

Ušteda energije u WSN upotrebom UAV i dinamičke arhitekture mreže

Goran Đukanović, Goran Popović
Mtel, a.d. Banja Luka
goran.djukanovic@mtel.ba, goran.popovic@mtel.ba

Sažetak—Ušteda energije senzorskih čvorova u bežičnim senzorskim mrežama je problem kojim se istraživači intenzivno bave duže od dvije decenije. Senzorski čvorovi se napajaju baterijama ograničenog kapaciteta koje najveći dio energije troše na komunikaciju sa ostatkom mreže. Stoga je potrebno i arhitekturu mreže prilagoditi zahtjevu za uštedom energije u ovom dijelu. U ovom radu je predložena upotreba bespilotnih letjelica za akviziciju očitanih podataka sa terena i praćenje tih podataka do krajnjeg odredišta, gdje će se vršiti njihova obrada. Predložen je algoritam i izvršeno poređenje rezultata dobijenih simulacijom sa rezultatima nekoliko ranije predloženih rješenja u statičkim i mobilnim bežičnim senzorskim mrežama.

Gljučne riječi—bežične senzorske mreže; senzor; UAV; WSN;

I. UVOD

Ušteda energije senzorskih čvorova u bežičnim senzorskim mrežama WSN (Wireless Sensor Networks) je osnovni zadatak koji se postavlja prilikom projektovanja ovih mreža. Senzorski čvorovi raspolažu konačnom energijom, pošto se napajaju iz baterija koje obično nije moguće zamijeniti na terenu, zbog nepristupačnosti, zagađenja, elementarnih nepogoda, ratnih dejstava i slično. Nakon što se raspoloživa energija baterije potroši, senzor gubi svoju funkciju pa dio mreže prestaje sa radom. Senzori troše najveći dio svoje energije na komunikaciju sa okruženjem pa je i uštedu energije prije svega potrebno izvršiti u različitim fazama ove aktivnosti. Savremene bežične senzorske mreže organizovane su gotovo isključivo u hijerarhijskoj formi [1], [2], gdje su senzori grupisani u klustere, a u svakom klasteru se bira po jedan vođa grupe CH (Cluster Head), koji je isključivo zadužen za komunikaciju sa baznom stanicom (BS). Ovaj dio mrežne arhitekture je najveći potrošač energije. U navedenim radovima prikazani su različiti pristupi rješavanju ovog problema, gdje se odgovarajućim modifikacijama težilo postizanju optimalnog rješenja i maksimalnoj uštedi energije u ovom segmentu komunikacije pa tako i u cijeloj mreži. Većina ovih rješenja polazi od pretpostavke da je CH statički element koji svoju ulogu vrši stalno ili periodično te na sebe preuzima ulogu najvećeg potrošača energije u čitavoj mreži. Upotreba mobilnih elemenata na različitim hijerarhijskim nivoima bežičnih senzorskih mreža pruža čitav niz novih mogućnosti. Mobilni elementi mogu se kretati po zemlji kao UGV (Unmanned Ground Vehicle), kroz vodu kao AUV (Autonomous Underwater Vehicle) ili kroz vazduh kao bespilotne letjelice ili UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Podvodni mobilni elementi imaju ograničeno područje primjene pa se ovdje njima nećemo baviti. Zemaljski pokretni elementi zbog konfiguracije terena ne mogu uvijek izvršiti sva neophodna kretanja pa se može

desiti da akvizicija podataka iz određenih dijelova mreže izostane. Pored toga, ovi uređaji imaju i velika kašnjenja zbog male brzine kretanja koja je zavisna od uslova na terenu. Sa druge strane UAV se kreću u prostoru trodimenzionalno i nemaju ograničenja koja imaju zemaljski pokretni elementi. Problem potrošnje baterija potrebnih za pogon UAV prevazilazi se tako što se element vraća na odredište ili odlazi na narednu stanicu, na kojoj njegove baterije mogu da se zamijene ili dopune.

UAV se u bežičnoj senzorskoj mreži može koristiti na različitim nivoima mreže [3], [4]. Na najnižem nivou UAV mogu imati ulogu osnovnih mobilnih senzorskih čvorova, čiji je primarni zadatak očitavanje različitih podataka sa terena i njihovo dostavljanje na mjesto obrade. Upotreba UAV na ovom nivou znatno širi senzorsko polje izvan područja osluškivanog statičkim sensorima. Ako se UAVs koriste na drugom nivou bežične senzorske mreže, sva komunikacija mreže sa BS se vrši preko UAV. Očitavanja na zemlji i dalje vrše statički senzori raspoređeni i grupisani na slučajan način. Upotreba UAV na trećem nivou bežične senzorske mreže podrazumijeva da se u mreži koristi jedan UAV koji ima ulogu BS, prikuplja sve podatke sa terena i ostvaruje direktnu komunikaciju sa centrom za obradu podataka.

Najjednostavniji način dostave podataka od senzora do mjesta za obradu podataka je direktna komunikacija svakog od senzora sa BS [5]. Energija koja se troši u svakom senzorskom čvoru prilikom slanja podataka raste sa kvadratom udaljenosti od bazne stanice [2]. BS je najčešće locirana van prostora senzorskog polja, pa je energija koja se potroši za komunikaciju neopravdano velika. Hijerarhijskom organizacijom mreže najveći teret potrošnje energije pada na čvorove koji imaju ulogu CH. Ova uloga se mijenja kroz definisanje runde, gdje svaki od čvorova dođe na red da u nekoj od rundi bude CH bez obzira na svoju poziciju unutar klastera. LEACH algoritam je najpopularniji iz ove grupe algoritama [6] a postoji na stotine modifikacija osnovnog algoritma koje podrazumijevaju statičnost senzora [1]. U svim ovim algoritmima ulogu CH mogu imati i senzori koji su dosta udaljeni od BS kojoj trebaju dostaviti prikupljene podatke. Ovi CH troše izuzetno veliku energiju za komunikaciju sa baznom stanicom.

U radu [7] predložena je jedna varijanta upotrebe UGV kroz algoritam nomadskog CH u senzorskom polju, koji uvodi kontrolisanu mobilnost čvorova koji imaju ulogu CH, u cilju zauzimanja optimalne pozicije unutar klastera u odnosu na ostale članove polazeći od Hamiltonove hipoteze. Koristi se solarno napajanje senzora, isključivo za pomjeranje senzora,

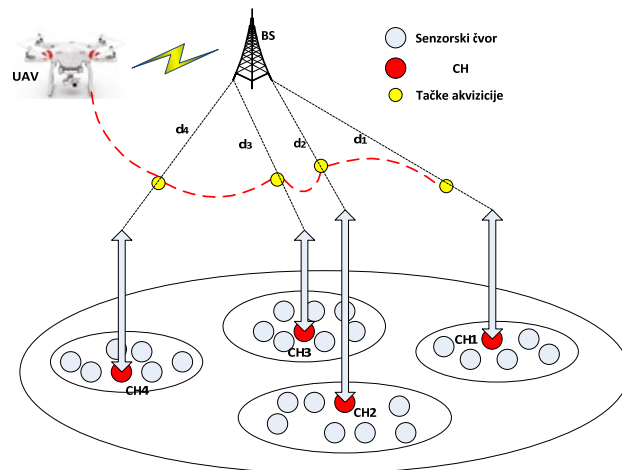
koji ima ulogu CH, prema centru masa klastera. Nakon što CH primi poruke od svih senzorskih čvorova u klasteru on se vraća na svoju inicijalnu poziciju iz koje prosleđuje podatke ka BS. Upotreba UAV u bežičnoj senzorskoj mreži pruža dosta više fleksibilnosti [4]. Istraživanja u ovoj oblasti svode se uglavom na problem rutiranja. U rješavanju problema rutiranja u [8], autori su postavili uslov da svaki senzorski čvor mora biti posjećen na takav način da je utrošeno vrijeme za ovaj zadatak minimalno, što je varijacija problema k-trgovačkog putnika. U radu [9] autori se bave vremenski ograničenim raspoređivanjem mobilnih elemenata, te opisuju problem posjeta UAV svakom senzorskom čvoru u onom vremenskom intervalu u kojem je senzor aktivan.

Osnovni okvir za prikupljanje podataka iz vazduha predstavljen je u [10]. Ovaj okvir uobziruje pet komponenata: razvoj mreže, pozicije čvorova, pretraga za tačkom usidranja, brzo planiranje putanje za UAV, te prikupljanje podataka iz mreže. Autori u [11] posmatraju klasterizacijski pristup u statičnoj mreži i planiranje rute za mobilni sink kao jedan zajednički problem, sa ciljem skraćivanja rute puta mobilnog sinka uz ograničenja: maksimalni broj hopova, ograničenja rute puta, te ograničenje izbjegavanja petlje. U radu [12], autori koriste Pareto model da bi uspostavili odnos između energije potrošene u prenosu i energije potrebne za let UAV, što zavisi od putanje. Što UAV leti bliže čvoru, manje je energije potrebno za transmisiju, ali može se desiti da treba više energije za propulziju da bi se ostvarila ovakva putanja.

U ovom radu prikazana je ideja pozicioniranja UAV između drugog (CH) i trećeg sloja (BS) hijerarhijske WSN. Bespilotna letjelica se kreće po senzorskom polju obilazeći periodično sve senzore koji trenutno vrše ulogu CH. Mobilnost UAV omogućava fleksibilan prilaz senzorskom čvoru na veoma kratkom rastojanju. Na tom putu UAV vrši akviziciju svih podataka koje su CH prikupili u međuvremenu i prikupljene podatke šalje ka baznoj stanici. Izvršena je simulacija algoritma za različite udaljenosti UAV od CH u trenutku akvizicije podataka, te je izvršeno poređenje dobijenih rezultata sa rezultatima dobijenim u nekim drugim algoritmima koji su tipični predstavnici različitih pristupa u rješavanju ovog problema: direktna komunikacija sa BS, hijerarhijska struktura sa statičkim čvorovima i hijerarhijska struktura sa ograničenom mobilnošću senzora na tlu. Pri komunikaciji senzora i CH sa drugim elementima, energija im se umanjuje, zavisno od udaljenosti i broja prenesenih bita. Pri tome je korišćen radio model, opisan u [1].

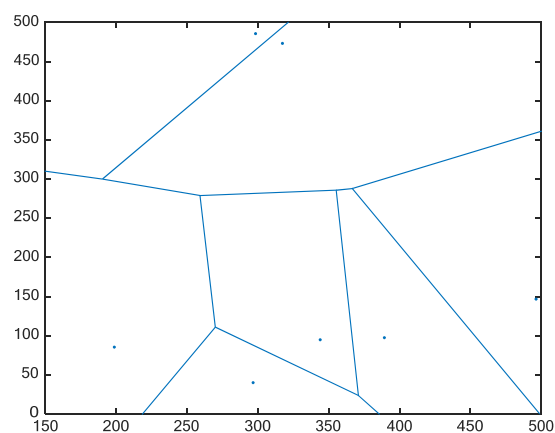
II. UAV KAO MOBILNI ELEMENT ZA AKVIZICIJU PODATAKA

U ovom radu predlaže se korišćenje UAV kao relejnog elementa između drugog i trećeg nivoa hijerarhijski organizovane bežične senzorske mreže. Predloženi algoritam je simuliran u MATLAB-u i izvršeno je poređenje njegova tri modaliteta sa direktnom vezom senzora sa BS, LEACH algoritmom i algoritmom sa nomadskim CH u senzorskom polju. Rezultati dobijeni simulacijom za sva četiri algoritma prikazani su zajedno na graficima. Posmatra se senzorsko polje 500 m x 500 m sa istim uniformnim rasporedom 100 čvorova u polju i istim početnim energijama čvorova (2J). Bazna stanica se nalazi van senzorskog polja na poziciji [1000, 1000] m.



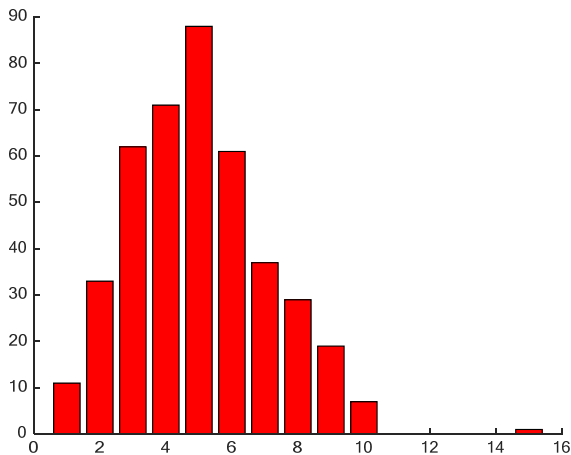
Slika 1. Kretanje UAV u senzorskom polju

Na Sl.1 ilustrovano je kretanje UAV u senzorskom polju. UAV se kreće tako da vodi klastera CHi priđe na udaljenost x_{di} , gdje je d_i udaljenost između odgovarajućeg CH i bazne stanice a x je dio ove razdaljine na kojoj je UAV pozicioniran prilikom akvizicije podataka gledajući od CHi (i predstavlja broj klastera u rundi, $i=1, 2, \dots, n$). U simulaciji su testirane tri vrijednosti za x i to: 0.75, 0.5 i 0.25. Na graficima su odgovarajući rezultati prikazani kao UAV₁, UAV₂ i UAV₃ respektivno. U svakoj tački akvizicije UAV pokupi sve podatke od odgovarajućeg CH koje dalje prosleđuje ka BS. Na taj način potrošnja energije na komunikaciju senzorskih čvorova sa BS ne pada na teret baterijskog napajanja samih senzora već na dopunjivo napajanje bespilotne letjelice. U ovom radu nije vršena analiza optimalne putanje UAV niti se vodi računa o potrošnji energije samog UAV što je posebna tema. Na Sl.2 prikazan je Voronoi dijagram za posmatrano senzorsko polje u jednoj od rundi. Dijagram predstavlja pozicije vođa klastera kao i granice odgovarajućih klastera. Očigledno je da CH nisu optimalno pozicionirani u odnosu na položaj ostalih čvorova u klasteru ali i na položaj BS. Komunikacija vođa klastera direktno sa BS imala bi za posljedicu značajnu potrošnju energije senzorskog čvora koji vrši ulogu CH.



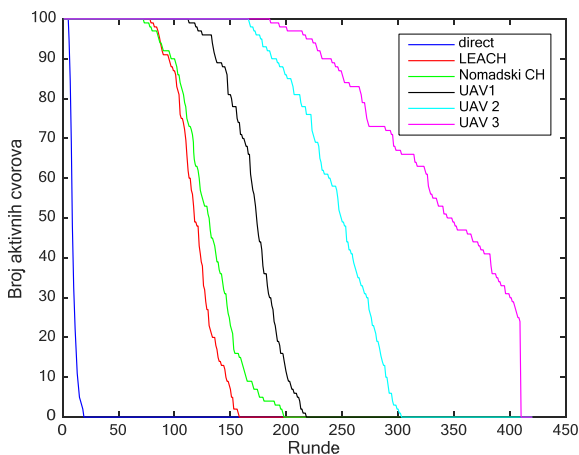
Slika 2. Voronoi dijagram senzorskog polja

Na Sl. 3 je prikazana učestanost pojavljivanja određenog broja CH u senzorskoj mreži u toku njenog životnog vijeka. Uočljivo je da je mreža u značajnom broju rundi imala 3 do 6 CH što je u skladu sa postavljenim uslovima. Dešavalo se i da mreža ima samo jedan klaster ali i čitavih 15 klastera, što je posljedica slučajnog načina u izboru CH i formiranju klastera [6].



Slika 3. Učestanost pojavljivanja CH u toku životnog vijeka mreže

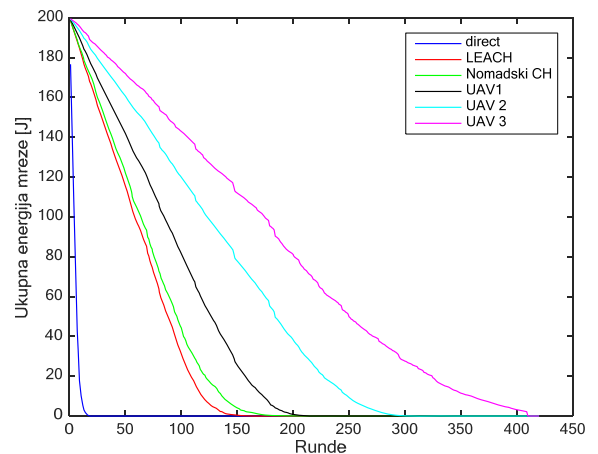
Na Sl. 4 predstavljeno je poređenje rezultata simulacije za četiri posmatrana algoritma gdje je predloženi algoritam simuliran na tri različite udaljenosti UAV od CH. Poređenje je izvršeno po broju senzorskih čvorova koji su još uvijek aktivni u odnosu na broj proteklih rundi. Trošeci raspoloživu energiju čvorovi se isključuju jedan po jedan. Nakon određenog broja rundi više neće biti aktivnih senzora u mreži. Simulacija se izvršava sve dok postoji barem jedan aktivan čvor.



Slika 4. Broj aktivnih čvorova u odnosu na broj završenih rundi

Jasno je vidljiva velika prednost korišćenja UAV u akviziciji podataka sa terena u odnosu na ostale algoritme. Ova prednost je sve izraženija što se UAV više približava vođama grupe prilikom akvizicije podataka. U trenutku kada mreža sa nomadskim CH, koja ima izrazito bolje performanse od klasičnog LEACH-a, ostane bez aktivnih čvorova, broj

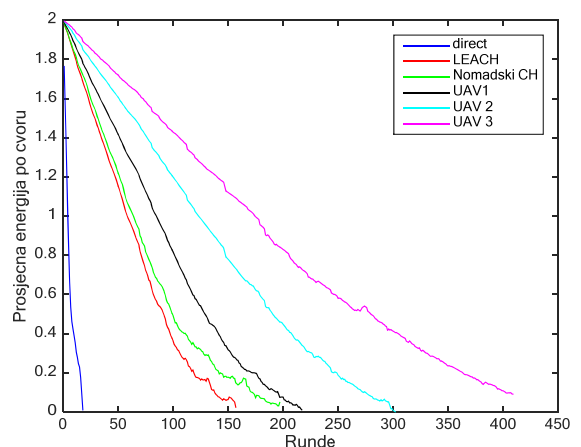
aktivnih čvorova u mreži sa UAV, koji prilaze vođama grupe na udaljenost $0,25di$ prilikom akvizicije podataka, još uvijek ima sve senzorske čvorove u aktivnom stanju.



Slika 5. Ukupna energija mreže u odnosu na broj završenih rundi

Na Sl.5 su upoređene preostale ukupne energije bežične senzorske mreže za algoritme koje posmatramo. Kao što se moglo i pretpostaviti u slučaju direktne komunikacije senzorskih čvorova sa BS ukupna energija mreže vrlo brzo počinje naglo da pada. Prvo se isključuju senzori koji su najdalji od bazne stanice a zatim ostali senzori sve bliži i bliži baznoj stanici, dok se na kraju ne isključe i oni koji su joj najbliži. Poređenjem mreže sa UAV na različitim udaljenostima od CH prilikom akvizicije podataka sa ostalim algoritmima i na ovoj slici je uočljiva značajna prednost korišćenja UAV u ovom dijelu mreže. Uočava se takođe da se povećanjem broja rundi, razlika ukupnih energija sve više povećava u korist mreže sa UAV i to sve više što je UAV bliži vođama grupe u trenutku akvizicije podataka.

Na Sl. 6 je prikazana prosječna energija po senzorskom čvoru u odnosu broj završenih rundi. Sve pomenute prednosti korišćenja UAV između drugog i trećeg nivoa hijerarhijske bežične pristupne mreže vidljive su i na ovoj slici.



Slika 6. Prosječna energija po čvoru u odnosu na broj završenih rundi

III. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana ideja korišćenja bespilotne letjelice UAV kao mobilnog elementa u bežičnoj senzorskoj mreži, čija je uloga da svojim pozicioniranjem između drugog i trećeg nivoa u hijerarhijski organizovanoj WSN pride na odgovarajuću udaljenost do svakog od vođa grupe CH, izvrši akviziciju svih podataka koje je CH dobio od pripadajućih senzorskih čvorova a potom ove podatke isporuči do bazne stanice tj. do mjesta gdje će se vršiti njihova obrada. Na ovaj način rasterećuje se energetski najzahtjevnija komunikaciona ruta osnovnog LEACH algoritma i svih njegovih modifikacija sa statičkim senzorskim čvorovima. Energija koju svaki od senzora troši prilikom komunikacije raste sa kvadratom udaljenosti do prijemnika. Najduža komunikaciona ruta je upravo ona između vođa grupe i bazne stanice. Ovaj algoritam prebacuje energetsko opterećenje ovog segmenta veze na UAV. UAV kao mobilni element periodično dolazi do lokacije gdje se njegovo napajanje mijenja ili dopunjuje pa potrošnja energije koju on ima na održavanje komunikacije nije kritičan resurs. Algoritam je simuliran u MATLAB-u. Rezultati koji su dobijeni simulacijom su upoređeni sa direktnom vezom senzorskih čvorova i BS, osnovnom verzijom LEACH algoritma i algoritmom sa nomadskim CH. Predloženi algoritam je simuliran u tri varijante zavisno od udaljenosti na koju UAV prilazi vođama grupa prilikom akvizicije podataka. Dobijeni rezultati pokazuju izrazito poboljšanje koje se postiže njegovim korišćenjem u pogledu potrošnje energije u cijeloj mreži pa tako i produženju životnog vijeka mreže. U nekim primjenama nadzora sa rjeđim izvještavanjima, gdje runda može trajati jedan dan, ostvareni su dobitci u životu mreže od preko 200 dana, u odnosu na nomadski CH algoritam. Dobitak algoritma raste sa rastom terena s kojeg se podaci očitavaju, sa povećanjem dužine trajanja runde i sa približavanjem UAV vođi klastera (poboljšanja su veća što se UAV više približava vođama grupa prilikom akvizicije podataka). Analiza dobitka zavisno od različitih odnosa ovih parametara i izabrane putanje, predmet je budućih istraživanja.

LITERATURA

- [1] G. Popovic, G. Djukanovic, "Cluster formation techniques in hierarchical routing protocols for Wireless Sensor Networks," *Journal of Information Technology and applications (JITA)* 2016; 1:5-11.
- [2] G. Đukanović, G. Popović, "Tehnike za klasterizaciju u bežičnim senzorskim mrežama," *ITeO* 2016. Zbornik radova, Banja Luka, Septembar 2016.
- [3] G. Popovic, G. Djukanovic, "Unmanned Aerial Vehicle Based Wireless Sensor Networks in Military Applications," *I International Conference*

on Management, Engineering and Environment ICMNEE 2017. Belgrade, September 2017; 1:78-89.

- [4] G. Đukanović, G. Popović, "Mogućnosti primjene UAV u bežičnim senzorskim mrežama," *ITeO* 2017, Zbornik radova, Banja Luka, Septembar 2017.
- [5] T. Meng, V. Rodoplu, "Distributed network protocols for wireless communication," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'98)*, vol. 4, pp. 600-603.
- [6] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, "Energy Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," *IEEE Computer Society 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '00)* vol. 8; 4-7 January 2000; Maui, Hawaii, USA. New York, NY, USA: IEEE. pp. 1-10.
- [7] G. Popović, G. Đukanović, "Produženje životnog vijeka bežičnih senzorskih mreža, zasnovano na Hamiltonovoj hipotezi," *XVI međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA* 2017, Vol.16, pp 249-252
- [8] G. Bhadauria, D. Isler, "Data gathering tours for mobile robots. In *Intelligent Robots and Systems*," *IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference*, pp 3868-3873.
- [9] K. Almi'ani, A. Viglas, L. Libman, "Mobile element path planning for time-constrained data gathering in wireless sensor networks," In *Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, 2010 24th IEEE International Conference on, pp 843-850.
- [10] W. Chengliang, F. Ma, Y. Junhui, D. Debraj, and K. Sajal Das, "Efficient Aerial Data Collection with UAV in Large-Scale Wireless Sensor Networks," *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Distributed Sensor Networks* Volume 2015, Article ID 286080.
- [11] J. Tang, Y. Wu, Z. Zhu, D. Wang and X. Feng, "An Adaptive Clustering Approach Based on Minimum Travel Route Planning for Wireless Sensor Networks with a Mobile Sink," *Sensors* 2017, 17, 964.
- [12] D. Yang, Q. Wu, Y. Zeng, and R. Zhang, "Energy Trade-off in Ground-to-UAV Communication via Trajectory Design," *arXiv:1709.02975 [cs.IT]*, 09.09.2017.

ABSTRACT

The energy saving of sensor nodes in wireless sensor networks is a problem that researchers have been intensively dealing with, for more than two decades. Sensor nodes are powered by limited capacity batteries that spend most of their energy on communication with the rest of the network. Therefore, it is necessary to adapt the network architecture to the energy saving request. In this paper, the use of unmanned aerial vehicles for the acquisition of sensor data from the terrain and for the transfer of these data to the final destination where they will be processed, is proposed. An algorithm is proposed, and a comparison of the results obtained by simulation with the results of several earlier proposed solutions in static and mobile wireless sensor networks were made.

USING UAV AND DYNAMIC NETWORK ARCHITECTURE FOR ENERGY SAVING IN WSN

Goran Djukanovic, Goran Popovic