

Upotreba bežičnih senzorskih mreža u heritologiji

Miodrag Malović, Darko Jevremović, Milanka Pećanac

Apstrakt—Minijaturizacija i pojeftinjenje mikroelektronskih komponenti dovelo je do značajnog širenja bežičnih tehnologija u zadnjih par decenija. Upotreba bežičnih senzorskih mreža u heritologiji vezuje se primarno za evaluaciju stanja objekata: modalnu analizu vibracija, snimanje pukotina u zidovima, detekciju prokišnjavanja i vlage, merenje koncentracije nepoželjnih hemijskih supstanci kao što je ugljen-dioksid, itd. Druge primene uključuju stalni bezbednosni nadzor (zaštitu od nepogoda i provalnika) kao i merenja prilikom sanacije objekata. U ovom pregledu opisane su neke savremene primene bežičnih senzorskih mreža u pomenute svrhe.

Ključne reči—bežične senzorske mreže, merenja, senzori, kulturno nasleđe

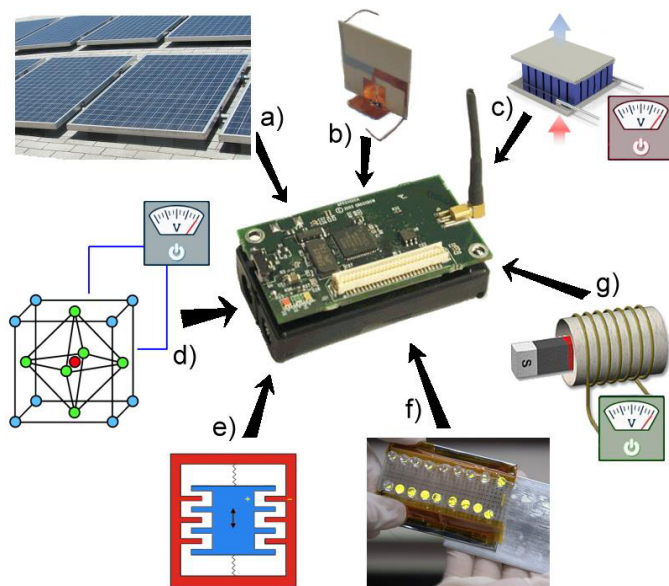
I. UVOD

Bežične senzorske mreže (*wireless sensor networks* odnosno WSN) su sa razvojem, a posebno minijaturizacijom i pojeftinjenjem elektronskih komponenti niske potrošnje, dobile važno mesto u različitim oblastima nauke i svakodnevnog života. Najčešće oblasti njihove primene su građevina (ispitivanje stanja objekata, posebno kapitalnih, kao što su brane, mostovi ili tornjevi), medicina (daljinski nadzor kritičnih pacijenata), meteorologija (akvizicija podataka), saobraćaj (kontrola kao i merenje zagađenja), prevencija nepogoda (požara, poplava i raznih havarija), industrijska i kućna automatika, itd. U heritologiji, bežični senzorski sistemi se koriste za procenu stanja objekata kulturne baštine: modalnu analizu vibracija [1], snimanje pukotina u zidovima, detekciju vlažnosti i prokišnjavanja, koncentracije nepoželjnih gasova, i drugih fizičkih veličina; u stalnom bezbednosnom nadzoru lokaliteta (zaštiti od prirodnih nepogoda i provalnika); kao i u praćenju i kontroli sanacije objekata.

II. DIZAJN BEŽIČNIH SENZORSKIH MREŽA

WSN se sastoje od nekoliko do nekoliko hiljada senzorskih uređaja koji nadgledaju neke pojave (vrše merenja određenih fizičkih veličina) i komuniciraju jedni sa drugima putem elektromagnetskih talasa. Skoro isključivo, u ovu svrhu se koriste radio frekvencije. Tipičan senzorski uređaj se sastoji od četiri elementa: modula za napajanje (koji može uključivati

mehanizam za dopunjavanje: *energy harvesting*), procesorske ploče, senzorskog sistema i komunikacionog modula. Često se koristi modularan dizajn u smislu mogućnosti da se upotrebe različiti senzori i različiti komunikacioni moduli. Poznate marke bežičnih uređaja koji se mogu nabaviti spremni za upotrebu uključuju: Waspote, TelosB, MICAz, MICA2, Wisense, Imote, Shimmer3, itd [2,3].



Sl. 1. Bežični uređaj (na slici: MICAz [4]) sa prikazom najčešćih sistema za dopunjavanje energije: a) solarne ćelije (fotonaponski efekat); b) rektene (apsorpcija radio talasa); c) termogeneratori (Zebekov efekat); d) piezoelektrični i piroelektrični generatori; e) kapacitivni elektrostatički generatori; f) triboelektrični generatori (trenje); g) induktivni mikrogeneratori (elektromagnetska indukcija)

Prednosti bežični senzorskih sistema u odnosu na žičane su ušteda u materijalu i radu usled izostanka postavljanja kablova i fleksibilnost: lakša promena konfiguracije sistema i lakše postavljanje pojedinačnih uređaja na teško dostupna mesta. Mane su manja brzina prenosa podataka, osetljivost na smetnje (što uključuje i prirodne izvore i napade hakera) i ograničenost energetske rezervi. Pitanja energetske rezervi se najčešće rešavaju upotrebom sistema za *energy harvesting*, tj. dopunu energije iz ambijentalnih izvora, uz razuman pristup strategiji uključivanja i isključivanja kako celih uređaja tako i njihovih radio modula, koji su najveći potrošači energije. Uređaji tipično rade sa vrlo malim radnim ciklusom, odnosno veći deo vremena provode u *sleep* režimu. Pitanja brzine prenosa se rešavaju lokalnim procesiranjem i izborom važnih informacija koje je neophodno preneti (uz kompresiju

Miodrag Malović – Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Karnegijeva 4, 11120 Beograd (e-mail: ofiss@malovic.in.rs), (<https://orcid.org/0000-0002-0691-4626>).

Darko Jevremović – Astronomska Opservatorija, Volgina 7, 11060 Beograd (e-mail: darko@aob.rs), (<https://orcid.org/0000-0002-8834-6625>).

Milanka Pećanac – Deseta gimnazija "Mihajlo Pupin", Antifašističke borbe 1a, 11179 Beograd & Univerzitet u Beogradu, Fizički fakultet, Studentski trg 12, 11158 Beograd (e-mail: milankaknez@gmail.com), (<https://orcid.org/0009-0007-6793-7921>).

podataka). Mrežna sigurnosna pitanja nisu primarna u heritološkim primenama, a problemi prirodnih i veštačkih smetnji se mogu donekle ublažiti dizajnom detalja mreže (npr. izborom noseće frekvencije).

III. WSN ZA MODALNU ANALIZU U HERITOLOGIJI

Važan cilj u realizaciji bežičnog mernog sistema za merenje vibracija građevinskih objekata (uključujući objekte kulturne baštine) jeste postizanje zadovoljavajuće vremenske sinhronizacije između mernih podataka koji potiču iz različitih tačaka. Dok se kod drugih vrsta merenja, kao što su merenja u medicini, biologiji, meteorologiji, i sl. ne zahteva velika sinhronizovanost, već se podaci obeležavaju pomoću lokalnog časovnika realnog vremena koji ne mora biti striktno održavan, kod modalne analize vibracija, bitna je usaglašenost podataka iz različitih tačaka u prostoru na nivou malog dela perioda najvišeg harmonika oscilacija koje se posmatraju. Srećom, što je objekat veći, ove frekvencije su niže, i u većini aplikacija maksimalne vrednosti su do 20 Hz. Za postizanje zadovoljavajuće sinhronizacije (reda veličine ms ili bolje) koriste se različite metode kojima se kontinualno vrše korekcije pokazivanja (ofseta) i brzine satova uređaja, kako u toku operacije mreže, tako i naknadno (*a-posteriori*), na nadzornom uređaju (kompjuteru) [5].

A. Palazzo Comunale di Castelfidardo

Opština (kuća gradskog veća) Kastelfidardo (u okolini Ankone, u centralnoj Italiji) je izgrađena na temeljima starijeg zdanja 1567. godine. Stara zgrada, u kojoj je vršeno prikupljanje poreza, nije imala vrata i prozore na nižim nivoima i u nju se moglo ući samo putem merdevina. Kompletna restauracija nove zgrade je zatim izvršena 1780. Kao i u mnogim sličnim ustanovama, i ovde je deo (podrum) bio korišćen kao zatvor u različitim vremenima. Danas se u zgradi osim prostorija gradskog veća nalazi i muzej.



Sl. 2. Opština (kuća gradskog veća) Kastelfidardo

Grupa italijanskih naučnika je izvršila merenje vibracija u cilju modalne analize i procene stanja objekta [6]. Korišćeno je 6 senzorskih uređaja sa 32-bitnim ARM mikrokontrolerom, opremljenih dvoosnim MEMS akcelerometrima opsega $\pm 2g$.

Sinhronizacija je obavljena upotrebom GPS risivera i korišćenjem PPS (*pulse per second*) signala, koji se emituje jednom u sekundi sa satelita. Iako mu kratkoročna stabilnost frekvencije nije jaka (susedni impulsi imaju neodređenost vremena prijema usled promene puta propagacije i nesavršenosti prijemne elektronike), dugoročna stabilnost je superiorna u odnosu na bilo koji samostalni oscilator, jer se PPS kontinualno sinhronizuje sa etalonskim laboratorijama na zemlji [7]. Uređaji su opremljeni neuobičajeno velikim energetskim rezervama (6 litijum-jonskih baterija) i memorijom (4 GB). PC računar je, kao i obično, korišćen kao hab sistema.

Uređaji su premeštani i merenje je vršeno u više prostornih konfiguracija da bi se proučili različiti modovi oscilovanja koji su prethodno označeni kao najverovatniji u softverskoj simulaciji. Za istovremenu analizu svih modova oscilovanja od interesa bio bi potreban veći broj uređaja (nekoliko desetina). Numerički model kojim je struktura opisana prvobitno je načinjen na osnovu geodezijskih premeravanja i poznatih podataka o strukturi građevine. U toku rada sistema, model je periodično ažuriran u skladu sa dobijenim podacima dok se nije poklopio sa njima u ostvarljivoj meri. Četiri značajna moda oscilovanja su detektovana na frekvencijama od oko 3 do oko 6 Hz. Uočene su manje razlike u parametrima zidova, kao i da zvonik ima veliki broj lokalnih modova oscilovanja (rezonantnih frekvencija) koji su potencijalno opasni po stabilnost strukture.

B. Basilica of Santa Maria di Collemaggio

Bazilika Device Marije Kolemado je velika srednjevekovna crkva u L'Akvili u centralnoj Italiji. Mesto je održavanja prvog celestinskog oproštaja, koga je papa Celestin V, sahranjen ovde, uveo 1294. Radi se o manifestaciji koja traje nedelju dana a posvećena je praštanju. Celestinski oproštaj se nalazi na Uneskovoj listi nematerijalnog kulturnog nasleđa. Bazilika je oštećena u zemljotresu 2009. i restauracija je trajala do 2017, kada je ponovo otvorena za posetioce, kao jedna od glavnih turističkih atrakcija L'Akvile.

Za ispitivanje objekta upotrebljena je mreža senzora koji su komunicirali bežično ali su napajani iz gradske mreže [8]. Ovo rešenje je bilo najjednostavnije da se obezbedi neprekinut dvogodišnji rad sistema (2012-2014). Merenje je vršeno uz pomoć 16 troosnih MEMS akcelerometara na bežičnim uređajima Memsic Imote2. Desetak dodatnih uređaja vršilo je i merenje osvetljenosti, temperature i vlažnosti vazduha. Sinhronizacija podataka je vršena putem FTSP (*flooding time synchronization*) protokola [9] koji koristi tzv. preplavlivanje mreže odnosno slanje velikog broja paketa sa vremenskim žigovima sa referentnog uređaja, u kombinaciji sa pamćenjem parova vremenskih žigova (sa parova uređaja) i linearnom regresijom kojom se upoređuju brzine njihovih tajmera.

Kao i u slučaju opštine Kastelfidardo, i drugih heritoloških objekata, nije korišćena veštačka pobuda za koju je potrebna teška mašinerija koja sa sobom povlači i rizik od oštećenja (što je neprihvatljivo), već je vršena tzv. operativna modalna analiza [10], što znači da se posmatraju vibracije niskog intenziteta koje su posledica ambijentalne pobude. Zabeležen

je i odziv na sedam slabijih zemljotresa, čime je dobijeno dosta korisnih podataka.



Sl. 3. Unutrašnjost bazilike Device Marije Kolemaje

Bazilika predstavlja kompleksnu strukturu, i uočeno je da se modalni odziv menja tokom starenja (dve godine koliko je ispitivanje trajalo), kao i u funkciji temperature (koja utiče kako na osobine materijala tako i na širenje ili skupljanje nekih pukotina, koje su takođe ispitivane različitim tehnologijama).

C. Mastio di Matilde

Matildina kula u Livornu (Toskana, Italija) predstavlja deo Stare tvrđave (*Fortezza Vecchia*) koja je dobila današnji izgled u prvoj polovini XVI veka. Matildina kula je izgrađena ranije, oko 1241. godine, a ime duguje grofici Matildi od Kanose koja je živela dva veka ranije, verovatno zato što je nastala na temeljima stare, izgrađene u njeno vreme.

Korišćeno je 12 modularnih senzorskih uređaja sa mogućnošću dopunjavanja solarnom energijom, sa kvalitetnim jednoosnim MEMS akceleratorima sa analognim izlazom, velikog frekventnog opsega. Vremenska sinhronizacija je vršena modifikovanim NTP protokolom, inače uobičajenim za kablovske mrežne sisteme. Uređaji, sa 32-bitnim ARM mikrokontrolerom, koriste FeRAM kao zamenu za flash (memoriju koja ne zavisi od napajanja). Najčešće od PZT-a (olovo cirkonat titanat), ove memorije koriste feromagnetski efekat. Prednost FeRAM-a je manja osetljivost na magnetske smetnje, brži upis, manja potrošnja energije i veći broj upisa (preko 10^{10}). Glavna mana je veća cena. Osim vibracija, mereni su i normalni napon, pomeraj, temperatura i vlažnost [11].

Dugotrajnom monitoringu je prethodio kratkotrajni probni monitoring, kojim su identifikovane osnovne karakteristike dinamičkog odziva kule. Numerički model i izbor lokacija za senzore su urađeni u skladu sa ovim rezultatima. Identifikovana su tri dominantna moda oscilovanja, i dokumentovani su njihovi driftovi frekvencije. Sezonske, zavisne od temperature, kao i druge promene, su u skladu sa teoretskim očekivanjima. Frekvencija oscilovanja translatornih (transverzalnih) modova raste sa temperaturom

usled porasta dimenzija i modula elastičnosti, dok frekvencija torzionih modova pokazuje tendenciju pada (nije sasvim dokazano ali korelacija je uočena), što je prema teoriji posledica popuštanja spojnih elemenata koji su ugrađeni prilikom ranije rekonstrukcije. Jak vetar takođe ima uticaj na smanjenje frekvencija svih modova, što teorija objašnjava smanjenjem modula elastičnosti usled interakcije vazduha i pukotina u zidovima.



Sl. 4. Stara tvrđava, Livorno (Matildina kula u pozadini levo)

IV. WSN ZA PRAĆENJE PARAMETARA OKRUŽENJA

Ispitivanje stanja građevinskih objekata podrazumeva ne samo analizu vibracija, već i merenje drugih fizičkih i hemijskih parametara ugrađenog građevinskog materijala i okoline. Objektima kulturne baštine ne prete samo katastrofe izazvane elementarnim nepogodama (zemljotresi, požari, oluje, poplave, itd). Vлага (koju donose vazduh i padavine), ugljen-dioksid (čijoj koncentraciji značajno doprinose posetioči) i razni produkti zagađenja (hemikalije, radioaktivnost i dr) mogu loše uticati kako na njihove estetske vrednosti (propadanje slika), tako i na stabilnost strukture. Zato se bežične senzorske mreže često koriste za kratkotrajno i dugotrajno praćenje ovih parametara.

A. Mogao Grottoes

Pećine Mogao u provinciji Gansu u severozapadnoj Kini predstavljaju kompleks budističkih manastira i hramova uklesan u stene, koji se prostiru u širinu više od kilometar i po. Nalaze se na nekadašnjem putu svile. Kompleks je počeo da se gradi 366. godine i razvijan je do XIV veka (oko hiljadu godina). 492 prostorije su trenutno sređene i otvorene za posetioce, sa muralima i preko 2400 oslikanih skulptura. Pećine su uvršćene u Uneskovu listu mesta svetske baštine (predstavljaju *Unesco World Heritage Site*). Kao pokazatelj evolucije budističke umetnosti, Mogao Pećine su od istorijske vrednosti bez premca, obezbeđujući vrlo živopisan uvid u sve aspekte života u pomenutim vremenima (politiku, ekonomiju, kulturu, religiju, svakodnevni život, itd). 1990. godine, otkrivena je prostorija (*Library Cave* - Pećina Biblioteka) sa desetinama hiljada rukopisa i raznih relikvija, što mnogi smatraju najvećim otkrićem na polju orijentalne arheologije. *Mogao Grottoes* trenutno prima oko 800.000 posetilaca godišnje, pa je izvršen monitoring lokaliteta da bi se procenilo koliki rizik ovo predstavlja.



Sl. 5. Centralna fasada kompleksa Pećine Mogao

Grupa kineskih naučnika je postavila 241 bežični senzorski uređaj u 57 pećina *Mogao Grottoes*-a [12]. Još devedesetih godina prošlog veka dokazano je da je propadanje murala i skulptura povezano sa koncentracijama vlage i ugljen-dioksida, pa je mrežom izvršeno dugotrajno osmatranje nivoa istih. Relativna vlažnost vazduha i temperatura su mereni digitalnim senzorima rezolucije 1,8% i 0,3°C, dok je koncentracija CO₂ merena infracrvenim NDIR¹ detektorima (opseg 0-5‰). Topologija mreže je organizovana tako da postoje lokalni centri klastera koji preuzimaju podatke od ostalih uređaja i šalju ih lokalnom data sinku (*gateway*-u²). 22 uređaja ovog tipa se nalaze na otvorenom, na stubovima javne rasvete, napajaju se žičano, i šalju odvojenim radio modulom velikog dometa podatke direktno nadzornom uređaju. Njemu se zatim pristupa preko interneta u cilju čitanja podataka.

Rezultati ispitivanja potvrđuju jaku korelaciju između broja posetilaca i nivoa vlage i ugljen-dioksida. Koncentracija ugljen-dioksida je često prelazila 2,5‰. Vrednosti od 2,5-5‰ mogu izazvati tegobe kod nekih ljudi, a preko 5‰ generalno predstavljaju rizik po zdravlje [13]. Kao posledica izvršenog osmatranja, dodatno je ograničen broj posetilaca koji mogu istovremeno da borave u prostorijama.

B. Dólmen de Antelas

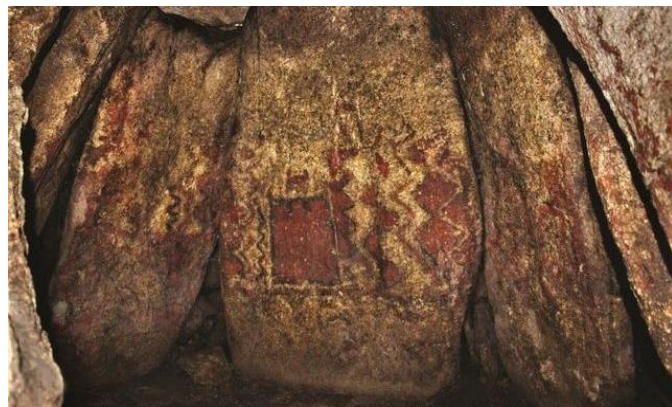
Slična vrsta ispitivanja rađena je na manjoj skali u oslikanom megalitskom dolmenu u distriktu Vizeu u Portugaliji, čija se starost procenjuje na 5700-6000 godina. Dolmen predstavlja grobnicu sastavljenu od kamenih blokova, obično postavljenih u obliku sličnom kapiji, i često prekrivenih zemljom i kamenjem tako da se dobija neka vrsta humke. Dolmen u Vizeu je otkriven 1956, a naučnici su odmah prepoznali njegovu vrednost kao i krhkost, i zatrpali ga u pokušaju da ga bolje očuvaju. Boje organskog porekla (crvena i crna) kojima je ovaj dolmen oslikan su posebno osetljive, i brže se raspadaju u prisustvu vlage, ugljen-dioksida, i na višoj temperaturi. Ispitivanja novijeg datuma započela su 1993.

¹ Non-Dispersive Infra-Red (nedisperzivni infracrveni) detektor neraspajajućim (suprotno od prizme ili difrakcione rešetke) elementom izdvaja uzak opseg talasnih dužina, pogodan za opažanje prisustva određenih gasova

² *Gateway* (prolaz) je uređaj koji služi za spajanje delova mreže koji koriste različite protokole i/ili fizičke medijume komunikacije

Procena stanja strukture i rizika koji posetioci predstavljaju po crteže izvršena je u kombinaciji dugotrajnog bežičnog monitoringa temperature i koncentracije H₂O i CO₂ sa periodičnim manuelnim merenjima nagiba kamenih blokova i širine pukotina u njima [14]. Osmam senzorskih uređaja i jedan *gateway* su korišćeni tokom 5 meseci bežičnog ispitivanja. Takođe su vršeni eksperimenti od 10-15 minuta sa različitim brojem posetilaca („glumaca” koji su se ponašali u skladu sa očekivanjima od budućih turista) i merene su vrednosti nepoželjnih gasova i temperature. Jednosatne posete troje ljudi ovom skučenom prostoru uzrokuju povećanje koncentracije CO₂ preko 2,4‰ (granica iznad koje ugljena kiselina u vodi dovodi do korozije krečnjaka [15]), povećanje temperature i do 7°C na nekim mestima, ali ne i povećanje i inače visoke relativne vlažnosti vazduha, uglavnom zbog njihovog kretanja koje pospešuje inače lošu ventilaciju.

Donet je zaključak da je neophodno instalirati ventilacioni sistem radi smanjenja koncentracije nepoželjnih gasova, kao i postaviti podupirače radi očuvanja stabilnosti strukture. Predlaže se i upotreba cementa radi boljeg prijanjanja kamenih blokova, što bi smanjilo šansu od pucanja.



Sl. 6. Dolmen de Antelas, star oko 6000 godina (Portugalija)

C. Torre Rognosa

Varošica *San Gimignano* (San Ćiminjano) u Toskani (Italija) uspela je da uprkos burnoj viševjekovnoj istoriji sačuva 14 kula (od ukupno 72), koje su aristokratske porodice imale običaj da podižu tokom vremena. Ove kule danas dočaravaju srednjevekovnu atmosferu i privlače turiste iz celog sveta. *Torre Rognosa* (52 m) je drugi najviši toranj, izgrađen 1200. godine, i predstavlja najstariji toranj danas. Ime (*šugavi*; *đavolji*; *mučni*) duguje tome što je dugo korišćen kao zatvor. Centar varošice sa kulama predstavlja *Unesco World Heritage Site*.

Za monitoring konstrukcije angažovana je multihop³ bežična mreža od 10 senzorskih uređaja [16] baziranih na 16-bitnom Risc mikrokontroleru MSP430. Merenje je trajalo 55 dana u toku 2010. Širina pukotina je merena magnetskim Holovim senzorima rezolucije 0,1 mm. Šest uređaja je merilo

³ komunikacioni paketi se ne prenose samo direktno od izvora do primaoca, već i putem relejnih uređaja - iz više “hopova” (skokova); na ovaj način šteti se ukupna energija jer je potrebna snaga emisije proporcionalna kvadratu odstojanja na koje treba preneti poruku

temperaturu i vlažnost vazduha, tri su posvećena merenju širine pukotina, a jedan je korišćen za merenje nivoa padavina, za šta je konstruisan poseban senzor rezolucije 0,04 mm (1 cl po kvadratu stranice 50 cm).



Sl. 7. Panorama San Ćiminjanija; Toranj Ronjoza, sa zvonikom na vrhu, je drugi sa desna

Rezultati pokazuju očekivane dnevne i sezonske varijacije parametara. Pukotine su pokazale tendenciju širenja, što je verovatno posledica toga što je merenje izvršeno u junu i julu, kada prosečna temperatura čvrstih tela na površini raste.

V. OSTALE UPOTREBE WSN U OČUVANJU KULTURNE BAŠTINE

Mreže čija je svrha osiguravanje objekata kulturne baštine uglavnom služe za detekciju nepogoda, a ređe za zaštitu od provalnika. Nepogoda koju je najčešće moguće sprečiti ili ograničiti njene posledice blagovremenom reakcijom je požar. Iako su žičane mreže uobičajene, bežične senzorske mreže su efikasno rešenje kod prostorno rastrkanih objekata.

Bežične mreže se mogu koristiti i za merenja u okviru akcija sanacije objekata. Jedna od ovih akcija je integralno (monolitno) preseljenje istih (pomeranje cele strukture zajedno sa temeljom). Pionirski rad o upotrebi WSN na ovom polju objavila je grupa kineskih naučnika iz Hangdžoua [17].

A. Bulguksa

Centralni hram korejskog budističkog reda *Jogye*, izgrađen u VIII veku u provinciji Severni Gjonsang u Južnoj Koreji, predstavlja još jedan *Unesco world heritage site*. Između ostalog, sadrži dve kamene pagode i zlatnu statuu Bude, koji se ubrajaju u najveća nacionalna blaga. Kompleks je preživeo više uništenja i rekonstrukcija, a danas zauzima manji prostor nego u srednjem veku. Pretnja vatrom je povećana zbog šume koja ga okružuje. Ova pretnja je posebno prepoznata u Južnoj Koreji zato što je jedan od najpoznatijih nacionalnih spomenika, kapija *Namdaemun*, izgorela u požaru 2008. godine [18].

U cilju zaštite od požara, korejski naučnici su upotreбили mrežu od 27 uređaja sa detektorima požara, od kojih se 25 nalaze na perimetru, i jedan sa video kamerom [19]. Detektor požara radi na principu merenja intenziteta infracrvenog zračenja u kombinaciji sa koncentracijom ugljen-monoksida. Temperatura, vlažnost vazduha i atmosferski pritisak se

takođe mere i loguju (senzori ovih veličina su uglavnom jeftini i niske potrošnje).

Bazna stanica izvršava algoritam prepoznavanja nivoa opasnosti (alerta) u četiri nivoa (nema opasnosti, sumnja, vanredno stanje, puna uzbuna). Sistem šalje upozorenja u realnom vremenu, putem interneta i SMS-a, vatrogascima i drugim nadležnim službama. Naravno, postoji i dežurno lice koje nadgleda rad sistema i učestvuje u potencijalnoj detekciji i saniranju požara.



Sl. 8. *Baegungyo* (Most Belog Oblaka), hram Bulguksa, J. Koreja

B. Hangzhou

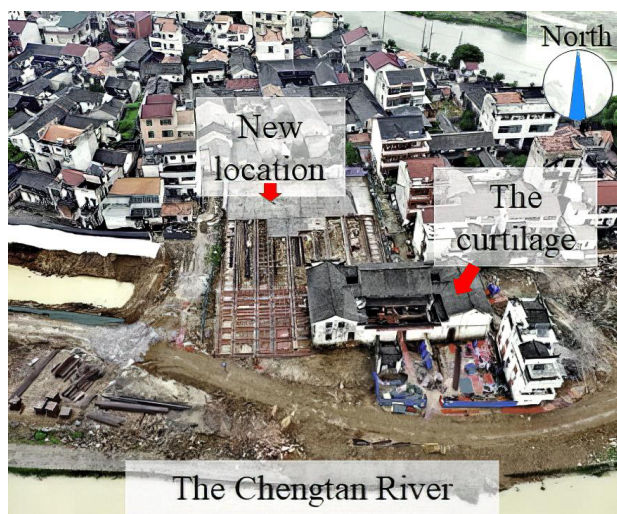
U poređenju sa rušenjem i rekonstrukcijom, monolitno preseljenje građevina ima prednosti zbog očuvanja humanog doživljaja, a u nekim slučajevima i strukturalnog integriteta. Prvo moderno preseljenje ovog tipa izvršeno je 1930. u Turskoj po nalogu Kemala Atatürka, kada je njegova jednospratna kuća pomerena pet metara po tramvajskim šinama, donetim za ovu priliku iz Istanbula, iz ekoloških pobuda, da bi se izbeglo sečenje grana platana [20]. „Pokretna Kuća“ je danas muzej.

U okolini grada Hangdžoua, provincija Džedang (južno od Šangaja), premeštena je dvospratna zidano-drvena sudnica, površine 685 m² i mase 370 tona, arhitektonski u stilu kasne Čing dinastije (početak 20. veka). Premeštanje je izvršeno u skladu sa hitnim projektom zaštite od poplava reke Čengtana. Trajalo je nedelju dana, a objekat je premešten 15 metara u zapadnu stranu tokom prvih 4 dana, a zatim 40 metara na sever tokom naredna 3 dana. Brzina pomeranja je bila 0,8 do 1,6 mm/s, u koracima od po pola metra.

Od senzorskog aparata su korišćeni precizni inklinometri za praćenje nagiba delova konstrukcije, senzori pomeraja za praćenje pukotina u zidovima kao i spojeva drveta i zidova, i senzori relativnog izduženja zakačeni na čelični okvir koji je pridržavao konstrukciju. Prikupljeni podaci su se slali preko GPRS modema i mreže mobilne telefonije do servera. Numerička simulacija je izvršena da bi se otkrile tačke u kojima je najverovatnije da će doći do pucanja, kako bi se senzori postavili na prava mesta.

Za vreme pomeranja nije detektovano značajno krivljenje konstrukcije - pokazivanja inklinometara su ostala konstantna

unutar nekoliko hiljaditih delova stepena. Pukotine su takođe bile relativno stabilne, sa varijacijama ispod desetog dela milimetra. Senzori na čeličnom okviru pokazali su maksimalne relativne deformacije od 0,04%. Pomeranje je proteklo bez poteškoća.



Sl. 9. Monolitno pomeranje objekta u Hangžou [17]

VI. ZAKLJUČAK

Bežične senzorske mreže predstavljaju skup, najčešće minijaturnih, elektronskih senzorskih uređaja koji služe za nadgledanje različitih pojava u fizičkom svetu. Budući da su bežični sistemi manje invazivni od žičanih, primena WSN u heritologiji je indikovana i vezuje se uglavnom za: modalnu analizu vibracija; kratkotrajni ili dugotrajni monitoring različitih fizičkih veličina koje utiču na stabilnost ili upotrebnu vrednost strukture; osiguravanje lokaliteta od prirodnih nepogoda i provalnika; i merenja u svrhu praćenja i kontrole sanacije objekata. U ovom prilogu prikazane su neke aplikacije WSN u pomenutim oblastima.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju za podršku Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (ugovori 451-03-47/2023-01/200287 i 200002).

REFERENCE

- [1] Á. Cunha, E. Caetano, "Experimental modal analysis of civil engineering structures," *Sound Vib*, vol. 40, no. 6, pp. 12-20, Jun. 2006.
- [2] A. Khalifeh, M. Felix, A. Nechibvute, B. M. Nyambo, "Microcontroller Unit-Based Wireless Sensor Network Nodes: A Review," *Sensors*, vol. 22, no. 22, 8937, Nov. 2022.
- [3] M. Abdulkarem, K. Samsudin, F. Z. Rokhani, M. F. A-Rasid, "Wireless sensor network for structural health monitoring: A contemporary review of technologies, challenges, and future direction," *Struct Health Monit*, vol. 19, no. 3, pp. 693-735, May 2020.
- [4] Crossbow Technology Inc., MICAz wireless measurement system, http://courses.ece.ubc.ca/494/files/MICAz_Datasheet.pdf
- [5] M. Malović, "Sinhronizacija mernih podataka u bežičnim senzorskim mrežama," *Zbornik LXVI konferencije ETRAN*, Novi Pazar, Srbija, pp. 883-889, 6-9 Jun. 2022.

- [6] A. Pierdicca, F. Clementi, D. Isidori, E. Concettoni, C. Cristalli, S. Lenci, "Numerical model upgrading of a historical masonry palace monitored with a wireless sensor network," *Int J Masonry Res Innov*, vol. 1, no. 1, pp. 74-98, 2016.
- [7] D. L. Mills, "Primary Servers and Reference Clocks," in *Computer network time synchronization: the network time protocol on earth and in space*, 2nd ed., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2011, ch. 7, pp. 131-148.
- [8] V. Gattulli, F. Graziosi, F. Federici, F. Potenza, A. Colarieti, M. Lepidi, "Role and perspectives of modal identification in rapid and permanent structural monitoring after an earthquake," 6th World Conf. on Structural Control and Monitoring, Barcelona, Spain, 15 pp, 15-17 Jul. 2014.
- [9] L. Gheorghe, R. Rughiniș, N. Țăpuș, "Fault-tolerant flooding time synchronization protocol for wireless sensor networks," *Proc. of 6th Int. Conf. on Networking and Services*, Cancun, Mexico, pp. 143-149, 7-13 Mar. 2010.
- [10] C. Rainieri Carlo, G. Fabbrocino, "Operational modal analysis for the characterization of heritage structures," *Geofizika*, vol. 28, no. 1, pp. 109-126, 2011.
- [11] P. Barsocchi, G. Bartoli, M. Betti, M. Girardi, S. Mammolito, D. Pellegrini, G. Zini, "Wireless sensor networks for continuous structural health monitoring of historic masonry towers," *Int J Archit Herit*, vol. 15, no. 1, pp. 22-44, Jan. 2021.
- [12] M. Xia, Y. Dong, W. Xu, D. Lu, P. Xue, G. Liu, "Long-term microclimate monitoring in wildland cultural heritage sites with wireless sensor networks," *Int J High Perfor Comput Netw*, vol. 7, no. 2, pp. 111-122, 2012.
- [13] Wisconsin Department of Health Services | Prevention & Healthy Living | Environmental Health | Carbon Dioxide, <https://www.dhs.wisconsin.gov/chemical/carbondioxide.htm>
- [14] C. Wang, A. Tavares, J. Fonseca, F. Soares, Z. Li, "Real-time condition assessment of a painted megalithic cave using Wireless Sensor Network," *Tunn Undergr Sp Tech*, vol. 120, 104270, Feb. 2022.
- [15] D. Dragovich, J. Grose, "Impact of tourists on carbon dioxide levels at Jenolan Caves, Australia: an examination of microclimatic constraints on tourist cave management," *Geoforum*, vol. 21, no. 1, pp. 111-120, Mar. 1990.
- [16] A. Mecocci, A. Abrardo, "Monitoring architectural heritage by wireless sensors networks: San Gimignano - a case study," *Sensors*, vol. 14, no. 1, pp. 770-778, Jan. 2014.
- [17] L. Shen, Y. Bo, Y. Yang, X. Yang, W. Zhu, Q. Wang, "Real-Time Monitoring for Monolithic Movement of a Heritage Curtilage Using Wireless Sensor Networks," *Build*, vol. 12, no. 11, 1785, Nov. 2022.
- [18] C. Sang-Hun, "South Korean Gate Destroyed in Fire," *The New York Times*, 12. Feb. 2008, <https://www.nytimes.com/2008/02/12/world/asia/12korea.html>
- [19] J. Joo, J. Yim, C. K. Lee, "Protecting cultural heritage tourism sites with the ubiquitous sensor network," *J Sustain Tour*, vol. 17, no. 3, pp. 397-406, May 2009.
- [20] N. Ö. Erbay, "The moving house or Atatürk house museum and the altered mind-set of Yalova province," *Unimuseum*, vol. 2, no. 1, pp. 28-33, Jul. 2019.

ABSTRACT

Miniaturization and cheapening of microelectronic components have lead to widespread use of wireless sensor networks (WSN) in the modern world. WSNs in heritology are used primarily for evaluation of object structural health: modal analysis of vibrations, observation of cracks in the walls, detection of seepage and moisture, measurement of concentrations of potentially harmful chemical substances, etc. Other possibilities include security supervision (protection against natural disasters and burglars) and measurements during the rehabilitation of buildings. This review describes and classifies some contemporary applications of WSNs in these fields.

Application of wireless sensor networks in heritology

Miodrag Malović, Darko Jevremović, Milanka Pećanac