

Izvorni naučni rad

OPTIMIZACIJA BEŽIČNIH SENZORSKIH MREŽA – IZAZOVI I MOGUĆNOSTI

Emina Zekotić, MA; email: emina_mince8@hotmail.com
Prof. dr. Goran Popovic; email: popovic.goran@yandex.com
Internacionalni univerzitet Travnik u Travniku

Sažetak: Ovaj rad prezentuje probleme koji prate implementaciju i eksploataciju bežičnih senzorskih mreža. Predstavimo specifičnosti problema i postaviti modele kojima se opisuju. Opisamo metodologiju optimizacije različitih parametara od interesa i predložiti neke od popularnih metoda koje daju dobra rješenja problema. Posebna pažnja biće posvećena pokrivenosti terena i tehnikama rutiranja podataka. Prvi od njih determiniše kvalitet servisa a drugi odlučujuće utiče na efikasnost potrošnje energije u mreži. Uporedićemo neke od metoda po različitim kriterijumima i dati prijedloge za dalja istraživanja.

Ključne riječi: optimizacija, sensor, wsn, višekriterijumska analiza.

OPTIMIZATION OF WIRELESS SENSOR NETWORKS - CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

Abstract: This paper presents the problems associated with the implementation and exploitation of wireless sensor networks. We will present the specifics of the problem and set up models that describe them. We will describe the optimization methodology of various parameters of interest and present some of the popular methods that provide good solutions to the problem. Special attention will be paid to terrain coverage and data routing techniques. The first of them determines the quality of service, and the second decisively affects the efficiency of energy consumption in the network. We will compare some of the methods according to different criteria and give suggestions for further research.

Key words: optimization, sensor, wsn, multicriteria analysis.

1. Uvod

Bežične senzorske mreže (*Wireless Sensor Networks*) WSN, predstavljaju jedan od najvažnijih aspekata savremenog informacionog društva. U kombinaciji sa drugim tehnologijama kao što su 5G, IoT, vještačka inteligencija, Blockchain itd. ove mreže će predstavljati osnovnu infrastrukturu za implementaciju velikog broja aplikacija koje će kvalitet ljudskog života podići na značajno viši nivo. Primjene u saobraćaju, poljoprivredi, ekologiji, industriji, medicini, trgovini i bezbjednosti, samo su neke od oblasti gdje će unapređenje sistema primjenom WSN dovesti do razvoja koji se ranije nije mogao ni zamisliti. Bežične senzorske mreže se obično sastoje od nekoliko stotina ili nekoliko hiljada senzorskih čvorova. Senzori su fizički mali uređaji sa niskom potrošnjom energije koji se sastoje od procesora ograničene snage, memorije malog kapaciteta, uređaja za očitavanje željenog fizičkog fenomena, baterije i komunikacionog modula. Problemi koji prate rad WSN su inspiracija za nekoliko popularnih istraživačkih oblasti kao što su projektovanje hardvera male potrošnje, algoritmi za rutiranje podataka, upravljanje topologijom mrežom, osiguranje pokrivenosti terena itd. U opštem slučaju, cilj ovih istraživanja je osiguranje pokrivenosti čitavog terena od interesa i blagovremeno i tačno

dostavljanje podataka na mjesto obrade što je pretpostavka za dostizanje željenog kvaliteta servisa te produženje životnog vijeka WSN tj. efikasnost potrošnje energije u mreži.

Kako bi se udovoljilo postavljenim zahtjevima neophodno je optimizovati određene parametre mreže koji utiču na kvalitet servisa i efikasnost potrošnje energije. Teorija optimizacije podrazumijeva razvoj modela i metoda za iznalaženje optimalnog rješenja postavljenog problema. Pri tome je neophodno predmet istraživanja prebaciti iz realnog u matematički model. Nakon što se problem opiše matematičkim funkcijama (linearnim ili nelinearnim) traži se optimum funkcije (minimum ili maksimum zavisno od postavke problema). Optimalno rješenje predstavlja u stvari najbolje rješenje za poznate uslove. Neophodno je da se usvoji mjera koja određuje kvalitet dobijenog rješenja i poredi ga sa drugim rješenjima. U većini problema optimizacije proces dobijanja optimalnog rješenja je veoma složen te zahtijeva dosta vremena i računarskih resursa. S obzirom da je praktično nemoguće izvesti iscrpnu pretragu čitavog prostora i analitički riješiti složene optimizacione problem u praksi se često koriste i približna odnosno dovoljno dobra rješenja.

U ovom radu opisujemo dvije osnovne grupe problema koje se pojavljuju u WSN. Predstavićemo ideje koje stoje iza metoda za optimizaciju kao i neke od metoda koje su se pokazale kao efikasne i koje najviše obećavaju u smislu daljeg razvoja i unapređenja. U drugom poglavlju ćemo opisati problem pokrivenosti terena senzorskog polja, a u trećem problem rutiranja podataka. Zaključak će sadržavati rekapitulaciju učinjenih opservacija, poređenje opisanih metoda i najavu budućeg rada autora na poboljšanju nekih od metoda sa posebnim osvrtom na specifične primjene.

2. Pokrivenost terena

Senzori su mali jeftini uređaji ograničenih procesnih, energetskih i memorijskih mogućnosti. Bežične senzorske mreže WSN se projektuju i implementiraju tako da prikupljaju podatke od interesa na ciljnom području i proslijeđuju ih do konačnog odredišta. Pošto je pokrivenost čitavog terena izuzetno važna, često se prilikom implementacije ne šteti na broju senzora što dovodi kako do neopravdano visoke cijene izgradnje tako i do čestih komunikacionih konflikata u toku eksploatacije mreže. Pored toga, bez obzira na raspored senzorskih čvorova na terenu kao i primjenjene tehnologije i tehnike bežične senzorske mreže, neki dijelovi terena ostaju nepokriveni. Nekoliko problema iz ove oblasti mogu biti predmetom optimizacije i svi se svode na traženje načina kako da se pokrije što veći teren sa što manje implementiranih senzora..

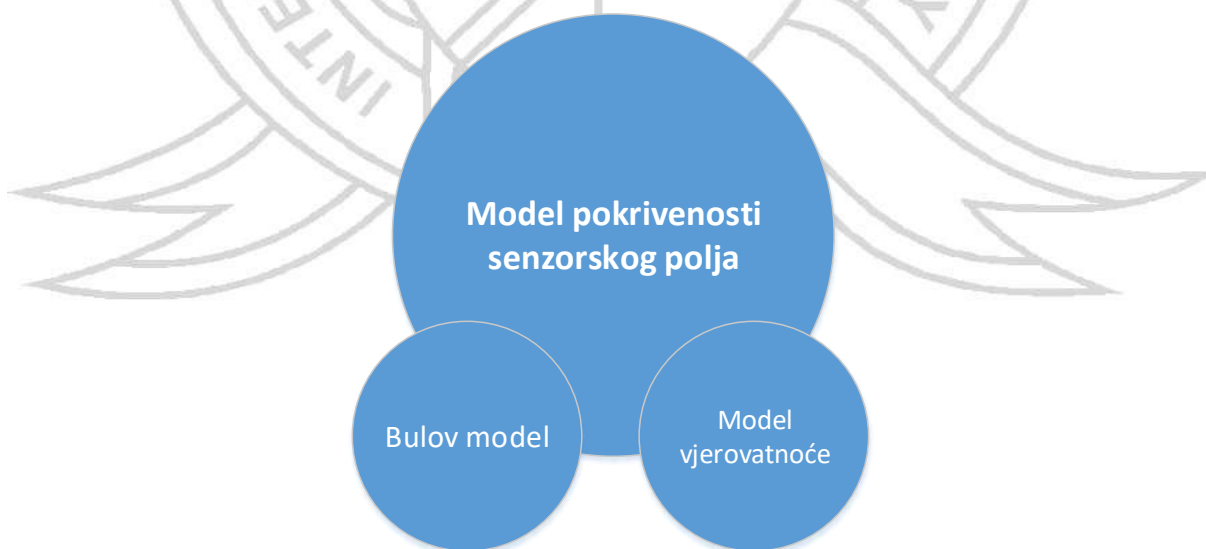
Pokrivenost se često smatra jednim od parametara kvaliteta servisa u WSN. U tom smislu parametar pokazuje u kojoj mjeri je WSN sposobna da detektuje sve događaje od interesa na terenu. Za teren datih dimenzija i konfiguracije potrebno je rasporediti konačan broj senzorskih čvorova tako da je vjerovatnoća detekcije događaja maksimalna. Vjerovatnoća neuspješne detekcije se prikazuje kao funkcija udaljenosti između senzora i određene tačke na terenu gdje se događaj može desiti. Objektivna funkcija je proizvod vjerovatnoća svih senzora, a problem se svodi na minimizaciju maksimuma ovog proizvoda. Ovaj problem spada u kategoriju nelinearnih nekonveksnih problema programiranja [1]. Pokrivenost terena se definiše kao odnos površine terena koja je obuhvaćena očitavanjem i površine terena koji predstavlja oblast od interesa.

Sličan prethodnom problemu je problem optimalnog lociranja bazne stanice (sinka) u senzorskom polju tako da se postigne maksimalno moguća pokrivenost. Ovaj problem spada u grupu težinskih p-centar lokacijskih problema.

Optimalno raspoređivanje senzora u polju podrazumijeva minimizaciju broja raspoređenih senzorskih čvorova koji mogu obezbijediti potpunu pokrivenost terena i ostvariti komunikaciju kako međusobnu, tako i sa višim hijerarhijskim nivoima tako da se očitani podaci mogu efikasno dostaviti na mjesto obrade ili konačne upotrebe. Ovaj problem spada u kategoriju *Art Gallery* problema koji spada u grupu NP teških problema [2]. Problemi ovog tipa u opštem slučaju se svode na određivanje najmanjeg broja čuvara galerije (u ovom slučaju senzorskih čvorova) tako da je svaki dio galerije pod sigurnim nadzorom nekog od čuvara. Galerija ovdje podrazumijeva geometrijski teren određenih karakteristika, u našem slučaju senzorsko polje. Postoje i različite modifikacije problema koji usložnjavaju situaciju npr. postavljanjem uslova da svaka tačka od interesa mora biti dostupna za nadgledanje od najmanje tri senzorska čvora. I ove modifikacije su u domenu NP teških problema [3].

Prilikom modeliranja problema moguća su dva slučaja koja imaju različite implikacije na izbor metode za optimizaciju [4]. Posmatramo oblast od interesa S na koju se raspoređuje n senzorskih čvorova. Problem je jednostavniji ako pretpostavimo da su čvorovi u polju uniformno raspoređeni tj. gustina čvorova se izražava sa $\rho = n/S$. Događaj se u svakom od senzora detektuje ako je jačina primljenog signala veća od postavljenog praga koga nazivamo osjetljivost očitavanja γ .

Ako je događaj pojavi unutar opsega očitavanja senzorskog čvora postoje dvije mogućnosti: A događaj je detektovan i B događaj nije detektovan. U ovom modelu nema zavisnosti od uslova koji vladaju u okolini kao što su prirodne i vještačke prepreke na putu prostiranja signala (zgrade, drveće itd.), niti od jačine emitovanog signala za očitavanje. Obično je poluprečnik r oblasti koja je pokrivena senzorskim čvorom krug poluprečnika jednakog poluprečniku oblasti očitavanja čvora.



Slika 1. Taksonomija modela pokrivenosti

Događaj koji se desi unutar S može biti detektovan od bilo kog senzora samo ukoliko se nalazi na udaljenosti manjoj od r od tog senzora. Vjerovatnoća da će događaj biti detektovan od proizvoljnog senzora iznosi:

$$P = \frac{r^2\pi}{S} \quad (1)$$

Vjerovatnoća da događaj neće biti detektovan od proizvoljnog senzora iznosi 1-P. Uzmimo da je n senzora raspoređeno slučajno na terenu. Vjerovatnoća da događaj neće biti detektovan od bilo kog senzora u polju iznosi

$$P_n = (1 - P)^n \quad (2)$$

Vjerovatnoća da će događaj biti detektovan od najmanje jednog od n čvorova u polju iznosi

$$P_{det} = 1 - P_n = 1 - (1 - P)^n \quad (3)$$

Kod modela koji se bazira na vjerovatnoćama (Slika 1.), koristi se osjetljivost očitavanja γ koja predstavlja minimalnu jačinu signala koji može biti pravilno dekodovan u senzoru. Vjerovatnoća da će nivo primljenog signala u senzoru biti iznad ove granične vrijednosti je data izrazom

$$P_r[P_r(d) > \gamma] = Q\left[\frac{\gamma - P_r(d)}{\sigma}\right] \quad (4)$$

Gdje se koristi Q funkcija za računanje vjerovatnoće Gausovog procesa u obliku:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^\infty \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (5)$$

i važi $Q(z)=1-Q(-z)$. Svaki događaj u polju može biti detektovan od strane više od jednog senzora. Kumulativna vjerovatnoća detekcije se računa takođe uz pomoć izraza (3).

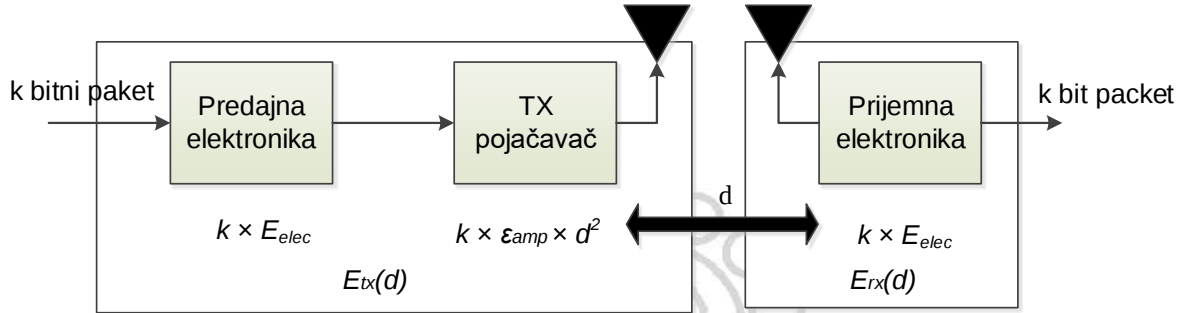
3. Rutiranje podataka

Komunikacija prilikom prenosa podataka između senzorskog čvora i odredišta troši najveći dio energije čvora, daleko više od očitavanja kao primarnog zadatka senzora i obrade podataka u njemu. Imajući u vidu da je senzor uređaj sa autonomnim napajanjem i da bateriju na terenu obično nije moguće ili nije rentabilno mijenjati, problem uštede energije se pojavljuje kao najveći problem u WSN. Kako komunikacija troši najveći dio energije jasno je da je i uštede energije potrebno vršiti prvenstveno u fazama razmjene podataka između senzorskih čvorova. Zbog toga je neophodno iznaći optimalni model rutiranja podataka tj. optimalnu putanju od izvora podataka do njihovog odredišta.

Na klasičnom radio modelu na Slici 2. oznakom d je prikazana udaljenost između senzorskog čvora i odredišta, svaki paket podataka se sastoji od k bita. E_{elec} je energija koja se disipira u elektronicima predajnika i prijemnika, ϵ_{amp} je snaga pojačavača. Ako se paket od k bita prenosi kroz slobodan prostor preko udaljenosti d, energija koja se potroši u prijemniku iznosi:

$$E_{tx}(k, d) = kE_{elec} + k\epsilon_{amp}d^2 \quad (6)$$

Iz ovog izraza je očito da potrošnja energije u predajniku raste sa kvadratom udaljenosti do odredišta.



Slika 2. Model prostiranja radio signala u slobodnom prostoru

Konvencionalni model prenosa podataka u senzorskoj mreži podrazumijeva direktnu vezu senzorskih čvorova i bazne stanice. Pošto je bazna stanica obično locirana van senzorskog polja na većoj udaljenosti d , potrošnja energije u čvorovima bi bila izuzetno velika, a time i životni vijek WSN veoma kratak.

Rješenju problema značajno je doprinijela ideja o hijerarhijskoj organizaciji bežičnih senzorskih mreža [5]. U ovom pristupu, senzorski čvorovi se grupišu u određen broj klastera. Svaki od klastera ima svog vođu (*Cluster Head CH*), koji pored osnovnog zadatka, očitavanja podataka sa terena, ima i posebna zaduženja kao što su: agregacija podataka primljenih od drugih čvorova u klasteru, njihova fuzija kao i prosljeđivanje prema krajnjem odredištu. Dodatna zaduženja CH čvorova uzrokuju znatno veću potrošnju energije u njima, pa je neophodno periodično rotirati ulogu CH, kako bi se ovo opterećenje ravnomjerno rasporedilo na sve čvorove u mreži. Tipičan protokol iz ove grupe je poznati LEACH algoritam [6]. Algoritam se izvodi u sukcesivnim rundama. Prvo se vrši izbor željenog procenta čvorova P u senzorskom polju koji će imati ulogu CH. Svaka runda se sastoji iz dvije faze: *setup* i *steady*. U toku *setup* faze svaki od čvorova samostalno odlučuje, da li će u toj rundi biti CH ili ne, birajući slučajno broj između 0 i 1. Ako je ova, slučajno izabrana vrijednost manja od vrijednosti praga $T(n)$ za čvor n , tada će čvor n postati CH u r -toj rundi. Prag se računa pomoću izraza :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times (r \bmod \frac{1}{P})} & \text{if } n \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

Gdje je G skup senzora koji nisu bili CH u posljednjih $1/P$ rundi, a r je broj tekuće runde. Na početku algoritma, svaki čvor ima jednaku vjerovatnoću da postane CH. Parametar $T(n)$ se u svakoj sljedećoj rundi povećava, jer je sve manje preostalih kandidata za ulogu CH. Nakon izbora, svaki CH saopštava svoj status ostalim čvorovima u mreži. Čvorovi potom biraju kom

će klasteru pripasti na osnovu nivoa signala koje primaju od svih novoizabranih CH. Nakon toga, svaki čvor šalje informaciju izabranom CH da se učlanjuje u njegov klaster, čime se klasteri konačno formiraju. U toku *steady* faze, senzorski čvorovi vrše svoj osnovni zadatak, očitavanje odgovarajućeg fizičkog fenomena, a prikupljeni podaci se šalju ka CH. CH vrše agregaciju podataka primljenih od svih čvorova svojih klastera i potom ih šalju ka BS. Nakon određenog vremena, koje mreža provodi u *steady* fazi, prelazi se u novu *setup* fazu. Čitav postupak se ciklično ponavlja sve dok u mreži postoje aktivni senzori. Osnovna prednost organizovanja bežičnih senzorskih mreža u klaster je u tome što se smanjuje broj veza koje se uspostavljaju na velikim razdaljinama, pošto samo CH imaju direktnu komunikaciju sa BS. Problem sa LEACH protokolom je taj što ulogu CH mogu imati i senzori koji su veoma daleko od BS tj. nalaze se na granicama svojih klastera ili su čak najdalji od BS prema kojoj trebaju usmjeriti podatke. Ovi CH troše enormno veliku energiju za komunikaciju sa baznom stanicom. Može se desiti da se za CH izaberu i senzori koji su toliko daleko da uopšte ne mogu uspostaviti vezu direktno sa BS. Pored toga, fizička pozicija CH u klasteru značajno utiče i na potrošnju energije koju ostvaruje svaki od pripadajućih čvorova prilikom komunikacije sa njim. Ovaj problem otvorio je utrku među istraživačima za optimizaciju LEACH algoritma koja traje već više od 20 godina. Predloženo je na hiljade modifikacija koje koriste različite pristupe kako bi što bliže prišle željenom rezultatu [7-10].

Neki od hijerarhijskih algoritma koriste i mobilne čvorove mreže na različitim nivoima. U radovima [11-13] je pokazano da mobilnost čvorova, u ulogama bazičnih senzora, vođa klastera ili sinka, značajno može doprinijeti optimizaciji problema potrošnje energije senzora na terenu. Energija koja se koristi za kretanje dobija se iz punjivih baterija ili korištenjem solarnog napajanja, čime se štede ograničeni resursi autonomnog napajanja senzorskih čvorova.

Posebno su zanimljive metode koje su inspirisane određenim pojavama u prirodi koje nazivamo biološki inspirisane metode. Neke od najpouklarnijih metoda su: genetski algoritmi (Genetic Algorithm - GA), diferencijalna evolucija (Differential Evolution - DE), optimizacija rojem čestica (Particle Swarm Optimization PSO), optimizacija kolonije mrava (Ant Colony Optimization - ACO), kukavičija pretraga (Cuckoo Search - CS), algoritam svica (Firefly Algorithm - FA), algoritam slijepog miša (Bat Algorithm - BA), optimizacija kretanja planktona (Krill Herd Algorithm - KHA), optimizacija vještačkih pčela (Artificial Bee Colony - ABC) [14] itd. Ovi algoritmi su primjenljivi na veliki broj problema jer daju mogućnost postavljanja širokog opsega za početne vrijednosti promjenljivih pa nije potrebno iskustvo pri određivanju bliskih početnih vrijednosti. Funkcija čija se optimizacija vrši ne mora biti diferencijabilna i neprekidna i nema ograničenja kada je broj promjenljivih čija se optimizacija vrši u pitanju. Algoritmi su tako struktuirani da omogućavaju jednostavne modifikacije kojima se može poboljšati efikasnost metode.

Ovdje ćemo se posebno osvrnuti na dva algoritma iz grupe bio inspirisanih metoda ACO i ABC. U socijalnim društvima, kakva grade mravi i pčele, jedinke djeluju nesebično za dobrobit čitave zajednice. Ovakav model je veoma pogodan za analogiju sa željenim ponašanjem senzora u bežičnim senzorskim mrežama. Senzorski čvorovi se ponašaju kao jedinke koje bi, djelujući sebično, rutiranje podataka vršili na način koji garantuje maksimalan

sopstveni životni vijek. Oponašanjem socijalnih insekata, ponašanje svakog od čvorova je uslovljeno opštom dobrobiti tj. produženjem životnog vijeka čitave mreže.

ACO algoritam oponaša razmjenu feromona između mravi prilikom potrage za hranom [15]. Vraćajući se sa lokacije na kojoj su pronašli hranu mravi luče hemijsku supstancu feromon. Što više mravi prođe jednom putanjom količina izlučenog feromona postaje sve veća. Pošto mravi tražeći hranu prate trag feromona, tim će biti veća i vjerovatnoća da veliki broj jedinki koriste istu putanju. Ovdje je na djelu vrsta kolektivne inteligencije. Kada ovu ideju primjenjujemo na WSN, mravi su paketi podataka koji se prenose od senzorskog čvora do bazne stanice, a feromon je podatak koji sadrži informacije neophodne za izbor optimalne putanje između čvorova. Mrave tj. pakete podataka, označavamo sa k . Svaki mrav sam za sebe traži optimalnu putanju do odredišta. Pri kretanju od ishodišta ka zajedničkoj destinaciji, svaki od mrava vodi sopstvenu listu čvorova koje je posjetio M_k . Na ovaj način se osigurava da pri daljem kretanju mrav neće ponovo proći kroz senzorski čvor koji je već posjetio u tekućoj iteraciji. Lista M_k svakog od mrava se briše na kraju svake iteracije.

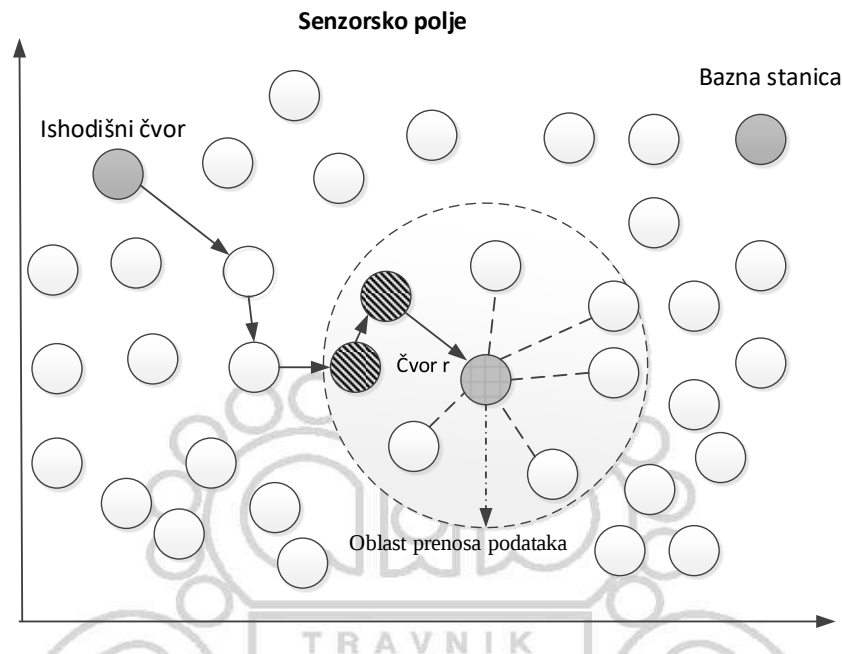
Kada se mrav k nađe u nekom čvoru r , tu se odmah računa sljedeći korak tj. određuje se senzor prema kome će se dalje proslijediti ova poruka. Sljedeći korak se određuje u skladu sa vjerovatnoćom:

$$P_k(r, s) = \begin{cases} \frac{[T(r,s)]^\mu [\delta(s)]^\vartheta}{\sum_{s \notin M_k} [T(r,s)]^\mu [\delta(s)]^\vartheta}, & s \notin M_k \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

gdje je $P_k(r,s)$ vjerovatnoća da će se mrav k u narednom koraku uputiti od čvora r ka čvoru s . T je tabela rutiranja u čvoru, gdje se čuvaju podaci o količini feromona za svaku od mogućih putanja (r,s) od čvora r do odgovarajućeg susjednog čvora s . Heuristička informacija koja se često naziva i tablica vidljivosti označena je sa δ i dobija se iz izraza:

$$\delta_{rs} = \frac{E_s}{\sum_{n \in N_i} E_n} \quad (9)$$

gdje je E_s trenutna rezidualna energija čvora s a suma u nazivniku je ukupna energija skupa susjednih čvorova. Uz pomoć težinskih parametara μ i ϑ podešava se relativni uticaj feromona u odnosu na vidljivost pošto je vjerovatnoća izbora putanje kompromis između količine feromona i vrijednosti heurističke energije.



Slika 3. Ilustracija ACO algoritma

Slika 3. ilustruje segment WSN pri izboru slijedećeg hopa u čvoru r računanjem P_k . Oblast susjedstva je prikazana isprekidanom kružnicom i samo čvorovi unutar ove oblasti mogu biti izabrani za slijedeći hop. Šrafirani čvorovi su članovi jedne M_k liste, pa oni ne mogu biti ponovo birani. Tokom jedne iteracije svaki mrav se kreće od čvora do čvora dok ne dostigne određište tj. baznu stanicu. Nakon što bazna stanica prihvati podatke šalje povratnu poruku ishodišnom čvoru čija je osnovna uloga da doprinese optimizaciji daljeg rutiranja u mreži.

U primjeni ACO algoritma na WSN u prvoj iteraciji se uzima da su svi elementi tabele T recipročne vrijednosti udaljenosti od čvora r do čvora s , $Trs=1/drs$, pa najkraće putanje imaju najveću gustinu feromona, u svim ostalim iteracijama tabela se ažurira prema izrazu:

$$T_k(r, s) = (1 - \rho)T_k(r, s) + \Delta T_k \quad (10)$$

Gdje je $(1-\rho)$ koeficijent koji predstavlja uticaj isparavanja feromona u prethodnoj iteraciji i uvodi se u formulu kako bi se izbjeglo nepotrebno gomilanje feromona na putanjama koje se biraju sa malim vjerovatnoćama, a ΔT_k je količina feromona koju mrav k izluči na putanji između čvorova r i s .

Pošto se mrav k (upućen iz bazne stanice prema čvoru pošiljaocu) ponovo vrati u ishodišni čvor, završava se i jedan ciklus potage za hranom ovog čvora. Nakon što se svi mravi pokrenuti u tekućoj iteraciji vrate u svoja odredišta može se početi sa novom iteracijom. Već poslije par iteracija, svaki od čvorova će pronaći susjedni čvor optimalan za prosljeđivanje, a po svim izabranim trasama kretaće se sve više mrava. Putanje koje su izabrane na ovaj način nisu globalno optimalne, a vremenom će se potrošnja energije senzorskih čvorova koji se nalaze na ovim putanjama povećavati neuravnoteženo u odnosu na ostale čvorove, sve dok se ti senzori potpuno ne isključe. Zbog toga je potrebno pažljivo izabrati način za ažuriranje feromona na putanjama i težiti što boljem kompromisu između potrošnje energije i količine feromona.

Količina izlučenog feromona zavisi od dužine puta koju je prešao mrav tokom direktne putanje i izračunava se prema jednačini:

$$\Delta T_k = \frac{1}{N - Fd_k} \quad (11)$$

Svaki put kad mrav u povratku na ishodište stigne u neki čvor r , ažurira se tabela usmjeravanja. Pri tome, količina feromona na trasama između čvorova isparava, pa je potrebno ažurirati stanje, oduzeti količinu feromona koja je u međuvremenu isparila i dodati novu količinu feromona koju ostavlja luči mrav u povratku.

ABC algoritam oponaša ponašanje pčela prilikom potrage za hranom. Kolonija vještačkih pčela dijelimo u tri grupe sa podijeljenim ulogama: radnici, posmatrači i izviđači. Pola članova kolonije su radnici (employed), a druga polovina su posmatrači (onlookers). Broj izvora hrane je jednak broju radnika. Radnik čiji izvor hrane se odbacuje kao izbor dobija ulogu izviđača. Moguće lokacije hrane su moguća rješenja optimizacionog problema. Kvalitet (fitness) svakog od rješenja je analogija količine i kvaliteta nektara u cvijetu. Posmatrač prati dešavanja na plesnom podijumu kako bi donio odluku o izboru izvora hrane, radnik odlazi do izvora hrane koje je posjetio ranije, izviđač izvršava slučajno pretraživanje. Svaki od čvorova WSN predstavlja mogući izvor hrane pa je broj čvorova u mreži jednak broju izvora hrane tj. broju rješenja problema. Problem se dakle svodi na određivanje narednog hopa prilikom prosljeđivanja poruke od senzora do bazne stanice. Svako rješenje je u stvari D-dimenzionalni vektor gdje je D broj optimizacionih parametara. Nakon inicijalne raspodjele čvorova u polju radnici počinju pretraživati susjedne izvore hrane poredeći njihovu količinu nektara. Ako nova lokacija ima više nektara od originalne, pčela pamti novu lokaciju, a zaboravlja originalnu. Pozicija novog kandidata se predstavlja izrazom:

$$v_{i,j} = x_{i,j} + \varphi_{i,j}(x_{i,j} - x_{k,j}) \quad (12)$$

Gdje indeksi $i, k \in \{1, 2, \dots, SN\}$ odgovaraju pozicijama izvora hrane (čvorova u mreži) a indeks $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ odgovarajućem optimizacionom parametru po kom se vrši pretraživanje. Indeksi k i j se slučajno biraju ali mora biti $k \neq i$. $\varphi_{i,j}$ je slučajni broj koji se bira iz skupa $[-1, 1]$. Nakon što radnik završi proces pretraživanja on kroz ples dijeli informaciju o nektaru sa posmatračima na plesnom podijumu. Posmatrači biraju izvor hrane na osnovu vjerovatnoće p_i povezane sa tim izvorom:

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{j=1}^{SN} fit_j} \quad (13)$$

Gdje je fit_i kvalitet (fitness) rješenja procijenjen od strane radnika. Kada se izabere izvor nektara, posmatrač koristi izraz (13) za traženje nove hrane. Kada se pojavi lokacija sa većom količinom nektara prethodna se odbacuje, a pamti se nova.

Najvažniji korak je izbor fitness funkcije koja će na najbolji način uobziriti specifičnosti WSN. Senzori isporučuju očitane podatke ka baznoj stanici periodično u rundama. U svakoj rundi se bira putanja u skladu sa izabranim kriterijumima. Na taj način se čitava putanja od ishodišnog čvora do bazne stanice formira iz dva koraka: od ishodišnog čvora do relejnog čvora i od relejnog čvora do bazne stanice. Fitness funkcija treba da uobziri slijedeće elemente:

- Preostala energija kandidata za relejni čvor.
- Udaljenost kandidata za relejni čvor od bazne stanice.
- Udaljenost od ishodišnog čvora do kandidata za relejni čvor.

Umjesto da se posebno optimizuje svaki od pomenutih parametara bolje je izvršiti optimizaciju kombinacije ovih funkcija [16]. Fitness funkcija se stoga računa prema izrazu (14), a traži se njen maksimum.

$$f(s) = \alpha E_{remc} + \beta \frac{1}{d_{c,s}} + \gamma \frac{1}{d_{i,c}} \quad (14)$$

Gdje je E_{remc} preostala energija kandidata za relejni čvor s , $d_{c,s}$ je udaljenost kandidata s od bazne stanice a $d_{i,c}$ je udaljenost od ishodišnog čvora do kandidata za relejni čvor. α , β i γ su odgovarajući koeficijenti kroz koje se uzima u obzir značaj pojedinih parametara na izbor fitness funkcije gdje važi $\alpha + \beta + \gamma = 1$. Vrijednosti ovih koeficijenata se određuju intuitivno na bazi poznavanja uticaja odgovarajućih parametara.

4. Zaključak

Optimizacioni problemi u WSN povezani sa planiranjem, projektovanjem, izgradnjom i eksploatacijom bežičnih senzorskih mreža moraju uzeti u obzir veliki broj kriterijuma pa donosilac odluke je suočen sa problemom pravljenja kompromisa među često suprotstavljenim zahtjevima. Maksimizacija pokrivenosti terena je u direktnom konfliktu sa nivoom grešaka prenosa, kašnjenjem podataka, potrošnjom energije i ukupnom cijenom mreže. S druge strane neki od ciljeva optimizacije podržavaju neke druge kao npr. maksimizacija trajanja baterije podržava maksimizaciju životnog vijeka mreže i minimizaciju ukupne cijene sistema. Zavisno od tipa i namjene mreže te aplikacija koje se u mreži implementiraju, postoji veliki broj metoda optimizacije koje se fleksibilno mogu primjenjivati u cilju dobijanja specifičnih rješenja. Bez obzira koja od metoda se koristi i koji problem se rješava, opšti cilj je da metoda zahtijeva malo memorije i procesorske snage te da daje prihvatljiva rješenja. U ovom radu su opisana dva najveća problema u WSN, pokrivenost terena i rutiranje podataka. Opisane su ideje na kojima se baziraju moguća rješenja i predstavljeni neki od popularnih algoritama. Posebna pažnja je data bioinspirisanim algoritmima i predočene su njihove prednosti. Autori će u svom daljem radu istraživati mogućnosti za unapređenje nekih od algoritama ove vrste i primjeniti ih na konkretne situacije.

LITERATURA

- [1] Ashlock, D. (2005). “Evolutionary Computation for Modeling and Optimization”, Springer Science, Business Media Inc., pp. 257
- [2] Efrat, A. et al. (2005). “Approximation algorithms for two optimal location problems in sensor networks”, Broadband Networks, 1:714–723
- [3] Gogu, N.D. et al. (2011). “Optimization Problems in Wireless Sensor Networks”, International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems, Seoul, 302-309
- [4] Hossain, A. et al. (2008). "Sensing models and its impact on network coverage in wireless sensor network", Proc. IEEE Region 10 3rd Int. Conf. Ind. Inf. Syst., 1-5

- [5] Popovic, G., Djukanovic, G., (2016). “Cluster formation techniques in hierarchical routing protocols for Wireless Sensor Networks”, Journal of Information Technology and applications (JITA) 2016, 1:5-11
- [6] Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A., (2000). “Energy Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks”, IEEE Computer Society 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '00) vol. 8; New York, NY, USA: IEEE. pp. 1-10
- [7] Popovic, G., Djukanovic, G., (2016). “Cluster formation techniques in hierarchical routing protocols for Wireless Sensor Networks”, Journal of Information Technology and Applications JITA, 2016., 1:35-41
- [8] Dembla, D., Shivam, H. (2013). “Analysis and Implementation of Improved - LEACH protocol for Wireless Sensor Network (I-LEACH)”, In: IJCSC,IJ, Vol. 4, No. 2, pp.8-12
- [9] Jiman, H., Joongjin, K., (2011). “T-LEACH The method of threshold-based cluster head replacement for wireless sensor networks”, Springer Inf Syst Front
- [10] Junping, H., et al. (2008). “A time-based cluster-head selection algorithm for LEACH”, Proceedings of the IEEE International Symposium on Computers and Communications (ISCC), 1172-1176.
- [11] Popovic, G., et al. (2018)., “Cluster Head Relocation Based on Selfish Herd Hypothesis for Prolonging the Life Span of Wireless Sensor Networks”, Electronics 2018, Vol.7, Issue 12, 403
- [12] Djukanovic, G., Popovic, G., (2017). “Solar-Inducted Cluster Head Relocation Algorithm”, International Journal of Computer and Information Engineering, Vol:11, No:6, 816-821
- [13] Đukanović, G., Popović, G., (2018). “Ušteda energije u WSN upotrebom UAV i dinamičke arhitekture mreže”, XVII međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2018, Vol.17
- [14] Wagner, M., (2013). “Theory and Applications of Bio-inspired Algorithms”, PhD Thesis, The University of Adelaide, Adelaide, South Australia
- [15] Đukanović, G., Popović, G., (2020). “O pravilima ažuriranja feromona kod ACO algoritama u jezgru IoT”, 12th International Scientific Congress – ITeO (Informational Technology for e-Education) Banja Luka
- [16] Elavarasan, R., Chitra, K. (2020). “An efficient fuzziness based contiguous node refining scheme with cross-layer routing path in WSN,” Peer-to-Peer Networking and Applications, vol. 13, no. 6, 2099–2111