

AUKCIJSKI AGREGACIONI PROTOKOLI BAZIRANI NA AGENTIMA U MULTI-HOP BEŽIČNIM ROBOTSKIM MREŽAMA

AGENT BASED AUCTION AGGREGATION PROTOCOLS IN MULTI-HOP WIRELESS ROBOT NETWORKS

Bojan Gašparović, Ivan Mezei, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Sadržaj - U ovom radu predložena je grupa aukcijskih agregacionih protokola baziranih na agentima za određivanje najboljeg robota za određeni zadatak u multi-hop bežičnim robotskim mrežama. Prostor je podeljen na sektore kojima je dodeljen jedan fiksno pozicionirani agent koji ima informacije o svim robotima u tom sektoru. Informacije o događaju, na koji neki od robota treba da reaguje, prima jedan od robota i prosleđuje ih agentu u svom sektoru. Taj agent organizuje aukciju slanjem upita ostalim susednim agentima tražeći robota sa najmanjim troškovima. Performanse ovih protokola pokazane su simulacijama.

Abstract - This article proposes several agent based auction aggregation protocols for task assignment in multi-hop wireless robot networks. Whole area is divided into sectors and one agent with fixed position is assigned to each sector. That agent has all information about robots in its sector. Event information is reported to one of the robots and is forwarded to his respective agent. That agent triggers auction searching for robot with lowest cost. Performances of protocols are shown by simulation results.

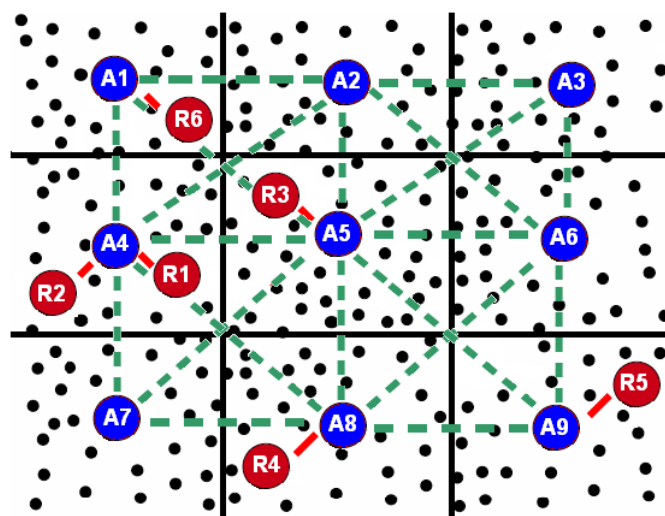
1. UVOD

Multi robotski sistemi (eng. *multi robot systems*, MRS) su detaljno proučeni u [1] i glavna tematika većine radova je koordinacija i kooperacija robota. Sam termin *robotske mreže* pojavio se kako bi se naglasila međusobna povezanost robota bežičnim putem formiranjem komunikacione mreže. Mogućnosti primene ovakvih mreža su ogromne i one se npr. mogu koristiti za istraživanje nepoznatih terena, njihovu pretragu ili mapiranje, prevenciju i sanaciju požara pa čak i za igru (npr. robotsku verziju fudbala).

Topologija mreže i osobine pojedinačnih robota diktiraju smer razvoja ove oblasti. Obzirom da je u pitanju bežično povezivanje, svi roboti dele medijum za razmenu poruka pa to navodi na potrebu minimizacije njihovog broja. Takođe, roboti imaju nezavisni i ograničen izvor napajanja pa je potrebno minimizovati trošak energije na komunikaciju. Dodatni bitan faktor jeste i kašnjenje koje razmena velikog broja poruka unosi u sistem. Stoga je jedan od osnovnih zadataka pri projektovanju ovakvih mreža optimizacija razmene poruka. Rezultati simulacija navedeni dalje u radu pokazuju opravdanost uvođenja agenata koji, iako zahtevaju dodatne resurse, zapravo znatno smanjuju broj poruka razmenjenih u mreži. Simulacije su vršene na posebnoj vrsti multi robotske mreže i to u bežičnoj senzorskoj i robotskoj mreži (eng. *wireless sensor and robot network*, WSRN), kao što je prikazano na Sl. 1.

U ovom radu je razmotrena samo najjednostavnija situacija u kojoj je informacija o događaju dojavljena jednom robotu (putem senzorskog dela mreže) i gde se očekuje reakcija samo jednog robota. Osnovna ideja je da robot

kojem je dojavljena informacija sprovede aukciju [2] i pronade najboljeg robota kao odgovor na događaj. Ta ideja je potom unapređena uvođenjem agenata čija pozicija je fiksna. Kompletan nadgledani prostor je podeljen u sektore i svakom sektoru je dodeljen po jedan agent. On u svakom trenutku poseduje sve potrebne podatke o robotima u svom sektoru (tačan položaj, količinu energije, trenutni status odnosno da li je robot zauzet ili ne...) i u dometu je svih agenata sa kojima se njegov sektor graniči. Po prijemu informacija o događaju od odgovarajućeg robota iz svog sektora, agent potom započinje aukciju sa ciljem da pronade najboljeg robota za pomenuti posao. Završetak ovog procesa je dodela posla najboljem raspoloživom robotu.



Sl.1 - Prikaz nadgledanog terena

Većina postojećih rešenja u ovoj oblasti je centralizovanog tipa [2]. Jedan robot ili jedan agent prikuplja sve informacije od ostalih robota/agenata i donosi odluku. Prednost ovakvog rešenja je što se, teoretski, uvek može doći do optimalnog rešenja u postojećem rasporedu robota. Sa druge strane, centralizovani sistemi zahtevaju mnogo resursa, veliki broj razmenjenih poruka, karakteriše ih manjak skalabilnosti i unose veliko kašnjenje. Takođe, jedna od velikih mana je niska tolerancija na grešku. Ukoliko baš taj robot/agent koji donosi odluku ne radi pravilno iz bilo kog razloga, rezultat rada celog sistema je loš.

Lokalizovana rešenja za ovakve sisteme prenose odgovornost sa jednog robota na sve njih podjednako. Roboti formiraju *multi-hop* mrežu i pri odlučivanju poseduju samo lokalne informacije na *k-hop* udaljenosti od njih. Podešavanjem parametra *k* mogu se postići optimalni rezultati i za slučaj da nisu svi roboti uključeni u proces odlučivanja. Dobra skalabilnost i visoka tolerancija na grešku su prednosti ovog tipa rešenja. On je implementiran u osnovnom protokolu predviđenom za *multi-hop* mreže [3], koji je ovde nazvan *prosti aukcijski protokol* (eng. *simple auction protocol*, SAP) i koji će biti detaljno opisan naknadno u tekstu. U pitanju je protokol zasnovan na slanju informacija o događaju svim komšijskim robotima (*flooding*) koji je potom prosleđuju samo jedanput, dok svoj odgovor na primljeni upit svi roboti šalju nazad zasebnim putanjama. Za velike mreže ovakvo rešenje unosi veliko kašnjenje u procesu izbora optimalnog robota iako se on najčešće nalazi u neposrednoj blizini prijavljenog događaja.

Jedno od rešenja problema kašnjenja i nekontrolisanog (ograničenog ili neograničenog) *flooding-a* je lokalizovano rešenje - *aukcijski agregacioni protokol* (eng. *auction aggregation protocol*, AAP) [4]. Kod ovog protokola se informacija o događaju širi sve dok u *k-hop* komšiluku postoji robot sa boljom cenom za pristigli upit. U suprotnom, robot obustavlja dalje slanje upita i šalje nazad kao odgovor najbolju poznatu cenu. Glavna prednost ovakvog rešenja je znatno smanjenje broja komunikacionih poruka obzirom da se u praksi najbolje rešenje najčešće nalazi blizu prijavljenog događaja.

U ovom radu biće pokazani rezultati simulacija za četiri različita protokola detaljno opisana u narednom poglavlju. Biće prikazan, uporedno po protokolima, prosečan broj razmenjenih poruka po robotu i procenat optimalne dodele posla. Takođe, biće opisan način izbora kolektora i njegov uticaj na krajnje performanse opisanih protokola. Ujedno, biće prikazana zavisnost broja poruka od broja robota i opravdanost uvođenja agenata.

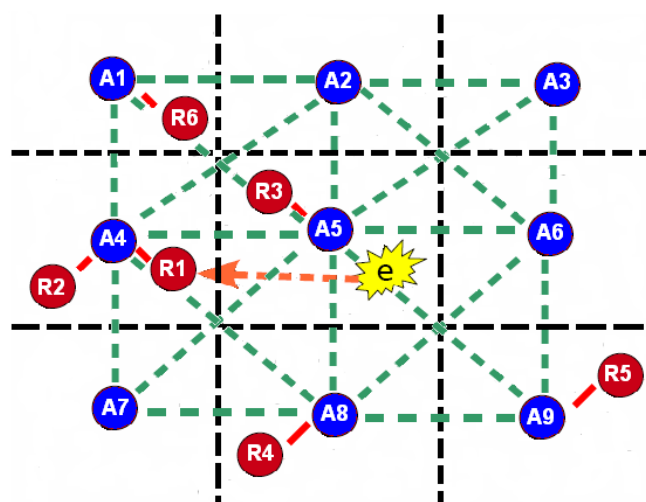
2. PREGLED PROTOKOLA

2.1 PROSTI AUKCIJSKI PROTOKOL

Najjednostavniji razmatrani protokol u *single-task single-robot* scenariju [3] predviđen za *multi-hop* mreže je prosti aukcijski protokol (SAP). U ovom radu su razmatrani aukcijski protokoli zasnovani na agentima (eng. *agent-based protocols*) pa će, radi jasnoće, njegova oznaka biti aSAP. Kao što je već rečeno, jedna tipična situacija je sledeća: događaj (eng. *event*) prijavljen jednom od robota od strane senzora

prosleđen je odgovarajućem agentu (agentu nadležnom za sektor u kom se robot nalazi, posebno nazvanom *glavni agent*). Glavni agent potom započinje aukciju slanjem upita svim okolnim agentima (*flooding*) u potrazi za najboljom cenom reakcije na događaj (*info* deo aukcije). Svi agenti šalju svoj odgovor glavnom agentu nezavisnim putanjama (*bidding* deo aukcije). Ovaj protokol uvek pronalazi najbolju cenu reakcije obzirom da su kontaktirani svi agenti (i samim tim su pregledani podaci o svim robotima). Sa druge strane, mana ovog rešenja je veliko kašnjenje koje se unosi zbog razmene velikog broja poruka.

U cilju poboljšanja performansi osnovnog protokola uveden je ograničeni *flooding*. Umesto svim agentima, glavni agent šalje upit samo onima koji su u njegovom *k-hop* komšiluku i taj protokol će biti označavan sa *k-aSAP*. Kao što scenario prikazan na Sl. 2 pokazuje, događaj *e* prijavljen je robotu *R1*, a glavni agent u ovom primeru *A4*.



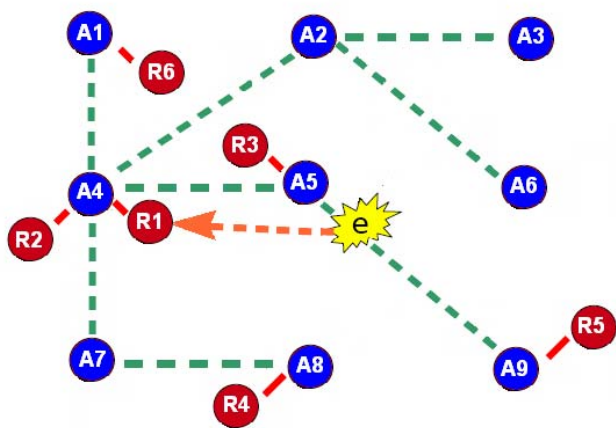
Sl.2 - Primer reakcije na događaj

Vredi zapaziti da događaj nije uvek prijavljen najbližem robotu i o tome će biti reči nešto kasnije. Pored toga, senzori koji javljaju o događaju imaju mogućnost komunikacije samo sa robotima. Za slučaj 1-hop verzije protokola biće konsultovani samo okolni agenti (*A1*, *A2*, *A5*, *A7* i *A8*) i ukoliko kao jedini parametar cene bude uzeta udaljenost robota od događaja, kao odgovor će biti odabran robot *R3*, koji zaista i jeste najbolji na prikazanom terenu. Detaljni rezultati simulacija za različite vrednosti parametra *k* prikazani su dalje u tekstu.

2.2 AUKCIJSKI AGREGACIONI PROTOKOLI

Aukcijski agregacioni protokoli (AAP) su unapređenje prostog aukcijskog protokola po pitanju optimizacije komunikacije. Prva ideja je da se smanji broj poruka pri slanju odgovora kreiranjem stabla kako bi se izbeglo da svaki agent šalje odgovor zasebnom putanjom. Stablo se kreira pri slanju upita i koristi u procesu slanja odgovora. Svaki agent retransmisijom primljenog upita šalje i ID svog roditeljskog člana stabla. Svaki element stabla ima samo jednog roditelja, čak i u slučaju prijema upita iz više izvora. Agenti koji ne prime nijednu poruku u kojoj su navedeni kao nečiji roditeljski član postaju listovi stabla. Opisani protokol ima naziv *prosti aukcijski agregacioni*

protokol (eng. *simple auction aggregation protocol*, SAAP) a kako je posmatrana verzija zasnovana na agentima njegova puna oznaka je aSAAP. Na Sl. 3 je prikazano kreiranje stabla za scenario sa Sl. 2. Događaj e prijavljen je robotu $R1$ i potom prosleđen njegovom nadležnom agentu $A4$. $A4$ (glavni agent) slanjem upita započinje kreiranje stabla. U datom primeru agent $A8$ je u dometu glavnog agenta $A4$ ali je pretpostavljeno da je na terenu situacija bila takva da mu je prvo stigla poruka od $A7$. Na sličan način agenti $A6$ i $A9$ su pripojeni svojim roditeljskim agentima $A2$ i $A5$, respektivno, iako su u dometu i drugih agenata (ovime se ilustruje da svaki element stabla ima samo jednog roditelja).



Sl. 3 - Primer kreiranja stabla

Ušteda se sastoji u sledećem: listovi stabla šalju kao odgovor najbolju cenu koje su svesni, u našem slučaju $A9$ šalje podatke o $R5$, $A1$ o $R6$, a $A8$ podatke o $R4$. U narednom koraku agenti koji su primili ponudu (eng. *bid*), u ovom slučaju $A5$ i $A7$, upoređuju primljene podatke sa onim njima lokalno dostupnim i ka glavnom agentu prosleđuju samo informaciju o najboljoj raspoloživoj ceni. Kao što se sa Sl. 3 može videti, agent $A5$ će glavnom agentu $A4$ proslediti podatke samo o $R3$ zanemarujući malopre primljenu poruku od $A9$ pošto $R3$ ima bolju cenu od $R5$. Nakon prikupljanja svih ponuda glavni agent $A4$ pronalazi najbolju raspoloživu cenu i, u našem primeru, dodeljuje posao robotu $R3$ preko postojeće putanje $A4$ - $A5$ - $R3$.

Dalje unapređenje je ograničavanje broja poruka pri slanju upita ograničenim *flooding*-om. U pitanju je već opisana ideja o k-hop komšiluku, u kojoj su u aukciji uključeni samo agenti udaljeni najviše k hopova od glavnog agenta. Primenom ove ideje na aSAAP dobijamo k-aSAAP verziju aukcijskog agregacionog protokola. Razlika između k-aSAP i k-aSAAP (slično kao i razlika između aSAP i aSAAP) je u tome da su pojedini odgovori na aukciju prikupljeni u pojedinačnim elementima stabla i da je ka glavnom agentu prosleđena samo najbolja ponuda umesto da se svi odgovori šalju zasebno.

Kreiranjem stabla znatno je umanjen broj poruka pri slanju odgovora (kao što je pokazano u rezultatima simulacija). Naredni korak pri optimizaciji

broja poruka jeste ušteda i pri slanju upita (u *info delu* aukcije) te je sa tim ciljem razvijen *aukcijski agregacioni protokol* (AAP), odnosno ovde opisana verzija aAAP. U pitanju je protokol koji nema smisla ukoliko se ne ograniči na k-hop komšiluk tako da će zapravo biti reči o k-aAAP verziji protokola. Već je rečeno da agent poseduje sve potrebne podatke o svim robotima koji se nalaze u njegovom sektoru. Ovaj protokol je unapređenje ove ideje i pretpostavljeno je da svaki agent poseduje podatke o svim robotima u k-hop komšijskim sektorima (a do njih dolazi periodičnom razmenom poruka sa k-hop komšijskim agentima). Razmena ovih poruka može ići van raspisane aukcije ili dodatkom u porukama pri nekoj od aukcija tako da broj ovih poruka i njihov uticaj nije uzet u obzir pri računanju ukupnog broja poruka u simulacijama.

U k-aAAP verziji protokola agent vrši retransmisiju poruka samo ukoliko u njegovom k-hop komšiluku postoji bolja cena od trenutno poznate koja mu je dostavljena upitom. Dakle, ukoliko makar jedan robot u k-hop komšiluku posmatranog agenta ima bolju cenu (a da pritom nije u pitanju 0-hop komšiluk odnosno da nije u pitanju robot iz njegovog sektora) doći će do retransmisije upita. U suprotnom, posmatrani agent šalje odgovor nazad roditeljskom elementu stabla.

U primeru sa Sl. 3, u 0-hop verziji protokola glavni agent $A4$ posmatra samo robote njemu lokalno dostupne i angažuje $R1$ za posao. U 1-hop verziji doći će do transmisije upita obzirom da $A4$ poseduje podatke o $R3$ jer mu je $A5$ 1-hop komšija. Agenti $A1$, $A2$, $A5$ i $A7$ neće vršiti retransmisiju jer u njihovom 1-hop komšiluku nema boljih robota za posmatrani događaj. Očigledno je da je broj razmenjenih poruka ovim putem znatno umanjen.

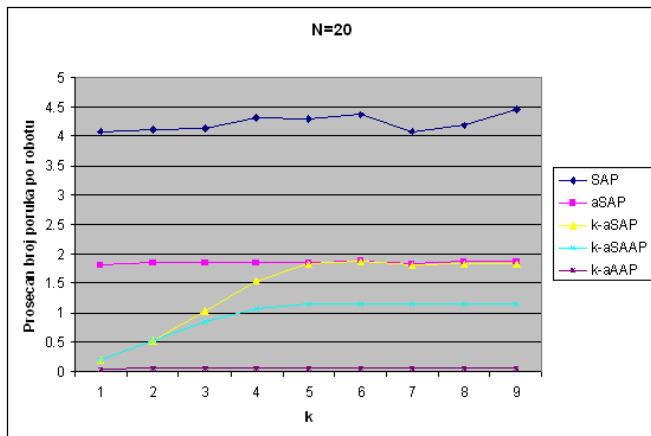
3. SIMULACIJE I REZULTATI

Posmatran je 2D teren dimenzija 100m x 100m i situacija u kojoj postoji samo jedan događaj na koji treba reagovati u posmatranom trenutku. Na terenu je pseudoslučajno bilo raspoređeno $N=10, 20, 50$ ili 100 robota. U skladu sa veličinom terena uvedeno je dodatnih $M=25$ agenata. Kao cena odgovora razmatrana je udaljenost robota od događaja i meren je prosečan broj poruka po robotu i procenat optimalne dodele posla stvarno najbližem robotu.

Robot kolektor (onaj kojem je događaj prijavljen) biran je probabilistički prema njegovoj udaljenosti od događaja. Ukoliko je d_i rastojanje robota i od događaja i ako je $D = 1/d_1 + 1/d_2 + \dots + 1/d_n$, verovatnoća da će biti odabran robot i za kolektora je $1/(D \cdot d_i)$. Ovim putem robot kolektor je ujedno i najbliži događaju u oko 15% slučajeva, konkretne vrednosti variraju između 5 i 27% i to tako da procenat opada porastom broja robota. Prosečni odnos udaljenosti između kolektora i najbližeg robota su 2.42, 3.34, 5.34 i 7.72 za $N=10, 20, 50$ i 100, respektivno.

Posmatrano je 10 različitih rasporeda robota i za svaki od njih kreirano po 100 slučajnih događaja. Upoređivani su protokoli opisani u sekciji 2. i to: SAP, aSAP, k-aSAP, k-aSAAP i k-aAAP.

Protokoli SAP i aSAP uvek pronalaze najmanju cenu obzirom da su u procesu odlučivanja konsultovani svi roboti, ali zahtevaju više razmenjenih poruka nego ostali protokoli (Sl. 4.). Ostali protokoli vrlo brzo postizu efikasnost SAP-a i aSAP-a, već za $k > 3$ njihova efikasnost prelazi 99%.



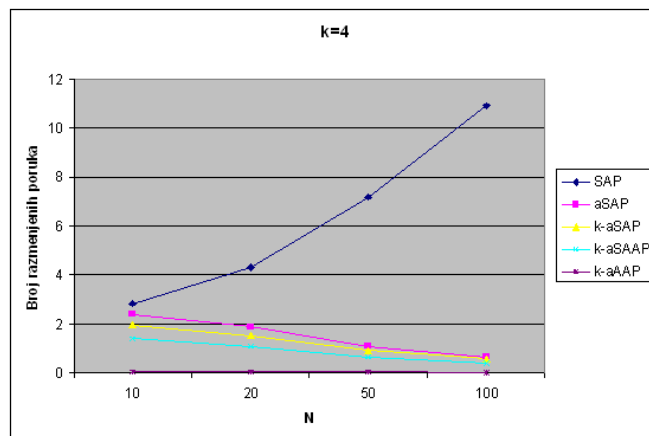
Sl. 4 - Prosečan broj razmenjenih poruka po robotu u zavisnosti od k

Kao što Sl. 4 pokazuje, k-aSAP unosi smanjenje broja poruka ali se ono povećanjem parametra k približava originalnim vrednostima iz aSAP verzije protokola, što je očekivano obzirom da porastom vrednosti k broj konsultovanih robota raste. Pritom, polazna verzija protokola (SAP) zahteva preko dva puta više poruka od najgoreg opisanog aSAP slučaja. Prikupljanjem pojedinačnih ponuda u elementima stabla pre slanja odgovora ka glavnom agentu ostvaruje se dodatna ušteda (k-aSAAP) i to gotovo duplo bolji rezultat za najkritičnije vrednosti parametra k .

Nesumnjivo, najbolje rešenje je k-aAAP sa izrazito malim prosečnim brojem poruka, oko 40 puta manjim od aSAP verzije protokola i čak preko 80 puta boljim rezultatima od SAP-a. Ovo i jeste očekivan rezultat obzirom da se najbolji robot najčešće nalazi u sektoru glavnog agenta ili u nekom od susjednih sektora. U konkretnom primeru: za $N=20$ i $k=5$, k-aSAP, k-aSAAP i k-aAAP pokazuju slične performanse (procenat optimalne dodele posla im je iznad 99%) ali k-aSAP zahteva prosečno 1.83 poruka po robotu, k-aSAAP 1.14, dok k-aAAP zahteva samo 0.05 poruka kako bi postigao pomenutu efikasnost.

Opravdanost uvođenja agenata je prikazana na Sl. 5. Na prikazani broj N treba dodati fiksnih $M=25$ agenata i lako se može uočiti da je broj poruka u padu pri rastu broja robota. Pritom, polazni protokol SAP pokazuje rast potrebnog broja poruka srazmerno broju robota na posmatranom terenu i on se kreće od 2.82 do 10.91 pri promeni N od 10 do 100. Konkretno vrednosti protokola zasnovanih na agentima pokazuju da se povećanjem broja robota 10 puta broj poruka smanjuje oko 4 puta za sve posmatrane protokole. Naravno, razlike među njima i dalje postoje pa se za najbolji protokol po ovom aspektu (k-aAAP) broj razmenjenih poruka kreće između 0.06 i 0.02, dok se kog najlošijeg posmatranog protokola (aSAP) taj broj kreće između 2.37 i 0.66. Direktno

poređenje osnovnih SAP i aSAP verzija protokola pokazuje svu opravdanost uvođenja agenata jer je za $N=100$ robota pri istim uslovima na posmatranom terenu broj poruka smanjen sa 10.91 na samo 0.66.



Sl. 5 - Prosečan broj poruka u zavisnosti od broja robota

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisani su aukcijski agregacioni protokoli zasnovani na agentima. Simulacije su pokazale da je moguće pronaći optimalno ili rešenje blizu optimalnog uz značajno smanjenje broja poruka u odnosu na prethodne radove iz ove oblasti uvođenjem agenata. Takođe, prikazane su osnovne prednosti agregacionih protokola u odnosu na proste aukcijske.

Dalji rad u ovoj oblasti mogao bi podrazumevati razmatranje više parametara u okviru cene odgovora na događaj pa bi se u razmatranje mogli uzeti preostala količina energije ili još konkretniji parametri (za primer upotrebe ovih mreža za sanaciju požara može se u razmatranje uzeti i preostala količina vode u rezervoaru robota i slično).

ZAHVALNICA

Istraživanje u okviru ovog rada delimično je finansirano od strane Republičkog Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj u okviru projekta "Razvoj sistema i instrumenata za istraživanje vode, nafte i gasa", ev. br. projekta TR11006.

LITERATURA

- [1] L.E. Parker, Multiple Mobile Robot Systems, In: Bruno, S., Oussama, K. (eds.) *Springer Handbook of Robotics*, pp. 921-941, Springer, 2008.
- [2] B.P. Gerkey, M.J. Mataric, "Sold!: Auction methods for multi-robot coordination," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 5, pp. 758-768, 2002.
- [3] T. Melodia, D. Pompili, V.C Gungor, I.F. Akyildiz, "Communication and Coordination in Wireless Sensor and Actor Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Volume 6, Issue 10, pp. 1116-1129, 2007.
- [4] I. Mezei, V. Malbasa, I. Stojmenovic, "Auction Aggregation Protocols for Wireless Robot-Robot Coordination", P.M. Ruiz and J.J. Garcia-Luna-Aceves (Eds.): *ADHOC-NOW 2009, LNCS 5793*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 180-193, 2009.