

# Elementi sa površinskim akustičkim talasom u radio senzorima

Marija F. Hribšek, Institut Goša, Beograd

**Sadržaj** — U radu je prikazana upotreba elemenata sa površinskim akustičkim talasom (PAT, SAW) kao radio senzora. Opisan je princip rada i izrade ovih senzora, kao i njihove vrste. Predložen je i novi, efikasan način analize jednog tipa ovih senzora.

**Gljučne reči** — PAT elementi, radio senzori, SAW senzori, transponderi.

## I. UVOD

U POSLEDNJIH tridesetak godina elementi sa površinskim akustičkim talasom – PAT (surface acoustic wave-SAW) su našli, i još uvek nalaze, široku i raznovrsnu primenu u komercijalnim i visokoprofesionalnim telekomunikacionim uređajima i sistemima. To je postignuto zahvaljujući s jedne strane načinu njihove izrade, koja je kompatibilna sa ostalim savremenim planarnim tehnologijama, i s druge strane raznovrsnosti funkcija koje ovi elementi mogu obavljati. Pat elementi rade u frekventnom području od 10 MHz do oko 5 GHz kao filtri propusnici opsega, linije za kašnjenje sa konstantnim i disperzivnim kašnjenjem, prilagođeni filtri, kompresori, ekspanzori, korelatori i konvolveri. Sa razvojem mobilne telefonije porasla je veoma potreba za ovim filtrima. Sada se godišnje proizvodi oko 3 milijarde komada raličitih vrsta ovih elemenata.

Pored klasične primene za procesiranje signala u telekomunikacijama i obradi signala, krajem prošlog veka su ovi elementi počeli da se primenjuju i kao senzori za merenje različitih neelektričnih fizičkih veličina. Prvi PAT senzori su bili za merenje temperature, a sada se prave i za detekciju pritiska i mehaničkih napona. U poslednje vreme sve se više radi na razvoju hemijskih i biosenzora sa ovim elementima. Posebna pogodnost ovih senzora je da se mogu koristiti za daljinski monitoring i merenja, ako se prave kao radio senzori.

Upravo u ovom radu će biti prikazani ovi senzori. Prvo će biti prikazan princip rada PAT elemenata uopšte, a zatim princip rada radio senzora i njihove vrste. Zatim će biti prikazan nov način analize rada jednog tipa ovih senzora. Na kraju će biti prikazane primene ovih senzora.

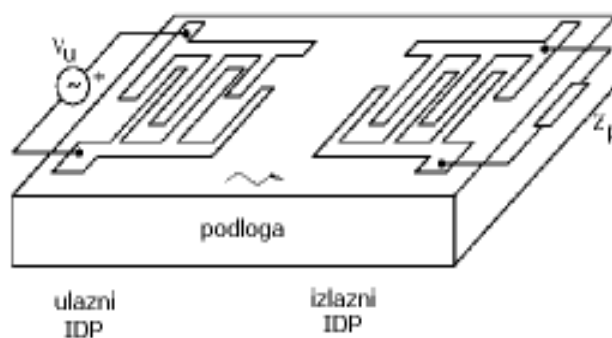
Ovaj rad je finansijski podržan od Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj u okviru projekta TR 11026.

Marija F. Hribšek, Institut Goša u Beogradu, Srbija telefon: 381-11-2413332; faks: 381-11-2410977; e-mail: [marija.hribsek@yahoo.com](mailto:marija.hribsek@yahoo.com).

Kao literatura se koriste radovi poznatih autora iz ove oblasti kao i radovi samog autora ovog rada.

## II. PRINCIPI RADA

Rad PAT elemenata 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. Pošto brzina talasa, zavisno od materijala podloge, iznosi 1500 do oko 5000 m/s, tj.  $10^5$  puta je manja od brzine elektromagnetnih talasa to im je donelo naziv akustički iako su po učestanostima daleko od čujnih. 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). IDP se sastoji od dva niza tankih češljastih metalnih elektroda postavljenih na piezoelektričnu podlogu kao što je prikazano na Sl. 1.



Sl.1 Osnovna konfiguracija PAT elementa.

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. Linearni PAT elementi imaju jedan ulazni i jedan ili više izlaznih pretvarača. Broj elektroda i njihova geometrija, kao i podloga biraju se zavisno od funkcije koju treba element da obavlja.

Mehanizam funkcionisanja IDP-a se može, vrlo uprošćeno, objasniti na sledeći način. Prostoperiodični napon  $v$  učestanosti  $f$  priključen na elektrode ulaznog pretvarača stvara električno polje koje, zbog piezoelektričnih osobina podloge, izaziva u podlozi

mehanički napon usled čega se javlja talasno kretanje čestica duž površine podloge u oba smera od pretvarača. Ovaj mehanički (akustički) talas kada stigne do izlaznog pretvarača svojim mehaničkim naponom izaziva odgovarajuće električno polje koje stvara odgovarajući napon na potrošaču. Kao što se vidi, IDP je reverzibilnog karaktera. Amplituda napona na potrošaču zavisi pre svega od odnosa talasne dužine pobudnog napona i rastojanja centara susednih elektroda  $d$ . Signal čija je talasna dužina  $2d$  imaće najveću amplitudu dok će amplitude ostalih biti utoliko manje ukoliko su po učestanosti više udaljene od signala najveće amplitude. To znači da se PAT element u suštini ponaša kao filter propusnik opsega učestanosti. Dokaz za napred izloženo se može naći u [1]–[4].

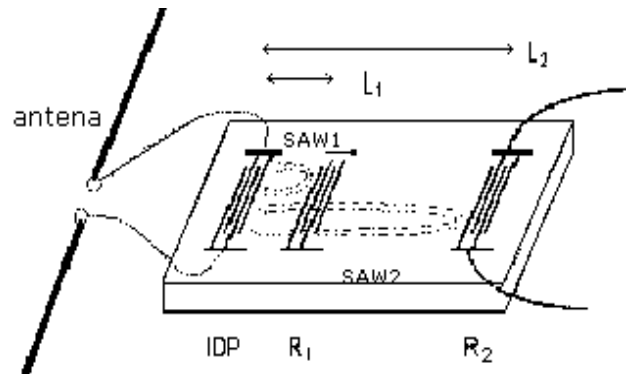
Iz napred izloženog može se zaključiti da se ovakvi PAT elementi mogu svrstati u transversalne filtre, pa se otuda oni nekad i nazivaju transversalnim PAT elementima. Kod ovih elemenata od uniformnosti rastojanja između elektroda zavisi oblik fazne karakteristike, a od broja i dužine preklapanja elektroda oblik amplitudske karakteristike elementa. Ako pretvarači imaju mali broj uniformno raspoređenih elektroda PAT element će biti širokopojasna linija za kašnjenje sa konstantnim kašnjenjem. Veličina kašnjenja je određena rastojanjem prvih elektroda pretvarača. Disperzivna linija za kašnjenje se dobija ako je jedan pretvarač uniforman sa malim brojem elektroda, a drugi sa elektrodama čije rastojanje linearno opada ili raste.

Druga vrsta PAT elemenata koristi takođe interdigitalne pretvarače, ali oni služe samo kao pretvarači za pobuđivanje i ekstrakciju signala, dok se željeni oblik karakteristike prenosa postiže na drugi način. Kod ovih elemenata 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 pobudne snage površinskog talasa u reflektovani, zavisi od odnosa visine prepreke i talasne dužine. Rasipanje i konverzija u zapreminske (parazitarne) talase su veći ako je refleksija jača. Zato se potpuna refleksija površinskih talasa može ostvariti samo sabiranjem fazno sinhronizovanih slabih refleksija od većeg broja malih prepreka. Na ovom principu rade PAT rezonatori i RAC (Reflective array compressor) filteri [5].

Kod radio senzora se koriste i transversalni i rezonatorski PAT elementi, ali se u oba slučaja praktično koristi refleksija. Naime, i kod transversalnih elemenata postoji refleksija. Deo signala se reflektuje od izlaznog pretvarača i vraća na ulazni od koga se opet odbija i ponovo vraća na izlaz. Kod većine primena ovo predstavlja smetnju, tzv. smetnju trostrukog prelaza. Kod radio senzora se upravo to koristi.

Rad širokopojasnog radio senzora je prikazan na Sl.2 [6]. Kao što se vidi ulazni pretvarač je priključen na antenu koja prima radio ispitni signal. Radio sistem posle emitovanja signala za ispitivanje (najčešće kratkotrajni impuls) se prebacuje u prijemni mod i prima impuls koji predstavlja konvoluciju odaslanog signala i reflektovanog

signala od PAT elementa. Ovaj primljeni signal nosi informaciju o merenoj veličini. Ovde se koriste širokopojasne linije za kašnjenje, kao na Sl.2, disperzivne linije za kašnjenje i PAT rezonatori. PAT element može ujedno da baš bude i senzor ili može samo da služi za prenošenje informacije koja je dobijena od samog senzora. U prvom slučaju bi element sa slike merio promenu vremena kašnjenja usled promene temperature na kojoj se nalazi PAT element. Vreme kašnjenja je količnik dužine  $L$  i brzine prostiranja talasa u podlozi  $v$ . Dužina i brzina su podložne promenama usled temperature, mehaničkog naprezanja i pritiska ili opterećenja na površini elementa (tanak sloj).



Sl. 2 Širokopojasna PAT linija za kašnjenje kao radio senzor [6].

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

$$T_y = T_k (1 + S_T^y \gamma) \quad (1)$$

gde je  $T_y$  rezultatno kašnjenje, a  $S_T^y$  relativna osetljivost vremena kašnjenja

$$S_T^y = \frac{1}{T} \frac{dT}{d\gamma} \quad (2)$$

koja je konstanta zavisna od materijala podloge.

Fizička veličina koja se meri može biti temperatura ili pritisak. Ako se meri temperatura, iz jednačine (1) se ona može odrediti iz izmerenog kašnjenja i poznate temperaturene osetljivosti za datu podlogu [1]. Merjenja se vrše na centralnoj učestanosti.

Ako je širina propusnog opsega senzora veća od opsega signala, odziv senzora će biti replika signala sa odgovarajućim kašnjenjem. Merjenje se zasniva na merenju razlike u kašnjenju između reflektora  $R_2$  i  $R_1$ .

U drugom slučaju se na  $R_2$  priključuje električno opterećenje koje je srazmerno merenoj veličini, a takav tip radio senzora se naziva radio transponder ili transponder.

Antena je vezana na ulazni interdigitalni pretvarač (IDP), a reflektor (izlazni IDP)  $R_2$  je opterećen spoljašnjom impedansom  $Z_p$ . Reflektor se modeluje kao trolpol sa dva akustična i jednim električnim parom krajeva. Zavisnost koeficijenta refleksije reflektora od opterećenja je data u [6]:

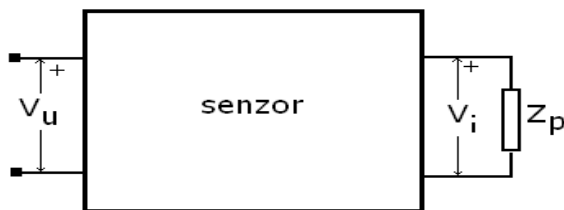
$$P_{11}(Z_p) = P_{11}^{ks} + \frac{2P_{13}^2}{P_{33} + \frac{1}{Z_p}} \quad (3)$$

gde je  $P_{11}^{ks}$  koeficijent refleksije pri kratkospojenim priključcima. Za dvostuke elektrode  $P_{11}^{ks}$  je približno nula.

Ovaj sistem je prvo korišćen za identifikaciju životinja (RF identifikacija). Kod identifikacije se reflektori prave kao prilagođeni filtri na PSK, impulsno poziciono ili impulsno fazno modulisan signal. Prva industrijska primena je bila kod naplate putarine u Norveškoj. Radna učestanost je ograničena veličinom podloge i dobrotom fotolitografskog postupka. Sada se koriste učestanosti u opsegu od 30 MHz do oko 3GHz. Rad radio sistema u kojima se koriste radio senzori je regulisan propisima svake države.

### III. ANALIZA TRANSPONDERA

Obično se se analiza vrši u vremenskom domenu izračunavanjem vremena kašnjenja. U frekvencijskom domenu analizira se koeficijent refleksije reflektora  $R_2$  kao što je prikazano u prethodnom odeljku. Ovde je predstavljen novi način analize u frekvencijskom domenu korišćenjem ekvivalentnog kola za PAT element [7]-[10]. PAT senzor se posmatra kao četvoropol, gde je jedan kraj ulazni pretvarač gde je antena, a drugi kraj izlaz pretvarača  $R_2$  na koji je priključena impedansa  $Z_p$  koja na neki način predstavlja mernu veličinu, Sl. 3.



Sl. 3 Senzor kao ekvivalentni četvoropol.

Parametri četvoropola se mogu izračunati na na načine prikazane u [1], [7]-[10]. Pošto se radi na rezonantnoj učestanosti onda je izračunavanje jednostavnije. Ulazna admitansa je data sledećim izrazom:

$$Y_u = G_a(f) + jB_a(f) + j2\pi f C_T \quad (4)$$

gde je

$$G_a(f) = 2f_0 C_0 k^2 \left( \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \sin \frac{N\theta}{2} \right)^2 \quad (5)$$

$$B_a(f) = f_0 C_0 k^2 \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \left( 2N + \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \sin N\theta \right) \quad (6)$$

$$\theta = 2\pi f / f_0 \quad (7)$$

$$C_T = N C_0 \quad (8)$$

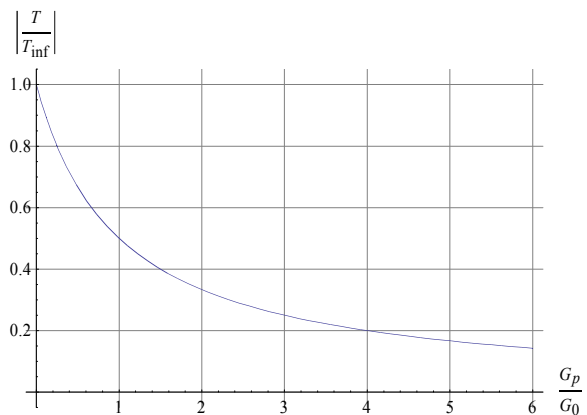
$N$  broj parova elektroda IDTa,  $C_0$  kapacitivnost jednog para elektroda,  $f_0$  rezonantna učestanost i  $k$  piezoelektrična konstanta materijala podloge.

Na rezonantnoj učestanosti  $B_a$  je jednako nuli, a preostala kapacitivnost se obično kompenzuje.

Reemitovan signal antene je ustvari primljeni (ispitni) signal koji se reflektovao od  $R_2$  i vratio na ulaz. U tom slučaju je na rezonantnoj učestanosti odnos reemitovanog signala pri nekoj impedansi i reemitovanog signala kada su krajevi otvoreni jednak odnosu funkcija prenosa pri impedansi  $Z_p$  i pri otvorenim krajevima. Ako je antena prilagođena na ulazni pretvarač, prenosna funkcija je data sledećim izrazom:

$$T(Z_p) = T(\infty) \frac{1}{1 + \frac{R_o}{Z_p}} \quad (9)$$

gde je  $T(\infty)$  prenosna funkcija kada je  $Z_p$  beskonačno, a  $R_o$  ulazna otpornost pretvarača na rezonantnoj učestanosti. Može se lako pokazati da su i koeficijenti refleksije u istom odnosu. Ako je impedansa opterećenja čisto otporna ( $Z_p = R_p = 1/G_p$ ) onda se odnos  $T(Z_p)$  i  $T(\infty)$  može prikazati dijagramom sa Sl.4.



Sl. 4. Uticaj otpornog opterećenja na relativnu funkciju prenosa

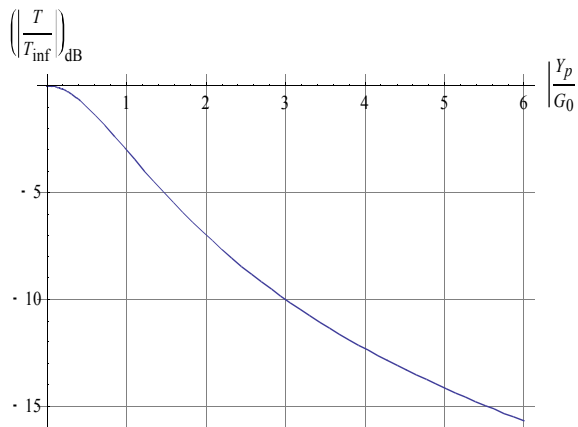
Sa Sl. 4 je jasno da se iz poznatog (izmerenog) odnosa

$T/T_{inf}$  i  $G_o$  može odrediti nepoznato opterećenje. Ako je ta otpornost funkcija temperature, onda se znači može odrediti i temperatura na kojoj se otpornost nalazi.

Ako je opterećenje čisto induktivno ili kapacitivno odnos  $T(Z_p)$  i  $T(\infty)$  može da se izrazi formulom:

$$T(B_p) = T(\infty) \frac{1}{1 + jB_p R_o} \quad (10)$$

Taj slučaj je prikazan na Sl. 5.



Sl. 5. Relativna prenosna funkcija u zavisnosti od reaktivnog opterećenja.

#### IV. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana primena elemenata sa površinskim akustičkim talasom u radio senzorima. Prikazan je princip rada i nov, jednostavniji način analize jedne vrste ovih senzora.

#### LITERATURA

- [1] Matthews L., ed., *Surface Wave Filters*, 1977, John Wiley, New York.
- [2] Morgan D. P., *Surface Wave Devices for Signal Processing*, 1985, Elsevier, London
- [3] Hribšek M., Elementi sa površinskim akustičnim talasom i njihova primena, *Tehnika-Elektrotehnika*, 1982, god. 31, str. 1725-1733, survey paper.
- [4] Hribšek M., Surface Acoustic Wave Devices and their applications, *Proc. MIEL 86*, 1986, vol.1, pp. 37-46, Belgrade, invited paper.
- [5] Hribšek M., Elementi sa površinskim akustičnim talasom u telekomunikacijama, *Proc. TELFOR 2000*, 2000, invited paper.
- [6] Pohl A., A Review of Wireless SAW Sensors, *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 2000, vol. 47, no. 2, pp.317-332, Invited Paper.
- [7] Smith W.R., et al, Analysis of interdigital surface wave transducer by use of equivalent circuit model, *IEEE Trans. on MTT*, 1969, vol.17, No 11, pp.856-864.
- [8] Debnath N., Ajmera J.C., Hribšek M. F., Newcomb R.W., Scattering and Admittance Matrices of SAW Transducers, in *Circuits, Systems and Signal Processing*, 1983, vol. 2., No.2, pp.161-178.
- [9] Hribšek M., Tošić D., An Improved Algorithm for Analysis of Uniform SAW Transducers, in *Proc. 26<sup>th</sup> Midwest Symposium On Circuits and Systems*, 1983, INAOE, Puebla, Mexico, pp. 243-246.
- [10] Hribšek M., Tošić D., An Improved algorithm for Analysis of SAW Pulse Compression Filters, *Proc. 8th Microcoll*, Budapest, 1986, pp.373-374.

#### ABSTRACT

Surface acoustic wave devices (SAW) used in radio sensors are presented. Principles of operation, fabrication and types of the devices are explained. The new analysis method of one type of the sensors is proposed.

#### SURFACE ACOUSTIC WAVE DEVICES IN RADIO SENSORS

Marija Hribšek