

Primena senzora sa površinskim akustičkim talasom u bežičnim senzorskom mrežama

Zoran Filipović, Marija Hribšek, Institut Goša, Beograd

Sadržaj — U radu je prikazan praktični koncept upotrebe radio senzora sa površinskim akustičkim talasom (PAT, SAW) u bežičnim senzorskim mrežama koristeći ortogonalno frekventno kodiranje (OFC).

Cljučne reči — PAT elementi, radio senzori, SAW senzori, OFDM.

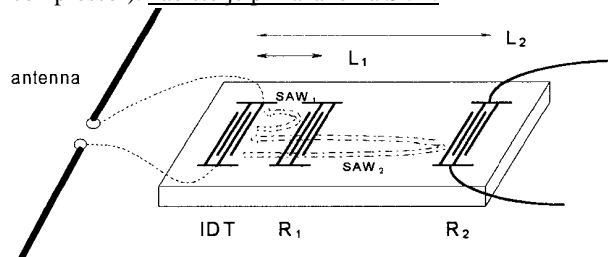
I. UVOD

U poslednje vreme bežične senzorske mreže (Wireless Sensor Networks-WSN) imaju sve značajniji uticaj na različite aspekte ljudskih aktivnosti. WSN su u početku su bile vezane isključivo za vojne i bezbednosne primene, ali kako je njihova cena opadala i tehnologija postajala sve dostupnija širim naučnim krugovima, njihova primena je intenzivirana u najrazličitijim oblastima, poput medicine, zaštite životne sredine nadzor saobraćaja i urbanih sredina, konstrukciji „pametnih“ kuća automobilske i aerokosmičke industriji kao i savremenoj poljoprivredi. Bežične senzorske mreže omogućuju akviziciju velikog broja relevantnih neelektričnih i električnih veličina. Ovi podaci prikupljaju se bez nadzora čoveka u veoma dugom vremenskom intervalu i omogućavaju uvid u sve parametre koji mogu imati uticaja na određene tehnološke procese. U ovom radu će biti prikazana aplikacija posebne grupe pasivnih senzora čiji se rad zasniva na prostiranju površinskih akustičnih talasa-PAT (Surface Acoustic Wave- SAW) u bežičnim mrežama. Poslednjih tridesetak godina komponente sa površinskim akustičkim talasom – PAT elementi, našli su široku i raznovrsnu primenu u komercijalnim i visoko profesionalnim telekomunikacionim uređajima i sistemima za procesiranje signala.

II. PRINCIPIRADA PAT SENZORA

Rad PAT senzora se zasniva na prostiranju mehaničkih talasa duž površine piezoelektrične podloge. Amplituda talasa opada eksponencijalno sa rastojanjem od površine, tako da je skoro sva energija talasa (obično više od 95 %) sadržana u površinskom sloju debljine jedne talasne dužine. Površinski talas se može pobuditi u podlozi na više načina ali se u elektronskim uređajima i sistemima to

najčešće čini pomoću tzv. interdigitalnih pretvarača - IDP (Interdigital Transducer-IDT) koji se sastoje od dva niza tankih češljastih metalnih elektroda postavljenih na piezoelektričnu podlogu. Kod PAT senzora se koriste linije za kašnjenje ili rezonatori RAC (Reflective array compressor), kao što je prikazano na Sl. 1.



Sl. 1 Sl. 2 Širokopojasna PAT linija za kašnjenje kao radio senzor [1].

Najčešće je širina elektroda jednaka njihovom međusobnom rastojanju, jer je tada koeficijent pretvaranja električne energije u mehaničku najveći. Za podloge se koriste kvarc, litijum niobat, olovocirkonat, litijum tantalat i bizmut germanijum oksid. Od uniformnosti rastojanja između elektroda zavisi oblik fazne karakteristike, a od broja i dužine preklapanja elektroda oblik amplitudske karakteristike elementa. Veličina kašnjenja je određena rastojanjem prvih elektroda pretvarača. Vreme kašnjenja je količnik dužine između IDP i reflektora i brzine prostiranja talasa u podlozi. Dužina i brzina su podložne promenama usled temperature, mehaničkog naprežanja i pritiska ili opterećenja na površini elementa (tanak sloj).

Uticaj fizičkog efekta y , koji se meri, na vreme kašnjenja T_k linije za kašnjenje (LK) može se izračunati na sledeći način:

$$T_y = T_k (1 + S_T^y y)$$

gde je T_y rezultantno kašnjenje, a S_T^y relativna

osetljivost vremena kašnjenja. ($S_T^y = \frac{1}{T} \frac{dT}{dy}$).

Merenja se vrše na centralnoj učestanosti i zasniva se na merenju razlike u kašnjenju između reflektora R_2 i R_1 .

Kod rezonatorskih senzora se pored prostiranja koristi i refleksija talasa od malih prepreka na površini podloge. Prepreke se mogu praviti ili nanošenjem tankog sloja provodnog ili neprovodnog materijala na površnu podloge ili ukopavanjem plitkih žljebova u podlogu. Koeficijent refleksije, tj. pretvaranje pobudine snage površinskog talasa u reflektovani, zavisi od odnosa visine

Ovaj rad je finansijski podržan od Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj u okviru projekta TR 11026.

Zoran Lj. Filipović, Marija Hribšek, Institut Goša u Beogradu, Srbija, (e-mail: filipovicz@nadlanu.com, marija.hribsek@yahoo.com).

prepreke i talasne dužine. Sopstvene frekvencije zavise od geometrije pretvarača i brzine prostiranja površinskog talasa, a brzina zavisi od vrste piezoelektrične podloge, načina izrade i ambijenta u kome se filter nalazi. Kod ovih senzora IDP se nalazi na sredini podloge i služi kao ulazni i kao izlazni pretvarač a sa njegove obe strane se nalazi niz metalnih traka-reflektora. Ako je sopstvena frekvencija ulaznog električnog signal jednaka sa rezonantnom učestanošću rezonatora (prostor između pretvarača i reflektora čini rezonator-rezonantnu šupljinu), formira se stojeći talas. Sopstvena frekvencija rezonatora zavisi od geometrije pretvarača i brzine prostiranja površinskog talas na čiju veličinu utiče vrste piezoelektrične podloge, načina izrade i ambijenta u kome senzor nalazi.

Ukoliko se na reflektor R_2 priključi električno opterećenje koje je srazmerno mernoj veličini Z_p , dobije se zavisnost koeficijenta refleksije reflektora od opterećenja data izrazom [1]:

$$P_{11}(Z_p) = P_{11}^{ks} + \frac{2P_{13}^2}{P_{33} + \frac{1}{Z_p}}$$

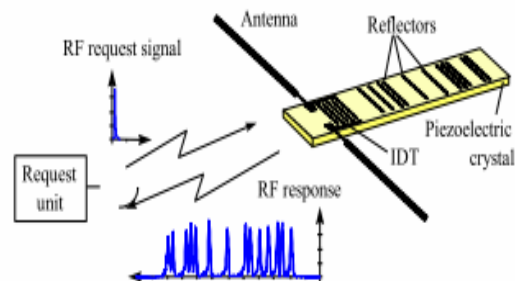
gde je P_{11}^{ks} koeficijent refleksije pri kratko spojenim priključcima. Za dvostruke elektrode P_{11}^{ks} je približno nula.

Osnovna podela PAT senzora se može izvršiti prema tome da li oni direktno ili indirektno detektuju određenu fizičku veličinu. Ako PAT element, linija za kašnjenje ili rezonator, direktno meri varijacije neke fizičke veličine kao što je temperature, pritisak, koncentracija gasa, itd., onda on predstavlja direktni sensor. Kod druge vrste – indirektnih senzora ili tzv. transpondera PAT element samo transformiše podatak izmeren nekim drugim direktnim senzorom u električni signal pogodan za dalju obradu. Bez obzira na konfiguraciju PAT senzora osnovni princip njihovog rada se zasniva na činjenici da merena veličina (temperatura, pritisak, itd.) utiče na prostiranje talasa tako što menja ili njegovo slabljenje ili kašnjenje. Ako se npr. sensor zagreva, isteže ili opterećuje, menja se dužina podloge kao i njene elastične konstante. Ove promene izazivaju promene faze i brzine kretanja talasa, koje pak izazivaju odgovarajuće promene centralne učestanosti, slabljenja i kašnjenje [1],[2].

III. KONFIGURACIJA RADIO SENZORA

Kod radio senzora se koriste i transversalni i rezonatorski PAT elementi, ali se u oba slučaja praktično koristi refleksija. Konfiguracija širokopojsnog radio senzora je prikazan na Sl.2 [1]. Bežični način merenja zasniva se na konfiguraciji u kojoj je uključen interogator (sadrži predajni i prijemni deo) i PAT senzora

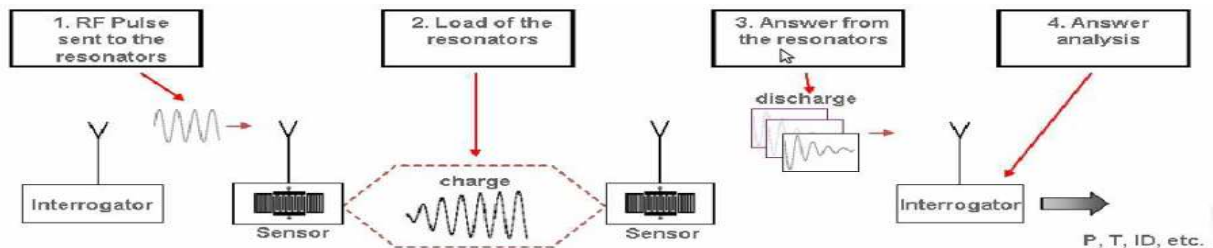
(transponder- ID tag or sensor). sa sopstvenim antenama (ISM Band 433 MHz, 868 MHz, 2.45 GHz) . Predajni deo interogatora emituje upitni signal u formi kratkotrajnih impulsa koji biva primljen od strane antene pasivnog radio PAT senzora. Njegov IDT konvertuje primljeni signal u površinske akustične talase koji su rezultat piezoelektričnog efekta.



Sl. 2 Osnovna konfiguracija bežičnog prenosa sa PAT senzorom [3].

Površinski akustični talasi prostiru se u pravcu reflektora različitim putanjama i delimično se odbijaju od svakog reflektora zadržavajući se u rezonatorskim šupljinama do trajanja poslednje refleksije (ehoa). Ukoliko je frekvencija poslatog signala bliska rezonantnoj frekvenciji PAT senzora doći će do njegove rezonancije posle vremena punjenja rezonantnih šupljina u stabilnom oscilatornom režimu na navedenoj frekvenciji. Rezonantna frekvencija senzora je proporcionalna brzini površinskih prostiranja akustičnih talasa koja zavisi od merne fizičke veličine (temperatura, pritisak, obrtni momenat, vibracije i.t.d.). Ukoliko se sensor zagreva, isteže ili opterećuje, menja se dužina podloge kao i njene elastične konstante. Ove promene izazivaju promene faze i brzine kretanja talasa, koje pak izazivaju odgovarajuće promene centralne učestanosti, slabljenja i kašnjenja koje se mogu korelisati sa merenom fizičkom veličinom [3].

Senzor šalje informaciju o izmerenoj veličini na sopstvenoj rezonantnoj učestanost. Navedeni odgovor sadrži informaciju o broju i lokaciji reflektora kao i propagaciona i reflektujuća svojstva PAT senzora. Promene različitih fizičkih ili hemijskih veličine uzrokuju način prostiranja površinskih talasa a samim tim i oblik karakterističnog odgovora. Prijemni deo interogatora prima kompletan signal emitovan iz senzora, vrši ekstrakciju informacije o vrednosti izmerene fizičke veličine koristeći adaptivni način procesiranja signala (vrši se različita analiza razlike amplituda, vremena, frekvencija i faza dobijenog signala). Emitovanjem RF signala u sam senzor, njegovom konverzijom u ekvivalentni mehanički talas zatim njegovim vraćanjem u oblik RF signala vrši se merenje raznorodnih neelektričnih veličina u ekstremnim ambijentalnim uslovima (Sl.3).



Sl. 3. Princip funkcionisanja PAT radio senzora [4].

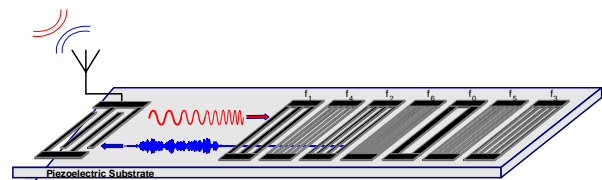
IV. KODIRANJE PAT SENZORA

Konstrukcija PAT senzora rezonatorskog tipa podrazumeva postojanje kratko-spojenih periodičnih rešetki reflektora (shorted periodic reflector gratings) u cilju smanjenja rasipanja površinskih talasa u zapremnske (parazitne). Potpuna refleksija površinskih talasa može se ostvariti samo sabiranjem fazno sinhronizovanih slabih refleksija od većeg broja malih prepreka (koeficijent refleksije, tj. pretvaranje pobudne snage površinskog talasa u reflektovani, zavisi od odnosa visine prepreke i talasne dužine). PAT senzori novije tehnološke generacije sa kratkim periodičnim rešetkama reflektora kodiraju se upotrebom tehnike ortogonalnog frekventnog kodiranja (orthogonal frequency coding -OFC). Tehnika ortogonalnog frekventnog kodiranja (Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM) omogućuje prenosa podataka u proširenom spektru kojom se jedan tok podataka prenosi istovremeno preko niza frekventnih podnosilaca. Frekventni razmak između podnosilaca se bira tako da obezbedi ortogonalnost njihovih frekvencija nosilaca na koji način se pri demodulaciji obezbeđuje da demodulatori vide samo svoje nosioce a ne vide ostale. Ortogonalnost je u OFDM-u postignuta tako što se svakom podnosiocu dodeljuje frekvencija koja je celobrojni umnožak recipročne vrednosti trajanja simbola na podnosiocu. Ovo znači da će se svaki simbol sastojati od celobrojnog umnoška perioda sinusoide.

Prednost OFDM-a je njegova velika spektralna efikasnost, otpornost na RF interferencije i nizak nivo izobličenja (intersimbolska interferencija) izazvanog višeputnim prostiranjem (multipath) koje veoma otežava ekstrakciju originalne informacije. Nedostatak OFDM-a je osjetljivost na frekventni ofset i fazni šum.

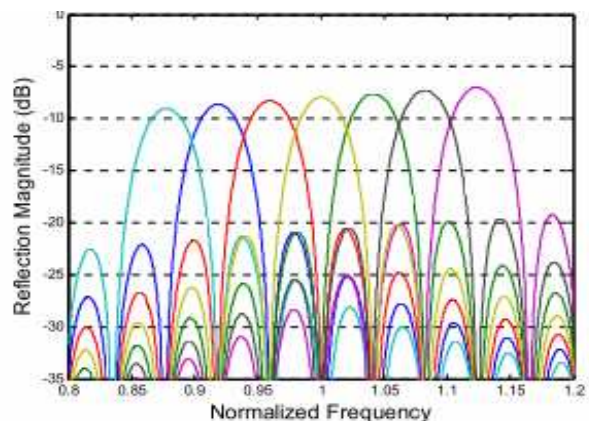
Određeni PAT senzor koji je kodiran sa OFC signalom sadrži određeni broj reflektora koji su izrađeni sa kratkim periodičnim rešetkama i sa različitim brojem elektroda. Njihove rezonantne frekvencije korespondiraju sa nosećim frekvencijama definisanim samom tehnikom OFDM. Svaka rešetka sadrži različit broj elektroda sa različitim sopstvenom frekvencije čime je obezbeđen uslov ortogonalnosti. Na Sl.4 prikazan je radio PAT senzor sa sedam reflektora različite konstrukcija (čip sa 7 sopstvenih frekvencija) koje odgovaraju nosiocima definisanim OFDM. Ulazno kolo senzora omogućuje prijem široko pojasnog signala.

Svaki od podnosilaca ima vrh na centralnoj učestanosti i nule su raspoređene na rastojanjima $k\Delta f$ od centra (k pripada skupu celih brojeva, a Δf predstavlja rastojanje između podnosilaca).



Sl.4 Grafički prikaz 7.čipnog OFC PAT ID tag Senzora [3].

Broj elektroda direktno je proporcionalan sopstvenoj frekvenciji a takode njihova širina raste sa porastom frekvencije. Otuda će spektar rezultujućeg signala jednog PAT kodiranog čipa sa više reflektora izrađenih od rešetaka čije su elektrode različitih širina biti sa različitim amplitudama (slika 3)



Sl.4 Odziv OFC PAT ID tag senzora [3].

U multisenzorskim bežičnim mernim sistemima PAT senzor mora slati istovremeno informaciju o svojoj identifikaciji (ID tag) i mernu informaciju. Tokom procesa merenja interogator generiše jedinstveni set kodova (Ortogonal Frequency Cods -OFC) u okviru široko pojasnog frekventnog signala. [3].

Putem prijemne antene PAT senzori primaju kodovane signale koji se prostiru kroz senzor kao površinski akustički talasi i generišu reflektovane kodovane talase proporcionalne lokalnoj mernoj veličini. Isti se emituju lokalnom antenom sa senzora da bi se zatim detektovao od strane interogatora koji najpre vrši identifikaciju aktivnog senzora a zatim dekodovanje merne veličine. To se obavlja posebnim aplikativnim programom uz obezbeđenje permanentnog merenja svih definisanih mernih veličina koje reprezentuju odzivi iz apliciranih PAT senzora u mernom sistemu. [3].

V. METROLOŠKE KARAKTERISTIKE PAT SENZORA

Većina današnjih konvencionalnih (poluprovodičkih) senzora u upotrebi podrazumeva korišćenje eksternog izvora napajanja i odgovarajućih elektronskih kola zasnovanih na silicijumskoj tehnologiji koji direktno limitiraju njihov rad u uslovima rada povećane radijacije i velikog raspona temperature ambijenta. Njihova merna nesigurnost je direktno zavisna od ambijentalnih uslova rada što limitira njihovu upotrebu. Aktivne elektronske komponente uz to povećavaju cenu proizvodnje a istovremeno smanjuju pouzdanost rada

PAT senzori su dizajnirani na bazi kristalnih strukturama pa su otuda otporni na rad u ekstremnim ambijentalnim uslovima. Razvoj bežičnih mreža sa PAT senzora pratili su problemi njihove implementacije zbog veličine antene, transfera RF signala u mreži vezanog za domet kao i identifikacija i procesiranje mernih signala dobijenih kao njihov odziv. Navedeni problemi su tehnološki rešeni (MEPS tehnologija omogućava implementiranje veoma tankih slojeva osetljivog filma na piezo podlogu) tako da je omogućena proizvodnja ovih komponenta pre svega u oblasti dizajna telekomunikacijskih uređaja (10 MHz - 5 GHz) kako za vojne tako i za civilne aplikacije. [1], [3].

Opšte metrološke karakteristike ovih senzora su:

- Pasivan karakter (ne zahtevaju dodatno napajanje),
- Predstavljaju kompaktnu kristalnu strukturu bez pokretnih delova u svojoj konstrukciji.
- Identifikacije RF signala sa različitih senzora u mreži vrši se primenom tehnike OFDM i transfer mernih podataka bežičnim putem u opsegu od nekoliko metara (frekvencije u MHz) i do 50 metara (frekvencije u GHz) uz smanjenje veličine antene.
- Zadovoljvanje uslova aplikacije na zemlji, vazduhu i kosmičkim uslovima u uslovima visoke radijacije i ekstremnih ambijentalnih temperatura od -200°C to +1,000°C zavisno od upotrebljenog piezoelektričnog materijala.
- Njihova upotrebljivost u WNS mrežama za merenje velikog broja raznorodnih fizičkih veličina.

Merna nesigurnost ove vrste senzora zavisi od više faktora kao što su refleksije, nelinearnosti i neželjene konverzije prostirućeg talas kroz njegovu strukturu.

Mogućnosti upotrebe ovih multisenzorskih mernih sistema su brojne kako za zemaljske tako i aero-kosmičke aplikacije i to vazduhoplovnoj, automobilskoj i hemijskoj industriji kao i tokom praćenja relevantnih procesa u fazi istraživanja i razvoja u različitim oblastima ljudske delatnosti. U budućnosti se očekuje njihova još šira primena u automobilskoj, hemijskoj, bio-medicinskoj i zaštiti životne sredine a pre svega u aero-kosmičkoj industriji. Tokom procesa proizvodnje mnoštvo PAT senzora biće integrisano u sami strukturu automobila i letelica koji će omogućiti merenje relevantnih veličina u svim fazama njihovog razvoja kao i kasnijeg njihovog praćenja tokom životnog veka. Time će biti izbegnuta upotreba optičkih kablova i žičnih komunikacionih sistema što će dovesti do manje težine vozila i letelica kao i

smanjenja troškova proizvodnje uz istovremeno povećanu bezbednost upravljanja istim.

Danas su naročito interesantne aplikacije pasivnih bežičnih sistema i u aero-kosmonautici za merenja u ralnom vremenu sledećih parametara.

- nivoa fluida na niskim temperaturama,
- temperatura na površinama kosmičkih letelica,
- napreznja i deformacija lopatica turbina na brzinama do 50,000 rpm.,
- ubrzanja i vibracija,
- rotacionih i usmerenih odstupanja kursa letelica
- merenja promenljivih parametara unutar hermetički zatvorenih kontejnera
- praćenje toksičnih pojava i drugih bezbednosnih parametara na nepristupačnim lokacijama

VI. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana primena senzora čiji se rad bazira na prostiranju akustičnih talasa u bežičnim mrežama za merenje različitih fizičkih veličina. Analizira je konfiguracija samih radio senzora sa određenim brojem reflektora koji su izrađeni sa kratkim periodičnim rešetkama sa naglaskom na njihovo kodiranje OFC signalom.

LITERATURA

- [1] Hribšek M., Elementi sa površinskim akustičnim talasom u radio senzorima, *Proc. TELFOR 2009*, 2009, CD.
- [2] Hribšek M., Surface Acoustic Wave Devices and their applications, *Proc. MIEL 86*, 1986, vol.1, pp. 37-46, Belgrade, invited paper.
- [3] D. Puccio 1, D. C. Malocha 1, D. Gallagher 1, and J. Hines 2, Sensors Using Orthogonal Using Orthogonal Frequency Coding, 1 Electrical and Computer Engineering Department, University of Central Florida, Orlando, S Microsensor Systems, Inc., Bowling Green, KY.
- [4] Application Note AN-W4S-EN-V1 – 06/04/09 (W.W.W.SENSORS.COM)

ABSTRACT

This paper presents the concept of surface acoustic wave (SAW) sensors applications in WNS (Wireless Sensor Network) using orthogonal frequency coding (OFC) to SAW device technology.

APPLICATION OF RADIO SURFACE ACOUSTIC WAVE SENSORS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Zoran Filipović, Marija Hribšek