

Mr Miodrag Malović, dipl.ing.el.¹
Dr Ljiljana Brajović, dipl.ing.el.¹
Dr Zoran Mišković, dipl.ing.grad.¹

PRIMENA BEŽIČNIH SENZORSKIH MREŽA U MONITORINGU GRAĐEVINSKIH KONSTRUKCIJA

0352-2733,42 (2009),p. 201-232

UDK: 621.39 : 004.7] : 624.04
PREGLEDNI NAUČNI ČLANAK

Rezime

Razvoj komunikacionih tehnologija poslednje decenije otvorio je mogućnosti primene bežičnih senzorskih mreža u najrazličitijim oblastima. Sve učestalija primena ove tehnologije u građevinarstvu posledica je njihove ekonomičnosti i jednostavnosti instalacije, a osmatranje različitih veličina čini fleksibilnijim i omogućava registrovanje na teško dostupnim lokacijama. Rad tretira strukturu mreža bežičnih senzora, detaljno prikazujući sve komponente ovakvih sistema, kao i pratećeg softvera i njihovu topologiju. Prikazani su značajni primeri realizacije u monitoringu građevinskih konstrukcija, čime se ilustruju mogućnosti za primenu u ovoj, sve značajnijoj,

¹ Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu
Rad primljen oktobra 2007.

201

1. UVOD

Razvoj elektronike u oblasti komunikacija, uglavnom zahvaljujući ekspanziji mobilne telefonije i bežičnog interneta, omogućio je razvoj bežičnih mreža senzora (*Wireless Sensor Networks - WSN*) u komercijalnim varijantama. Mreže bežičnih senzora danas se koriste u mnogim oblastima nauke i svakodnevnog života, kao što su merenja u meteorologiji [12], medicini (daljinski nadzor pacijenata) [23], saobraćaju (praćenje statistike saobraćaja, merenje zagađenja, i dr.) [6], industriji [25], kućnoj automatiki [7], kao i u drugim oblastima.

Pored navedenih oblasti primene, evidentna je izuzetna pogodnost primene mreža bežičnih senzora u građevinskim problemima. Praktično, mnogo je lakše, a najčešće i značajno ekonomičnije od instalacije sistema sa kablovskim vezama, realizovati mreže bežičnih senzora tokom monitoringa objekata visokogradnje, infrastrukturnih objekata na saobraćajnicama, a naročito kod kapitalnih objekata kao što su mostovi velikih raspona i brane. Monitoringom građevinskih konstrukcija najčešće je obuhvaćeno praćenje vibracija (ubrzanja akcelerometrima ili brzina brzinomerima) i lokalnih deformacija - dilatacija (što se najčešće realizuje primenom elektrootpornih merenih traka), kao i drugih veličina kao što su temperatura, osvetljenost, nivo buke, itd.

203

oblasti građevinske delatnosti. Ubrzan infrastrukturni razvoj aktuelizuje inteziviranje istraživanja u ovoj oblasti.

Ključne reči: bežični senzori, mreže, konstrukcijski monitoring, građevinske konstrukcije, akvizicija, vibracije

WIRELESS SENSOR NETWORKS FOR CIVIL STRUCTURAL MONITORING

Abstract

Development of communication technologies during last decade carried out possibility of application wireless sensor networks in many different areas. Recently frequently application of this technology in civil engineering is consequence of its economy and simplicity of installation, which provide possibility of monitoring of different parameters more flexible and possible at hard accessed locations. Paper deals with structure of wireless sensor network and in detail describe all components of those systems, as well as accompanying software and topology. Successful significant examples of applications in civil structure monitoring are presented, which illustrate possibility of application in this, very important, area of civil engineering. Accelerated infrastructural development actualized research efforts in this area.

Key words: wireless sensor networks, structural monitoring, data acquisition, vibrations

202

U velikom broju aplikacija senzori se često postavljaju na otvorenom prostoru, te moraju odoleti nepovoljnim meteorološkim uslovima. Iz pomenotog razloga isti se moraju instalirati u kutije sa odgovarajućim stepenom vodonepropustljivosti (*International Protection rating - IP*), i obezbediti njihova funkcionalnost u različitim vremenskim uslovima (na niskim i visokim temperaturama i pri visokoj vlažnosti, i dr.). Takođe, iz razloga obezbeđenja nesmetanog funkcionisanja, moraju se uzeti u obzir mnogobrojne moguće elektromagnetske smetnje prirodnog i veštačkog porekla. Izbor parametara komunikacije, pored ostalog, zavisi i od očekivanih smetnji na konkretnoj lokaciji. Difrakcija u zatvorenim prostorima, kao i u slučajevima kada se uređaji ne nalaze u liniji optičke vidljivosti, takođe predstavlja važan faktor pri projektovanju mreže bežičnih senzora.

Svrha primene mreža bežičnih senzora u građevinarstvu je najčešće Monitoring Stanja Konstrukcija - MSK (*Structural Health Monitoring - SHM*) [10, 20, 21, 30]. MSK se takođe primenjuje i u mašinskim problemima za praćenje stanja ključnih delova mašina i sklopova, [14,25]. Nakon registrovanja praćenih veličina (npr. parametara vibracija u jednoj ili više tačaka konstrukcije odnosno objekta), analizom - obradom - registrovanih vremenskih istorija, moguće je proceniti stanje osmatrane konstrukcije. U ovakvim primenama najčešće se analiziraju sopstveni modovi oscilacija, prigušenje prilikom impulsne pobude, korelacija između oscilacija u bliskim tačkama, itd.

204

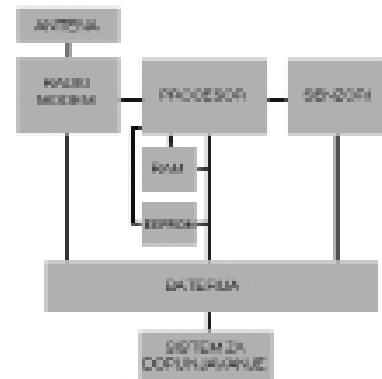
2. STRUKTURA MREŽA BEŽIČNIH SENZORA I SASTAVNI ELEMENTI

Značajna prednost mreža bežičnih senzora, u odnosu na klasične kablovske sisteme, je mogućnost jednostavne instalacije na teško pristupačnim mestima. Takođe, značajan faktor je i znatno smanjenje troškova instalacije što je posledica nepostojanja sistema kablova za povezivanje senzora sa jedinicama za registrovanje i akviziciju. Bežične mreže su lako pokretne, odnosno iste se cele mogu prenositi na druge lokacije ili pojedini uređaji unutar mreže mogu menjati lokaciju. Glavni nedostaci bežičnih sistema su manja maksimalna brzina prenosa, osetljivost na elektromagnetne smetnje, veći stepen nesigurnosti (mreža je po svojoj prirodi otvorena za ometanje i neovlašćeno korišćenje).

Glavni elementi mreža bežičnih senzora su čvorovi (nodes), odnosno uređaji. Svaki uređaj sastoji se od senzora (jednog ili više), radio modema, baterije (sa ili bez sistema za dopunjavanje, tzv. energy harvesting), i odgovarajuće prateće elektronike. Naravno, jedan od uređaja je i centralna stanica, sa funkcijom prikupljanja i obrade podataka, a ista je najčešće povezana sa standardnim PC računarom, (odnosno prenosivim laptop računarom), a ređe je sa autonomnim uređajem za akviziciju (datalogger-om). Centralna stanica ima značajno veću memoriju od ostalih uređaja i čuva podatke do momenta prenosa istih na drugi elektronski medijum (hard disk odnosno

205

računar) od strane operatera, što se najčešće ostvaruje direktnim žičanim prenosom preko odgovarajućeg komunikacijskog kanala.



Slika 1.- Blok šema bežičnog uređaja (čvora)

Tokom protekle decenije razvijen je izvestan broj komercijalnih i nekomercijalnih uređaja uz mogućnost podrške različitih operativnih sistema, različitih senzora, i modema, čime je obezbeđena fleksibilnost njihove primene, slično kao i kod PC računara. U poznatije varijante uređaja spada familija Mica [20] i Telos [2] (razvijeni na univerzitetu Berkli, a postoje i komercijalne varijante), iMote (Intel) [19], Tmote Sky (prvobitno razvijen

206

od strane MoteIV corporation, dok je aktuelni vlasnik patenta Sentilla) [16] i BTnode (razvijen na ETH Cirih) [3,4].

2.1 Topologija mreže

Topologija mreže senzora podrazumeva raspored uređaja i njihove međusobne veze, što je određeno logičkim i fizičkim rasporedom. Logička topologija definiše logički plan mreže, tj. definiše načine i putanje komunikacije. Fizička topologija definiše fizički plan mreže, tj. raspored uređaja i njihovih veza u prostoru. Logička i fizička topologija nisu neophodno identične, ali iz razumljivih razloga projektovanje logičke topologije je tesno povezano sa fizičkom topologijom. Tri najčešće korišćena tipa topologije kod bežičnih mreža su topologija zvezde, magistrale, i mrežasta topologija.

Topologija zvezde podrazumeva da je svaki uređaj u vezi sa centralnom stanicom preko odvojenog medijuma (žičanom vezom, odnosno određenom frekvencijom u slučaju bežičnog prenosa). U slučaju ovakve topologije izražena je potreba za značajnom procesorskom snagom centralne stanice, iz razloga neophodnosti komunikacije sa više uređaja istovremeno. U slučaju kablovskih veza značajni su troškovi za ostvarenje ovakvih komunikacija, a isti se značajno redukuju u slučaju u slučaju bežičnih komunikacija. Za ovaj tip topologije je karakterističan vrlo jednostavan protokol komunikacije.

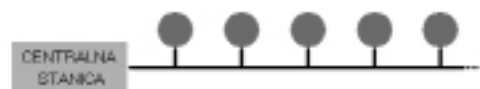
207



Slika 2.- Topologija zvezde

Topologija magistrale (glavne linije, bus-a) podrazumeva da su svi uređaji spojeni sa centralnom stanicom putem zajedničke magistrale (kablovski, odnosno na jednoj frekvenciji u slučaju bežične mreže). Centralna stanica je u mogućnosti da komunicira samo sa jednim uređajem u određenom trenutku, što povećana potrebu za pouzdanim protokolom. U slučaju kablovskih veza troškovi ožičavanja su značajno smanjeni.

Mrežasta topologija (*web* ili *mesh*) znači da je svaki uređaj spojen sa bar dva druga uređaja (može biti i sa svim ostalim), uključujući i centralnu stanicu (ukoliko



Slika 3.- Topologija magistrale

208

takva postoji), a ovo je i topologija *Internet*-a. Mnoge bežične mreže u određenoj meri rade na ovom principu zbog dinamičke prirode skupa ostvarivih veza.



Slika 4.- Mrežasta topologija

Naravno, u praksi postoje i druge podele formi topologije, kao što su npr. tačka-do-tačke (*point-to-point*) i višerazvodna (*multi-drop*) topologija. *Point-to-point* topologija podrazumeva da ne postoji grananje veza (što se ne odnosi na centralnu stanicu). Primeri ove topologije su *zvezdasta* i *linijska* (mreža u kojoj je centralna stanica spojena sa prvim uređajem, prvi sa drugim, drugi sa trećim, itd). *Multi-drop* mreža je takav tip topologije u kojoj svaki uređaj ima više veza sa drugim uređajima, dakle *web*-topologija spada *multi-drop* kategoriju.

Takođe postoji i podela topologije mreža na *single-hop* i *multi-hop* mreže. Ovim se definiše da li se informacija prenosi direktno iz svakog uređaja do centralne jedinice, ili se iste mogu prenositi u više koraka preko različitih uređaja do odredišta. Usled ograničenog dome-

209

gija može samokonfigurisati u zadatim granicama. Ovo je pogotovo bitno kod mreža sa velikim brojem uređaja, kao i kod mreža koje su projektovane da budu mobilne. Samokonfigurisanje mreže može se vršiti jednom, prilikom instalacije mreže, ili periodično.

2.2 Senzori

Sastavni deo uređaja su senzori za registrovanje odgovarajućih veličina, a isti moraju biti pretvarači sa izlazom u vidu električne analogne ili digitalne veličine. Od pretvarača mehaničkih veličina u električne najčešće se koriste akcelerometri, merne trake i piezoelektrični senzori, kao i ostale vrste senzora kao što su termometri, detektori svetlosti ili zvuka, detektori hemijskih supstanci, itd. Senzori koji se koriste u bežičnim aplikacijama su uglavnom integrisani digitalni (*Micro-Electro-Mechanical Systems - MEMS*) a ređe analogni sa A/D konverzijom njihovog izlaza u digitalni oblik. Većina procesora imaju ugrađene A/D konvertore za ovu namenu, a mogu se koristiti i konvertori u vidu posebnih čipova. Analogni senzori imaju bolje karakteristike, pri čemu su im manje značajno veća cena, viši radni napon, i značajno veća snaga (što utiče na brzi utrošak ograničene količine energije kojima bežični uređaji raspoložu).

MEMS akcelerometri koji se koriste u merenjima u građevinarstvu najčešće su trooskikaljni, sa mogućnošću merenja u tri ortogonalna pravca. Ovaj tip akcelerome-

211

ta radio modema, kod bežičnih mreža česta je upotreba *multi-hop* pristupa.



Slika 5.- Složena multi-hop topologija mreže (razgranata ili distribuirana zvezda)

Topologija mreže se često ne može striktno svrstati u okvire navedenih podela. Npr., čest način realizacije mreže je takozvana razgranata ili distribuirana zvezda, gde neki uređaji u osnovnoj zvezdi predstavljaju čvorišta (*habove*) sekundarnih zvezda, kao što je slučaj sa *multi-hop* mrežom.

Optimalna konfiguracija mreže uslovljena je mnoštvom faktora, kao što su karakteristike sredine, funkcija i položaj uređaja, i dr. Za razliku od kablovskih mreža, u slučaju bežičnih mreža senzora ne postoje materijalne veze između uređaja, što im daje prednost da se topolo-

210

tara je obično rezolucije 10-12 bita, ulazni opseg u intervalu $\pm g$ do $\pm 10g$, dok se maksimalne frekvencije koje se mogu njima registrovati nalaze u intervalu od nekoliko desetina do više stotina herca. Ovi senzori se napajaju naponom reda veličine 3-4 V, a protokol komunikacije sa procesorom je preko I²C ili SPI interfejsa. Loša osobina ovog tipa senzora je visoka unakrsna osna osetljivost, tipično 3-5%, što je za red veličine veće nego kod analognih senzora. Ova mana se ipak, dobrim delom, može kompenzovati tokom postprocesiranja registrovanih podataka, tj. softverski. U građevinskim aplikacijama najčešće su primenjivani modeli iz familije ADXL (Analog Devices) [13, 27, 28], LIS (ST microelectronics) [19], MX (Memsic) [22], SMB (Bosch) [13], KXP (Kionics) [7], i drugi.

2.3 Radio modemi

Komunikacija između uređaja realizuje se radio modemima koji predstavljaju sastavni deo ovih uređaja. Komunikacija se obavlja različitim brzinama prenosa, obično reda veličine više kbps, na različitim nosećim frekvencijama u opsegu od desetina MHz do nekoliko GHz, i imaju različite domete, od nekoliko desetina metara do više kilometara.

Tipične potrošnje modema su reda veličine desetine mW (manje pri prijemu, više pri slanju). Kod nekih modema potrošnja se može podešavati u zavisnosti od

212

željenog dometa. Domet se takođe može regulisati postavljanjem različitih tipova antena.

U nekim aplikacijama svi uređaji komuniciraju na istom kanalu (istoj nosećoj frekvenciji) dok kod drugih različiti uređaji ili grupe uređaja komuniciraju na odvojenim kanalima (različitim nosećim frekvencijama).

Veće frekvencije prenosa imaju osobinu da mogu fizički da podrže veći prenos podataka (bodnu brzinu reda veličine stotina kbps na frekvencijama preko GHz), ali niže frekvencije se bolje prenose u zatvorenim prostorima i prostorima sa preprekama između uređaja (usled difrakcije). Konačan izbor radne frekvencije je uvek kompromis između ovih fizičkih i zakonskih ograničenja (koje frekvencije su zakonom dopuštene za korišćenje u datoj zemlji u datom području).

2.4 Izvor energije - napajanje

Za napajanje uređaja koriste se različiti tipovi baterija, a najčešće litijum jonske, litijum polimerske, i nikel metal hidridne (NiMH) baterije. Naponi koje ove baterije daju su reda veličine nekoliko volta. Klasične baterije su takođe u upotrebi, ali iste su nepovoljne iz razloga što se ne mogu dopunjavati (alkalne) ili su relativno skupe i nekološke (nikel kadmijumske).

Kao sastavni deo napajanja, pored baterija, često se koriste dodatni uređaji za njihovo dopunjavanje [1, 8, 18, 31]. Ovi uređaji koriste energiju sunca ili mehaničku ene-

213

jom. Najrazličitije vrste procesora i ostalih komponenti je moguće upotrebiti u ove svrhe. Najbitnija činjenica je da procesor (mikrokontroler) ima nisku potrošnju i da može da isključuje delove električnog sklopa koji se ne koriste. Moderni mikrokontroleri rade sa taktovima reda veličine nekoliko desetina MHz, pri čemu im je potrošnja reda veličine μW . Uz mogućnost podešavanja da isti rade sa prekidima, tj. da se periodično uključuju i isključuju, njihova ukupna potrošnja energije je vrlo mala, i moći će se nadoknaditi na primer običnim solarnim ćelijama u slučaju da je uređaj izložen suncu u proseku par sati dnevno. Senzori mogu konzumirati različite snage u zavisnosti od njihove vrste. Nažalost, što je senzor kvalitetniji, to se više snage zahteva za njegovo funkcionisanje. Najveći potrošač energije je ipak radio modem, stoga pri projektovanju sistema treba voditi računa da se njime rukovodi krajnje racionalno. U ovu svrhu najčešće se vrši kompresija podataka, procesiranje podataka na licu mesta, i prenos što je moguće manje sirovih podataka.

2.6 Upravljački softver

Tokom razvoja sistema bežičnih senzora mogu se koristiti gotovi operativni sistemi (takozvani *embedded real time operating systems* ili skraćeno *embedded RTOS*). Ovi operativni sistemi su uglavnom razvijeni na raznim univerzitetima, mada je moguće kreirati i nove, čime se povećava fleksibilnost sistema, a može biti i od velikog

215

rgiju vibracija. Njihovo prisustvo, u zavisnosti od aplikacije, može obezbediti ili trajno dopunjavanje energije koje će omogućiti teorijski neograničeno vreme rada uređaja, ili će samo produžiti radni vek (posle koga se baterija mora zameniti ili dopuniti na drugi način). Razne vrste solarnih ćelija imaju sposobnost da daju snage reda veličine 10^{-2} W po cm^2 i da daju izlazni napon koji je reda veličine volta (u slučaju izloženosti direktnoj sunčevoj svetlosti). Od mehaničkih uređaja za dopunjavanje energije najčešće se koriste piezoelektrični i induktivni. Piezoelektrični rade na principu pretvaranja energije vibracija u električnu putem piezoelektričnog kvarcnog kristala, a induktivni stvaraju energiju pomeranjem feritnog jezgra kalema po principu elektromagnetske indukcije. Opravdanost njihove upotrebe zavisi od intenziteta vibracija na mestu na kome se nalazi uređaj. Na mostovima sa gustim saobraćajem, na primer, isti se često koriste, dok nisu efikasni kod konstrukcija sa manjim nivoom vibracija, kao što su stambene zgrade. Prednost mehaničkih uređaja za dopunjavanje energije je što se isti mogu postaviti na mestima koja nisu osunčana, dok je nepovoljnost ovakvih sistema u činjenici da imaju manju snagu nego solarne ćelije.

2.5 Prateća elektronika uređaja

Prateće elektronske komponente uređaja predstavlja kompjuter u malom, sa svojim procesorom i memori-

214

značaja ako je aplikacija po bilo čemu specifična, odnosno nestandardna. Među poznatije operativne sisteme koji se koriste u mrežama bežičnih senzora spadaju TinyOS [20, 24, 2, 3], MantisOS [9, 24], SOS [9, 24], EPOS [9], Contiki[24], i drugi. Tokom razvoja sistema, većina procesora može se programirati putem serijske veze, ili se može koristiti emulator (simulator procesora sa mogućnošću proučavanja toka programa i stanja registara, dakle debaginga na PC-ju).

Softver na uređaju (embedded RTOS), osim osnovnog upravljanja hardverom (što podrazumeva naravno i kontrolu komunikacije i ulaznje i izlaznje iz sleep moda), može vršiti određenu obradu signala na licu mesta. Ovo se sprovodi kako bi se štedela energija prilikom prenosa, s obzirom da se tokom komunikacije troši najviše energije. Softver instaliran na centralnoj stanici, PC računaru, ima veću slobodu jer isti nije ograničen u vremenskom i energetskom smislu. Ovaj softver može vršiti i korekciju snimljenih podataka usled poznatih statičkih i dinamičkih karakteristika senzora. Naime, nijedan senzor ne preslikava ulaznu u izlaznu veličinu savršeno. Pod statičkom korekcijom podrazumeva se korigovanje usled nesavršenosti, kao što su npr. nelinearnost ili unakrsna osetljivost po osama kod tro-osnih akcelerometara. Iako stabilne, ove nesavršenosti ipak nisu specificirane za izvestan broj senzora od strane proizvođača, već se iste moraju eksperimentalno odrediti. Efekti inercije i prigušenja (koji potiču od pokretne mase i trenja kod se-

216

nzora sa mehaničkim principom rada, ili induktivnosti i kapacitivnosti kod električnih senzora) čine da senzori ne odgovaraju na pobudu trenutno niti signalom istog oblika u vremenu, pa se iz tog razloga vrši dinamička korekcija. Kako bi se izvršila dinamička korekcija, potrebno je modelirati senzor odgovarajućom jednačinom. Najčešće se koristi diferencijalna jednačina drugog reda koja dovoljno tačno opisuje ponašanje većine realnih senzora (sistem drugog reda) [26]. Nakon ovoga, neophodno odrediti koeficijente koji figurišu u ovoj jednačini, što se realizuje kalibracijom senzora (ispitivanjem njegovog odziva na impulsnu ili odskočnu pobudu). U slučaju merenja mehaničkih veličina treba voditi računa i o promeni dinamičkih karakteristika senzora prilikom instalacije u kućište i u zavisnosti od načina ostvarenja veze sa objektom koji je predmet monitoringa.

3. PRIMENE MREŽA BEŽIČNIH SENZORA

U cilju ilustracije mogućnosti primene bežičnih senzorskih mreža u monitoringu građevinskih konstrukcija, u narednom se daje prikaz nekoliko uspešnih primena u ovoj oblasti.

3.1 Monitoring mosta

Uspešna primena bežične mreže senzora realizovana je tokom ispitivanja mosta Geumdang u Koreji, a što je prikazano u radu »*Performance Monitoring of Geumda-*

217

3.2 Primena mikrofrekventnih talasa za energetska dopunjavanje

U cilju unapređenja efikasnosti bežične mreže senzora, razvijen je sistem za energetska dopunjavanja prikazan u radu »*Development of an Impedance-Based Wireless Sensor Node for Structural Health Monitoring*«, [17]. Karakteristike sistema ogledaju se u sledećem:

- *Senzor*: Analog Devices AD5933 integrisani piezoelektrični pretvarač, koji spada u klasu ADSP procesora, ima rezoluciju 12 bita, frekvenciju samplinga od 1 MHz, i ugrađeno FFT procesiranje za spektar do 100 KHz
- *Radio modem*: Xbee (Maxstream) na frekvenciji od 2,4 GHz, potrošnje 150 mW
- *Procesor*: Atmel ATmega128L
- *Napajanje*: Specifično

Sistem je projektovan za merenje mehaničke impedanse građevinskih konstrukcija, pri čemu se iste pobuđuju ultrazvučnim mehaničkim talasima (frekvencija 30 KHz i više), i piezoelektrični senzori pretvaraju odgovor sistema u električnu veličinu čija se akvizicija i prenos zatim sprovodi.

Kod ovog bežičnog sistema težište je na daljinskom dopunjavanju baterija energijom putem mikrofrekventnih talasa emitovanih iz veštačkog izvora. Koriste se takozvane rektene (*rectifying antenna*, *rectenna*), antene za prijem mikrofrekventnih talasa (frekvencije reda ve-

219

ng Bridge Using a Dense Network of High Resolution Wireless Sensors«, [15].

Osnovne karakteristike primenjenog sistema mogu se rekapitulirati u sledećem:

- *Senzor*: analogni kapacitivni akcelerometar sa dodatnim električnim kolom za obradu signala (pojačanje i filtriranje) sa 16-bitnim A/D konvertorom TI ADS8341
- *Radio modem*: Maxstream 9XCite na frekvenciji od 900 MHz, dometa 300 m, potrošnje 175 mW pri prijemu i 275 mW pri slanju
- *Procesor*: Atmel ATmega128
- *Napajanje*: Litijum-jonske baterije od 5 V bez sistema za dopunjavanje

Merenje je sprovedeno primenom 14 uređaja pričvršćenih na betonske nosače mosta Geumdang, dužine 273 m. Registrovalo se ubrzanje kao odgovor na pobudu koja je izazivana kalibrisanim kamionom (težine između 5 i 40 tona koji se kretao brzinom od 40 do 80 km/h). Performanse sistema uspešno su upoređene sa klasičnim kablovskim sistemom koji je bio instaliran paralelno. Cilj monitoringa bio je određivanje modova oscilacija mosta, kao i amplitude na različitim mestima. Vremenska sinhronizacija izvršena je slanjem signala iz centralne stanice. Posebna pažnja je posvećena mogućim zastojima u propagaciji ovog signala kroz mrežu, pri čemu je ustanovljeno kašnjenje do 10 ms, što je prihvatljivo za najviše frekvencije od značaja ispod 10 Hz.

218

ličine 10 GHz) koje imaju dobar stepenom iskorišćenja (preko 50%), i pretvaraju primljenu energiju u električnu. Na svakom uređaju jedna ovakva rektena puni kondenzator velikog kapaciteta (reda veličine 0,1 F). U zavisnosti od udaljenosti i snage izvora zračenja, različito je vreme potrebno kako bi se kondenzator napunio do operativnog napona uređaja od 3,3 V, i ono iznosi nekoliko minuta u laboratorijskim uslovima kada se izvor snage 1 W postavi na udaljenosti manjoj od 1 metra, a energija koja se pri tome skladišti iznosi oko 1 J i može da napaja uređaj nekoliko sekundi. Naravno, nemoguće je iskoristiti svu energiju s obzirom da napon kondenzatora opada, te ubrzo padne ispod donjeg praga potrebnog za rad elektronike.

3.3 Bežični sistem Wisden

Značajna primena bežične senzorske mreže prikazana je u radu »*Performance Monitoring of Geumdang Bridge Using a Dense Network of High Resolution Wireless Sensors*« [20], prezentacijom sistema *Wisden*. *Wisden* je razvijen za merenje vibracija građevinskih objekata, i najčešće bazira na sistemima sastavljenim od MICA-2 ili MICA-Z uređaja. Ovi uređaji kao senzore sadrže takozvane vibracione kartice, na kojima su instalirani tro-osni akcelerometri sa pratećom elektronikom. Mogu se koristiti različite baterije i radio modemi. Jedna od glavnih karakteristika *Wisden* sistema je post-vremenska sinhro-

220

nizacija (sinhronizacija podataka sa različitih uređaja vrši se nakon sprovedenih merenja, u centralnoj stanici, na osnovu procene vremena zadržavanja i putovanja paketa podataka kroz mrežu). Takođe, Wisden je samokonfigurišuća multi-hop mreža (nalik internetu) što omogućava visoku pouzdanost prenosa podataka.

Sistem *Wisden* je u ovom radu uspešno primenjen na dve strukture, na modelu četvorospratne zgrade dimenzija oko metra, postavljenoj na seizmičku test konstrukciju (napuštenu poslovnu zgradu sa instalacijom za izazivanje vibracija) u kojoj se proučavaju efekti zemljotresa. Instalacija je u stanju da proizvede sile do 250 KN, sa pomeranjima većim od 10 cm. Takođe, *Wisden* je korišćen i u velikom broju drugih aplikacija i napisan je veliki broj radova o ovom sistemu.

3.4 Monitoring sila u kablovima visećeg mosta

Praćenje napreznja u kablovima mostovskih konstrukcija je vrlo aktuelan problem monitoringa građevinskih konstrukcija, a primena bežične senzorske mreže u monitoringu ovih veličina prikazana je u radu »*Wireless Monitoring of Cable Tension of Cable-Stayed Bridges Using PVDF Piezoelectric Films*«, [11], iz 2001.

U ovoj ranoj aplikaciji primenjeni su klasični uređaji sa procesorima. Kao senzori korišćeni su polivinil fluoridni piezoelektrični filmovi, analogni senzori koji se lepe na noseće kablove na mostu. Napon na ovim fi-

221

sleđuju centru sastoje od rezultata merenja i koordinata vozila. Cilj je bio formiranje »mape« zagađenja vazduha od izduvnih gasova u realnom vremenu, kojoj bi svaki korisnik interneta mogao da pristupi. Osim korišćenja od strane običnih korisnika, ovakav sistem bi u doglednoj budućnosti mogao da posluži i za kontrolu saboračaja.

3.6 Praćenje stanja veza u čeličnim konstrukcijama bežičnim putem

Primena bežične senzorske mreže u Monitoringu Stanja Konstrukcija - MSK, prikazana je u radu »*Structural Health Monitoring Using Modular Wireless Sensors*«, [27]. Uređaji prikazane senzorske mreže za osmatranje oštećenja sastojali su se od sledećih komponenti:

- *Senzor*: Analog Devices ADXL202 digitalni dvoosni akcelerometar. Frekvencija smplovanja između 250 i 1000 Hz, opseg ± 2 g, rezolucija oko 17 mg.
- *Radio modem*: RF Monolithic TR 1000
- *Procesor*: Atmel
- *Napajanje*: Standardne alkalne AA baterije

U ovoj aplikaciji prati se stanje veza i vijaka u spojevima čeličnih konstrukcija. Dva akcelerometra postavljena su sa različitih strana istog spoja, i povezivani su na jedan bežični uređaj, sa obradom registrovanih podataka lokalno na uređaju. Iz međusobne korelacije ovih signala može se zaključiti da li su spojevi ispravni ili nisu.

223

Imova, preko operacionog pojačavača LF353, dovodi na ulaz integrisanog pretvarača napona u frekvenciju Analog Devices ADVFC32. Ovaj signal se zatim dovodi na Hartlijev oscilator, i služi za frekventnu modulaciju izlaznog radio signala. Koriste se noseće frekvencije oko 100 MHz, a svaki uređaj komunicira na posebnom kanalu. Za prijem ovih signala na centralnom računaru korišćen je komercijalni radio modem PL757.

Cilj monitoringa bio je određivanje sile u kablovima, te je uz poznate karakteristike materijala kablova (gustina i poprečni presek), bilo moguće jednoznačno odrediti napreznje na osnovu frekvencije oscilovanja.

3.5 Monitoring zagađenja vazduha saobraćajem

Uspešna primena monitoriga zagađenja vazduha prikazana je u radu »*Online Vehicle and Atmospheric Pollution Monitoring Using GIS and Wireless Sensor Networks*«, [6].

U ovom slučaju primenjeni su uređaji tipa MICA-2 koji komuniciraju na frekvencijama od 433 ili 915 MHz. Registrovana je koncentracija izduvnih gasova automobila (CO₂, CO, SO₂, NO₂ i dr). Primenjivana su dva tipa senzora: MISiC-FET ili senzore sa optičkim vlaknima. Uređaji su korišćeni na dva načina: fiksiranjem na nepokretne objekte kao što su semafori, odnosno instalacijom na automobile sa pridruženim GPS modulom MTS400CA, u kom slučaju se informacije koje se pro-

222

Prednost ovakvog sistema je što se proračun vrši na licu mesta i time se eliminiše potreba za prenosom velike količine podataka. Efikasnost je postignuta prenosom samo zaključaka o stanju spoja.

U svrhu pobude sistema koristi se piezoelektrični aktuator. Da bi se odredilo stanje spoja, potrebno je prvo proučiti odzive ispravnog i neispravnog spoja. Tek posle velikog broja probnih merenja može se doći do pouzdanog zaključka koliko standardno odstupanje korelacije signala dva akcelerometra, na određenom uzorku mernih podataka, predstavlja siguran indikator oštećenja spoja.

3.7 Bežični sistem velike brzine za statički i dinamički monitoring

Primer realizovanog robustnog i izuzetno brzog sistema za statički i dinamički konstrukcijski monitoring na bazi bežičnih komunikacija prikazan je u radu »*Design of a Robust High-Rate Wireless Sensor Network for Static and Dynamic Structural Monitoring*«, [29]. Sistem se sastoji od komponenti:

- *Uređaj*: Tmote Sky, sa procesorom Texas Instruments MSP430 i operativnim sistemom TinyOS
- *Senzori*: LIS2L02AL dvoosni integrisani akcelerometar opsega ± 2 g i poluprovodničke merne trake
- *Radio modem*: CC2420 na 2,4 GHz brzine 250 kbps dometa 50-500 m niske potrošnje (ispod 20 mW)
- *Napajanje*: AA baterije kapaciteta 2650 mAh (bez sistema za dopunjavanje)

224

Skup od 20 uređaja (svaki sa po dva senzora) korišćen je za ispitivanje stanja integralnog mosta u St Lawrence okrugu (NY, USA), dužine 17 m sa 4 betonska noseća stuba na međusobnim odstojanjima od 2,75 m. Ispitivanje stanja objekta vršilo se analizom modova oscilovanja. Registrovane su se frekvencije do 60 Hz (najviši mod oscilacija sa frekvencijom od 47 Hz). Kod mostova ovog tipa, sa kruto vezanim oslonačkim stubovima, tj. bez ležišta, amplituda oscilacija je vrlo mala, a u ovom slučaju registrovana amplituda je iznosila 10 mg (ubrzanje). Ovo je za posledicu imalo malu efektivnu rezoluciju akcelerometra, ali ipak dovoljnu za sprovođenje frekventne analize.

Posebno značajno u ovoj aplikaciji je činjenica da je razvijen protokol prenosa podataka sa visokom pouzdanošću (prosečnim uspehom prenosa paketa od 99,91%).

3.8 Praćenje dilatacija bežičnim sistemom tokom montaže mostova

Bežične senzorske mreže našle su primenu i tokom izgradnje značajnih konstrukcija. Jedna takva aplikacija prikazana je u radu "Wireless Sensor Networks for Strain Monitoring During Steel Bridges Launching" [5]. Osnovne karakteristike primenjenog sistema su:

- Uređaj: MICA-2, komercijalna verzija MDA300 (Crossbow), sa procesorom AtMega128L i radio modemom na 916 MHz

225

hnološkog razvoja kroz projekat TR-16023 finansijski potpomoglo realizaciju istraživanja koje se sprovodi na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

5. LITERATURA

- [1] ANTON, S.R., SODANO, H.A., *A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials (2003-2006)*, Smart Materials and Structures 16 (2007) R1-R21
- [2] BEUTEL, J., *Metrics for Sensor Network Platforms*, ACM REALWSN June 19. 2006. Uppsala, Sweden
- [3] BEUTEL, J., DOGAN, A., *Using TinyOS on BTNodes*, 4. GI/ITG KuVS Fachgespräch "Drahtlose Sensornetze", Zürich, 23-24 Mar 2005.
- [4] BEUTEL, J., KASTEN, O., RINGWALD, M., *BTNodes - Applications and Architecture Compared*, TKN Technical Report TKN-03-012, 1. GI/ITG KuVS Fachgespräch Sensornetze, TU Berlin, July 2003.
- [5] CHACÓN, R., GUZMÁN, F., MIRAMBELL, E., REAL, E., OÑATE, E., *Wireless Sensor Networks for Strain Monitoring During Steel Bridges Launching*, Structural Health Monitoring 2009; 8; 195;
- [6] CORDOVA-LOPEZ, L.E., MASON, A., CULLEN, J.D., SHAW, A., AL-SHAMMA' A.A.I., *Online Vehicle and Atmospheric Pollution Monitoring Using GIS and Wireless Sensor Networks*, Journal of Physics; Conference Series 76 (2007) 012019

227

- *Senzor*: Merne trake, jednoosne HBM K-RY81-6, i troosne (rozete) HBM K-LY41-6
- *Napajanje*: Alkalne C-1,5V baterije

Sistemom se prate deformacije čeličnih konstrukcija tokom montaže istih. Uspešno su upoređeni rezultati dobijeni mrežom bežičnih senzora sa rezultatima dobijenim od strane klasičnog kablovskog sistema, prilikom puštanja u rad čeličnog mosta. Kao senzori korišćene su poluprovodničke merne trake, koje služe za merenje dilatacija, vezane u Vitstonov most. Izlaz sa mernog mosta, linearno proporcionalan dilataciji, preko operacionog pojačavača, povezan je sa 12-bitnim A/D konvertor opsega 2,5 V. Frekvencije od interesa su do 10 Hz. Ukupno je primenjeno 5 uređaja, 4 za jednokanalno merenje (jednoosne merne trake) i jedan za tro-kanalno merenje (troosne merne trake).

4. ZAKLJUČAK

Prikazani pregled primene bežičnih senzorskih mreža u monitoringu građevinskih konstrukcija evidentno ukazuje na njihovu izuzetno veliku efikasnost u rešavanju zadataka monitoringa konstrukcija tokom izgradnje i eksploatacije. Takođe, ekonomičnost primenjenih tehnologija ukazuje na potrebu intenziviranja istraživanja mogućnosti primene u domaćoj građevinskoj praksi.

Autori izražavaju zahvalnost Ministarstvu za nauku i tehnološki razvoj, koje je finansiranjem programa te-

226

- [7] DOWAD, T., *Personal Action Wireless Sensor*, Personal and Ubiquitous Computing, Volume 10, Issue 2-3, January 2006. pp 173-176
- [8] ELVIN, N.G., ELVIN, A.A., SPECTOR, M., *A Self-Powered Mechanical Strain Energy Sensor*, Smart Materials and Structures 10 (2001) 293-299
- [9] GRACIOLI, G., FRÖHLICK, A.A., *An Operating System Infrastructure For Remote Code Update in Deeply Embedded Systems*, Proceedings of the 1st International Workshop on Hot Topics in Software Upgrades, Nashville, Tennessee, USA, 2008. Article no.3
- [10] GROSSE, C.U., KRÜGER, M., GLASER, S.D., *Wireless Acoustic Emission Sensor Networks for Structural Health Monitoring in Civil Engineering*, Proceedings of European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT), September 2006, 1-8
- [11] LIAO, W.H., WANG, D.H., HUANG, S.L., *Wireless Monitoring of Cable Tension of Cable-Stayed Bridges Using PVDF Piezoelectric Films*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 2001; 12; 331;
- [12] LUNDQUIST, J., CAYAN, D.R., DETTINGER, M.D., *Meteorology and Hydrology in Yosemite National Park: a Sensor Network Application*, Proceedings of Information Processing in Sensor Networks (IPSN), April 2003. pp 518-528

228

- [13] LYNCH, J.P., LOH, K.J., *A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring*, The Shock and Vibration Digest 2006; 38; 91;
- [14] LYNCH, J.P., SUNDARARAJAN, A., LAW, K.H., KIREMIDJIAN, A.S., CARRYER, E., *Embedded Damage Detection Algorithms in a Wireless Sensing Unit for Operational Power Efficiency*, Smart Materials and Structures 13 (2004) 800-810
- [15] LYNCH, J.P., WANG, Y., LOH, K.J., YI, J., YUN, C., *Performance Monitoring of Geumdang Bridge Using a Dense Network of High Resolution Wireless Sensors*, Smart Materials and Structures 15 (2006) 1561-1575
- [16] MARCILLO, O.E., *Digital Seismo-Acoustic Signal Processing Aboard a Wireless Sensor Array for Volcano Monitoring*, thesis submitted to the University of New Hampshire for the Degree of MS in Geology 2002.
- [17] MASCARENAS, D.L., TODD, M.D., PARK, G., FARRAR, C.R., *Development of an Impedance-Based Wireless Sensor Node for Structural Health Monitoring*, Smart Materials and Structures 16 (2007) 2137-2145
- [18] MENINGER, S., MUR - MIRANDA, J. O., AMIRTHARAJAH R., CHANDRAKASAN, A.P., LANG, J.H., *Vibration to Electric Energy Conversion*, IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Vol. 9, No. 1, February 2001.

229

mmunicated, Technical Report, IIT Madras, India, May 2007.

- [25] SINHA, J.K., *Higher Order Spectra for Crack and Misalignment Identification in the Shaft of a Rotating Machine*, Structural Health Monitoring 2007; 6; 325;
- [26] STANKOVIĆ, D., *Fizičko tehnička merenja*, Naučna Knjiga, Beograd, 1991.
- [27] TANNER, N.A., WAIT, J.R., FARRAR, C.R., SOHN, H., *Structural Health Monitoring Using Modular Wireless Sensors*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 2003; 14; 43
- [28] TORAH, R., GLYNNE-JONES, P., TUDOR, M., O'DONNELL, T., ROY, S., BEEBY, S., *Self-powered Autonomous Wireless Sensor Node Using Vibration Energy Harvesting*, Measurement Science and Technology, 19 (12). ISSN 1361-6501
- [29] WHELAN, M.J., JANOYAN, K.D., *Design of a Robust High-Rate Wireless Sensor Network for Static and Dynamic Structural Monitoring*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures OnlineFirst, November 28. 2008, doi: 10.1177/1045389X08098768
- [30] WU, J., YUAN, S., ZHAO, X., YIN, Y., YE, W., *A Wireless Sensor Network Node Designed for Exploring a Structural Health Monitoring Application*, Smart Materials and Structures 16 (2007) 1898-1906

231

- [19] NAGAYAMA, T., SPENCER JR, B.F., *Structural Health Monitoring Using Smart Sensors*, NSEL Report Series, Report No. NSEL-001, November 2007. UILU-ENG 2007-1801 ISSN 1940-9826
- [20] PAEK, J., CHINTALAPUDI K., GOVINDAN R., CAFFREY J., MASRI S., *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
- [21] PARK, S., LEE, J., YUN, C., INMAN, D.J., *Electro-Mechanical Impedance-Based Wireless Structural Health Monitoring Using PCA-Data Compression and K-Means Clustering Algorithms*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures OnlineFirst, May 24. 2007, doi: 10.1177/1045389X07077400
- [22] PORTA, G., ESTUDILLO, S., SANCHEZ, A., *Bluetooth/GMRS Car Security System with a Randomly Located Movement Detect Device*, Proceedings of the Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, Vol. 2, September 2006. pp 100-105
- [23] RASHHVAND, F. H., SALCEDO, V. T., SÁNCHEZ, E.M., ILIESCU, D., *Ubiquitous Wireless Telemedicine*, IET Commun., 2008, 2, (2), pp. 237-254
- [24] REDDY, A.M., KUMAR, P., KUMAR, G.A., JANAKIRAM D., *Operating Systems for Wireless Sensor Networks: A Survey Technical Report*, Co-

230

- [31] YUSE, K., MONNIER, T., PETIT, L., LEFEUVRE, E., RICHARD, C., GUYOMAR, D., *Self-Powered Wireless Health Monitoring Supplied by Synchronized Switch Harvesting (SSH) Method*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 2008; 19; 387;

232