PAT SENZORI I NJIHOVA PRIMENA

Zdravko R. Živković, TOC KoV - Poligon Nikinci

Sadržaj – U radu su izloženi principi merenja fizičkih veličina korišćenjem promene u vremenu kašnjenja površinskih akustičkih talasa (PAT) i PAT senzori koji se zasnivaju na ovim principima. Pored toga, prezentirani su savremeni PAT čirp senzori za daljinsku indikaciju i merenje, i analizirana njihova primena pri pojavi smetnji u prostiranju signala (Doplerov pomak) pomoću senzorske funkcije neodređenosti. Pokazano je takođe da se primenom tehnike proširenog spektra (čirp kompresija impulsa), uz upotrebu ovih senzora, omogućuje povećanje osetljivosti i tačnosti merenja.

1. UVOD

Elementi sa površinskim akustičkim talasima (PAT-SAW) se danas veoma mnogo koriste kako u komercijalnim tako i u visokoprofesionalnim uređajima i sistemima.Razlog tome su njihove performanse i širok spektar različitih tipova ovih elemenata. PAT elementi rade u frekventnom opsegu od 10 MHz do blizu 11 GHz kao: filtri propusnici opsega, linije za kašnjenje sa konstantnim i disperzivnim kašnjenjem, čirp filtri, konvolveri i korelatori, rezonatori itd. Najveći nedostatak ovih elemenata je relativno veliko uneseno slabljenje, čak i 20 dB, za materijale sa velikom temperaturnom stabilnošću. Drugi nedostatak je vrlo složeno projektovanje ali se to prevazilazi proizvodnjom u velikim serijama.

Ovi elementi se koriste pre svega za procesiranje signala u različitim elektronskim i telekomunikacionim sistemima. Međutim, njihova primena u sistemima automatske kontrole i upravljanja je mnogo manje zastupljena. Stoga ćemo u ovom radu analizirati mogućnosti upotrebe PAT elemenata za realizaciju senzora, elemenata neophodnih za detekciju i merenje neelektričnih veličina u bilo kom sistemu regulacije, nadzora i upravljanja. Takođe će biti razmotrena savremena rešenja PAT senzora i način njihove upotrebe.

2. OSNOVNI PRINCIPI

U najvećem broju primena PAT komponenti efekat ambijentalnih promena izazvan dejstvom veličina kao što su pritisak, temperatura ili mehanička sila smatra se nepoželjnim. Međutim, u slučaju merenja nekog fizičkog parametra te promene mogu biti vrlo korisne. Pokazano je [1] da naprezanje izazvano delovanjem spoljnjeg medijuma (gas, tečnost itd.) utiče na prostiranje akustičkih talasa izazivajući, pre svega, promene u faznom i vremenskom kašnjenju. Te promene, izazvane veličinom koja se meri mogu se iskoristiti za realizaciju senzora uzimajući za osetljivi element n.p PAT liniju za kašnjenje.

Dobro poznata procedura merenja nekog fizičkog parametra jeste njegova konverzija u frekvenciju koja se onda može meriti efikasno i sa velikom preciznošću. Navedeni princip može da se upotrebi i za realizaciju PAT senzora koristeći pri tom kao generator signala oscilator sa površinskim akustičkim talasima (PATO). Obično se kod PATO-a kao element povratne sprege uzima linija za kašnjenje sa dva para krajeva ili rezonator. Konfiguracija PATO-a sa linijom za kašnjenje u petlji povratne sprege,pogodna za primenu kao merni pretvarač, data je na slici 1



Slika 1. Šematski prikaz konfiguracije PAT oscilatora za senzorske primene

Kao što se sa slike vidi, monokristalna podloga je stanjena u zoni IDP-a formirajući minijaturnu fleksibilnu dijafragmu osetljivu na delovanje medijuma. Za oscilovanje senzorskog kola sa slike 1. potrebno je da su ispunjeni sledeći uslovi :

- pojačanje u otvorenoj petlji da bude veće od jedinice
- ukupni fazni pomak u kolu, akustički plus električki
- treba da bude jednak 2nπ gde je n ceo broj (broj moda)

$$\frac{2\pi f L}{v} + \phi_T(f) + \phi_A(f) = 2\pi n \tag{1}$$

i gde je f frekvencija oscilovanja, v brzina akustičkih talasa, L efektivna dužina akustičke linije za kašnjenje, a $\phi_T i \phi_A$ su fazni pomaci oba pretvarača i elektronskog pojačavača respektivno. Delovanje neke spoljne veličine izaziva promene u L, v i ϕ_T što prema (1) dovodi do varijacije u frekvenciji oscilovanja zavisne od vrednosti fizičkog parametra koji se meri. Ukoliko se vreme kašnjenja u PAT kolu predstavi količnikom ukupnog faznog pomaka sa kružnom učestanošću

$$\tau_a = \frac{L}{v} + \frac{\phi_T}{2\pi f} \tag{2}$$

i ako je senzorski sklop izložen dejstvu neke procesne veličine, na osnovu (1) se za izlazni signal senzorskog kola dobija :

$$f(P,\theta) = \frac{n}{\tau} = \frac{n}{\tau_a + \tau_e} \cong \frac{n}{\tau_a(P,\theta)}$$
(3)

gde su P i θ pritisak odnosno temperatura a τ_a i τ_e su akustičko i električno kašnjenje, pri čemu je τ_a mnogo veće od τ_e . Dobijena relacija (3) pokazuje da izlazni signala kola sa slike 1. varira zavisno od promene vrednosti merne veličine, što ukazuje da se PAT senzori mogu ostvariti implementacijom osetljive PAT linije za kašnjenje u elektronski oscilator tj. realizacijom PATO-a kontrolisanog njenim parametrom kašnjenja τ .

Razmotrićemo mogućnosti primene PAT senzora za nezavisno merenje pritiska i temperature i izvesti relacije za izlazni signal u tom slučaju. Tako, ukoliko se propagacija PAT-a odvija na dovoljno malom segmentu površine podloge, efekti primene naprezanja će biti uniformni duž puta prostiranja. U tom slučaju, s obzirom da oba parametra vezana za kašnjenje i L i v mogu varirati u odzivu na P i θ , normalizovano diferencijalno kašnjenje će biti dato izrazom

$$\frac{d\tau_a}{\tau_a} = \gamma_{\theta} d\theta + \gamma_P dP \tag{4}$$

gde su :

$$\gamma_{\theta} = \left(\frac{L}{\nu}\right)^{-1} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{L}{\nu}\right) = \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial \theta} - \frac{1}{\nu} \frac{\partial \nu}{\partial \theta}$$
(5)

$$\gamma_P = \left(\frac{L}{\nu}\right)^{-1} \frac{\partial}{\partial P} \left(\frac{L}{\nu}\right) = \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial P} - \frac{1}{\nu} \frac{\partial \nu}{\partial P} \tag{6}$$

koeficijenti akustičkog kašnjenja prvog reda.

Kada je dužina prostiranja površinskih talasa dovoljno velika tako da se promene opterećenja i pritiska ne mogu smatrati uniformnim, izraz za kašnjenje (4) dobija nešto drugačiji oblik

$$\frac{d\tau_a}{\tau_a} = \widetilde{\gamma}_{\theta} d\theta + \widetilde{\gamma}_P dP \tag{7}$$

gde se koeficijenti γ_{θ} i γ_{P} proračunavaju integracijom duž puta propagacije. Tada se iz (1)-(7) se za frekvencijski izlaz kola senzora dobija

$$f(P,\theta) \cong f_o \Big[1 - \widetilde{\gamma}_{P_o} P - \widetilde{\gamma}_{\theta_o} (\theta - \theta_o) \Big]$$
(8)

tj. on ima oblik linearne funkcije prvog reda gde su $P_o=0$ i $\theta=\theta_o$ referentni uslovi. Ovakvi rezultati dobijeni za PAT senzore mogu biti vrlo značajni i pokazuju da se oni mogu optimizovati za visoko precizna merenja veličina kao što su P i θ . Npr. za slučaj temperaturnih promena, PATO-i sa frekvencijom oscilovanja u opsegu od 40 do 80 MHz imaju temperaturnu osetljivost u opsegu 2 do 5 kHz/°C [1].

Takođe, primenom ovih jednostavnih elemenata moguće je realizovati i mnogo sofisticiranije PAT senzore. Primer takvog rešenja je dualna PAT konfiguracija na slici 2. Prezentirani sklop predstavlja napredno rešenje temperaturski kompenzovanog senzora pritiska. Naime, sa dva PATO-a čiji su izlazi vezani na mešač i filtrirani da se dobije diferencijalni frekventni izlaz, moguće je realizovati temperaturski kompenzovan senzor pritiska.



Slika 2. Šema dvokanalnog PATO-a konfigurisanog za aplikaciju kao senzor

Ukoliko su referentne frekvencije oscilatora skoro identične $(f_{o1}\cong f_{o2}\cong f_{o})$ i mnogo veće nego izabrana diferencijalna frekvencija, diferencijalni frekventni izlaz će biti proporcionalan diferencijalnom mernom pritisku i temperaturi PAT elemenata

$$f_D = f_2 - f_1 \cong f_{D_o} - f_o \widetilde{\gamma}_{P_o} (P_2 - P_1) - f_o \widetilde{\gamma}_{\theta_o} (\theta_2 - \theta_1) \quad (9)$$

Ukoliko je član $\theta_2 - \theta_1$ dovoljno mali, što je realno s obzirom da su PATO-i na istom kristalu, ovaj dualni senzor pritiska će omogućiti temperaturski kompenzovano merenje diferencijalnog pritiska u širokom temperaturskom opsegu, obezbeđujući visok stepen potiskivanja frekventnog pomaka zbog promene temperature. Inače, ovakav sklop ima digitalnu formu izlaza koja se može registrovati nekim brojačem ili pak direktno voditi u računar, n.p za kontrolu procesa. Stoga, PAT senzori imaju značajnu prednost u odnosu na senzore čiji je izlazni signal naponski i gde se mora vršiti procesiranje preciznim A/D konvertorima pre uvođenja u digitalne procesore signala.

3. PAT SENZORI ZA BEŽIČNE APLIKACIJE

Za razliku od PAT elemenata sa dva para krajeva koji se sastoje od dva IDP-a čiji je rad reverzibilan, u elementu sa jednim ulazom samo jedan pretvarač je vezan električki a svi drugi su refleksioni, slično rezonatoru. Vezivanjem električnog ulaza na antenu, dobija se pasivni senzor pogodan za bežične aplikacije. Struktura takvog PAT elementa i dijagrami signala koji ilustruju njegov rad prikazani su na slici 3. Ovakvi, tzv. "ID - tag" senzori mogu se upotrebiti za daljinsku indikaciju identifikacionih kodova, i već su implementirani u sistemima za naplatu putarine [2]

Kada se na senzor dovede RF upitni signal, u signalu odgovora se pojavljuje povorka impulsa pri čemu svaki pojedini impuls odgovara jednom reflektoru a kašnjenje vremenu akustičke propagacije. Identifikaciona informacija je sadržana u broju i vremenskom pomaku reflektovanih impulsa. Razlika u kašnjenju $\tau_{m,n}$ između dva impulsa m i n u signalu replike zavisi od mehaničkog rastojanja $L_{m,n}$



Slika 3. PAT senzor za daljinsku indikaciju

između odgovarajućih reflektora i brzine površinskih akustičkih talasa i data je izrazom

$$\tau_{m,n} = \frac{L_{m,n}}{v} \tag{10}$$

Talasna dužina PAT-a na frekvenciji f je

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{11}$$

Kašnjenje $\tau_{m,n}$ se određuje iz prijemnog signala a na osnovu njega, koristeći (10) može se odrediti relativna promena mehaničke dužine ili pak promena brzine PAT-a ϵ . Ukoliko se za monokristalnu podlogu uzme litijum niobat, materijal čiji je ukupni temperaturski koeficijent $\epsilon_{\tau}(\theta)$ vremenskog kašnjenja τ zbog varijacije temperature θ aproksimativno 94 ppm/°K, "ID-tag " senzori se mogu upotrebiti za daljinsku indikaciju temperature.

Rezolucija sistema koji koriste podatke o vremenskom kašnjenju impulsa u senzorskom odzivu može se povećati ako se umesto merenja vremenske razlike primeni merenje fazne razlike. Tako, u RF opsegu od ~ 1 GHz, diferencijalnom vremenskom kašnjenju od 1 ns odgovara fazni pomak od 2π . Naravno, teško je odrediti vremenske pomake reda subnanosekundi ali je lako proceniti fazne razlike od nekoliko stepeni u koherentnom prijemniku. Na taj način rezolucija sa nekoliko stepeni °K može biti povećana na aproksimativno stotinak mK.

4. PAT ČIRP SENZORI

Razmotrićemo sada sisteme za kompresiju čirp impulsa sa aspekta moguće primene u PAT senzorima. U ovim sistemima za generisanje čirpa i njegovu kompresiju koriste se disperzivne linije za kašnjenje tipa PAT ekspandora i kompresora, čije je kašnjenje linearna funkcija učestanosti. Ako se ovi sistemi podvrgnu ambijentnim uslovima n.p zagrevanju, promena uslova će rezultovati u frekventnom pomaku kako čirpa generisanog u ekspanderu tako i impulsnog odziva kompresora, slično Dopplerovom pomaku radarskih signala. Sve ovo ima za posledicu vremenski pomak kompresionih impulsa koji zavisi od fizičkog uticaja na PAT elemente. Kako se parametri akustičkog elementa kao što su brzina PAT-a ili dužina menjaju zbog zagrevanja, ovi disperzivni PAT elementi iz sistema za kompresiju impulsa mogu biti upotrebljeni kao temperaturni senzori [3]. Ukoliko se jedna od spomenutih disperzivnih PAT komponenata implementira kao pasivni reflektor vezan za antenu i spregnut u sistem preko RF signala, spomenuti vremenski pomak može biti upotrebljen za daljinsku indikaciju. Šematski prikaz disperzivnog PAT senzora sa jednim parom krajeva i disperzijom "na gore" (linearna funkcija raste) dat je na slici 4.



Slika 4. Disperzivni PAT senzor "na gore"

Princip rada sistema sa disperzivnim PAT senzorima ilustrovan je na slici 5. Pretpostavićemo da je signal upita s(t)prilagođen linearnom čirpu "na dole", a impulsni odziv senzora $h_s(t)$. Deo propusnog opsega senzora koji se preklapa sa frekventnim opsegom signala je aktivna zona za operacije sistema, a TB proizvod unutar te zone je efektivno korelaciono pojačanje. Odziv senzora je kompresioni impuls reemitovan u upitni sistem.

Razmotrićemo primenu senzora u slučaju temperaturskih promena tj. zagrevanja. Periodičnost p elektroda IDP-a se povećava sa $\varepsilon(\theta)$, a maksimum akustoelektrične interakcije se dešava na $f_0/\varepsilon(\theta)$ (***** a na slici 5.). Impulsni odziv senzora klizi ka nižim frekvencijama za $\varepsilon(\theta) > 1$ a vremensko kašnjenje kompresionog impulsa postaje duže. U slučaju, pak, senzora sa čirpom na dole kašnjenje kompresionog impulsa će se smanjivati.

Poboljšanje osetljivosti disperzivnih senzora u odnosu na obične "ID-tag" senzore sa jednim ulazom može se proceniti prema [3]

$$\left|\frac{\Delta T_{chirp}}{\Delta T_{tr,vreme}}\right| = \frac{T_{chirp}}{T_{tr,vreme}} \cdot \frac{f_o}{B} \approx \frac{f_o}{B}$$
(12)

Znači, birajući odnos centralne frekvencije i spektralne širine čirpa B, može se projektovati senzor zahtevanih performansi. Tako recimo, sa odnosom f_o/B od nekoliko stotina može se dobiti rezolucija reda mK. U praktičnim sistemima dimenzije senzora treba da budu što manje, time itrajanje čirp impulsnog odziva što kraće. U slučaju delimičnog napuštanja frekventnog opsega B, slika 5., efektivni TB proizvod se smanjuje a efektivno uneseno slabljenje senzorskog sklopa se tada redukuje za kompresiono pojačanje disperzivne linije za kašnjenje. Kompromis između veličine PAT podloge i stoga ograničenog efektivnog TB proizvoda zahteva disperzivne PAT linije za kašnjenje sa TB proizvodom od nekoliko stotina.



Slika 5. Princip rada PAT čirp senzora

Postoje i takve aplikacije gde se PAT senzori koriste na pokretnim uređajima i vozilima. Tu primenu karakterišu smetnje u prijemu i prostiranju signala, Doplerov pomak itd. Stoga je potrebno obezbediti unutrašnju referencu. Jedan od načina je primena obe vrste čirp reflektora na senzoru, na gore i na dole, i upiti sa oba tipa čirpa istovremeno. U tom slučaju odziv senzora će se sastojati od dva impulsa sa vremenskim pomakom zbog termičke ekstenzije podloge i varijacije brzine (jednačine 10 i 11), i dodatnog vremenskog pomaka zbog pomeranja aktivnog regiona. Merna veličina će u tom slučaju biti predstavljena samo diferencijalnim kašnjenjem između kompresionih impulsa.



Slika 6. Funkcija neodređenosti g(t,ε) dvostruko čirpovanog PAT senzora

Analogno metodama u radarskoj tehnici, za analizu rada senzora pogodno je upotrebiti senzorsku funkciju neodređenosti. Numeričke vrednosti odziva dvostruko čirpovanog PAT senzora, za gore opisani senzorski sistem, prikazane su na slici 6. Dijagram prikazuje amplitude kompresionih impulsa u zavisnosti od vremena i relativne promene parametra senzora $\varepsilon(\theta)$. Gore spomenuta degradacija osetljivosti pretvarača zbog distorzije ovojnice impulsa može se posmatrati u zavisnosti od porasta vrednosti parametra ɛ. Zbog slabog ponderisanja signala kompresioni impulsi imaju bočne snopove koji vode daljoj degradaciji performansi sistema. U cilju optimizacije sistema potrebno bi bilo primeniti napredniji sistem ponderisanja predajnog signala. Jedna od prednosti metode kompresije impulsa primenjene kod ovog tipa senzora, u poređenju sa jednostavnim "ID-tag" tipom, jeste i sniženje snage signala upita za faktor jednak efektivnom TB proizvodu.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu su prikazane mogućnosti realizacije senzora primenom elemenata sa površinskim akustičkim talasima. Pokazano je da se princip merenja nekog fizičkog parametra, njegovom konverzijom u frekvenciju, može realizovati implementacijom PAT linije za kašnjenje osetljive na poremećaj u elektronski oscilator čija se frekvencija kontroliše parametrom kašnjenja τ . Analiziran je njihov rad i konstatovano da oni imaju značajne prednosti u odnosu na senzore čiji je izlaz naponski i čiji se izlazni signal mora procesirati preciznim A/D konvertorima. Takođe su prezentirani moderni PAT senzori sa jednim ulazom vezanim na antenu koji se RF signalima sprežu u sisteme za daljinsku indikaciju i očitavanje. Ukazano je da se rezolucija ovih sistema može povećati ukoliko se umesto procene vremenskog kašnjenja primeni procena faznog kašnjenja. Posebno su razmotreni PAT čirp senzori i pokazano da primena tehnike proširenog spektra (čirp kompresija impulsa) za daljinsko očitavanje mernih rezultata, u sprezi sa senzorima sa disperzivnom linijom za kašnjenje omogućuje bolju osetljivost i tačnost merenja nego primena sa običnim senzorima sa jednim ulazom.

LITERATURA

- [1] D.P. Morgan, Surface Wave Devices for Signal Processing, Elsevier, Amsterdam, 1985.
- W.E. Bulst, C. Ruppel, *Developments to watch in* SAW Technology, Siemens Review, Spring 1994., pp. 2-6.
- [3] F. Seifert, W.E Bulst., C. Ruppel, *Mechanical* sensors based on surface acoustic waves, Sensors and Actuators, A44 (1994), pp. 231-239.

Abstract – Principle of measuring some physical parametar by use the change in SAW time delay and SAW sensors based on these principles are explained. Modern SAW chirp sensors for remote sensing and readout are also presented and their application to moving machinery based on the sensor ambiguity function is discussed. It is also shown that use of spread spectrum methods with this sensors yields better sensitivity and accuracy of measurement.

SAW SENSORS AND THEIR APPLICATIONS Zdravko R Živković