

Mikrotalasni senzor za detekciju padavina

Ana Tatović
Univerzitet u Kragujevcu
Fakultet tehničkih nauka
Čačak, Srbija

ana.tatovic@ftn.kg.ac.rs
<https://orcid.org/0000-0001-5653-0850>

Stefan Radovanović
Univerzitet u Beogradu
Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija

rs225041p@student.etf.bg.ac.rs
<https://orcid.org/0009-0008-8673-553X>

Milka Potrebić Ivaniš
Univerzitet u Beogradu
Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija

milka_potrebic@etf.bg.ac.rs
<https://orcid.org/0000-0002-4866-6608>

Apstrakt—U radu je prikazan postupak projektovanja mikrotalasnog senzora za detekciju padavina. Senzori su projektovani u planarnoj tehnici u vidu mikrotalasnog rezonatora, kao i kvadratnog spiralnog kalema. Detektovanje padavina se zasniva na analizi frekvencijskog odziva senzora. Prvo se posmatra senzor bez padavina i određuje njegov amplitudski odziv, koji se zatim poredi sa odzivom senzora kada postoje padavine. Vrednost pomeraja amplitudskog odziva ka nižim učestanostima određuje tip padavina. Model predložene senzora realizovan je u Cadence AWR Microwave Office.

Ključne reči—detekcija padavina, mikrotalasni senzor, polutalasni rezonator, pravougaoni spiralni kalem

I. UVOD

Svakodnevno se suočavamo sa padavinama, pa se procenjuje da je u cilju njihove detekcije oko trećine kopna Zemlje pokriveno sensorima za njihovu detekciju [1], [2]. U cilju bezbednog funkcionisanja transporta i infrastrukture u zimskim uslovima, razvoj senzorskih sistema za detekciju padavina postaje od suštinskog značaja. Ovi sistemi imaju značajnu ulogu u regulisanju saobraćaja, održavanju puteva i smanjenju rizika od nesreća usled zimskih vremenskih uslova. U regionima gde se veći deo godine zastupljene padavine u vidu snega i leda, treba obezbediti infrastrukturu koja će pouzdano funkcionisati u zimskim uslovima. Prvenstveno se misli na elektroenergetsku [3] i komunikacijsku infrastrukturu [4]. Treba izdvojiti i probleme u pomorskom saobraćaju i industrijska postrojenja u zimskim uslovima niskih temperatura gde dolazi do pojave naslaga slanog leda [5]. Pojava leda na letelicama je još jedan od problema koji se javlja u avio saobraćaju zbog mogućih fatalnih posledica [6], [7]. Atmosferski led može se javiti kod vetroturbina što može izazvati velike probleme u funkcionisanju i na kraju rezultirati ispadom iz elektroenergetske mreže [8]. U tom kontekstu, razvoj senzora za preciznu detekciju prisustva padavina u vidu snega i leda predstavlja krucijalan korak ka unapređenju bezbednosti i efikasnosti različitih infrastrukturnih sistema.

Razvijene su različite tehnologije [4], [5], [9]-[10] i standardi [11]-[12] za detekciju padavina u vidu leda. Postojeći senzori snega i leda se baziraju na kapacitivnim [13], optičkim [14]-[15] i ultrazvučnim [16]-[17] metodama. Komercijalni senzori za vetroturbine su često mogu biti nedovoljno osetljivi na pojavljivanje leda na lopaticama, što može uzrokovati kašnjenje pri zaustavljanju turbine [10]. Postojeći optički senzori imaju problem pri detekciji leda u prisustvu šuma, skupi su, a njihova integracija je zahtevna [14], [18], [19]. Kapacitivni i rezistivni senzori leda na putevima imaju ograničenu preciznost i veliki su potrošači električne energije što zahteva složenu kablovsku instalaciju [20]. Ultrazvučne metode su relativno nove [16] i zahtevaju testiranje u realnom okruženju sa velikom vibracijom i bukom.

Najnovije metode detekcije na mikrotalasnim učestanostima omogućavaju realizaciju preciznih senzora, za detekciju u realnom vremenu, koji se primenjuju u industriji [21], biomedicini [22]-[25] i hemijske primene [26]-[29]. Mikrotalasni senzori se uspešno koriste za detekciju materijala u čvrstom, tečnom i gasnom stanju [30]. Ovi tipovi mikrotalasnih senzora su prilagođeni protokolima za bežične komunikacije i omogućavaju implementaciju bežičnih mreža za detekciju [31]. Ovi senzori pouzdano rade u zimskim vremenskim uslovima, a zbog jednostavne implementacije cena proizvodnje je niska. Jedna od značajnih industrijskih primena mikrotalasnih senzora je za merenje vlage u industriji prerade celuloze i drveta [32]. Još jedna od važnih komercijalnih primena mikrotalasnih senzora je za merenje protoka nafte, gasa i vode [33]. Mikrotalasni senzori se koriste u nadzoru naftnih bušotina, kao i za praćenje korozije [32]. Na mikrotalasnim učestanostima, biomedicinski senzori imaju primenu u neinvazivnoj dijagnostici, zato što je mikrotalasno zračenje bezbedno za primenu kod živih organizama [34].

Rezonantne strukture na mikrotalasnim učestanostima pokazale su osetljivost, preciznost i ponovljivost, a imaju i velike Q -faktore [31]. Navedene karakteristike mikrotalasnih senzora čine ih odličnim kandidatima za detekciju padavina grupišući ih u bežične senzorske mreže, jeftine za realizaciju i sa minimalnom potrošnjom.

U radu će biti analizirani mikrotalasni senzori realizovani u vidu planarnih štampanih rezonatora, čija rezonantna učestanost zavisi od geometrije strukture. Kada se materijali, poput leda ili snega, nađu u okruženju senzora, dolazi do promene njegove rezonantne učestanosti. Korišćenjem ovog fenomena, moguća je detekcija materijala u blizini mikrotalasnih rezonantnih struktura, na osnovu odstupanja rezonantne učestanosti, tj. frekvencijskog odziva senzora.

II. KARAKTERISTIKE PADAVINA NA MIKROTALASNIM UČESTANOSTIMA

Elektromagnetska svojstva leda i snega na mikrotalasnim učestanostima opisuju se pomoću dielektrične permitivnosti i tangensa ugla gubitaka. Voda ima realnu relativnu permitivnost oko 90 (na 0° C i 5 GHz), i velike gubitke koji su posledica polarizacije O-H veza na mikrotalasnim učestanostima. Led ima dielektričnu permitivnost 3.2 (na 0° C i 5 GHz). Ova značajna razlika u permitivnosti veoma je bitan podatak u razlikovanju leda od vode.

Karakteristike leda su složene i određuju se na osnovu lokalne temperature, pritiska, relativne vlažnosti i mešavine vode i leda. Ovo dovodi do stvaranja leda različite gustine i strukture. Sneg je primer mešavine leda, vode i vazduha gde različiti uslovi sredine utiču na njegov tip i karakteristike.

Kako mikrotalasni senzori detektuju materijale na osnovu promene efektivne permitivnosti, mogu se klasifikovati različite gustine leda i snega, kao i sadržaj vode [34]-[35].

III. PLANARNI MIKROTALASNI REZONATORI

Analiziraju se moguće realizacije senzora na mikrotalasnim učestanostima za detekciju padavina. Senzori su realizovani u vidu planarnih rezonatora. Rezonatori se mogu klasifikovati kao rezonatori sa koncentrisanim ili kvazi-koncentrisanim elementima i kao rezonatori sa raspodeljenim parametrima u vidu sekcije voda.

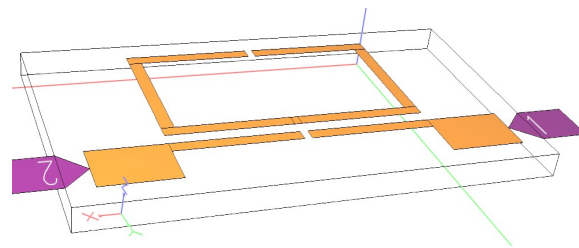
Za mikrotalasne učestanosti, postoji više realizacija rezonatora [36]. Rezonantna učestalost određena je fizičkim dimenzijama rezonatora i karakteristikama korišćene tehnologije [37]. U mikrotrakastoj tehnici rezonantna učestalost određena je dimenzijama i parametrima supstrata kao što su dielektrična konstanta, debljina supstrata, gubici u provodnicima i gubici u dielektriku.

Osnovne karakteristike rezonatora su dimenzije, faktor dobre neopterećenog rezonatora, neželjene rezonancije i drugo [37]. Zahtevi tržišta za što kompaktnijim uređajima uslovlili su minijaturizaciju planarnih komponenti. Manje dimenzije u opštem slučaju imaju za posledicu veće gubitke u slučaju realizacije u mikrotrakastoj tehnici. Na osnovu definicije faktora dobre neopterećenog rezonatora jasno je da manji rezonatori imaju i mogućnost skladišta manje energije pa samim tim i manji faktor dobre. Manji faktor dobre neopterećenog rezonatora izaziva veće gubitke u propusnom opsegu. Neophodno je naći način kompenzacije smanjenja faktora dobre usled smanjenja dimenzija. Neželjene rezonancije se javljaju kod rezonatora realizovanih u mikrotrakastoj tehnici. Elementi realizovani pomoću odsečaka voda, na određenim učestanostima, ponašaju se kao polutalasn i četvrttalasni vod i unose neželjene efekte [38]. U slučaju da se kao elementi koriste koncentrisane i kvazi-koncentrisane komponente, neželjene rezonancije su značajno potisnute. Potiskivanje neželjenih rezonancija, ka višim učestanostima, veoma je važno kod realizacije senzora da bi se pouzdano izvršila detekcija. Važno je da se pri postojanju uzorka ne detektuje neželjena rezonanca i donese pogrešan zaključak. Snaga kod planarnih realizacija za prenosive uređaje nije kritična, pa nije ni razmatrana.

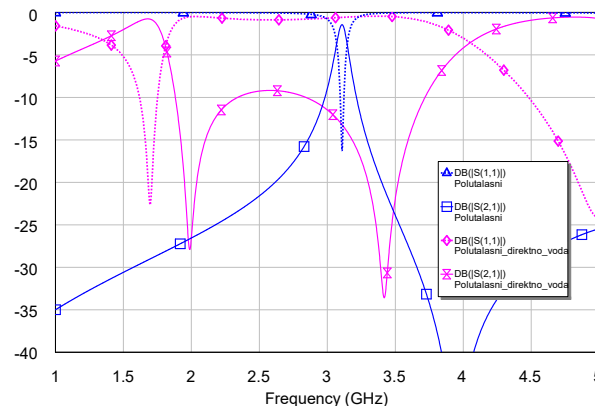
U radu su analizirane dve planarne realizacije senzora u vidu polutalasnog rezonatora i pravougaonog spiralnog kalema.

IV. SENZOR U VIDU POLUTALASNOG REZONATORA

Za karakterizaciju i detekciju materijala često se koriste polutalasn i rezonatori u obliku pravougaonika ili ukosnice (open-loop resonator), kao i njihove modifikacije sa smanjenom površinom zauzeća koja se dobija meandriranjem rezonatora [36]. Kao primer uzet je polutalasn i rezonator karakteristične impedanse 100Ω za rezonantnu učestanost 3.1 GHz. Rezonator je realizovan na mikrotrakastoj podlozi RO 4003C debljine $h = 1 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 3.55$, $\text{tg}\delta = 0.0021$, i debljine metalizacije $t = 18 \mu\text{m}$ (Sl. 1). Uzorak materijala, voda ili led, je posmatran kao sloj debljine 0.1 mm. Prvo je uzorak postavljan direktno na površinu senzora. U slučaju da je uzorak voda, gde je $\epsilon_r \approx 90$, uočava se promena oblika amplitudskog odziva (Sl. 2), pored pomerana rezonantne učestanosti ka nižim vrednostima.

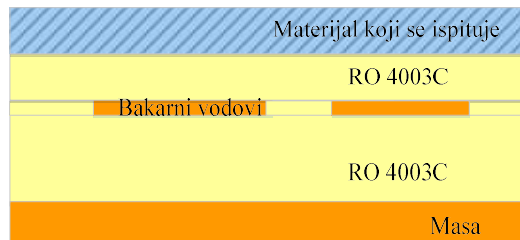


Sl. 1 Polutalasn i rezonator realizovan u mikrotrakastoj tehnici.



Sl. 2 S-parametri polutalasnog rezonatora u slučaju kad nema uzorka i kad postoji voda direktno na površini senzora.

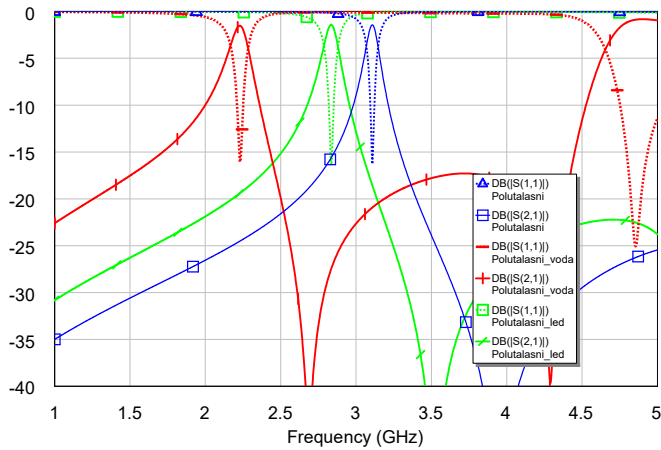
Uočeno je da dodavanjem sloja dielektrika, između površine senzora i uzorka, oblik amplitudskog odziva ostaje približno isti što olakšava sam proces detekcije. Poprečni presek senzora sa dodatnim dielektrikom i uzorkom materijala prikazan je na Sl. 3.



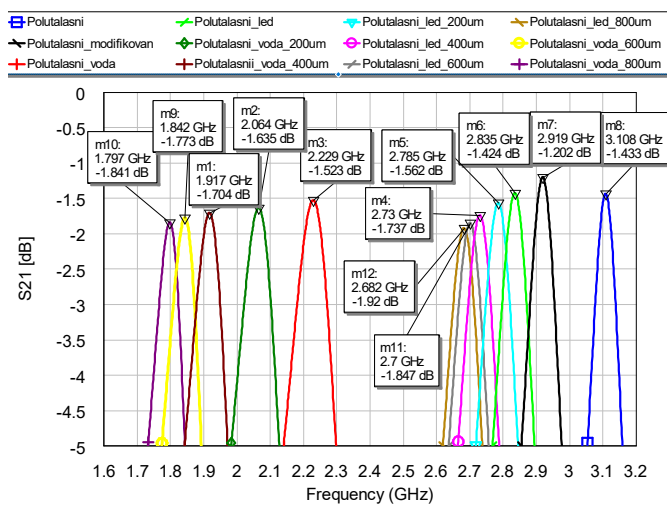
Sl. 3 Poprečni presek senzora kad se doda prekrivka i uzorak materijala koji se ispituje.

Na Sl. 4. je prikazan amplitudski odziv senzora bez uzorka i sa uzorkom, kad postoji dodat dielektrični sloj na sam senzor ispod uzorka. Uočava se pomeraj amplitudskog odziva senzora sa uzorkom u odnosu na slučaj kad nema uzorka. Za debljine oba uzorka uzeta je vrednost od $100 \mu\text{m}$. Za oba uzorka, vodu i led, dobija se pomeraj rezonantne učestanosti ka nižim vrednostima što omogućuje detekciju postojanja uzoraka.

Promenom debljine uzorka uočava se pomeraj u rezonantnoj učestanosti, što otvara mogućnost detekcije debljine uzorka (Sl. 5). Posmatrani su uzorci debljine od 0.1 mm do 0.8 mm, i za vodu i za led. Na Sl. 5 prikazan je amplitudski odziv senzora za oba uzorka kad se posmatra pet debljina uzoraka. Pored toga uveden je referentni odziv senzora kada je mikrotrakasta podloga prekrivena dielektrikom debljine 0.1 mm. Uzet je isti dielektrik kao i same podloge tj. RO 4003C.



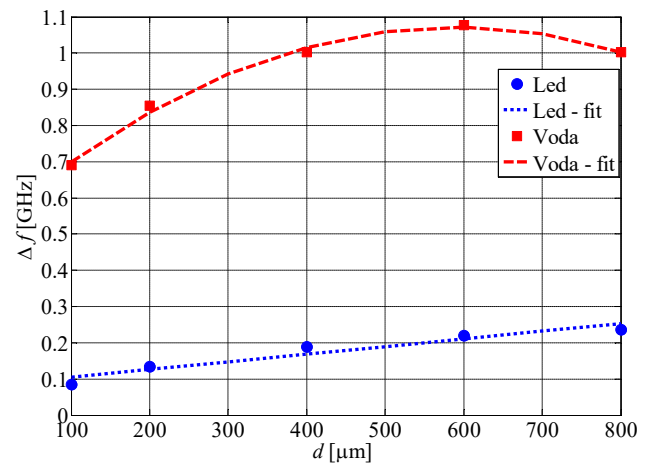
Sl. 4 S-parametri polutalasnog rezonatora u slučaju kad nema uzorka materijala i kad postoji.



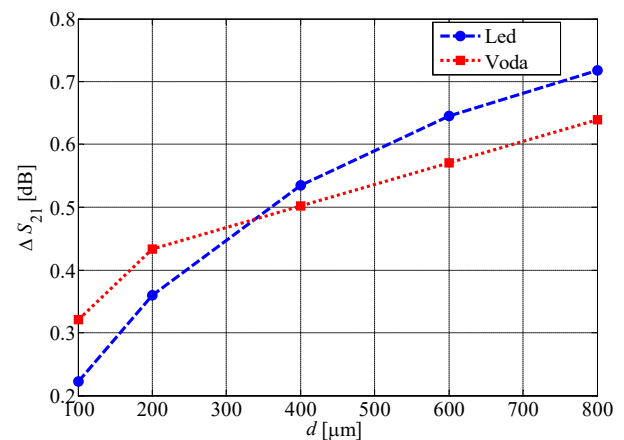
Sl. 5 S-parametri polutalasnog rezonatora u slučaju kad nema uzorka materijala i kad postoji uzorak vode i leda različitih debljina.

Da bi se bolje uočio pomeraj rezonantne učestanosti senzora u prisustvu uzorka, različite debljine, na Sl. 6 je prikazana zavisnost pomeraja rezonantne učestanosti u funkciji debljine uzorka. Referentna rezonancija je uzeta za senzor prekriven dielektrikom debljine 0.1 mm. Kod leda se uočava linearna zavisnost pomeraja rezonantne učestanosti senzora u zavisnosti od debljine uzorka, dok se kod vode uočava kvadratna zavisnost.

Sa Sl. 5 se uočava i promena maksimuma amplitudskog odziva u slučaju promene debljine uzorka, što može predstavljati dodatni parametar za detekciju debljine uzorka. Zavisnost promene maksimuma amplitudske karakteristike senzora u funkciji debljine uzorka prikazana je na Sl. 7.



Sl. 6 Odstupanje rezonantne učestanosti polutalasnog rezonatora u prisustvu uzorka različitih debljina (d).

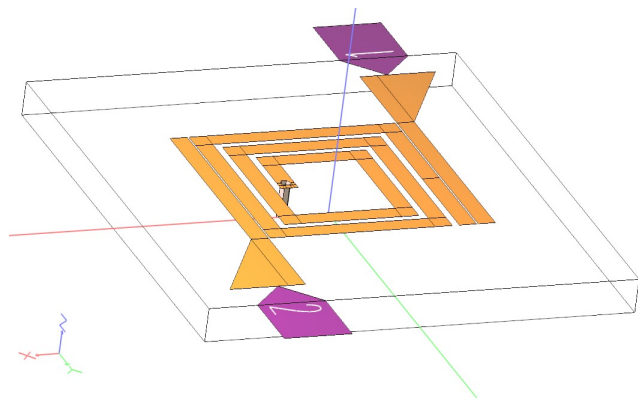


Sl. 7 Odstupanje maksimuma amplitudske karakteristike polutalasnog rezonatora u prisustvu uzorka različitih debljina (d).

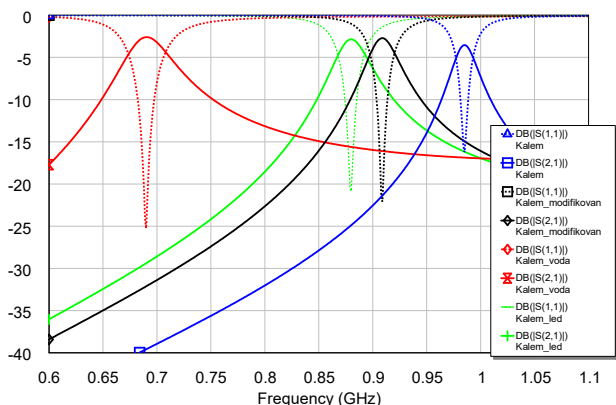
V. SENZOR U VIDU PRAVOUGAONOG SPIRALNOG KALEMA

Kao druga planarna struktura za karakterizaciju i detekciju materijala korišćen je pravougaoni spiralni kalem. Karakteristična impedansa voda kalema je 100Ω , a električna dužina 90° na rezonantnoj učestanosti oko 1 GHz. Kalem je realizovan na mikrotrakastoj podlozi RO 4003C, istih parametara kao i za polutalasnog rezonator (Sl. 8). Rastojanje između navojaka spirale je 0.2 mm. Uzorak materijala, voda ili led, je posmatran kao sloj debljine od 0.1 mm. Prvo je analiziran uzorak postavljen direktno na površinu senzora, ali zbog promena oblika amplitudskog odziva, pored pomerana rezonantne učestanosti, senzor je modifikovan dodavanjem sloja dielektrika između površine senzora i uzorka (Sl. 3).

Na Sl. 9 je prikazan amplitudski odziv senzora bez uzorka i sa uzorkom, kad postoji dodat dielektrični sloj na sam senzor ispod uzorka. Uočava se pomeraj rezonantne učestanosti senzora ka nižim učestanostima kada je dodat uzorak. Za oba uzorka uzeta je ista debljina od $100 \mu\text{m}$.

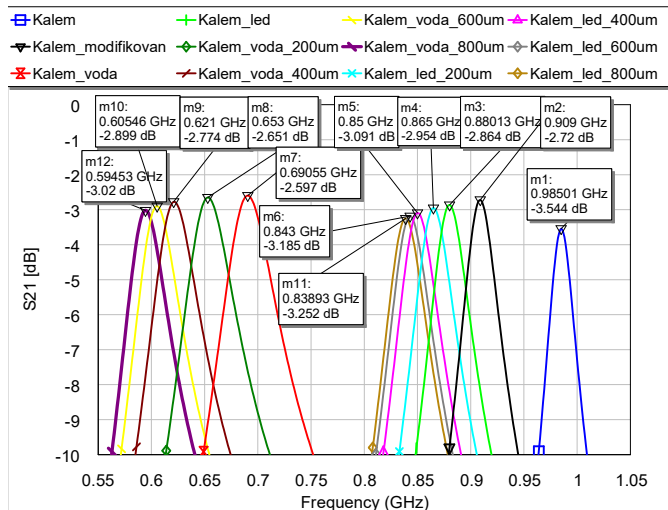


Sl. 8 Pravougaoni spiralni rezonator u mikrotrakastoj tehnici.



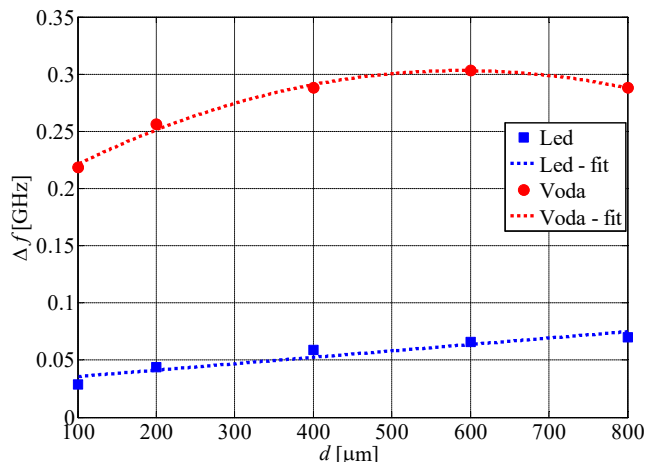
Sl. 9 S-parametri pravougaonog spiralnog kalemata u slučaju kad nema uzorka materijala i kad postoji.

Ispitan je uticaj promene debljine uzorka na pomeraj rezonantne učestanosti (Sl. 10). Uzeti su uzorci debljine od 0.1 mm do 0.8 mm, i za vodu i za led. Na Sl. 10 prikazan je amplitudski odziv senzora, za oba uzorka, kad se posmatra pet debljina uzorka. Za referentni odziv senzora uzet je slučaj kad je mikrotrakasta podloga prekrivena dielektrikom parametara istih kao RO 4003C, a debljina 0.1 mm.



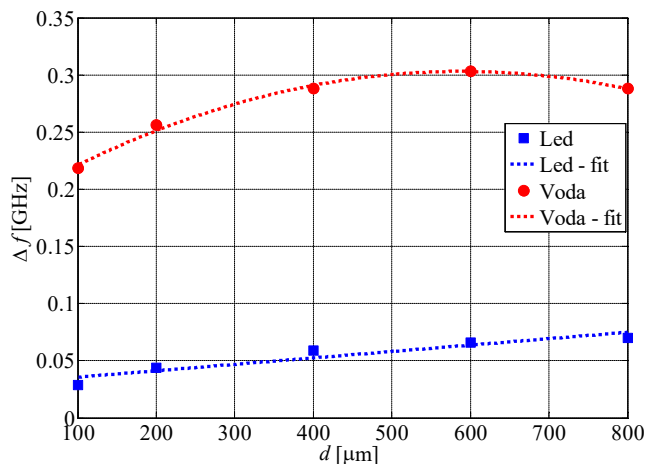
Sl. 10 S-parametri pravougaonog spiralnog kalemata u slučaju kad nema uzorka materijala i kad postoji uzorak vode i leda različitih debljina.

Na Sl. 11 je prikazana zavisnost pomeraja rezonantne učestanosti kalemata u funkciji debljine uzorka. Kod leda se uočava linearna zavisnost pomeraja rezonantne učestanosti senzora u zavisnosti od debljine uzorka, dok se kod vode uočava kvadratna zavisnost.



Sl. 11 Odstupanje rezonantne učestanosti pravougaonog spiralnog kalemata u prisustvu uzorka različitih debljina (d).

Na Sl. 10 se uočava promena maksimuma amplitudskog odziva pri promeni debljine uzorka, što se može uvesti kao dodatni parametar za detekciju debljine uzorka. Odstupanje maksimuma amplitudske karakteristike senzora u funkciji debljine uzorka prikazano je na Sl. 12. Kod leda se uočava kvadratna zavisnost odstupanja maksimuma amplitudske karakteristike senzora u zavisnosti od debljine uzorka, dok se kod vode uočava linearna zavisnost.



Sl. 12 Odstupanje maksimuma amplitudske karakteristike pravougaonog spiralnog kalemata u prisustvu uzorka različitih debljina (d).

VI. ZAKLJUČAK

Rad analizira moguću primenu mikrotrakastog planarnog senzora za detekciju padavina. Prikazana je analiza dva senzora: polutalasnog rezonatora i pravougaonog spiralnog kalemata. Detektovanje padavina je zasnovano na analizi frekvencijskog odziva senzora. Prvo je posmatran senzor realizovan u mikrotrakastoj tehnici, pa je modifikovan sa dielektričnom

prekrivkom preko senzora na koju se postavlja uzorak vode i leda. Nalazi se prvo referentni odziv modifikovanog senzora bez uzorka, a zatim se poredi sa odzivom senzora kada postoji uzorak. Na osnovu pomeraja rezonantne učestanosti može se detektovati tip padavina, tj. da li je u pitanju led ili voda. Uočeno je da se na osnovu pomeraja rezonantne učestanosti može detektovati i debljina uzorka. Kao dodatni parametar za detekciju debljine uzorka može se uzeti promena maksimuma amplitudskog odziva senzora.

Kod oba analizirana senzora, uočava se da u prisustvu leda postoji linearna zavisnost pomeraja rezonantne učestanosti senzora u zavisnosti od debljine uzorka, dok se kod vode uočava kvadratna zavisnost.

Budući pravci istraživanja mogu uključivati optimizaciju karakteristika senzora kako bi se poboljšala osetljivost i tačnost detekcije, kao i istraživanje primene senzora pri različitim uslovima sredine. Bila bi ispitana minimalna i maksimalna debljina uzorka koja se može detektovati, optimalan opseg učestanosti za detekciju, itd. Dodatno, moguće je istražiti potencijalne primene ovih senzora u drugim oblastima, kao što su meteorologija, bezbednost saobraćaja i energetika, što bi moglo otvoriti nove perspektive u primeni mikrotalasnih senzora za rešavanje širokog spektra problema.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržalo Ministarstvo za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije po ugovoru broj: 451-03-65/2024-03/200103.

LITERATURA

- [1] P. Przyborski and R. Levy, "Snow cover," EOS Project Science Office, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA, Feb. 2022. Accessed: Nov. 5, 2022. [Online]. Available: https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOD10C1_M_SNOW.
- [2] E. Kim, "How can we find out how much snow is in the world?" *Eos*, vol. 99, Jun. 2018, doi: 10.1029/2018EO099939. [Online]. Available: <https://eos.org/science-updates/how-can-we-find-out-how-much-snow-is-in-the-world>.
- [3] M. Farzaneh, Ed., *Atmospheric Icing of Power Networks*. Dordrecht, The Netherlands: Springer Netherlands, 2008.
- [4] M. Virk, M. Mustafa, and Q.-A. Hamdan, "Atmospheric ice accretion measurement techniques," *Int. J. Multiphys.*, vol. 5, no. 3, pp. 229–242, Sep. 2011, doi: 10.1260/1750-9548.5.3.229.
- [5] T. Rashid, H. A. Khawaja, and K. Edvardsen, "Review of marine icing and anti-/de-icing systems," *J. Mar. Eng. Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 79–87, May 2016, doi: 10.1080/20464177.2016.1216734.
- [6] D. G. Jackson and J. I. Goldberg, "Ice detection systems: A historical perspective," SAE Int., Warrendale, PA, USA, SAE Tech. Paper 2007-01-3325, Sep. 2007.
- [7] K. Petty and C. Floyd, "A statistical review of aviation airframe icing accidents in the U.S.," in *Proc. 11th Conf. Aviation, Range, Aerosp.*, Oct. 2004. Accessed: Nov. 5, 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/287186718_A_statistical_review_of_aviation_airframe_icing_accidents_in_the_US.
- [8] H. Hu, "The science behind frozen wind turbines – And how to keep them spinning through the winter," *Conversation*, Mar. 2021. Accessed: Nov. 5, 2022. <https://theconversation.com/the-science-behind-frozen-wind-turbines-and-how-to-keep-them-spinning-through-the-winter-156520#:~:text=By%20heating%20just%20the%20critical,refreeze%20over%20the%20blade%20surfaces>.
- [9] U. N. Mughal, M. S. Virk, and M. Y. Mustafa, "State of the art review of atmospheric icing sensors," *Sens. Transducers*, vol. 198, no. 3, pp. 2–15, Mar. 2016. Accessed: Nov. 5, 2022. [Online]. Available: <https://www.proquest.com/docview/1781331985?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true>.
- [10] V. Lehtomäki et al., "Available Technologies for Wind Energy in Cold Climates—report," 2nd ed., The International Energy Agency Wind Technology Collaboration Program, Oct. 2018. Accessed: Nov. 5, 2022. [Online]. Available: <https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2021/09/Lehtomaki-et-al.-2018-Available-Technologies-for-Wind-Energy-in-Cold-Climates-report-2-nd-edition-2018.pdf>.
- [11] AC-9C Aircraft Icing Technology Committee, "Minimum operational performance specification for inflight icing detection systems AS5498B," SAE Int., Warrendale, PA, USA, Apr. 2022. [Online]. Available: <https://www.sae.org/standards/content/as5498b/>
- [12] AC-9C Aircraft Icing Technology Committee, "Aircraft inflight ice detectors and icing rate measuring instruments AIR4367A," SAE Int., Warrendale, PA, USA, May 2022. [Online]. Available: <https://www.sae.org/standards/content/air4367a/>
- [13] T. Schlegl, M. Moser, and H. Zangl, "Wireless and flexible ice detection on aircraft 2015-01-2112," SAE Int., Warrendale, PA, USA, SAE Tech. Papers, Jun. 2015. [Online]. Available: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2015-01-2112/>
- [14] "On wing ice detection and monitoring system reporting project information final report summary-ON-WINGS (on Wing Ice Detection and Monitoring System)." <https://cordis.europa.eu/project/id/233838/reporting>.
- [15] "All-in-one optical sensor for advanced ice detection," Collins Aerospace, Charlotte, NC, USA, 2020. Accessed: Nov. 5, 2022. [Online]. Available: <https://www.collinsaerospace.com/-/media/CA/productassets/marketing/o/optical-ice-detector-data-sheet.pdf>
- [16] D. Fuleki, Z. Sun, J. Wu, and G. Miller, "Development of a non-intrusive ultrasound ice accretion sensor to detect and quantify ice accretion severity," presented at the 9th AIAA Atmospheric Space Environ. Conf., Denver, CO, USA, Jun. 2017.
- [17] Y. Liu, L. J. Bond, and H. Hu, "Ultrasonic-attenuation-based technique for ice characterization pertinent to aircraft icing phenomena," *AIAA J.*, vol. 55, no. 5, pp. 1602–1609, Jan. 2017, doi: 10.2514/1.J055500.
- [18] A. Piccardi and L. Colace, "Optical detection of dangerous road conditions," *Sensors*, vol. 19, no. 6, Mar. 2019, Art. no. 1360, doi: 10.3390/s19061360.
- [19] J. Ge, L. Ye, and J. Zou, "A novel fiber-optic ice sensor capable of identifying ice type accurately," *Sens. Actuators A, Phys.*, vol. 175, pp. 35–42, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.sna.2011.12.016.
- [20] *Installation & Operation Manual, Tekmar Snow/Ice Sensor 090*, Tekmar, 2016 [Online]. Available: <https://www.watts.com/dfsmedia/0533dbba17714b1ab581ab07a4cbb521/42701-source/090-dl-08>.
- [21] M. H. Zarifi et al., "A microwave ring resonator sensor for early detection of breaches in pipeline coatings," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 2, pp. 1626–1635, Jul. 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2733449.
- [22] O. Krivosudský, D. Havelka, D. E. Chafai, and M. Cifra, "Microfluidic on-chip microwave sensing of the self-assembly state of tubulin," *Sens. Actuators B, Chem.*, vol. 328, Feb. 2021, Art. no. 129068, doi: 10.1016/j.SNB.2020.129068.
- [23] J. Munoz-Enano, O. Peytral-Rieu, P. Velez, D. Dubuc, K. Grenier, and F. Martin, "Characterization of the denaturation of bovine serum albumin (BSA) protein by means of a differential-mode microwave microfluidic sensor based on slot resonators," *IEEE Sensors J.*, vol. 22, no. 14, pp. 14075–14083, Jul. 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3181542.
- [24] Y. Kozhemyakin, S. Rehault-Godbert, D. Dubuc, and K. Grenier, "Millifluidic sensor designed to perform the microwave dielectric spectroscopy of biological liquids," in *Proc. 52nd Eur. Microw. Conf. (EuMC)*, Sep. 2022, pp. 1–4, doi: 10.23919/EUMC54642.2022.9924355.
- [25] A. Ebrahimi, W. Withayachumnankul, S. Al-Sarawi, and D. Abbott, "High-sensitivity metamaterial-inspired sensor for microfluidic dielectric characterization," *IEEE Sensors J.*, vol. 14, no. 5, pp. 1345–1351, May 2014, doi: 10.1109/JSEN.2013.2295312.
- [26] M. Abdolrazzaghi, M. H. Zarifi, and M. Daneshmand, "Wireless communication in feedback-assisted active sensors," *IEEE Sensors J.*, vol. 16, no. 22, pp. 8151–8157, Nov. 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2604855.
- [27] B. D. Wiltshire, T. Zarifi, and M. H. Zarifi, "Passive split ring resonator tag configuration for RFID-based wireless permittivity sensing," *IEEE Sensors J.*, vol. 20, no. 4, pp. 1904–1911, Feb. 2020, doi: 10.1109/JSEN.2019.2950912.
- [28] F. Martin, *Introduction to Planar Microwave Sensors*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2022, pp. 1–64.
- [29] O. Niksan, M. C. Jain, A. Shah, and M. H. Zarifi, "A nonintrusive flow rate sensor based on microwave split-ring resonators and thermal

- modulation,” IEEE Trans. Microw. Theory Techn, vol. 70, no. 3, pp. 1954–1963, Mar. 2022, doi: 10.1109/TMTT.2022.3142038.
- [30] M. Mallach, P. Gebhardt, and T. Musch, “2D microwave tomography system for imaging of multiphase flows in metal pipes,” Flow Meas. Instrum., vol. 53, pp. 80–88, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.FLOWMEASINST.2016.04.002.
- [31] J. Muñoz-Enano, P. Vélez, M. Gil, and F. Martín, “Planar microwave resonant sensors: A review and recent developments,” Appl. Sci., vol. 10, no. 7, Apr. 2020, Art. no. 2615, doi: 10.3390/APP10072615.
- [32] “Roxar.” Emerson. Accessed: Nov. 6, 2022. [Online]. Available: <https://www.emerson.com/en-ca/automation/roxar>.
- [33] E. G. Nyfors and A. Wee, “Measurement of mixtures of oil, water, and gas with microwave sensors: New developments and field experience of the MFI MultiPhase and WaterCut meters of Roxar, in Proc. SPIE 4129, Subsurface Sens. Technol. Appl. II, Jul. 2000, vol. 4129, pp. 12–21, doi: 10.1117/12.390612.
- [34] S. Guha, F. I. Jamal, and C. Wenger, “A review on passive and integrated near-field microwave biosensors,” Biosensors, vol. 7, no. 4, Sep. 2017, Art. no. 42, doi: 10.3390/BIOS7040042.
- [35] J. D. Baena et al., “Equivalent-circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines,” IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 53, no. 4, pp. 1451–1460, Apr. 2005, doi: 10.1109/TMTT.2005.845211.
- [36] J.-S. Hong. “*Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*” New Jersey: John Wiley & Sons: 2011.
- [37] R. J. Cameron, C. M. Kudsia, R. R. Mansour, “*Microwave filters for communication systems: fundamentals, design, and applications*”. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [38] V. V. Petrović, D. V. Tošić, A. R. Đorđević, “*Mikrotalasna pasivna kola*”, Beograd: Elektrotehnički fakultet, elektronsko izdanje, 2010.
- [39] Cadence AWR Microwave Office, [online] https://www.cadence.com/en_US/home/tools/system-analysis/rf-microwave-design/awr-microwave-office.html

ABSTRACT

The paper presents a design procedure of a microwave sensor for precipitation detection. The sensors are designed in the planar technique in the form of a microwave resonator, as well as a square spiral coil. Rainfall detection is based on the analysis of the sensor's frequency response. First, a sensor without precipitation is observed and its amplitude response is determined, which is then compared to the response of the sensor when there is precipitation. The shift of the amplitude response towards lower frequencies will determine the type of precipitation. The model of the proposed sensor was realized in Cadence AWR Microwave Office.

Microwave sensor for precipitation detection

Ana Tatović, Stefan Radovanović, Milka Potrebić Ivaniš