticaj debljine supstrata mikrostrip linije na opseg faznog kašnjenja	84
Slika 5.6: Uticaj širine provodne linije mikrostripa na opseg faznog kašnjenja.	85
Slika 5.7: Uticaj relativne permitivnosti supstrata na opseg faznog kašnjenja.	85
Slika 6.1: Fazno kašnjenje prostoperiodičnog signala koji se prostire duž mikrostrip linije	89

Slika 6.2: Prvih šest redova Hilbertove fraktalne krive	90
Slika 6.3: Rezultati simulacije koji ispituju uticaj reda fraktalnih krivih kao i uticaj paralelnog vezivanja krivih:a) uneseno slabljenje za slučaj vlažnog zemljišta b) ostvareni fazni opseg.....	91
Slika 6.4: Senzorski element - pogled od gore	92
Slika 6.5: Linije E-polja senzorskog elementa sa odstranjenim delom uzemljenog sloja	92
Slika 6.6: Senzor postavljen u kontejner sa peskom.....	94
Slika 6.7: Kalibraciona kriva na učestanosti 2.5 GHz	95
Slika 6.8: Kalibracione krive uzoraka vlaženih vodom različitog saliniteta na učestanostima: a) 500 MHz i b) 2500 MHz.....	96
Slika 6.9: Promene na bakru senzorskog elementa pod uticajem korozije	98
Slika 8.1: Koncept senzora realizovanog u LTCC tehnologiji a) poprečni presek b) senzor postavljen u zemljište.....	117
Slika 8.2: LTCC primene a) Mikrotalasni modul [98] b) BGA matrica [99] c) Hybrid circuit [100] (20 GHz fractional –N synthesizer module for satellite operation)	119
Slika 8.3: Mikrostrip linije za električnu karakterizaciju Ceramtec GC trake i granularne matrice	120
Slika 8.4: Optimalan oblik pregiba mikrostrip linije	121
Slika 8.5: Senzorski element sa a) četvrtastim pregibom b) zaobljenim pregibom c) kosim pregibom	124
Slika 8.6: Detalj pregiba mikrostrip linije: a) pukotina koja se javlja b) rešenje problema	126
Slika 8.7: Predlog senzorskog elementa	126
Slika 8.8: Sito maske za: a) gornji provodni sloj sloj senzorskog elementa b) donji provodni sloj senzorskog elementa	128
Slika 8.9: LTCC traka pripremljena za sito štampu i laminaciju.....	129
Slika 8.10: Proces laminacije: a) trake poređane u kalup za laminaciju b) uniaksijalni laminator	129
Slika 8.11: Temperaturni profil pečenja	130
Slika 8.12: Fabrikovani senzorski element sa postavljenim SMA konektorima	130
Slika 8.13: Sklop merne sonde senzora vlažnosti zemljišta	132
Slika 8.14: Merna sonda senzora vlažnosti zemljišta	132
Slika 8.15: Uzorak zemljišta sa postavljenom mernom sondom	133

Slika 8.16: Merenje vlažnosti zemljišta pomoću sonde.....	134
Slika 8.17: Koncept minijaturnog senzora vlažnosti zemljišta.....	136

Spisak tabela

Tabela 2.1: Klasifikacija čestica zemljišta prema veličini na osnovu ISSS.	6
Tabela 2.2: Relativne permeabilnosti pojedinih sastojaka zemljišta [13].....	14
Tabela 2.3: Realna relativna permitivnosti sastojaka zemljišta [15].	14
Tabela 4.1: Relativna permitivnost i efektivna električna provodnost karakterisanih uzoraka	49
Tabela 4.2: Relativne permitivnosti i efektivne permitivnosti ritske crnice ekstrahovane na osnovu 19 merenja uzorka zemljišta različitog masenog udela vode.	51
Tabela 4.3: Električna provodnost ritske crnice na niskim učestanostima	58
Tabela 8.1: Rezultati simulacije povratnog i unesenog slabljenja na učestanosti 2.2 GHz za potrebe pronalazjenja optimalne širine provodne linije.....	123
Tabela 8.2: Rezultati simulacije za razne oblike pregiba provodne linije kod mikrostripa.....	125
Tabela 8.3. Rezultati agrohemijske analize uzoraka zemljišta upotrebljenih za testiranje merne sonde	134

1 Uvod

Najnovije procene Organizacije za hranu i poljoprivredu Ujedinjenih nacija (eng. *Food and Agriculture Organization of United Nations* - FAO) ukazuju da je trenutno prisutan nagli pad u rastu broja stanovnika [1]. Stopa rasta svetske populacije imala je svoj vrhunac u drugoj polovini šezdesetih godina prošlog veka sa 2.04% po godini. Sadašnje procene za 2015. govore da taj procenat iznosi 1.1% sa projekcijom da će opasti na 0.5% do 2050. godine. Uprkos navednim prognozama, apsolutni godišnji priraštaj nastavlja da bude veoma visok o čemu govori podatak da se trenutno svetska populacija uvećava za 79 miliona godišnje. Ovakav trend povlači za sobom povećanje potrebe za proizvodnjom hrane koja se, sa druge strane, uvećava i zahvaljujući porastu prihoda. Procena Svetske Banke za period 2000-2015. predviđa višu stopu rasta BDP-a po glavi stanovnika nego u periodu devetdesetih godina prošlog veka u svim oblastima i zemljama izuzev Istočne Azije. Predviđanja za potražnju hrane pokazuju da će potražnja za hranom po glavi stanovnika (kcal/person/day) naglo porasti. Svetski prosek za 2015. približava se 3000 kcal kcal/osoba/dan što će sigurno biti premašeno do 2030.

Značajan problem s kojim se susreće današnje društvo jeste neuhranjenost o čemu svedoče podaci UNICEF-a iz maja 2006. godine prema kojima 45% dece mlađe od 5 godina u južnoj Aziji pati od gladi, dok u podsaharskoj Africi ovaj podatak iznosi 28% [2]. Imajući u vidu da neuhranjenost ometa pravilan rast i razvoj dece, otpornost na infekcije, oporavak od bolesti, sposobnost za učenje i bavljenje fizičkim aktivnostima, trudnoću i dojenje kod žena, postaje jasno koliki je značaj borbe protiv neuhranjenosti. Svetski samit posvećen hrani koji je održan 1996, postavio je cilj da se broj neuhranjenih prepolovi do 2015. godine.

Rešenje za što većom potražnjom za hranom bilo iz potrebe stalnog priraštaja broja stanovnika ili iz potrebe borbe protiv neuhranjenosti leži upravo u poljoprivredi i usredsređivanju na proizvodnju hrane. Do 2030. planirano je uvećanje prinosa useva u zemljama u razvoju za 67% u odnosu na period 1997-1999. godine [1]. Veći deo pomenutog porasta prevashodno se odnosi na porast prinosa i što manje perioda u kom je zemljište neobrađeno, dok se ostatak odnosi na uvećanje površine obradivog zemljišta.

Navodnjavanje u znatnoj meri utiče na porast prinosa, te je primenom optimalnih sistema za parcijalna navodnjavanja moguće uvećati prinose u proseku za 79% [3]. Navedeni podatak ima potporu u činjenici da većinu fizičkih i hemijskih osobina zemljišta određuje njegova vlažnost, pa samim tim pravilan razvoj i održavanje biljaka upravo zavise od ovog faktora [4]. Na primer, izrazito suvo zemljište kod biljaka izaziva smanjenu fotosintezu kao i redukovanu deobu ćelija. S druge strane, previše vlažno zemljište podložno je ispiranju hranljivih sastojaka i nije u stanju da primi vodu od prirodnih padavina. Biljke u ovim uslovima postaju osetljivije na bolesti. Može se reći da voda predstavlja „životnu snagu“ poljoprivrede i da je unapređenje sistema za navodnjavanje kritično za održivu proizvodnju hrane. Imajući u vidu da se skoro 40% svetske hrane proizvodi sa parcela koje se navodnjavaju jasno je koliko su ovi sistemi bitni u obezbeđivanju dovoljne količine hrane kao i u štednji vode koje se koristi [5].

Jedan od načina unapređenja sistema za navodnjavanje jeste razvoj novih i tačnih senzora za merenje vlažnosti zemljišta. Takvi senzori bi davali pouzdanu informaciju o vlažnosti zemljišta i tako omogućili irigacionim sistemima da isporuče optimalne količine vode. U okviru ove disertacije razvijena su dva senzorska rešenja za merenje vlažnosti zemljišta. Oba senzora rade na relativno visokim učestanostima stoga se njihovo ponašanje može modelovati elementima sa distribuiranim parametrima. Prvo rešenje namenjeno je određivanju vlažnosti uzoraka zemljišta u neporemećenom stanju, u laboratorijskim uslovima. Glavna prednost ovakvog senzora je u znatno kraćem vremenu potrebnom za određivanje vlažnosti zemljišta u odnosu na referentnu metodu koja traje minimalno 24 časa. S druge strane, fabrikovani senzor omogućava karakterizaciju zemljišta u neporemećenom stanju što je znatna prednost u odnosu na ostale indirektno metode.

Drugo rešenje senzora je projektovano za upotrebu na terenu i postavljanje u zemljište. Takav senzor karakterišu male dimenzije, dobra osetljivost i robusnost, što ga čini pogodnim za integraciju u bežične senzorske mreže. Važno je napomenuti da je odziv novog tipa senzora, nezavisan od električne provodnosti zemljišta, koja je usko povezana sa tipom zemljišta. Pokazivanje postojećih senzora vlažnosti varira u zavisnosti od omske provodnosti, odnosno tipa

zemljišta. U ovoj osobini leži osnovna prednost novih senzora u odnosu na postojeće. Pored toga, sama metoda na kojoj je zasnovan novi senzor čini ga imunijim na šum, te samim tim i pouzdanijim. Disertacija je organizovana na sledeći način:

Druga glava posvećena je zemljištu i njegovom odnosu sa vodom. Zemljište je opisano sa stanovišta osnovnih fizičkih osobina poput teksture, strukture i poroznosti, a potom su ove osobine zemljišta dovedene u vezu sa prisustvom vode. Zatim su definisani kvantitativni parametri kojima se definiše količina vode u zemljištu. Poseban osvrt dat je na dinamičko ponašanje vode u zemljištu koje opisuje procese kroz koje voda prolazi počev od saturacije zemljišta vodom pa do njegovog potpunog sušenja. Dalje su definisane osnovne vodne konstante zemljišta, bitne za sisteme navodnjavanja, a na kraju glave zemljište je razmotreno sa stanovišta svojih električnih karakteristika, budući da su upravo ove karakteristike korišćene kod razvijanja metoda za merenje vlažnosti zemljišta.

U *trećoj glavi* opisane su postojeće metode za merenje vlažnosti zemljišta. U prvom planu se nalaze indirektna metode, budući da su nedestruktivne, imaju brzi odziv i mogućnost kontinualnog praćenja vlažnosti zemljišta. Stoga su ove metode naročito značajne kod sistema za navodnjavanje. Metode su sagledane sa aspekta njihovih osnovnih prednosti i nedostataka.

Novi, robustan senzor za merenje vlažnosti uzoraka zemljišta koji je razvijen u okviru ove teze je tema *četvrte glave*. Na samom početku opisan je postupak projektovanja senzora zatim je prikazan ekvivalentni električni model senzora i na kraju je opisan njegov princip rada. Na osnovu teorijskog razmatranja i rezultata modelovanja izrađeni su prototipovi novog senzora, a potom je sa novim sensorom urađeno merenje vlažnosti zemljišta dva različita tipa zemljišta, ritska crnica i karbonatni černoze. Na osnovu merenja sensorom i gravimetrijske metode merenja količine vode u uzorcima konstruisane su kalibracione krive. Potom su dobijene krive korišćene za merenja vlažnosti test uzoraka sa različitim sadržajem vode. Rezultati merenja su pokazali zadovoljavajuće poklapanje sa rezultatima dobijenim gravimetrijskom metodom. Na kraju ove glave demonstrirana je mogućnost upotrebe senzora za električnu karakterizaciju raznih praškastih materijala na primeru NTC prahova.

Teorijske osnove minijaturnog senzora vlažnosti zemljišta opisane su u *petoj glavi*. Na početku glave je opisana metoda faznog kašnjenja kao principska metoda ponuđenog senzorskog rešenja i mikrostrip arhitektura voda kao optimalno rešenje za realizaciju predložene metode. U nastavku je izveden izraz za efektivnu permitivnost mikrostripa kako bi se u velikoj meri izbegla potreba za zahtevnim elektromagnetskim simulacijama prilikom projektovanja senzora. Na kraju *pete glave* je pokazano kako osnovni parametri mikrostripa poput širine provodne linije, debljine i relativne permitivnosti podloge utiču na odziv senzora. Ovim je stvoren i skup mehanizama za kasniju optimizaciju novog senzora.

U *šestoj glavi* prikazan je proces projektovanja i izrade senzorskog elementa u tehnologiji štampanih ploča. Cilj ove glave je da se principski potvrdi predložena metoda faznog kašnjenja kao i da se potvrdi analitički pokazana tvrdnja da se na dovoljno visokim učestanostima uticaj električne provodnosti zemljišta može u potpunosti zanemariti. *Šesta glava* se završava opisom nedostataka senzorskog elementa napravljenog u standardnoj tehnologiji štampanih ploča. Zaključeno je da je neophodno osmisliti i realizovati električno kolo koje podržava predloženu metodu faznog kašnjenja kao i neminovnost realizacije senzorskog elementa u tehnologiji niskotemperaturne zajedno pečene keramike (LTCC).

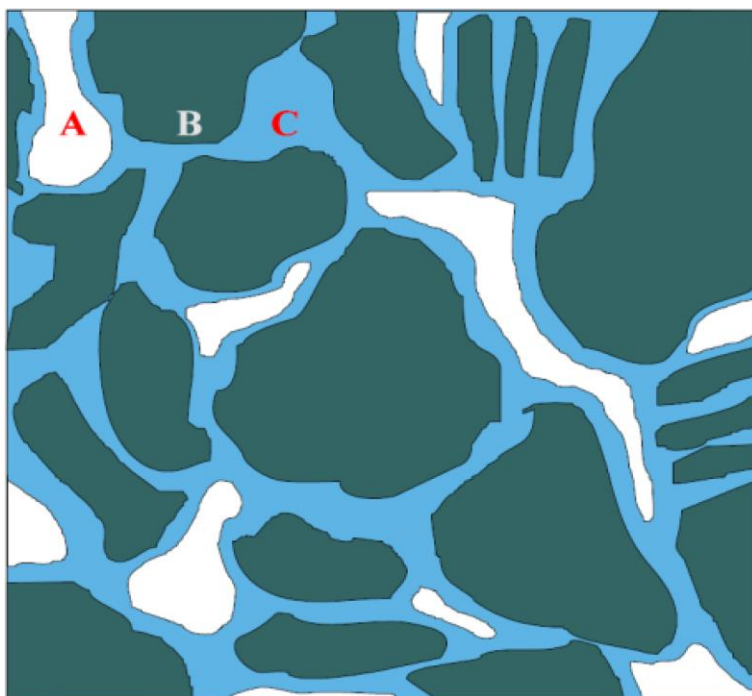
Elektronsko kolo za merenje faznog kašnjenja je tema *sedme glave* doktorske disertacije u kojoj je opisan kompletan postupak projektovanja kola počev od njegovog koncepta preko funkcionalnih modula koji ga čine. Osmišljeno električno kolo je projektovano, izrađeno i testirano, a rezultati su prikazani na kraju *sedme glave*.

Opisane mane senzorskog elementa fabrikovanog u tehnologiji štampanih ploča bile su povod za realizaciju senzorskog elementa u tehnologiji niskotemperaturne zajedno pečene keramike. Projektovanje i fabrikacija senzorskog elementa u pomenutoj tehnologiji opisano je u *osmoj glavi*. U nastavku je opisana sonda koja je zasnovana na izrađenom senzorskom elementu. Sonda je testirana na dva uzorka zemljišta različitog hemijskog sastava, kako bi se dokazala nezavisnost ovog tipa senzora od tipa zemljišta.

Zaključak disertacije je dat u *devetoj glavi*, kao i predlozi za buduća istraživanja kojima bi se unapredilo postojeće rešenje. Na kraju disertacije dat je pregled literature.

2 Zemljište i voda

Zemljište predstavlja kompleksnu mešavinu minerala i organske materije koje formiraju strukturu u kojoj se pored mineralnih čestica nalaze i vazduh, voda i rastvorene supstance. Mineralne čestice su nastale raspadanjem i usitnjavanjem stena pod uticajem različitih fizičkih i hemijskih procesa. Dominatni minerali su silikati a prisutni su i ostali elementi poput kalijuma, kalcijuma i fosfora u obliku svojih soli. Organska materija nastala je raspadanjem biljaka i životinja i predstavlja izvor azota i ostalih osnovnih hranljivih sastojaka potrebnih biljkama. Pored toga, organska materija zadržava vodu u svojim porama, stabilizuje strukture zemljišta i sprečava nagle promene pH vrednosti. Između čestica minerala nalaze se zazori (pore) koji mogu biti ispunjeni vodom i/ili vazduhom.



Slika 2.1: Zemljište i njegove faze: A - gasna faza, B - čvrsta faza, C - tečna faza [6].

Voda čini tečnu fazu u zemljištu i od presudnog je značaja za metabolizam biljaka i transport hranljivih sastojaka. Voda sadrži rastvorene soli koje su bitne za ishranu biljaka, dok vazduh čini gasnu fazu, formira atmosferu zemljišta i takođe je od presudnog značaja za stvarnje uslova u kojima je korenje biljaka u stanju da apsorbuje hranljive sastojke. Može se zaključiti da je zemljište porozna sredina koju čine tri konstitutive faze: čvrsta, tečna i gasna, slika 2.1.

Odnos ove tri faze koje čine zemljište određuje kako se voda kreće kroz zemljište i što je bitnije, kakva je njena dostupnost biljkama. U nastavku će biti opisana osnovna fizička svojstva zemljišta kao i uticaj vode na njih. Pored svoje strukture, zemljište se može opisivati i preko svojih elektromagnetskih osobina što je bitno prilikom merenja vlažnosti zemljišta. Stoga će zemljište biti opisano na osnovu obe klasifikacije, svoje teksture i elektromagnetskih osobina kao funkcije vlažnosti.

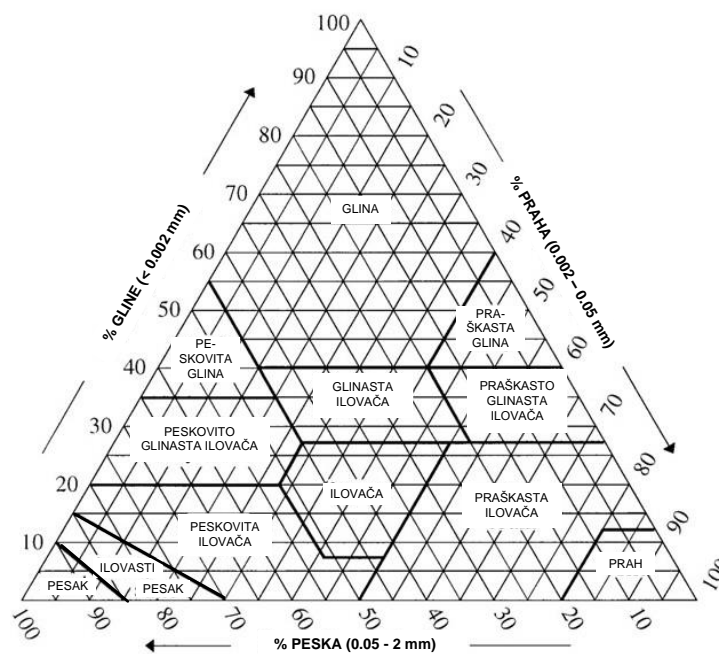
2.1 Tekstura zemljišta

Tekstura zemljišta predstavlja mehanički sastav zemljišta i prevashodno je određena učešćem čestica različitih veličina. Postoji niz klasifikacija zemljišnih čestica: prema Kačinskom, Američka podela i moderna evropska podela prema De Leenheer-u [7]. Kod nas je najzastupljenija klasifikacija Međunarodnog društva za proučavanje zemljišta (eng. *International Society of Soil Science – ISSS*) koja je prikazana u tabeli 2.1, ali se takođe koristi i klasifikacija američkog ministarstva poljoprivrede (eng. *United States Department of Agriculture – USDA*) koja je prikazana na slici 2.2.

Tabela 2.1: Klasifikacija čestica zemljišta prema veličini na osnovu ISSS.

Čestice	Veličina čestice [mm]
Glina	<0.002
Prah	0.002 – 0.02
Sitni pesak	0.02 – 0.2
Krupni pesak	0.2 – 2
Šljunak	2 – 20
Kamen	> 20

Tekstura zemljišta određena je procentualnom zastupljenošću odnosno kvantitativnim odnosom frakcija peska, praha i gline prema USDA standardu. Prema teksturnom trouglu sa slike 2.2 klasifikacija dobija naziv prema primarnoj veličini čestica prisutnoj u zemljištu ili kombinacijom većinskih čestica koje su zastupljene. Termin ilovača označava tip zemljišta u kojoj su podjednako zastupljene čestice gline, praha i peska. Na osnovu opisane podele postoji ukupno 12 teksturalnih tipova zemljišta.

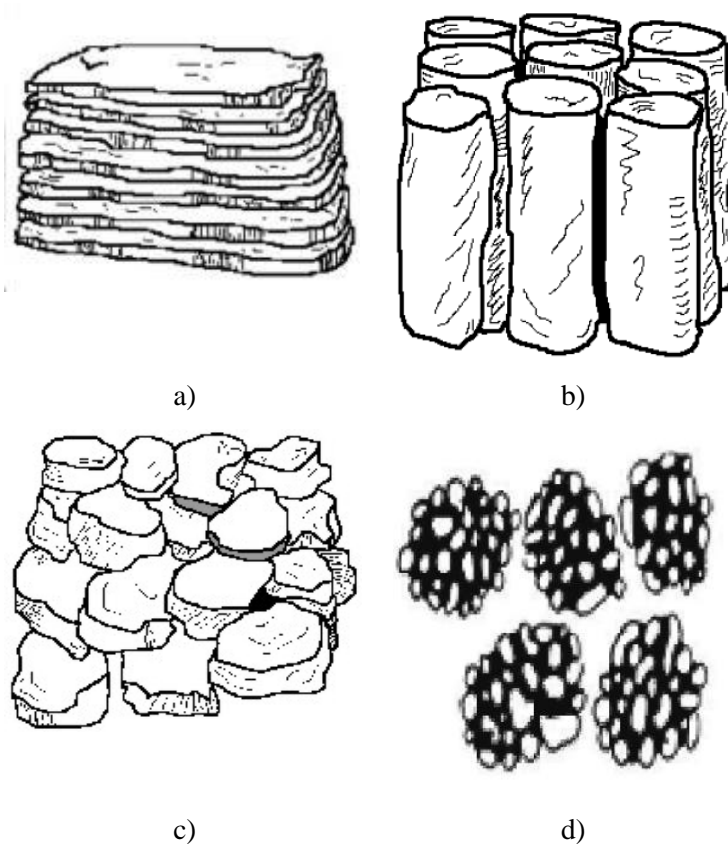


Slika 2.2: Teksturni trougao zemljišta prikazuje 12 osnovnih klasa tekstura definisana od strane USDA.

Od teksture zemljišta zavisi čitav spektar osobina zemljišta poput sklonosti prema eroziji, drenaže, infiltracije i retencije vode. Mnoge hemijske i fizičke osobine zemljišta zavise od teksture zemljišta budući da se fizičko-hemijske reakcije odvijaju na površini zemljišnih čestica gde je veličina ove aktivne površine direktno određena teksturom. Primer uticaja teksture je sposobnost zemljišta da zadrži vodu, koja je značajno bolja kod zemljišta finije teksture (glinovita tekstura).

2.2 Struktura zemljišta

Struktura zemljišta nam govori na koji način su zemljišne čestice vezane u strukturne agregate i kako su oni međusobno orijentisani. Strukturni agregati nastaju vezivanjem zemljišnih čestica koloidima organskog i neorganskog sastava koji deluju poput prirodnog lepka (cementa) i oni se mogu klasifikovati prema formi, obliku i otpornosti na dejstvo vode. U opštem slučaju postoje četiri osnovna tipa strukture zemljišta po formi strukturnih agregata: laminarni, prizmatični, kuboidni i granularni, slika 2.3. Laminarna struktura zemljišta podrazumeva agregate koji su razvijeniji u pravcima horizontalnih osa nego u pravcu vertikalne ose. Prizmatična struktura zemljišta je suprotna od laminarne i grade je agregati pretežno razvijeni u pravcu vertikalne ose. Kuboidna forma se karakteriše agregatima koji su podjednako razvijeni u sva tri prostorna pravca, dok granularnu strukturu zemljišta čine agregati sferičnog oblika koji su veoma rastresiti.



Slika 2.3: Struktura zemljišta: a) laminarna b) prizmatična c) kuboidna d) granularna.

Struktura zemljišta je bitna za rast i razvoj biljaka, budući da određuje način na koji se voda kreće i zadržava u zemljištu, kao i sa kojim otporom korenje biljaka prodire kroz zemljište. Kretanje vode prema nižim nivoima zemljišta je znatno otežano kod laminarnog tipa zemljišta, voda se umerenom lakoćom kreće kroz zemljišta prizmatične i kuboidne strukture, dok je njeno kretanje veoma lako kod zemljišta granularne strukture. Bitno je napomenuti, da pored opisanih osobina provođenja vode, struktura zemljišta utiče na aeraciju (provetravanje) i eroziju zemljišta.

2.3 Poroznost zemljišta i veličina pora

Zemljišne čestice ne ispunjavaju u potpunosti zapreminu zemljišta, već se između njih nalaze vazdušni zazori odnosno pore koje su ispunjene vazduhom ili vodom. Poroznost zemljišta predstavlja deo ukupne zapremine zemljišta koje zauzimaju pore i predstavlja ukupan volumen koji je moguće ispuniti vodom. Tipična vrednost poroznosti zemljišta kreće se od 0.3 do 0.7 [8]. Značajniji parametar za biljke od same poroznosti predstavlja veličina pora u zemljištu koja se klasifikuje na tri osnovna tipa: makropore, mezospore i mikropore [9]. Makropore su pore veličine veće od 75 μm što je preveliko za zadržavanje vode kapilarnim silama, te su iz tog razloga ispunjene vazduhom. Mezospore su veličine (30 – 75 μm) i one su najznačajnije za rast i razvoj biljaka pošto su zbog svoje veličine u mogućnosti da zadrže vodu kapilarnim silama, ali te sile nisu tolikog inteziteta da onemoguće dostupnost vode biljkama. Mikropore sa veličinom pora od 30 μm mogu biti ispunjene vodom čak i u slučaju veoma suvog zemljišta ali je ta voda nedostupna biljkama budući da je voda čvrsto vezana za zemljišne čestice.

2.4 Voda u zemljištu

Voda koja se nalazi u zemljištu može se podeliti na: higroskopnu vodu, kapilarnu vodu i slobodnu vodu [10]. Higroskopnu vodu čine molekuli vode koji se nalaze neposredno uz čestice zemljišta i koji su vezani za njih površinskim silama. Higroskopni sloj vode je čvrsto vezan elektrostatičkim silama koje potiču od negativno naelektrisanih površina mineralnih čestica. Ovaj tip vode ispunjava mikropore i nedostupan je biljkama, ali je veoma bitan za aktivnost mikroba jer stvara vlažne anaerobne uslove.

Sloj vode koji nije u neposrednom kontaktu sa mineralima u zemljištu ali s druge strane ne podleže uticaju gravitacije predstavlja kapilarnu vodu. Kapilarnu vodu dalje možemo podeliti na unutrašnju i spoljašnju. Unutrašnji sloj je u direktnom kontaktu sa adsorbovanom vodom i ponaša se kao prelazna zona prema spoljašnjem kapilarnom sloju. Unutrašnjim slojem vode preovladavaju koloidne sile dok je u slučaju spoljašnjeg sloja reč i o silama površinskog napona. Količina kapilarne vode zavisi od same teksture i strukture zemljišta, kao i količine organske materije i sila gravitacije. Sa stanovišta biljaka kapilarna voda je najkorisnija jer ona predstavlja vodu koja im je dostupna.

Slobodna voda, koja se takođe naziva i gravitaciona voda, ima mogućnost da se kreće naniže kroz zemljište pod uticajem sile zemljine teže usled nemogućnosti privlačnih sila čestica zemljišta i kapilarnih sila da je zadrže. Gravitaciona voda je nepoželjna jer ispira hranljive sastojke iz zone sisajućeg korenja (rizosfere).

Količina vode u zemljištu izražava se obično preko masenog (gravimetrijskog) ili volumetrijskog udela vode, [11]. Maseni udeo vode θ_g predstavlja odnos mase vode u uzorku m_w i mase suvog uzorka zemljišta m_{ds} :

$$\theta_g = \frac{m_w}{m_{ds}} = \frac{m_{ws} - m_{ds}}{m_{ds}}, \quad (2.1)$$

gde je masa vlažnog uzorka zemljišta označena sa m_{ws} . Ukoliko je poznata gustina suvog zemljišta ρ_{ds} , volumetrijski udeo vode računa se kao

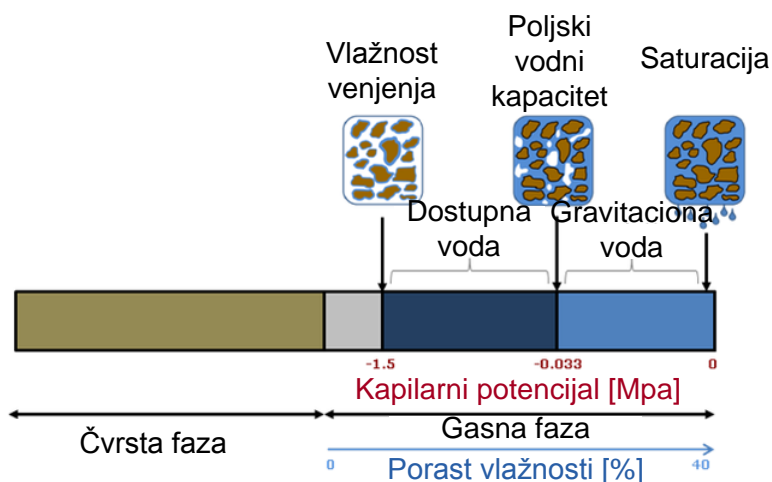
$$\theta_v = \frac{V_w}{V_{ds}} = \frac{\frac{m_w}{\rho_w}}{\frac{m_{ds}}{\rho_{ds}}} = \frac{\rho_{ds}}{\rho_w} \theta_g, \quad (2.2)$$

gde su V_w i V_{ds} redom zapremine vode u uzorku i zapremina suvog uzorka, dok je ρ_w gustina vode. Na osnovu ovih podataka moguće je proceniti, sa aspekta biljaka, količinu pristupačne, lakopristupačne, teže pristupačne, teško pristupačne i nepristupačne vode u zemljištu. Udeo vode u zemljištu direktno određuje način i količinu vode za navodnjavanje i neposredno utiče na prinos useva.

2.5 Dinamika vode u zemljištu

Pojava prodiranja vode u zemljište, bilo putem navodnjavanja ili prirodnih padavina, naziva se infiltracija. Kada voda dospe u zemljište ona prvo u potpunosti popunjava pore i dovodi do njegove saturacije. Daljim dotokom vode kapilarne sile nisu u mogućnosti da zadrže vodu i dolazi do pojave gravitacione vode koja se kreće ka nižim nivoima. Kao što je već navedeno, gravitaciona voda je štetna budući da dovodi do ispiranja hranljivih sastojaka zemljišta. Kada se uspostavi ravnoteža između gravitacionih i kapilarnih sila, zemljište zadržava najveću moguću količinu vode koja se naziva *poljski vodni kapacitet*.

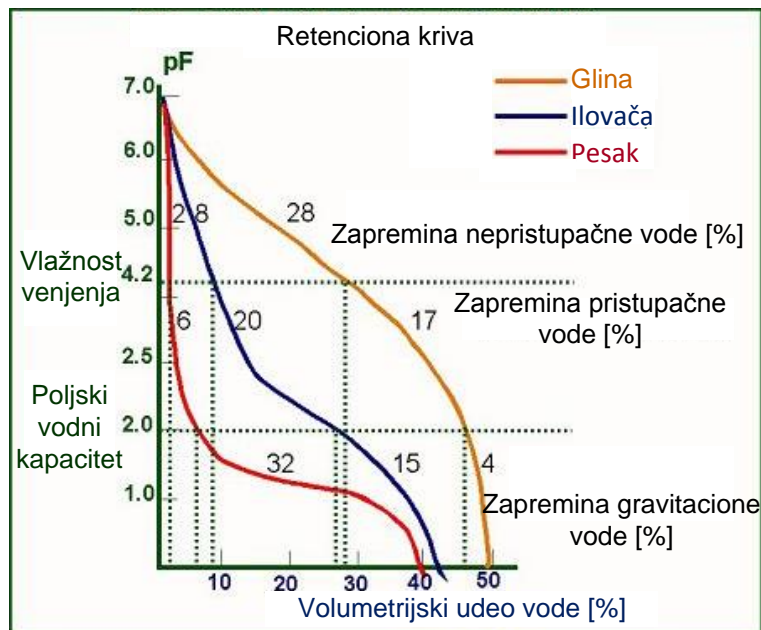
Količina vode u zemljištu se smanjuje pod uticajem isparavanja i apsorpcijom korenja biljaka, do nivoa adsorpcione vode koja je nedostupna biljkama. Ovakvo stanje zemljišta karakteriše se *konstantom vlažnosti venjenja* koja predstavlja granicu između pristupačne vode biljkama i nepristupačne vode biljkama. Opseg vlažnosti između poljskog vodnog kapaciteta i vlažnosti venjenja predstavlja opseg pristupačne vode biljkama, slika 2.4. Ove granice mogu se izraziti i putem kapilarnog potencijala izraženog u atmosferama (at), barima (bar) ili u paskalima (Pa), kojim se karakteriše sila kojom zemljište zadržava vodu. Primera radi, kapilarni potencijal iznosi 0 MPa pri saturaciji zemljišta, u slučaju gravitacione vode -0.033 MPa, prilikom poljskog vodnog kapaciteta i približno -1.5 MPa kad je zemljište u stanju vlažnosti venjenja.



Slika 2.4: Sadržaj vode i kapilarni potencijal prilikom saturacije zemljišta, poljskog vodnog kapaciteta i vlažnosti venjenja.

Sa stanovišta navodnjavanja bitna je relacija koja povezuje količinu vode u zemljištu sa kapilarnim potencijalom, odnosno sa njenom dostupnošću biljkama. Ova međuzavisnost prikazuje se pF krivom ili retencionom krivom, gde simbol p označava logaritamski karakter skale, dok je energija, odnosno snaga držanja vode u zemljištu označena simbolom F . Kapilarni potencijal zemljišta predstavlja se pF skalom od 0 do 7, tako da je njom moguće pokriti stanja zemljišta od saturacije do apsolutno suvog stanja. Veza između podeoka na pF skali i jedinice pritiska milibara dobija se proračunavanjem logaritma osnove 10 vrednosti kapilarnog pritiska u milibarima. Na primer, 100 milibara kapilarnog potencijala odgovara podeoku 2 na pF skali.

U engleskoj terminologiji pF zavisnost se označava kao *soil moisture characteristics curve* ili *soil moisture retention curve*.



Slika 2.5: Retenciona kriva za glinu, ilovaču i pesak [12].

Retenciona pF kriva se eksperimentalno određuje tako da se uzorci zemljišta u neporemećenom stanju zasićeni vodom podvrgavaju hidrosatičkom pritisku u nekom opsegu, obično 0 do 100 kPa, a zatim se meri masa uzorka i određuje se zapreminski ili maseni udeo vode. Za svaku tačku pF krive koristi se novi uzorak zemljišta u neporemećenom stanju saturisan

vodom. Na slici 2.5 prikazane su pF krive karakterističnih teksturalnih tipova zemljišta: gline, ilovače i peska.

Nekad nije potrebno konstruisati kompletnu pF krivu već se zemljište karakteriše u pogledu mogućnosti zadržavanja vode na tri kritične tačke. Prvo tačka je retencija vlage pri pritisku od 0.33 bara jer je utvrđeno da se voda posle proceđivanja odnosno pri poljskom vodnom kapacitetu drži u zemljištu kapilarnim potencijalom od otprilike 0.33 - 0.50 bara. Druga tačka se određuje na pritisku od 6.25 bara i predstavlja lentokapilarnu vlažnost (vlažnost prekida kapilarne veze) koja se odnosi na stanje kada voda prelazi iz lako pristupačne u teže pristupačnu vodu za biljke. Treća tačka koja se određuje na pritisku od 15 bara se odnosi na vlažnost venjenja.

2.6 Uticaj vode na električne karakteristike zemljišta

Zemljište se u pogledu svojih elektromagnetskih svojstava može karakterisati kao svaki drugi materijal putem konstitutivnih parametara, električne permitivnosti ε , permeabilnosti μ i provodnosti σ .

Za stacionaran slučaj mogu se definisati kompleksni oblici permitivnosti i permeabilnosti koji u sebi objedinjuju mogućnosti skladištenja električnog odnosno magnetskog polja kao i gubitke koji se pri tom javljaju:

$$\begin{aligned}\varepsilon^* &= \varepsilon' - j\varepsilon'', \\ \mu^* &= \mu' - j\mu''.\end{aligned}\tag{2.3}$$

Ukoliko se permitivnost i permeabilnost normalizuju u odnosu na vrednosti za slučaj vakuuma, ε_0 i μ_0 , onda se govori o relativnim vrednostima ovih parametara

$$\begin{aligned}\varepsilon_r^* &= \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'', \\ \mu_r^* &= \mu_r' - j\mu_r''.\end{aligned}\tag{2.4}$$

Mnogi sastavni delovi zemljišta su ili paramagnetici ili diamagnetici te je pretpostavka da je $\mu' = \mu_0$ u velikoj većini slučajeva sasvim opravdana. U tabeli 2.2 prikazane su vrednosti permeabilnosti pojedinih sastojaka zemljišta.

Tabela 2.2: Relativne permeabilnosti pojedinih sastojaka zemljišta [13].

Sastojak	μ_r'
voda	0.99991
kvarc	0.9999988
kaolinit	0.99999995-1.0000023
ilit	1.000034
škriljac	1.000005-1.0015
granit	1-1.004
hematit	1.002-1.003

Kada govorimo o konstitutivnim parametrima zemljišta uticaj vode odražava se na ukupnu permitivnost i električnu provodnost. Naime, voda značajno menja relativnu permitivnost zemljišta budući da je njena dielektrična konstanta velika i iznosi 78.36 [14] što je znatno veće od relativne permitivnosti vazduha i minerala u zemljištu, tabela 2.3.

Tabela 2.3: Realna relativna permitivnosti sastojaka zemljišta [15].

Sastojak	ϵ_r'
Kvarc	4.2-5.0
Halite	5.7-6.2
Gips	5.0-11.5
Krečnjak	7.7-8.5
Liskun	6
Voda	78.36

Poreklo visoke permitivnosti vode je posledica asimetrije naelektrisanja molekula vode koja dovodi do pojave stalnog dipolnog momenta 6.216×10^{-30} Cm [16]. Kad se molekuli vode nađu u naizmeničnom električnom polju oni se usmeravaju u pravcu polja i na taj način skladište električnu energiju. Sposobnost poravnavanja molekula, odnosno skladištenja energije električnog polja materijala, direktno određuje veličinu realnog dela relativne permitivnosti.

Imaginarni deo opisuje gubitke energije koji se javljaju u dielektriku. Voda u zemljištu nije čista i sadrži dodatne nosioce naelektrisanja u vidu jona od kojih potiče jonska provodnost,

odnosno gubitak energije. Dodatni dielektrični gubici javljaju se usled polarizacije molekula u naizmeničnom električnom polju pri čemu se generiše toplota. Uzimajući ovo u obzir kompleksna permitivnost ε_r^* može se napisati u obliku u kom opisuje mogućnost materijala da skladišti energiju električnog polja kao i ukupne gubitke koji se u njemu javljaju

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - j \left(\varepsilon_r'' + \frac{\sigma_{DC}}{2\pi f \varepsilon_0} \right), \quad (2.5)$$

gde ε_r'' predstavlja dielektrične gubitke, σ_{DC} je električna provodnost pri nultoj učestanosti, a f učestanost.

Bitno je napomenuti da voda povećava električnu provodnost zemljišta i to iz dva razloga. Pre svega, u njenom prisustvu dolazi do rastvaranja minerala i pojave jona u zemljištu pa se samim tim koncentracija nosilaca naelektrisanja povećava. Drugi razlog je što vlažnije zemljište olakšava kretanje pomenutih jona budući da je sistem kanala i šupljina koji postoji u zemljištu ispunjen vodom i provodan.

Postoje različiti modeli koji povezuju zapreminski udeo vode u zemljištu i njegovu permitivnost i njihov cilj je da opišu način interakcije elektromagnetskih talasa sa složenim materijalom poput zemljišta. Modele karakterišu analitičke relacije, formule mešavina (eng. *mixing formulas*), koje u sebi objedinjuju sastav zemljišta, njegovu teksturu, poroznost i pojedine faktore koje je teško analitički odrediti već se oni procenjuju ili se do njih dolazi kalibracijom. Modeli mešavine (eng. *mixing models*) su zasnovani na konceptu dielektrične mešavine gde se definišu električne osobine svih sastojaka (relativna permitivnost, provodnost, disperzija parametara), koncentracija i raspodela faza kao i hemijske reakcije između njih. Cilj modela mešavine jeste homogenizacija sredine i dobijanje efektivnog parametra u kom su objedinjeni svi navedeni uticaji.

Primer relacije zasnovane na modelu dielektrične mešavine je (Roth [17]):

$$\varepsilon_r'^{\alpha} = (1 - \phi)\varepsilon_s^{\alpha} + \theta_v\varepsilon_w^{\alpha} + (\phi - \theta_v)\varepsilon_a^{\alpha}, \quad (2.6)$$

gde ϕ predstavlja poroznost zemljišta, dok su ε_s , ε_w i ε_a redom relativne permitivnosti suvog zemljišta, vode i vazduha. Geometrijski faktor α modeluje geometriju zrna od kojih se sastoji zemljište, odnosno njegovu teksturu.

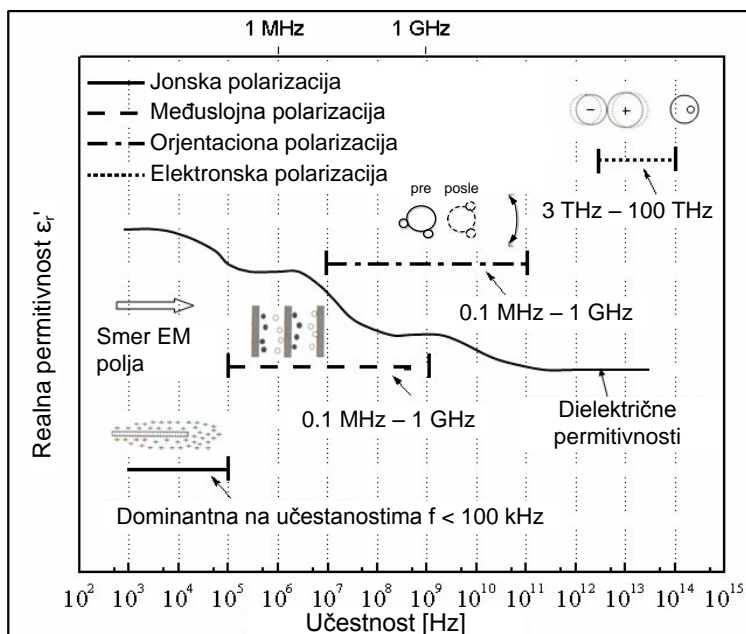
Postoji i niz drugih formula mešavina poput Maksvel Garnetove formule, Brugemanove formule i ostalih kojima je moguće modelovati električne osobine zemljišta [18]. Pošto određivanje faktora iz izraza (2.6) nije jednostavno, u upotrebi su i empirijske relacije do kojih se došlo merenjima raznih tipova zemljišta. Najpoznatija relacija jeste Topova relacija koja se dobro pokazala za gustine zemljišta između $1.35 - 1.5 \text{ g/cm}^3$ i male specifične površine ($0 - 100 \text{ m}^2/\text{g}$) [19]:

$$\varepsilon'_r = 3.03 + 9.3\theta_v + 146.0\theta_v^2 - 76.7\theta_v^3. \quad (2.7)$$

Zemljišta, posebno glinovita i ona sa visokim sadržajem organske materije, pokazuju disperzivne karakteristike što znači da su i realni i imaginarni deo permitivnosti funkcije učestanosti na kojoj se posmatraju. Polarizacija zemljišta koja je okarakterisana realnim delom permitivnosti potiče od izmeštanja naelektrisanja iz njihovih ravnotežnih položaja pod uticajem spoljašnjeg električnog polja. Najznačajniji mehanizmi polarizacije su: elektronska, jonska, orijentaciona polarizacija i međuslojna polarizacija, slika 2.6. S porastom učestanosti određeni mehanizmi polarizacije više nemaju uticaja zbog nemogućnosti čestica, molekula, jona i internih struktura da se prilagode brzopromenljivom električnom polju što ima za posledicu smanjenje permitivnosti.

Elektronska polarizacija javlja se na atomskom nivou i nezavisna je od temperature i učestanosti u opsegu ispod 10 GHz. Prilikom primene električnog polja dolazi do pomeranja elektrona u odnosu na pozitivno naelektrisano jezgro pri čemu se indukuje električni dipolni moment atoma.

Jonska polarizacija prisutna je kod materijala u kojima dominira jonska hemijska veza u vidu kristalnih rešetaka u kojima su vezani anjoni i katjoni Kulonovim elektrostatičkim silama. Svaki par anjon-katjon predstavlja dipol koji se pri primeni spoljašnjeg električnog polja orjentiše i deformiše kristalnu rešetku. Jonska polarizacija dominira na učestanostima manjim od 0.1 MHz ali može da da svoj doprinos permitivnosti i na učestanostima većim od 1 MHz [21].



Slika 2.6: Opsezi učestanosti na kojima se javljaju određeni mehanizmi polarizacije [20].

Međuslojna polarizacija, koja se još naziva i Maksvel-Vagnerov efekat, dominira na učestanostima 0.1 – 1 GHz. Pomenuti efekat nastaje kod materijala sa defektima u strukturi, odnosno materijala koji su sačinjeni iz više agregatnih stanja (faza) kao što je zemljište. Akumulacija naelektrisanja se dešava na razdvojnim površinama faza što uvećava polarnost zemljišta a samim tim i permitivnost. Higroskopna voda podleže ovom mehanizmu polarizacije budući da su njeni molekuli vezani elektrostatičkim silama za minerale u zemljištu.

Polarizacija slobodnih molekula vode odvija se po mehanizmu orijentacione polarizacije koja ima najviše uticaja na permitivnost u opsegu učestanosti od 10 MHz do 100 GHz. Prilikom orijentacione polarizacije polarni molekuli se usmeravaju prema električnom polju koje je na njih primenjeno pri čemu dolazi do dielektričnih gubitaka zbog pretvaranja električne energije u toplotnu.

2.7 Zaključak

U ovoj glavi opisano je zemljište u vidu kompleksne sredine sastavljene od tri faze: čvrste koju grade minerali i organska materija, tečne faze koju čini voda i gasne faze formirane od pora ispunjenih vazduhom. Potom su navedene fizičke osobine zemljišta koje određuju

ponašanje vode u zemljištu, poput uticaja teksture na poljski vodni kapacitet zemljišta, strukturnih agregata na način na koji se voda kreće ili zadržava u zemljištu i njegovu stabilnost i veličine pora od kojih zavisi udeo vode dostupan biljkama. Zatim su nabrojana tri osnovna oblika u kojim se voda može naći u zemljištu: gravitaciona voda koju kapilarne sile zemljišta ne mogu da zadrže i koja se kreće na nižim slojevima, kapilarna voda koja ispunjava zemljišne pore i u velikoj meri dostupna je biljkama i higroskopna voda koja je čvrsto vezana elektrostatičkim silama za minerale u zemljištu i kao takva nedostupna je biljkama.

U nastavku su opisani parametri za kvantitativno izražavanje količine vode u zemljištu u vidu masenog odnosno volumetrijskog sadržaja. Potom su opisana tri karakteristična stanja kad se govori o odnosu zemljišta i količine vode: saturacija, poljski vodni kapacitet i vlažnost venjenja. Saturacija nastaje kad je zemljište prezasićeno vodom i karakterišu ga gravitaciona voda i kapilarni potencijali u rasponu od -0.033 MPa – 0 MPa. Poljski vodni kapacitet označava maksimalnu količinu vode koje zemljište može da zadrži svojim kapilarnim silama i pokriva opseg kapilarnog potencijala od -1.5 MPa do -0.033 . Kad u zemljištu ostane samo higroskopna voda nedostupna biljkama nastaje stanje vlažnosti venjenja pri kom biljke više nisu u stanju da crpe vodu. Zatim je ukazano na činjenicu da različiti tipovi zemljišta dostižu određena stanja vlažnosti pri drugačijim volumetrijskim sadržajima vode što se može prikazati pF karakteristikom zemljišta koja se upotrebljava prilikom upravljanja irigacionim sistemima.

Na kraju ove glave zemljište je posmatratano u vidu njegovih elektromagnetskih karakteristika što je bitno prilikom razvoja metoda i senzora za merenje vlažnosti zemljišta koje će biti opisane u narednoj glavi. Zaključeno je da voda utiče na konstitutivne parametre zemljišta kao što su permitivnost i električna provodnost. Glavni razlog velike permitivnosti vode proizlazi iz polarne prirode njenog molekula koji na račun svoje orjentacione polarizacije doprinose ukupnoj permitivnosti zemljišta. Što se tiče električne provodnosti zemljišta voda u zemljištu utiče na njeno povećanje pošto rastvara jone koji se nalaze u mineralima i olakšava im kretanje kroz sistem pora. Kako bi se stekao bolji uvid i analitički objasnila interakcija elektromagnetskih talasa sa zemljištem predloženi su razni modeli mešavine. Pomenuti modeli u sebi objedinjuju električne osobine svih sastojaka kao i hemijske reakcije između njih.

3 Metode za merenje vlažnosti zemljišta

Potreba za poznavanjem vlažnosti zemljišta usloвила je pojavu brojnih metoda za određivanje sadržaja vode u zemljištu. Merne metode se mogu klasifikovati po složenosti: neke su vrlo jednostavne i ne zahtevaju upotrebu alata, dok se neke nužno oslanjaju na obučene operatere i posebnu, složenu i skupu opremu poput radioaktivnog izvora gama zraka ili neutrona. Sa druge strane, po tome da li se vlažnost zemljišta određuje neposredno ili posredno na osnovu određenog parametra zemljišta koji zavisi od vlažnosti, metode se mogu podeliti na direktne i indirektne [15].

Najstarija direktna metoda jeste vizuelna pri kojoj se uzorak ispituje gnječenjem, valjanjem i izvlačenjem u valjak, te se na osnovu dobijenih forma i oblika procenjuje se stanje vlažnosti [22]. Glavna prednost ove metode je u tome što ne zahteva opremu ali potrebno je veliko iskustvo i praksa osobe koja vrši ispitivanje. Iako subjektivna i destruktivna, ova metoda pruža mogućnost da se veoma brzo i jednostavno proceni vlažnost zemljišta.

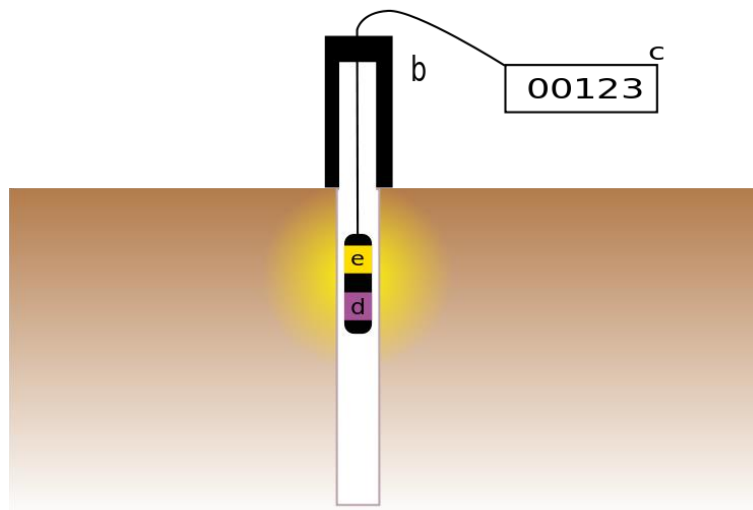
Najzastupljenija laboratorijska metoda za utvrđivanje vlažnosti zemljišta direktnim putem jeste gravimetrijska metoda koja se zbog svoje tačnosti koristi i kao referentna metoda [11]. Gravimetrijska metoda zasniva se na uzorkovanju zemljišta iz različitih slojeva zemljišta i utvrđivanju vlažnosti uzoraka merenjem mase pre i posle procesa sušenja. Sušenje se obavlja u sušnici na 105 °C do postizanja konstantne mase obično u trajanju od 24 časa, nakon čega se na osnovu razlike u masi uzorka pre i posle sušenja izračunava gravimetrijski sadržaj vode u uzorku θg . Iako veoma tačna ova metoda je destruktivna po uzorak zemljišta i ne omogućava ponovljivost merenja na istoj lokaciji. Pouzdanost rezultata merenja zavisi od načina na koji su uzorci zaštićeni od isparavanja prilikom prenošenja sa terena do laboratorije. Ovom metodom nije moguće posmatrati promenu vlažnosti u realnom vremenu. Istina je da gravimetrijska metoda ne zahteva komplikovanu i skupu laboratorijsku opremu, ali je vremenski zahtevna, fizički naporna i osetljiva na raspodelu temperature i vlažnosti vazduha u sušnici.

Mane direktnih metoda su otvorile put brojnim indirektnim metodama, koje procenjuju vlažnost na osnovu određenih merljivih parametara zemljišta koji neposredno zavise od vlažnosti. Relacija koja povezuje stvarnu vlažnost zemljišta sa parametrom koji se meri iskazuje

se u formi kalibracionih kriva. Prednosti indirektnih metoda jesu njihov brz odziv, nedestruktivna priroda i mogućnost kontinualnog praćenja vlažnosti zemljišta u realnom vremenu. Sa druge strane, njihov glavni nedostatak je da na fizičku karakteristiku koja se meri često ne utiče samo vlažnost zemljišta već i drugi parametri, a posledica unakrsne osetljivosti je potreba za čestom kalibracijom instrumenta. U nastavku će biti dat pregled indirektnih metoda kao i senzora zasnovanih na opisanim metodama.

3.1 Neutronska metoda

Neutronska metoda bazirana je na emisiji visokoenergetske neutronske radijacije od emitera, odnosno radioaktivnog izvora (radium – berilium, plutonium – berilium, americium – berilium) u pravcu zemljišta. Emitovani neutroni kreću se velikom brzinom kroz zemljište i pri tom se sudaraju sa atomskim jezgrima što ima za posledicu smanjenje njihove kinetičke energije. Atomi vodonika predstavljaju dominantni faktor odgovoran za usporavanje neutrona jer su približno iste mase. Pošto većina atoma vodonika u zemlji predstavlja deo molekula vode, gustina usporenih neutrona koncentrisanih oko radioaktivnog izvora može se dovesti u vezu sa vlažnošću zemljišta [23]. Slika 3.1 prikazuje mernu sondu koja je cilindričnog oblika pogodnog za prodiranje u zemljište u kojoj su smešteni emiter i detektor, slika 3.1.



Slika 3.1: Neutronska proba: e – emiter, d – detektor, b – oklop, c – brojač [24].

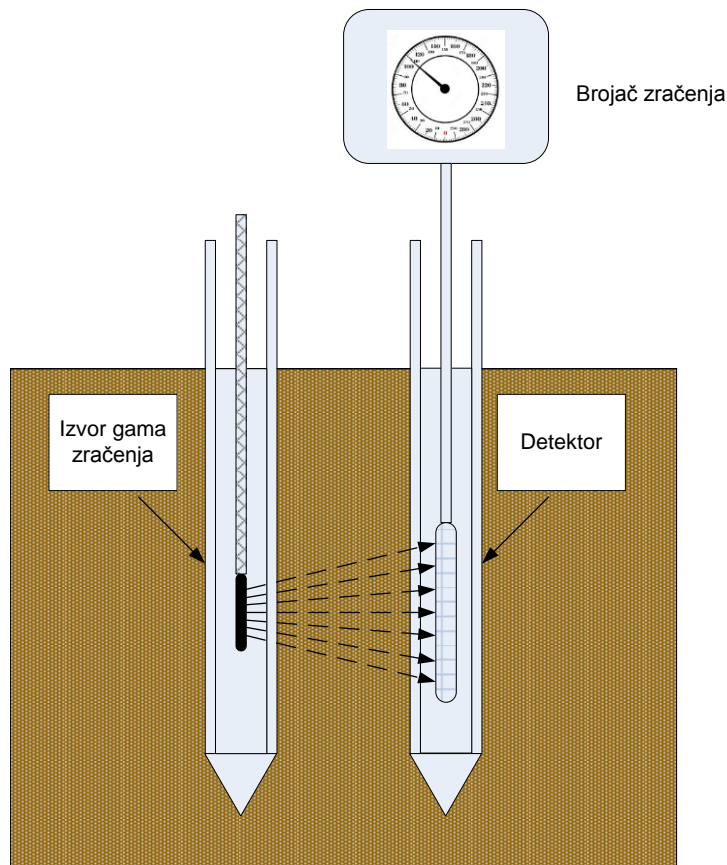
Merenja vlažnosti vrše se smeštanjem sonde u prethodno postavljenu cev u zemljištu i moguće ih je vršiti na više dubina. Prednost ove metode sastoji se u mogućnosti merenja vlažnosti velike zapremine zemljišta pošto je sfera uticaja poluprečnika 10 – 40 cm, kao i da je moguće utvrditi raspodelu vlažnosti u zemljištu duž vertikalnog profila. Ono što karakteriše ovu metodu jeste da ona ne podleže uticaju saliniteta zemljišta kao ni vazdušnih zazora. Budući da metoda koristi radioaktivni izvor predstavlja opasnost po zdravlje i zahteva obučenog operatera. Pored toga, oprema koja se koristi je teška, nezgrapna, skupa i neophodna joj je kalibracija prema tipu zemljišta, merenja vlažnosti mogu dati netačne rezultate u slučajevima zemljišta bogatih organskom materijom jer je kod njih prisutan povišen broj atoma vodonika. Još jedno od ograničenja odnosi se na tačnost merenja vlažnosti na površini zemlje i u njenoj blizini koje daje netačne rezultate pošto se neutroni koji napuste zemljište ne reflektuju od vazduha prema detektoru u dovoljnoj količini [25]. Na tržištu postoje merne sonde koje su zasnovane na neutronske metode jedan od primera je *CPN 503 elite hydroprobe* [26].

3.2 Metoda slabljenja gama zraka

Merenje vlažnosti zemljišta ovom metodom zasnovano je na činjenici da su rasejanje i apsorpcija gama zraka zavisi od gustine materije kroz koju se gama zraci prostiru [27]. Metoda polazi od pretpostavke da se specifična gustina čvrste faze zemljišta može smatrati konstantnom i da na nju ne utiče količina vode, pa je samim tim slabljenje gama zraka koje potiče od čvrste faze zemljišta nepromenljiva je veličina. Međutim promenom vlažnosti menja se i ukupna gustina zemljišta usled ispunjavanja pora vodom, što se odražava na intezitet zračenja koje dospeva na detektor, te se merenje slabljenja gama zraka tokom njegove transmisije sa emitera na detektor može dovesti u vezu sa sadržajem vodu u zemljištu, slika 3.2.

Kao izvor radioaktivnog zračenja koriste se kobalt i cezijum sa energijom zračenja od 0.66 MeV ili americijum energije zračenja 0.06 MeV, što izaziva štetno zračenja te su potrebne posebne mere predostrožnosti tokom rukovanja mernom opremom. Prilikom merenja potrebno je postaviti najmanje dve cevi u kojima su smešteni emiter odnosno detektor, a kao rezultat dobija se raspodela vlažnosti visoke rezolucije koja je ograničena na sloj zemljišta debljine ne veće od 2.5 cm.

Osnovne prednosti ove metode sastoje se u mogućnosti automatizovanih i nedestruktivnih merenja kojima se može pratiti dinamika vlažnosti zemljišta. Velika mana ove metode jeste da na nju utiče promena specifične gustine zemljišta koja je prisutna kod slojevitog zemljišta, visoka cena kao i neophodnost stručnog lica za rukovanje mernom opremom.

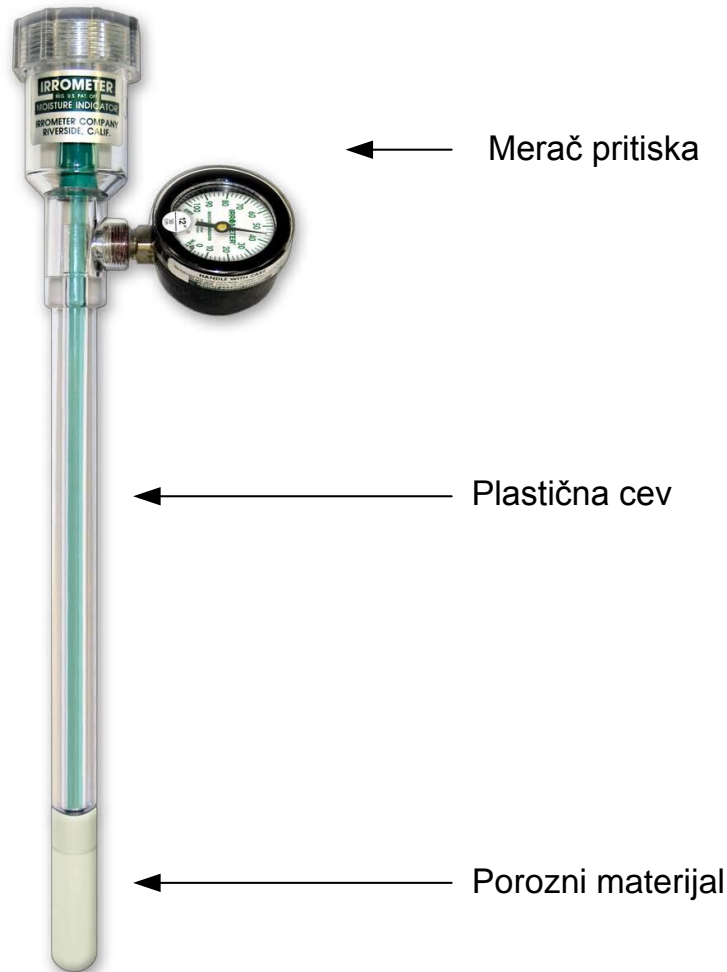


Slika 3.2: Metoda slabljenja gama zraka.

3.3 Tenziometrijske metode

Metode koje mere kapilarni potencijal zemljišta nazivaju se tenziometrijske metode. Merenje kapilarnog potencijala vrši se pomoću uređaja koji se nazivaju tenziometri i koji se sastoje od zaptivene plastične cevi ispunjene vodom na čijem se dnu nalazi porozni materijal dok je na suprotnoj strani merač pritiska, slika 3.3. Porozni materijal je u kontaktu sa okolnim zemljištem i u stanju je da otpušta vodu iz cevi u slučaju kad je kapilarni potencijal zemljišta veći od kapilarnog potencijala poroznog materijala ili da je upija u obrnutom slučaju. Na taj

način obezbeđeno je da se ove dve sredine nalaze u stanju hidrodinamičke ravnoteže. Promene nivoa vode u cevi direktno utiču na merač pritiska čime se utvrđuje kapilarni potencijal zemljišta sa tačnošću od 0.1 – 1.0 kPa [28].



Slika 3.3: Sastavni delovi tenziometra [29].

Zbog samog principa rada tenziometri su u stanju da procene količinu vode dostupne biljkama što predstavlja njihovu veliku prednost. Dalje, oni su nezavisni od saliniteta zemljišta, pošto se rastvorene soli mogu slobodno kretati kroz porozni medijum tako da je uticaj tipa zemljišta minimalan. Moguće je čak i izbeći korišćenje električnih kola i napajanja što u sklopu sa veoma robusnom izvedbom čini jedan dugotrajan i nezavisan senzor.

Međutim, ovaj tip senzora ima nedostatak od nastajanja šupljina između poroznog medijuma i zemljišta koje se suši, te nije pogodan za zemljišta koja bubre. Takođe, kapilarni potencijal ne bi smeo da pređe granicu koja omogućuje vazduhu da uđe u porozni materijal, pa stoga dimanički opseg tenziometara iznosi od 0 do -85 kPa. Tenziometri se moraju zaštititi od mraza budući da su ispunjeni vodom tako da njihova radna temperatura iznosi između 0 i 80°C, mada postoje i modeli koji rade i na temperaturi od -10°C [30].

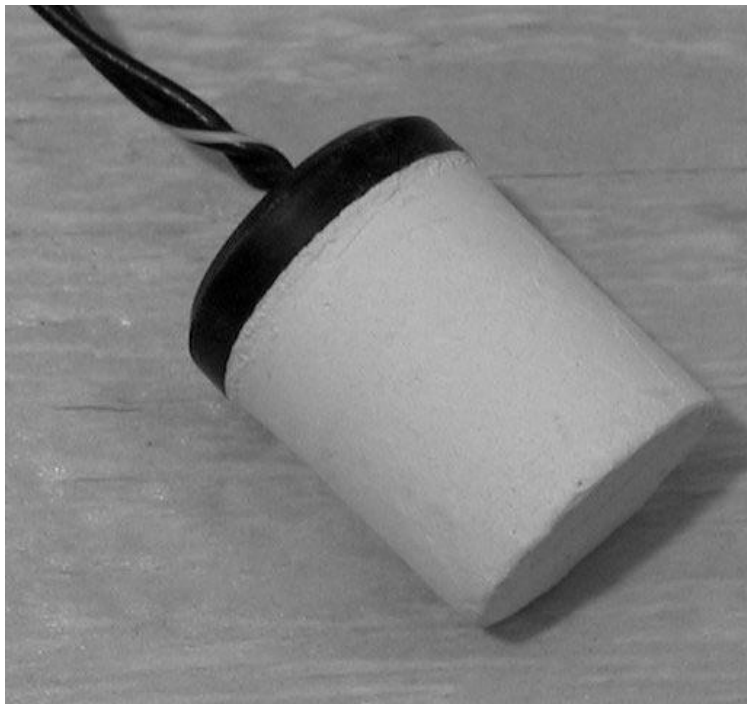
3.4 Elektromagnetske metode

Elektromagnetske metode zasnivaju se na uticaju vlažnosti na promene električnih osobine zemljišta. Parametri koji se dominantno menjaju pri promeni udela vode su pre svega provodnost i električna permitivnost kao što je i opisano u poglavlju 2.6. Elektromagnetske metode odlikuju se brzim odzivom, lakom integracijom sa akvizicionim sistemima i mogućnošću integracije sa sistemima za daljinsko očitavanje. Pored toga, ovaj tip metoda je nedestruktivan, ne koristi radioaktivni izvor i omogućuje merenja proizvoljan broj puta. Zbog ovih prednosti elektromagnetske metode veoma su raširene što je imalo za posledicu razvoj niza senzora zasnovanih na ovim principima. U nastavku će biti opisane elektromagnetske metode kao i senzorska rešenja koja su zasnovana na njima.

3.4.1 Rezistivni senzori

Električna provodnost zemljišta se meri između elektroda ili se otpornost meri za određeni medijum posrednik koji je sa jedne strane u neposrednom kontaktu sa elektrodama a sa druge strane u kontaktu sa okolnim zemljištem i koji je uravnotežen sa vlažnošću okolnog zemljišta. Primer senzorskog rešenja zasnovanog na merenju provodnosti medijuma jesu rezistivni senzori. Uređaj se sastoji od poroznog bloka napravljenog od gipsa ili fiberglasa u kojem su smeštene dve elektrode sa električnim izvodima [31]. Prilikom postavljanja senzora u zemljište dolazi do kretanja vode iz oblasti nižeg kapilarnog potencijala ka oblasti višeg potencijala čime se potencijali u bloku senzora i okolnom zemljištu izjednačavaju. Kad dođe do ravnoteže vlažnosti vrši se merenje provodnosti (otpornosti) naizmničnom strujom kako bi se eliminisao uticaj nagomilavanja jona na elektrodama.

Glavni problem ovih metoda jeste činjenica da provodnost zemljišta ne zavisi isključivo od vlažnosti zemljišta već zavisi i od koncentracije jona u zemljištu i praktično je nemoguće eliminisati ovaj uticaj. Navedeni problem značajno je umanjen kod senzora koji koriste blok od gipsa. Gips je po svojoj strukturi so, odnosno kalcijum-sulfat koji zasićuje vodu jonima i na taj način poništava uticaj provodnosti zemljišta, slika 3.4. Međutim rešenje problema promenljive vlažnosti zemljišta stvorilo je nove nedostatke budući da se gipsani blok vremenom rastvara čime se gubi kontakt sa okolnim zemljištem i kvalitet merenja degradira, s druge strane metoda je ograničena u pogledu električne provodnosti zemljišta na vrednosti ne veće od 6 dS/m.

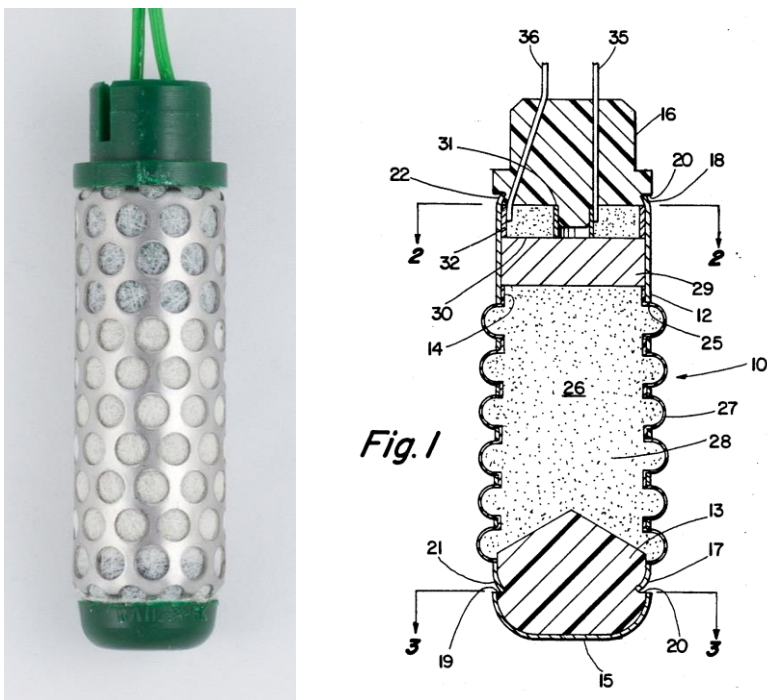


Slika 3.4: Rezistivni senzor sa gipsanim blokom [32].

Kako bi se prevazišao problem kontakta osmišljeni su senzori sa granularnom matricom ili prenosnom matricom obično u vidu kvarcnog peska visoke čistoće. Primer senzora koji koristi ovakvu sredinu posrednik je *Watermark* senzor model 200SS prikazan na slici 3.5 [33]. Princip rada ovog senzora sastoji se u merenju provodnosti između elektroda označenih sa **35** i **36** na slici 3.5. Voda prolazi kroz otvore **25** i filter čestica **28** na cilindričnom kućištu **12** senzora i dospeva u šupljinu ispunjenu peskom **26**, pri čemu se vlaži i pesak i gipsana tableta **29**. Voda

koja je dospela u gipsanu tabletu obogaćuje se elektrolitima iz gipsa (kalcijum-sulfat) čime se povećava električna provodnost koja se meri između elektroda **35** i **36** koje su u kontaktu sa matricom elektroda **30** koja naleže na gipsanu tabletu. Povećanje vlažnosti okolnog zemljišta direktno utiče na povećanje izmerene električne provodnosti čime se uspostavlja neophodna relacija između pomenutih parametara.

Iako se ovim pristupom eliminisao problem kontakta između senzora i zemljišta, nasleđene su ostale mane prethodnog rešenja kao što su potrošnost gipsane tablete, dugo vreme odziva, temperaturna zavisnost, i nemogućnost primene senzora u zemljištima koja bubre. Kod svih rezistivnih senzora neophodno je uzeti u obzir uticaj temperature pošto ona značajno utiče na provodnost.



Slika 3.5: Watermark senzor model 200SS.

3.4.2 Dielektrične metode

Veliku grupu elektromagnetskih metoda čine dielektrične metode koje su zasnovane na činjenici da je relativna permitivnost suvog zemljišta približno 2.5, dok ona za vodu iznosi oko

78, stoga čak i mala količina vode izaziva značajne promene permitivnosti zemljišta. Ova zavisnost omogućila je razvoj mnogobrojnih metoda i senzora zasnovanih na merenju permitivnosti koji se uopšteno mogu podeliti na metode iz vremenskog domena i one iz domena učestanosti.

3.4.2.1 Metode iz vremenskog domena

Merenja vlažnosti zemljišta koja potpadaju pod vremenski domen veoma se često koriste prilikom utvrđivanja ovog parametra [34]. Dielektrična permitivnost određuje se na osnovu njenog uticaja na vremensko kašnjenje elektromagnetskog talasa i može se odrediti na više načina, bilo putem modela mešavine [35] ili empirijskim putem [19]. Bitno je napomenuti da merenje kašnjenja daje samo jednu vrednost permitivnosti, takozvanu vidljivu permitivnost (eng. *apparent permittivity*):

$$\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_r'}{2} \left(1 + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \right)^2 + 1} \right). \quad (3.1)$$

Vidljiva permitivnost utiče na brzinu prostiranja elektromagnetskog talasa u dielektriku sa gubicima, a time i na vreme kašnjenja. Metode iz vremenskog domena mogu se podeliti na reflektometrijske (eng. *Time Domain Reflectometry* - TDR) i transmisijske metode (eng. *Time Domain Transmission* - TDT). Kod TDR metoda meri se vremensko kašnjenje impulsa koji se reflektuje s kraja senzora. U opštem slučaju senzor je realizovan u vidu voda kojeg čine dve ili tri provodne šipke koje se postavljaju u zemljište i minimalno ga remete, slika 3.6. Rezultat merenja predstavlja srednju vrednost permitivnosti duž cele dužine senzora. Preciznost reflektometrijskih metoda ograničena je pojavom višestrukih refleksija izazvanih nehomogenošću zemljišta.



Slika 3.6: Primeri TDR proba: a) FieldScout TDR 100 b) Stevens Hydra Probe.

Za razliku od uobičajnih reflektometrijskih metoda, na tačnost transmisijskih metoda ne utiču višestruke refleksije, pošto prvi detektovani impuls sadrži neophodnu informaciju [36]. Međutim, senzori zasnovani na transmisijskoj metodi zahtevaju dva pristupa, što stvara probleme konstrukcije senzora koja bi omogućila jednostavno postavljanje oba porta u zemljište.

Metode iz domena učestanosti

Merenja u domenu učestanosti pružaju mogućnost detaljnije analize dielektričnih osobina zemljišta budući da neposredno određuju i realni i imaginarni deo kompleksne permitivnosti. Ovi parametri mogu se dovesti u vezu sa određenim osobinama zemljišta kao što je specifična površina, sadržaj organske materije ili udeo gline [37].

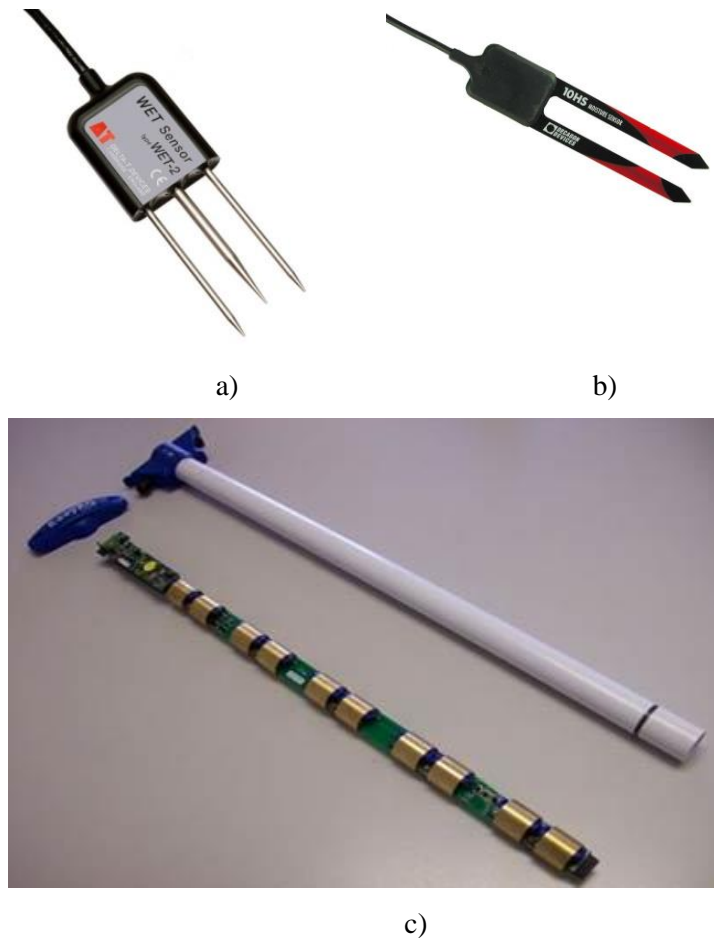
Kapacitivne sonde

Merne sonde kapacitivnih senzora koriste zemljište kao dielektrik kondenzatora. Promena vlažnosti direktno utiče na ukupnu kapacitivnost sonde. Relativna permitivnost zemljišta može se odrediti na osnovu vremena punjenja kondenzatora ili se koriste oscilatori promenljive učestanosti za utvrđivanje rezonantne učestanosti. Oblik elektroda projektuje se tako da omogući što jednostavnije postavljanje u zemljište stoga su to forme poput šipke ili ploče i može ih biti od dve pa naviše [38, 39], slika 3.7. Postoje i sonde nalik na senzore koji se koriste kod neutronske metode u vidu PVC (polivinil hlorid, eng. *PolyVinyl chloride*) cevi na kojoj se nalaze parovi metalnih prstenova koji formiraju kondenzatore čija se ivična kapacitivnost menja s promenom vlažnosti zemljišta [40] slika 3.7c.

Senzori električne impedanse

Jedan od načina merenja dielektrične permitivnosti a time i sadržaja vode u zemljištu jeste merenje impedanse otvorenog voda koji je u neposrednom kontaktu sa uzorkom zemljišta. Otvoreni vod koji se koristi za merenje obično se naziva sonda ili senzor i najčešće je realizovan u vidu koaksijalnog voda koji omogućuje merenja širokog opsega učestanosti. Sonda se postavlja tako da je njen otvoreni kraj u kontaktu sa uzorkom. Tako se postiže da vlaga u zemljištu, koja menja njegovu kompleksnu permitivnost, utiče na impedansu koju vod „vidi“ na svom kraju, slika 3.8a. Merenja impedanse u laboratorijskim uslovima rade se putem merenja koeficijenta refleksije pomoću vektorskog analizatora mreža (eng. *vector network analyzer* - VNA). Kako bi

se došlo do vrednosti kompleksne permitivnosti rezultate merenja neophodno je uporediti sa odgovarajućim ekvivalentnim električnim modelom.



Slika 3.7: Kapacitivne sonde a) realizovane provodnim šipkama [38]
b) pločasti tip [39] c) ivična kapacitivnost [41].

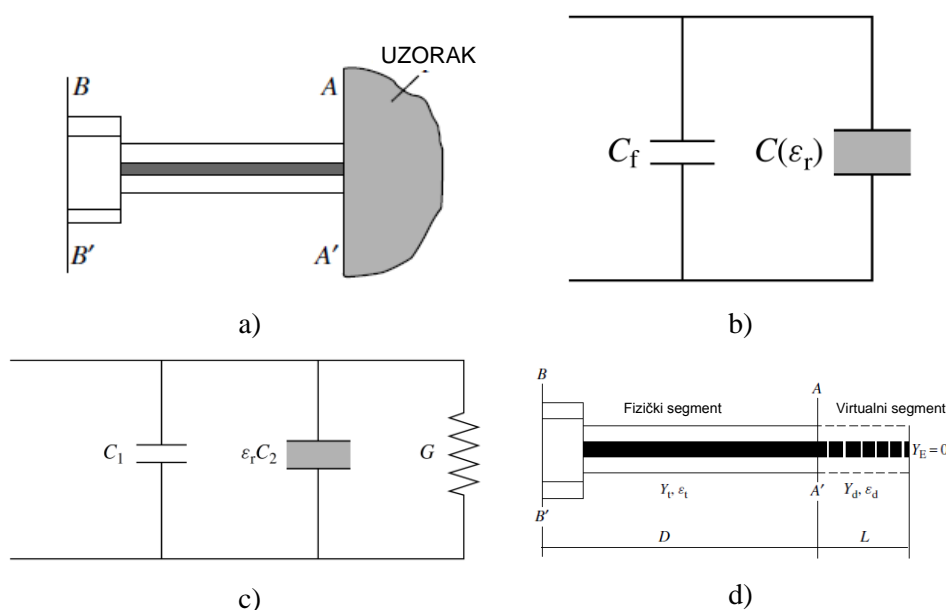
Postoji više ekvivalentnih električnih modela koji se koriste za određivanje permitivnosti poput kapacitivnog modela, modela zračenja, modela virtualnog voda i modela racionalnih funkcija [42,43]. Kod kapacitivnog modela otvoreni vod se modeluje pomoću dve paralelne kapacitivnosti od koji je jedna fiksna C_f , a druga zavisi isključivo od permitivnosti uzorka $C(\epsilon_r)$, slika 3.8b. Model zračenja „gleda“ na otvoreni koaksijalni vod kao na izvor zračenja odnosno antenu, slika 3.8c. Kod modela virtualnog voda, ivično polje u produžetku voda može se

aproximirati ekvivalentnim virtualnim vodom kojim se modeluje uzorak zemljišta. Model racionalnih funkcija računa kompleksnu impedansu voda pomoću metode momenta [44] i pogodan je za računanje električnih permitivnosti iz opsega učestanosti 1 – 20 GHz.

Ono što je zajedničko svim modelima jeste da se problem računanja kompleksne permitivnosti svodi na problem nalaženja nule sledeće fukcije

$$f(\epsilon_r) = Z_{inm} - Z_{inc}, \quad (3.2)$$

gde Z_{inm} predstavlja izmerenu vrednost impedanse, dok je Z_{inc} impedansa koja je proračunata na osnovu ekvivalentnog električnog modela.



Slika 3.8: Merenje vlažnosti metodom električne impedanse
a) postupak merenja b) model virtuelnog voda [45].

Glavna mana ovog tipa senzora je što zahteva skupe uređaje poput vektorskog analizatora mreža ili analizatora impedanse, što ograničava njihovu upotrebu na laboratorijske uslove. Za potrebe primene na terenu odustalo se od širokog opsega učestanosti i merenja su vršena na jednoj učestanosti od obično 100 MHz [46]. Senzor, odnosno vod namenjen za merenja na licu mesta nije koaksijalnog tipa već je realizovan u vidu dve ili više provodnih šipki, slično TDR mernim probama, kako bi se lakše postavio u zemlju, slika 3.9.



Slika 3.9: Senzor zasnovan na metodi merenja impedanse [47].

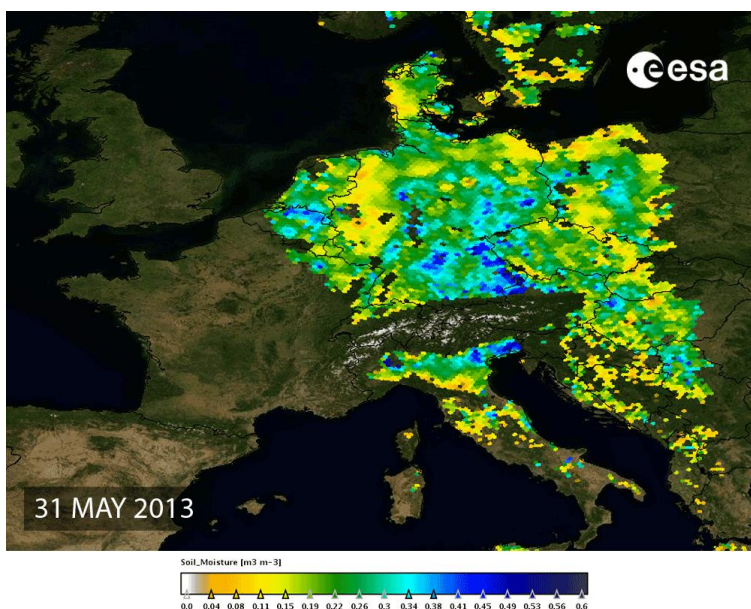
3.4.3 Daljinsko merenje vlažnosti zemljišta

Senzori i metode koje su do sad opisane pružaju relativno tačne podatke o vlažnosti zemljišta, ali su ograničene na konkretno merno mesto i sprovode se *in situ*. Ova činjenica ne omogućava da se vlažnost zemljišta meri na većim površinama, poput čitavih parcela i regiona. Metode za daljinsko merenje vlažnosti zemljišta rešavaju ovaj problem i omogućuju procenu vlažnosti na površinama od nekoliko kvadratnih metara pa do nekoliko hiljada kvadratnih kilometara [48]. Na osnovu interakcije između elektromagnetskog zračenja i zemljišta moguće je odrediti dielektričnu konstantu zemljišta kao i njegovu temperaturu.

Mikrotalasne daljinske metode veoma su osetljive na sadržaj vode u površinskom sloju zemljišta budući da male količine vode naglo menjaju permitivnost zemljišta. U opštem slučaju metode ovog tipa mogu se podeliti na aktivne i pasivne. Aktivni mikrotalasni senzori emituju elektromagnetski impuls i mere energiju koja se reflektuje od površine Zemlje, dok je kod pasivnih senzora izvor elektromagnetske energije sam objekat posmatranja te su senzori ovog tipa zapravo pasivni prijemnici - radiometri.

Mikrotalasni radiometri mere temperaturu osvetljaja površine Zemlje koja je zavisna od stvarne temperature i emisivnosti. Emisivnost je funkcija dielektrične konstante, a samim tim i vlažnosti zemljišta. Debljina sloja zemljišta koju je moguće analizirati mikrotalasima smanjuje se sa porastom učestanosti i iznosi nekoliko desetina talasne dužine. Do sada je lansirano nekoliko satelitskih misija sa mikrotalasnim radiometrima namenjenih mapiranju vlažnosti zemljišta na globalnom nivou. Neke od najvažnijih misija su SMMR (eng. *Scanning Multichannel Microwave Radiometer*) koja je bila aktivna u periodu 1978 – 1987. sa ostvarenim rezolucijama između 27 km i 148 km, AMSR-E (eng. *Advanced Microwave Scanning Radiometer*) lansirana 2002. sa rezolucijama između 38 i 56 km i SMOS (eng. *Soil Moisture and Oceanic Salinity*) lansiran od strane Evropske Svemirske Agencije u novembru 2009. i postignutim rezolucijama od 30 do 50 km, slika 3.10. SMMR i AMSR-E imaju radnu učestanost u C-opsegu

($f = 4 - 8$ GHz) dok SMOS radi u L-opsegu ($f = 1 - 2$ GHz) što se pokazalo prikladnije primenama merenja vlažnosti zemljišta. Pasivne mikrotalasne metode pokazale su veliki potencijal ali su nažalost osetljive na smetnje iz radiofrekventnog opsega koje su naročito izražene u gusto naseljenim područjima. Drugi problem ovih metoda jeste činjenica da vegetacija slabi emisiju zračenja sa površine Zemlje što je izraženije na višim učestanostima. U tom smislu merenje vlažnosti zemljišta ograničeno je na vegetacijski sadržaj vode niži od $3-5 \text{ kg/m}^2$ u slučaju L-opsega ili 1.5 kg/m^2 u slučaju C-opsega [49].

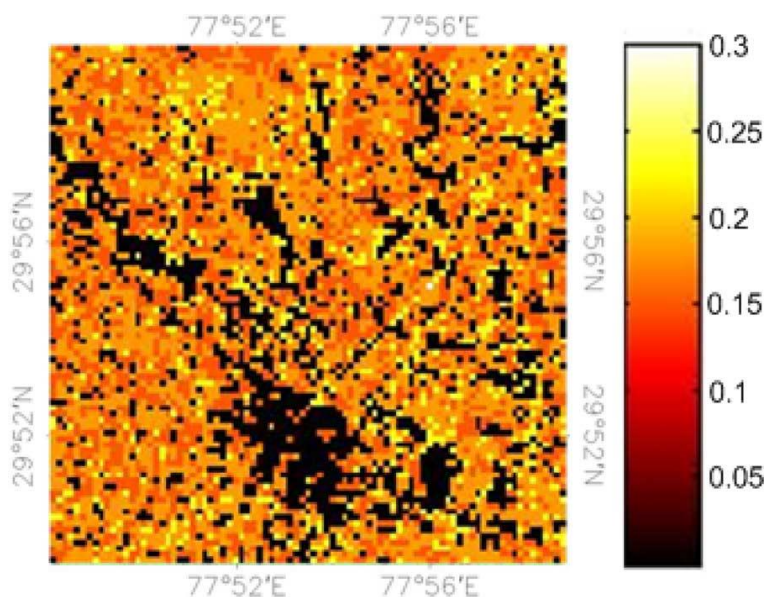


Slika 3.10: Mapa vlažnosti zemljišta nastala koristeći SMOS podatke koja pokazuje vrednosti vlažnosti zemljišta centralne Evrope 31. maja 2013. kad su obilne padavine izazvale poplave u Nemačkoj, Austriji, Češkoj Republici i Slovačkoj [50].

U slučaju aktivnih mikrotalasnih senzora elektromagnetski impuls emituje se prema površini Zemlje i detektuje se reflektovana energija. Princip merenja vlažnosti je isti kao i kod pasivnih senzora. Najpoznatiji primer aktivnog senzora jeste SAR (eng. *Synthetic Aperture Radar*) koji je namenjen rezolucijama manjim od 30 m za oblasti od otprilike $100 \times 100 \text{ km}^2$, slika 3.11.

Ovakvi sistemi postavljaju se kako na satelite tako i na vazduhoplovne platforme (avione i bespilotne letelice). Iako imaju potencijal visoke rezolucije pomenuti sistemi suočavaju se sa

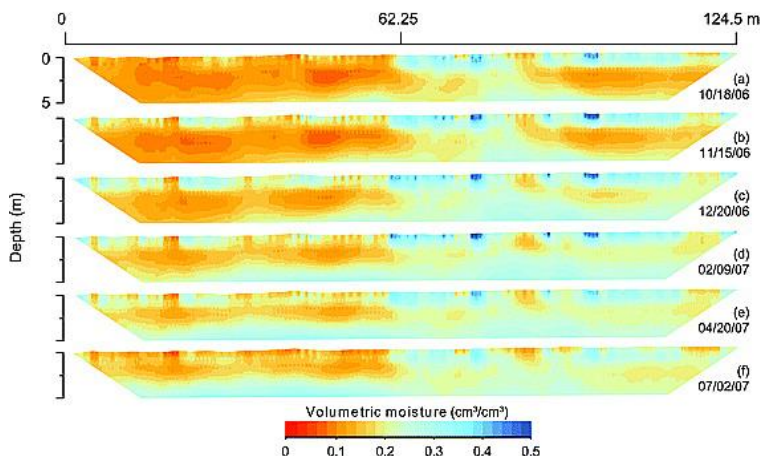
brojnim poteškoćama prilikom određivanja vlažnosti zemljišta koji potiču od složene interpretacije reflektovanog signala kao i od načina na koji se on modeluje [52].



Slika 3.11: Mapa volumetrijskog udela vode, jedan piksel odgovara površini od 250 m² [51].

Opisane metode za daljinsku detekciju nemaju mogućnost procene podzemne količine vode. One daju zadovoljavajuće rezultate za površinski sloj zemljišta kroz koji prodiru mikrotalasi, ali sa relativno grubom rezolucijom.

Metoda koja ima mogućnost da prebrodi ove nedostatke jeste georadar (eng. GPR – *Ground Penetrating Radar*) koji se izvorno koristi pri detekciji objekata u zemljištu emitovanjem radio-talasa (1 MHz – 1 GHz) i analiziranjem povratnih signala generisanih refleksijom talasa na mestima na kojima postoje razlike u dielektričnim svojstvima materijala [53]. Metode određivanja vlažnosti ovim putem oslanjaju se na merenje vremena propagacije signala georadara na osnovu čega se procenjuje njegova brzina, a samim tim i dielektrična konstanta sredine [54]. Profili koji se dobijaju pomoću georadara su nedestruktivni i dovoljne su rezolucije da uoče heterogenosti u zemljištu čime otkrivaju podzemnu strukturu koja je bitna za kretanje podzemne vode. Prilikom snimanja profila, radar može biti postavljen na određenu leteću platformu ili se snimanja mogu obavljati sa zemlje, slika 3.12.



Slika 3.12: Primer vremensko-prostornog GPR profila zemljišta koje se nalazi na prelazu šume i travnjaka [55].

Prilikom odabira radne učestanosti radara potrebno je napraviti kompromis između dubine prodiranja talasa koja je veća za niže učestanosti signala i rezolucije koja je finija na višim učestanostima. Dubina prodiranja talasa georadara određena je električnom provodnošću te je u slučaju suvih peskovitih zemljišta moguće raditi profile na dubinama i do 15 m, dok je u slučaju vlažnih ili glinovitih zemljišta dubina profila ograničena na nekoliko centimetara. Najmanji objekti koji se mogu uočiti u zemljištu pri višim učestanostima su veličine 0.5 cm. Iako obećavajuća, ova metoda ima suštinska ograničenja u pogledu višestruke refleksije signala, izdvajanja korisnog signala, destruktivne interferencije između talasa koji se prostire u vazduhu i podzemnog talasa, potrebe za reflektorima poznate dubine za kalibraciju uređaja [56].

Iako su se daljinske mikoratalasne metode pokazale kao veoma korisne za merenje vlažnosti zemljišta na većim područjima pa i na globalnom nivou, senzori koji vrše merenja na licu mesta su neophodni za njihovu kalibraciju i validaciju. Pojavom daljinskim metoda potreba za preciznijim i tačnijim *in situ* sensorima postala je još veća.

3.5 Zaključak

Direktna gravimetrijska metoda je najtačnija metoda za utvrđivanje vlažnosti zemljišta koja omogućava određivanje ovog parametra u neporemećenom stanju zemljišta upotrebom jednostavne i jeftine opreme. Nažalost ova metoda je vremenski i fizički zahtevna i zbog svoje

destruktivnosti onemogućava ponovljivost merenja. Iz navedenih razloga razvijene su razne indirektno metode koje su značajno ubrzale i olakšale proceduru merenja.

Indirektno metode oslanjaju se na merenje vlažnosti zemljišta pomoću određenih parametara koji neposredno zavise od vlažnosti zemljišta. Mane indirektnih metoda su pre svega njihova potreba za kalibracijom prema odgovarajućem tipu zemljišta. Ukoliko se govori o vlažnosti zemljišta za potrebe pravilnog rasta i razvoja biljaka ovaj problem ne postoji kod tenziometara koji zapravo mere kapilarni potencijal koji je nezavisan od tipa zemljišta. Nažalost tenziometri se ne mogu koristiti na nižim temperaturama budući da su ispunjeni vodom i nisu pogodni za zemljišta koja bubre pošto gube na kvalitetu kontakta. Neutronska metoda nije osetljiva na pojavu vazdušnih zazora između sonde i okolnog zemljišta ali koristi opremu koja je skupa, radioaktivna i zahteva obučeni kadar. Elektromagnetske *in situ* metode su veoma popularne zbog mogućnosti integracije sa sistemima za daljinsko očitavanje i nedestruktivna merenja, ali kao i sve indirektno metode zahtevaju kalibraciju prema tipu zemljišta i nepogodne su za zemljišta visoke električne provodnosti kao što su glinovita zemljišta i zemljišta bogata organskom materijom.

In situ metode daju relativno tačna merenja vlažnosti na lokalnom nivou, međutim postoji potreba da vlažnost zemljišta bude poznata za veće površine što je ostvarivo daljinskim metodama za merenje vlažnosti zemljišta. U ovu grupu metoda spadaju pasivne mikrotalasne daljinske metode kao što su satelitski radiometri kojima je moguće odrediti vlažnost zemljišta za čitave kontinente sa rezolucijom reda 30 km. Kod radiometara prisutan je problem smetnji iz radiofrekventnog opsega što u znatnoj meri utiče na pouzdanost merenja u naseljenim područjima. Predstavnik aktivnih mikrotalasnih metoda je SAR kojim se određuje vlažnost zemljišta sa rezolucijom od 30 m na površinama 100 x 100 km². Kod ovog tipa aktivnog senzora glavne poteškoća je složenost interpretacije reflektovanog signala kao i način njegovog modelovanja. Georadari su još jedan tip aktivnih senzora koji su u mogućnosti da odrede ovaj parametar i na dubinama do 15 m, ali je očitavanje rezultata složeno zbog pojave višestrukih refleksija. Zbog navedenih nesigurnosti mikrotalasnih daljinskih metoda neophodna su merenja na licu mesta čime je potreba za pouzdanim i tačnim *in situ* sensorima još izraženija.

4 Senzor za merenje vlažnosti uzoraka zemljišta u neporemećenom stanju

Indirektne metode merenja vlažnosti zemljišta, zasnovane na promeni permitivnosti veoma su osetljive na promenu gustine zemljišta do koje dolazi kad se zemljište remeti prilikom postavljanja senzora na terenu ili tokom rukovanja uzorkom u laboratorijskim uslovima. Iz navedenog razloga vrlo je bitno da zemljište bude u neporemećenom stanju prilikom merenja vlažnosti. Iako postoje određeni minijaturni senzori za *in situ* merenja konstruisani tako da minimalno remete zemljište prilikom postavljanja [57-64], njihova tačnost i pouzdanost zavisi od tipa zemljišta i procesa kalibracije. Štaviše, performanse određenih senzora vremenom degradiraju [65,66].

U slučaju gravimetrijske metode moguće je odrediti vlažnost zemljišta u neporemećenom stanju budući da se uzorkovanje vrši posebnim postupkom i opremom koji to omogućavaju. Nažalost, direktna metoda je fizički i vremenski veoma zahtevna. U okviru ove glave disertacije biće opisana nova, pouzdana i tačna metoda za laboratorijsko merenje vlažnosti uzorka proizvoljnog tipa zemljišta u neporemećenom stanju. Osmišljeni senzor nema potrebu za sušenjem uzorka, ima mogućnost ponovljivosti merenja, i njegove performanse ne opadaju vremenom [67].

U poglavlju 4.1 će biti opisan postupak projektovanja senzora koji je nastao unapređenjem standardne opreme za uzorkovanje zemljišta u neporemećenom stanju. Princip funkcionisanja predloženog uređaja detaljno je objašnjen u poglavlju 4.2 i posebna pažnja je posvećena odabiru odgovarajućeg radnog opsega učestanosti senzora kako bi se ostvarila precizna karakterizacija električnih osobina zemljišta. Na odabranom opsegu učestanosti predloženi senzor može se opisati pomoću elemenata sa distribuiranim parametrima. Stoga je senzor modelovan vodovima, a kasnije je takav model sveden na ekvivalentni električni model sa elementima sa koncentrisanim parametrima i uspostavljena je analitička relacija između izmerene reaktanse sonde i permitivnosti uzorka zemljišta. Poglavlje 4.3 opisuje postupak za ekstrakciju permitivnosti i efektivne provodnosti uzorka na osnovu rezultata merenja. Opisani

postupak je nezavisan od tipa zemljišta. Sama metoda potvrđena je kontrolnim merenjima raznih tečnih i granularnih materijala poznate permitivnosti. Kalibracione krive dva tipa zemljišta, ritske crnice i karbonatnog černoze, konstruisane su u poglavlju 4.4, pri čemu je demonstriran način kako dovesti u vezu permitivnost zemljišta sa sadržajem vode. Predloženi senzor je testiran na nepoznatim uzorcima zemljišta oba tipa. Budući da se projektovani senzor može iskoristiti i za merenje kompleksne permitivnosti u poglavlju 4.5 opisana je i ova mogućnost zajedno sa svojim prednostima i manama. Razvijena metoda je validna i kod praškastih i tečnih materijala. Ova prednost metode je pokazana u poglavlju 4.6 na primeru nikl manganitnog praha. U poglavlju 4.7 je dat zaključak o rezultatima ispitivanja, kao i preporuke o mogućim budućim istraživanjima koja bi poboljšala ovo senzorsko rešenje.

4.1 Projektovanje senzora

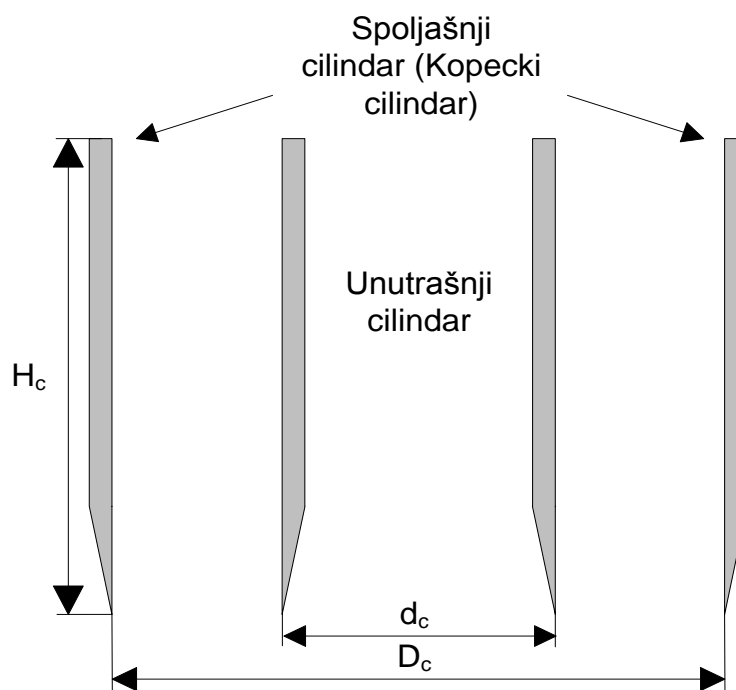
Osmišljeni senzor za merenje vlažnosti zemljišta u neporemećenom stanju potpada pod grupu indirektnih metoda koje koriste uticaj sadržaja vode na promenu permitivnosti uzorka. Bitno je napomenuti da je permitivnost zemljišta funkcija zavisna od njegove gustine, prema tome remećenje zemljišta prilikom uzorkovanja mora biti minimalno. Uobičajena metoda za uzorkovanje zemljišta u poljoprivredi obavlja se pomoću Kopecki cilindara načinjenih od nerđajućeg čelika prečnika $D_c = 54 \text{ mm}$ i visine $H_c = 44 \text{ mm}$, slika 4.1. Cilindri se utiskuju zemljište primenom sile na njihov gornji obod. Donji obod cilindra je tako projektovan da minimalno naruši uzorak i obezbedi da se njegova gustina ne razlikuje od prvobitne gustine u zemljištu. Kada se uzorak vadi iz cilindra, posebno u slučaju male vlažnosti, može se dogoditi da se uzorak iskruni ili čak i raspadne, što dovodi do smanjenje gustine i time do promene permitivnosti. Prema tome, prvi zahtev koji mora biti ispunjen kod novog senzora je da se uzorak ne vadi iz Kopecki cilindra odnosno da cilindar bude deo mernog uređaja. Zbog toga je odlučeno da se postojeća oprema za uzorkovanje nadogradi tako da ne remeti zemljište a opet omogućiti električnu karakterizaciju uzorka, što je bio složen zadatak.

Kod novog senzora, Kopecki cilindri se koriste kao spoljašnji provodnik koaksijalnog voda koji je nastao umetanjem metalnog cilindra manjeg prečnika d_c u središte uzorka zemljišta. Na ovaj način formiran je *Kopecki koaksijalni vod* čiji je poprečni presek prikazan na slici 4.1.

Donji obod unutrašnjeg cilindra projektovan je tako da minimalno remeti uzorak zemljišta prilikom uzorkovanja. Prečnik unutrašnjeg cilindra d_c određen je pomoću jednačine (4.1) i to tako da ispunjava uslov da karakteristična impedansa Kopeccki koaksijalnog voda bude 50Ω :

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln\left(\frac{D_c}{d_c}\right) = 50 \Omega. \quad (4.1)$$

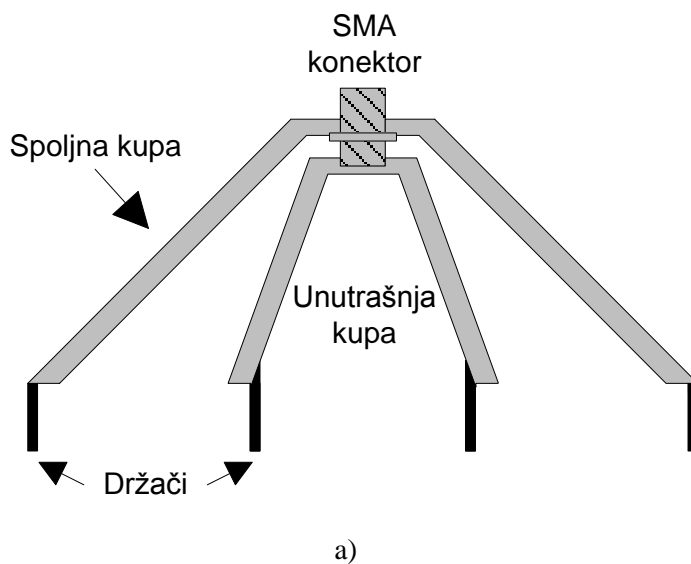
Uslov 50Ω karakteristične impedanse potreban je kako bi se postiglo prilagođenje impedanse između mernog uređaja, standardnog 50Ω SMA (eng. *SubMiniature version A*) konektora, i *Vector Network Analyzer*-a (VNA), kojim će se meriti ulazna reaktansa senzora. Proračunati prečnik unutrašnjeg cilindra d_c iznosi 23.5 mm .



Slika 4.1: Poprečni presek Kopeccki koaksijalnog voda deo senzora u kom je smešten uzorak zemljišta.

Kako bi se omogućilo povezivanje sa SMA konektorom i VNA, projektovan je adapter koji je prikazan na slici 4.2. Adapter je napravljen od mesinga i sastoji se od dve kupe čiji odnos poluprečnika zadovoljava uslov (4.1) na svakom poprečnom preseku. Na vrhu adaptera smešten

je SMA konektor. Držači su postavljeni na dnu obe kupa kako bi se osigurala dobra električna i mehanička veza između adaptera i Kopecki koaksijalnog voda.



Slika 4.2: Adapter: a) poprečni presek b) fotografija dva sastavna dela adaptera.

Fotografija kompletnog senzora i njegovih delova prikazana je na slici 4.3. Pošto su koaksijalni vodovi osetljivi na relativan položaj unutrašnjeg i spoljašnjeg cilindra, usmeravač (na slici prikazan pozadi) upotrebljen je da obezbedi postavljanje unutrašnjeg cilindra tačno u sredinu spoljašnjeg cilindra. U prvom planu slike nalazi se otvoren Kopecki koaksijalni vod sa

izvađenim unutrašnjim cilindrom, dok se potpuno sastavljeni senzor nalazi na desnoj strani fotografije.



Slika 4.3: Predloženi senzor (desno) i njegovi sastavni delovi.

Kapacitivnost Kopecki koaksijalnog voda C_c menja se sa promenom permitivnosti materijala unutar voda, a samim tim i vlažnosti zemljišta. Međutim, kapacitivnost Kopecki koaksijalnog voda se ne može izmeriti direktno pa se umesto nje meri ulazna reaktansa čitavog senzora X_{in} pomoću VNA. Da bi se dobila analitička veza između izmerene X_{in} i stvarne vrednosti C_c razvijen je odgovarajući ekvivalentni električni model senzora.

Bitno je naglasiti, da merenje X_{in} nije jedini način da se odredi C_c . Na primer, u radovima [37,68] upotrebljen je VNA za merenje kompleksnog koeficijenta refleksije na osnovu kojeg je određena kapacitivnost otvorene koaksijalne sonde, a potom i permitivnosti uzorka. Međutim, takav pristup dovodi do nejednoznanih rezultata permitivnosti i potrebe za posebnim postupkom kako bi se odredila tačna vrednost. Cilj istraživanja u okviru disertacije je između ostalog bio da razvije brzu, efikasnu i pouzdanu metodu za nedvosmisleno određivanje permitivnosti. Pošto udeo vode u zemljištu dominantno utiče na realni deo permitivnosti, precizno određivanje imaginarnog dela permitivnosti nije potrebno. Oslanjajući se na merenja

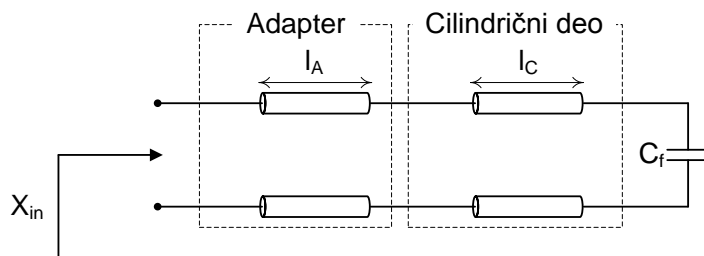
ulazne reaktanse senzora, razvijena je jednostavna metoda za procenu realnog dela kompleksne permitivnosti, koja daje jedinstveno rešenje.

Kako bi bilo moguće karakterisati dielektrične osobine zemljišta u širem opsegu učestanosti, prvo su analizirana ograničenja radne učestanosti predloženog senzora. Gornja granica učestanosti određena je pojavom viših modova u Kopecki koaksijalnoj liniji. Osnovni mod prostiranja je TEM mod. Neželjeni TE_{11} mod pojavljuje se na učestanosti definisanoj izrazom (4.2):

$$f_c = \frac{c_0}{\pi \frac{D_c + d_c}{2} \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}, \quad (4.2)$$

gde je c_0 brzina svetlosti u vakuumu. Iznad učestanosti f_c u Kopecki koaksijalnoj liniji pojavljuju se dva talasa različitih konstanti prostiranja koji se superponiraju, čime se performanse senzora pogoršavaju [69]. Ukoliko se uzme u obzir teoretski maksimum relativne permitivnosti vlažnih uzoraka (relativna permitivnost vode koja iznosi približno 78), proračunata gornja granična učestanost za date dimenzije senzora iznosi 250 MHz. Donja granična učestanost je teoretski bilo koja učestanost iznad 0 Hz, kako bi se isključili odzivi kondenzatora pri jednosmernom režimu. Štaviše, donja granica radne učestanosti određena je Maksvel-Vagnerovom polarizacijom koja ima jak uticaj na procenu permitivnosti glinovitih zemljišta na nižim učestanostima [70]. Kako bi se izbegao uticaj međuslojne polarizacije učestanost od 100 MHz je uzeta kao donja granica radne učestanosti.

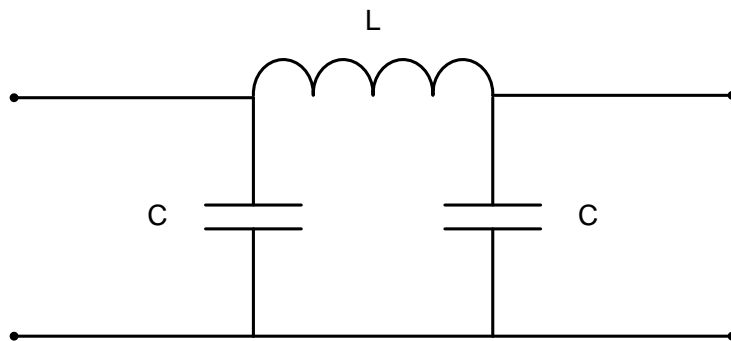
Potrebno je naglasiti da je gornja granica od 250 MHz postavljena samo za merenje permitivnosti zemljišta. Predloženi uređaj može se koristiti za merenje permitivnosti raznih zrnastih i tečnih materijala kao što će i biti pokazano u nastavku. U zavisnosti od očekivanih vrednosti permitivnosti gornja granica radne učestanosti može se postaviti čak na 1 GHz. U tom slučaju, su odgovarajuće talasne dužine relativno male u odnosu na dimenzije samog senzora. Prema tome, kako bi se tačno modelovao senzor potrebno je koristiti elemente sa distribuiranim parametrima kao što su vodovi. Vodovima modelovan senzor prikazan je na slici 4.4.



Slika 4.4: Vodovima modelovan senzor. Dužine vodova su $l_c = H_c = 44 \text{ mm}$, $l_a = 24.5 \text{ mm}$, ivična kapacitivnost $C_f = 0.51 \text{ pF}$.

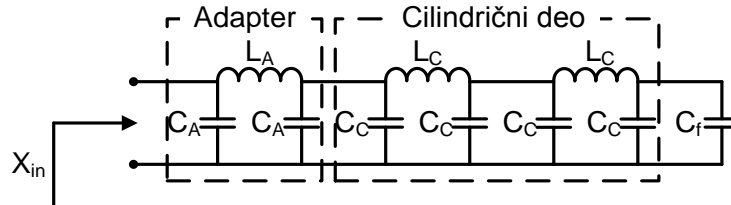
Adapter i Kopecki koaksijalan vod modelovani su rednom vezom dva voda dužine l_A i l_C , slika 4.1. Pošto je Kopecki vod na jednom svom kraju otvoren, kondenzator C_f uključen je u model kako bi se uzelo u obzir ivično polje koje se javlja na otvorenom kraju. Vrednost kapacitivnosti C_f određena je numeričkim simulacijama u programu *COMSOL Multiphysics 3.5* i iznosi 0.51 pF . Kao što je potvrđeno dodatnim simulacijama, vrednost ove kapacitivnosti je nezavisna od električnih osobina uzorka smeštenog unutar Kopecki koaksijalnog voda, kao i da se u opsegu od interesa ne menja sa promenom učestanosti.

Početni model sa elementima sa distribuiranim parametrima je pojednostavljen tako što su vodovi zamenjeni odgovarajućim modelom sa elementima sa koncentrisanim parametrima. U električnom smislu, kratka sekcija voda približno jednaka četvrtini vođene talasne dužine, može se modelovati LC sekcijom prikazanoj na slici 4.5.



Slika 4.5: Električno kratka sekcija voda bez gubitaka modelovana elementima sa koncentrisanim parametrima.

Uzimajući u obzir fizičku dužinu predloženog senzora, potrebne su dve LC sekcije da bi modelovale Kopecki koaksijalnu liniju, dok je jedna LC sekcija dovoljna da modeluje adapter. Konačan model sa elementima sa koncentrisanim parametrima prikazan je na slici 4.6.



Slika 4.6: Predloženi senzor modelovan elementima sa koncentrisanim parametrima.

Vrednosti elemenata sa koncentrisanim parametrima prikazanog modela mogu se izračunati pomoću izraza za induktivnost i kapacitivnost vodova [71]:

$$C = \frac{\sqrt{\epsilon_r} \tan\left(\frac{\omega}{c_0} \frac{l}{2} \sqrt{\epsilon_r}\right)}{\omega Z_0},$$

$$L = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{Z_0 \sin\left(\frac{\omega}{c_0} l \sqrt{\epsilon_r}\right)}{\omega},$$
(4.3)

gde je l dužina voda, Z_0 karakteristična impedansa, a ω kružna učestanost.

Na osnovu modela sa koncentrisanim parametrima ulazna reaktansa senzora može se izračunati kao:

$$X_{in} = -\frac{A}{B},$$
(4.4)

gde su A i B :

$$\begin{aligned}
A = & [1 - \omega^2(L_A(C_A + C_f) + 2L_C C_f)] \\
& + C_C[-4\omega^2(L_A + L_C) \\
& + 2\omega^4 L_C(2L_A(C_A + C_f) + L_C C_f) - 2\omega^6 L_A L_C^2 C_A C_f] \\
& + C_C^2[2\omega^4 L_C(3L_A + L_C) - 2\omega^6 L_A L_C^2(C_A + C_f)] \\
& - C_C^3[2\omega^6 L_A L_C^2],
\end{aligned} \tag{4.4a}$$

$$\begin{aligned}
B = & [\omega(2C_A + C_f) - \omega^3 C_A(L_A C_A + 4L_C C_f) + 2\omega^5 L_A L_C C_A^2 C_f] \\
& + C_C[4\omega - \omega^3(L_A(4C_A + C_f) + 4L_C(2C_A + C_f))] \\
& + 4\omega^5 L_C C_A(L_A(C_A + C_f) \\
& + L_C C_f) - 2\omega^7 L_A L_C^2 C_A C_f] + C_C^2[-6\omega^3 L_C \\
& + 2\omega^5 L_C(3L_A C_A + L_A(2C_A + C_f)) \\
& - 2\omega^7 L_A L_C^2 C_A(C_A + C_f)] + C_C^3[2\omega^5 L_C^2 - 2\omega^7 L_A C_A L_C^2].
\end{aligned} \tag{4.4b}$$

Ulazna impedansa je funkcija kružne učestanosti $\omega = 2\pi f$, kao i svih elemenata modela: C_A , L_A , C_C , L_C i C_f . Međutim, samo C_C zavisi od permitivnosti zemljišta. Može se pretpostaviti da induktivnost kratke sekcije voda definisane izrazom (4.3) ne zavisi ni od permitivnosti sredine ni od radne učestanosti tako da važi:

$$L \approx \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{Z_0 l \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\epsilon_r}}{\omega} = \frac{Z_0 l}{c_0}. \tag{4.5}$$

Prema tome L_A i L_C mogu se smatrati konstantama na celom opsegu učestanosti i za sve karakterisane materijale. Kapacitivnost adaptera računa se pomoću izraza (4.3). Kako je adapter uvek ispunjen vazduhom, kapacitivnost C_A ne zavisi od permitivnosti uzorka. Za slučaj merenja permitivnosti zemljišta, gde se opseg radnih učestanosti kreće od 100 MHz do 250 MHz, zavisnost C_A od učestanosti se takođe može zanemariti pošto je njen uticaj manji od 0.1%.

Korišćenjem izraza (4.3) izračunate su sledeće vrednosti elemenata sa koncentrisanim parametrima: $L_A = 4.075 \text{ nH}$, $C_A = 0.819 \text{ pF}$, i $L_C = 3.61 \text{ nH}$. Kada se ove vrednosti uvrste u

jednačine (4.4a) i (4.4b), dobija se analitička zavisnost ulazne reaktanse od kapacitivnosti uzorka C_C :

$$X_{in} = -\frac{A}{B}, \quad (4.6)$$

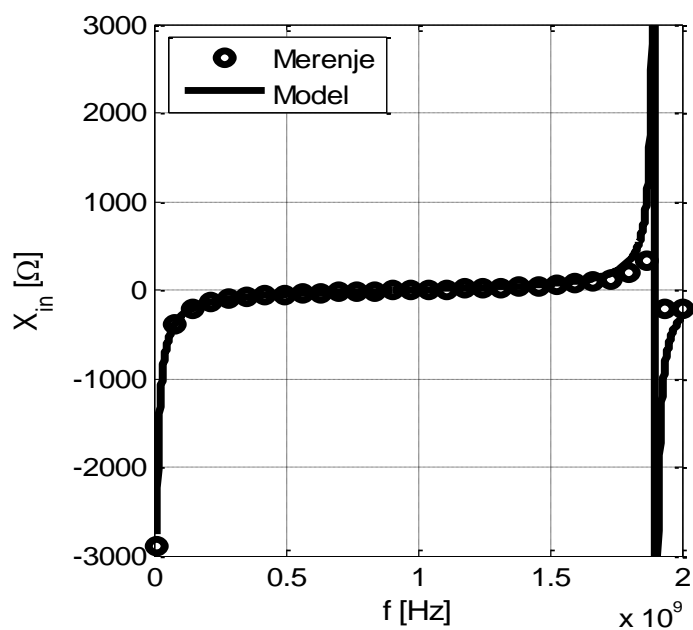
gde su A i B :

$$\begin{aligned} A = & 1 - 3.5917 \cdot 10^{-7} f^2 \\ & + C_C(-1.2136 \cdot 10^{-6} f^2 + 0.1426 \cdot 10^{-12} f^4 \\ & - 2.7296 \cdot 10^{-21} f^6) + C_C^2(1.7819 \cdot 10^{-13} f^4 - 8.6851 \\ & \cdot 10^{-21} f^6) - C_C^3 \cdot 6.5351 \cdot 10^{-21} f^6, \end{aligned} \quad (4.6a)$$

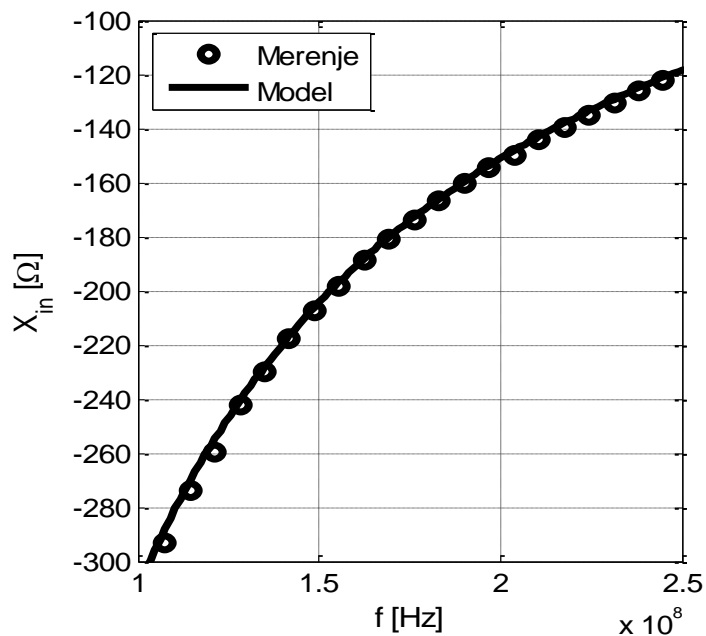
$$\begin{aligned} B = & 1.3496 \cdot 10^{-5} f - 2.1741 \cdot 10^{-12} f^3 + 9.856 \cdot 10^{-20} f^5 \\ & + C_C(2.5133 \cdot 10^{-8} f - 11.5207 \cdot 10^{-12} f^3 + 8.4042 \\ & \cdot 10^{-19} f^5 - 1.4047 \cdot 10^{-26} f^7) \\ & + C_C^2(-5.3728 \cdot 10^{-12} f^3 + 1.2561 \cdot 10^{-18} f^5 \\ & - 0.0477 \cdot 10^{-24} f^7) + C_C^3(2.5524 \cdot 10^{-53} f^5 \\ & - 3.3629 \cdot 10^{-26} f^7) \end{aligned} \quad (4.6b)$$

gde f predstavlja radnu učestanost izraženu u MHz, a C_C je dato u pF.

Kako bi se potvrdila ispravnost modela, na slici 4.7 prikazano je poređenje između izmerene ulazne reaktanse i ulazne reaktanse izračunate pomoću (4.4), za slučaj vazduhom ispunjenog uređaja. Poređenje je urađeno za širok opseg učestanosti, čak do 2 GHz i može se uočiti dobro slaganje, koje potvrđuje ispravnost modela. Razlika u amplitudama odziva na približno 1.9 GHz nastaje zbog činjenice da model sa koncentrisanim parametrima ne uzima u obzir gubitke. Međutim, ovo ne umanjuje tačnost modela, utoliko više što se rezonanca nalazi na 1.9 GHz što je van opsega radnih učestanosti predloženog senzora.



a)



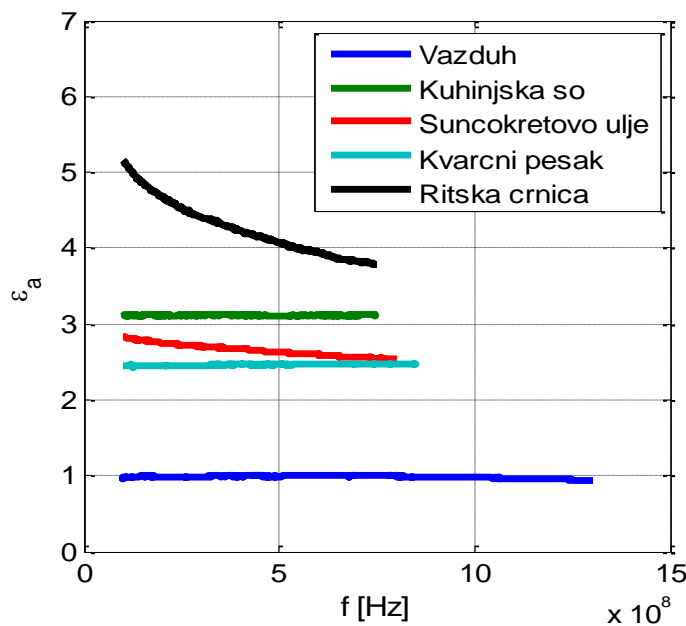
b)

Slika 4.7: Poređenje između izmerene ulazne reaktanse i ulazne reaktanse modelovane elementima sa koncentrisanim parametrima za slučaj vazduhom ispunjenog senzora: a) u širokom opsegu učestanosti 0 – 2 GHz b) u radnom opsegu učestanosti 100 – 250 MHz.

4.2 Merenje permitivnosti i uticaj gubitaka

Pomoću predloženog modela senzora određena je relativna permitivnost raznih praškastih i tečnih materijala merenjem ulazne impedanse. Kao što je prethodno pomenuto, gornja granica radne učestanosti zavisi od stvarne vrednosti permitivnosti, i za materijale relativne permitivnosti približno jednake 1 može ići i do 1 GHz. Sva merenja su obavljena pomoću VNA-a, pomoću kojih je na osnovu i izraza (4.6) i (4.3), određena permitivnost uzorka u funkciji učestanosti, nezavisno od tipa materijala koji se testira.

Na slici 4.8 prikazane su permitivnosti raznih uzoraka koji ovo ilustruju. Može se primetiti da izmerene permitivnosti vazduha, kuhinjske soli, suncokretovog ulja i kvarcnog peska odgovaraju stvarnim vrednostima [72-74]. Štaviše, izmerene permitivnosti ovih materijala su konstantne u opsegu učestanosti od interesa. Međutim, primećuje se disperzija permitivnosti koja je u slučaju suncokretovog ulja slabije izražena dok je intenzivnija kod uzorka ritske crnice nepoznate vlažnosti.



Slika 4.8: Izmerene permitivnosti raznih uzoraka, koje pokazuju da se uređaj može koristiti nezavisno od tipa materijala koji se testira.

Permitivnost prikazana na slici 4.8 koja je dobijena na osnovu izmerene ulazne reaktanse u stvari predstavlja „vidljivu“ permitivnost ε_a , koja je funkcija učestanosti, stvarne relativne permitivnosti ε_r (koja je relativno konstantna u opsegu učestanosti od interesa) i efektivne provodnosti σ_e (u kojoj su uračunate stvarna provodnost uzorka kao i dielektrični gubici uzorka) [19]. Stvarna permitivnost i efektivna provodnost mogu se ekstrahovati iz izmerenih rezultata vidljive permitivnosti procedurom fitovanja, pomoću izraza [75]:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_r + \frac{\sigma_e}{4\varepsilon_a\varepsilon_0^2\omega^2}. \quad (4.7)$$

Iako je opisani koncept inicijalno predložen u metodama iz vremenskog domena, u ovom istraživanju je pokazano da se izraz (4.7) može uspešno koristiti i u domenu učestanosti pri modelovanju uticaja gubitaka na rezultate merenja. Ovde je potrebno napomenuti da se predloženi postupak može sprovesti bez upotrebe jednačine (4.7), i to merenjem ulazne impedanse senzora umesto reaktanse. Međutim, u tom slučaju model prikazan na slici 4.6 bi uključivao redno vezane otpornike i paralelne provodnosti, kako bi se uračunali gubici. Ovo bi dovelo do znatno složenijih izraza od jednačine (4.6) iz kojih bi bilo teško izračunati kapacitivnost C_C . Zato je izabran model koji ne uračunava gubitke, kako bi se jednostavno izračunala kapacitivnost C_C i permitivnost ε_a .

Ekstrahovana vrednost vidljive permitivnosti ε_a se koristi kako bi se pomoću izraza (4.7) odredili nepoznati parametri relativne permitivnosti i efektivne električne provodnosti. Menjanjem vrednosti pomenutih parametara izraz (4.7) je moguće fitovati proračunatim vredostima za ε_a . Par vrednosti relativne permitivnosti i efektivne električne provodnosti za koje se dobija najbolje poklapanje sa proračunatom vidljivom permitivnošću u celom opsegu učestanosti od interesa upravo predstavlja rešenje nepoznatih parametara. Procedura fitovanja urađena je pomoću alata *Curve Fitting Toolbox* u okviru programskog paketa *Matlab*.

Upotrebom predloženog pristupa dobijene su vrednosti za ε_r i σ_e za sve izmerene uzorke, pri čemu se dobijene vrednosti koje su prikazane u tabeli 4.1, veoma dobro slažu sa stvarnim [72-74]. U slučaju vazduha, kuhinjske soli i kvarcnog peska, stvarna i vidljiva permitivnost su praktično identične zbog činjenice da su ovi materijali veoma dobri dielektrici čija je provodnost bliska nuli.

Tabela 4.1: Relativna permitivnost i efektivna električna provodnost karakterisanih uzoraka

Uzorak	σ_e [S/m]	ϵ_r
Vazduh	0	0.99
Kuhinjska so	0	3.12
Suncokretovo ulje	0.006	2.70
Kvarcni pesak	0	2.46
Uzorak zemljišta	0.081	10.7

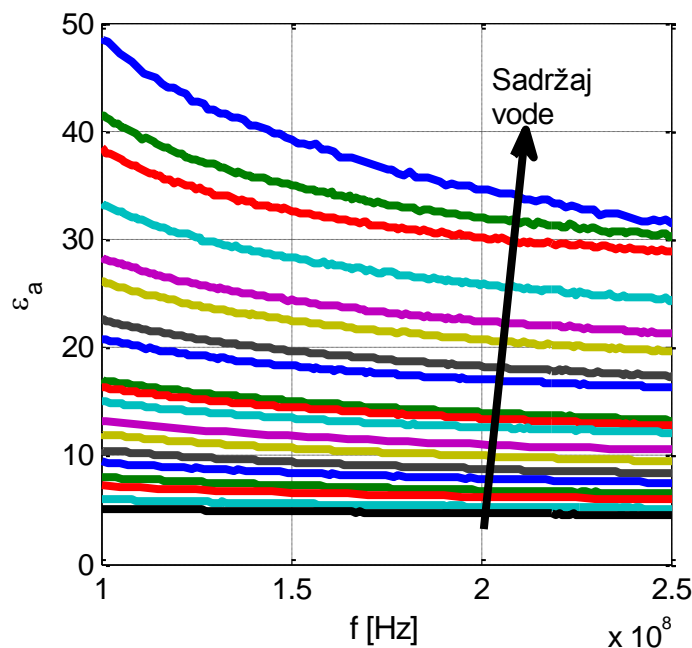
4.3 Kalibracija i testiranje

U prethodnom poglavlju pokazano je da se projektovani senzor može koristiti za merenje stvarne relativne permitivnosti ϵ_r i efektivne provodnosti σ_e , nezavisno od materijala koji se karakteriše. Međutim, da bi se senzor koristio za tačnu procenu vlažnosti zemljišta, izmerena vrednost permitivnosti mora se dovesti u vezu sa stvarnim sadržajem vode u uzorku. Ova relacija je ostvarena kalibracijom zasnovanom na činjenici da količina vode u zemljištu utiče kako na masu uzorka tako i na njegove dielektrične osobine. Za potrebe kalibracije korišćen je maseni udeo vode θ_g definisan izrazom (2.1). Kalibracione krive koje povezuju vidljivu permitivnost sa masenim udelom vode u uzorku zemljišta konstruisane su za ritsku crnicu koja je uzorkovana iz Banata na severoistoku Srbije sa dubine od 20 do 25 cm. Ritska crnica je veoma plodno poljoprivredno zemljište koje po USDA klasifikaciji potpada pod tip glinovaste ilovače.

Postupak kalibracije započet je sa potpuno suvim uzorkom zemljišta u neporemećenom stanju smeštenom u Kopecki cilindru. Prvo je izmerena masa suvog uzorka zemljišta nakon čega je uzorak potopljen u destilovanu vodu na 48 časova, kako bi se uzorak ovlažio do saturacije. Masa uzorka u ovom stanju je takođe zabeležena. Potom je formirana Kopecki koaksijalna linija postavljanjem unutrašnjeg cilindra i nakon čega je obavljeno prvo merenje ulazne reaktanse. Uzorak je ostavljen da se osuši a nova merenja ulazne reaktanse su urađena kad god bi masa uzorka opala za približno 2 g. Procedura merenja i sušenja je nastavljena dok uzorak nije bio u potpunosti suv. Na ovaj način, dobijeno je ukupno 19 merenja. Za svako merenje ekstrahovana je vrednost vidljive permitivnosti u opsegu učestanosti od 100 do 250 MHz.

Dobijene vrednosti vidljive permitivnosti u navedenom opsegu učestanosti prikazane su na slici 4.9, za svih 19 merenja. Potrebno je naglasiti da su se rezultati dobijeni prilikom merenja

10 uzoraka zemljišta koji su uzeti sa iste lokacije poklapali, što ilustruje visoku ponovljivost metode. Kao što se očekivalo, veći sadržaj vode daje veće vrednosti vidljive permitivnosti na opsegu učestanosti od interesa. Takođe, kod svih rezultata merenja uočljiva je zavisnost vidljive permitivnosti od učestanosti.



Slika 4.9: Vidljiva permitivnost proračunata na osnovu 19 rezultata merenja ritske crnice uzoraka poznatog sadržaja vode. Strelica pokazuje smer porasta vlažnosti zemljišta.

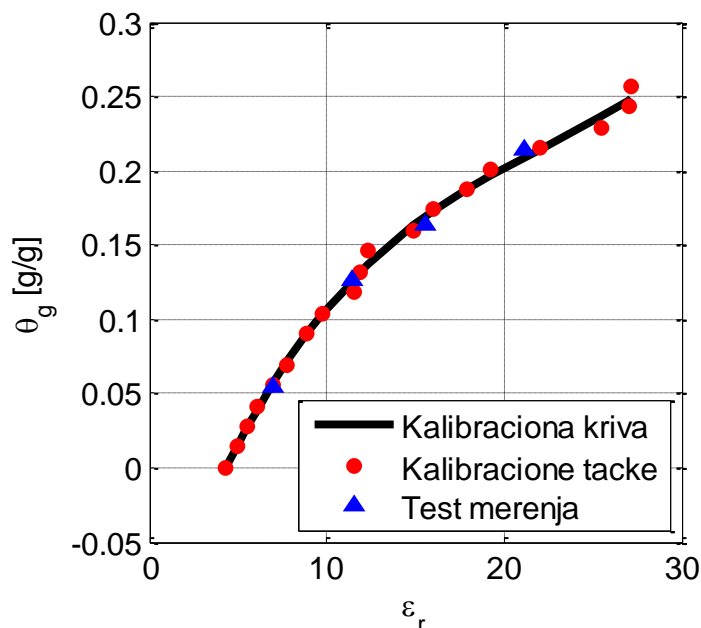
Korišćenjem izraza (4.7), vrednosti za ϵ_r i σ_e mogu se ekstrahovati na osnovu izmerenih vrednosti vidljive permitivnosti. Stvarna permitivnost ϵ_r dobijena na ovaj način ne zavisi od provodnosti zemljišta kao što je to slučaj kod vidljive permitivnosti ϵ_a , stoga je predloženi pristup pogodan za merenje permitivnosti nezavisno od tipa zemljišta. Vrednosti koje su dobijene za ϵ_r i σ_e prikazane su u tabeli 4.2 za svih devetnaest merenja i u saglasnosti su sa tipičnim vrednostima koje se mogu naći u literaturi [75-77]. Primetno je da se stvarna permitivnost ϵ_r i efektivna provodnost σ_e povećavaju sa porastom vlažnosti zemljišta, što je bio očekivan rezultat.

Tabela 4.2: Relativne permitivnosti i efektivne permitivnosti ritske crnice ekstrahovane na osnovu 19 merenja uzorka zemljišta različitog masenog udela vode.

R. br.	θ_g [g/g]	σ_e [S/m]	ϵ_r
1	0.2569	0.359	27.20
2	0.2431	0.23	27.10
3	0.2292	0.246	25.50
4	0.2153	0.218	22.00
5	0.2014	0.182	19.20
6	0.1875	0.164	17.90
7	0.1736	0.136	16.00
8	0.1597	0.124	14.90
9	0.1458	0.100	12.30
10	0.1319	0.095	11.90
11	0.1181	0.081	11.50
12	0.1042	0.075	9.80
13	0.0903	0.068	8.90
14	0.0694	0.060	7.80
15	0.0556	0.053	7.00
16	0.0417	0.043	6.10
17	0.0278	0.038	5.55
18	0.0139	0.028	4.95
19	0	0.023	4.32

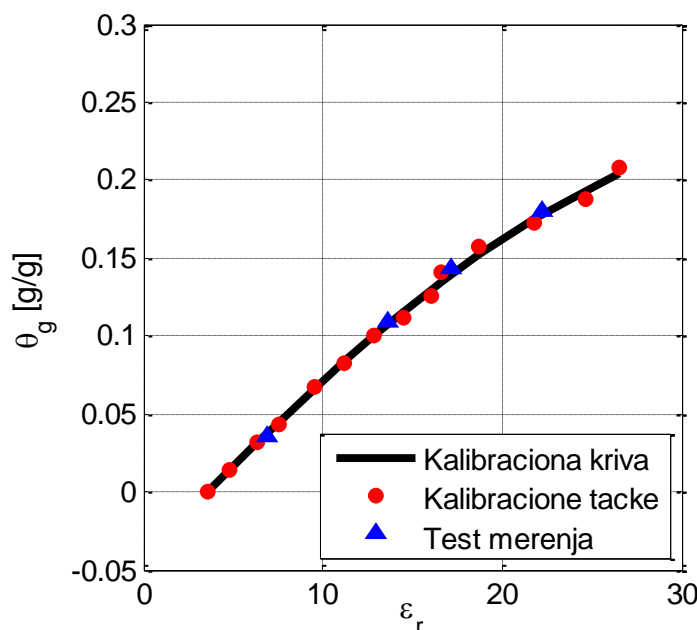
Kalibraciona kriva, prikazana na slici 4.10, konstruisana je polinomnim fitovanjem 19 kalibracionih tačaka iz tabele 4.2 (označene su crvenim kružićima). Svaka tačka definisana je vrednostima stvarne permitivnosti na apscisi i masenog udela vode na ordinati.

Apsolutna greška polinomnog fitovanja je ispod 0.0094 g/g, što predstavlja 3.65 % od punog opsega izlaznih vrednosti. Kako bi se testiralo predloženo senzorsko rešenje, izmerena je ulazna reaktansa četiri uzorka zemljišta različitog masenog udela vode. Uzorci su uzeti sa iste lokacije i sa iste dubine (20-25 cm) kao i uzorak korišćen za kalibraciju. Pomoću gore opisane procedure i kalibracione krive sa slike 4.10, određen je gravimetrijski udeo vode za sve test uzorke. Dobijene vrednosti upoređene su sa stvarnim gravimetrijskim udelima (takođe poznatim), pri čemu izračunata apsolutna greška iznosi 0.0057 g/g što je samo 2.24% punog mernog opsega. Osim toga, predloženi senzor daje tačne rezultate u širokom opsegu vlažnosti zemljišta koji uključuje vrednosti koje se sreću u stvarnosti (0 – 25 %).



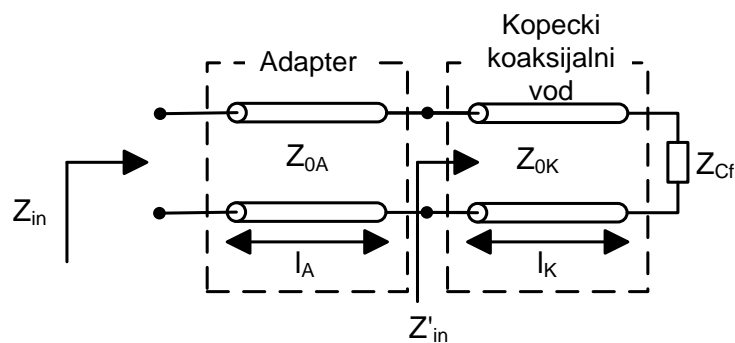
Slika 4.10: Kalibraciona kriva konstruisana za ritku crnicu.

Kako bi se ispitala mogućnost primene predloženog senzora za razne tipove zemljišta, ista procedura sprovedena je za drugi skup uzoraka zemljišta. Ovog puta mereni su uzorci karbonatnog černozema, prihranjeni sa 200 kg/ha azota i uzorkovani na dubini od 10 cm. Konstruisana kalibraciona kriva prikazana je na slici 4.11 zajedno sa kalibracionim i test tačkama. Senzor se opet pokazao kao veoma tačan budući da je apsolutna greška samo 0.0046 g/g što je samo 2.22% od punog mernog opsega izlaznih vrednosti.



Slika 4.11: Kalibraciona kriva konstruisana za karbonatni černoziem.

U ovom poglavlju ispitana je pomenuta mogućnost ekstrahovanja kompleksne permitivnosti na osnovu merenja ulazne impedanse senzora i upotrebom vodovima modelovonog senzora sa slike 4.12. Pošto su merenja obavljena u domenu učestanosti, na osnovu njih moguće je doći do neposrednih vrednosti i realnog i imaginarnog dela kompleksne permitivnosti što pruža dublji uvid u dielektrične osobine uzorka zemljišta [68].



Slika 4.12: Električni model senzora za određivanje kompleksne permitivnosti uzorka.

Kompleksna permitivnost uzorka ne može se izmeriti direktno pomoću projektovanog uređaja, već se njena vrednost procenjuje na osnovu predloženog električnog modela i izmerene

ulazne impedanse. Adapter i Kopecki koaksijalna linija modeluju se putem dva serijski vezana voda dok je ivična kapacitivnost uključena pomoću impedanse Z_{C_f} . Potrebno je naglasiti da i kod ovog modela kao i slučaju modela sa koncentrisanim parametrima, slika 4.6, važe ista ograničenja u pogledu opsega radne učestanosti, te on iznosi 100 – 250 MHz.

Kako bi se pojednostavio problem rešavanja, prvo je izmerena ulazna impedansa Z_{inm} transformisana na impedansu na početku Kopecki koaksijalnog voda Z'_{inm} pomoću sledeće jednačine

$$Z'_{inm} = Z_{0A} \frac{Z_{0A} \tanh\left(j \frac{\omega}{c_0} l_A\right) - Z_{in}}{Z_{in} \tanh\left(j \frac{\omega}{c_0} l_A\right) - Z_{0A}}, \quad (4.8)$$

gde je Z_{0A} karakteristična impedansa adaptera, a l_A dužina adaptera prema slici 4.12. Ista impedansa može se proračunati na osnovu električnog modela sa slike 4.12, transformacijom impedanse Z_{C_f} na impedansu koja se vidi sa početka Kopecki koaksijalnog voda kao

$$Z'_{in} = \frac{Z_{C_f} + \frac{Z_{0Kair}}{\sqrt{\epsilon_r}} \tanh\left(j \frac{\omega}{c_0} l_K \sqrt{\epsilon_r}\right)}{1 + \frac{Z_{C_f}}{Z_{0Kair}} \sqrt{\epsilon_r} \tanh\left(j \frac{\omega}{c_0} l_K \sqrt{\epsilon_r}\right)}, \quad (4.9)$$

gde su Z_{0Kair} i l_K redom karakteristična impedansa vazduhom ispunjene Kopecki koaksijalne linije i njena dužina. Pošto važi da su impedanse iz izraza (4.8) i (4.9) ekvivalentne, problem nalaženja kompleksne permitivnosti može se svesti na problem pronalaženja nule sledeće funkcije

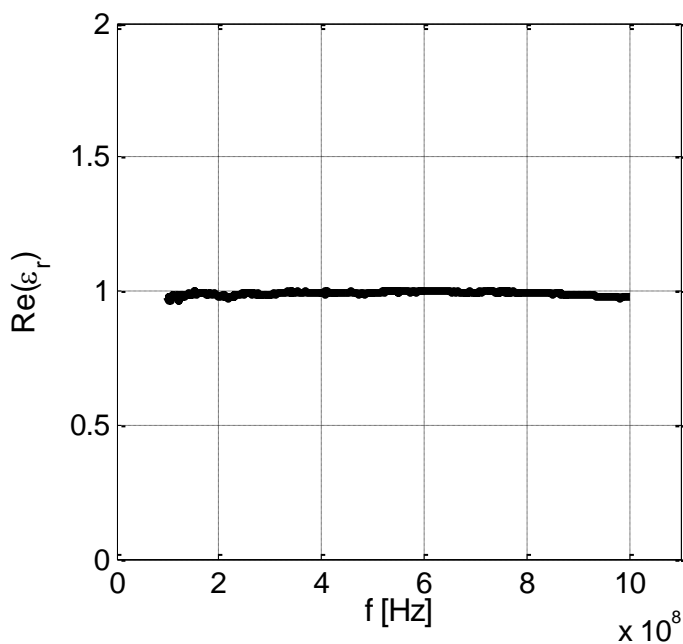
$$f(\epsilon_r) = Z'_{inm} - Z'_{in}. \quad (4.10)$$

Numerička metoda *regula falsi* korišćena je za rešavanje jednačine (4.10) i određivanje kompleksne permitivnosti uzorka zemljišta smeštenog u Kopecki koaksijalnoj liniji [78]. Na osnovu pronađenih nula, ekstrahovana je kompleksna permitivnost. Zbog periodičnog karaktera izraza (4.8) i (4.9) dobijena rešenja su nejednoznačna pa je potrebno izostaviti rešenja koja ne pripadaju očekivanim vrednostima za zemljište. Posebnu pažnju potrebno je posvetiti odabiranju intervala u kom se nalaze nule funkcije (4.10) kako bi uopšte došlo do konvergencije ka odgovarajućem kompleksnom rešenju.

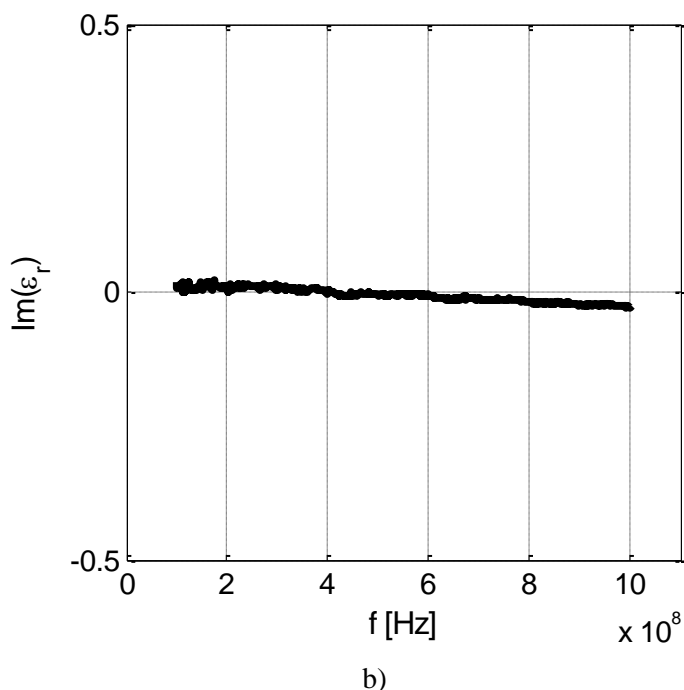
Kako bi se ispitala ispravnost modela urađeno je test merenje vazduhom ispunjene Kopecki koaksijalne linije. Sprovedena su merenja u širem opsegu učestanosti (0.1 – 1 GHz) pošto je relativna permitivnost vazduha 1, i prema tome je gornja granica radne učestanosti viša na osnovu izraza (4.2). Procenjena vrednost kompleksne permitivnosti prikazana je na slici 4.13.

Relativna greška u slučaju realnog dela kompleksne permitivnosti iznosi 3.64%, dok je u slučaju imaginarnog ona nešto viša i iznosi 5.59%. Relativno niske vrednosti grešaka ukazuju na to da je predloženi model pogodan za procenu kompleksne permitivnosti zemljišta.

Kompleksna permitivnost zemljišta tipa ritske crnice procenjena je pomoću opisanog postupka u radnom opsegu učestanosti 100 – 250 MHz. Na slici 4.14a i 4.14b prikazani su realni i imaginarni deo permitivnosti zemljišta za četiri različita zapreminska udela vode.

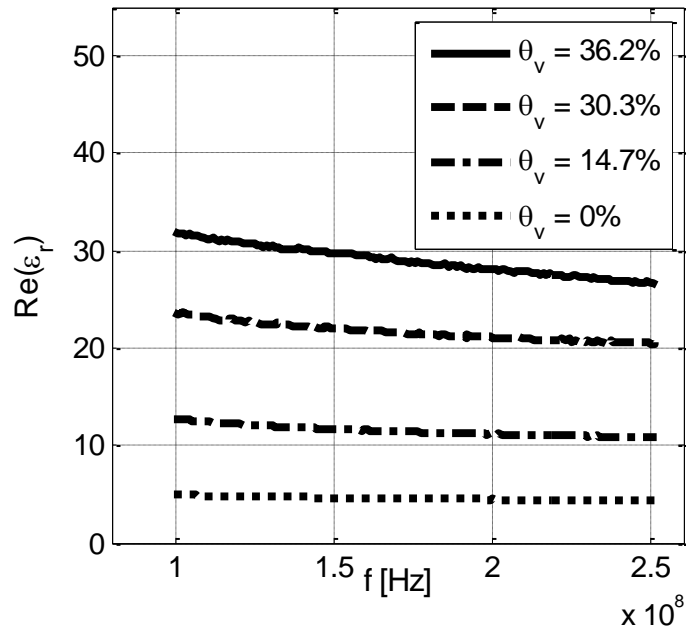


a)

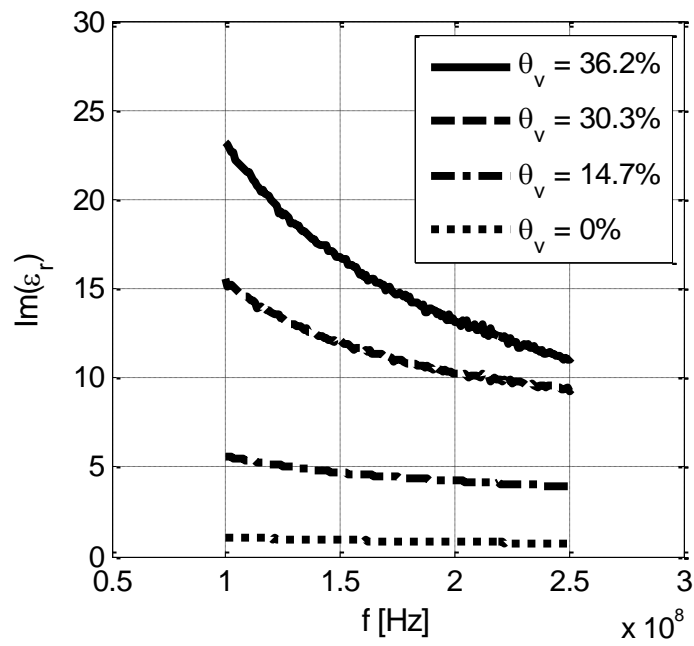


Slika 4.13: Kompleksna permitivnost vazduha: a) realni deo b) imaginarni deo.

Kao što se može videti sa slike 4.14, veći volumetrijski udeli vode daju veće prosečne vrednosti i realnog i imaginarnog dela permitivnosti što se slaže sa teorijom iznetoj u poglavlju 2.6. Poznato je da imaginarni deo dielektrične permitivnosti zavisi kako od dielektričnih gubitaka ϵ_d tako i od električne provodnosti na niskim učestanostima σ_{DC} , izraz (2.5). Fitovanjem pomenutog izraza prema dobijenim rezultatima moguće je ekstrahovati vrednosti električne provodnosti na niskim učestanostima. Ovaj parametar je bitan pošto je usko povezan sa brojnim osobinama zemljišta poput sposobnosti zemljišta da zadržava odnosno otpušta vodu, kapacitet za jonsku razmenu, poroznost i salinitet [79]. U tabeli 4.3 prikazane su ekstrahovane vrednosti električne provodnosti za različite volumetrijske udele.



a)



b)

Slika 4.14: Kompleksna permitivnost ritske crnice a) realni deo b) imaginarni deo.

Tabela 4.3: Električna provodnost ritkse crnice na niskim učestanostima dobijene za različite zapreminske udele vode.

θ_v [%]	0	14.7	30.3	36.2
σ_{DC} [dS/m]	≈ 0	0.02	0.55	1.13

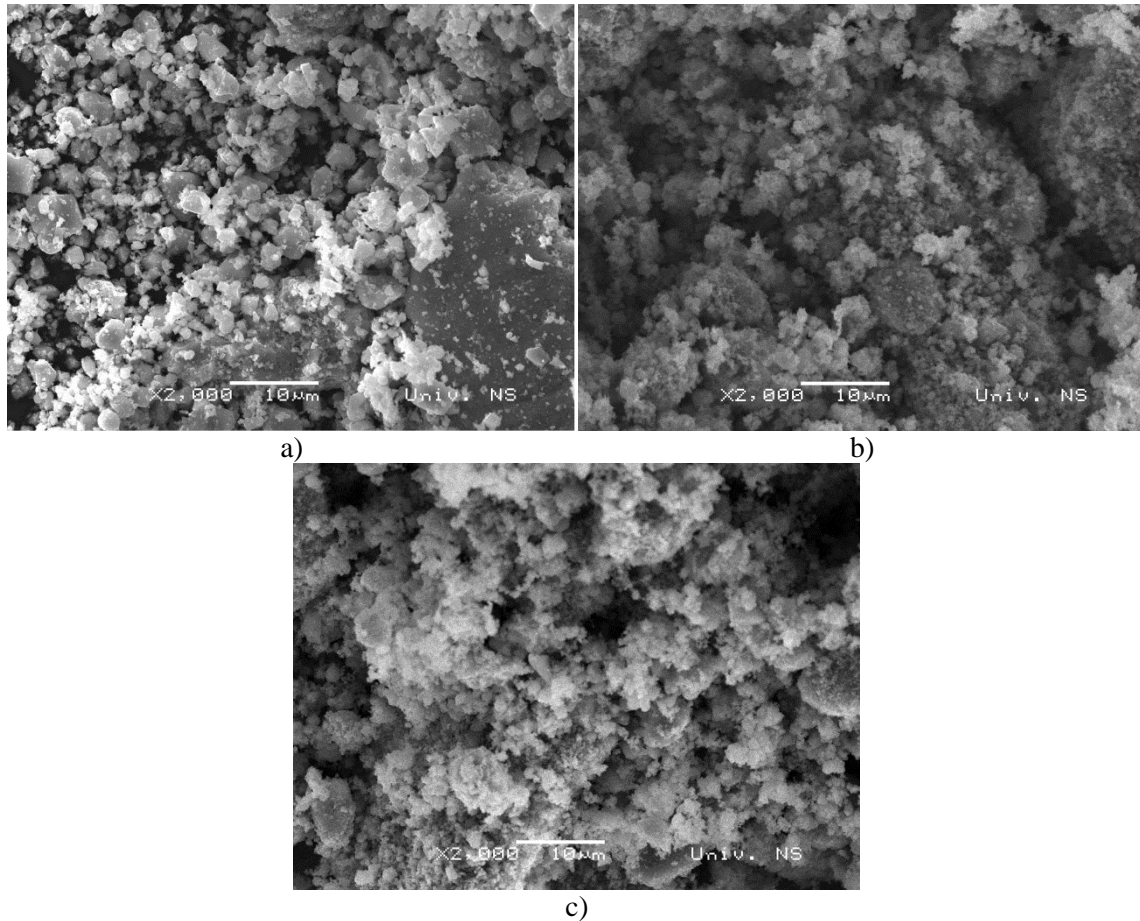
4.4 Primena projektovanog senzora za karakterizaciju nikel-manganitnog praha na visokim učestanostima

Projektovani senzor, kao što je već pomenuto, može se primeniti za električnu karakterizaciju raznih praškastih i tečnih materijala. U ovom poglavlju opisan je postupak karakterizacije nikel-manganitnog praha NiMn_2O_4 koji je najčešće korišćen materijal za fabriku termistora sa negativnim temperaturnim koeficijentom – NTC (eng. *Negative Temperature Coefficient*) [80]. Ovaj tip termistora našao je svoju primenu u industriji u vidu termometara [81], senzora požara [82], infracrvenih detektora [83,84] itd. U skorije vreme termistori se koriste i u mobilnim telefonima i primopredajnicima stoga se javila potreba za električnom karakterizacijom NTC prahova na visokim učestanostima, tipično 900 MHz. Zahvaljujući poznatoj relativnoj permitivnosti NTC materijala moguće je projektovati kola za temperaturnu kompenzaciju koja se koriste u modernim telekomunikacionim uređajima.

4.4.1 Priprema praha

Nikel-manganitni prah sintetisan je kalcinacijom stehiometrijske mešavine mangan(II)-oksida (MnO , Aldrich 99.9 wt.%) i nikel(II)-oksida (NiO , Merck 99.5 wt.%) u trajanju od 1 časa na temperaturi od 1050°C . Kalcinirani prah je potom mleven planetarnim kugličnim mlinom u kontinualnom režimu rada (400 o/min) upotrebom Fe kuglica u odnosu 10:1. Vremenski intervali mlevenja bili su 5, 30 i 45 minuta.

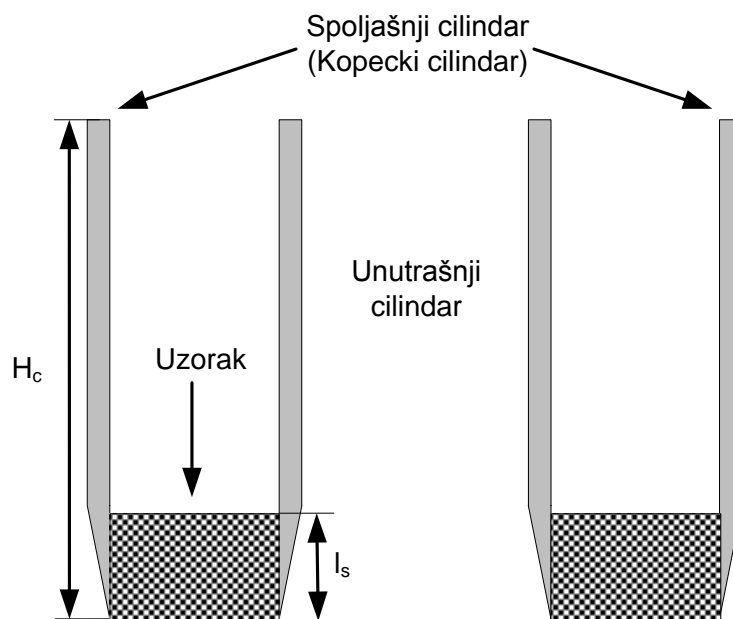
SEM mikrografi uzoraka koji su bili mehanički aktivirani u različitim vremenskim intervalima prikazani su na slici 4.15. Može se primetiti da se sa porastom vremena mlevenja povećava broj finih čestica (približno 30 nm) koje postaju homogenije i po veličini i po obliku.



Slika 4.15: SEM mikrografi nikel manganitnog praha mleveni u vremenskim intervalima od a) 5 min b) 30 min i c) 45 min.

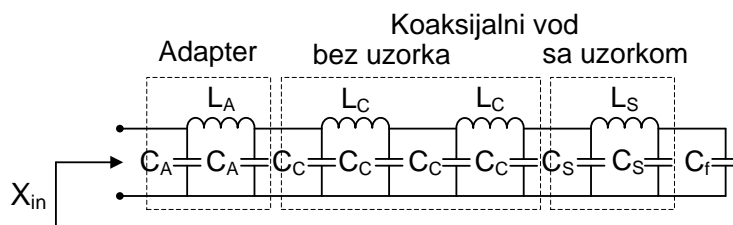
4.4.2 Ekvivalentni električni model

Za karakterizaciju praha korišćen je senzor opisan u poglavlju 4.1. Budući da uzorak NTC praha ne ispunjava u potpunosti Kopecki koaksijalni vod (slika 4.16), bilo je neophodno osmisliti novi ekvivalentni električni model uređaja.



Slika 4.16: Kopecki koaksijali vod delimično ispunjen NTC uzorkom.

U slučaju karakterizacije nikel-manganita takođe postoje granice radnog opsega učestanosti, te je sa donje strane ona ograničena Maksvel-Vagnerovom polarizacijom i iznosi 100 MHz, a sa gornje pojavom viših modova prostiranja koji se za konkretan slučaj javljaju iznad 1 GHz. Na osnovu gornje granice radne učestanosti i dužine samog uređaja, dovoljno je koristiti jednu LC sekciju za modelovanje adapterskog dela, dve LC sekcije koje modeluju deo koaksijalne linije ispunjene vazduhom i jednu LC sekciju za potrebe dela koaksijalne linije ispunjenog NTC prahom, slika 4.17.



Slika 4.17: Ekvivalentni električni model senzora za električnu karakterizaciju NTC praha.

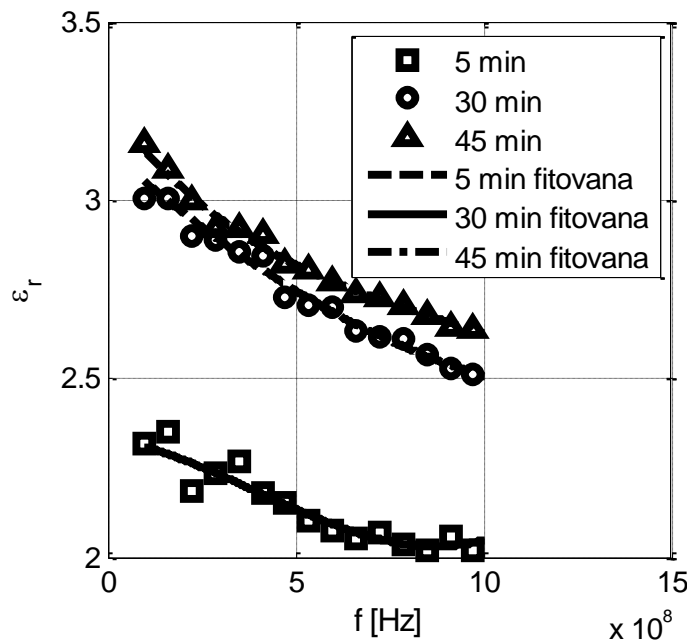
Kao što je izloženo u prethodnim poglavljima vrednost elemenata koji modeluju adapter, deo prazne Kopecki koaksijalne linije kao i induktivnost L_S ne menjaju se značajno unutar radnog opsega učestanosti i mogu se proračunati pomoću izraza (4.3) $L_A = 4.011 \text{ nH}$, $C_A = 0.826 \text{ pF}$, $L_C = 3.211 \text{ nH}$, $C_C = 0.655 \text{ pF}$ i $L_S = 0.831 \text{ nH}$. Kapacitivnost C_S je funkcija permitivnosti NTC uzorka, koja se može tačno proračunati fitovanjem ulazne reaktanse modela, merenoj ulaznoj reaktansi u radnom opsegu učestanosti koristeći izraz (4.3).

4.4.3 Rezultati merenja

Korišćenjem predloženog mernog uređaja, relativna permitivnost određena je eksperimentalnim putem za NTC prahove koji su dobijeni mlevenjem u vremenskim periodima od 5, 30 i 45 minuta. Rezultati merenja prikazani su na slici 4.18 u vidu tačaka, dok su krive dobijene polinomijalnim fitovanjem odgovarajućih mernih tačaka. Očigledno je da NTC uzorci koji su duže mleveni daju veće vrednosti permitivnosti. Dobijeni rezultati su u skladu sa teoretskim vrednostima efektivne permitivnosti mešavišne NTC čestica i vazduha, budući da vazduh svojim prisustvom snižava ukupnu permitivnost mešavine. Duže mleveni uzorci sastoje se od finijih čestica koji bolje ispunjavaju raspoloživu zapreminu, pa je prema tome količina vazdušnih šupljina u uzorku smanjena, što uvećava ukupnu relativnu permitivnost uzorka.

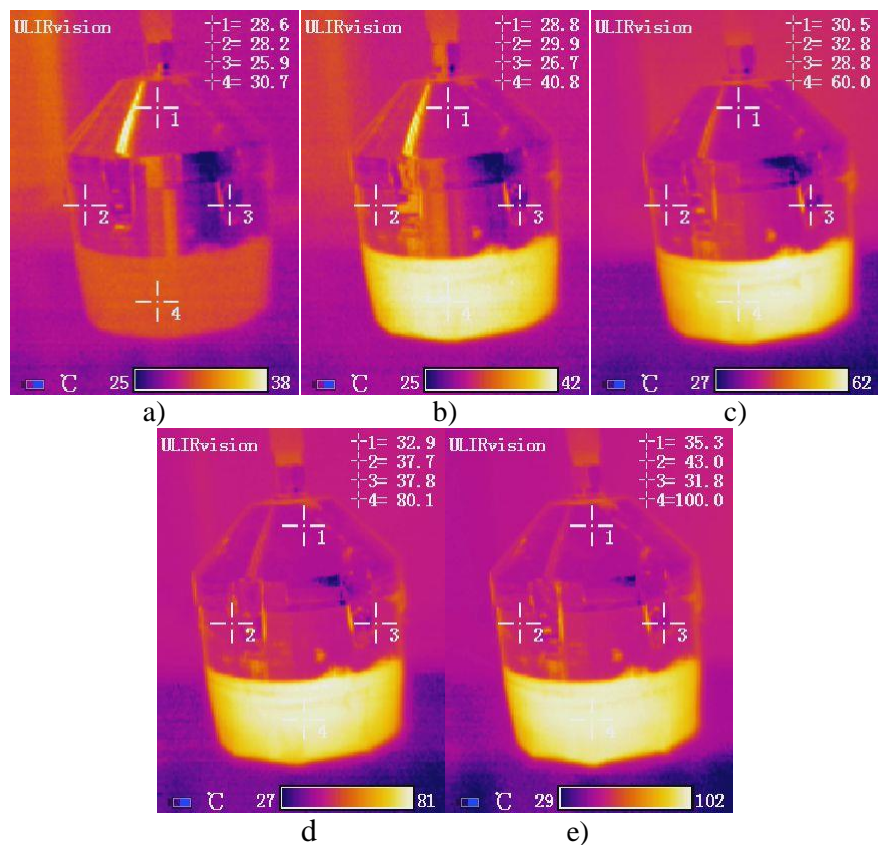
Rezultati sa slike 4.18 pokazuju da se permitivnost NTC praha smanjuje za više od 15% kad se učestanost merenja poveća sa 100 MHz na 1 GHz. Objašnjenje ove pojave leži u činjenici da se sposobnost dipola nikel-manganita da prate promene električnog polja smanju sa porastom učestanosti. Povećanjem učestanosti disipira veći deo energije polja u uzorku što ima za posledicu smanjenje ukupne permitivnosti. Praktično isti trend disperzije permitivnosti prisutan je kod svih NTC uzoraka. Fenomen opadanja permitivnosti sa porastom učestanosti potiče od nanoskopskih (molekularnih) osobina nikel manganitnog materijala. Iznad određene učestanosti spoljašnjeg polja, elektroni koji se razmenjuju između jona Mn^{3+} i Mn^{4+} ne mogu da prate promene polja što ima za posledicu smanjenje polarizacije. Na nižim učestanostima viša vrednost permitivnosti nastaje na račun međuslojne polarizacije koja je prisutna na graničnim prelazima između različitih faza u materijalu, poglavlje 2.6. Međutim i ovaj doprinos

permitivnosti opada na višim učestanostima zbog nemogućnosti praćenja promena električnog polja.



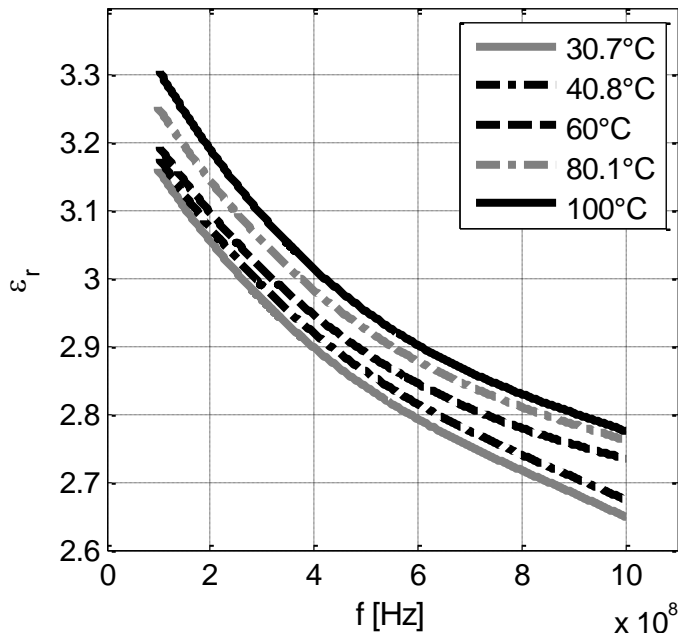
Slika 4.18: Relativna permitivnost NTC prahova mleveni u različitim intervalima.

Kod NTC materijala bitno je posmatrati uticaj temperature na relativnu permitivnost uzorka. Merenja permitivnosti sprovedena su na temperaturama od 30.7°C, 40.8°C, 60.0°C, 80.1°C i 100.0°C i to na uzorku NTC praha mlevenog u intervalu od 45 minuta. Uzorak je zagrevan korišćenjem izvora vrelog vazduha sa mogućnošću preciznog podešavanja temperature koju je moguće očitati na displeju izvora. Temperatura samog senzora a time i temperatura uzorka određena je pomoću infracrvene kamere TI160. Kako je pokazano na slici 4.19, na ovaj način dobijene su jasne termalne slike i tačno očitavanje temperature (tačka 4 odgovara temperaturi NTC praha).



Slika 4.19: Termovizijske slike mernog uređaja za različite temperature
a) 30.7°C b) 40.8°C c) 60.0°C d) 80.1°C e) 100.0°C.

Zavisnost permitivnosti od učestanosti na različitim temperaturama prikazana je na slici 4.20. Može se primetiti da relativna permitivnost raste sa porastom temperature. Ovakav trend posledica je činjenice da jonska polarizacija preovlađuje u dielektriku i da se dipoli u uzorku na nižim temperaturama ne orijentišu. Zagrevanjem uzorka pospešuje se polarizacija dipola što se odražava na povećanje permitivnosti.



Slika 4.20: Relativna permitivnost u zavisnosti od učestanosti i temperature.

4.5 Zaključak

U ovom poglavlju opisan je veoma tačan i robusan senzor za merenje vlažnosti uzoraka zemljišta u neporemećenom stanju, koji je zasnovan na uobičajenoj opremi za uzorkovanje zemljišta u poljoprivredi – Kopecki cilindri. Zahvaljujući osmišljenom postupku, senzor tačno meri permitivnost nezavisno od tipa zemljišta. Upotrebom kalibracione krive koja povezuje izmerenu permitivnost sa sadržajem vode, senzor veoma brzo procenjuje vlažnost zemljišta sa greškom manjom od 2.24% u odnosu na pun merni opseg. Pri tom predloženi uređaj omogućuje ponovljivost merenja za široki opseg vlažnosti zemljišta koji uključuje sve vrednosti od interesa koje se sreću u stvarnim situacijama (0 – 25%).

Predloženo senzorsko rešenje može se koristiti i za detaljnije analize električnih karakteristika zemljišta zahvaljujući mogućnosti merenja ulazne impedanse na osnovu koje se proračunava kompleksna permitivnost uzorka zemljišta. Pored realnog i imaginarnog dela kompleksne permitivnosti moguće je odrediti i vrednost električne provodnosti koja se može dovesti u vezu sa poroznošću i salinitetom zemljišta. Međutim ovaj metod je nejednoznačan zbog periodične prirode jednačina koji ga definišu i osetljiv je u smislu konvergencije ka

kompleksnom rešenju, pa je potrebno obratiti posebnu pažnju pri odabiru granica u kojima se traži kompleksna permitivnost.

Na samom kraju ilustrovana je primenljivost razvijenog senzora u smislu mogućnosti da karakteriše praškaste materijale. Permitivnost nikel-manganitnog NTC praha je po prvi put karakterisana na učestanostima do 1 GHz, što je veoma bitno za njihovu primenu u termistorima kod mobilnih telefona i ostalih RF i mikrotalasnih uređaja. Ispitan je uticaj temperature i dužine vremena mlevenja NTC prahova na relativnu permitivnost čime je olakšano projektovanje uređaja koji rade u opsegu RF i mikrotalasnih učestanosti gde se ovi prahovi primenjuju.

5 Teorijske osnove minijaturnog senzora vlažnosti zemljišta

Senzorsko rešenje zasnovano na Kopecki cilindrima za uzorkovanje zemljišta u neporemećenom stanju funkcioniše isključivo u laboratorijskim uslovima i neophodna mu je skupa oprema u vidu vektorskog analizatora mreže za merenje vlažnosti zemljišta. Iz navedenog razloga u okviru ove disertacije sprovedeno je istraživanje na temu projektovanja i fabrikacije senzora koji bi se moglo koristiti na terenu i koje ne zahteva tako složenu opremu kao u slučaju Kopecki senzora.

U nastavku će biti opisana indirektna metoda merenja vlažnosti koja se predlaže kao osnova za razvoj novih minijaturnih senzora u okviru ove disertacije. Budući da se ova metoda zasniva na vodovima, predložena je arhitektura voda u vidu mikrostrip linije koji će obavljati funkciju senzorskog elementa. Pod senzorskim elementom podrazumeva se pasivni deo senzora koji je u neposrednom kontaktu sa zemljištem. Potom će biti opisan princip rada minijaturnog senzora vlažnosti zemljišta zasnovan na predloženoj metodi. Na kraju ove glave biće izveden izraz za efektivnu permitivnost budući da je ona jedan od ključnih parametara za optimizaciju senzorskog elementa.

5.1 Metoda faznog kašnjenja

Metoda faznog kašnjenja zasniva se na merenju faznog pomeraja prostoperiodičnog signala koji propagira duž voda. Metoda faznog kašnjenja nameće se kao pogodna indirektna metoda merenja vlažnosti zemljišta pošto se karakteriše brzim vremenskim odzivom i ima potencijala za razvoj jeftinog senzora sa niskom potrošnjom energije. Dalje, merenje faze je manje podložno uticaju šuma te je ovo velika prednost u odnosu na metode merenja vlažnosti koje su zasnovane na utvrđivanju amplitude signala opisane u poglavlju 3.4. Pritom, dovoljno je vršiti merenje na samo jednoj učestanosti, što pojednostavljuje razvoj prateće elektronike.

Fazno kašnjenje $\Delta\varphi$ određeno je brzinom i učestanošću signala kao i fizičkim osobinama voda

$$\Delta\varphi = \frac{\omega L_{TL}}{v_p}, \quad (5.1)$$

gde je ω ugaona učestanost signala, v_p fazna brzina signala, a L_{TL} dužina voda.

Fazna brzina signala zavisi od dielektrične permitivnosti na koju neposredno utiče vlažnost zemljišta [19]. Kako bi se odredila fazna brzina elektromagnetnih talasa v_p , polazi se od imaginarnog dela kompleksne konstante prostiranja za sredinu sa gubicima, [85], koja se može definisati pomoću izraza

$$\beta = \frac{\omega\sqrt{\mu\varepsilon}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\varepsilon^2}}}, \quad (5.2)$$

gde su μ , ε i σ permeabilnost, permitivnost i električna provodnost sredine kroz koju se signal prostire, respektivno. Ukoliko je poznat imaginarni deo kompleksne konstante prostiranja moguće je odrediti faznu brzinu signala kao

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \frac{1}{\sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\varepsilon^2}}}}. \quad (5.3)$$

Na osnovu izraza (5.3) dolazi se do zaključka da brzina dominantno zavisi od dielektrične konstante, permeabilnosti i učestanosti signala, a potom i od provodnosti. Od navedenih veličina jedino se permitivnost i električna provodnost menjaju sa količinom vode u zemljištu. Većina sastojaka u zemljištu su dijamagnetici ili paramagnetici koa što je prikazano u tabeli 2.2. Prema tome, s tačke gledišta propagacije talasa sasvim je opravdana pretpostavka da je magnetska permeabilnost u opštem slučaju konstantna i iznosi $4\pi \cdot 10^7$ H/m. Izuzetak se javlja ukoliko se u sredini kroz koju se signal prostire nalaze feromagnetski materijali (gvožđe, nikel, kobalt i njihove legure).

Glavna prednost metode faznog kašnjenja leži u mogućnosti izbora takve radne učestanosti da je moguće zanemariti uticaj električne provodnosti zemljišta. Provodnost zemljišta

zavisu od tipa zemljišta i određuje ga tekstura, nivo organske materije i salinitet zemljišta [79]. Ukoliko bi se umanjio uticaj provodnosti na faznu brzinu signala, mogao bi se realizovati senzor vlažnosti koji je nezavisan od tipa zemljišta.

Na dovoljno visokim učestanostima fazna brzina zavisi samo od dielektrične permitivnosti. Dovoljno visoka učestanost se kvantitativno može opisati zadovoljavanjem sledećeg uslova

$$\frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon^2} \ll 1. \quad (5.4)$$

Izraz za faznu brzinu se u tom slučaju svodi na jednostavniju formu

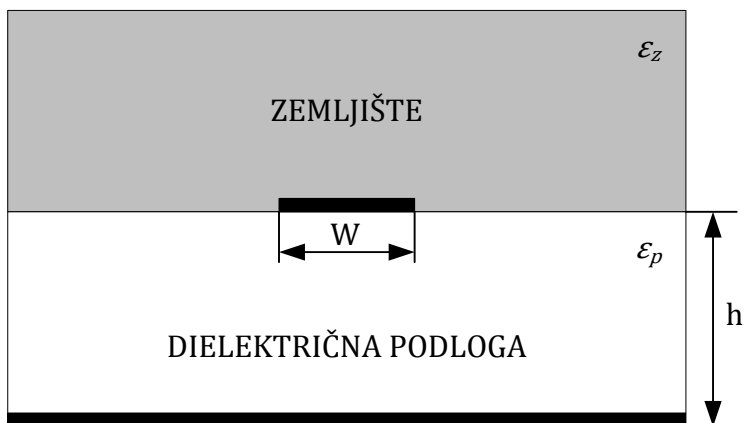
$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}, \quad (5.5)$$

zavisnu isključivo od permitivnosti i permeabilnosti koja se ne menja sa količinom vode u zemljištu.

5.2 Arhitektura voda i princip rada senzora

Među raznim arhitekturama vodova, izdvaja se mikrostrip linija kao optimalno i jednostavno rešenje za realizaciju senzorskog elementa senzora vlažnosti zemljišta. Mikrostrip se lako može integrisati sa električnim kolom potrebnim za merenje fazne razlike. Na taj način moguće je projektovati kompletno rešenje senzora vlažnosti zemljišta. Za razliku od koplanarnog talasovoda i slotlajna, mikrostrip linija pruža veću slobodu u projektovanju gornjeg provodnog sloja, što otvara mogućnosti za minijaturizaciju senzorskog elementa.

Uticaj vlažnosti zemljišta na prostiranje signala ogleda se u efektivnoj permitivnosti mikrostrip linije koja zavisi od sredine iznad strukture, odnosno zemlje, kao i od same dielektrične podloge na kojoj je mikrostrip linija realizovana, slika 5.1. Koncept efektivne permitivnosti služi da homogenizuje inače nehomogenu strukturu mikrostrip linije. Prema tome ovaj parametar se koristi umesto permitivnosti ε za proračun fazne brzine u izrazima (5.3) i (5.5) odnosno faznog kašnjenja (5.1).



Slika 5.1: Poprečni presek mikrostripa postavljenog u zemljište

Efektivna permitivnost mikrostripa prikazanog na slici 5.1, može se izračunati pomoću jednačine

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_p + \varepsilon_z}{2} + \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_z}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \quad (5.6)$$

gde su ε_p i ε_z permitivnosti dielektrične podloge mikrostripa i zemljišta koje se na njemu nalazi, a h i w debljina podloge i širina linije mikrostripa, [86].

Nakon uvedenog neophodnog matematičkog aparata može se definisati princip rada senzora:

- 1) Povećanjem vlažnosti raste permitivnost zemljišta ε_z
- 2) Porastom permitivnosti zemljišta raste i efektivna permitivnost mikrostripa ε_{eff} (5.6)
- 3) Smanjuje se fazna brzina signala (5.5)
- 4) Povećava se fazno kašnjenje signala (5.1)

Iz principa rada direktno sledi da određenim vlažnostima zemljišta odgovaraju određena fazna kašnjenja signala, što je neophodan uslov za konstruisanje kalibracione krive koja povezuje fazno kašnjenje signala sa količinom vode u zemljištu.

Međutim predloženi izraz za efektivnu permitivnost (5.6) nije dovoljno tačan budući da ne uzima u obzir raspodelu naelektrisanja koja nije uniformna po širini provodne linije mikrostripa. U nastavku će biti izveden izraz za proračun efektivne permitivnosti koji daje tačnije rezultate.

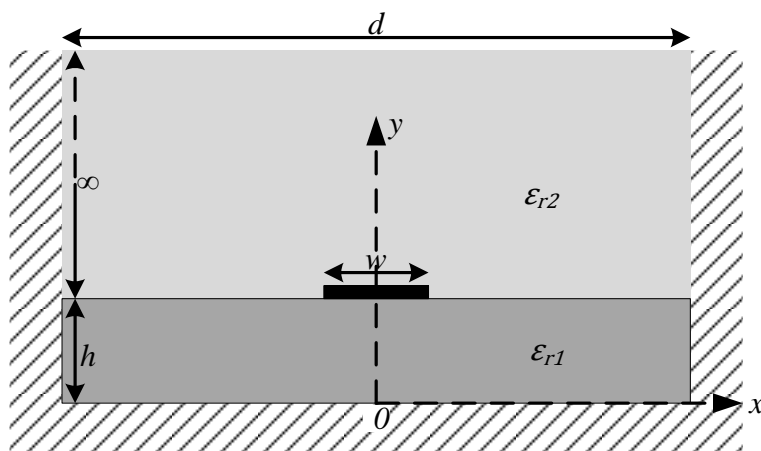
5.3 Efektivna permitivnost mikrostrip linije

Proces projektovanja senzorskog elementa može biti zasnovan na sprovođenju niza zahtevnih elektromagnetskih simulacija kako bi se pronašao optimalni opseg faznog kašnjenja pri prihvatljivim gubicima. Kako bi se ubrzao proces projektovanja novih senzorskih elemenata bilo je neophodno izvesti odgovarajući izraz za efektivnu permitivnost na osnovu kog bi se vrlo lako ispitivao uticaj određenih parametara, poput debljine i relativne permitivnosti podloge, širine provodne linije mikrostripa, na fazno kašnjenja signala. Stoga, cilj ovog poglavlja jeste pronalaženje aproksimativnog kvazi-statičkog rešenja efektivne permitivnosti mikrostripa prekrivenog dielektrikom proizvoljne permitivnosti.

Kako bi se izvelo pomenuto rešenje, neophodno je pronaći podužnu kapacitivnost mikrostrip linije i iz odnosa kapacitivnosti mikrostripa prekrivenog dielektrikom i kapacitivnosti mikrostripa okruženog vazduhom, kada su permitivnost podloge i dielektrika jednake permitivnosti vakuuma, doći do rešenja za efektivnu permitivnost.

Podužnu kapacitivnost moguće je pronaći polazeći od izraza za jačinu električnog polja koji se dobija rešavanjem odgovarajuće Laplasove jednačine. Na slici 5.2 prikazan je poprečni presek mikrostrip linije zajedno sa graničnim uslovima koji moraju biti zadovoljeni za rešavanje diferencijalnih jednačina. Mikrostrip linija okružena provodnim zidovima koji se nalaze na pozicijama $x = \pm d/2$, $y = 0$ i $y = \infty$. Postavka ovih graničnih uslova je tačna ukoliko je

zadovoljeno da je $d \gg h$, gde je h visina dielektrične podloge (supstrata). U ovom slučaju, parcijalne diferencijalne jednačine rešive su metodom razdvajanja promenljivih [87].



Slika 5.2: Poprečni presek beskonačno duge mikrostrip linije

Zbog prirode problema koji se rešava, Laplasova jednačina postavljena je u dvodimenzionalnom Dekartovom koordinatnom sistemu i ima sledeći oblik

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0. \quad (5.7)$$

Moguće je da skalar potencijal predstavimo kao proizvod dve funkcije, od kojih jedna isključivo zavisi od x a druga od y

$$\Phi = X(x)Y(y). \quad (5.8)$$

Ukoliko jednačinu (5.8) uvrstimo u (5.7) dobija se

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} = 0, \quad (5.9)$$

što omogućuje da se napišu dve diferencijalne jednačine

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} = -k^2, \quad (5.10a)$$

$$\frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} = k^2. \quad (5.10b)$$

Diferencijalne jednačine (5.10) rešavaju se nalaženjem nula karakteristične jednačine

$$\begin{aligned} X(x) &= C_1 e^{jkx} + C_2 e^{-jkx} \\ &= C_1 (\cos kx + j \sin kx) + C_2 (\cos kx - j \sin kx), \end{aligned} \quad (5.11a)$$

$$\begin{aligned} Y(y) &= \hat{C}_1 e^{ky} + \hat{C}_2 e^{-ky} \\ &= \hat{C}_1 (\cosh ky + \sinh ky) + \hat{C}_2 (\cosh ky - \sinh ky). \end{aligned} \quad (5.11b)$$

Skalar potencijal može se izvesti zamenom izraza (5.11) u izraz (5.8), prilikom čega se dobija

$$\begin{aligned} \Phi &= X(x)Y(y) \\ &= [C_1 (\cos kx + j \sin kx) + C_2 (\cos kx - j \sin kx)] \\ &\quad \cdot [\hat{C}_1 (\cosh ky + \sinh ky) + \hat{C}_2 (\cosh ky - \sinh ky)]. \end{aligned} \quad (5.12)$$

Kako bi se jednačina (5.19) rešila neophodno je primeniti sledeće početne uslove

$$\Phi(x, y) = 0 \Big|_{x = \pm \frac{d}{2}} \quad (5.13)$$

što predstavlja skalar potencijal na bočnim provodnim zidovima i

$$\Phi(x, y) = 0 |_{y = \{0, \infty\}}, \quad (5.14)$$

što je skalar potencijal na uzemljenom sloju kao i u beskonačno udaljenoj tački. Trebalo bi primetiti da postoje dve oblasti za koje postoje zasebna rešenja. Prva oblast je oblast dielektrika i njene granice su $y = 0$ do $y = h$, dok se druga oblast prostire od $y = h$ pa do beskonačnosti. Skalar

potencijal mora biti jednak sa obe strane zajedničke granice ovih oblasti čime dobijamo još jedan granični uslov.

Prvo ćemo rešiti skalar potencijal za oblast dielektrika ($0 \leq y < h$). Skalar potencijal za ovu oblast definišemo na osnovu izraza (5.12)

$$\begin{aligned}\Phi^{(1)} &= X^{(1)}(x)Y^{(1)}(y) \\ &= \left[C_1^{(1)}(\cos kx + j \sin kx) + C_2^{(1)}(\cos kx - j \sin kx) \right] \\ &\quad \cdot \left[\hat{C}_1^{(1)}(\cosh ky + \sinh ky) + \hat{C}_2^{(1)}(\cosh ky - \sinh ky) \right].\end{aligned}\quad (5.15)$$

Posmatranjem izraza za $X^{(1)}$ primećujemo da je granični uslov (5.13) zadovoljen ukoliko je

$$\begin{aligned}C_1^{(1)} &= C_2^{(1)}, \\ k &= \frac{n\pi}{d},\end{aligned}\quad (5.16)$$

gde je n neparan broj. Budući da je granični uslov (5.13) višestruko zadovoljen, uvodi se konstanta $C_{1n}^{(1)} = 2C_1^{(1)}$ koja zadovoljava granični uslov (5.13) za odgovarajuće n . Primenom zaključaka (5.16) izraz (5.11) svodi se na

$$X^{(1)}(x) = C_{1n}^{(1)} \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right).\quad (5.17)$$

Izraz za $Y^{(1)}$ zadovoljava granični uslov (5.14) za $y = 0$ ukoliko je ispunjeno da je $\hat{C}_1^{(1)} = -\hat{C}_2^{(1)} = -\frac{\hat{C}_{2n}^{(1)}}{2}$ iz čega sledi

$$Y^{(1)}(y) = \hat{C}_{2n}^{(1)} \sinh\left(\frac{n\pi}{d}y\right).\quad (5.18)$$

Na osnovu izraza (5.14 -5.18) skalar potencijal za oblast dielektrika ima sledeći oblik

$$\Phi^{(1)} = C_{1n}^{(1)} \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right) \hat{C}_{2n}^{(1)} \sinh\left(\frac{n\pi}{d}y\right).\quad (5.19)$$

Pošto su $C_{1n}^{(1)}$ i $\hat{C}_{2n}^{(1)}$ konstante moguće ih je zameniti jednom konstantom A_n , čime skalar potencijal dobija još jednostavniji oblik

$$\Phi^{(1)} = A_n \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right) \sinh\left(\frac{n\pi}{d}y\right). \quad (5.20)$$

Skalar potencijal za drugu oblast, gde je ($h \leq y < \infty$) se može definisati na sledeći način:

$$\begin{aligned} \Phi^{(2)} &= X^{(2)}(x)Y^{(2)}(y) \\ &= \left[C_1^{(2)}(\cos kx + j \sin kx) + C_2^{(2)}(\cos kx - j \sin kx) \right] \\ &\cdot \left[\hat{C}_1^{(2)}(\cosh ky + \sinh ky) \right. \\ &\left. + \hat{C}_2^{(2)}(\cosh ky - \sinh ky) \right]. \end{aligned} \quad (5.21)$$

Na osnovu graničnog uslova (5.13) se analogno postupku za oblast dielektrika dobija rešenje za $X^{(2)}$ za drugu oblast

$$X^{(2)}(x) = \hat{C}_{1n}^{(2)} \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right). \quad (5.22)$$

Za $y = \infty$ granični uslov (5.14) je zadovoljen kad je $\hat{C}_1^{(2)} = 0$. Zbog višestrukosti rešenja uzima se da je $\hat{C}_2^{(2)} = \hat{C}_{2n}^{(2)}$ čime se $Y^{(2)}$ svodi na

$$Y^{(2)}(y) = \hat{C}_{2n}^{(2)} e^{-\frac{n\pi}{d}y} = \hat{C}_{2n}^{(2)} \left(\cosh \frac{n\pi}{d}y - \sinh \frac{n\pi}{d}y \right). \quad (5.23)$$

Skalar potencijal za drugu oblast može se na osnovu izraza (5.22) i (5.23) definisati na sledeći način:

$$\Phi^{(2)} = \hat{C}_{1n}^{(2)} \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right) \hat{C}_{2n}^{(2)} e^{-\frac{n\pi}{d}y}. \quad (5.24)$$

I u ovom slučaju moguće je konstante $\hat{C}_{1n}^{(2)}$ i $\hat{C}_{2n}^{(2)}$ zameniti jednom konstatom B_n , čime se skalar potencijal svodi na

$$\Phi^{(2)} = B_n \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right) e^{-\frac{n\pi}{d}y}. \quad (5.25)$$

Pošto je skalar potencijal neprekidna funkcija, granični uslov $\Phi^{(1)} = \Phi^{(2)}$ kad je $y = h$ mora biti ispunjen

$$A_n \sinh\left(\frac{n\pi}{d}h\right) = B_n e^{-\frac{n\pi}{d}h}, \quad (5.26)$$

na osnovu čega je moguće izraze za skalar potencijal napisati u zavisnosti od samo jedne konstante, recimo A_n . Rešenje koje se dobija za $n = 1$ naziva se fundamentalno rešenje, dok sva ostala rešenja predstavljaju više harmonike. Konačno rešenje skalar potencijala predstavlja sumu fundamentalnog rešenja i viših harmonika. Na osnovu iznesenih zaključaka izraz za skalar potencijal mikrostripa može se definisati na sledeći način

$$\Phi(x, y) = \begin{cases} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right) \sinh\left(\frac{n\pi}{d}y\right) & | 0 \leq y < h \\ \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} B_n \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right) e^{-\frac{n\pi}{d}y} & | h \leq y < \infty \end{cases} \quad (5.27)$$

Odnosno ukoliko se uzme u obzir (5.26)

$$\Phi(x, y) = \begin{cases} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right) \sinh\left(\frac{n\pi}{d}y\right) & | 0 \leq y < h \\ \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} A_n \sinh\left(\frac{n\pi}{d}h\right) \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right) e^{-\frac{n\pi}{d}(y-h)} & | h \leq y < \infty \end{cases} \quad (5.28)$$

Sledeći korak u pronalazanju izraza za efektivnu permitivnost je pronalazjenje konstanti A_n . Iz navedenog razloga polazimo od graničnog uslova za vektor dielektričnog pomeraja \mathbf{D} na razdvojnoj površini ($y = h$). Normalna projekcija vektora dielektričnog pomeraja na graničnu ravan skokovito se menja, i ta promena jednaka je površinskoj gustini naelektrisanja na provodnoj liniji

$$\rho_s = D_y|_{x,y=h^+} - D_y|_{x,y=h^-} = \varepsilon_0 \varepsilon_{r2} E_y^{(2)}|_{x,y=h^+} - \varepsilon_0 \varepsilon_{r1} E_y^{(1)}|_{x,y=h^-}, \quad (5.29)$$

gde su,

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}^{(1)} &= -\nabla \Phi^{(1)} = \\
 \hat{a}_x &\sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} A_n \frac{n\pi}{d} \sin\left(\frac{n\pi}{d}x\right) \sinh\left(\frac{n\pi}{d}y\right) - \\
 \hat{a}_y &\sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} A_n \frac{n\pi}{d} \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right) \cosh\left(\frac{n\pi}{d}y\right)
 \end{aligned} \tag{5.30a}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}^{(2)} &= -\nabla \Phi^{(2)} = \\
 \hat{a}_x &\sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} A_n \frac{n\pi}{d} \sin\left(\frac{n\pi}{d}h\right) \sin\left(\frac{n\pi}{d}x\right) e^{-\frac{n\pi}{d}(y-h)} + \\
 \hat{a}_y &\sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} A_n \frac{n\pi}{d} \sin\left(\frac{n\pi}{d}h\right) \cosh\left(\frac{n\pi}{d}x\right) e^{-\frac{n\pi}{d}(y-h)}
 \end{aligned} \tag{5.30b}$$

Korišćenjem izraza (5.30) moguće je napisati sledeći izraz za gustinu površinskog naelektrisanja

$$\rho_s = \varepsilon_0 \sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} A_n \frac{n\pi}{d} \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right) \left(\varepsilon_{r2} \sin\left(\frac{n\pi}{d}h\right) + \varepsilon_{r1} \cosh\left(\frac{n\pi}{d}h\right) \right). \tag{5.31}$$

Potrebno je primetiti da svi članovi proizvoda u gornjem izrazu osim $\cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right)$ zavise samo od n , te se ovaj izraz može uprostiti sledećim

$$\rho_s = \sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} \alpha_n \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right), \tag{5.32}$$

gde je koeficijent α_n jednak

$$\alpha_n = \varepsilon_0 A_n \frac{n\pi}{d} \left(\varepsilon_{r2} \sin\left(\frac{n\pi}{d}h\right) + \varepsilon_{r1} \cosh\left(\frac{n\pi}{d}h\right) \right). \tag{5.33}$$

S druge strane gustina površinskog naelektrisanja kod mikrostrip linije može se aproksimirati putem dva izraza u zavisnosti od odnosa širine linije i debljine podloge. Iz navedenog razloga prilikom pronalaženja konstanti A_n postoje dva slučaja: kada je $w/h > 1$, slučaj (I), i kada je $w/h \leq 1$, slučaj (II). Poći ćemo od prvog slučaja gde se gustina površinskog naelektrisanja aproksimira kao

$$\rho_s^{(I)} = 1 \quad \left| -\frac{w}{2} \leq x \leq \frac{w}{2} \right. \quad (5.34)$$

Iz ortogonalnosti $\cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right)$ i iz izraza (5.32) i (5.34) dobija se

$$\alpha_n^{(I)} = \frac{1}{d/2} \int_0^{w/2} \rho_s^{(I)} \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right) dx = \frac{4}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi w}{2d}\right). \quad (5.35)$$

Na osnovu izraza (5.33) i (5.35) moguće je napisati konstante $A_n^{(I)}$ na sledeći način

$$A_n^{(I)} = \frac{4a \sin\left(\frac{n\pi w}{2d}\right)}{(n\pi)^2 \varepsilon_0 \left[\varepsilon_{r2} \sin\left(\frac{n\pi}{d}h\right) + \varepsilon_{r1} \cosh\left(\frac{n\pi}{d}h\right) \right]}. \quad (5.36)$$

U drugom slučaju kada je $w/h \leq 1$ gustina površinskog naelektrisanja aproksimira se putem izraza

$$\rho_s^{(II)} = \frac{2}{\pi w \sqrt{1 - \left(\frac{x}{w/2}\right)^2}} \quad \left| -\frac{w}{2} \leq x \leq \frac{w}{2} \right. \quad (5.37)$$

I u ovom slučaju iz ortogonalnosti $\cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right)$ i iz izraza (5.32) i (5.37) dobija se sledeći integral

$$\alpha_n^{(II)} = \frac{4}{d} \int_0^{w/2} \frac{2}{\pi w \sqrt{1 - \left(\frac{x}{w/2}\right)^2}} \cos\left(\frac{n\pi}{d}x\right) dx. \quad (5.38)$$

Uvođenjem smene $x = \frac{w}{2} \sin \theta$ imamo da je

$$\begin{aligned} \alpha_n^{(II)} &= \frac{4}{d} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2}{\pi w \cos \theta} \cos\left(\frac{n\pi w}{2d} \sin \theta\right) \frac{w}{2} \cos \theta d\theta \\ &= \frac{4}{d\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\left(\frac{n\pi w}{2d} \sin \theta\right) d\theta \end{aligned} \quad (5.39)$$

odnosno da su nepoznate konstante $A_n^{(II)}$

$$A_n^{(II)} = \frac{4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\left(\frac{n\pi w}{2d} \sin \theta\right) d\theta}{n\pi^2 \varepsilon_0 \left[\varepsilon_{r2} \sinh\left(\frac{n\pi}{d} h\right) + \varepsilon_{r1} \cosh\left(\frac{n\pi}{d} h\right) \right]}. \quad (5.40)$$

Do rešenja integrala $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\left(\frac{n\pi w}{2d} \sin \theta\right) d\theta$ došlo se pomoću numeričkih metoda softverskog paketa *Matlab*

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\left(\frac{n\pi w}{2d} \sin \theta\right) d\theta = \frac{\pi}{2} J\left(0, \frac{\pi n w}{2a}\right), \quad (5.41)$$

gde je $J\left(0, \frac{\pi n w}{2a}\right)$ Beselova jednačina prve vrste, nultog reda, niza $\frac{\pi n w}{2a}$. Ako se uzme u obzir rešenje integrala (5.41), konstante A_n dobijaju sledeći oblik

$$A_n^{(II)} = \frac{2J\left(0, \frac{\pi n w}{2a}\right)}{n\pi \varepsilon_0 \left[\varepsilon_{r2} \sinh\left(\frac{n\pi}{d} h\right) + \varepsilon_{r1} \cosh\left(\frac{n\pi}{d} h\right) \right]}. \quad (5.42)$$

Sad kad su koeficijenti $A_n^{(I)}$ i $A_n^{(II)}$ definisani sledeći korak u pronalaženju efektivne permitivnosti jeste određivanje podužne kapacitivnosti za oba razmatrana slučaja. Podužnu kapacitivnost možemo definisati kao

$$C = \frac{Q}{V}. \quad (5.43)$$

U prvom slučaju kad je $w/h > 1$ ukupno podužno naelektrisanje iznosi

$$Q^{(I)} = \int_{-w/2}^{w/2} 1 dx = w, \quad (5.44)$$

dok je napon između mikrostrip linije i mase jednak

$$V^{(I)} = - \int_0^h E_y^{(1)} \Big|_{x=0} dy = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} A_n^{(I)} \sin\left(\frac{n\pi}{d} h\right). \quad (5.45)$$

Na osnovu izraza (5.36), (5.44) i (5.45) dobija se kapacitivnost

$$C^{(I)} = \frac{w}{\sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4a \sin\left(\frac{n\pi w}{2d}\right)}{(n\pi)^2 \varepsilon_0 \left[\varepsilon_{r2} \sin\left(\frac{n\pi}{d} h\right) + \varepsilon_{r1} \cosh\left(\frac{n\pi}{d} h\right) \right]} \sin\left(\frac{n\pi}{d} h\right)}. \quad (5.46)$$

Kako bismo došli do izraza za kapacitivnost u slučaju kada je $w/h \leq 1$, kao i u prethodnom slučaju polazimo od ukupnog podužnog naelektrisanja i napona između mikrostrip linije i mase.

Da bismo došli do izraza ukupnog podužnog naelektrisanja polazimo od sledeće jednačine

$$Q^{(II)} = \int_{-w/2}^{w/2} \frac{2}{\pi w \sqrt{1 - \left(\frac{x}{w/2}\right)^2}} dx. \quad (5.47)$$

Uvođenjem smene $x = \frac{w}{2} \sin \theta$ dobija se

$$Q^{(II)} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{2}{\pi w \cos \theta} \frac{w}{2} \cos \theta d\theta = 1. \quad (5.48)$$

Izraz za napon dobija se analogno izrazu za napon u prethodnom slučaju (5.45)

$$V^{(I)} = - \int_0^h E_y^{(1)} \Big|_{x=0} dy = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} A_n^{(II)} \sin\left(\frac{n\pi}{d} h\right). \quad (5.49)$$

Na osnovu jednačina (5.40), (5.48) i (5.49) dobija se izraz za podužnu kapacitivnost u drugom slučaju kada je $w/h \leq 1$

$$C^{(II)} = \frac{1}{\sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2J\left(0, \frac{\pi n w}{2a}\right)}{n\pi \varepsilon_0 \left[\varepsilon_{r2} \sinh\left(\frac{n\pi}{d} h\right) + \varepsilon_{r1} \cosh\left(\frac{n\pi}{d} h\right) \right]} \sin\left(\frac{n\pi}{d} h\right)}. \quad (5.50)$$

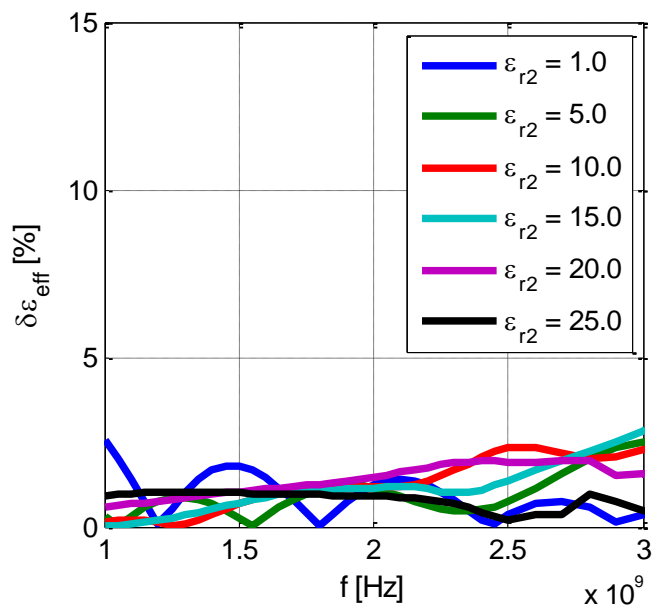
Za oba slučaja se pronalaženjem odnosa kapacitivnosti mikrostripa okruženog dielektricima ε_{r1} i ε_{r2} kao na slici 5.2 (obe vrednosti veće od 1) i kapacitivnosti linije okružene vazduhom, C_0 ($\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2} = 1$), dobija efektivna permitivnost

$$\epsilon_{eff} = \frac{C}{C_0}. \quad (5.51)$$

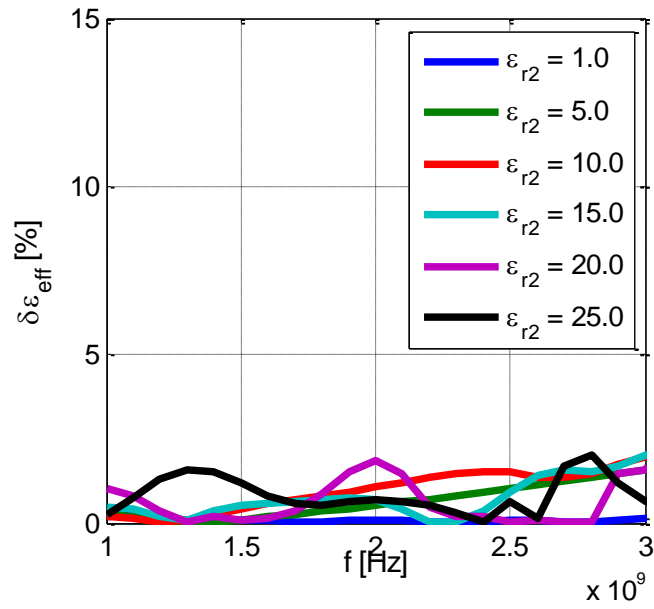
Kako bi se ispitala ispravnost izvedenog izraza (5.51) sproveden je niz elektromagnetskih simulacija mikrostrip struktura pri čemu se proračunata efektivna permitivnost poredila sa vrednošću efektivne permitivnosti koja je izračunata na osnovu rezultata simulacije putem izraza

$$\epsilon_{eff}^{(sim)} = \left(\frac{\Delta\phi c}{2\pi f L} \right)^2. \quad (5.52)$$

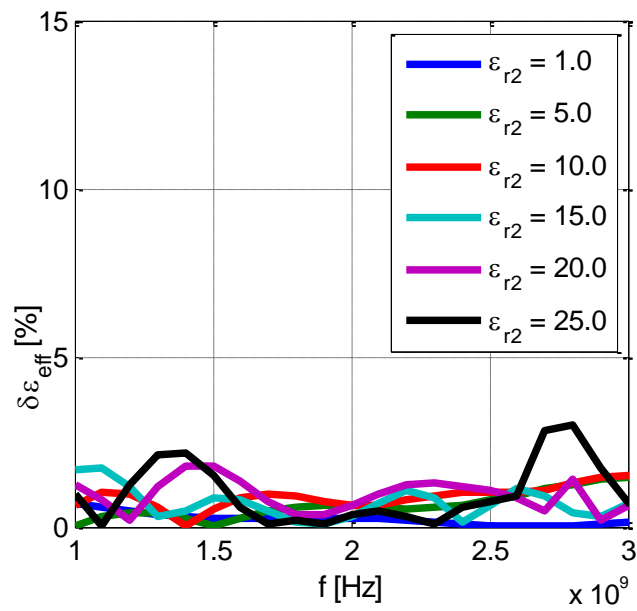
gde je $\Delta\phi$ fazno kašnjenje signala, c brzina svetlosti, f radna učestanost, a L dužina mikrostripa. Simulirane su širine linija 0.5, 1, 1.5 i 2 mm, dužine 50 mm. Širina supstrata je 30 mm kako bi bio ispunjen uslov da je $d \geq 10w$. Supstrat koji je korišćen u simulacijama je TaconicCER debljine 1.27 mm, sa relativnom permitivnošću 9.8, pri čemu su zanemareni gubici u dielektriku. Na mikrostrip strukturu smeštani su dielektrici relativne permitivnosti 1, 5, 10, 15, 20, 25, pri čemu nisu uzimani u obzir gubici pošto nisu bili uračunati prilikom izvođenja izraza za efektivnu permitivnost. Na slici 5.3 prikazana je relativna greška proračunate efektivne permitivnosti u odnosu na simuliranu vrednost u opsegu učestanosti 1 – 3 GHz.



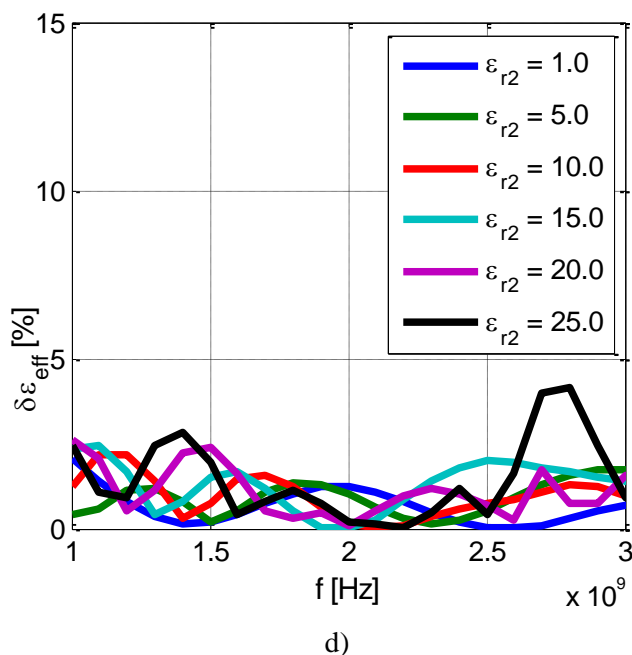
a)



b)

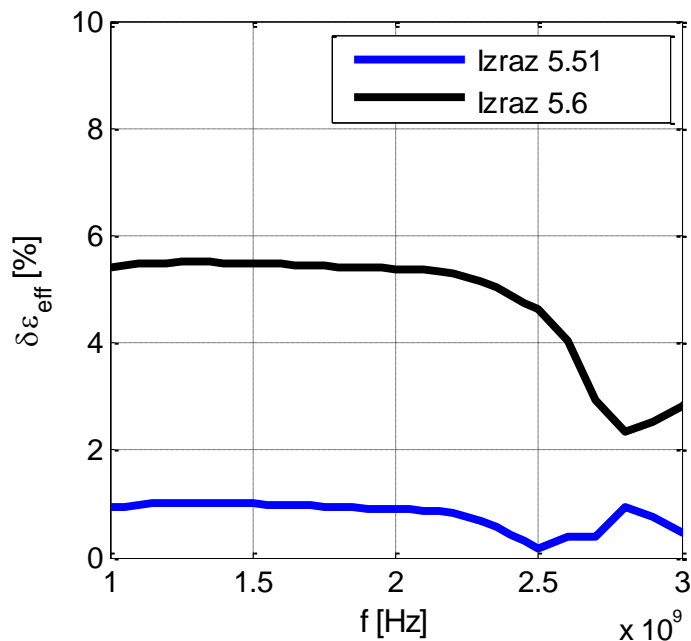


c)



Slika 5.3: Relativna greška proračunate efektivne permitivnosti u odnosu na simuliranu vrednost za različite širine mikrostrip linije a) $w = 0.5$ mm b) $w = 1.0$ mm c) $w = 1.5$ mm d) $w = 2.0$ mm

Kao što se može primetiti relativna greška ne prelazi 5% na osnovu čega se može zaključiti da izraz za proračunavanje efektivne permitivnosti daje vrlo tačne rezultate. Poređenja radi na slici 5.23 prikazane su relativne greške efektivne permitivnosti proračunate na osnovu izvedenog izraza (5.51) i na osnovu manje tačnog izraza (5.6). Rezultati su prikazani za slučaj supstrata Taconic-CER, pri čemu je širina provodne linije 0.5 mm, a relativna permitivnost dielektrika koji pokriva mikrostrip iznosi 25.



Slika 5.4: Poređenje izraza za efektivnu permitivnost

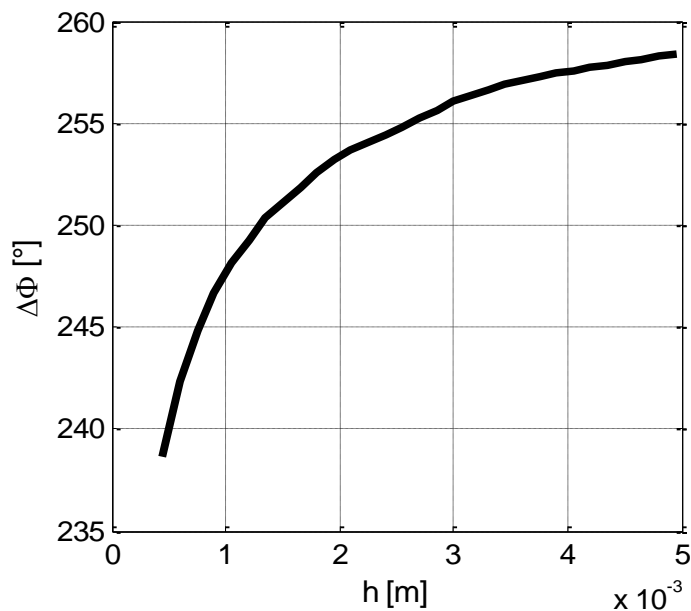
5.4 Opseg faznog kašnjenja

Kalibraciona kriva konstruiše se u opsegu od veoma suvog zemljišta do zemljišta koje je dostiglo saturaciju vlažnosti. Ovim ekstremnim vrednostima odgovaraju određena fazna kašnjenja $\Delta\varphi_d$ za suvo zemljište i $\Delta\varphi_w$ za vlažno. Razlika ovih vrednosti jeste opseg faznog kašnjenja Φ koji definiše merni opseg faza i koji je potrebno prilagoditi električnom kolu za merenje faze. Na osnovu izraza za fazno kašnjenje (5.1) i izraza za faznu brzinu (5.5), opseg faznog kašnjenja može se zapisati u sledećem obliku

$$\Delta\Phi = \Delta\varphi_w - \Delta\varphi_d = \omega L_{TL} \sqrt{\mu} (\sqrt{\varepsilon_{effW}} - \sqrt{\varepsilon_{effD}}). \quad (5.53)$$

Poznavanjem izraza za efektivnu permitivnost može se brzo, bez potrebe za vremenski zahtevnim elektromagnetskim simulacijama, ispitati uticaj osnovnih parametara mikrostrip linije na opseg faznog kašnjenja.

Prvi parametar koji je ispitivan jeste uticaj debljine podloge. Na slici 5.5 može se primetiti da opseg faznog kašnjenja raste sa porastom debljine podloge, ali isto tako da ovaj efekat teži zasićenju gde dalje povećanje visine podloge neće uticati na opseg faznog kašnjenja.

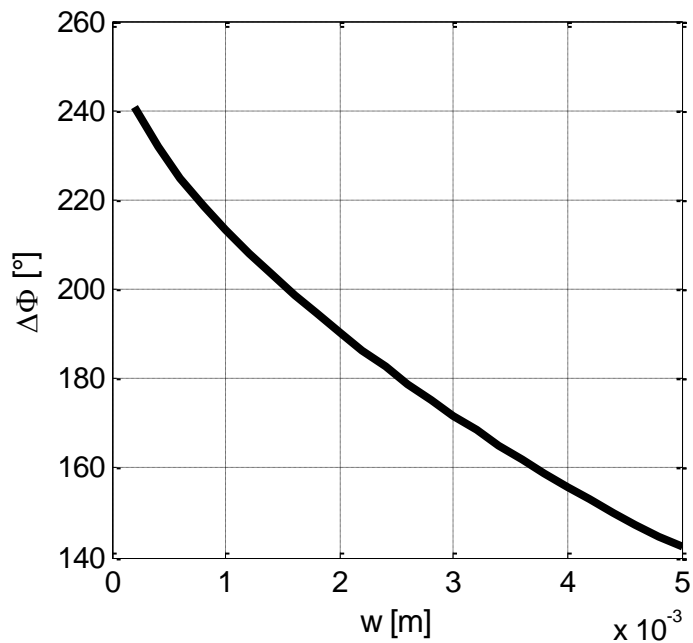


Slika 5.5: Uticaj debljine podloge mikrostrip linije na opseg faznog kašnjenja

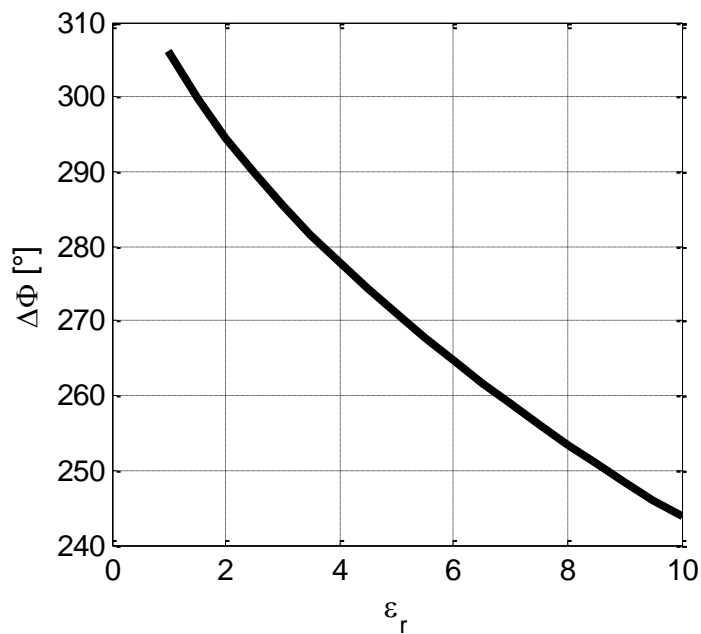
Sledeći parametar koji je ispitivan jeste širina provodne linije mikrostripa, slika 5.6. Proširivanjem provodne linije smanjuje se ostvareni fazni opseg. Ovo je bitan zaključak s obzirom na to da komercijalno dostupne podloge za izradu štampanih kola imaju fiksne debljine podloge, te je jedino promenom širine provodne linije moguće uticati na opseg faznog kašnjenja.

Na kraju, razmotren je uticaj permitivnosti podloge mikrostrip linije na ostvareni opseg faznog kašnjenja. Rezultati prikazani na slici 5.7 pokazuju da se sa povećanjem permitivnosti podloge smanjuje opseg faznog kašnjenja.

Zahvaljujući ovakvoj analizi uticaja osnovnih parametara mikrostripa na opseg faznog kašnjenja moguće je jednostavno optimizovati ovaj opseg i prilagoditi ga električnom kolu za merenje faznog kašnjenja koje je razvijeno za potrebe minijaturnog senzora vlažnosti.



Slika 5.6: Uticaj širine provodne linije mikrostripa na opseg faznog kašnjenja



Slika 5.7: Uticaj relativne permitivnosti podloge na opseg faznog kašnjenja

Mikrostrip linija može se karakterisati i putem njenih podužnih parametara, podužne induktivnosti L' i podužne kapacitivnosti C' . Na visokim učestanostima fazna brzina signala koji se prostire duž mikrostrip linije može se definisati na sledeći način [69]:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \quad (5.54)$$

Na osnovu izraza (5.1) i (5.54) fazno kašnjenje signala koji se prostire mikrostrip linijom dužine L_{TL} je

$$\Delta\varphi = \omega L_{TL} \sqrt{L'C'} = \omega \sqrt{LC}. \quad (5.55)$$

Da bismo ispitali kako podužni parametri mikrostrip linije utiču na opseg faznih razlika posmatraćemo ekstremne slučajeve vlažnosti, veoma suvo zemljište i zemljište zasićeno vodom. Opseg faznog kašnjenja tada iznosi

$$\Delta\Phi = \Delta\varphi_w - \Delta\varphi_d = \omega(\sqrt{L_w C_w} - \sqrt{L_d C_d}). \quad (5.56)$$

Kapacitivnost možemo napisati u obliku

$$C = C_0 \varepsilon_{eff}, \quad (5.57)$$

gde C_0 predstavlja kapacitivnost mikrostripa kada bi ε_p i ε_z (slika 5.1) bili jednaki permitivnosti vakuuma i nadalje će biti označavana kao vakuumska kapacitivnost. Na osnovu izraza (5.57) i uzimajući u obzir da se induktivnost ne menja sa vlažnošću, $L_w = L_d = L$, opseg faznog kašnjenja može se napisati u sledećem obliku

$$\Delta\Phi = \omega \sqrt{LC_0} (\sqrt{\varepsilon_{effw}} - \sqrt{\varepsilon_{effd}}). \quad (5.58)$$

Na osnovu izraza (5.58) može se zaključiti da se veći opseg faznog kašnjenja dobija na višim učestanostima i pri što većim ukupnim induktivnostima i vakuumskim kapacitivnostima mikrostrip linije.

5.5 Zaključak

U ovom poglavlju opisana je metoda faznog kašnjenja na kojoj su zasnovani minijaturni senzori vlažnosti koji će biti opisani u narednim glavama. Predložena je arhitektura voda u vidu mikrostripa koji će biti upotrebljen za realizaciju senzorskog elementa nakon čega je opisan

princip rada senzora. Za potrebe optimizacije senzorskog elementa i njegovog brzog i lakog prilagođavanja električnom kolu za očitavanje faze izveden je novi izraz za efektivnu permitivnost mikrostrip linije kojim je moguće tačnije proračunati ovaj parametar. Na osnovu dobijenog izraza ispitano je na koji način parametri mikrostripa, poput širine provodne linije mikrostripa, debljine i permitivnosti podloge, utiču na opseg faznog kašnjenja. Pokazana je i mogućnost proračunavanja faznog opsega na osnovu podužne induktivnosti i kapacitivnosti mikrostrip linije. Zahvaljujući izvedenim zakonitostima moguće je relativno brzo optimizovati senzorski element i prilagoditi ga električnom kolu potrebnom za merenje faznog kašnjenja odnosno vlažnosti zemljišta.

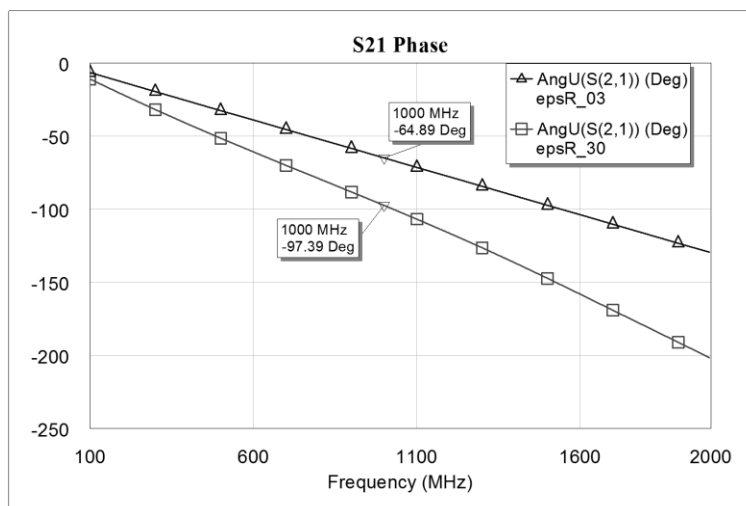
6 Projektovanje i fabrikacija senzorskog elementa u tehnologiji štampanih ploča

Nakon definisanja principa rada senzora bilo je neophodno eksperimentalno potvrditi opisani koncept. Polazna tačka bila je projektovanje i fabrikacija senzorskog elementa u tehnologiji štampanih ploča, koja je u datom momentu istraživanja jedina bila na raspolaganju. Budući da je cilj bio osmisliti senzorsko rešenje kompaktnih dimenzija ispitane su metode minijaturizacije pomoću fraktalnih krivih. Sledeći korak bila je fabrikacija senzorskog elementa za potrebe validacije metode faznog pomeraja. U pomenutim inicijalnim istraživanjima ispitana je i analitički pokazana tvrdnja da se na dovoljno visokim učestanostima uticaj provodnosti može zanemariti. U nastavku će biti opisani i komentarisani ostvareni rezultati na pomenutim poljima zajedno sa određenim manama fabrikovanog senzorskog elementa.

6.1 Projektovanje i fabrikacija senzorskog elementa

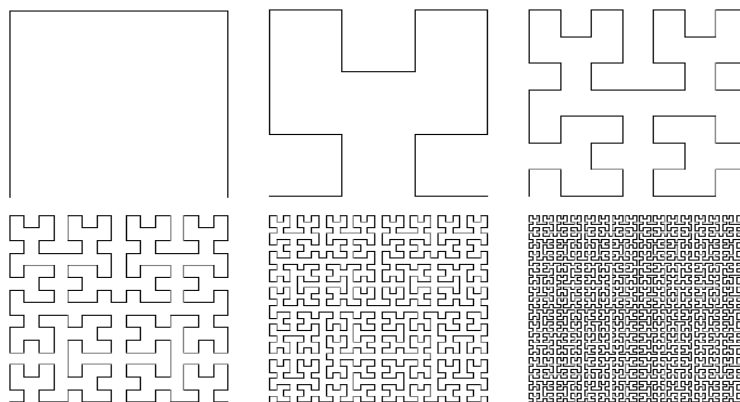
Na slici 6.1 prikazani su rezultati simulacije faze signala koji se prostire duž 50Ω - ske mikrostrip linije dužine 20 cm za dva ekstremna slučaja vlažnosti. Podloga je Taconic CER-10 permitivnosti $\epsilon_p = 9.8$, tangensa ugla gubitaka $\tan\delta = 0.0025$ i debljine $h = 1.27 \text{ mm}$. Za relativne permitivnosti suvog i vlažnog zemljišta uzete su vrednosti koje se sreću u stvarnosti, te je tako relativna permitivnost suvog zemljišta $\epsilon_{rd} = 3$, a vlažnog $\epsilon_{rw} = 30$. Simulacije su sprovedene u programskom paketu *AWR Microwave Office* [88].

Može se primetiti da rezultati simulacije pokazuju veći opseg faznog kašnjenja na višim učestanostima što je u skladu sa izrazima (5.53) i (5.58). Vidimo da je u ovom slučaju opseg faznog kašnjenja na učestanosti od 1 GHz nešto veći od 32° . Većina komercijalno dostupnih električnih kola za merenje fazne razlike na ovako visokim učestanostima mogu meriti faznu razliku i do 90° . Budući da je opseg faznog kašnjenja simulirane mikrostrip linije dosta manji od opsega koji je moguće meriti neophodno je optimizovati senzorski element u tom pogledu, kako bi se ostvarila što preciznija merenja.



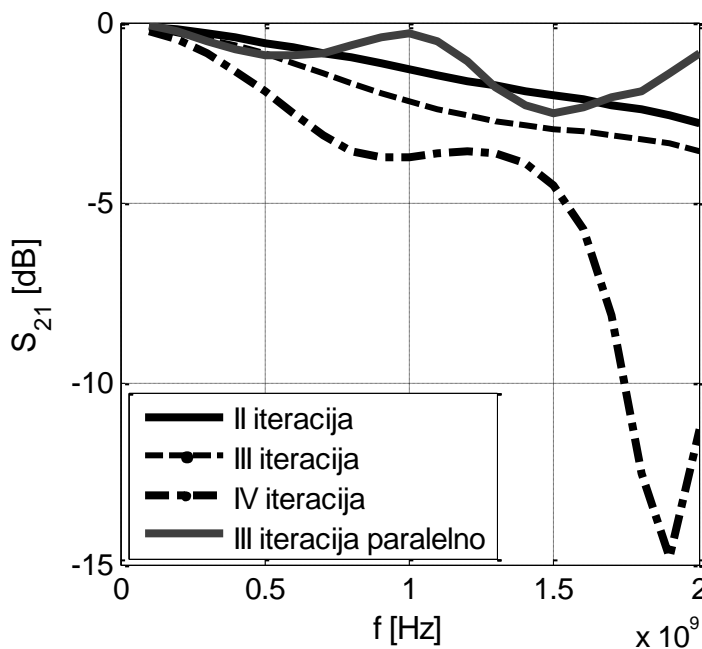
Slika 6.1: Fazno kašnjenje prostoperiodičnog signala koji se prostire duž mikrostrip linije

Za optimizaciju senzorskog elementa koristi se izraz za fazni opseg (5.58) gde se uočava da je za povećanje ovog parametra neophodno vršiti merenja na višim radnim učestanostima. Međutim, radna učestanost se može povećavati do izvesne mere kada nastaje preveliko slabljenje signala i javljaju se nelinearni efekti usled disperzije efektivne permitivnosti [89]. Druga mogućnost povećanja faznog opsega leži u povećanju induktivnosti L i vakuumske kapacitivnosti C_0 mikrostrip linije. Ova opcija je direktno povezana sa produžavanjem mikrostrip linije, ali to za posledicu ima smanjenu kompaktnost senzora. Kako bi se očuvala kompaktnost, a opet zadovoljila potreba za većim faznim opsegom, koriste se fraktalne krive koje imaju osobinu optimalnog ispunjavaja prostora. Fraktalne krive pružaju mogućnost ostvarenja beskonačno dugačkih linija na ograničenoj površini. Kako je pokazano u [90] Hilbertova fraktalna kriva na istoj površini podloge daje veću ukupnu induktivnost mikrostrip linije. Na slici 6.2 prikazano je prvih šest redova Hilbertove fraktalne krive.

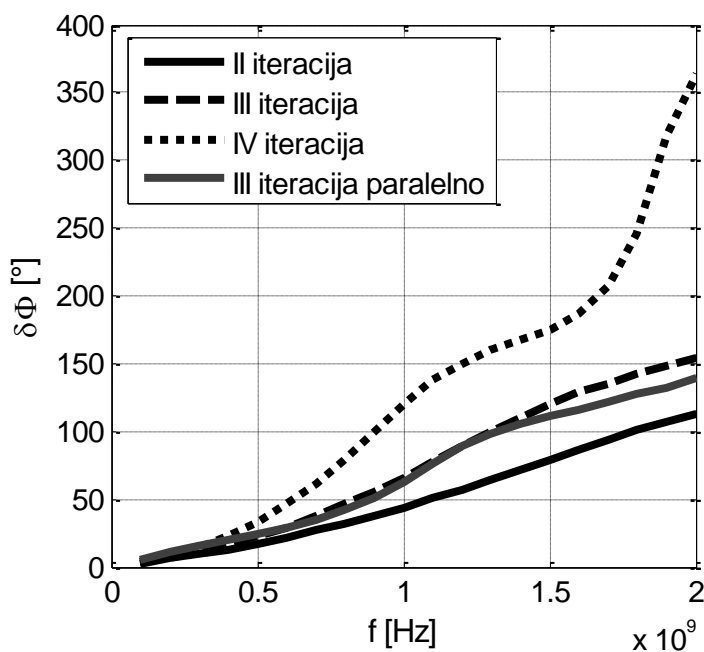


Slika 6.2: Prvih šest redova Hilbertove fraktalne krive

Sprovedene su dodatne simulacije u *AWR Microwave Office*-u kako bi se ispitalo uticaj reda Hilbertove fraktalne krive na opseg faznog kašnjenja. Zaključak je da se povećanjem reda fraktalne krive povećava opseg, ali je pri tom veće uneseno slabljenje, slika 6.3. Isti efekat se postizao vezivanjem više fraktalnih kriva na red. Vezivanjem fraktalnih kriva paralelno za istu radnu učestanost dobija se približno isti opseg faznog kašnjenja pri manjem unesenom slabljenju, što se može primetiti na slici 6.3.



a)

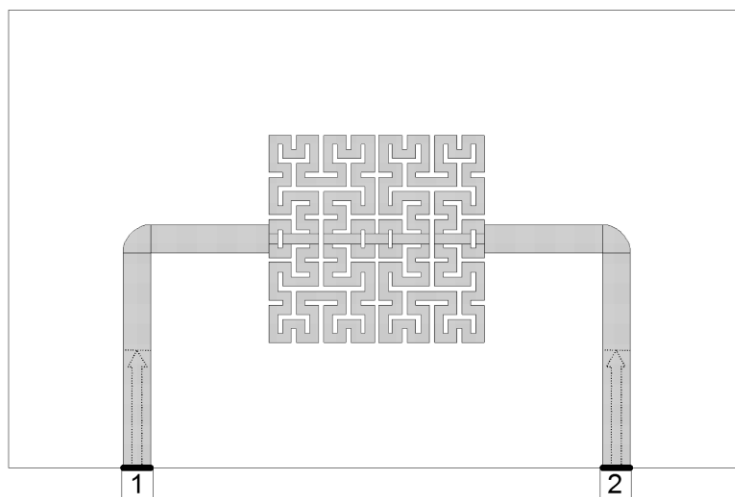


b)

Slika 6.3: Rezultati simulacije koji ispituju uticaj reda fraktalnih krivih kao i uticaj paralelnog vezivanja krivih: a) uneseno slabljenje za slučaj vlažnog zemljišta b) ostvareni fazni opseg

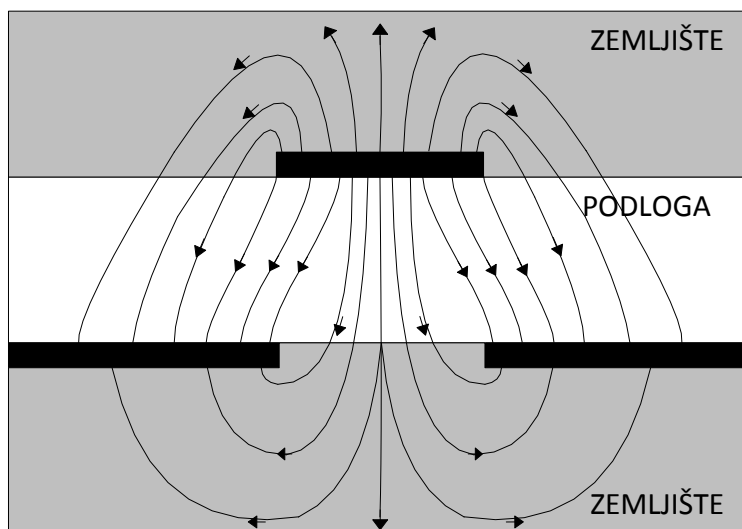
Nakon ispitanih mehanizama promene faznog opsega u pogledu fraktalnih kriva pristupilo se optimizaciji senzorskog elementa. U ovoj fazi istraživanja bilo je bitno načelno potvrditi princip rada. U datom momentu nisu bile poznate mogućnosti elektronskog kola za merenje faze te su iz navedenog razloga odabrani parametri optimizacije koji su manje zahtevni u pogledu performansi elektronskog kola. Za radnu učestanost uzeta je vrednost nešto veća od 1 GHz, maksimalno dozvoljeno uneseno slabljenje je 3 dB i opseg faznog kašnjenja od 90°.

Kao rezultat optimizacije dobijena je struktura sa slike 6.4, koja je sačinjena od dva paralelna segmenta. Svaki segment se sastoji od dve na red vezane Hilbertove fraktalne krive trećeg reda. Prilikom simuliranja senzorskog elementa korišćeni su parametri Taconic CER-10 podloge, na kom je senzorski element kasnije i fabrikovan. Portovi i uvodne linije su smešteni sa iste strane supstrata kako bi bio omogućen lak pristup senzorskom elementu kada je on postavljen u zemljište. Ukupne dimenzije senzora su 32 mm x 19.4 mm.



Slika 6.4: Senzorski element - pogled od gore

Kako bi se dodatno povećala osetljivost, a time i opseg faznog kašnjenja senzora, deo uzemljenog sloja koji se nalazi tačno ispod Hilbertove fraktalne krive je odstranjen. Na taj način se stvara određeni otvor za linije električnog polja koje kroz njega prolaze u zemlju i završavaju na uzemljenom sloju sa njegove donje strane, slika 6.5. Na taj način izraženiji je uticaj vlažnosti zemljišta na odziv senzora.



Slika 6.5: Linije E-polja senzorskog elementa sa odstranjenim delom uzemljenog sloja

Rezultati simulacije senzora sa delimično odstranjenim uzemljenim slojem pokazuju da je opseg faznog pomeraja 82.9° na učestanosti od 1077 MHz, dok uneseno slabljenje iznosi 3 dB. Primera radi, rezultati simulacije za mikrostrip liniju sa slike 6.1 na ovoj radnoj učestanosti daju opseg faznog kašnjenja od 34.7° , što je skoro 2.5 puta manje od vrednosti ostvarene optimizovanim senzorskim elementom.

6.2 Validacija metode faznog kašnjenja

Kako bi se potvrdio princip metode faznog kašnjenja, fabrikovan je predloženi senzorski element i izvršena su merenja faznog kašnjenja u materijalu koji je sličan zemlji. Odabrani medijum je kvarcni pesak, jer je po strukturi i osobinama sličan zemljištu i olakšava ponovljivosti merenja.

Postupak merenja započeo je od potpuno suvog peska koji je sipan u plastične kanistere, slika 6.6. Senzorski element je pričvršćen na poklopac kanistera u posebna ležišta koja osiguravaju element i u izvesnoj meri sprečavaju njegovo pomeranje. Zatvaranjem poklopca senzorski element se postavlja u kanister ispunjen peskom. Na poklopcu kanistera nalaze se otvori za kontrolisano vlaženje peska. Pomoću vektorskog analizatora mreža urađeno je merenje faznog kašnjenja u opsegu od 0.5 - 2.5 GHz. Potom je pesak navlažen destilovanom vodom kroz otvore na poklopcu. Kanister sa postavljenim senzorskim elementom ostavljen je na 24 časa u zatvorenoj najlonskoj vreći kako bi se voda u uzorku ravnomerno rasporedila. Nakon navedenog perioda opet je sproveden postupak merenja i vlaženja uzorka. Postupak je ponavljan dok se pesak nije zasitio vodom. Kao rezultat dobijene su kalibracione tačke koje su definisane faznim kašnjenjem za određeni zapreminski udeo vode u uzorku.



Slika 6.6: Senzor postavljen u kontejner sa peskom

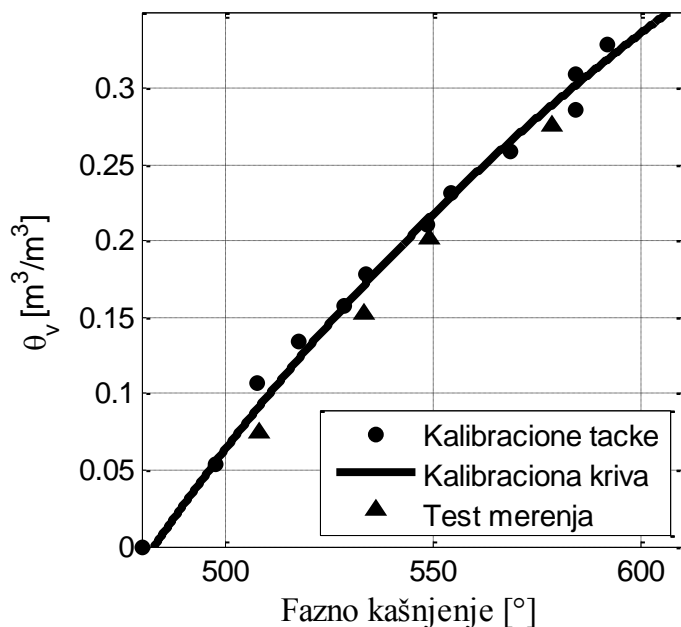
Kalibracione krive konstruisane su prilagođavanjem modela mešavine tri faze (eng. *three phase mixing model*) rezultatima merenja na svim učestanostima mernog opsega, [17]. Model pretpostavlja da je ostvareno fazno kašnjenje $\Delta\varphi$ rezultat uticaja raznih komponenti u uzorku peska: matrice peska $\Delta\varphi_s$, vazduha $\Delta\varphi_a$ i vode $\Delta\varphi_w$. Zapreminski udeo vode θ_v može se odrediti pomoću izraza

$$\theta_v = \frac{\Delta\varphi^\alpha - (1 - \phi) \Delta\varphi_s^\alpha - \phi \Delta\varphi_a^\alpha}{\Delta\varphi_w^\alpha - \Delta\varphi_a^\alpha}, \quad (6.1)$$

gde je α geometrijski parametar, a ϕ poroznost. Parametri $\Delta\varphi_a$ i $\Delta\varphi_w$ direktno su određeni u opsegu radnih učestanosti na osnovu rezultata merenja za slučaj senzorskog elementa okruženog vazduhom odnosno destilovanom vodom. Na osnovu poznatog parametra $\Delta\varphi_a$ i izmerenog faznog kašnjenja za slučaj uzorka suvog peska, dobijena je komponenta faznog kašnjenja usled matrice peska $\Delta\varphi_s$. Konačno, geometrijski parametar α dobijen je fitovanjem kalibracione krive prema rezultatima merenja vlažnosti pomoću alata *Curve Fitting Toolbox* u okviru programskog paketa *Matlab*.

Na slici 6.7 prikazana je kalibraciona kriva konstruisana na radnoj učestanosti 2.5 GHz. Kriva je projektovana prilagođavanjem na 12 kalibracionih tačaka. Apsolutna greška u odnosu na kalibracione tačke iznosi $0.018 \text{ m}^3/\text{m}^3$, što predstavlja 5.22% punog mernog opsega. Kako bi

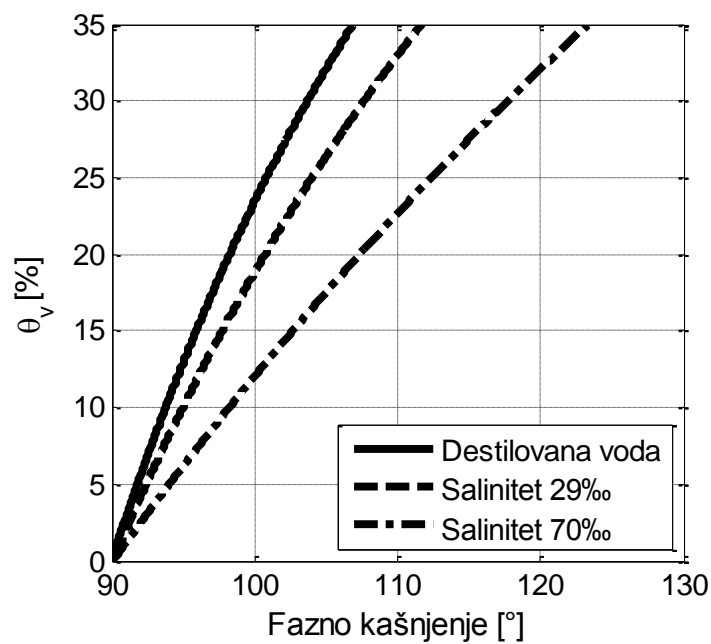
se ispitala tačnost kalibracione krive urađena su dodatna merenja na drugom uzorku peska pri četiri različita nivoa vlažnosti. Maksimalna apsolutna greška kalibracione krive u ovom slučaju iznosila je $0.019 \text{ m}^3/\text{m}^3$.



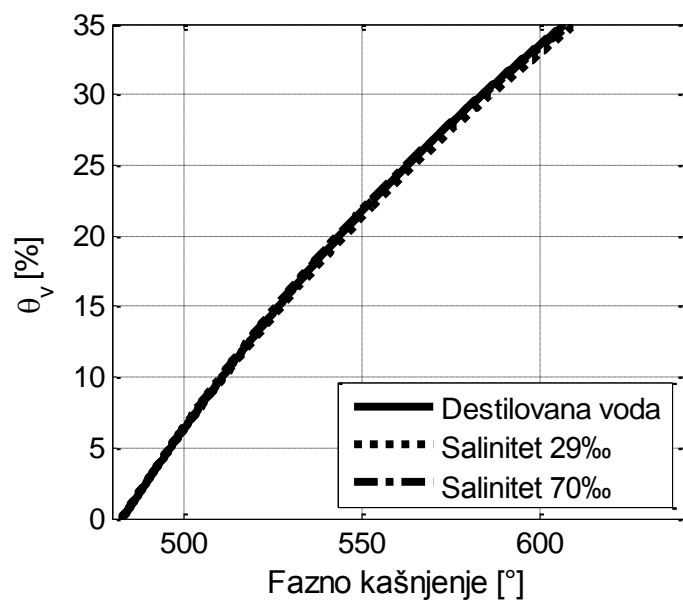
Slika 6.7: Kalibraciona kriva na učestanosti 2.5 GHz

6.3 Zanemarivanje uticaja provodnosti

Jedna od glavnih prednosti metode faznog kašnjenja je što omogućava merenje vlažnosti zemljišta koje zavisi samo od permitivnosti, a nezavisno je od električne provodnosti koju velikim delom određuje sam tip zemljišta. Ukoliko je ispunjen uslov o dovoljno visokoj učestanosti (5.4) moguće je potpuno zanemariti uticaj provodnosti. Kako bi se potvrdio ovaj iskaz i ispitao uticaj električne provodnosti na kalibracione krive procedura merenja faznog kašnjenja ponovljena je za vlaženje peska vodom dva različita saliniteta odnosno provodnosti: 29‰ i 70‰. Na slici 6.8 prikazane su kalibracione krive na granicama mernog opsega učestanosti, 0.5 i 2.5 GHz. Kao što se može primetiti, postoji značajna razlika u kalibracionim krivama različito tretiranih uzoraka na donjoj granici mernog opsega. Međutim, ukoliko se radna učestanost poveća na 2.5 GHz, kalibracione krive za sva tri slučaja gotovo se preklapaju.



a)



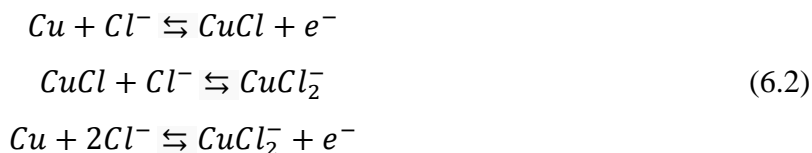
b)

Slika 6.8: Kalibracione krive uzoraka vlaženih vodom različitog saliniteta na učestanostima: a) 500 MHz i b) 2500 MHz

Može se zaključiti da su rezultati merenja potvrdili analitička predviđanja i pokazali da je uticaj provodnosti na kalibracione krive izraženiji na nižim učestanostima dok se na višim on može u potpunosti zanemariti. Ovo otvara vrata razvoju senzora koji su nezavisni od tipa zemljišta.

6.4 Nedostaci senzorskog elementa fabrikovanog u tehnologiji štampanih ploča

Rezultati inicijalnih merenja vlažnosti iako obećavajući otkrili su nekoliko problema koje je potrebno rešiti kako bi se došlo do konačnog rešenja senzora vlažnosti zemljišta. Prevažodno je potrebno odabrati pogodnu tehnologiju za fabrikacije senzora koja bi omogućila robustan senzorski element sposoban da opstane u relativno agresivnim uslovima kakvo je vlažno zemljište. Fabrikovan prototip senzorskog elementa realizovan je na podlozi Taconic CER-10 gde su provodni slojevi načinjeni od bakra. Nakon merenja koja su za cilj imala da dokažu mogućnost zanemarivanja uticaja provodnosti na visokim učestanostima, senzorski element bio je vidno izmenjen. Hlor iz slane vode koja se nalazila u uzorcima peska reagovao je sa bakrom pri čemu je nastajao bakar hlorid, [91]



Na slici 6.9 mogu se jasno videti zelene oblasti na bakru koje su posledica hemijske reakcije (6.2). Ove promene nastale su nakon dve nedelje boravka senzorskog elementa u uzorku peska koji je bio vlažen vodom saliniteta 70‰.

Jasno je da standardnom tehnologijom štampanih ploča nije moguće fabrikovati senzorski element koji zadovoljava uslove neophodne za opstanak u vlažnom zemljištu. Tehnologija fabrikacije koja se nameće svojim mogućnostima za fabrikaciju robustnih i temperaturno stabilnih mikrotalasnih kola jeste tehnologija niskotemperaturne zajedno pečene keramike – LTCC (*Low Temperature Co-fired Ceramics*).



Slika 6.9: Promene na bakru senzorskog elementa pod uticajem korozije

LTCC tehnologija fabrikacije pruža mogućnost upotrebe raznih metala sa realizaciju provodnih struktura na površini podloge. Od širokog izbora svakako je najbolje koristiti zlato budući da ono ne menja svoja svojstva u zemljištu. LTCC tehnologija spada u grupu višeslojnih tehnologija što otvara novu dimenziju u procesu projektovanja senzorskog elementa, s obzirom na to da je u tom slučaju moguće varirati debljinu podloge.

Prilikom validacije metode faznog pomeraja zaključeno je da je senzorski element izuzetno zavisan od kvaliteta kontakta sa okolnim zemljištem. Kako bi se otklonio ovaj problem bilo je neophodno uvesti koncept „sredine posrednika“. Zadatak ovog medijuma je da sa jedne strane ima dobar kontakt sa senzorskim elementom, a da sa druge strane prati okolno zemljište u pogledu njegove vlažnosti. Ova sredina bi trebalo da bude slične strukture kao i zemljište i to pre svega da bude porozna kako bi bila u stanju da prima i otpušta vodu.

Sredina posrednik se označava kao granularna matrica (eng. *granular matrix*) ili prenosna matrica (eng. *transfer matrix*) i obično je u pitanju kvarcni pesak visoke čistoće [92]. Primer senzora koji koristi ovakvu sredinu posrednik je rezistivni senzor koji je prethodno opisan u poglavlju 3.4.1. Mana ovog rešenja jeste trošnost gipsane tablete (kalcijum sulfat) koja pre svega utiče na performanse senzora i zahteva redovno menjanje tablete. Senzor koji je cilj ove doktorske disertacije ne sastoji se od potrošnih delova te u tome leži njegoova ogromna prednost u odnosu na pomenuti rezistivni senzor.

Ono što je izostalo u ovoj fazi projektovanja senzora jeste tačno definisanje električnog kola koje bi pobuđivalo osmišljeni senzorski element i vršilo merenje faznog pomeraja. Potrebno je pronaći koja su ograničenja pomenutog kola u pogledu opsega faza koji je moguće meriti kao i dozvoljenog slabljenja signala na njegovim ulazima, kako bi se nova verzija senzorskog elementa prilagodila takvom električnom kolu.

Može se zaključiti da bi nova verzija senzorskog elementa trebalo da bude prilagođena električnom kolu za merenje fazne razlike i nepogodnim uslovima u vlažnom zemljištu, a u isto vreme manje osetljiva na kvalitet kontakta sa okolnim zemljištem. Iz tih razloga će u sledećoj glavi biti opisano električno kolo za merenja faznog kašnjenja koje je projektovano i fabrikovano u okviru ove disertacije.

6.5 Zaključak

U ovoj glavi prikazano je projektovanje i fabrikacija senzorskog elementa u tehnologiji štampanih ploča, gde je kao rezultat predložen senzorski element realizovan paralelnom vezom dve redno vezane Hilbertove fraktalne krive trećeg reda. Predloženo rešenje ima otvor u donjem provodnom sloju mikrostripa kako bi linije električnog polja mogle da prodiru u zemljište i sa donje strane. Na ovaj način je povećana osetljivost senzora. Pomoću fabrikovanog senzorskog elementa potvrđena je metoda faznog kašnjenja i konstruisana je kalibraciona kriva koja povezuje zapreminski udeo vlažnosti sa faznim kašnjenjem. Tačnost kalibracione krive potvrđena je test merenjima koja su pokazala relativnu grešku u odnosu na pun opseg ne veću od 5.22%.

Eksperimentalno je potvrđena analitički pokazana tvrdnja da je moguće zanemariti uticaj električne provodnosti na fazno kašnjenje ukoliko se merenja vrše na višim učestanostima. Rezultati merenja su jasno pokazali poklapanje kalibracionih kriva konstruisanih za uzorke peska koji su vlaženi vodom različitog saliniteta na učestanosti 2.5 GHz, dok to nije bio slučaj za kalibracione krive na učestanosti od 0.5 GHz. Na osnovu rezultata može se zaključiti da je načinjen jedan korak bliže u realizaciji senzora koji je nezavisan od tipa zemljišta. Potom su opisane mane i nedostaci fabrikovanog senzorskog elementa u tehnologiji štampanih ploča koje su se pre svega odnosile na osetljivost na kvalitet kontakta između senzorskog elementa i sredine

čija se vlažnost određuje, kao i na degradiranje performansi usled stvaranja patine na bakarnom provodniku. Na samom kraju predložena su rešenja pomenutih problema i ukazano je na neophodnost projektovanja odgovarajućeg električnog kola koje bi pobuđivalo osmišljeni senzorski element i vršilo merenje faznog kašnjenja.

7 Električno kolo za merenje faznog kašnjenja

Projektovanje napredne verzije senzorskog elementa zahteva projektovanje električnog kola za merenje faze i definisanje dozvoljenog slabljenja signala na svojim ulazima kao i na maksimalnu faznu razliku koju je moguće izmeriti. Na osnovu definisanog električnog kola moguće je optimizovati senzorski element prema zahtevima kola i na taj način ponuditi kompletno senzorsko rešenje za merenje vlažnosti zemljišta.

7.1 Koncept električnog kola za merenje faznog kašnjenja

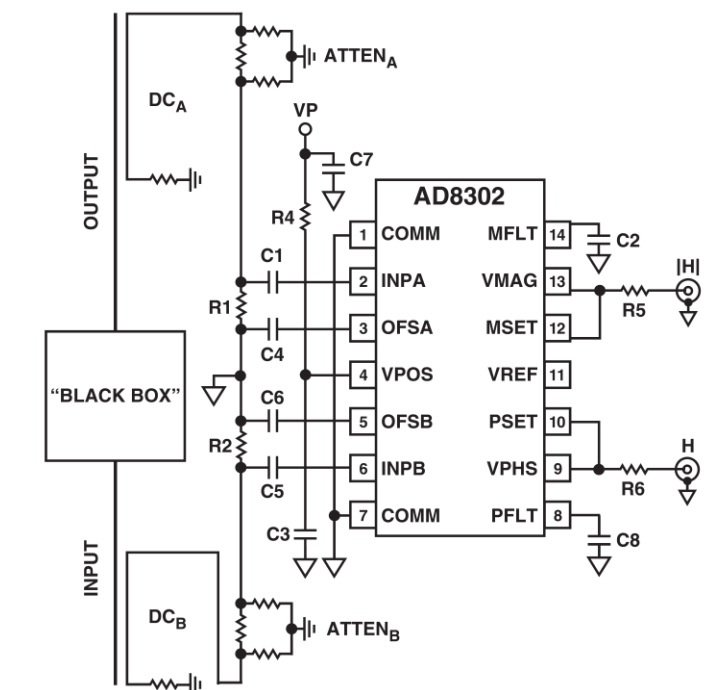
Budući da na tržištu već postoje integrisana kola za merenje razlike faze signala u mikrotalasnom opsegu odlučeno je da se jedno od ovakvih kola iskoristi za potrebe senzora vlažnosti zemljišta. U pitanju je električno kolo proizvođača *Analog Devices* sa oznakom AD8302 [93].

Pomenuto integrisano kolo u sebi uključuje fazni detektor multipikativnog tipa, kojeg pobuđuju ulazni signali preko logaritamskih pojačavača. Na ovaj način ulazni signali su limitovani i na tačnost merenja fazne razlike ne utiče amplituda ulaznih signala u širokom opsegu amplituda ulaznih snaga.

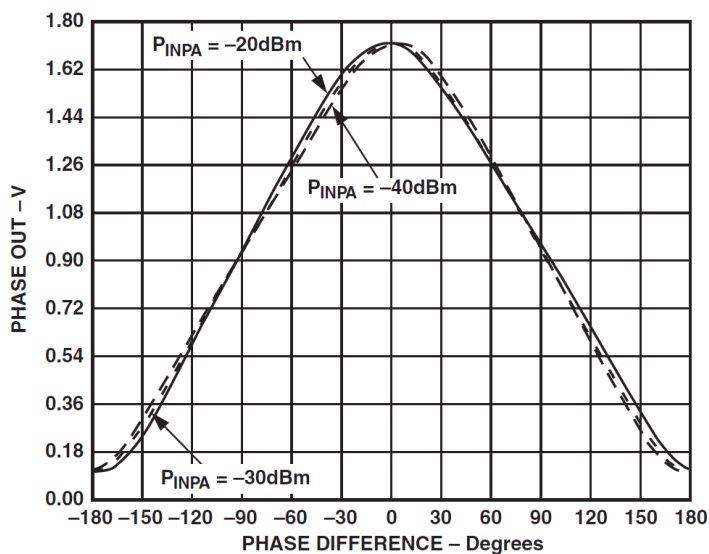
Po kataloškim podacima na učestanosti od 1900 MHz devijacija $\pm 1^\circ$ od idealne prenosne karakteristike zadovoljena je u opsegu od 128° pri ulaznim signalima istih amplitudskih nivoa, dok je na učestanosti od 2200 MHz devijacija od $\pm 1^\circ$ očuvana u mernom opsegu 115° . Ukoliko postoji razlika u nivoima signala ova razlika je veća. Preporučuje se da se ulazni signali ne razlikuju više od 10 dB. Što se tiče apsolutnih nivoa ulaznih signala, ovo integrisano kolo na svom ulazu dozvoljava snage od -60 dBm do 0 dBm, u 50 Ω -skom sistemu.

U tehničkoj dokumentaciji integrisanog kola AD8302 dat je primer električnog kola za merenje pojačanja i faznog kašnjenja signala kod pojačavača ili miksera (mešača) signala, slika 7.1a. Komponenta označena sa „BLACK BOX“ predstavlja pojačavač odnosno mikser kod kog se određuje uneseno slabljenje i fazno kašnjenje signala. Signal se sa ulaza, na slici *INPUT*, i izlaza, na slici *OUTPUT*, putem sprežnika DC_A i DC_B , dovodi na kanal *A* odnosno *B* integrisanog kola AD8302. Neophodno je obratiti pažnju na snagu signala budući da kolo na svom ulazu

može da primi signal od maksimalno 1 mW. Iz navedenog razloga su pre samog ulaza postavljene atenuatori $ATTEN_A$ i $ATTEN_B$ kako bi se zaštitilo integralno kolo.



a)



b)

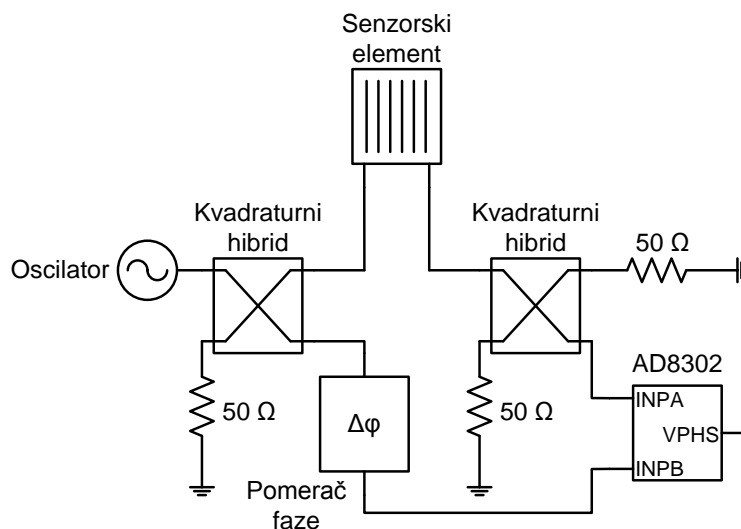
Slika 7.1: a) Električno kolo za merenje slabljenja i faznog kašnjenja signala pomoću AD8302

b) odziv kola na učestanosti 2200 MHz

Jednosmerni napon na nožici *VMAG* odgovara odnosu decibela signala na pinovima *INPA* i *INPB*, dok napon na izazu *VPHS* odgovara faznoj razlici signala na pomenutim ulazima. Na slici 7.1b prikazana je zavisnost izlaznog napona na *VPHS* izvodu od fazne razlike signala koji se primenjuju na ulazima *INPA* i *INPB* za učestanost 2200 MHz.

Predloženo kolo predstavljalo je dobru polaznu tačku za projektovanje električnog kola merača faze koji bi se primenjivalo u sklopu minijaturnog senzora vlažnosti zemljišta. Sam senzorski element bi bio smešten umesto *BLACK BOX*-a sa slike 7.1a. Neophodno je ovoj šemi dodati oscilator koji bi pobuđivao kolo pri čemu bi trebalo odabrati optimalnu radnu učestanost koja bi ispunjavala uslov zanerivanja električne provodnosti kola. Ovom kolu neophodno je dodati i električno kolo pomerača faze koje bi imalo za zadatak da postavi radnu tačku senzora u slučaju suvog zemljišta na početak linearnog opsega prenosne karakteristike na slici 7.1b, kako bi se iskoristio što veći linearni opseg komponente AD8302. Ovim postupkom bi se ujedno mogla vršiti i kalibracija uređaja jer bi se njegov odziv nakon sušenja senzora uvek podešavao na ovu referentnu vrednost.

Principska blok šema električnog kola merača faze prikazana je na slici 7.2. Ovo kolo funkcioniše tako da se signal sa oscilatora deli pomoću kvadraturnog hibrida na signal koji pobuđuje senzorski element i referentni signal koji ide ka jednom od ulaza AD8302. Referentni signal vodi se na pomerač faze kojim se radna tačka kola smešta tako da se što bolje iskoristi linearni opseg integrisanog kola AD8302 i obezbedi maksimalni merni opseg. Nakon prostiranja signala kroz senzorski element dolazi do njegovog faznog kašnjenja i slabljenja. Takav signal vodi se preko kvadraturnog hibrida na drugi ulaz integrisanog kola AD8302 gde se njegova faza poredi sa fazom referentnog signala.



Slika 7.2: Blok šema električnog kola merača fazne kašnjenja

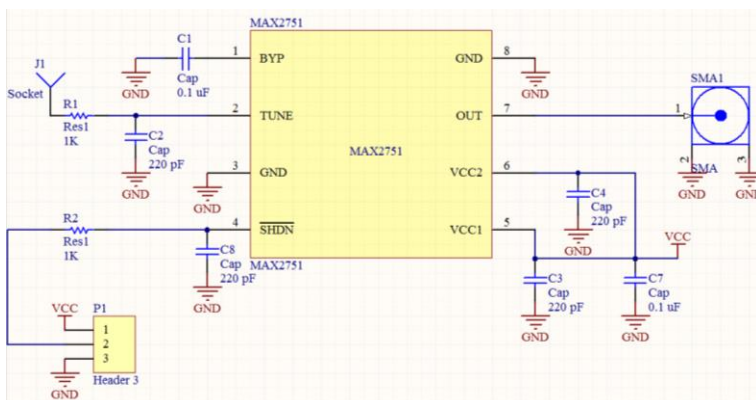
Predloženo električno kolo je izdelfjeno na odgovarajuće funkcionalne jedinice, kao što su oscilator, pomerač faze i detektor faze, koje su zasebno projektovane, fabrikovane i testirane. Na ovaj način obezbeđeno je da se svaka komponenta sistema proveri pre integracije u kompletno kolo merača fazne razlike. U nastavku će biti opisana svaka komponenta kola merača faze, biće prikazana njihova električna šema, izgled štampane ploče kao i rezultati merenja.

7.2 Oscilator

Pri odabru oscilatora neophodno je voditi računa o optimalnoj učestanosti, koja bi pre svega trebalo da zadovolji uslov zanemarivanja električne provodnosti zemljišta, a zatim i dozvoljenog slabljenja signala. Sa stanovišta učestanosti navedena dva zahteva su oprečna, povećanjem učestanosti raste imunost merenja na električnu provodnost zemljišta, ali se isto tako povećava uneseno slabljenje, te je iz tih razloga neophodno postići kompromis. Optimalna radna učestanost je minimalna učestanost na kojoj je merenje nezavisno od električne provodnosti zemljišta. Ukoliko se uzme u obzir uslov 5.4 i rezultati merenja iz tabele 4.2, optimalna radna učestanost iznosi približno 2.2 GHz.

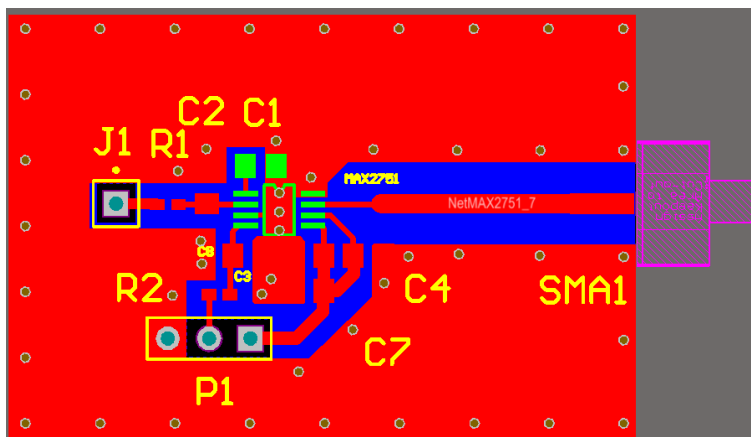
Zbog ograničenja AD8302 u pogledu snage signala na njegovom ulazu koja ne sme da prelazi 0 dBm odabran je naponom kontrolisani oscilator MAX2751 [94]. Izlazna snaga oscilatora tipično iznosi -3 dBm dok se njegova radna učestanost može menjati u opsegu od

2120 MHz do 2260 MHz. Električna šema oscilatora napravljena je po preporuci proizvođača i prikazana je na slici 7.3. Na pristupu 2 pod oznakom *TUNE* moguće je podešavati učestanost oscilatora variranjem napona u rasponu od 0.4 V do 2.4 V.

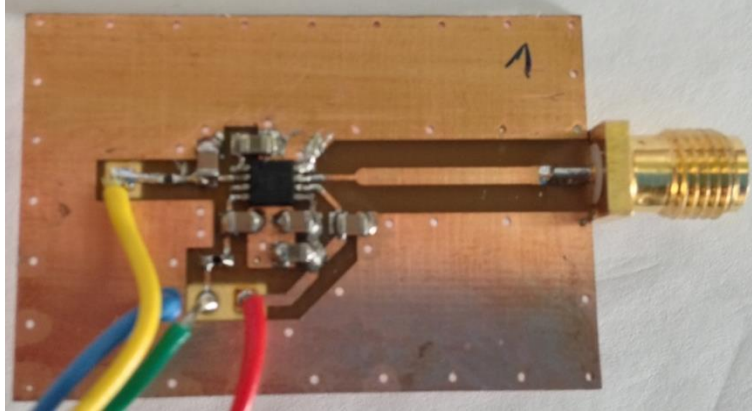


Slika 7.3: Šema električnog kola naponom kontrolisano oscilatora MAX2751

Na osnovu šeme projektovana je štampana ploča, koja je fabrikovana u standardnoj tehnologiji štampanih ploča na podlozi FR4 debljine 0.80 mm, slika 7.4.



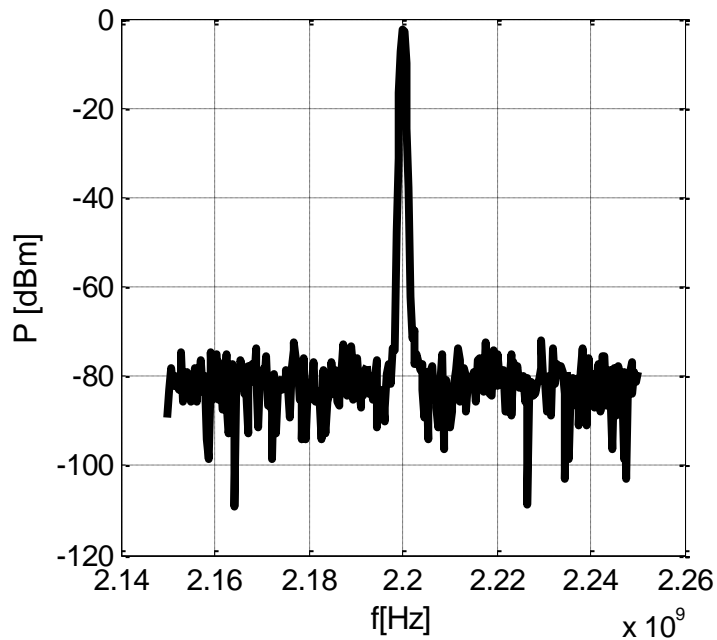
a)



b)

Slika 7.4: Naponom kontrolisani oscilator a) izgled štampane ploče b) fabrikovani oscilator

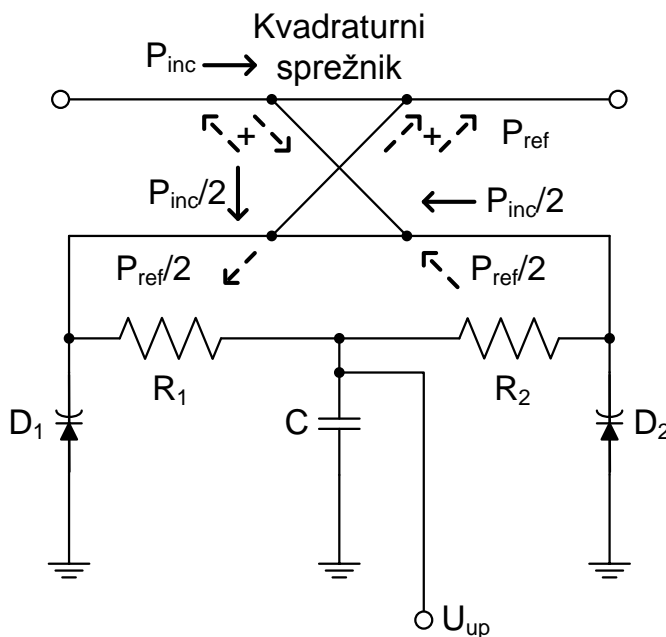
Fabrikovani oscilator karakterisan je pomoću spektralnog analizatora R&S FSH 1145.5850.03., zahvaljujući kom mu je podešena radna učestanost na planiranih 2.2 GHz, pri čemu je ostvarena izlazna snaga oscilatora -2.26 dBm. Spektar signala fabrikovanog oscilatora prikazan je na slici 7.5.



Slika 7.5: Spektar signala fabrikovanog oscilatora

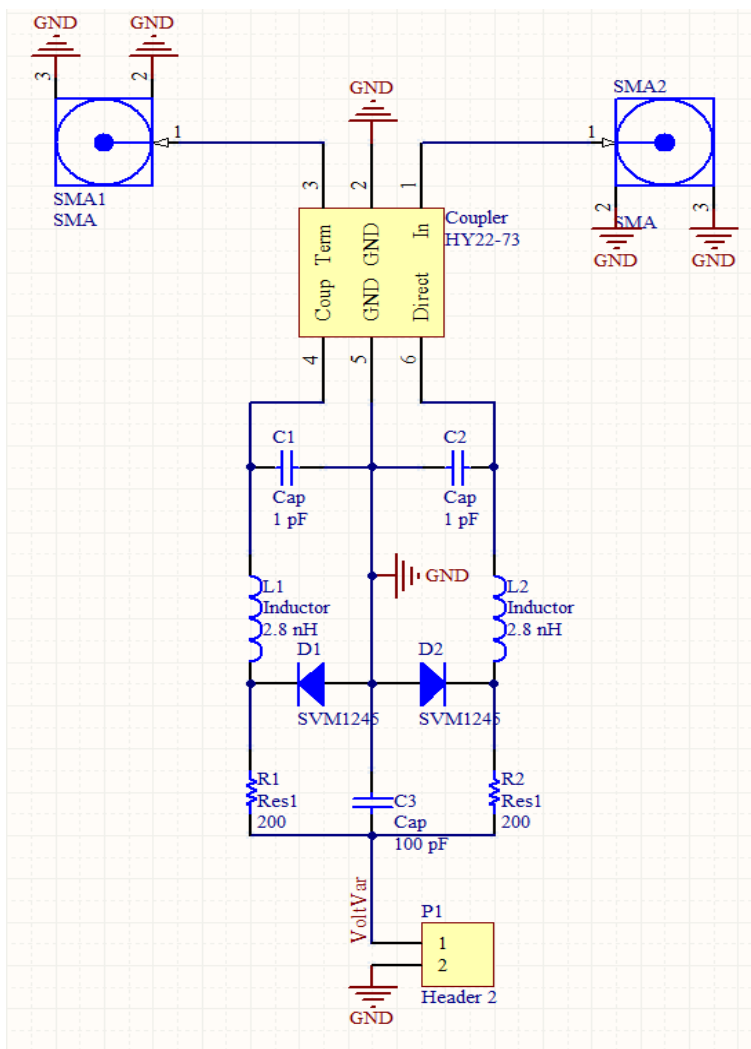
7.3 Pomerač faze

Pomerač faze moguće je realizovati pomoću kvadraturnog sprežnika i para varaktorskih dioda što je i prikazano na slici 7.6 u vidu principске šeme. Ulazni signal snaga P_{inc} sa pristupa IN se podjednako deli pomoću sprežnika na dve grane, pri čemu je signal u levoj grani smaknut za -90° , dok je u desnoj smaknut za -180° tako da fazna razlika između njih iznosi 90° . Na kraju svake grane nalaze se odgovarajuće varaktorske diode D_1 odnosno D_2 koje podjednako menjaju fazu signala u obe grane budući da su povezane na isti upravljački napon U_{up} . Reflektovani signali $P_{ref}/2$ se potom superponiraju na izlaznom pristupu OUT budući da su u fazi dok se na pristupu IN poništavaju jer su smaknuti za 180° . Na slici 7.6 neisprekidanim strelicama označeni su incidentni signali, dok su isprekidanim strelicama označeni reflektovani signali. Pravcima strelica su označeni fazni pomeraji do kojih dolazi prilikom prostiranja signala kroz ovo električno kolo. Podešavanjem upravljačkog napona moguće je uticati na fazni pomeraj signala na izlazu.

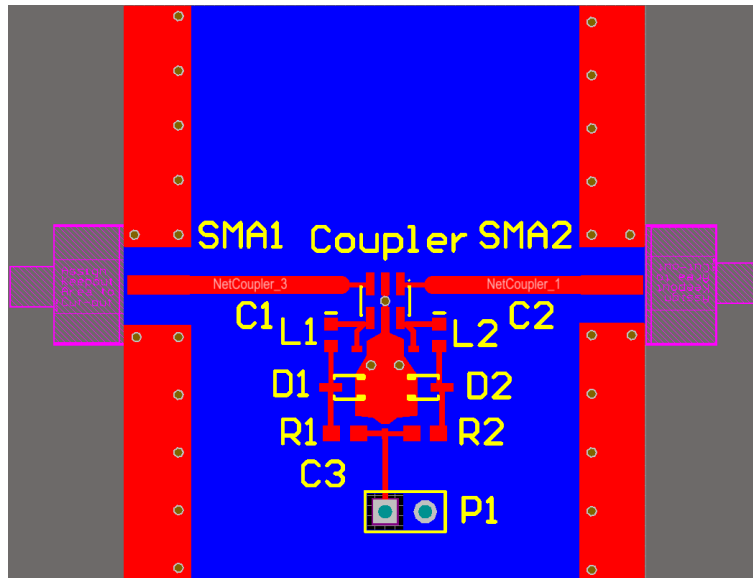


Slika 7.6: Principska šema pomerača faze

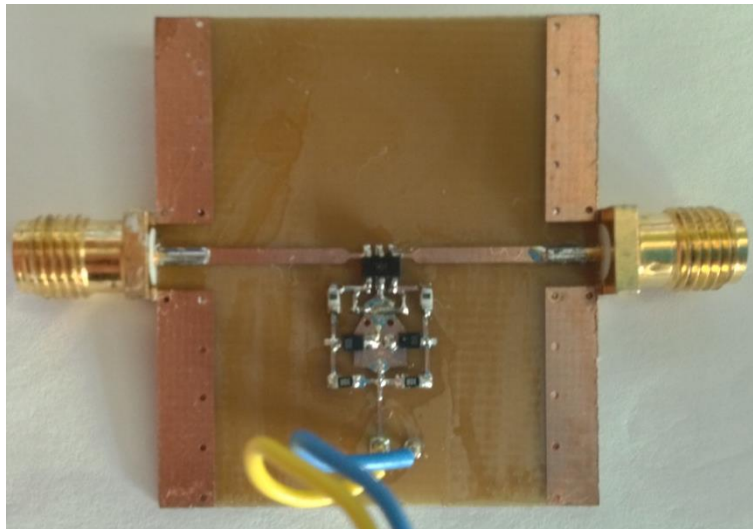
Varaktori koji su odabrani za realizaciju kola su SMV1245 od proizvođača *Skyworks Solution Inc.*, dok je za kvadraturni sprežnik iskorišćen HY22-73LF od istog proizvođača [95,96]. Električna šema pomerača faze prikazana je na slici 7.7. Za razliku od principske šeme na električnoj su dodata dva kalema $L1$ i $L2$ induktivnosti 2.8 nH, i dva kondenzatora $C1$ i $C2$ kapacitivnosti 1 pF po preporuci proizvođača kako bi se proširio opseg promena faza [97]. Izgled štampane ploče kao i fabrikovano kolo pomerača faze prikazani su na slici 7.8. Pomerač faze realizovan je na FR4 podlozi debljine 0.80 mm.



Slika 7.7: Električna šema kola pomerača faze



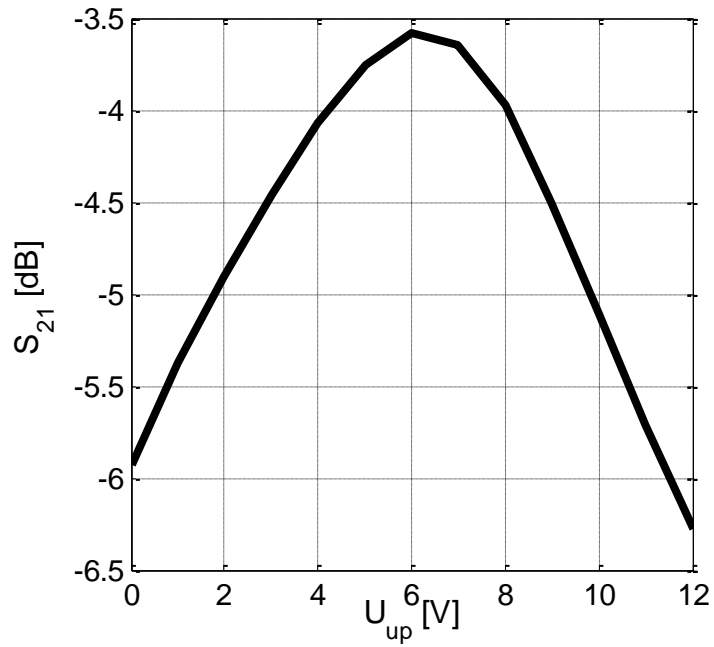
a)



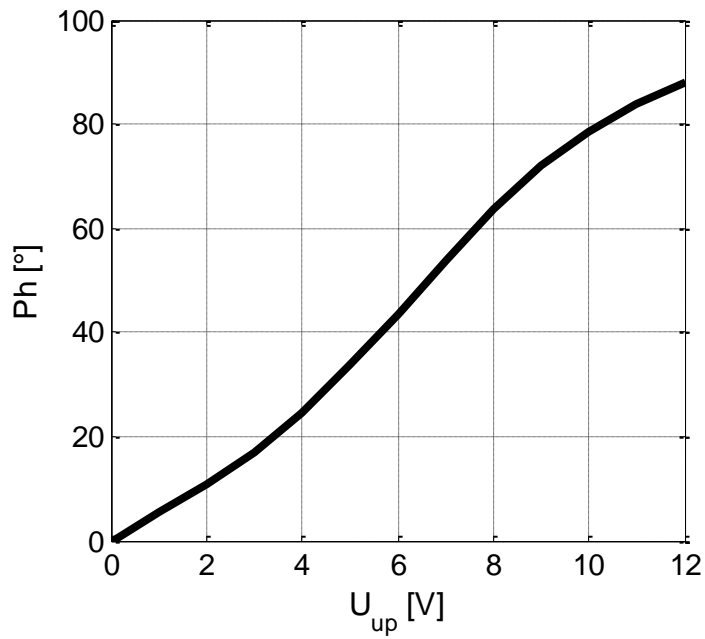
b)

Slika 7.8: Pomerac faze a) izgled štampane ploče b) fabrikovano električno kolo

Fabrikovano kolo karakterisano je pomoću VNA na radnoj učestanosti od 2.2 GHz. Izmereno je uneseno slabljenje i fazni pomak u rasponu od 0 do 12 V sa korakom od 1 V, slika 7.9. Uneseno slabljenje nije prelazilo 6.5 dB dok je ostvareni fazni pomeraj iznosio 89.7°.



a)

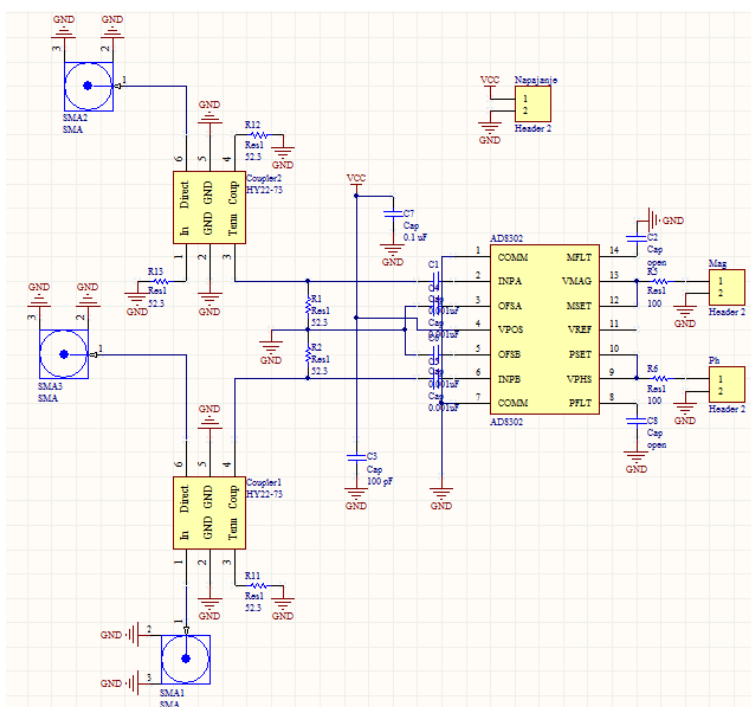


b)

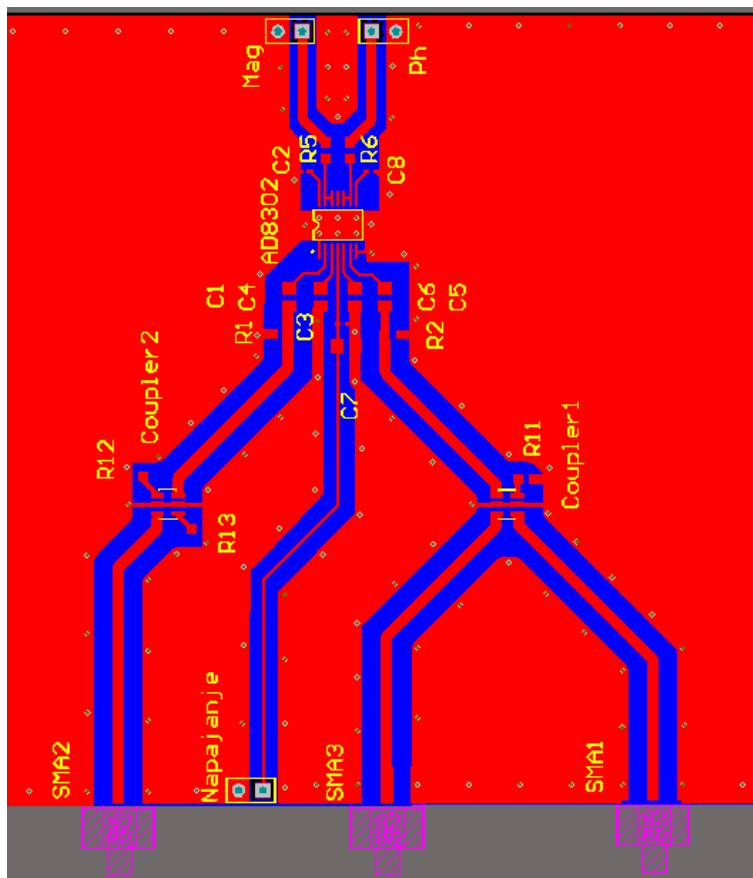
Slika 7.9: Karakterizacija pomerača faze: a) uneseno slabljenje b) pomeraj faze

7.4 Kompletno kolo za merenje faznog pomeraja

Nakon projektovanja i fabrikacije oscilatora i pomerača faze, projektovana je i napravljena štampana pločica detekora faze po ugledu na električnu šemu koju je predložio proizvođač, a koja je prikazana na slici 7.1a. Izgled električne šeme i štampane ploče prikazan je na slici 7.10. Na SMA konektor pod oznakom *SMA1* dovodi se izlaz sa oscilatora, signal oscilatora se potom deli na referetni signal koji ide ka kanalu *B* detektora faze AD8302 i na mereni signal koji se upućuje prema senzorskom elementu preko SMA konektora označenog sa *SMA3*. Drugi kraj senzora se priključuje na konektor pod oznakom *SMA2* sa kog se fazno zakašnjeni signal, koji je propagirao kroz senzorski element, putem spreznika dovodi na kanal *A* detektora faze. Fazna razliku moguće je očitati na konektoru *Header2* u vidu jednosmernog napona.



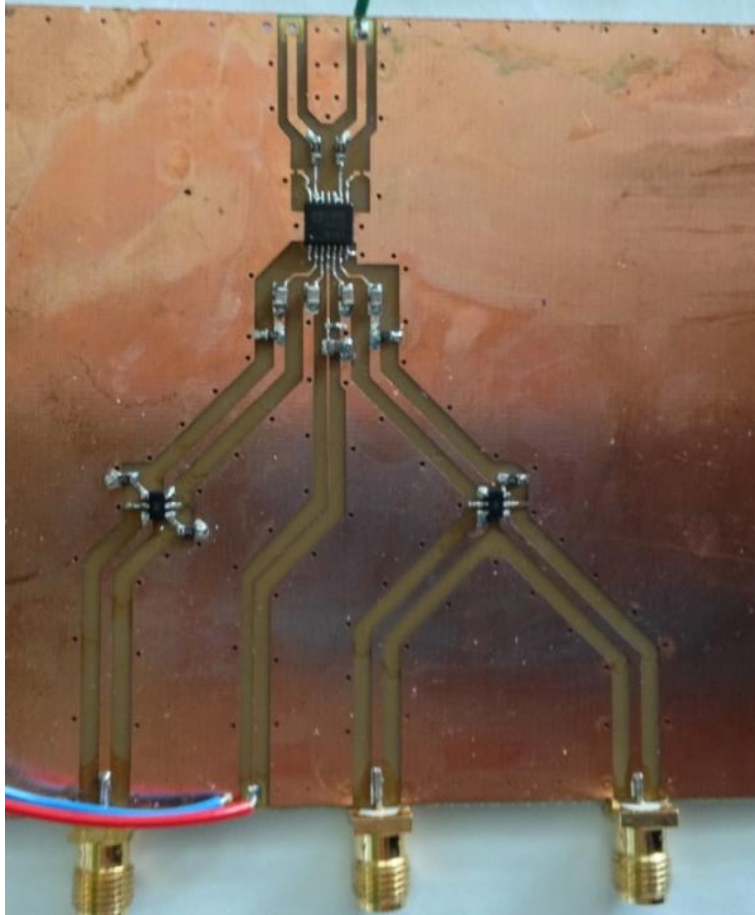
a)



b)

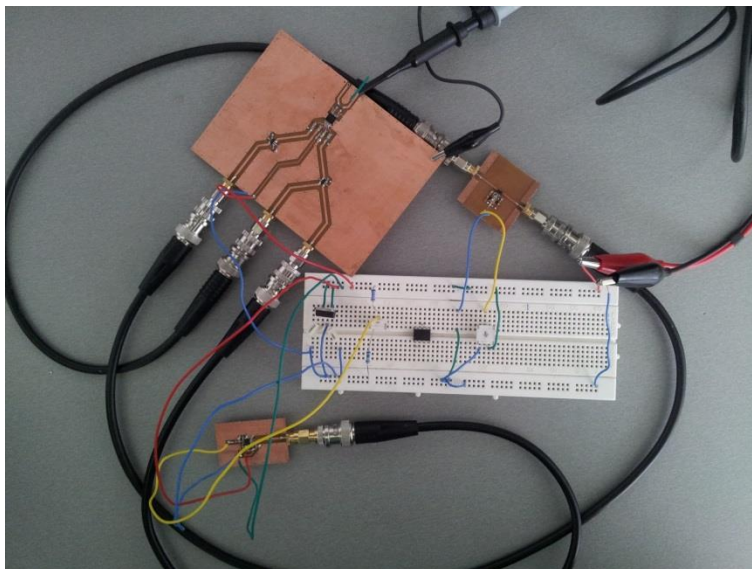
Slika 7.10: Električno kolo za detekciju fazne razlike: a) električna šema b) izgled štampane ploče

Električno kolo za detekciju fazne razlike dva signala fabrikovano je na FR4 podlozi debljine 0.80 mm, slika 7.11.

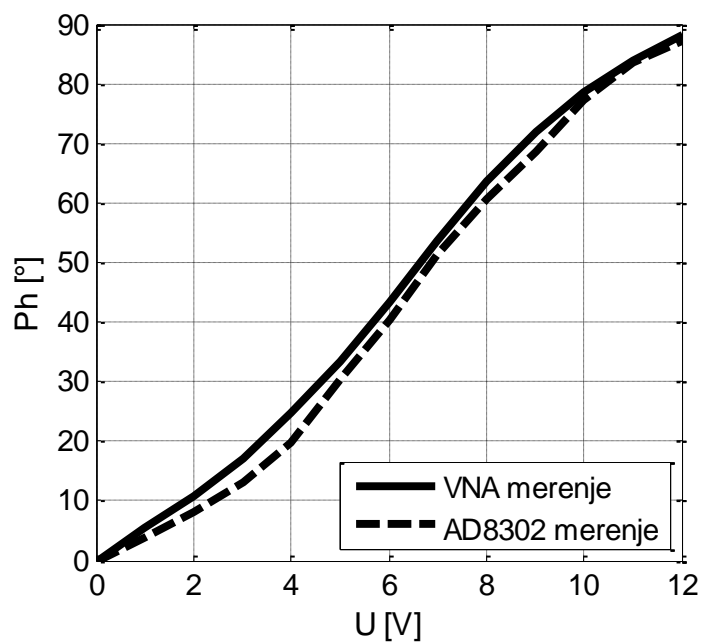


Slika 7.11: Fabrikovano električno kolo za detekciju faze

Fabrikovano kolo testirano je tako što je na konektore na kojima je planirano priključenje senzorskog elementa postavljen pomerač faze, a kao izvor mikrotalasnog signala korišćen je fabrikovani oscilator sa slike 7.4b. Upravljački napon menjan je u rasponu od 0 V do 12 V sa korakom od 1 V pri čemu su beležene vrednosti napona na izlazu VPHS integrisanog kola AD8302. Izgled postavke eksperimenta prikazan je na slici 7.12a. Kako bi bilo moguće uporediti merenje faze načinjeno pomoću integrisanog kola AD8302 sa merenjima VNA, vrednosti izmerenog napona sa pristupa VPHS su konvertovane u odgovarajuće vrednosti faznog kašnjenja pomoću prenosne karakteristike sa slike 7.1b. Dobijeni rezultati upoređeni su sa rezultatima merenja pomoću VNA-a, slika 7.12b. Relativna greška u odnosu na pun opseg iznosi 5.56%, čime je potvrđena ispravnost električnog kola merača fazne razlike.



a)



b)

Slika 7.12: Testiranje električnog kola merača fazne razlike: a) postavka eksperimenta
b) poređenje rezultata merenja sa rezultatima dobijenim VNA-om

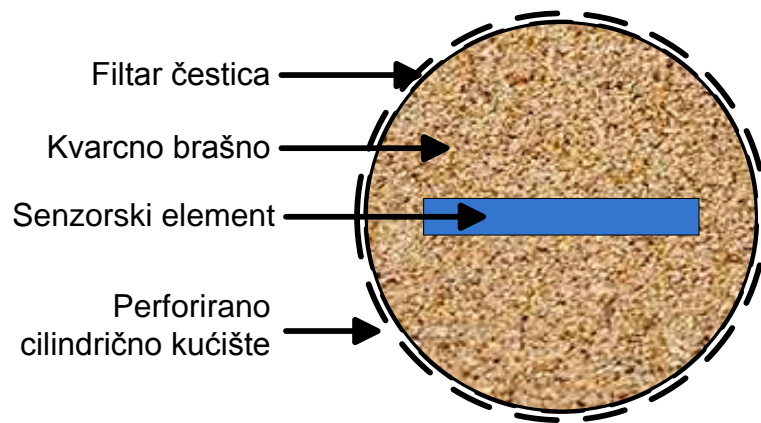
7.5 Zaključak

U ovoj glavi opisano je električno kolo za pobuđivanje senzorskog elementa i merenje faznog kašnjenja signala koji propagira kroz element. Centralna komponenta električnog kola jeste detektor faze, koji na svom izlazu daje jednosmerni napon srazmeran razlici faza signala na svojim ulazima, naponom kontrolisanog oscilatora. Kolo se pobuđuje pomoću naponom kontrolisanog oscilatora koji je podešen na radnu učestanost od 2.2 GHz. Kako bi se što bolje iskoristio merni opseg detektora faze projektovano je i fabrikovano kolo pomerača faze. Fabrikovane komponente električnog kola su povezane u kompletan sistem koji je testiran i čiji su rezultati merenja faznog kašnjenja upoređeni sa rezultatima merenja dobijenih pomoću vektorskog analizatora mreža. Relativna greška u odnosu na pun opseg iznosi 5.56% što je zadovoljavajući rezultat s obzirom da su se elementi kola povezivali koaksijalnim kablovima koji su mogli prouzrokovati dodatne greške u merenju. Predloženo kolo je svakako potrebno integrisati u kompaktnu celinu čime bi se ostvarili tačniji rezultati merenja.

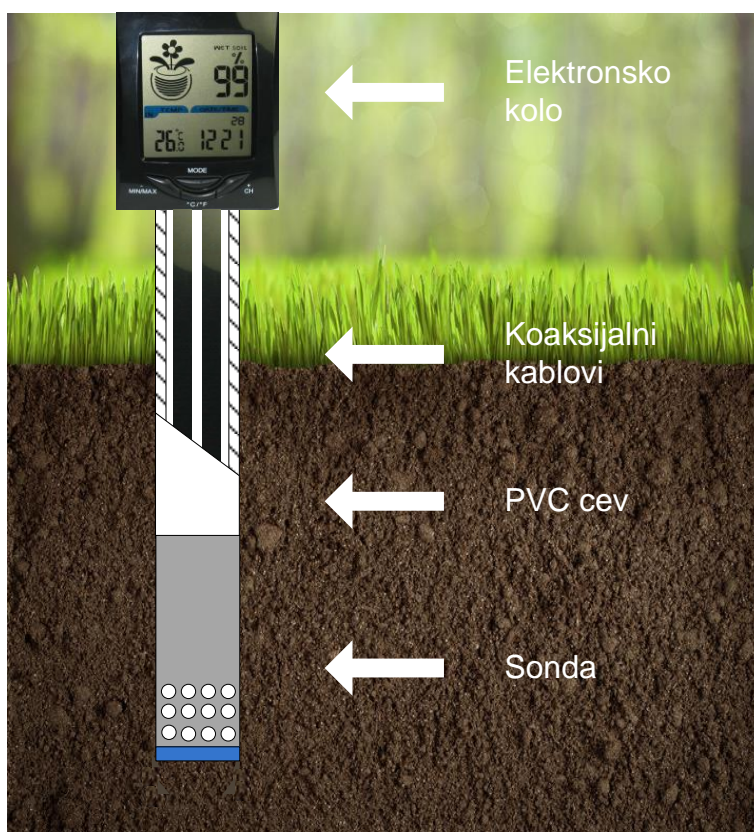
8 Projektovanje i fabrikacija senzora u LTCC tehnologiji

Imajući u vidu nedostatke senzorskog elementa izrađenog u standardnoj tehnologiji štampanih ploča opisane u poglavlju 6.4 osmišljeno je novo rešenje elementa u LTCC tehnologiji. Ideja je da novi LTCC senzorski element bude okružen granularnom matricom i zajedno sa njom bude smešten u cilindrično perforirano kućište, 8.1a. Ovaj sklop formira mernu sondu koja se postavlja u zemljište i do koje dolazi par koaksijalnih kablova kojim se senzorski element pobuđuje. Na drugom kraju koaksijalnih kablova nalazi se projektovano električno kolo za merenje fazne razlike, odnosno vlažnosti zemljišta. Koncept novog senzorskog rešenja prikazan je na slici 8.1b.

U narednim poglavljima biće ukratko opisana LTCC tehnologija fabrikacije budući da je odabrana za realizaciju senzorskog elementa. Pošto ostvareni fazni opseg i uneseno slabljenje signala zavise od podloge na kojoj je senzorski element realizovan kao i od granularne matrice u koju je smešten, u nastavku su ispitane električne karakteristike pomenutih elemenata senzora. Potom će biti opisan proces projektovanja i optimizacije senzorskog elementa prema zahtevima električnog kola tako da na radnoj učestanosti od 2.2 GHz ostvareni fazni opseg bude približno 115° kako bi se maksimalno iskoristio linearni opseg integrisanog kola AD8302 i povećala osetljivost. Prilikom projektovanja uzeto je u obzir da uneseno slabljenje signala ne premašuje 10 dB, kako bi očitane vrednosti napona na izlazu električnog kola odgovarale prenosnoj karakteristici integrisanog kola AD8302 koju je proizvođač istakao, kao i da povratni gubici budu na zadovoljavajućem nivou kako ne bi došlo do neželjenih refleksija signala. Nakon projektovanja biće opisan proces fabrikacije senzorskog elementa i njegove integracije u mernu sondu. Na kraju će biti prikazani rezultati testiranja senzorskog rešenja na dva uzorka zemljišta različitog hemijskog sastava kako bi se potvrdila pretpostavka da je ovo senzorsko rešenje nezavisno od tipa zemljišta.



a)



b)

Slika 8.1: Koncept senzora realizovanog u LTCC tehnologiji
a) poprečni presek b) senzor postavljen u zemljište

8.1 LTCC tehnologija fabrikacije

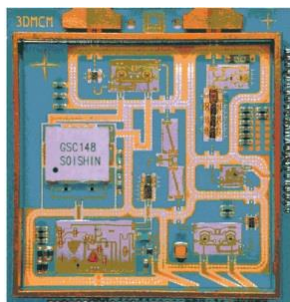
LTCC tehnologija fabrikacije predstavlja 3D višeslojnu tehnologiju kod koje se slojevi (trake), sa elementima električnog kola, povezuju vertikalno postupkom laminacije i pečenjem. LTCC je kombinacija debeloslojne tehnologije i keramičke tehnologije [98]. Pomoću debeloslojne tehnologije mogu se napraviti pasivne komponente poput otpornika, kalemova, kondenzatora i njihovih međusobnih električnih veza. Tehnologija keramike uslovljava materijale koje je moguće koristiti i određuje električne, mehaničke i ostale fizičke osobine fabrikovanih kola, kao i sam postupak izrade.

Materijali koji se koriste u LTCC tehnologiji se odlikuju izuzetnom temperaturnom stabilnošću. Takodje, ovu tehnologiju karakteriše relativno visoka rezolucija (~100 μm) i dobra upravljivost debljinom dielektričnog sloja. Uobičajeni metali koji se koriste u LTCC-u su oni sa visokom električnom provodnošću poput zlata, srebra, baka i njihovih legura (Ag-Pd, Ag-Pt, Au-Pt itd.), što predstavlja značajnu prednost u odnosu na visokotemperaturnu zajedno pečenu keramiku (eng. *High Temperature Co-fired Ceramics* - HTCC) gde nije moguće koristiti navedene metale. Pošto je neophodno zajedno pečenje keramike sa pobrojanim metalima, potrebno je izvesti proces sinterovanja ispod temperature topljenja metala (900 – 1000°C). Kako bi se postigla visoka gustina sinterovanja pomoću niske temperature pečenja uobičajeno je dodavanje amornog stakla, kristalnog stakla ili oksida niske temperature topljenja čime se poboljšava sinterovanje.

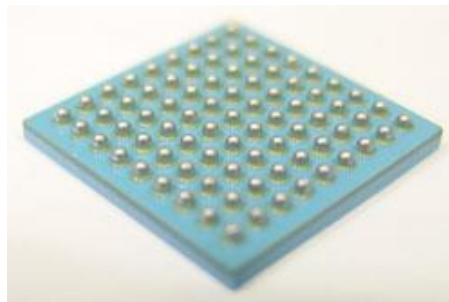
Glavna prednost LTCC-a u odnosu su na standardnu tehnologiju štampanih ploča jeste temperaturna stabilnost, mogućnost integrisanja pasivnih komponenti u sam supstrat i mali dielektrični gubici na visokim učestanostima. U odnosu na debeloslojnu tehnologiju LTCC ostvaruje mnogo veći prinos pošto je mogućnost greške značajno smanjena budući da je moguće ispitati svaki sloj ponaosob. Pored komponenti koje je moguće izvesti unutar LTCC supstrata, moguće je dodati komponente na površinu nakon postupka pečenja. Prema tome ova tehnologija je pogodna za fabrikaciju hibridnih kola.

Zahvaljujući navedenim prednostima, LTCC je našao svoje mesto u mnogim primenama uglavnom u oblasti mikrotalasne tehnologije u vidu rezonatora, filtara, antena, dipleksera i

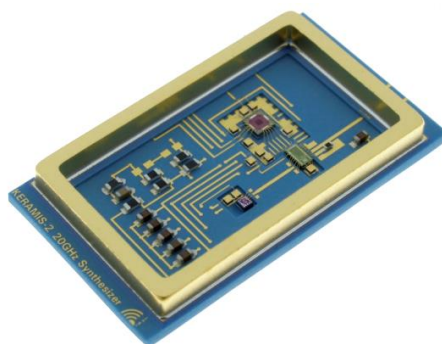
slično, agresivnim sredinama (visoka vlažnost i temperatura), za potrebe pakovanja elektronskih komponenti i modula, medicinski implantati itd., slika 8.2.



a)



b)



c)

Slika 8.2: LTCC primene a) Mikrotalasni modul [99] b) BGA matrica [100] c) Hybrid circuit [101] (20 GHz fractional -N synthesizer module for satellite operation)

8.2 Električne karakteristike keramičkog supstrata i granularne matrice

Kako bi bilo moguće optimizovati senzorski element tako da zadovolji zahteve električnog kola, neophodno je ispitati električne karakteristike keramičkog supstrata i granularne matrice u ekstremnim slučajevima vlažnosti. Do sada su razvijene mnoge metode karakterizacije materijala pomoću arhitekture mikrostrip linije koje se generalno mogu podeliti u rezonantne i nerezonantne metode [102].

Kod rezonantnih metoda se materijal koji se karakteriše koristi kao supstrat ili kao sloj unutar višeslojnog supstrata ili kao prekrivajući sloj. Električne karakteristike materijala se određuju na osnovu rezonantne učestanosti i faktora dobrote rezonatora. Ove metode su

uskopojasne i unose određenu nesigurnost budući da se uticaj ivičnih polja koja se javljaju kod rezonatora uzimaju empirijski.

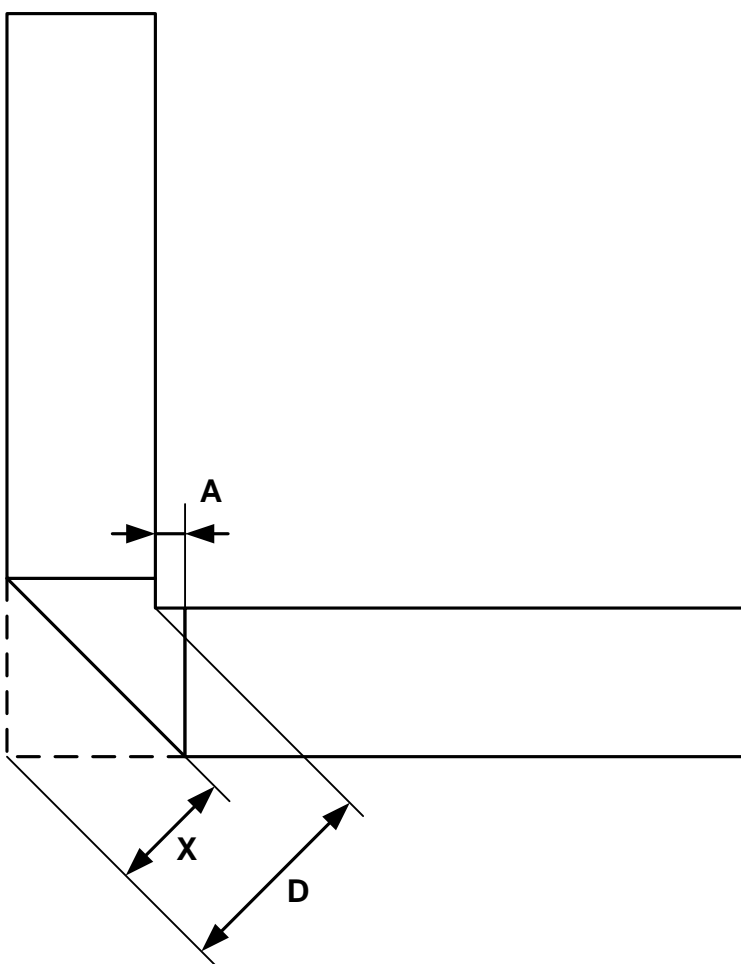
Za razliku od rezonantnih metoda nerezonantne metode su širokopojasne ali se kod njih uticaj tranzicije koaksijalnog voda na mikrostrip liniju znatno veći što se odražava na tačnost rezultata merenja [103]. Da bi se izbegao uticaj tranzicije potrebno je koristiti dve identične mikrostrip linije karakteristične impedanse 50Ω koje bi se među sobom razlikovale jedino u dužini [104]. Potom se vrše merenja faznog kašnjenja (električne dužine) u opsegu učestanosti od interesa za svaku mikrostrip liniju ponaosob. Oduzimanjem faznog kašnjenja, dobija se fazno kašnjenje signala koji se prostirao duž razlike dužine mikrostrip linije koje je nezavisno od uticaja konektora. Na osnovu ovog kašnjenja moguće je izračunati efektivnu permitivnost pomoću izraza (5.52), gde je za dužinu L potrebno uzeti razliku dužina mikrostrip linija. Kasnije je moguće pomoću izraza (5.51) pronaći vrednost permitivnosti supstrata.



Slika 8.3: Mikrostrip linije za električnu karakterizaciju Ceramtec GC trake i granularne matrice

Keramički supstrat koji je bio na raspolaganju je Ceramtec GC, koji se dostavlja u vidu traka debljine 300 μm [105]. Fabrikovane su dve mikrostrip linije dužine 38.5 mm i dužine 77.1 mm na supstratu koji napravljen od ukupno sedam slojeva Ceramtec GC traka, slika 8.3.

Mikrostrip linije su ciljano napravljene u obliku slova „U“, kako bi SMA konektori bili dostupni prilikom kasnije električne karakterizacije granularne matrice. Prilikom „savijanja“ mikrostrip linija korišćen je kosi oblik pregiba sa slike 8.4 koji održava karakterističnu impedansu i ne dovodi do neželjenih refleksija [106,107].



Slika 8.4: Optimalan oblik pregiba mikrostrip linije

Parametre sa slike 8.4 moguće je izračunati pomoću sledećih izraza

$$\begin{aligned}
 D &= w \sqrt{2} \\
 X &= D \left(0.52 + 0.65 e^{(-1.35 \frac{w}{h})} \right), \\
 A &= \left(X - \frac{D}{2} \right) \sqrt{2}
 \end{aligned} \tag{8.1}$$

gde je w širina provodne linije, a h debljina podloge mikrostripa.

Sprovedena su merenja faznog kašnjenja u opsegu učestanosti 2120 – 2260 MHz budući da je oscilator korišćen u električnom kolu za merenje faznog kašnjenja moguće podesiti da osciluje u navedenom opsegu. Dobijena vrednost relativne permitivnosti supstrata je 7.3. Pošto izraz (5.51) ne računa gubitke u dielektriku kako bi se došlo do ovog podatka sprovedene su elektromagnetske simulacije u programskom paketu Microwave Office čiji rezultati su se poredili sa rezultatima merenja, na osnovu čega je dobijeno da tangens ugla gubitaka iznosi 0.002.

Materijal koji je iskorišćen za potrebe granularne matrice jeste kvarcno brašno od proizvođača Kvarc D.O.O. U pitanju je kvarcni pesak visokog kvaliteta gde se procenat silicijum dioksida kreće 95 – 99 % i koji je prosejan tako da se u njemu nalaze čestice veličine ne veće od 70 μm . Za potrebe električne karakterizacije kvarcnog brašna fabrikovane mikrostrip linije postavljane su u plastične posude zapremine 100 ml koje su bile ispunjene u jednom slučaju potpuno suvim uzorkom kvarcnog brašna, dok je u drugom slučaju kvarcno brašno bilo zasićeno vodom. Na osnovu rezultata merenja izračunata relativna permitivnost suvog kvarcnog brašna iznosi 2.6, dok je u slučaju vlažnog brašna relativna permitivnost 27.6. Putem elektromagnetskih simulacija u programskom paketu Microwave Office određen je tangens ugla gubitaka za suhu matricu 0.098, dok za vlažnu matricu ova vrednost iznosi 0.267.

8.3 Projektovanje senzorskog elementa

Senzorski element bi između ostalog morao da zadovolji zahteve za malim unesenim slabljenjem i velikim povratnim gubicima što je moguće zadovoljiti prilagođenjem impedanse mikrostrip linije na 50 Ω -ski standard. Takođe, prisutan je zahtev za što većom osetljivošću i minijaturizacijom senzora što je moguće ostvariti korišćenjem debljeg supstrata, slika 5.5. Međutim u ovom smislu postojalo je ograničenje i korišćeno je maksimalno 5 slojeva LTCC traka kako bi bilo moguće postaviti raspoložive SMA konektore na supstrat.

U prvoj fazi projektovanja cilj je bio naći širinu provodnika mikrostrip linije takvu da uneseni gubici budu što je moguće manji, a povratno slabljenje veće. Sproveden je niz elektromagnetskih simulacija u programskom paketu *Microwave Office* za različite širine provodnika od 0.5, 0.8, 1, 1.3, 1.7 i 2 mm. Posmatrana su dva karakteristična slučaja - potpuno suva granularna matrica i matrica zasićena vodom. U svim slučajevima korišćen je supstrat od 5 slojeva Ceramtec GC traka ukupne debljine 1.2 mm. Rezultati simulacije na učestanosti od 2.2 GHz prikazani su u tabeli 8.1, gde su najbolji rezultati za ispitani parametar označeni podebljanim brojkama.

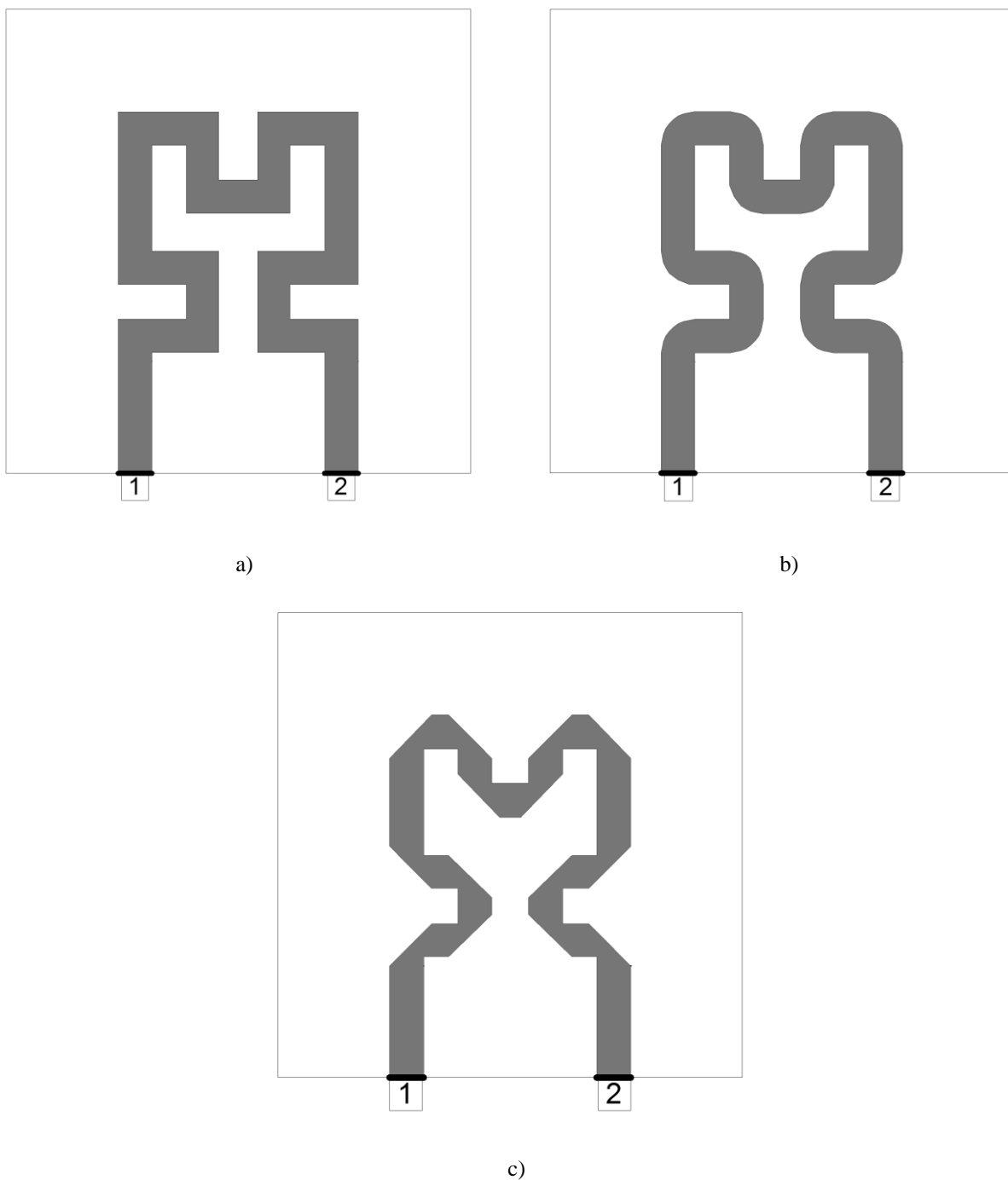
Tabela 8.1: Rezultati simulacije povratnog i unesenog slabljenja na učestanosti 2.2 GHz za potrebe pronalaženja optimalne širine provodne linije

Širina provodnika	Povratno slabljenje - S_{11} [dB]			Uneseno slabljenje - S_{21} [dB]		
	Suva matrica	Vlažna matrica	Suma	Suva matrica	Zasićena matrica	Suma
0.5	-8.88	-31.16	-40.04	-1.24	-6.51	-7.75
0.8	-12.95	-20.77	-33.72	-0.78	-6.61	-7.39
1	-16.79	-18.12	-34.91	-0.61	-6.70	-7.31
1.3	-28.67	-15.70	-44.37	-0.50	-6.87	-7.37
1.5	-31.09	-14.58	-45.67	-0.48	-6.98	-7.46
1.7	-21.15	-13.68	-34.83	-0.51	-7.11	-7.62
2.0	-15.44	-12.59	-28.03	-0.59	-7.29	-7.88

Na osnovu rezultata simulacija odlučeno je da optimalna širina provodnika bude 1.5 mm budući da je ovaj slučaj pokazao najbolje performanse.

Za potrebe minijaturizacije senzora primenjene su fraktalne krive i to Hilbertova fraktalna kriva drugog reda. Zbog lakšeg dovođenja i odvođenja pobudnog signala na senzorski element pristupi su smešteni sa iste strane supstrata. Minimalan razmak između pristupa iznosio je 9.3 mm kako bi bilo moguće priključiti koaksijalne kablove na SMA konektore. Ispitani su

različiti oblici pregiba kod provodnih linija poput četvrtastog, zaobljenog i kosog. Izgled tri varijante senzorskog elementa prikazan je na slici 8.5.



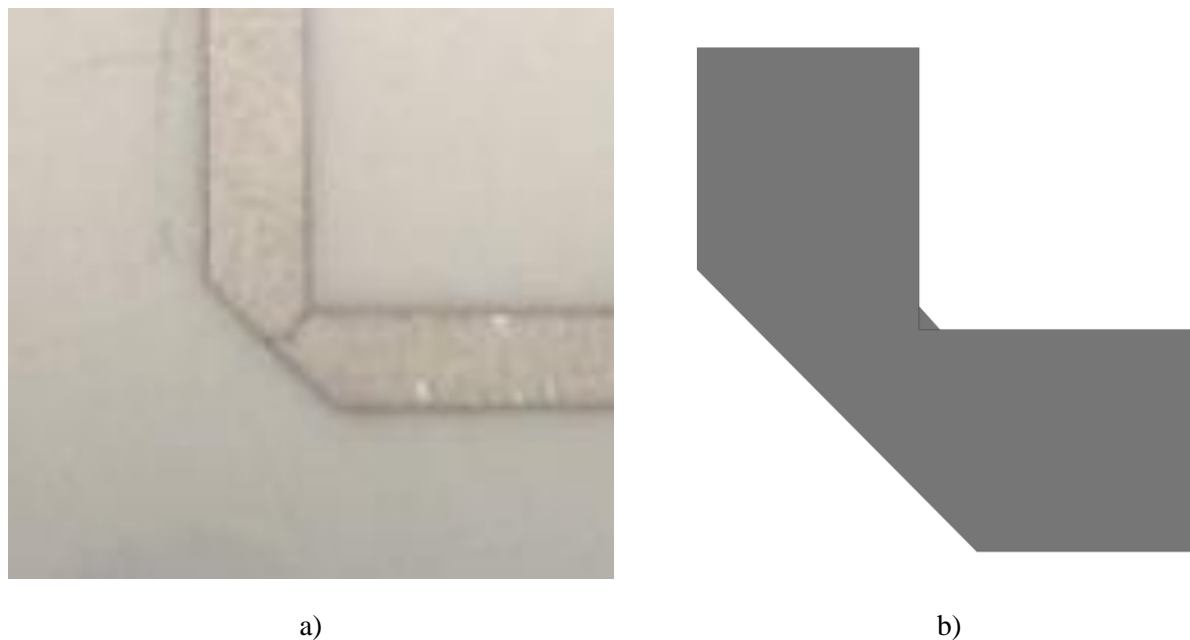
Slika 8.5: Senzorski element sa a) četvrtastim pregibom
b) zaobljenim pregibom c) kosim pregibom

Rezultati simulacije na 2.2 GHz prikazani u tabeli 8.2 pokazali su da je uneseno slabljenje u slučaju kosog pregiba pri vlažnoj matrici bolje za približno 0.8 dB, te je ova vrsta pregiba korišćena u daljem postupku optimizacije senzorskog elementa.

Tabela 8.2: Rezultati simulacije za razne oblike pregiba provodne linije kod mikrostripa

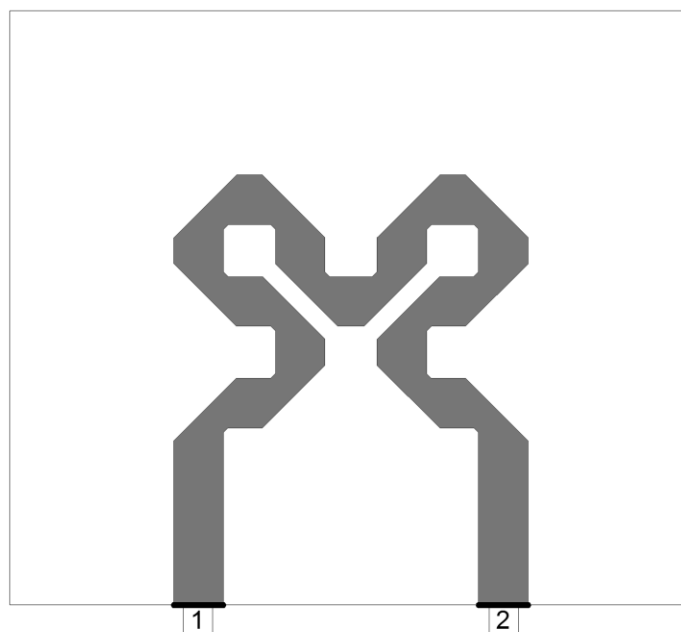
Oblik pregiba	Stanje matrice	S11 [dB]	S21 [dB]	Opseg faza [°]
Četvrtasti	Suva	-16.79	-0.58	148.9
	Vlažna	-9.08	-8.00	
Zaobljeni	Suva	-20.61	-0.51	143.6
	Vlažna	-10.98	-7.33	
Kosi	Suva	-28.75	-0.46	137.3
	Vlažna	-13.80	-6.62	

Na napravljenim mikrostrip linijama koje su bile upotrebljene za karakterizaciju keramičkog supstrata i granularne matrice uočene su pukotine koje su se javljale kod pregiba, slika 8.6a. Kako bi se prevazišao pomenuti problem, kod konačnog senzorskog elementa bilo je potrebno „zatupiti“ prav ugao kod pregiba umetanjem jednakokrakog pravouglog trougla katete 150 μm , slika 8.6b. Umetnutni trougao je vrlo malih dimenzija stoga se njegovo postavljanje ne odražava na odziv senzorskog elementa.



Slika 8.6: Detalj pregiba mikrostrip linije: a) pukotina koja se javlja b) rešenje problema

Imajući u vidu gore pomenutu izmenu i zahteve elektronskog kola projektovana je konačna varijanta senzorskog elementa sa kosim pregibom koja je prikazana na slici 8.7.



Slika 8.7: Predlog senzorskog elementa

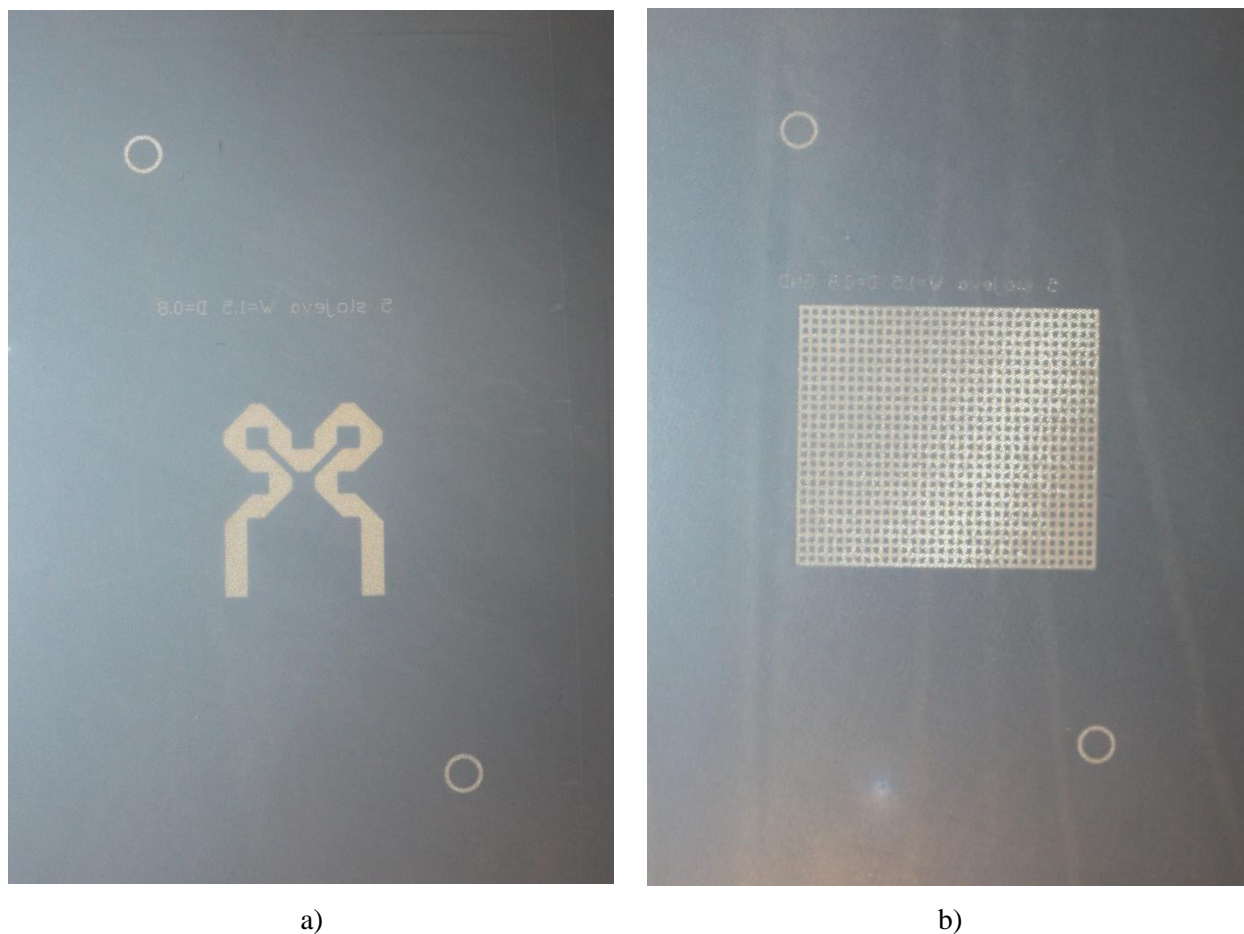
Predloženi senzorski element ostvaruje fazni opseg od 115.2° pri unesenom slabljenju od 6.12 dB, dok minimalni povratni gubici iznose 12.72 dB na radnoj učestanosti od 2.2 GHz. Dimenzije supstrata na kom je izrađen senzorski element iznose 20.7 mm x 18.2 mm.

8.4 Fabrikacija predloženog senzorskog elementa

Projektovani senzorski element fabrikovan je u LTCC tehnologiji na ukupno 5 slojeva Ceramtec GC trake. Detaljniji opisi postupka fabrikacije mogu se naći u odgovarajućoj literaturi [108-110]. U nastavku će koraci fabrikacije biti posredno opisani kroz opis procesa fabrikacije senzorskog elementa.

Postupak fabrikacije započeo je projektovanjem maske za sitoštampanje gornjeg sloja senzorskog elementa. Tom prilikom uzeto je u obzir skupljanje LTCC traka u lateralnim pravcima tokom pečenja pa su dimenzije projektovanog senzorskog elementa povećane za 17% kako bi konačne dimenzije senzorskog elementa odgovarale projektovanim. Tako pripremljena maska je izrađena u vidu fotomaske na transparentnoj foliji za potrebe izrade sita fotopostupkom. Sito za štampanje gornjeg sloja je napravljeno na mrežici finoće 325, upotrebom fotoosetljivog kapilarnog filma debljine 30 μm , slika 8.8a. Kružići koji su prisutni u gornjem desnom i donjem levom uglu služe za pozicioniranje sita u odnosu na LTCC traku prilikom procesa štampanja.

Kako bi se formirala mikrostrip arhitektura neophodno je realizovati i sloj uzemljenja. U standardnoj tehnologiji štampanih ploča ovaj sloj se realizuje u vidu poligona koji je u potpunosti ispunjen provodnikom. U slučaju LTCC tehnologije sloj uzemljenja formira se u vidu mreže provodnih linija širine 250 μm koje su na međusobnom rastojanju od 500 μm tako da ukupna površina supstrata koju zauzima provodnik bude manja od 50% [111]. Na ovaj način je obezbeđeno da ne dođe do deformacije podloge prilikom pečenja usled različitih termičkih koeficijenata širenja (skupljanja) LTCC traka i provodne paste. Sito za realizaciju sloja uzemljenja napravljeno je na mrežici finoće 200 pomoću fotoosetljivog kapilarnog filma debljine 30 μm , slika 8.8b.

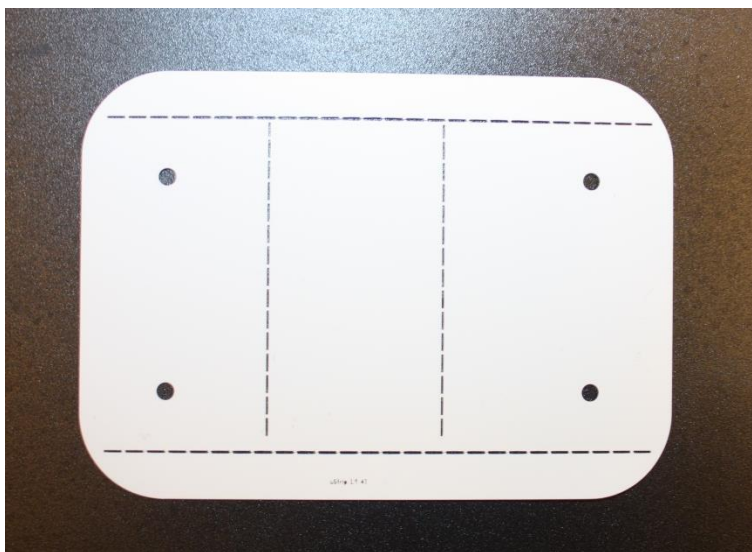


Slika 8.8: Sito maske za: a) gornji provodni sloj senzorskog elementa b) donji provodni sloj senzorskog elementa

Nakon izrade sito maski, LTCC trake su isečene i izbušene i na taj način pripremljene za proces štampanja i laminacije. Izgled obrađene LTCC trake prikazan je na slici 8.9. Za potrebe pripreme LTCC traka korišćen je Nd:YAG Laser Rofin CombiLine Advanced WT. Kružni otvori koji se nalaze u uglovima trake imaju višestruku ulogu. Pre svega koriste se za poravnavanje traka prilikom postavljanja u kalup za laminaciju, a potom i za pozicioniranje trake u odnosu na otisak sito štampe.

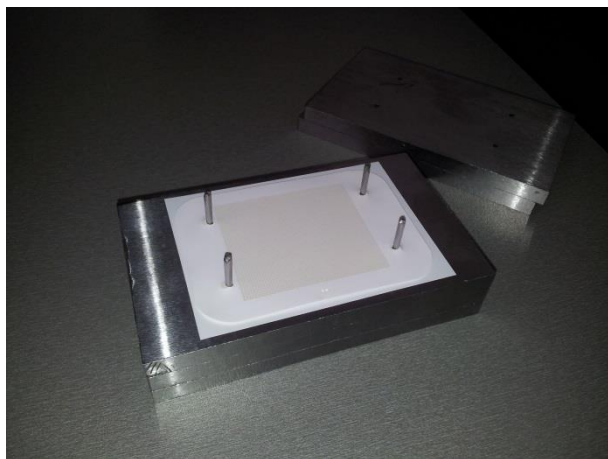
Kako bi se nakon pečenja senzorski element odvojio od ostatka podloge, na traci su napravljene perforacije u vidu linija širine 0.2 mm, dužine 2 mm na međusobnom rastojanju od 0.5 mm. Zahvaljujući perforacijama moguće je odlomiti višak podloge tako da ostane samo

senzorski element. Svaka traka označena je tekstem čitljivim sa gornje strane trake koja daje podatak kom sloju pripada traka, kako bi se izbegle greške prilikom štampanja i laminiranja.



Slika 8.9: LTCC traka pripremljena za sito štampu i laminaciju

Nakon pripreme sito maski i LTCC traka, sitoštampom nanesen je gornji i donji provodan sloj. Za potrebe provodnih slojeva korišćena je srebrna pasta TC7303 od proizvođača Heraeus [112]. Potom su LTCC trake ređane u kalup za laminaciju, i smeštane u uniaksijalni laminator, slika 8.10. Proces laminacije vrši se pri povišenom pritisku od 4.1 MPa i povišenoj temperaturi od 75°C.



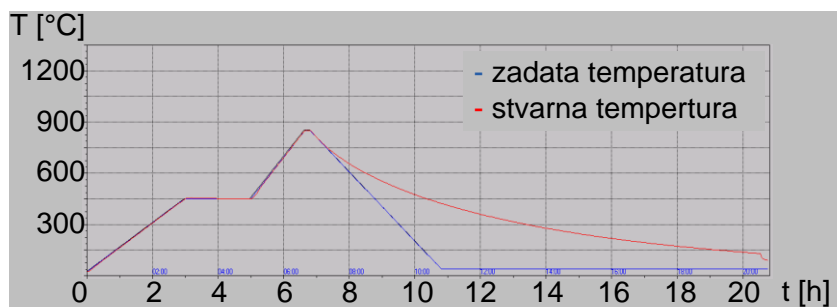
a)



b)

Slika 8.10: Proces laminacije: a) trake poredane u kalup za laminaciju b) uniaksijalni laminator

Rezultat procesa laminacije je kompaktna struktura spremna za pečenje. Prilikom procesa pečenja dolazi do otapanja čestica stakla (sinterovanja) čime se ostvaruju još čvršće veze kako između samih traka, tako i između traka i paste. Pečenje keramike obavljeno je u peći za žarenje po temperaturnom profilu sa slike 8.11.



Slika 8.11: Temperaturni profil pečenja

Nakon pečenja na senzorski element su postavljeni SMA konektori. Izgled izrađenog senzorskog elementa prikazan je na slici 8.12.

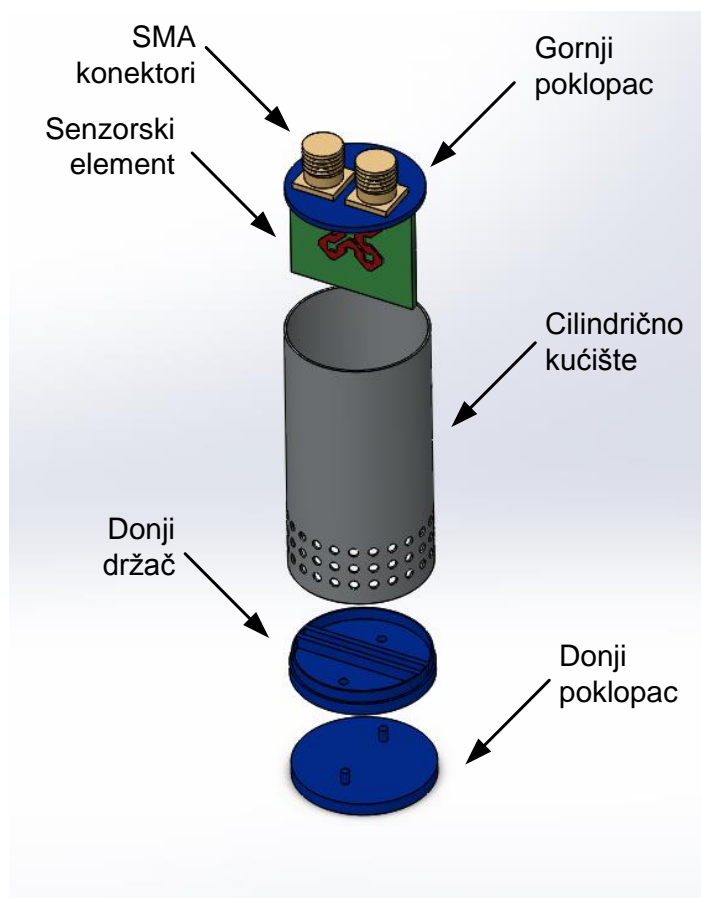


Slika 8.12: Fabrikovani senzorski element sa postavljenim SMA konektorima

8.5 Fabrikacija sonde senzora vlažnosti zemljišta

Napravljeni senzorski element bilo je neophodno smestiti u kućište koje s jedne strane obezbeđuje kvalitetan kontakt elementa i granularne matrice, a s druge strane omogućuje neometano kretanje vode iz zemljišta u matricu i obratno. Sastavni delovi idejnog rešenja osmišljene sonde prikazani su na slici 8.13.

Sonda se sastoji od cilindričnog kućišta od niklovanog mesinga koje je perforirano sa donje strane otvorima prečnika 1.5 mm. Neposredno uz otvore kućišta nalazi se polipropilenska filter tkanina koja omogućuje kretanje vode, sprečava prodiranje krupnih čestica u sondu i zadržava kvarcno brašno unutar sonde. Na senzorski element sa postavljenim SMA konektorima smešten je gornji poklopac sonde koji ga istovremeno učvršćuje sa gornje strane. Senzorski element sa poklopcem postavlja se u cilindrično kućište tako da se nalazi u ravni sa perforacijama. Prostor između dna kućišta i gornjeg poklopca ispunjava se kvarcnim brašnom. Na donjem držaču nalazi se žljeb u koji se postavlja senzorski element tako da bude učvršćen i sa donje strane. Neophodno je bilo da senzorski element bude fiksiran sa obe strane kako bi se sprečilo njegovo pomeranje što bi se odrazilo na kvalitet kontakta sa granularnom matricom. Donji držač ima dva otvora za dopunjavanje kvarcnog brašna kako bi se obezbedilo da pesak u potpunosti okružuje senzorski element. Pomenuti otvori se zatvaraju donjim poklopcem i na taj način se kompletira merna sonda. Izgled merne sonde sa priključenim koaksijalnim kablovima prikazan je na slici 8.14.



Slika 8.13: Sklop merne sonde senzora vlažnosti zemljišta



Slika 8.14: Merna sonda senzora vlažnosti zemljišta

8.6 Merenje vlažnosti zemljišta

Nakon što je sklopljena merna sonda, konstruisana je kalibraciona kriva senzora koja povezuje maseni udeo vode u uzorku zemljišta sa faznim kašnjenjem. Procedura je započeta

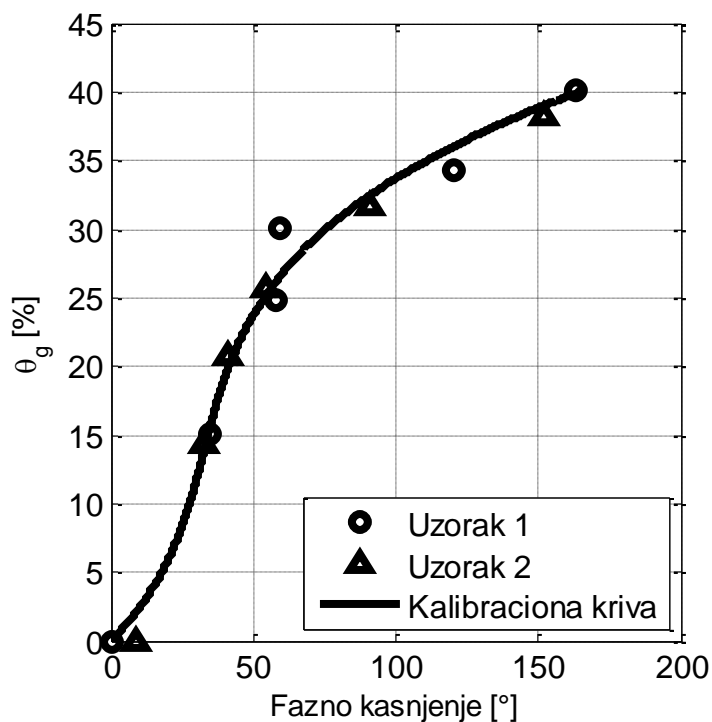
potapanjem merne sonde u destilovanu vodu na period od 24 časa. Za to vreme uzorak zemljišta koji je uzet sa terena sušen je u pećnici na temperaturi od 105°C. Potom je uzorak zemljišta smeštan zajedno sa mernom sondom u plastičnu posudu sa perforiranim dnom zapremine 750 ml, slika 8.15.



Slika 8.15: Uzorak zemljišta sa postavljenom mernom sondom

Tako pripremljen uzorak u plastičnoj posudi postavljen je u posudu sa vodom na 24 časa kako bi se zemljište zasitilo vodom kroz otvore na dnu. Zatim je posuda sa uzorkom zemljišta i mernom sondom ostavljena u zatvorenoj plastičnoj vreći kako bi se ocedio višak vode i zemljište dovelo u stanje poljskog vodnog kapaciteta. Nakon toga urađeno je prvo merenje faznog kašnjenja sonde na radnoj učestanosti od 2.2 GHz, pri čemu je izmerena masa uzorka za potrebe određivanja masenog udela vlažnosti. Potom je uzorak sušen i ostavljen na 24 časa unutar zatvorene plastične vreće kako bi se voda ravnomerno rasporedila u uzorku i sondi. Nakon ovog perioda procedura merenja faznog kašnjenja i određivanja masenog udela je ponovljena. Procedura sušenja i merenja je sprovedena sve do momenta konstantne mase, odnosno kad je uzorak zemljišta postao potpuno suv. Na kraju procedure dobijeno je ukupno šest tačaka koje su određene masenim udelom vode i odgovarajućim faznim kašnjenjem. Pomoću dobijenih kalibracionih tačaka konstruisana je kalibraciona kriva, slika 8.16. Na slici se jasno vidi da je

fazni opseg nešto veći od planiranog što je posledica odstupanja dimenzija fabrikovanog senzorskog elementa od projektovanih i to po širini za približno 100 μm , a po dužini 200 μm što se i odrazilo na odziv senzora.



Slika 8.16: Merenje vlažnosti zemljišta pomoću sonde

Procedura merenja faznog kašnjenja i određivanja masenog udela vode sprovedena je i za drugi uzorak zemljišta različitog hemijskog sastava kako bi se pokazala imunost predloženog senzora na različite tipove zemljišta. Rezultati agrohemijske analize uzoraka zemljišta koji su upotrebljeni za testiranje senzora prikazani su u tabeli 8.3.

Tabela 8.3. Rezultati agrohemijske analize uzoraka zemljišta upotrebljenih za testiranje merne sonde

Uzorak	pH		Humus [%]	Ukupan N [%]	Al-P ₂ O ₅ [mg/100g]	Al-K ₂ O [mg/100g]
	u KCl	u H ₂ O				
1	7.25	8.29	3.39	0.17	17.92	28.53
2	7.30	8.27	2.05	0.10	13.69	21.70

Može se primetiti da prvi uzorak zemljišta koji je korišćen za konstruisanje kalibracione krive sadrži više humusa i ukupnog azota od drugog uzorka. Takođe prvi uzorak prednjači i u koncentraciji pristupačnog fosfora i kalijuma. Navedene razlike, međutim ne utiču značajno na rezultate merenja budući da se merne tačke za drugi uzorak u znatnoj meri poklapaju sa konstruisanom kalibracionom krivom. Apsolutna greška merenja iznosi 0.01 g/g što iznosi 5.36% u odnosu na pun opseg.

8.7 Planirana istraživanja

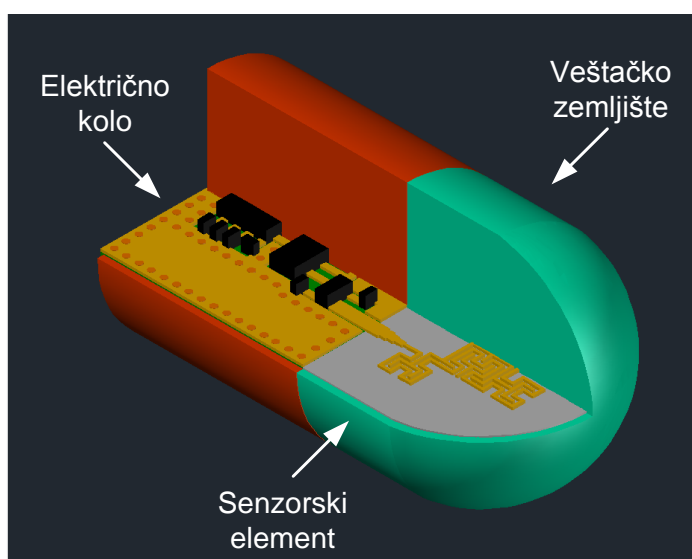
Dobijeni rezultati su svakako obećavajući ali je merenja potrebno ponoviti na reprezentativnom broju uzoraka raznih tipova zemljišta kako bi validicija senzora bila potpuna što će i biti predmet daljih istraživanja. Pred ovim senzorskim rešenjem nalaze se brojna testiranja poput uticaja temperature na rezultate merenja što nije razmatrano u dosadašnjim istraživanjima, optimalan način postavljanja u zemljište i njegova primena na terenu.

Iako predloženo rešenje prati niz prednosti, uočeni su i određeni nedostaci tokom inicijalnih merenja. Prilikom testiranja merne sonde utvrđeno je da su koaksijalni kablovi koji povezuju mernu sondu sa vektorskim analizatorom mreža unosili izvesnu nesigurnost i greške u rezultate merenja, pošto su oni prilikom merenja vlažnosti i odziva senzora neprekidno postavljani i isključivani sa VNA. Sledeći korak u projektovanju senzora bi bio uklanjanje koaksijalnih kablova integracijom merne sonde sa pratećom elektronikom koja je opisana u *glavi 7*. U tom slučaju bi do senzora bilo neophodno sprovesti napajanje i komunikacionu vezu putem koje bi se očitavali rezultati merenja. Odstranjivanjem koaksijalnih kablova bilo bi moguće smanjiti fizičke dimenzije senzora budući da su one bile ograničene širinom SMA konektora.

Naknadnim testiranjem kvarcnog brašna u pogledu retencije vlažnosti utvrđeno je da je njegov poljski vodni kapacitet relativno nizak i da na pritisku od 0.33 bara maseni udeo vode iznosi samo 2.5 %, dok se vlažnost venjenja javlja na 0.61% masenog udela. Ovi podaci ukazuju na potrebu isprobavanja drugih materijala za potrebe granularne matrice gde postoje dva puta. Prvi put vodi ka upotrebi već postojećih materijala kao što je na primer fenolna pena ili zeolit. Fenolna pena je porozni materijal koji se inače koristi kao sunder za sveže cveće zbog svoje

osobine da kad se navlaži svojim kapilarnim silama zadržava vodu ali je ona zbog veličine pora dostupna biljkama. S druge strane zeolit apsorbuje vodu slično kao i zemljište te je stoga dobar kandidat za realizaciju matrice koja bi bila u ravnoteži u pogledu vlažnosti sa okolnim zemljištem. Drugi put vodi ka razvijanju novih materijala u vidu veštačkog zemljišta koje je moguće napraviti od mikrosfera načinjenih od stakla, polietilena ili PMMA (poli metil metakrilat) različitih veličina koje bi oponašale teksturu zemljišta.

Koncept minijaturnog senzora vlažnosti zemljišta sa integrisanim električnim kolom i granularnom matricom u vidu veštačkog zemljišta prikazan je na slici 8.17.



Slika 8.17: Koncept minijaturnog senzora vlažnosti zemljišta

8.8 Zaključak

U ovoj glavi ukratko je opisana LTCC tehnologija u kojoj je fabrikovan robustan senzorski element. Pošto LTCC trake nisu do sad korišćene u razvoju senzorskog elementa bilo je neophodno na samom početku karakterisati njihove električne karakteristike pomoću kojih je bilo moguće optimizovati senzorski element. Isprojektovano senzorsko rešenje uspešno je fabrikovano i integrisano u mernu sondu. Nakon kompletiranja merne sonde ista je i testirana u uzorcima zemljišta različitog hemijskog sastava kako bi se potvrdila tvrdnja da je predloženo

senzorsko rešenje moguće koristiti za različite tipove zemljišta. Pomoću prvog uzorka zemljišta konstruisana je kalibraciona kriva koja povezuje masene udele vlažnosti sa odgovarajućim faznim kašnjenjem. Kalibraciona kriva upotrebljena je za merenje vlažnosti drugog uzorka poznatog masenog udela vlažnosti. Poređenjem izmerenih i poznatih vrednosti faznog kašnjenja relativna greška u odnosu na pun merni opseg nije veća od 5.36%. Na samom kraju ove glave predložen je plan budućih aktivnosti na daljem razvoju i usavršavanju minijaturnog senzora vlažnosti zemljišta.

9 Zaključak

Rezultati ove disertacije su dva senzorska rešenja za merenje vlažnosti zemljišta. Prvi senzor je zasnovan na standardnoj opremi za uzorkovanje zemljišta u neporemećenom stanju – Kopecki cilindrima. Kopecki senzor je nasledio osobine opreme za uzorkovanje i u stanju je da odredi vlažnost uzoraka zemljišta u neporemećenom stanju sa relativnom greškom u odnosu na pun opseg koja je manja od 2.24%. Bitna prednost ovog senzorskog rešenja u odnosu na standardnu gravimetrijsku metodu je što nije vremenski zahtevna.

Budući rad usmeren je prema konstrukciji kalibracionih kriva za sve tipove zemljišta tipičnih za Srbiju, uključujući i zemljišta tretirana različitim tipovima i količinama đubriva. Takva banka kalibracionih kriva bi omogućila brzo i jednostavno merenje vlažnosti zemljišta raznih tipova zemljišta, bez potrebe za kalibracijom za svaki skup različitih uzoraka.

Osmišljeni Kopecki senzor ima mogućnost električne karakterizacije praškastih i tečnih uzoraka što je i pokazano na primeru nikel-manganitnog NTC praha gde je ovaj materijal po prvi put karakterisan na učestanostima do 1 GHz. Budući da je Kopecki senzor robustan, iskorišćen je i za temperaturnu karakterizaciju NTC praha na temperaturama i do 100°C. Zahvaljujući poznatoj relativnoj permitivnosti NTC materijala moguće je projektovati kola za temperaturnu kompenzaciju koja se koriste u modernim telekomunikacionim uređajima.

Drugi senzor vlažnosti zemljišta je minijaturnog tipa i namenjen je *in situ* primenama. Senzor je zasnovan na metodi faznog kašnjenja, koja je principski potvrđena u tehnologiji štampanih ploča na uzorcima kvarcnog peska. Ovim senzorskim elementom je pre svega pokazano da je moguće konstruisati kalibracionu krivu koja povezuje udeo vode sa faznim kašnjenjem. Greška merenja vlažnosti test uzoraka kvarcnog peska nije bila veća od 5.22% u odnosu na pun opseg što iznosi 0.018 m³/m³ apsolutne greške. Eksperimentalno je dokazana analitički pokazana tvrdnja da se na dovoljno visokim učestanostima uticaj električne provodnosti može zanemariti. Kalibracione krive, konstruisane za kvarcni pesak koji je vlažen vodom različitog saliniteta, potpuno se preklapaju na učestanosti od 2.5 GHz, dok na nižoj učestanosti od 0.5 GHz znatno odstupaju jedna od druge. Dobijeni rezultat nesumljivo

predstavlja jedan korak bliže u realizacije senzora vlažnosti zemljišta koji je nezavisan od tipa zemljišta.

Senzorski element koji je proizveden u tehnologiji štampanih ploča pokazao je izvesne nedostatke u pogledu osetljivosti na kvalitet kontakta sa kvarcnim peskom čija vlažnost se utvrđuje. Zatim je primećena i patina na bakarnim provodnicima koja je nastala u hemijskoj reakciji sa hlorom iz slane vode što je degradiralo performanse senzora. Uočena je i potreba za projektovanjem odgovarajućeg električnog kola kojim je moguće realizovati metodu faznog pomeraja i prema kome je potrebno prilagoditi naredni senzorski element.

Iz navedenih razloga projektovano je i izrađeno električno kolo za merenje faznog kašnjenja. Pomenuto kolo je upoređeno za rezultatima merenja vektorskog analizatora mreža pri čemu je maksimalna relativna greška iznosila 5.56% u odnosu na pun merni opseg. Bitno je napomenuti da električno kolo ima mogućnost podešavanja odziva čime je moguće izvršiti kalibraciju senzora. Izrađeno električno kolo je potrebno integrisati u jednu celinu i prilagoditi ga određenim standardima koji se koriste u bežičnim senzorskim sistemima kako bi bilo moguće integrisati predloženi senzor u jedan takav sistem. Integrisano kolo AD8302 koje je centralna komponenta fabrikovanog kola za merenje faznog kašnjenja, ima mogućnost merenja unesenog slabljenja signala koje se može dovesti u vezu za električnom provodnošću zemljišta. Ovaj parametar može se dovesti u vezu sa osobinama zemljišta kao što su veličina čestica, tekstura, poroznost, poljski vodni kapacitet i sadržaj hranljivih materija. Za merenje električne provodnosti bi se mogla koristiti ista sonda koja bi bila pobuđivana signalom niže učestanosti kako bi uticaj provodnosti bio izraženiji.

Naredna verzija senzorskog elementa proizvedena je u LTCC tehnologiji. Fabrikovani element je ugrađen u mernu sondu koja se sastoji od cilindričnog kućišta od niklovanog mesinga koje je perforirano pri donjem obodu i koje je ispunjeno granularnom matricom u vidu kvarcnog brašna. LTCC tehnologija je obezbedila robusnost senzora u agresivnoj sredini kao što je zemljište, dok je granularna matrica rešila problem osetljivosti senzorskog elementa na kvalitet kontakta. Formirana sonda je testirana na dva uzorka zemljišta različitog hemijskog sastava. Rezultati merenja su nedvosmisleno pokazali da tip zemljišta nije uticao na odziv senzora tako

da je vlažnost test uzorka određena pomoću kalibracione krive pokazala apsolutnu grešku od 0.01 g/g što iznosi 5.36% u odnosu na pun opseg.

Bitno je napomenuti da izrađena sonda nema potrošnih delova kao što je to slučaj kod rezistivnog senzora sa granularnom matricom kao i da joj performanse ne degradiraju vremenom zbog otporne LTCC tehnologije. Predloženi senzor je imuniji na šum od senzora koji su zasnovani na merenjima u vremenskom domenu jer je zasnovan na merenju faze a ne amplitude signala. Za razliku od senzora električne impedanse predloženo rešenje ne zahteva skupe uređaje poput VNA ili analizatora impedanse budući da radi na jednoj učestanosti. Odabrana radna učestanost od 2.2 GHz obezbeđuje nezavisnost senzora od električne provodnosti zemljišta.

Na samom kraju disertacije predložene su buduće aktivnosti na daljem usavršavanju predloženog senzora vlažnosti zemljišta od koji su najvažnije: integracija električnog kola sa mernom sondom čime bi se uklonila potreba za koaksijalnim kablovima, razvijanje nove granularne matrice u vidu veštačkog zemljišta, testiranje senzora u laboratorijskim uslovima na raznim tipovima zemljišta i testiranje senzora na terenu.

Literatura

- [1] *World Agriculture: Towards 2015/2030, An FAO perspective*, edited by Jelle Bruinsma, Earthscan Publications Ltd London, 2003.
- [2] Progress for Children UNICEF, „A report card on nutrition“, No. 4, 2006.
- [3] Organizacija za hranu i poljoprivredu Ujedinjenih nacija (eng. *Food and Agriculture Organization of United Nations - FAO*), „Soils store and filter water“, 2015.
<http://www.fao.org/3/a-bc272e.pdf>
(pristupljeno 15.12.2015.)
- [4] G.B.Allison, J.S. Colville, and E.L. Greacen, *Soils: an Australian viewpoint*, CSIRO/Academic Press, Australia pp. 531,1983.
- [5] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Crops and Drops - Making the Best Use of Water for Agriculture*; FAO: Rome, Italy, 2002.
- [6] B.H. George, *Comparison of techniques for measuring the water content of soil and other porous media*, Master Thesis, Australia, 1999.
- [7] Đ. Bošnjak, *Metode istraživanja i određivanja fizičkih svojstava zemljišta*, Jugoslovensko društvo za proučavanje zemljišta, Novi Sad, Srbija, 1997.
- [8] J.R. Nimmo, *Porosity and Pore Size Distribution*, in Hillel, D., ed. *Encyclopedia of Soils in the Environment*: London, Elsevier, v. 3, pp. 295-303. 2004
- [9] Soil Science Glossary Terms Committee (2008). *Glossary of Soil Science Terms 2008*. Madison, WI: Soil Science Society of America. ISBN 978-0-89118-851-3
- [10] T. Saarenketo, „Electrical properties of water in clay and silty soils,“ *Journal of applied Geophysics*, vol. 40, pp. 73-88, March 1998.
- [11] C.A. Black, *Methods of Soil Analysis: Part I Physical and mineralogical properties*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA, 1965.
- [12] <http://www.aardappelpagina.nl/explorer/pagina/soilwater.htm> (pristupljeno 15.07.2015.)
- [13] J. C. Santamarina, K. A. Klein and M. A. Fam., *Soils and Waves*, JohnWiley & Sons Ltd, Chichester., 2001.

- [14] D. R. Lide, ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2005.
- [15] M. Nussberger, *Soil moisture determination with TDR: single-rod probes and profile reconstruction algorithms*, Ph.D. thesis. Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2005.
- [16] D.A. Robinson, S.B. Jones, J.M. Wraith, D. Or and S.P. Friedman, "A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry," *Vadose Zone J.*, vol. 2, pp. 444-475, 2003.
- [17] K. Roth, R. Schulin, H. Fluhler and W. Attinger, „Calibration of time domain reflectometry for Water Content Dielectric Approach," *Water Resources Research*, vol. 26, pp. 2267-2273, 1990.
- [18] A. Sihvola, "Homogenization principles and effect of mixing on dielectric behavior," *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, vol. 11, No. 4, pp. 364-373., 2013.
- [19] G.C. Topp, J.L. Davis and A.P. Annan, „Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines," *Water Resources Research*, vol. 16, pp. 574-582, 1980.
- [20] N. Liu, *Soil and Site Characterization Using Electromagnetic Waves*, Ph.D. thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2007.
- [21] C. Polk, and E. Postow, *CRC Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL., 1986.
- [22] Đ. Bošnjak, *Praktikum iz navodnjavanja poljoprivrednih kultura*, Poljoprivredni fakultet, Naučno obrazovni institut za ratarstvo i povrtarstvo, Novi Sad, 1992.
- [23] M. Visvalingam and J.D. Tandy, „The neutron method for measuring soil moisture content: A review," *European Journal of Soil Science*, vol. 23, pp. 499–511, 1972.
- [24] "NeutronProbe-0001" by Xofc - Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NeutronProbe-0001.svg#/media/File:NeutronProbe-0001.svg> (pristupljeno 23.09.2015.)
- [25] D.S. Chanasyk and M.A. Naeth. Field measurement of soil moisture using neutron probes. *Can. J. Soil Sci.* 76, pp 317 – 323, 1996.

- [26] <http://cpn-intl.com/downloads/CPN-503-Elite.pdf> (pristupljeno 23.09.2013.)
- [27] Nofziger, D.L. „Errors in Gamma-ray measurements of water content and bulk density in nonuniform soils,“ *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, vol. 42., pp. 845-850, 1978.
- [28] D. Or, „Who invented the tensiometer?“ *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 65, pp. 1-3, 2001.
- [29] Irrometer Model R *datasheet*
- [30] SKP 850 *datasheet*
- [31] B. Hanson, D. Peters, S. Orloff, „Effectiveness of Tensiometers and Electric Resistance Sensors Varies with Soil Conditions,“ *Calif. Agric.*, vol. 54, pp. 47-50. 2000.
- [32] T. N. Carlson, J.E. Salem „Measurement of soil moisture using gypsum blocks,“ *International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status. Centennial of Utah State Univ.*, pp. 193-200. 1987.
- [33] Watermark 200SS. Dostupno putem internet adrese:
www.irrometer.com/pdf/sensors/403%20Sensor%20%20Web5.pdf
(pristupljeno 17.10.2014.)
- [34] P. C. Dubois, J. Van Zyl, T. Engman, „Measuring soil moisture with imaging radars,“ *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 33, No. 4, pp. 915–926, 1995.
- [35] A. Sihvola, „Mixing rules with complex dielectric coefficients,“ *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, vol. 1, No. 4, pp. 393–415, 2000.
- [36] B. Will, M. Gerding, C. Schulz, C. Baer, T. Musch, and I. Rolfes, “A time domain transmission measurement system for dielectric characterizations,“ *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 4, No. 3, pp. 349-355, 2012.
- [37] W. Skierucha, A. Wilczek, „A FDR Sensor for Measuring Complex Soil Dielectric Permittivity in the 10–500 MHz Frequency Range,“ *Sensors*, vol. 10, pp.3314-3329, 2010
- [38] Delta-T Devices WET-2 – WET Sensor *datasheet*
- [39] Decagon Devices Inc. Soil Moisture Sensor 10HS *datasheet*
- [40] K. Watson, R. Gatto, P. Weir, P. Buss, „Moisture and Salinity Sensor and Method of Use,“ United States Patents, Patent No.: US 5,418,466, Maj 1995.
- [41] Sentek™ technologies EnvironSCAN™ Probe *datasheet*

- [42] C. L. Pournaropoulos, D. K. Misra, „The co-axial aperture electromagnetic sensor and its application in material characterization”, *Measurement Science and Technology*, vol. 8, No. 11, pp. 1191–1202., 1997.
- [43] D. Berube, F. M. Ghannouchi, P. Savard, „A comparative study of four open-ended coaxial probe models for permittivity measurements of lossy dielectric biological materials at microwave frequencies,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, No. 10, pp. 1928–1934., 1996.
- [44] W.C. Gibson, *The Method of Moments in Electromagnetics 2nd edition*, CRC Press A Chapman & Hall Book, 2015.
- [45] L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan, V.K. Varadan, *Microwave Electronics – Measurement and Materials Characterization*, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England, 2004.
- [46] G.J. Gaskin, J.D. Miller, „Measurement of Soil Water Content Using a Simplified Impedance Measuring Technique,” *J. agric. Engng Res.*, vol. 63, pp. 153 – 160, 1996.
- [47] Theta probe ML3 *datasheet*
- [48] W. Wagner, G. Bloschl, P. Pampaloni, J.C. Calvet, B. Bizzarri, J.P. Wigneron, Y. Kerr, „Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrological applications,” *Nord. Hydrol.*, vol. 38, pp. 1–20, 2007.
- [49] E.G Njoku, L. Li, „Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6 – 18 GHz,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 37, No. 1, pp. 79 – 93, 1999.
- [50] CESBIO/ESA, Dostupno putem internet adrese:
[http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/06/Soil moisture from SMOS](http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/06/Soil_moisture_from_SMOS)
(pristupljeno: 27.09.2015.)
- [51] R.P. Prakash, D. Singh, „A Fusion Approach to Retrieve Soil Moisture With SAR and Optical Data,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 5, No. 1, February 2012.
- [52] K.C. Kornelesen, P. Coulibaly, „Advances in soil moisture retrieval from synthetic aperture radar and hydrological applications,” *Journal of Hydrology*, Vol. 476, pp. 460 – 489, 2013.

- [53] R. Siegel, „Land mine detection,” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, pp. 22 – 28, December 2002.
- [54] S. Du and P. Rummel, „Reconnaissance studies of moisture in the subsurface with GPR,” *Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Kitchener, Ontario, pp. 1241-1248., June 1994.
- [55] D.H. Jayawickreme, R. L. Van Dam, D. W. Hyndman, „Subsurface imaging of vegetation, climate, and root-zone moisture interactions,” *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, pp. L18404, 2008.
- [56] M.B. Charlton, „Principles of ground-penetrating radar for soil moisture assessment,” *MBCharlton.com Research Note 3*, June 2008.
- [57] P.P.L. Regtien, „Humidity sensors,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 23, pp. 1-2, 2012.
- [58] H.Xing, J. Li, R. Liu, „2.4 GHz On-Board Parallel Plate Soil Moisture Sensor System,” *Sensors for Industry Conference*, pp. 35-38, 2005.
- [59] A. Pardossi, L. Incrocci, G. Incrocci, F. Malorgio, P. Battista, „Root zone sensors for irrigation management in intensive agriculture,” *Sensors*, vol. 9, pp. 2809–2835., 2009.
- [60] L. Chow, Z.Xing, H.W. Rees, F. Meng, „Field performance of nine soil water content sensors on a Sandy Loam soil in New Brunswick, Maritime region, Canada,” *Sensors*, vol. 9, pp. 9398–9413.. 2009.
- [61] Spectrum Technologies, Inc. Dostupno putem internet adrese
<http://www.specmeters.com/soil-and-water/soil-moisture/soil-moisture-sensors/>
(pristupljeno 21.06.2012.)
- [62] Vernier. Dostupno putem internet adrese:
<http://www.vernier.com/products/sensors/sms-bta/>
(pristupljeno 21.06.2012.)
- [63] Dynamax. Dostupno putem internet adrese:
<http://www.dynamax.com/ml2.htm>
(pristupljeno 21.06.2012.)

- [64] Campbell Scientific. Dostupno putem internet adrese:
<http://www.campbellsci.com.au/cs620>
(pristupljeno 21.06.2012.)
- [65] Irrrometer. Dostupno putem internet adrese:
<http://www.irrometer.com/sensors.html#wm>
(pristupljeno 21.06.2012.)
- [66] J. Weremczuk, G. Tarapata, R.S.Jachowicz, „The ink-jet printing humidity sorption sensor—Modelling, design, technology and characterization,„ *Meas. Sci. Technol.*, 23, pp. 14003, 2012.
- [67] G. Kitić V. Crnojević Bengin, “A Sensor for the Measurement of the Moisture of Undisturbed Soil Samples”, *Sensors*, vol. 13, pp. 1692-1705, 2013.
- [68] A. Wilczek, A. Szyplowska, W. Skierucha, J.Cieśla, V. Pichler, G. Janik, „Determination of soil pore water salinity using an FDR sensor working at various frequencies up to 500 MHz“ *Sensors*, vol. 12, pp. 10890–10905., 2012.
- [69] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John Wiley and Sons, New Jersey, 1998.
- [70] Y. Chen, D. Or, „Effects of Maxwell-Wagner polarization on soil complex dielectric permittivity under variable temperature and electrical conductivity,“ *Water Resour. Res.*, vol. 42, pp. 1–14., 2006.
- [71] G. Matthaei, L. Young,; E.M.T. Jones, „Low-pass and high-pass filters using semi-lumped elements or waveguide corrugations,“ in *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, 1st ed.; Artech House: Norwood, MA, USA, pp. 360–364., 1985.
- [72] V. Komarov, S. Wang,; J. Tang, „Permittivity and measurements,“ in *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*; Chang, K., Ed.; John Wiley and Sons, Inc.: New York, NY, USA, pp. 3693–3711., 2005.
- [73] D. Faktorova, „Complex permittivity of biological materials measurement at microwave frequencies,“ *Meas. Sci. Rev.*, vol. 7, pp. 12–15., 2007.
- [74] D. A. Robinson, S. P. Friedman, „The effective permittivity of dense packings of glass beads, quartz sand and their mixtures immersed in different dielectric backgrounds,“ *J. Non-Crystal. Solid.*, vol. 305, pp. 261–267., 2002.

- [75] M. Bittelli, F. Salvatorelli, P. R. Pisa, „Correction of TDR-based soil water content measurements in conductive soils,“ *Geoderma*, vol. 143, pp. 133–142., 2008.
- [76] M. C. Dobson, F. T. Ulaby, M. T. Hallikainen, M. A. El-Rayes, „Microwave dielectric behaviour of wet soil. Part II: Dielectric mixing models,“ *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, vol. 23, pp. 35–45. 1985.
- [77] G.C. Topp, S. Zegelin, I. White, „Impacts of the real and imaginary components of relative permittivity on time domain reflectometry measurements in soils,“ *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 64, pp. 1244–1252., 2000.
- [78] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling, *Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing*, 2nd ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1992.
- [79] R.B. Grisso, M. Alley, W.G. Wysor, D. Holshouser, W. Thomason, „Precision farming tools: Soil electrical conductivity,“ *Virginia Cooperative Extension*, pp. 442-508, 2009.
- [80] G. M. Stojanović, G. Kitić, S. M. Savić, V. Crnojević Bengin, „Electrical characterization of nickel manganite powders in high-frequency range,“ *Journal of Alloys and Compounds*, vol 554, pp. 264-270, 2013.
- [81] G. Stojanović, O. Aleksić, S. Savić, Lj. Živanov, „Application of NTC thick-filmsegmented thermistor for the realisation of an ultra-low power thermostat,“ *Electroceramics XI*, pp. L-031-P., 2008.
- [82] M. L. Singla, S. Sharma, B. Raj, V. R. Harchekar, „Characterization of transition metal oxide ceramic material for continuous thermocouple and its use as NTC fire wire sensor,“ *Sensor. Actuat. A*, vol. 120, pp. 337–342., 2005.
- [83] P. Umadevi, C.L. Nagendra, „Preparation and characterisation of transition metal oxide micro-thermistors and their application to immersed thermistor bolometer infrared detectors,“ *Sensor. Actuat. A*, vol. 96, pp. 114–124. 2002.
- [84] S. Karanth, M.A. Sumesh, V. Shobla, H. Ganesh Shanogue, C.L. Nagendra, „Infrared detectors based on thin film thermistor of ternary Mn–Ni–Co–O on micro-machined thermal isolation structureOriginal,“ *Sensor. Actuat. A*, vol. 153, pp. 69–75., 2009.

- [85] C.A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, Publisher Inc., New York, 1989.
- [86] R. Liu, Z. Zhang, R. Zhong, X. Chen and J. Li, *Nanotechnology synthesis study: Technical Report 0-5239-1*, pp.76-79, April 2007.
- [87] J.D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd ed., Wiley, New York, 1999.
- [88] AWR Microwave Office, National Instruments
- [89] K.C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, P. Bhartia, *Microstrip Lines and Slotlines*, Artech House Inc., Norwood 1996.
- [90] V. Crnojević-Bengin, „Nove konfiguracije fraktalnih i LH mikrostrip rezonatora”, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 2006.
- [91] K.F. Khaled, „Studies of the corrosion inhibition of copper in sodium chloride solutions using chemical and electrochemical measurements” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 125, pp. 427-433, 2011.
- [92] A.J. Hawkins, *Sensor for sensing moisture in soils*. United States Patents, Patent No.: US 7,705,616 B2, April 2010.
- [93] AD8302 – RF/IF Gain and Phase Detector *datasheet*. Dostupno putem internet adrese: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8302.pdf> (pristupljeno 26.11.2015.)
- [94] MAX2751 – Voltage-Controlled Oscillators <https://www.maximintegrated.com/en/products/comms/wireless-rf/MAX2751.html> (pristupljeno 26.11.2015.)
- [95] SMV1245: Hyperabrupt Junction Tuning Varactors http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/SMV1245_Series_200060I.pdf (pristupljeno 26.11.2015.)
- [96] HY22-73: 90-Degree Hybrid 2.1 – 2.3 GHz [http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Skyworks%20PDFs/HY22-73\(LF\).pdf](http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Skyworks%20PDFs/HY22-73(LF).pdf) (pristupljeno 26.11.2015.)
- [97] Skyworks application note: „A Varactor Controlled Phase Shifter for PCS Base Station Applications“, august 13, 2009.

- [98] Y. Imanaka, *Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology*. Springer Science + Business Media, Inc., 2005.
- [99] M. Oppermann, „RF Radio Links and LMDS Communications – Module Technology, Status and Trends,” *Advancing Microelectronics*, vol 28, No. 6, November/December 2001.
- [100] Electronics Materials, Packaging and Reliability Techniques (EMPART), University of Oulu, Finland
<http://www.infotech.oulu.fi/Annual/2006/empart.html>
(pristupljeno 24.11.2015.)
- [101] P. Uhlig, R. Follmann, O. Kersten, T. Kohl, R. Kulke, G. Möllenbeck: „A 20 GHz Fractional-N Synthesizer Module for Satellite Operation,” *IMAPS Nordic, Conference Proceedings* pp. 124-128, Helsingør, Denmark, September 14-16, 2008.
- [102] L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan, V.K. Varadan *Microwave Electronics – Measurement and Materials Characterization*. John Wiley and Sons, West Sussex, England, 2004.
- [103] R.M. Pannel and B. W. Jervik, „Two simple methods for the measurement of the dielectric permittivity of low-loss microstrip substrates” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 29, pp. 383-386, April 1981.
- [104] N.K. Das, S. M. Voda, D.M. Pozar „Two Methods for the Measurement of Substrate Dielectric Constant“, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 35, No. 7, July 1987.
- [105] LTCC Ceramtape GC - CeramTec
- [106] R.J.P. Douville and D.S. James, „Experimental Characterization of Microstrip Bends and Their Frequency Dependent Behaviour,” 1973 *IEEE Conference Digest*, pp. 24-25., October 1973.
- [107] R.J.P. Douville and D.S. James, „Experimental Study of Symmetric Microstrip Bends and Their Compensation,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 26, pp. 175-181, March 1978.

- [108] G. Radosavljević, „Nove konfiguracije induktorskih struktura i njihova primena u RF elektronici i mikrosenzorima”, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 2010.
- [109] H. Birol, „ Fabrication of Low Temperature Co-Fired Ceramic (LTCC)-Based Sensor and Micro-fluidic Structures,“ Ph.D. thesis. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2007.
- [110] Y. Fournier, „3D Structuration Techniques of LTCC for Microsystems Applications,“ Ph.D. thesis. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2010.
- [111] VTT technical Research Centre of Finland, „Design Guidelines - Low Temperature Co-Fired Ceramic Modules“, 2014.
- [112] Heraeus TC7303
http://heraeus-circuits-components.com/media/webmedia_local/media/datasheets/lccmaterials/TC_7303_en.pdf
(pristupljeno 17.11.2015.)