

MREŽA BEŽIČNIH SENZORA ZA MERENJE VIBRACIJA NA GRAĐEVINSKIM OBJEKTIMA

Miodrag Malović, Ljiljana Brajović, Zoran Mišković

Ključne reči: bežični senzori, merenje vibracija, komponente sa niskom potrošnjom energije

KRATAK SADRŽAJ

Nedestruktivno praćenje stanja građevinskih objekata se bazira na merenju vibracija objekata pri dinamičkim ispitivanjima ili u toku njihove eksploatacije. U ovu svrhu se sve više koriste mreže bežičnih senzora (WSN) koje čine fleksibilan i jeftin merni sistem, jer nema razvlačenja kablova velikih dužina za povezivanje senzora. U ovom radu je ukratko prikazan sadašnji stepen razvoja i primene WSN i opisan je sistem za bežično merenje vibracija na objektima razvijen na Građevinskom fakultetu u Beogradu. Predstavljani su struktura i karakteristike mernog sistema baziranog na elektronskim komponentama male potrošnje i originalnom softveru.

WIRELESS SENSOR NETWORKS FOR VIBRATION MEASUREMENTS AT CIVIL ENGINEERING STRUCTURES

Keywords: wireless sensor network, vibration measurement, low power components

ABSTRACT

Nondestructive structural health monitoring in civil engineering is mostly based on of the structure vibrations measurements during dynamic examinations or in everyday use. Wireless sensor networks (WSN) are used for these purposes lately because they represent flexible and cheap measurement system without long cables connecting sensors with the measuring equipment. In this work, a brief presentation of the level of development of WSN applications is given and the WSN for vibrational measurements on civil engineering structures developed at the Faculty of Civil Engineering in Belgrade is described. Structure and the characteristics of this measuring system based on low energy consumption electronic components and the original software are presented.

UVOD

Razvoj bežičnih komunikacija, pre svega mobilne telefonije i interneta je omogućio da mreže bežičnih senzora (*Wireless Sensor Networks*, WSN) počinju da se koriste u mnogim oblastima nauke i svakodnevnog života [1]. Građevinska struka je vrlo pogodna za primenu WSN, jer je lakše i najčešće dosta jeftinije postaviti ovakav nego žičani sistem na zgrade, saobraćajnice, a pogotovu na kapitalne objekte kao što su mostovi i hidrotehničke brane. Mogu se lako postaviti na slabo pristupačna mesta, i fleksibilnije su od žičanih, tj. omogućavaju lako i brzo premeštanje cele mreže ili njenih pojedinih delova. Najčešći cilj upotrebe WSN na objektima je stalni nadzor stanja objekata (*Structural Health Monitoring*), u okviru koga se snimaju oscilacije na različitim mestima na objektu i zatim se obradom signala na različite načine određuje stanje konstrukcije [1,2,3,4]. Pored opštih karakteristika WSN treba da zadovolje i specifične zahteve građevinske struke, kao što su: otpornost na nepovoljne atmosferske uslove (visoka vlažnost, visoke i niske temperature), otpornost na elektromagnetske smetnje (prirodnog i veštačkog porekla) ako se radi na otvorenom prostoru, postavljanje senzora na objektima velikih dimenzija, pouzdana komunikacija sa sensorima kada su postavljeni u zatvornim objektima i ne nalaze se u liniji optičke vidljivosti.

Mreža bežičnih senzora se sastoji od senzorskih uređaja koji su raspoređeni na mernim mestima i centralne stanice. Svaki senzorski uređaj se sastoji od senzora (jednog ili više), radio modema, baterije (sa ili bez sistema za dopunjavanje, tzv. *energy harvesting*), i prateće elektronike. Centralnu stanicu, koja skuplja i obrađuje sve podatke, najčešće predstavlja standardni ili prenosivi (*laptop*) personalni računar.

Razvoj mreže bežičnih senzora je multidisciplinarni i obuhvata: a) razvoj ili odabir senzora male potrošnje, a dovoljne tačnosti za određene primene, b) projektovanje kola pomoću elektronskih komponenti niske potrošnje, c) izbor parametara i konfiguracije bežične mreže koja omogućava pouzdan i brz prenos podataka između centralne stanice i senzora kao i između samih senzora, d) razvoj zahtevnog i fleksibilnog softvera za upravljanje pojedinim komponentama i sistemom kao celinom da bi bio upotrebljiv za što širi spektar aplikacija, e) razvoj softvera za obradu podataka za specifične primene u građevinarstvu, i sl.

ARHITEKTURA RAZVIJENOG SENZORSKOG SISTEMA

Bežični senzorski sistem za merenje vibracija na građevinskim objektima koji se razvija na Građevinskom fakultetu se sastoji od više senzorskih uređaja i PC računara (koji predstavlja centralnu stanicu bežične mreže). Centralna stanica poseduje praktično neograničene resurse: ne mora se voditi računa o potrošnji energije, procesorske sposobnosti su velike i prostor za skladištenje podataka je za više redova veličine veći nego što je neophodno. Svo procesiranje rezultata, osim kompresije prilikom prenosa podataka, vrši se na centralnoj stanici.

Topologija mreže je zvezdasta. Sinhronizacija uređaja se vrši prozivnim signalom (tzv. *beacon*).

Glavna ploča

Glavna ploča senzorskog uređaja sadrži procesor ADuC845 sa pratećom elektronikom. Izrađena je u SMD tehnologiji. Procesor ADuC845 spada u novu generaciju familije procesora 8051, koji imaju dugu istoriju upotrebe u industrijskim aplikacijama i smatraju se vrlo pouzdanim. Karakteristika koja ga čini pogodnim za upotrebu u bežičnoj aplikaciji je niska potrošnja, odnosno mogućnost ulaska u *sleep* mod sa potrošnjom od oko 70 μ W. Radi sa programabilnim taktom, koji ide do 6,29 MHz. Ima ugrađena dva desetokanalna 24-bitna sigma-delta A/D konvertora, efektivne rezolucije 19,5 do 22 bita, sa frekvencijom odabiranja oko 1 KHz koja premašuje potrebe građevinskih merenja i mogućnosti senzora koji će se eventualno vezivati na njih, kao i ugrađeni termometar sa rezolucijom od 1 °C. Procesor se napaja naponom od 3 do 3,6 V

(stabilizator smanjuje ulazni napon tipično od 3,5 do 4 V, koga daju 3 NiMH baterije, na optimalnih 3,3 V). Radni opseg temperatura iznosi od -40 do +85 °C. Maksimalna potrošnja struje iznosi 4,8 mA (što odgovara snazi od oko 16 mW). UART, I2C, i SPI interfejsi služe za povezivanje procesora sa svim perifernim uređajima predviđenim u mogućim aplikacijama. Na ploči se još nalaze četiri LP2986 stabilizatora, eksterni RAM sa leč kolom za kontrolu, LT1512 kontroler punjenja baterija, ADR2981 izvor referentnog napona, MAX232A drajver-risiver za serijsku komunikaciju, i veći broj osnovnih komponenti kao što su operacioni pojačavači, diode, kondenzatori, otpornici, oscilatori, itd.

Radio modem

Radio modem PRM-4 je domaće proizvodnje i vezan je putem RS232 interfejsa na procesor glavne ploče. Modem predstavlja nezavisan procesorski uređaj, koji sa jedne strane komunicira putem RS232 interfejsa, a sa druge šalje i prima elektromagnetske signale preko antene koja može biti različitih oblika i dometa. Snaga signala je programabilna što omogućava uštedu u slučaju da se signal ne mora slati na velike udaljenosti. Maksimalni domet u urbanim uslovima je reda veličine 1 km, a dosta zavisi od nivoa smetnji i topologije terena. Bodna brzina komunikacije radio talasima iznosi 9600 bps i vrši se na frekvenciji od 863 MHz. Modem troši struju od nekoliko mA pri prijemu, i 40 mA pri slanju.

Uobičajena frekvencija rada bežičnih modema je 2,4 GHz, ali je noseća frekvencija od 863 MHz izabrana zbog bolje difrakcije i manje elektromagnetskih smetnji (mnogo veći broj postojećih bežičnih uređaja radi na 2,4 GHz nego na 863 MHz).

Modem ima sopstveni protokol u kome koristi sopstvene čeksume i adresiranje. Slične mere preduzima i softver na uređaju, tako da je mogućnost prenosa pogrešnih podataka sa dva sloja kontrole praktično nula.

Ploča akcelerometra

Glavni senzor uređaja je integrisani mikroelektromehanički (MEMS) troosni akcelerometar LIS3LV02DL, 12-bitne rezolucije, opsega $\pm 2g$, koji komunicira sa procesorom glavne ploče putem četvorožičnog SPI interfejsa, iz glavnog programa. Akcelerometar je postavljen na posebnu ploču koja se napaja iz zajedničkog izvora (baterije), da bi se mogao nezavisno montirati. Uzorkovanje se vrši frekvencijom od 160 Hz (da bi se ostvarilo željeno oversamplingovanje za frekvencije od značaja koje su do 25 Hz), što je jedna od četiri radne frekvencije čipa. Traje približno 20 sekundi kojom prilikom se skupi 3 puta (za 3 ose) po 3200 12-bitnih odmeraka koji se zatim komprimuju i na zahtev šalju centralnoj stanici preko radio modema.

U praksi se pokazalo da frekvencije merenja akcelerometara nisu identične, odnosno da variraju između različitih primeraka i preko 1%. Zato je važno vremensko označavanje uzoraka, jer je cilj da sistem uređaja vrši poređenje oscilacija u različitim tačkama u prostoru.

Program pamti početno i krajnje vreme merenja koje traje 20-21 sekundu. Trenutak u vremenu u odnosu na koji se merenje vrši je prijem "beacon" signala za start merenja. Ispitivanje *storage* osciloskopom je pokazalo da standardno odstupanje stizanja ovog signala do različitih procesora (uređaja) iznosi oko 10 μ s. Relativna neodređenost frekvencije kristala procesora glavne ploče iznosi do $2 \cdot 10^{-5}$ s tim da postoji mogućnost nabavke uparenih kristala čije bi frekvencije bile podudarne bolje od 10^{-6} . Ovo predstavlja jedan od izvora greške prilikom sinhronizacije podataka. Moguće je ispitivanje procesora *storage* osciloskopom da bi se izvršilo dodatno sinhronizovanje, ali s obzirom na ukupnu neodređenost ispod 1 ms na 20 sekundi merenja, ovo neće bitno uticati na proučavanje signala čije frekvencije ne idu preko 25 Hz.

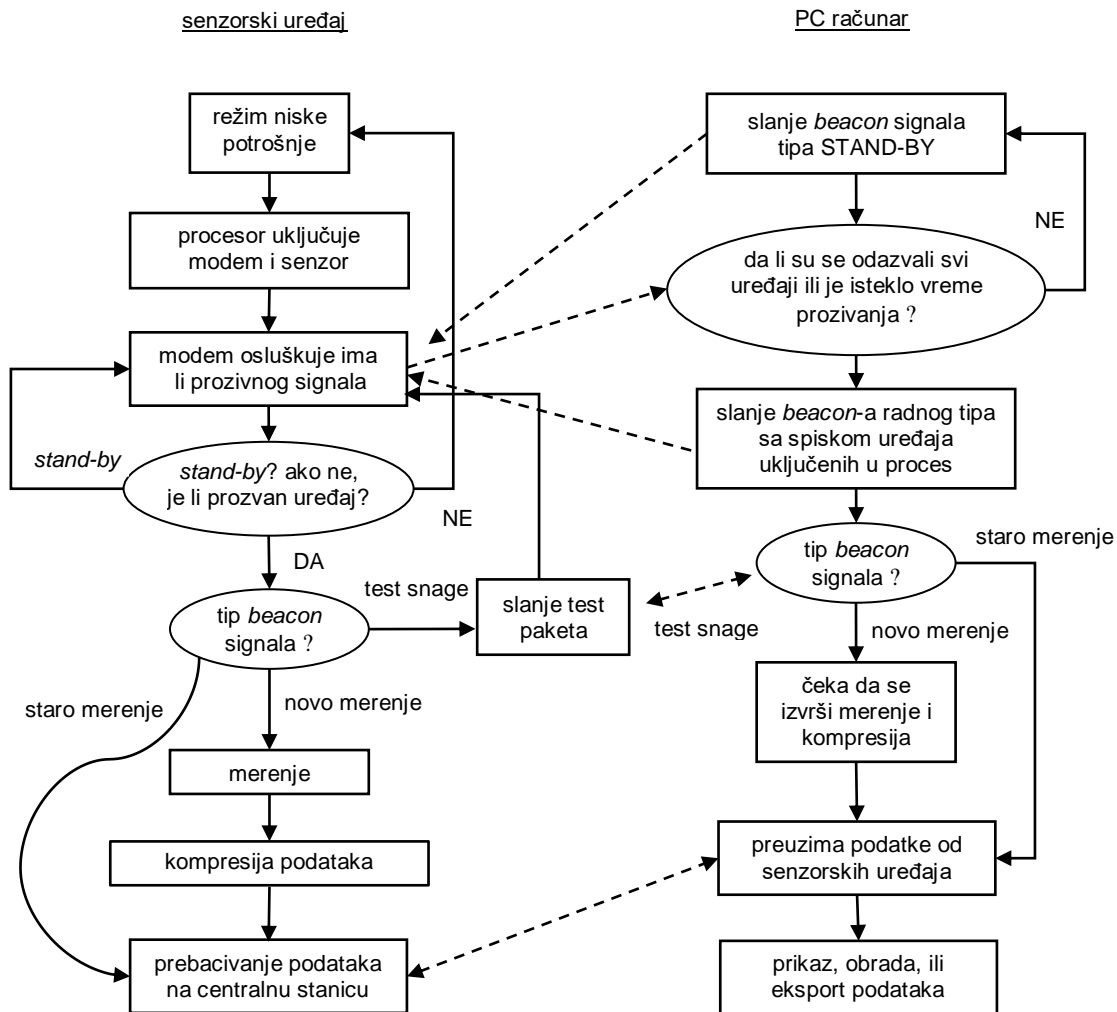
Svaki akcelerometar se posebno ispituje na unakrsnu osnu osetljivost. Ova može iznositi do 3,5% po proizvođačkoj specifikaciji (što je eksperimentalno verifikovano).

Displej

LCD displej D20486SYHLY je stavljen na posebnu integrisanu ploču sa procesorom AT89C4051. Ploča displeja komunicira sa glavnom senzorskom pločicom putem I2C interfejsa (dvožična komunikacija). Procesor AT89C4051 nema ugrađen I2C protokol tako da je svo programiranje urađeno manuelno. LCD displej sadrži 4 reda po 20 karaktera i ima 8 dugmića. Uređaj se može (a ne mora) prikačiti na glavnu ploču sa senzorom. Svrha priključenja displeja glavnom senzorskom uređaju je višestruka: olakšava razvoj softvera na glavnoj ploči, omogućava dijagnostiku stanja uređaja u realnim uslovima u slučaju da se ne odaziva na radio signale i služi za kalibraciju uređaja (upisivanje radnih parametara). Ploča sa displejom se napaja iz baterije senzorskog uređaja, jer I2C interfejs ne sadrži zajedničku masu. U slučaju da je baterija prazna, displej neće funkcionisati.

ALGORITAM RADA SISTEMA

Algoritam rada sistema je prikazan na sl.1. Senzorski uređaji rade impulsno. Procesor najveći deo vremena provodi u režimu niske potrošnje (takozvanom *sleep* režimu), u kome radi samo tajmer za aktiviranje, a potrošnja iznosi oko 20 μ A, odnosno oko 70 μ W, i aktivira se na kratko u određenim



Slika 1 - Algoritam rada sistema

vremenskim intervalima. Ova potrošnja je zanemarljiva u odnosu na potrošnju stabilizatora koji napaja procesor, te je stvarna potrošnja uređaja u režimu niske potrošnje oko 1,5 mA (oko 5 mW), u slučaju da se ne koristi uređaj za dopunjavanje (čiji kontroler troši još energije). Perioda aktiviranja procesora je programibilna i predviđena da bude u opsegu od 30 sekundi do 60 minuta. Dok je procesor u *sleep* režimu, perifernim komponentama (senzorima, radio modemu, generatoru referentnog napona i drugim) je isključeno napajanje. Po aktiviranju, procesor uključuje radio modem, koji detektuje postoji li signal prozivanja od strane centralne stanice, i u slučaju da je isti detektovan u roku od nekoliko sekundi, započinje sa radom, a u suprotnom se vraća u *sleep* režim. Centralna stanica, po zahtevu korisnika, počinje da periodično šalje *beacon* signal, kojim se vrši prozivanje i sinhronizacija senzorskih uređaja. Ne postoje garancije da su trenuci aktiviranja uređaja međusobno usaglašeni, mada će to u praksi najčešće biti slučaj kada se sistem aktivno koristi. Kada prođe maksimalno predviđeno vreme (poželjno malo veće od očekivane periode aktiviranja uređaja) ili se svi predviđeni uređaji jave, centralna stanica šalje komandu za rad. Svi uređaji do ovog momenta ostaju u režimu očekivanja naredne komande (*stand-by* režim) i ne gase se. Po izvršenju datog zadatka ponovo se vrši komunikacija sa centralnom stanicom, tj. vrši se prenos podataka centralnoj stanici i uređaji odlaze nazad u *sleep* režim.

SOFTVER

Takozvani *embedded real time operating system* ili *embedded RTOS* je naziv za softver koji se izvršava na glavnoj ploči. Za razliku od na primer PC računara, na kome postoje različiti "slojevi" softvera, kao što su onaj upisan u matičnu ploču (BIOS), operativni sistem (npr. Windows), i aplikacija (editor, brauzer, i sl), na uređaju ovih dimenzija softver je statičniji, tj. ne postoji mogućnost učitavanja različitih modula za vreme regularnog rada, te se ceo ovaj skup, od rutina za čitanje tastature i prikaz tačaka na displej, do najkompleksnijih rutina za kompresiju podataka, naziva *embedded RTOS*. Razvoj ovog softvera predstavlja najveću stavku u realizaciji ove vrste sistema, ne samo zbog složenosti zadatka, već i zbog nedostatka skupe opreme koja omogućava da se proces prati u detalje i ima uvid u fazu izvršenja programa u svakom trenutku. Osim kontrole toka radi ostvarenja zamišljenog algoritma rada sistema, operativni sistem vrši određen nivo multitaskinga. On vodi računa o interaptima od strane različitih tajmera, I2C interfejsa i serijskog (RS232) interfejsa.

Nekoliko događaja mogu izazvati uključenje procesora, i program koristi ovu informaciju da bi znao kojim tokom da krene: uključenje pri dolasku napajanja, regularno zakazano uključenje (ako nije bilo prekida napajanja), uključenje posle havarijskog prekida (reset od strane *watchdog* tajmera - ne dešava se u normalnom režimu rada), i uključenje od strane displeja (putem interapta od strane I2C interfejsa). U prva tri slučaja, uređaj ulazi u režim očekivanja komande od radio modema, dok u četvrtom slučaju vrši prikaz parametara (temperatura, napon baterije, razni statusi) i očekuje ulazak u proceduru kalibracije.

Kada je uređaj isključen tj. u *sleep* modu, eksterna memorija čuva rezultate merenja, pošto je ugrađen RAM sa baterijom (čiji je rok trajanja 5 godina, a u praksi se pokazalo da traje i duže). Na ovaj način može se, recimo, posle gašenja uređaja ponovo zahtevati slanje mernih podataka, ako je došlo do greške u prenosu (ostaju zapamćeni i ostali parametri merenja, a to su datum i vreme, radna temperatura, napon baterije, i tačna vremena uzimanja uzoraka, relativno u odnosu na prijem *beacon* signala).

Radi uštede energije pri slanju rezultata merenja, potrebno je izvršiti kompresiju rezultata merenja. U tom cilju napisan je skup procedura kojima se vrši standardno Hofmanovo kodiranje signala koji je prethodno diferencijalno kodiran (DPCM modulacija). Ova kompresija daje rezultate od tipično 30-70% u veličini (izračunato u odnosu na signal koji je već DPCM kodiran i spakovan u povorku bitova), u zavisnosti od nivoa vibracija (što je izlaz iz senzora jednoličniji, bolji je i stepen kompresije). Poseban izazov u primeni ove kompresije predstavlja činjenica da memorija uređaja od 32 KB (preko pola ovog iznosa je zauzeto

sirovim rezultatima merenja i drugim radnim varijablama) zahteva racionalno korišćenje i preklapanje podataka (tzv. *overlay* tehniku, što znači korišćenje istog memorijskog prostora za različite varijable koje se ne koriste istovremeno), kao i kompleksnost procesa (puno rekurzivnih poziva rutina), koja zahteva efikasno assembler programiranje radi postizanja zadovoljavajuće brzine rada. Tipična kompresija se vrši nekoliko sekundi, mada ovo dosta zavisi od harmoničnosti i amplitude vibracija koje se mere.

Na PC računaru napisan je program za upravljanje sistemom bežičnih senzora. Ovaj program vrši kontrolu celog procesa preko radio modema vezanog na PC serijski port.

Pre pokretanja procesa, korisnik selektuje uređaje koje želi da prozove sa liste. Zatim vrši funkciju prozivanje uzređaja. PC setuje svoj radio modem i počinje sa slanjem *beacon* signala tipa "*stand-by*". Stanice koje se uključuju i registruju ovaj signal, odgovaraju, kako prvi tako i svaki sledeći put (signal se šalje učestanošću nešto manjom od 1 Hz), sve dok PC ne prestane da ga šalje. On će to učiniti po isteku vremena prozivanja, ili ako se sve obeležene stanice jave. U momentu kada je neki od ovih uslova ispunjen, prelazi se na slanje drugog *beacon* signala koji sadrži traženu funkciju (novo merenje, staro merenje, ili test snage) i spisak stanica koje treba da je izvrše. Stanice koje nisu uključene u predviđenu funkciju će se ugasiti po prijemu drugog *becon* signala.

U slučaju funkcije "novo merenje", PC obustavlja aktivnosti za dvadesetak sekundi koliko traje merenje i još nekoliko sekundi koliko obično traje kompresija, a onda pokušava da pojedinačno prozove stanice. Svaka koja se javi potom šalje bafer sa rezultatima merenja, koji se tipično sastoji od dvadesetak paketa. Svi događaji u procesu ispisuju se sa vremenskim žigom u listi koja se može kasnije skrolovati (log), kao i snimiti u tekst fajl. U slučaju funkcije "staro merenje", samo se preskače se proces merenja i kompresije. Preko funkcije "test snage" PC naređuje senzorskom uređaju da šalje pakete sa određenom snagom. Paketi sadrže različite bajtove (kao što će u stvarnosti tipično biti slučaj sa kompresovanim podacima). Pamti se koliki je procenat primljenih paketa na centralnoj stanici pri kojoj snazi senzorskog uređaja. Snaga centralne stanice je sve vreme maksimalna.

U slučaju funkcije "stand-by", PC prestaje sa komunikacijom, a stanice ostaju uključene oko minut i spremne za prijem novih komandi.

Kod svih funkcija, moguće je preneti vreme i datum sa PC-ja na uređaje, kao i podesiti njihovu predajnu snagu i period buđenja.

Rezultati merenja se mogu pregledati na grafiku ili snimiti ili učitati iz binarnog fajla. Eksportovanje za upotrebu u drugim programima vrši se snimanjem u tekst fajl. Predviđeno je da se koeficijenti unakrsne osne osetljivosti uključe u softversku korekciju koja će se vršiti u okviru programa.

ISPITIVANJE KARAKTERISTIKA UREĐAJA

Ispitivanje unakrsne osne osetljivosti akcelerometara

Usled nesavršenosti senzora, postoji unakrsna osna osetljivost, što znači da na izlaz senzora po bilo kojoj od tri ose utiču ne samo ubrzanje po toj osi već i po ostale dve. Glavni izvor ove greške je mehanička nesavršenost senzora (međusobna neortogonalnost osa). Dakle, izlazi senzora dati su kao:

$$f_x = k_{xx}a_x + k_{xy}a_y + k_{xz}a_z \quad f_y = k_{yx}a_x + k_{yy}a_y + k_{yz}a_z \quad f_z = k_{zx}a_x + k_{zy}a_y + k_{zz}a_z \quad (1)$$

pri čemu su koeficijenti k_{xx} , k_{yy} i k_{zz} dominantni (znatno veći od ostalih, čije je prisustvo neželjeno).

Ispitivanje senzora na unakrsnu osnu osetljivost izvodi se tilt testom, u kome se senzor dovodi u različite međusobno ortogonalne položaje (kojih ima 6), tako da gravitaciono ubrzanje g deluje na svaku od tri ose, u oba smera. Usled moguće nesavršenosti položaja osa akcelerometra, kao i moguće nesavršene horizontalnosti podloge na koju se akcelerometar postavlja, vršeno je postavljanje akcelerometra u 24 moguća položaja (rotiranje četiri puta za po 90° u svakom od šest položaja). Ovime se posle usrednjavanja eliminišu pomenuti

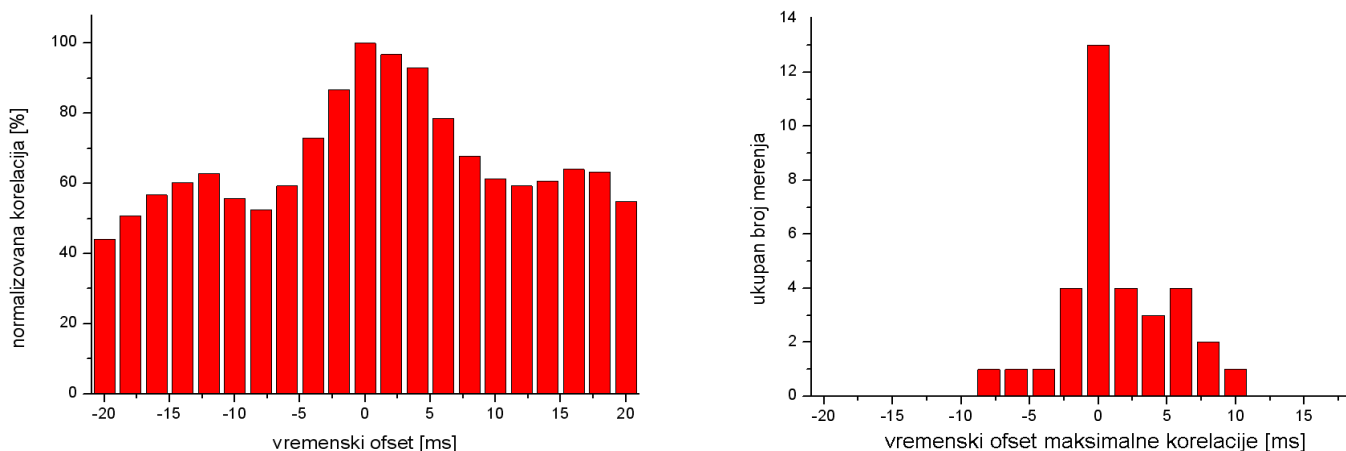
efekti i dobijaju objektivni koeficijenti unakrsne osne osetljivosti. Ispitivanjem je ustanovljeno da najveće neželjene osne osetljivosti iznose oko 2,6 %, a ukupne unakrsne osne osetljivosti S_{cr} , definisane kao

$$S_{cr.x.} = \sqrt{k_{xy}^2 + k_{xz}^2} / k_{xx} \quad S_{cr.y.} = \sqrt{k_{yx}^2 + k_{yz}^2} / k_{yy} \quad S_{cr.z.} = \sqrt{k_{zx}^2 + k_{zy}^2} / k_{zz} \quad (2)$$

ne prelaze 2,8 %.

Ispitivanje vremenske usaglašenosti rezultata merenja

Osim ispitivanja simultanosti prijema *beacon* signala, koje je dalo dobre rezultate (odstupanja daleko manja od ms), izvršeno je 36 merenja sa dva uređaja pri čemu su akcelerometarske pločice bile pričvršćene na zajedničku plastičnu podlogu jedna pored druge (tako da je udaljenost senzora bila oko 10 cm) i izložene različitim vibracijama podloge. Posmatrana je kros-korelacija snimljenih signala. Pošto su odmerci međusobno nesimultani, a poznati su vremenski trenuci uzimanja svakog, množeni su (normalizovani na srednju vrednost nula) rezultati merenja na jednom senzoru sa linearno aproksimiranim rezultatima sa drugog senzora (izračunatim na osnovu dva u vremenu susedna rezultata merenja). Maksimalan rezultat korelaciona funkcija bi trebalo da ima kada je vremenski pomeraj jedne funkcije u odnosu na drugu jednak nuli. Odstupanja su se očekivano pokazala. Ona su manje posledica nesavršenosti hardvera i softvera uređaja, a više neidentičnosti oscilacija na dva različita mesta na maloj pločici. Ukupan rezultat je zadovoljavajući što pokazuju histogrami na sl.2. Prvi pokazuje relativnu korelaciju zbirno za svih 36 merenja. Naravno u nekim merenjima je korelacija maksimalna za vremenski pomeraj nula a u nekima nije, pa drugi histogram pokazuje raspodelu vremenskih pomeraja za koje se dobija maksimalna korelacija. Korak pri analizi je bio 2 ms što je oko jedne trećine periode samplovanja akcelerometra.

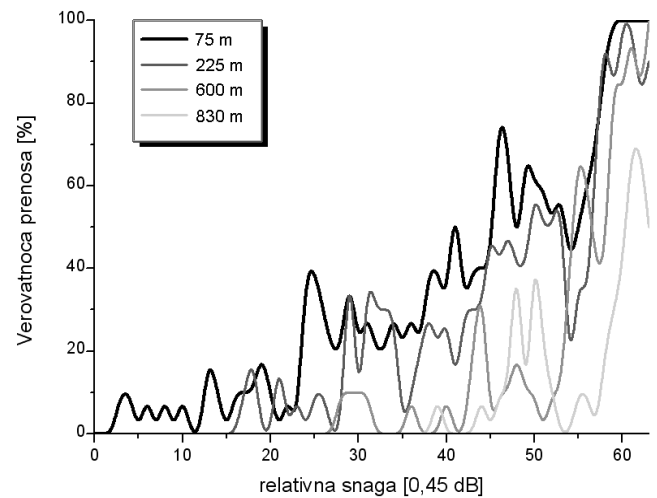


Slika 2. Histogrami kros-korelacije u zavisnosti od vremenskog ofseta snimljenih signala

Ispitivanje dometa uređaja

Dometa uređaja je pojam koji je nemoguće jednoznačno definisati. Verovatnoća prenosa paketa podataka zavisi od njegove veličine, snage predajnika, udaljenosti prijemnika, mogućih prepreka, prirodnih i veštačkih elektromagnetskih smetnji, atmosferskih uslova, itd. Veći broj ponovnih pokušaja povećava šansu prenosa. U slučaju senzorskih uređaja sa ograničenim energetske izvorom potrebno je pronaći kompromis između šanse da se odgovarajući broj paketa (u našem slučaju od 10-11 za uobičajen šum i do 40-50 za intenzivno pomeranje i trešenje koje najčešće ne odgovara realnim merenjima) uspešno prenese i činjenice da osim trošenja energije na datom uređaju, i drugi uključeni u proces za to vreme čekaju da budu prozvani i time troše energiju. Program na centralnoj stanici dozvoljava korisniku da izabere maksimalan broj pokušaja da se

paket prenese. U ovom merenju date su šanse da se paket pun različitih bajtova (dužine 250) prenese pri različitim predajnim snagama senzorskog uređaja u funkciji odstojanja. Za svaku snagu na svakom položaju vršeno je po 10 pokušaja. Maksimalna snaga predajnika iznosi 20 mW i odgovara parametru snage 63, a svako smanjenje za 1 je ekvivalentno -0,45 dB (tako da relativna snaga 0 odgovara snazi od oko 30 μ W). Primećeno je da rezultati ne zavise od napona napajanja baterija (u opsegu 3,65-4,05 V), ali da se razlikuju u različitim periodima u toku dana, što se pripisuje veštačkim smetnjama (merenja su vršena u uslovima intenzivnog saobraćaja na prometnom bulevaru u centru grada). Na dijagramu na sl.3 su prikazani neki tipični rezultati merenja, a odbačeni su izrazito loši (velike smetnje) ili slični (radi preglednosti).



Slika 3. Verovatnoća prenosa paketa u zavisnosti od predajne snage na različitim udaljenostima prijemnika

ZAKLJUČAK

U radu je opisana razvijena WSN za merenje vibracija na građevinskim objektima koja se sastoji od mernih uređaja sa troosnim akcelerometrima i centralne stanice. Zbog baterijskog napajanja posebna pažnja je posvećena minimiziranju potrošnje energije uređaja, odabirom komponenti niske potrošnje i optimalnim softverskom upravljanjem. Zahvaljujući originalno razvijenom softveru moguće je variranje velikog broja parametara, pa se ova WSN lako prilagođava konkretnim uslovima merenja. Ispitana unakrsna osetljivost akcelerometara i međusobna vremenske usaglašenost merenja sa više uređaja odgovaraju zahtevima građevinskih merenja, a test snage pokazuje koliko je na nekoj predajnoj snazi prenos podataka pouzdan.

ZAHVALNOST

Autori se posebno zahvaljuju Ministarstvu prosvete i nauke Republike Srbije za finansijsku pomoć u okviru projekta TR-36048 i kolegij Goranu Jezdimiroviću na velikoj pomoći u praktičnoj realizaciji mernih uređaja.

LITERATURA

- [1] J.Paek, K.Chintalapudi, R.Govindan, J.Caffrey, S.Masri *A Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring - Performance and Experience*, The 2nd IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors, 2005. EmNetS-II, May 30-31. 2005, 1-10
- [2] J.P.Lynch, K.J.Loh, *A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring*, The Shock and Vibration Digest 2006; 38; 91;
- [3] K.Chintalapudi, T.Fu, J.Paek, N.Kothari, S.Rangwala, J.Caffrey, R.Govindan, E.Johnson, S.Masri, *Monitoring Civil Structures with a Wireless Sensor Network*, Internet Computing, IEEE Volume 10, Issue 2, March-April 2006. Pages: 26-34
- [4] N.Xu, S.Rangwala, K.Chintalapudi, D.Ganesan, A.Broad, R.Govindan, D.Estrin, *A Wireless Sensor Network for Structural Health Monitoring*, Proceedings of the ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, November 2004, pp. 13-24