

# Analiza kvaliteta prenosa podataka u ZigBee mrežama u različitim prostorima i situacijama

Ištvan I. Papp, Đorđe M. Isailović, Saša A. Vukosavljev, Dragan M. Samardžija

**Sadržaj** — U ovom radu su opisane osnovne osobine ZigBee protokola bežične komunikacije sa naglaskom na maksimalni domet ovakvih mreža u različitim prostorima i situacijama sa zadovoljavajućim kvalitetom prenosa podataka. Izloženi su rezultati koji obuhvataju kvalitet prenosa podataka u zavisnosti od rastojanja u zatvorenom i na otvorenom prostoru i u saobraćaju gde se uređaji nalaze u automobilima.

**Cljučne reči** — RSSI, ZigBee.

## I. UVOD

**T**OKOM poslednje decenije došlo je do ogromnog napretka u oblasti bežičnih komunikacija. Pojavio se veliki broj široko prihvaćenih bežičnih protokola koji su našli svoje mesto u različitim potrebama koje je diktiralo tržište. Osobine većine ovih protokola su velika brzina prenosa podataka, potrošnja koja ograničava rad takvih uređaja kada su napajani baterijom na sate ili eventualno dane, stalno dodavanje novih opcija i mogućnosti čime se i potrebna memorija za integraciju tih protokola povećava. Međutim, pojavila se potreba za određenim standardom koji ima potpuno druge osobine od gore navedenih. Tržištu je trebao standard koji će zadovoljiti potrebe za minimalnom potrošnjom, ne tako velikom brzinom prenosa podataka, što manjom potrebnom memorijom i malom cenom. Kao rezultat toga pojavio se ZigBee protokol, koji se nadovezao na IEEE 802.15.4 bežični protokol i koji je zauzeo deo tržišta koji nije bio na pravi način obuhvaćen od strane ostalih bežičnih standarda.

Primena ovog protokola je pre svega u senzorskim sistemima, gde nije potreban prenos velikih količina podataka, gde je bitno da je potrošnja toliko mala da baterije kojima se senzori napajaju mogu da traju i do nekoliko godina. Osnovne primene ovog protokola obuhvataju senzorske mreže koje imaju za cilj kućnu automatizaciju i senzorske mreže u industrijskim postrojenjima pomoću kojih se ona nadgledaju i upravljaju.

Ovaj rad je delimično finansiran od Ministarstva za nauku Republike Srbije, projekat 11005, od 2008. god.

Ištvan I. Papp, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija (telefon: 381-21-4801189, e-mail: istvan.papp@rt-rk.com).

Đorđe Isailović, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija (telefon: 381-21-4801185, e-mail: djordje.isailovic@rt-rk.com)

Saša A. Vukosavljev, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija (telefon: 381-21-4801201, e-mail: sasa.vukosavljev@rt-rk.com)

Dragan M. Samardžija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija (telefon: 381-21-4801135, e-mail: dragan.samardzija@rt-rk.com).

Cilj ovog rada je da se ispita ponašanje ZigBee mreže u različitim prostorima i situacijama i da se u svim tim slučajevima utvrde maksimalna rastojanja između čvorišta mreže pri kojima je kvalitet prenosa zadovoljavajuć.

Rad je organizovan u šest poglavlja: opis ZigBee protokola, opis ZigBee uređaja i način ispitivanja, rezultati merenja, poređenje sa drugim bežičnim komunikacijama, i zaključak. U drugom poglavlju se detaljnije opisuju osobine i struktura ZigBee protokola. Treće poglavlje se odnosi na opis korišćenog tipičnog uređaja sa implementiranim ZigBee protokolom i sadrži opis programske podrške pomoću koje će se skupljati rezultati. U četvrtom poglavlju je dat grafički prikaz rezultata sa odgovarajućim objašnjenjima. Peto poglavlje obuhvata poređenje ZigBee protokola sa drugim bežičnim protokolima kao što su Bluetooth i WiFi. Zaključak o postignutim rezultatima je šesto poglavlje.

## II. OPIS ZIGBEE PROTOKOLA

ZigBee protokol je rezultat razvoja i vlasništvo ZigBee Alianse koja obuhvata preko 70 kompanija koje su se udružile da bi definisale i promovisale ovaj standard. ZigBee je standard koji je izgrađen nad IEEE 802.15.4 standardom definisanim za WPAN (Wireless Personal Area Network). Ovaj važan standard definiše fizičku arhitekturu i programsku podršku koji su opisani kao fizički sloj i sloj za upravljanje pristupa medijumima (Medium Access Control, nadalje u tekstu MAC). ZigBee Aliansa je dodavanjem specifikacija mrežnog i aplikativnog sloja kompletirala strukturu koja se naziva ZigBee stek. Struktura ovako definisanog steka je prikazana na Sl.1.



Sl. 1. ZigBee stek

IEEE 802.15.4 standard definiše fizički sloj koji predstavlja tri slobodna frekvencijska opsega koja obuhvataju 16 kanala na frekvenciji od 2.4GHz (maksimalna brzina prenosa 250 kb/s), 10 kanala u opsegu od 902 do 908 MHz (40 kb/s) i jedan kanal u opsegu od 868 do 870 MHz (20 kb/s) [1]. Fizički sloj ima sledeće funkcije : uključenje i isključenje radio primopredajnika

(transivera), slanje i primanje paketa podataka i merenje parametara kvaliteta prenosa kao što su otkrivanje snage signala (ED - Energy Detection) i indikacija kvaliteta linka (LQI - Link Quality Indication) koje će kasnije koristiti mrežni sloj kao deo algoritma za odabir slobodnih frekvencijskih kanala. Fizički sloj predstavlja vezu između samog medijuma kroz koji se šalju podaci i MAC sloja.

MAC sloj, osim što je zadužen za celokupnu komunikaciju sa fizičkim slojem, ima i sledeće zadatke : kontroliše pristup radio kanalu koristeći algoritam sa višestrukim pristupom sa osluškivanjem nosioca i izbegavanjem kolizije (CSMA-CA, Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance), generiše određene poruke kada se mreža podiže ako uređaj ima ulogu koordinatora, povezuje uređaj u ZigBee mrežu, pruža određeni stepen zaštite na ovom sloju i zadužen je za slanje poruka sa potvrdom o prijemu (ACK - Acknowledged frame delivery).

Mrežni sloj povezuje MAC sloj sa gornjim aplikativnim slojem i njegova uloga je da skenira frekvencijske kanale i proveriti da li je na nekima od njih već uspostavljena neka mreža, da usmerava poruke između članova mreže, pruža nekoliko stepena zaštite koji se mogu odabrati, dodeljuje adrese čvorištima mreže ako je uređaj koordinator i definiše određene uslove kao što je maksimalna veličina mreže, maksimalni broj usmerivača, veličina tabela za usmeravanje i slično[2].

Aplikativni sloj se sastoji od APS podsloja (Application Support Sub-Layer), ZDO (ZigBee Device Objects) podsloja i aplikativnih objekata definisanih od strane korisnika koji i definišu funkciju uređaja. APS podsloj ima ulogu da održava i kontroliše komunikaciju između dva člana mreže koji su ostvarili vezu na zahtev jednog od njih. Odgovornosti ZDO podsloja su da definiše ulogu uređaja u mreži, da šalje i odgovara na zahteve za povezivanjem sa nekim drugim uređajem radi međusobne razmene poruka.

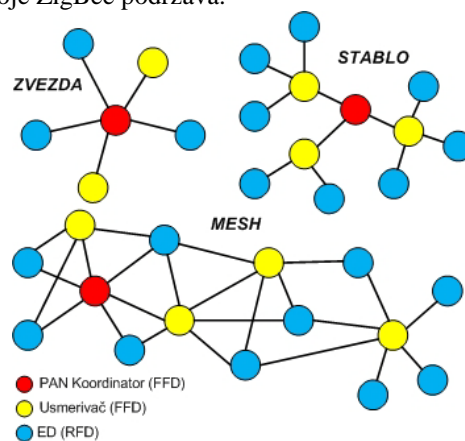
Da bi se ostvarila jedna od osnovnih osobina ZigBee protokola, niska cena implementacije, u ZigBee sistemima postoje dva fizička tipa uređaja: uređaj sa kompletnim funkcijama (Full Function Device, nadalje u tekstu FFD) i uređaj sa ograničenim funkcijama (Reduced Function Device, nadalje u tekstu RFD). RFD se implementira sa redukovanim ZigBee stekom i minimalnim memorijskim resursima pa je i njegova cena manja. Može da komunicira samo sa FFD - om koji ima dovoljno sistemskih resursa potrebnih pre svega za usmeravanje. Jedna od osnovnih osobina RFD - a je da može da ulazi u režim pripravnosti (sleep mode) što predstavlja stanje male potrošnje energije kada se isključuju svi nepotrebni moduli uređaja. FFD se implementira sa kompletnim ZigBee stekom i svim funkcijama potrebnim za usmeravanje i upravljanje mrežom.

ZigBee definiše i tri logička tipa uređaja koji predstavljaju uloge u mreži koje fizički tipovi uređaja mogu imati: koordinator, usmerivač i krajnji uređaj (End Device, nadalje u tekstu ED).

ZigBee mreža zahteva postojanje jednog koordinatora čija je uloga da podigne mrežu, da ima informacije o svim čvorištima mreže, često i da usmerava poruke između njih

i on mora biti FFD jer zahteva postojanje veće memorije i više funkcija i najčešće je napajana iz mreže. Osnovna uloga usmerivača je da prosleđuje poruke između čvorišta mreže i da proširuje domet mreže. Usmerivač takođe mora biti FFD jer mora da čuva određene informacije o članovima i strukturi mreže. Najjednostavniji tip uređaja je ED i najčešće je to senzorski element koji je RFD i može da se obraća samo koordinatoru ili usmerivaču, projektovan je za baterijsko napajanje, može da ide u režim pripravnosti čime je omogućeno da baterija traje i do nekoliko godina, ima ograničene funkcije ali mu je prednost mala cena.

ZigBee tehnologija obuhvata dva tipa steka: ZigBee i ZigBee PRO. Prvi tip steka je namenjen za komercijalne primene manjeg obima i podržava topologiju mreže tipa zvezda (STAR) i tipa stablo (TREE), dok ZigBee PRO podržava petljastu topologiju mreže (MESH) sa povećanom zaštitom. Na Sl. 2 su dati primeri topologija mreža koje ZigBee podržava.



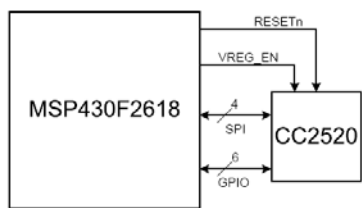
Sl. 2. Različite topologije mreža

Kod topologije mreže tipa zvezda komunikacija je moguća isključivo između glavnog uređaja koji ima ulogu koordinatora i naziva se PAN (Personal Area Network) koordinator i usmerivača ili ED. Prednosti ove topologije su jednostavnost i mogućnost da većina uređaja bude ED pa samim tim i napajana baterijom. Petljastu topologiju mreže odlikuje velika pouzdanost jer postoji više mogućih putanja između čvorišta mreže pa ako se desi da neko čvorište mreže ode u režim pripravnosti i zato ne bude u mogućnosti da učestvuje u usmeravanju velika je verovatnoća da će se uspostaviti neka druga putanja preko koje će čvorišta mreže komunicirati. Topologija mreže tipa stablo kombinuje prednosti prethodne dve topologije: mogućnost da postoji veći broj uređaja koji se baterijski napajaju i veća pouzdanost.

### III. OPIS ZIGBEE UREĐAJA I PROGRAMSKE PODRŠKE ZA ISPITIVANJE

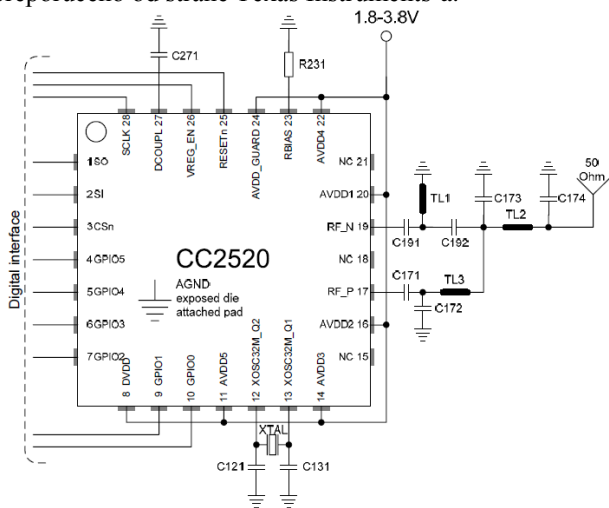
Za testiranje je korišćen tipični ZigBee uređaj čije je jezgro sastoji od mikrokontrolera i RF primopredajnika. Uređaj je implementiran pomoću komponenata firme Texas Instruments (TI). Korišćen je 16-bitni mikrokontroler MSP430F2618 sa 8051 jezgrom, namenjen za primene koje zahtevaju veoma malu potrošnju i RF primopredajnik CC2520 namenjen za ZigBee komunikaciju. Na Sl. 4 je data blok šema povezanih

mikrokontrolera i primopredajnika.



Sl. 4. Šema povezanih mikrokontrolera i primopredajnika [4].

Na Sl. 5 je prikazano tipično kolo za primenu CC2520 preporučeno od strane Texas Instruments-a.



Sl. 5. Tipično CC2520 kolo [4].

Korišćena je PCB antena čiji je izgled preporučen od strane TI-a dat na Sl. 6. Maksimalno pojačanje ovakve antene je +3.3dB a potrebna površina za njenu implementaciju je 15.2 x 5.7 mm [5].



Sl. 6. Izgled PCB antene preporučen od strane TI-a [5].

Za potrebe ispitivanja koristi se aplikacija PER (Packet Error Rate) ispitivač, urađena od strane TI-a i prilagođena za korišćeni ZigBee uređaj. Ova aplikacija zahteva postojanje dva člana mreže i uspostavlja jednosmernu RF (Radio Frequency) vezu između njih. U aplikaciji je potrebno da korisnik definiše koji član mreže je predajnik a koji prijemnik, koliki broj paketa podataka će biti poslat (1K, 10K, 100K, 1M) i na kojem frekvencijskom kanalu će se uspostaviti veza i obavljati prenos podataka (2405 – 2480 MHz). Aplikacija je prilagođena da parametre kvaliteta prenosa podataka ispisuje na računar preko UART-a (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter). Ti parametri su broj primljenih paketa, prosečni RSSI (Receive Signal Strength Indicator) i PER koji se računa po sledećoj formuli:

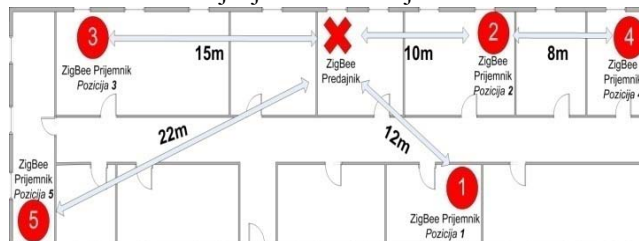
$$PER = \frac{lp}{sp} \cdot 100[\%],$$

gde su  $lp$  izgubljeni paketi a  $sp$  ukupni poslani paketi podataka.

#### IV. REZULTATI MERENJA

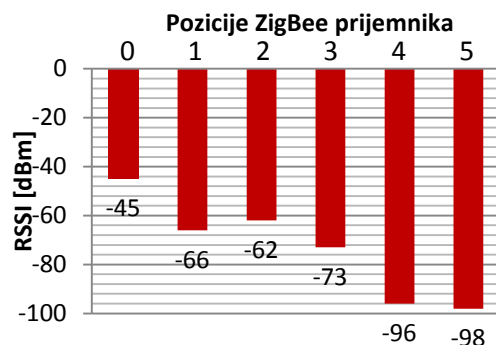
Izvedena su merenja u tri slučaja : u zatvorenom i na otvorenom prostoru i na otvorenom u situaciji kada se ZigBee uređaji nalaze u automobilima. Korišćena su dva uređaja, pri čemu je jedan statični uređaj bio predajnik a drugi koji je menjao pozicije je imao ulogu prijemnika.

Na Sl. 7 je prikazana struktura zatvorenog prostora u kome se vršilo merenje sa označenom pozicijom predajnika i numerisanim pozicijama prijemnika zajedno sa naznačenim rastojanjima između njih.



Sl.7. Struktura zatvorenog prostora.

Sl. 8 prikazuje rezultate dobijene merenjem u gore prikazanom prostoru, sa tim da pozicija 0 podrazumeva vrednost RSSI na međusobnom rastojanju prijemnika i predajnika od 1m.

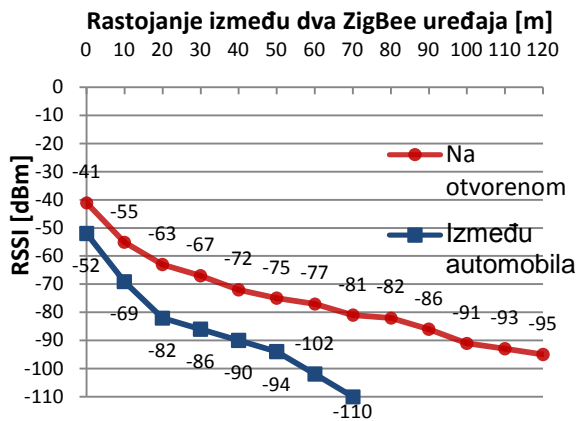


Sl.8. Rezultati u zatvorenom prostoru.

Vrednost PER parametra je nula u pozicijama 0,1,2 i 3 što znači da nije bilo izgubljenih paketa dok je u poziciji 4 ta vrednost 10% što govori da se na svakih 1000 paketa 100 paketa izgubi što je veoma loše. U poziciji 5 situacija je još kritičnija jer je PER 20% tako da se zaključuje da domet u zatvorenom prostoru više zavisi od prepreka koje se nalaze na liniji komunikacije nego od rastojanja.

Dalja merenja su izvedena na otvorenom prostoru i u situaciji kada jedan automobil sa uređajem koji ima ulogu predajnika stoji dok drugi automobil sa uređajem kao prijemnikom zauzima pozicije na različitim rastojanjima.

Pri merenju na otvorenom prostoru PER ima vrednost nula sve do oko 100m, posle toga ta vrednost raste približno 3% na svakih 10m. U drugoj situaciji već na 20m RSSI je -82 dBm dok je PER 1%, na oko 50m RSSI je -94 dBm a PER 5% što je dosta lošije nego u situaciji na otvorenom tako da je zaključak da bi se u nekim ozbiljnijim primenama antena ZigBee uređaja morala nalaziti izvan vozila. Na Sl. 9 su grafički prikazani rezultati prethodnih merenja.



SI.9. Rezultati merenja na otvorenom i između automobila.

#### V. POREĐENJE SA DRUGIM BEŽIČNIM PROTOKOLIMA

Iako su i Bluetooth i ZigBee protokoli definisani za WPAN (Wireless Personal Area Networks) postoje velike razlike između njih. Kao što je dato u Tabeli 1 potrošnja u ZigBee-ju je dosta manja pa baterije mogu da traju godinama zahvaljujući mogućnosti koja je ranije navedena a odnosi se na mogućnost uređaja da mogu da idu u režim pripravnosti dok to u Bluetooth mrežama nije tako lako izvodljivo jer uređaji moraju stalno da se javljaju u mreži da bi održali međusobnu sinhronizaciju. Kao posledica toga, iako su potrošnje struje u toku slanja podataka kod ova dva protokola približne, oko 40 mA, primećuje se razlika u potrošnji struje u režimu pripravnosti gde je kod ZigBee-ja ta struja oko 3  $\mu$ A dok je kod Bluetooth-a oko 200  $\mu$ A. Baterije za Bluetooth uređaje su namenjene za česta ponovna punjenja, dok kod ZigBee-ja nisu, pa je to još jedan od razloga zašto duže traju.

TABELA 1: KLJUČNE OSOBINE KOMPLEMENTARNIH BEŽIČNIH TEHNOLOGIJA [3].

Osobine	IEEE 802.11b	Bluetooth	ZigBee
Trajanje baterije	Satima	Danima	Godinama
Složenost	Veoma složen	Složen	Jednostavan
Vreme potrebno da se uređaj poveže u mrežu	3 s	10 s	30 ms
Domet	100 m	10 m	300 m
Brzina prenosa podataka	11 Mb/s	1 Mb/s	250 Kb/s
Struja u režimu pripravnosti	400 mA	200 $\mu$ A	3 $\mu$ A
Maks. broj članova mreže	32	7	64000

Wi-Fi je bežični LAN (Local Area Network) standard tako da zahteva skoro stalnu aktivnost uređaja u mreži i njegova fizička arhitektura je i projektovana da se napaja

iz značajnog strujnog izvora. Njegova prednost u odnosu na date standarde je velika brzina prenosa podataka oko 11Mb/s, dok je kod Bluetooth-a oko 1Mb/s a ZigBee ima najmanji protok, svega oko 250Kb/s ali u najčešćim primenama u kojima se ZigBee koristi, a to su mreže senzorskih elemenata, ovo ne predstavlja veliko ograničenje. Bluetooth i Wi-Fi su protokoli koji zahtevaju dosta kompleksniju integraciju i dok je maksimalni broj članova mreže kod pomenutih protokola 7 i 32, kod ZigBee-ja taj broj iznosi 64000 članova zahvaljujući tome što koristi 64-bitne IEEE adrese koje interno mogu biti zamenjene 16-bitnim adresama. Realan broj čvorova koji funkcionišu u petljastoj mreži je oko 500. Velika prednost ZigBee-ja je veoma kratko vreme potrebno da se uređaj poveže u mrežu, oko 30 ms, pa se na izlasku iz čestih režima pripravnosti ne gubi puno na vremenu dok je kod Bluetooth-a to vreme dosta veće, oko 3s, a kod Wi-Fi čak 10s. Domet Wi-Fi je oko 100m, Bluetooth-a oko 10m, dok je kod tipičnog ZigBee uređaja sa PCB (Printed Circuit Board) antenom taj domet oko 100m na otvorenom, kao što je pokazano, dok sa jačom antenom taj iznos ide i do 300m.

Još jedna razlika koja može biti interesantna sa stanovišta jednostavnije implementacije i niže cene je veličina steka, koja je kod Bluetooth-a oko 250Kb a kod ZigBee protokola, ako se radi o kompletnom steku, oko 40Kb, a može biti i još manja ako se koristi redukovani stek za ED uređaj.

#### VI. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata vidi se da je potencijal uređaja sa ZigBee protokolom veliki uzimajući u obzir da su u merenjima korišćeni uređaji sa PCB antenama koje imaju relativno skromne mogućnosti tako da bi se sa boljom antenom dobili još bolji rezultati. Dalja istraživanja bi mogla obuhvatiti merenja kvaliteta signala u raznim ambijetalnim uslovima a bilo bi interesantno i proučiti ponašanje ovakvih uređaja u vodi i u situaciji kada bi se oba uređaja stalno kretala.

#### LITERATURA

- [1] IEEE Std 802.15.4 – 2003, IEEE Computer Society, Oct. 2003.
- [2] ZigBee specification, ZigBee Alliance, Jan. 2008.
- [3] Adis Vojvodić, "An Paper on ZigBee," Chalmers University of Technology, Sweden, May 2006.
- [4] CC2520 Datasheet, www.ti.com, Dec. 2007 .
- [5] "Small size 2.4GHz PCB antenna", Application Note, www.ti.com, 2008.

#### ABSTRACT

This paper describes basics of ZigBee protocol and includes measurement of signal strength and quality of received packets of a typical ZigBee device in various situations.

#### QUALITY COMMUNICATION ANALYSIS IN ZIGBEE NETWORKS IN VARIOUS SITUATIONS

Ištvan I. Papp, Đorđe M. Isailović, Saša A. Vukosavljev, Dragan M. Samardžija