

BEŽIČNA MREŽA OSJETILA ZA NADZIRANJE OTPADA

Jednostavni instrumenti

U Hrvatskoj se grade ili planiraju graditi veliki regionalni centri za gospodarenje i odlaganje komunalnog otpada. Da bi ti centri bili učinkoviti, potrebno je imati djelotvoran nadzor odlaganja otpada, osobito njegova transporta i nelegalnih odlagališta, te onemogućiti daljnja onečišćanja tla, zraka i vode. Na uređenim, ograđenim i čuvanim odlagalištima moguće je organizirati djelotvoran sustav mjerenja osjetilima i uređajima koji su međusobno povezani i podatke razmjenjuju s pomoću žica. No za nekontrolirano odlaganje otpada na širokom prostoru, posebno onoga koji je potencijalno opasan za okoliš, doista je nemoguće imati valjan i razrađen sustav motrenja (monitoringa) na kojem bi se temeljio sustav zaštite okoliša.

Zanimljivo su rješenje toga problema ponudili Martin Žagar, dipl. ing. el., dr. sc. Igor Čavrak i Tomislav Sečen, dipl. ing. el., s Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, u referatu *Bežična mreža osjetila za nadzor otpada* koji su predstavili na X. međunarodnom simpoziju *Gospodarenje otpadom – Zagreb 2008*. Oni su razradili poseban sustav bežične mreže osjetila koji omogućuje potpun i djelotvoran nadzor otpada. Riječ je o raspodijeljenoj i širokoj mreži jednostavnih osjetila koja mjere različite kemijske elemente i spojeve u zraku, vodi i tlu. Ta su osjetila, odnosno jednostavni instrumenti, udružena u bežičnu mrežu čije prednosti dolaze do izražaja pri promatranju pojava čija vremena promatranja nisu unaprijed određena ni poznata. Raspodijeljenost osjetila znači da se takva osjeti-

WIRELESS WASTE MONITORING SENSOR NETWORK

An efficient and low-cost monitoring system has to be put in place to make the future waste management centres cost-effective, to prevent an uncontrolled waste disposal, and to avoid creation of illicit dump sites. One of possible solutions is the creation of an integrated wireless network of sensors that would measure concentration of various chemical elements and compounds in the air, water and soil. These networks are capable of detecting even those sites or spots that were previously unknown, or the change of situation over time on the already known sites. Their main advantage is an independent adjustment to the on-site conditions, to the situation within the network, and to the loss of signal. In addition, the consumption of energy in such networks is negligible. The main principles according to which they function are described, and it is stated that wireless sensor networks are highly suitable for measuring and monitoring waste, especially its harmful components, both during transport and disposal. The networks are based on the MEMS technology which presents numerous advantages when compared to the wire-connected sensors.

la mogu postaviti što bliže promatranim pojavama, a najveća je prednost mreže osjetila u odnosu na mali broj ili samo jedno osjetilo postavljeno u prostoru znatno manja osjetljivost na prirodne prepreke. S gustim rasporedom osjetila u okolišu s brojnim prirodnim preprekama za širenje signala, sasvim je sigurno da će manji broj takvih osjetila biti blizu promatranjoj pojavi i da neće bit zaklonjen, a to je omogućiti pomno i detaljno promatranje.

Nadgledavanje i upravljanje takvom mrežom osjetila ostvaruje se daljinskim, također bežičnim putem u stvarnom vremenu. Uporabom interneta oni koji upravljaju mrežom osjetila mogu upravljati bežičnom mrežom osjetila s bilo koje lokacije, čak i iz velike daljine.

Mreže se osjetila mogu primijeniti u nadzoru odlagališta otpada, njegovu transportu, ali i procjenama utjecaja na okoliš za mjesta znatno udaljena od tog odlagališta. Time se može uspostaviti odgovorno gospodarenje otpadom, ali i spriječiti veća onečišćenja i neželjene događaje, poput

pomora riba, trovanja faune i flore i sl. Ujedno primjena takvih suvremenih tehnologija pogoduje i energetske učinkovitosti i smanjivanju onečišćenja.

Važnost učinkovitog nadzora

Iako je otpad jedan od ključnih ekoloških problema to su kasno spoznala i mnoga razvijenija društva. Otpad je izravna posljedica sveukupnih ljudskih aktivnosti, pa je njegova količina često pokazatelj gospodarske snage i razvijenosti određenog društva. Hrvatska na godinu proizvede 13,2 milijuna t otpada, od čega 1,2 milijuna t komunalnog otpada (270 kg po kućanstvu) i 0,1 milijun t opasnoga otpada (42.000 t prijavljeno u 2004.). U Hrvatskoj je više od 280 registriranih odlagališta otpada, od kojih su većina legalna, ali ima zatvorenih i brojnih "divljih" odlagališta. Ključni su problemi u raspolaganju i gospodarenju otpadom prepoznavanje i količinsko utvrđivanje njegovih sastojaka, posebno onih koji mogu biti opasni za okolinu i mogu prouzročiti mnoge probleme

pri odlaganju. Na sadašnjim se legalnim odlagalištima radi sprječavanja neželjenog onečišćenja može postaviti stalna i međusobno žicom povezana mreža osjetila za stalna mjerenja. Ali na "divljim" odlagalištima na kojima je praktički nemoguće

pojavama čija točna lokacija nije unaprijed poznata ili se mogu dogoditi znatne promjene tijekom procesa promatranja.

Takozvano raspodijeljeno motrenje omogućuje postavljanje osjetila što bliže promatranim pojavama i znat-

no poboljšava signal u odnosu prema mogućim šumovima i ometanjima. Ipak najveća je prednost mreža osjetila znatno manja ovisnost o prirodnim preprekama. Gustim prostornim rasporedom osjetila na terenu s mnogobrojnim prirodnim ograničenjima, dio osjetila neće biti zaklonjen ili će biti dovoljno blizu promatranoj pojavi, a to će omogućiti pomnije i detaljnije promatranje. Kako se nadgledanje i upravljanje mrežom može ostvariti daljinskim putem, takve mreže mogu nadzirati odlagališta, transport otpada ili utjecaje koje odlagalište ima na bližu i dalju okolicu.

Samostalno prilagođavanje

Bežične su mreže osjetila najniža razina računalnih sustava koji su se u stanju sami organizirati i prilagođavati, a pritom onaj koji tim sustavom upravlja samo preuzima nadzor i određuje ponašanje sustava na višoj razini. Sustav samostalno provodi zadanu aktivnost na najnižoj (izvršnoj) razini, posebno u određivanju veličina, koordinaciji s drugim



Mrežom osjetila može se brzo otkriti „divlje“ odlagalište u nastajanju

odrediti veličinu i pravce daljnega širenja te na zatvorenim odlagalištima (gdje stalna mjerenja nisu potrebna) može se postaviti privremena bežična mreža osjetila. Takve se mreže mogu postaviti i u blizini legalnih odlagališta, posebno onih koja se nalaze u blizini aktivnih vodocrpilišta, u područjima zaštićene prirodne baštine, neposrednoj blizini naselja ili na drugim ekološki osjetljivim područjima.

Radi održivoga i sveobuhvatnoga gospodarenja otpadom potrebni su učinkoviti mehanizmi zaštite okoliša i nadzora. Kao jedno od mogućih i prihvatljivih rješenja nameće se dobro raspoređena (raspodijeljena) mreža jednostavnih osjetila koja može mjeriti koncentracije različitih kemijskih elemenata i spojeva, neovisno o tome nalaze li se oni u zraku, vodi ili tlu. Ta se osjetila ujedno mogu povezati u bežičnu mrežu, a to može imati velike prednosti, posebno pri



Mrežom osjetila može se zaštititi prirodna baština (slap Krčić pokraj Knina)

sustavima i reakcijama na promjene u okolini. Stoga brojna raspoređena i međusobno povezana osjetila omogućuju promatranje svijeta na dosad nedostupnoj razini.

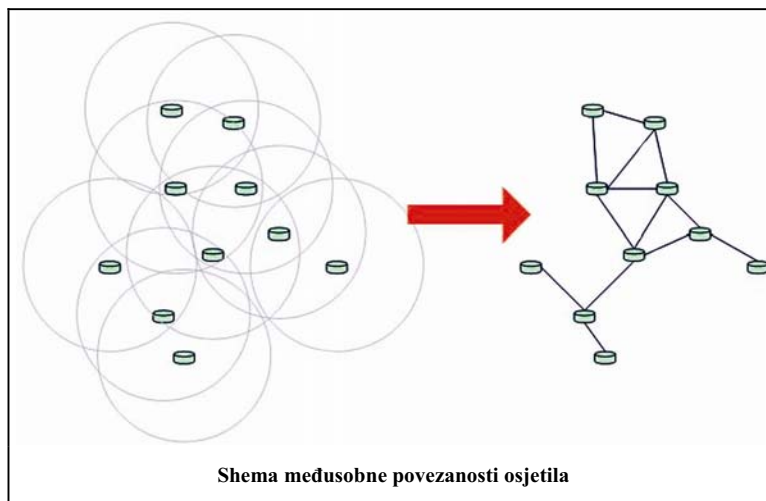
Glavne su značajke najvećeg dijela bežičnih mreža osjetila velik broj čvorova, rad bez nadgledavanja, a ograničeni izvori i mala raspoloživa energija uvjetuju neovisnost izravnome upletanju u njihov rad. Upravo je samoorganiziranje i samoprilagodavanje koje je uvjetovano stanjem u samom sustavu i u okolini nužno za ispravan i dugotrajan rad. Bežične mreže osjetila uključuju komunikacije, računala, obradu signala, izvore energije i operacijske sustave te biološki potaknute sustave.

Tradicionalna mreža žicom povezanih osjetila ovisi o postojanju komunikacijske i energetske infrastrukture, a rasprostranjena se osjetila napajaju iz praktički neiscrpnih izvora energije pa im građa i način rada ne ovise o takvim ograničenjima. Dobra komunikacijska povezanost omogućuje jednostavno i brzo prikupljanje podataka sa svih osjetila i obradu na jednom središnjem mjestu. Centralizirana obrada omogućuje dostupnost izmjerenih podataka i njihovu složeniju obradu, a čuvanje ovisi samo o raspoloživom prostoru i količini pohranjenih podataka.

Raspodijeljene mreže osjetila omogućuje postavljanje osjetila što bliže promatranoj pojavi, a time bolji i razumljiviji signal. Ipak najveća je prednost mreža osjetila spomenuta neovisnost o prirodnim zaprekama. Dovoljno gustim rasporedom osjetila moguće je precizno opažanje. Na terenu s brojnim prirodnim preprekama često nema nikakve energetske

i komunikacijske infrastrukture. Stoga se mreže osjetila oslanjaju na bežičnu (radijsku, optičku ili zvučnu) komunikaciju i obnovljive izvore energije male snage.

Prenošenje i prikupljanje podataka s umreženih osjetila na središnje mjesto



radi obrade moguće je i u žicom povezanim mrežama osjetila, ali je u ovom slučaju zbog ograničene energije vrlo neprikladno. Pojačana bi komunikacija vrlo brzo iscrpila postojeće količine energije i uvjetovala kratak životni vijek takvog osjetila. Stoga je umjesto središnje vrlo važna raspoređena i raspodijeljena obrada podataka u mreži. Takvom se obradom na pojedinim čvorovima smanjuje količina prenesenih podataka, a time i utrošena energija.



Bespilotna letjelica

Česta je značajka bežičnih mreža osjetila njihovo *ad hoc* postavljanje. Karakteristike okoliša (poput krošnja stabala) ili način postavljanja u prostor (primjerice izbacivanje osjetila iz bespilotne letjelice) ne omogućuju točno postavljanje svakog osjetila. Raspodjela osjetila i njihova povezanost u odnosu na domet veze te širenje signala u prostoru ne omogu-

ćuju prethodno planiranje i gradnju komunikacijske mreže. Stoga je vrlo važno svojstvo bežične mreže osjetila samostalno prilagođavanje i samostalno organiziranje prema postojećim komunikacijskim vezama među parovima osjetila. Kvarovi, potrošena energija ili promjene što utječu na širenje radiosignala, a time i na povezanosti pojedinih čvorova, uvjetuju samostalnu prilagodljivost mreže osjetila. Samoprilagodljive mreže reagiraju na povoljne i nepovoljne promjene u mreži, a ta su svojstva nužna i zbog nedostupnosti te velikog broja osjetila. Nedostupnost se osjetila može očitovati u fizič-

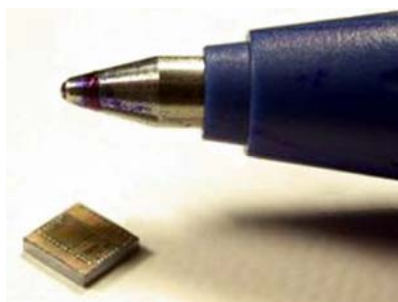
koj nepristupačnosti, primjerice kada se mreža nalazi u toksičnoj okolini ili području kojemu se teško prilazi, nepraktičnom pristupu (poput krošnja stabala) ili kada je pristup nemoguć poradi neželjena utjecaja na promatranu pojavu.

Čvorovi i njihove karakteristike

Različite primjene bežičnih mreža osjetila određuju i njihove osnovne elemente – čvorove. S obzirom na veličine koje se mjere, najpogodniji su specijalizirani čvorovi (sustavi na čipu) oblikovani za jednostavne i sasvim određene zadaće. To uvjetuje malu potrošnju energije, male dimenzije i nisku cijenu. Komunikacijske su sposobnosti čvorova male i često jednosmjernе (samo za slanje podataka) te vrlo ograničena dometa.

Čvorovi su opće namjene većih mogućnosti od specijaliziranih čvorova, ali ograničavaju ih male količine energije. Njihov razvoj potiče dostupnost i pristupačnost bilo cijenom, bilo vremenom. Karakteristika je takvih čvorova funkcionalnost obra-

de podataka, dvosmjerna radijska komunikacija i mogućnost dugotrajne pohrane podataka, a mogu se priključcima proširiti na više jednostavnih osjetila. Čvorovi su velike propusnosti namijenjeni složenijim osjetilima, primjerice akustičnim ili vizualnim, a zahtjevi im nadilaze mogućnosti čvorova opće namjene. Postoje i čvorovi poveznici za uspostavljanje veze između mreža osjetila i tradicionalne široke mrežno povezane infrastrukture. U tu se grupu ubrajaju i različite vrste osobnih računala male snage, ugrađena i posebna računala pa i ona veličine dlanca s nekoliko ugrađenih osjetila i bogatim komunikacijskim mogućnostima. Pojedini se čvorovima poveznicima mogu priključiti i dodatna osjetila, ali mogu poslužiti i za prikupljanje, obradu i pohranu podataka.



Specijalizirani čvor uspoređen s vrhom olovke

Za platforme malih dimenzija problem je radijska komunikacija zbog dodatnih sklopova koji troše prostor na čvoru i dodatnu energiju. Mali čvorovi ograničavaju i veličinu antene, a to uvjetuje uporabu visokih frekvencija i veću potrošnju energije. Stoga je poželjno aktivno komuniciranje uporabom lasera male snage i pasivno temeljeno na refleksiji optičkog signala s pomoću posebne antene s kontroliranom refleksijom. Osim savršene refleksije i komunikacije s izvorom signala troši neznatne količine energije. Osnovni joj je nedostatak nužnost izravne optičke povezanosti i trenutačnoj orijentaciji čvora. Suradnja je čvorova temelj uspješnoga rada bežične mreže osjetila jer

je njezino postojanje uvjetovano pouzdanim prenošenjem podataka.



Čvor poveznik

Komunikacija bežične mreže osjetila podrazumijeva uporabu radija, a pritom je domet pojedinoga čvora predstavljen kao zamišljeni krug. Svi čvorovi u zamišljenom krugu primaju pouzdane podatke, a ostali su podaci nedostupni. Čvorovi su povezani simetričnim vezama, a komunikacija među njima obavlja se neizravno, kratkim skokovima s pomoću posredničkih čvorova koji primaju poruku i usmjeravaju je jednom od susjednih čvorova posebnim algoritmom usmjeravanja.

Svakom je čvoru u bežičnoj mreži poznata njegova lokacija i oni imaju određenu količinu energije i memorije te rade bez nadzora i mogućnosti ljudskog zahvata. Ograničenost energije uvjetuje komunikacija kratkih skokova i minimalno trajanje aktivnosti radijskog signala. Ograničenost radne memorije onemogućuje pohranjivanje većih količina informacija.

MEMS tehnologija

Pojava mikroelektromehaničkih sustava MEMS (eng. *microelectromechanical systems*) izazvala je velike

promjene u gradnji osjetila iznimno malih dimenzija, male potrošnje energije i boljih radnih karakteristika, ali omogućila i integraciju s drugim komponentama na istom čipu. Dosađanja se osjetila ostvarena tom tehnologijom ponajprije odnose na akcelerometre, barometre i magnetometre, ali ona omogućuje i nova komunikacijska rješenja, poput aktivne i pasivne povezanosti svjetlom i ubiranja energije iz okoliša. Tako primjerice eksperimentalni modul *Figaro CDM4160* može mjeriti i najmanje koncentracije CO₂. Valja istaknuti male dimenzije i težinu (22 g) te neznatnu potrebu za energijom. Osnovna su mu svojstva visoka razlučivost koncentracije CO₂, izdržljivost, mala potrošnja, široki raspon mjerenja, niski troškovi i nikakvo održavanje. Osim u zatvorenim prostorima, poput ureda i tvornica, može se rabiti i na otvorenom, primjerice u poljoprivredi. Izlazni se napon mijenja ovisno o različitim koncentracijama CO₂, a analogni se signal može pretvoriti u digitalni. Mikroprocesor omogućuje očitavanje svake sekunde, a osnovna se koncentracija može prilagodovati i na više vrijednosti od koncentracija CO₂ u čistom zraku. Zbog minimalne se potrošnje za napajanje mogu iskoristiti niskonaponski izvori napajanja od 5 V.

Bežične mreže osjetila predstavljaju nov način u mjerenju i nadgledavanju otpada, odnosno pojedinih njegovih opasnih sastojaka i u transportu i u odlaganju. Samostalna je prilagodljivost takvih mreža posebno važna u promjenljivoj okolini i daje znatnu prednost u odnosu na statična osjetila međusobno povezana žicama. Prilagodljivi čvorovi omogućuju spajanje različitih osjetila, a nadgledavanje je takve mreže moguće iz posebnoga središnjega operativnog centra s prikupljanjem i obradom podataka u stvarnom vremenu.

Jadranka Samokovlija Dragičević

Snimci: L. Dragičević