

Ispitivanje vremenske sinhronizovanosti mernih signala snimljenih MEMS akcelerometrima

Miodrag Malović, Ljiljana Brajović, Tomislav Šekara, Saša Kočinac

Apstrakt—U radu je opisano ispitivanje sinhronizovanosti podataka koji su uzorkovani putem odvojenih MEMS akcelerometara. Korišćeni su bežični senzorski uređaji razvijeni na Građevinskom fakultetu u Beogradu, namenjeni merenju vibracija građevinskih objekata. Poznato je da ovi uređaji mogu da postignu tačnost vremenskog označavanja uzoraka reda veličine 10 μ s za kraće merne periode (ispod minuta). Ovo znači da je greška koju elektronika unosi zanemarljiva za merenje mehaničkih veličina sa frekvencijom uzorkovanja reda veličine kHz. Analizirane su varijacije u fazi izlaznih signala različitih senzora prilikom identične pobude. Problem je ograničena mogućnost ostvarivanja identične mehaničke pobude na različitim mestima u prostoru, te je bez savršene opreme nemoguće razgraničiti koliki deo greške potiče od nepoklapanja ulaznih signala, a koliki od nesavršenosti senzorskog aparata. Pokazano je da je moguće dobiti standardnu devijaciju vremenskog ofseta između snimljenih signala reda veličine milisekunde.

Ključne reči—Akcelerometri, MEMS, sinhronizovanost, simultanost, vreme, ubrzanje, vibracije.

I. UVOD

Statičke karakteristike pretvarača, senzora ili senzorskih sistema su dobro poznate široj publici. U ovaj skup spadaju na primer tačnost, preciznost, osetljivost ili histerezis. S druge strane, dinamičke karakteristike predstavljaju nejasnoću za veliki broj nedovoljno stručnih korisnika, a proizvođači ovo zlostupotrebljavaju tako što ih najčešće ne specificiraju u dovoljnoj meri. Uobičajeno je da se osim frekvencijskog propusnog opsega u specifikacijama proizvoda ne nađe nijedna druga dinamička karakteristika. U stvarnosti, svaki senzor predstavlja složen fizički sistem koji se može manje ili više uspešno modelovati diferencijalnom jednačinom određenog reda, a najčešće se koristi sistem drugog reda. Fizika iza ovog modela je Njutnov zakon akcije i reakcije koji u slučaju mehaničkih pretvarača izjednačava eksternu silu sa sumom inercijalne sile, sile prigušenja, i sile opruge. I kod električnih pretvarača model je često sličan, s tim da su izvori nelinearnosti reaktivni elementi. Stvarni odziv senzora obično uključuje i pojavu tzv. mrtvog vremena, koje predstavlja

Miodrag Malović – Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Karnegijeva 4, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: ofis@malovic.in.rs).

Ljiljana Brajović – Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: brajovic@grf.rs).

Tomislav Šekara – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: tomi@etf.rs).

Saša Kočinac – Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Karnegijeva 4, 11200 Beograd, Srbija (e-mail: sasakocinac@tmf.bg.ac.rs).

kašnjenje izlaznog u odnosu na ulazni signal. Ovo vreme, kao i konstante sistema drugog reda (faktor prigušenja i sopstvena frekvencija), najčešće nisu date od strane proizvođača modernih integrisanih senzora (kao što su MEMS akcelerometri), niti ima pomena o njihovim statističkim odstupanjima (vrsti raspodele i standardnoj devijaciji) između različitih komada.

Pomenute karakteristike utiču na sinhronizovanost (raspodelu i standardnu devijaciju vremenskih žigova) mernih podataka sakupljenih sa različitih lokacija različitim komadima senzora istog tipa. U svrhu orijentacionog (sasvim tačno bi zahtevalo savršenu opremu za izazivanje mehaničkih oscilacija i savršena kućišta) određivanja sinhronizovanosti izvršeno je nekoliko serija eksperimenata u kojima je upotrebljena Brabender vibraciona platforma, sa mogućnošću podešavanja frekvencije i amplitude relativno pravilnih sinusnih oscilacija.

II. MERNI SISTEM

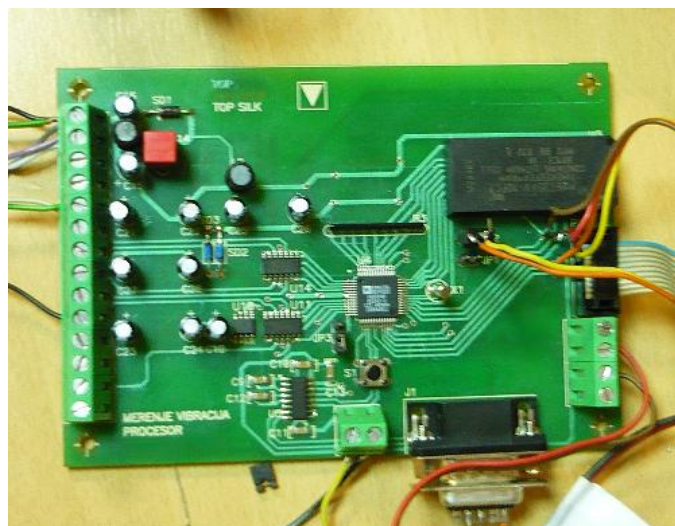
Korišćen je bežični merni sistem za merenje vibracija razvijeni na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu [1]. Ovaj je bio sastavljen od tri senzorska uređaja koji su povezani sa centralnom stanicom (PC računarom) preko radio modema. Uređaji su baterijski napajani. Imaju u potpunosti originalan hardver i softver, baziran na ADuC-845 mikrokontroleru (proizvođača Analog Devices), koji predstavlja modernu varijaciju 8051 (Intel MCS-51), sa bržim taktom, niskom snagom, i mogućnošću ulaska u *sleep* mod, u kome je potrošnja zanemarljiva (što je posebno značajno pri dizajnu baterijski napajanih sistema).

Kao glavni senzor sistema u ovoj aplikaciji je korišćen LIS3LV02DL MEMS akcelerometar (proizvođača STMicroelectronics). On je uglavnom namenjen merenjima vibracija i detekciji slobodnog pada. Njegov merni element se sastoji od tri kapacitivna polu-mosta koji su u ravnoteži kada je ubrzanje jednako nuli. Primenjeno ubrzanje veće od nule dovodi do pomeranja seizmičkih masa pod uticajem inercijalnih sila i dolazi do promene odgovarajućih kapacitivnosti. Izlazni naponi na polu-mostovima su proporcionalni ovim promenama i naponima napajanja. Analogni izlazni signali se dobijaju integracijom izlaznih napona sa odgovarajućih polu-mostova i oni se zatim uzorkuju trokanalnim A/D konvertorom. Dalje procesiranje se vrši logičkim kolom čiji se parametri mogu podesiti od strane korisnika, pre nego što signal stigne na izlaz u digitalnoj formi i očita se putem I2C ili SPI interfejsa [2,3].

Primarna namena uređaja je merenje vibracija kapitalnih

građevinskih objekata, kao što su mostovi, brane i tornjevi, u cilju nadzora stanja (*structural health monitoring*-a, ili SHM-a [4]). U cilju procene sinhronizovanosti podataka koje sistem skuplja, pre eksperimenata sa mehaničkom pobudom, izvršeno je ispitivanje sa električnom eksitacijom, pri čemu je konstatovana neodređenost reda veličine 10 μ s za kraće merne periode (do minuta). Razlog što se insistira na proceni pouzdanosti vremenskog označavanja podataka sa različitih senzorskih uređaja jeste što je prilikom SHM analize objekata bitno pronaći tačne korelacije između faza određenih harmonika mehaničkih oscilacija u različitim tačkama na mernom objektu. Srećom, frekvencije od značaja u građevini su utoliko manje što je objekat veći, pa za kapitalne objekte (čija je procena stanja od najveće važnosti) maksimalna vrednost iznosi oko 20 Hz, tako da su najmanji periodi od interesa oko 50 ms.

Sl. 1 prikazuje izgled glavne štampane ploče uređaja, pored koje se pločica akcelerometra posebno montira.



Sl. 1. Glavna ploča senzorskog uređaja, napravljena u *surface-mount device* (SMD) tehnologiji

III. EKSPERIMENTI

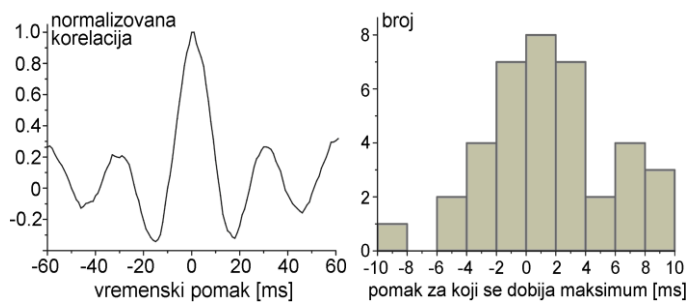
Određivanje vremenskog pomaka između dva signala (sa dva različita senzora) je vršeno metodom *Time Delay Estimation* (TDE). To znači da se upotrebljava kros-korelacija dva signala koji se transliraju u vremenu i traži se ofset (pomeraj, odnosno vremenska razlika) pri kome je kros-korelaciona funkcija maksimalna [5]. Kros-korelaciona funkcija predstavlja produkt dva signala sa uklonjenom jednosmernom komponentom. TDE se najčešće koristi u uređajima kao što su sonari ili radari da bi se detektovalo poklapanje između emitovanog i odbijenog signala. Takođe se koristi kod matrica senzora (npr. seizmičkih ili mikrofona) da bi se detektovao izvor signala (kada ne postoji veštački generisan referentni signal; ovakvi sistemi se nazivaju pasivni).

Pošto uzorci na različitim uređajima nisu uzimani istovremeno, jedan signal je interpoliran linearno tako da se odrede vrednosti koje se množe sa uzorcima sa drugog

uređaja. Osim linearne interpolacije, moguće je korišćenje i drugih algoritama, koji su najčešće zasnovani na polinomima ili Furijeovoj analizi [6]. Takođe, koriste se i tehnike obrade same funkcije kros-korelacije, da bi se preciznije identifikovao vremenski pomak [7].

Akcelerometar LIS3LV02DL ima programabilan opseg ubrzanja i frekvenciju odabiranja. U svim eksperimentima korišćen je opseg od $\pm 2g$ (druga opcija je $\pm 6g$). Frekvencija odabiranja akcelerometra je 40, 160, 640 ili 2560 Hz. Korišćene su frekvencije od 160 Hz (pogodna za merenja u građevini) i 2560 Hz (maksimalna).

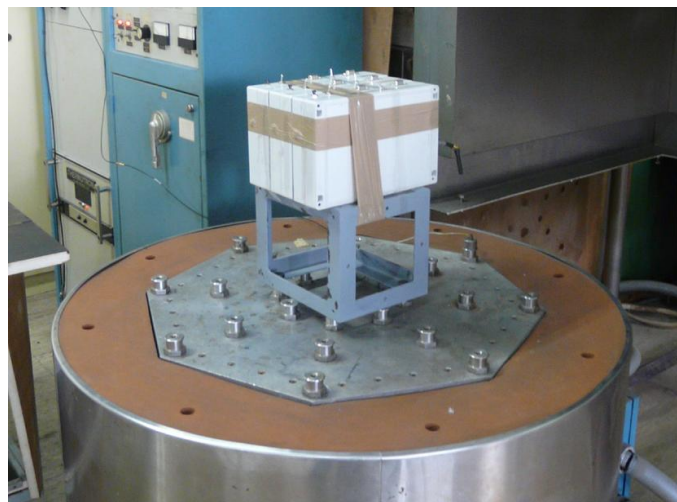
U preliminarnoj seriji eksperimenata, dve akcelerometarske pločice su izvađene iz kućišta i montirane na zajedničku plastičnu podlogu, nekoliko santimetara jedna od druge. Ova pločica je zatim pomerana na različite načine, manuelno ili izazivanjem vibracija podloge. Korišćena je frekvencija odabiranja od 160 Hz i korak TDE analize od 1 ms (približno šestina perioda uzorkovanja). Rezultati su prikazani na Sl. 2 gde vidimo srednju normalizovanu korelaciju na levoj strani i histogram koji pokazuje broj maksimuma korelacije za odgovarajuće pomake na desnoj strani. Pod normalizovanom korelacijom se podrazumeva vrednost korelacionog integrala dobijena za određeni vremenski pomak, podeljena sa vrednošću autokorelacionog integrala (integrala za nulti vremenski pomak). Grafik levo prikazuje srednju vrednost za sve eksperimente. U nekim eksperimentima maksimalna korelacija se dobija za nulti pomak, a u drugim ne. Histogram desno pokazuje frekvenciju pojavljivanja maksimuma za različite pomake. Zaključujemo da postoji sistemski ofset (srednje odstupanje) od 1 ms, i standardna devijacija od 4 ms. Obe vrednosti su manje od perioda uzorkovanja pa možemo reći da je ovo unutar očekivanih granica.



Sl. 2. Srednja normalizovana korelacija (levo) i histogram broja pojavljivanja maksimalne korelacije (desno), u funkciji vremenskog pomaka, za preliminarne eksperimente; sekundarni pikovi na levom dijagramu opisuju rezonantne efekte podloge (stola)

Eksperimentalna postavka u glavnom eksperimentu, koji je izveden u Vojnotehničkom institutu (VTI) u Beogradu, je prikazana na Sl. 3. Korišćena je frekvencija odabiranja od 2560 Hz, a korak TDE analize je bio 0.1 ms (oko četvrtina perioda uzorkovanja). Senzorski uređaji su postavljeni na vibracionu platformu tako da se sami akcelerometri nalaze na približno jednakim odstojanjima od nje. Takođe, ovakva postavka smanjuje šum na osi na kojoj se javljaju vibracije

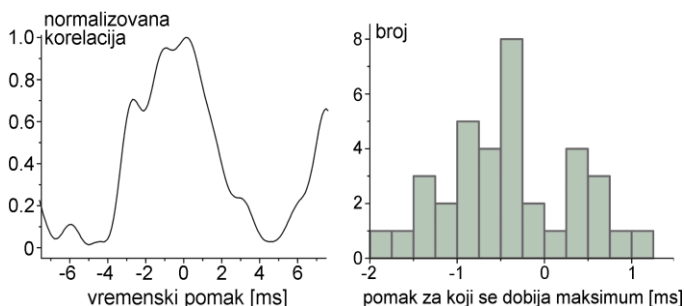
najvećeg intenziteta, jer je z-osa (u postavci na slici horizontalno orijentisana) ovog tipa akcelerometra osetljivija na šum zbog specifičnosti njegove izrade [3]. Naime, čip sadrži dva odvojena senzora. Jedan je dvoosni i služi za merenje x i y ubrzanja, a drugi je jednoosni i meri ubrzanje po z osi. Konstrukcija njihovih opruga i elektroda nije identična i samo se šum na z osi uvećava značajno kada se odgovarajuća seizmička masa udalji od ravnotežnog položaja (što se dešava pri izlaganju gravitacionom ubrzanju).



Sl. 3. Eksperimentalna postavka: senzorski uređaji na vibracionoj platformi, u vertikalnom položaju (glavni eksperiment)

Frekvencije pobude (vibracija platforme) preko 200 Hz su izazvale primetne sopstvene oscilacije rešetke (pričvršćene na platformu, a za koju su senzorski uređaji zalepljeni), ali ovo nije znatnije uticalo na rezultate u smislu kvarenja sinhronizacije. Uočljivo je da senzor u sredini, budući da se nalazi u truhu lokalnog stojećeg talasa, pokazuje nešto veće amplitude ubrzanja.

Jedan od važnih zaključaka iz eksperimenata u Vojnotehničkom institutu je da su uređaji dovoljno robusni, jer su svi preživeli najgrublje ispitivanje kome su ikada bili izloženi bez oštećenja. Radi se o više sati vibracija sa amplitudama ubrzanja u opsegu od 0.3 do 1 g i frekvencijama u opsegu od 5 do 700 Hz.



Sl. 4. Srednja normalizovana korelacija (levo) i histogram broja pojavljivanja maksimalne korelacije (desno), u funkciji vremenskog pomaka, za glavni set merenja, za najudaljeniji par senzora; oblik funkcije levo je zavisano od kombinacije frekvencija korišćenih u eksperimentu

Analizom korelacije signala, vidimo da se najgori rezultati dobijaju za par 1-3 senzorskih uređaja. Ovo je sasvim očekivano, budući da se radi o uređajima na krajevima (koji su postavljeni najdalje međusobno). Grafikonu za ovaj par su prikazani na Sl. 4. Oblik normalizovane autokorelacije (usrednjene za sve eksperimente) je, prirodno, zavisano od mešavine frekvencija koje su se koristile u eksperimentu, a koja je proizvoljna. Srednji vremenski pomak za maksimalnu korelaciju, odnosno sistemski ofset, iznosi 0.4 ms, a dobijena je standardna devijacija od 0.7 ms. Vidimo da su ovi rezultati bolji po apsolutnoj vrednosti, ali lošiji po relativnoj u odnosu na period odabiranja (oko 0.4 ms), kada se uporede sa preliminarnim eksperimentom (u kome je period odabiranja bio oko 6 ms).

Izvršena su još dva manja seta eksperimenata. U prvom, postavka je bila identična onoj na Sl. 3, ali je korišćena frekvencija uzorkovanja od 160 Hz. Dobijeni rezultati su slični kao u slučaju preliminarnih eksperimenata. Standardna devijacija je ista (4 ms) ali se sistemski ofset ovog puta ne zapaža (iznosi 0 ms za sve parove senzora). U drugom setu, frekvencija odabiranja je bila 2560 Hz, ali su senzori složeni vertikalno (jedan preko drugog, umesto jedan pored drugog). Uočava se vreme propagacije signala (mehaničkog talasa) od 0.8 ms po uređaju (sistemski ofset - toliko približno kasni signal na gornjem u odnosu na srednji senzor, kao i na srednjem u odnosu na donji). Standardna devijacija je porasla na 1 ms, što se objašnjava činjenicom da ovog puta nisu svi senzori bili u dodiru sa rigidnom metalnom podlogom, čime su dobili veću slobodu kretanja.

TABELA I

REZULTATI EKSPERIMENATA: BROJ MERENJA, FREKVENCIA UZORKOVANJA, SREDNJA VREDNOST VREMENSKOG OFSETA, I STANDARDNA DEVIJACIJA VREMENSKOG OFSETA

eksperiment	merenja	f_s [Hz]	t_{sr} [ms]	σt [ms]
preliminarni	38	160	1	4
vibr. platforma, VTI vertikalno, najdalji par	12	160	0	4
vibr. platforma, VTI vertikalno, najdalji par	36	2560	0.4	0.7
vibr. platforma, VTI horizontalno, susedni par	10	2560	0.8	1.0

IV. ZAKLJUČAK

Ostvarena je praktična sinhronizovanost signala, snimljenih na različitim mestima u prostoru različitim komadima istog tipa akcelerometra, reda veličine milisekunde. Standardna devijacija između signala je približno jednaka periodu uzorkovanja, nešto manja po relativnoj vrednosti kod nižih frekvencija, a nešto veća kod viših. Sistemski ofseti su do milisekunde u svim slučajevima.

Integrirani akcelerometri imaju neodređena vremena kašnjenja, sa nepoznatom standardnom devijacijom, a osim frekvencijskog propusnog opsega (koji je kod korišćenog modela jednak četvrtini frekvencije odabiranja) dinamičke

karakteristike nisu specificirane. Nije moguće tačno razgraničiti koliki deo efekata nesinhronizovanosti treba da se pripíše MEMS akceleratorima a koliki nesavršenosti mehaničke opreme (kako one za izazivanje vibracija tako i plastičnih kućišta senzorskih uređaja), tj. nejednakosti ulaznih signala. Ipak, očigledna zavisnost između standardne devijacije vremenskog ofseta i perioda uzorkovanja ukazuje da dinamičke karakteristike senzora imaju značajnu ulogu u posmatranoj pojavi.

Pouzdanost vremenskog označavanja podataka od nekoliko milisekundi je zadovoljavajuća za modalnu analizu vibracija kapitalnih građevinskih objekata, gde su frekvencije od značaja niske (a čemu je senzorski sistem prvenstveno namenjen). Čak i pri pojavi devijacija većih od nekoliko milisekundi, vršenjem više merenja i usrednjavanjem može se dobiti zadovoljavajuća preciznost pri upoređivanju faza najviših harmonika od interesa u građevinskim merenjima, čiji su periodi oko 50 ms.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju za finansijsku podršku Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (kroz projekte III-44002 i TR-36048), kao i Vojnotehničkom institutu u Beogradu za pruženu pomoć u istraživanju.

LITERATURA

- [1] M. Malović, Lj. Brajović, Z. Mišković, T. Šekara, "Simultaneity analysis in a wireless sensor network," *Metrol. Meas. Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 275-288, Jun. 2015.
- [2] STMicroelectronics (2008). *LIS3LV02DL datasheet*. [Online]. Available: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00091417.pdf>
- [3] S. J. Dixon-Warren, (2010, Dec. 23). "Motion sensing in the iphone 4: MEMS accelerometer," *MEMS J.*, [Online]. Available: <http://www.memsjournal.com/2010/12/motion-sensing-in-the-iphone-4-mems-accelerometer.html>
- [4] V. M. Karbhari, F. Ansari, (Eds.) *Structural health monitoring of civil infrastructure systems*, Cambridge, UK: Woodhead Pub., 2009.
- [5] D. Hertz, M. Azaria, "Time delay estimation between two phase shifted signals via generalized cross-correlation methods," *Signal Process.*, vol. 8, no 2, pp. 235-257, Apr. 1985.
- [6] A. M. Sabatini, E. Spinielli, "Correlation techniques for digital time-of-flight measurement by airborne ultrasonic rangefinders," *Proc. of the IEEE/RSJ/GI Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems '94: 'Advanced Robotic Systems and the Real World'*, Munich, Germany, vol. 3, pp. 2168-2175, Sep. 12-16, 1994.
- [7] C. A. Teixeira, L. Mendes, M. G. Ruano, W. C. Pereira, "A method for sub-sample computation of time displacements between discrete signals based only on discrete correlation sequences," *Biomed. Signal Process.*, vol. 31, pp. 560-568, Jan. 2017.

ABSTRACT

This paper analyses synchronicity of data acquired by different pieces of MEMS accelerometers. Wireless sensor devices developed at the Faculty of Civil engineering, University of Belgrade, used in the experiments, were designed primarily for vibration measurements in civil engineering. It was established earlier that they have timestamping accuracy of approximately 10 μ s for short (up to a minute) measuring periods. Therefore, the error introduced by the electronics is negligible for measurements of mechanical quantities using sampling frequency in the order of KHz. Variations of phases of output signals of different sensor pieces exposed to the identical excitation were analyzed. Limited possibility of producing the same mechanical excitation at different points in space poses a problem, so without the ideal equipment it is impossible to distinguish between errors to be attributed to the inequality of input signals and to the imperfections of the sensory apparatus. It was shown that millisecond order standard deviation of time offset between the signals can be obtained.

Analysis of time synchronization of signals acquired by MEMS accelerometers

Miodrag Malović, Ljiljana Brajović, Tomislav Šekara,
Saša Kočinac