

**ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У ЧАЧКУ
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ
Број 2 – 157/14
30. 01. 2013. год.
ЧАЧАК**

На основу члана 84. Статута Факултета техничких наука, Наставно-научно веће, на седници одржаној 30. јануара 2012. год., донело је

О Д Л У К У

I ПРИХВАТА СЕ извештај рецензената за техничко решење под називом:
"Систем за одређивање вероватноће грешке бежичног преноса у IEEE 802.15.4. мрежама", чији су аутори: др Синиша Ранђић, ред. проф., mr Урош Пешовић, асистент и Горан Димић.

II Техничко решење је реализовано у оквиру Пројекта бр. ТР32043.

III Извештај рецензената из тачке I, саставни је део ове Одлуке.

Доставити:

- именованима,
- продекану за науку и међународну сарадњу,
- архиви ННВ.



ФАКУЛТЕТА ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Проф. др Јерољав М. Живанић, дипл. инж. ел.

Здехан
[Handwritten signature]

РЕЦЕНЗИЈА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

1. Подаци о техничком решењу

Назив техничког решења: Систем за одређивање вероватноће грешке бежичног преноса у IEEE 802.15.4 мрежама
Категорија техничког решења: M85
Назив пројекта: Развој и моделовање енергетских ефикасних, адаптибилних, вишепроцесорских и вишесензорских система мале снаге
Ознака пројекта: ТР 32043
Руководилац пројекта: Горан Димић
Организација: Факултет техничких наука, Чачак, Институт „Михајло Пупин“, Београд
Одговорно лице: Урош Пешовић, email: pesovic@yahoo.com
Реализатори: Урош Пешовић, Синиша Ранђић, Горан Димић

2. Евалуација техничког решења

- Сажетак описа техничког решења:* Техничко решење, у оквиру кога је извршена реализација система за одређивање вероватноће грешке при преносу у IEEE 802.15.4 бежичним мрежама намењено је истраживању у области бежичних комуникација. С обзиром да овакви системи нису комерцијално доступни аутори су одлучили да на бази комерцијално расположивих компонената и развојем потребног софтвера развију систем који ће се користити у даљим истраживањима у оквиру пројекта. Систем се може користити и у сличним истраживањима из ове области. Развијени систем омогућава одређивање вероватноће грешака, при преносу података у бежичним мрежама које раде по стандарду IEEE 802.15.4, а које настају под утицајем позадинског шума, интерференције са другим мрежама, као и колизија које могу да настану унутар саме мреже.
- Релевантност техничког решења за примењену област:* Поседовање информације о вероватноћи грешака до којих долази при преносу података у рачунарским мрежама је један од најважнијих задатака савремених телекомуникација. Овај проблем је данас још значајнији ако се има у виду интензитет ширења примене бежичних мрежа, као што је и мрежа која ради по стандарду IEEE 802.15.4. Представљено техничко решење је посебно значајно за истраживање на плану одређивања вероватноће грешака IEEE 802.15.4 мрежама, јер не постоје адекватни комерцијални системи.
- Проблем који се решава:* Разматраним техничким решењем омогућава се праћење појаве грешака у преносу података у IEEE 802.15.4 мрежи. Систем врши идентификацију критеријумских параметара на бази којих се развијеном софтверском апликацијом одређује вероватноћа појаве грешака. Реализацијом овог система превазилази се недостатак одговарајућег комерцијалног уређаја.
- Стање решености истог проблема у свету:* Коришћење бежичних рачунарских мрежа, а тиме и мрежа типа IEEE 802.15.4 постаје све интензивније. Истовремено услови у којима се бежичне комуникације остварују све су неповољнији. Повећање интензитета бежичног саобраћаја значајно утиче на

повећавање нивоа шума и интерференција што директно утиче на повећавање броја грешака у преносу података. У таквим околности идентификовање утицаја окружења на појаву грешака је веома важно па је и познавање вероватноће појаве грешака при преносу од великог значаја. И поред тога не постоје комерцијално доступни системи за одређивање вероватноће грешака у бежичним мрежама, што разматрано техничко решење чини значајним достигнућем у овој области.

5. *Квалитет објашњења и описа решења:* Техничко решење је приказано на разумљив начин уз коришћење потребног броја слика и табела. Опис је добро структуриран.
6. *Применљивост резултата рада:* Разматрано техничко решење је реализовано према постављеним функционалним захтевима. Развијени систем може да се користи за одређивање вероватноће појаве грешака при преносу података у оквиру мрежа типа IEEE 802.15.4, које настају услед деловања позадинског шума, интерференције са другим мрежама истог типа односно колизије међу уређајима унутар исте IEEE 802.15.4 мреже.
7. *Научни допринос:* Научни допринос овог решења састоји се у реализацији система који омогућује истраживања квалитета преноса података у IEEE 802.15.4 мрежама. Одређивањем вероватноће појаве грешке стварају се могућности за утврђивање корелације између услова у којима се пренос остварује и интензитета појаве грешака у преносу који су узроковане постојањем позадинског шума, интерференције са другим мрежама истог типа и колизијама које настају унутар исте мреже.

ОПШТА ОЦЕНА КВАЛИТЕТА РАДА: Решење је комплетно и квалитетно урађено.

Да ли се техничко решење прихвата (Да или Не): Решење се прихвата.

3. Квалитети техничког решења

Реализовани систем пружа подршку за истраживања у области праћења грешака које настају при преносу података у IEEE 802.15.4 мрежама са циљем одређивања вероватноће појаве грешака. Систем је развијен на бази комерцијално расположивих компонената, које су путем одговарајуће софтверске подршке интегрисане у јединствену целину. Модуларношћу система омогућено је додавање нових мрежних компонената чиме се може утицати на промену услова у којима се одвија пренос података, што додатно проширује област примене овог система у истраживачке сврхе.

4. Примедбе на техничко решење

4.1 Суштинске примедбе

Немам суштинских примедби на ово техничко решење.

4.2 Ситније примедбе

У Нишу, 24. јануар 2013. године

Рецензент:


проф. др Горан Т. Ђорђевић,
Универзитет у Нишу, Електронски факултет

РЕЦЕНЗИЈА ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

1. Подаци о техничком решењу

Назив техничког решења:	Систем за одређивање вероватноће грешке бежичног преноса у IEEE 802.15.4 мрежама
Категорија техничког решења:	M85
Назив пројекта:	Развој и моделовање енергетских ефикасних, адаптибилних, вишепроцесорских и вишесензорских система мале снаге
Ознака пројекта:	TP 32043
Руководилац пројекта:	Горан Димић
Организација:	Факултет техничких наука, Чачак, Институт „Михајло Пупин“, Београд
Одговорно лице	Урош Пешовић, email: pesovic@yahoo.com
Реализатори:	Урош Пешовић, Синиша Ранђић, Горан Димић

2. Евалуација техничког решења

- Сажетак описа техничког решења:* Техничко решење – реализација система за одређивање вероватноће грешке бежичног преноса у IEEE 802.15.4 мрежама представља систем за истраживање на плану бежичних комуникација. Имајући у виду да овакви системи нису комерцијално доступни аутори су учинили напор да коришћењем комерцијално расположивих компонената уз одговарајућу софтверску надградњу реализују систем који ће бити од велике користи у даљим истраживањима у оквиру овог пројекта, али и за потребе других пројеката у овој области. Систем омогућава одређивање вероватноће грешке, при преносу података у IEEE 802.15.4 мрежама, која настаје утицајем позадинског шума, интерференције од стране других мрежа, као и колизија између уређаја у оквиру исте мреже.
- Релевантност техничког решења за примењену област:* Одређивање вероватноће грешке при преносу података у рачунарским мрежама представља један од важних изазова у савременим телекомуникацијама. Значај овог проблема је увећан са ширењем бежичних мрежа, као што је мрежа која ради по стандарду IEEE 802.15.4. Разматрано техничко решење је веома значајно за истраживање на плану одређивања вероватноће грешке преноса у поменутом типу мрежа, јер не постоје одговарајући комерцијални системи. Такође, треба указати и на могућности система у погледу праћења појаве грешака при преносу, које су последица деловања позадинског шума, интерференције од стране сличних мрежа, као и колизија које постоје унутар саме мреже која се испитује.
- Проблем који се решава:* Овим техничким решењем омогућава се праћење појаве грешака у преносу података у IEEE 802.15.4 мрежи, идентификација одговарајућих параметара и на бази тога одређује се вероватноћа појаве грешака. С друге стране реализацијом овог система превазилази се недостатак одговарајућег комерцијалног уређаја.
- Станje решености истог проблема у свету:* Обим примене бежичних рачунарских мрежа, а тиме и мрежа типа IEEE 802.15.4 постаје све већи.

Сходно томе услови у којима се бежичне комуникације остварују све су неповољнији, што значајно утиче на повећавање нивоа грешака у преносу података. Овакве околности захтевају идентификовање утицаја окружења на појаву грешака тако да је познавање вероватноће појаве грешака при преносу од великог значаја. Међутим, и поред тога не постоје комерцијално доступни одговарајући системи, што разматрано техничко решење додатно чини значајним достигнућем у овој области.

5. *Квалитет објашњења и описа решења:* Техничко решење описано јасним језиком уз коришћење потребног броја слика и табела. При томе опис је концизан и добро структуриран.
6. *Примењивост резултата рада:* Представљено техничко решење реализовано је у складу са постављеним функционалним захтевима, што омогућава да имплементирани систем може да се користи за одређивање вероватноће појаве грешака при преносу података у оквиру мрежа типа IEEE 802.15.4 у условима постојања позадинског шума, интерференције са другим мрежама истог типа односно колизије пакета до којих долази унутар исте IEEE 802.15.4 мреже.
7. *Научни допринос:* Научни допринос овог решења се огледа пре свега у реализацији система који омогућује истраживања на плану квалитета преноса података у IEEE 802.15.4 мрежама, кроз одређивање корелације између вероватноће појаве грешке и услова у којима се пренос остварује, који се дефинишу нивоом позадинског шума, нивоом интерференције са другим мрежама истог типа и појавом колизија које настају унутар једне мреже.

ОПШТА ОЦЕНА КВАЛИТЕТА РАДА: Решење је комплетно и квалитетно урађено.

Да ли се техничко решење прихвата (Да или Не): Решење се прихвата.

3. Квалитети техничког решења

Основни квалитет реализованог система огледа се у чињеници да он у потпуности обезбеђује услове за истраживање на плану идентификовања интензитета појаве грешака при преносу у IEEE 802.15.4 мрежама у функцији главних параметара који утичу на вероватноћу појаве грешака. Такође, треба нагласити да је систем развијен на бази комерцијално расположивих компонената, које су развојем одговарајуће софтверске подршке интегрисани у јединствену целину. Систем је у основи модуларан, јер се додањем нових мрежних компонената може утицати на промену услова у којима у којима се пренос података одвија чиме сешири област примене овог система у истраживачке сврхе.

4. Примедбе на техничко решење

4.1 Суштинске примедбе

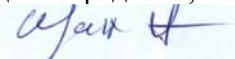
Немам суштинских примедби на ово техничко решење.

4.2 Ситније примедбе

У Београду, 22. јануар 2013. године

Рецензент

др Слободан Обрадовић, ванр. проф.



Fakultet tehničkih nauka, Čačak
Institut Mihajlo Pupin, Beograd

SISTEM ZA ODREĐIVANJE VEROVATNOĆE GREŠKE BEŽIČNOG PRENOSA U IEEE 802.15.4 MREŽAMA

Projekat: **Razvoj i modelovanje energetsko efikasnih, adaptibilnih,
višeprocesorskih i višesenzorskih elektronskih sistema male
snage**

Oznaka projekta: **TR32043**
Rukovodilac projekta: **Goran Dimić**

Vrsta dokumenta: **Tehnička dokumentacija projekta**
Stepen poverljivosti: **poverljivo - interno**

Odgovorno lice:

Uroš Pešović, e-mail: pesovic@yahoo.com

Realizatori:

Pešović Uroš, Randić Siniša, Dimić Goran

SADRŽAJ:

1. KRATAK OPIS TEHNIČKOG REŠENJA	3
2. STANJE U SVETU	5
3. DETALJAN OPIS TEHNIČKOG REŠENJA.....	5
3.1 Uvod	5
3.2 Specifikacija sistema	5
3.2.1 Funkcionalni zahtevi	5
3.2.2 Interfejsi.....	6
3.2.3 Uslovi rada i klimo – mehaničke karakteristike	6
3.2.4 Cena	6
3.3 Arhitektura sistema.....	6
3.3.1 Arhitektura predajnika.....	7
3.3.2 Arhitektura prijemnika	9
3.3.3 Arhitektura računarske aplikacije	10
3.4 Verifikacija sistema	12
3.4.1 Verifikacija predajnika	12
3.4.2 Verifikacija prijemnika.....	13
3.4.3 Verifikacija računarske aplikacije	13

1. KRATAK OPIS TEHNIČKOG REŠENJA

Primena od (dd.mm.gggg): 13.07.2012. godine

Godina: 2012

Odgovorno lice: Uroš Pešović

Opis:

Digitalne bežične komunikacije, kao i ostali vidovi komunikacija, podložne su smetnjama koje se ogledaju u pojavi grešaka u prenosu korisnih informacija. Greške u bežičnim komunikacijama mogu nastati usled uticaja pozadinskog šuma i interferencije drugih tipova mreža, kao i kolizija signala u mreži nastalih od uređaja koji ne poštuju pravo pristupa medijumu. Poznavanje verovatnoće greške prenosa u IEEE 802.15.4 mrežama važno je kod primene ovih mreža u realnom okruženju. Sistem predstavljen ovim tehničkim rešenjem namenjen je za merenje verovatnoće greške bežičnog prenosa u IEEE 802.15.4 mrežama, nastalih usled uticaja pozadinskog šuma, interferencije drugih mreža i kolizija nastalih između uređaja unutar IEEE 802.15.4 mreže.

Merenje parametara verovatnoće greške u bežičnom prenosu IEEE 802.15.4 mreža, zahteva pristup svim stepenima primopredajnika. Komercijalno dostupni IEEE 802.15.4 primopredajnici su u principu realizovani kao monolitne komponente kod kojih je nemoguć pristup unutrašnjim stepenima primopredajnika. Proces modulacije na predajniku je jednoznačno određen sadržajem paketa koji se šalje, pa se u tom slučaju tačno zna šta će se odvijati u unutrašnjim stepenima predajnika. Za razliku od predajnika, prijemnik će demodulisati primljeni signal sa većom ili manjom greškom, koju nije moguće izmeriti na izlazu komercijalnih predajnika za sve unutrašnje stepene. Za potrebe realizacije predstavljenog sistema, IEEE 802.15.4 primopredajnik je realizovan na platformi softverskog radija, pri čemu je omogućen pristup svim stepenima prijemnika, a time i uvid u greške nastale prilikom prijema. Realizovani sistem se sastoji od računara, dva IEEE 802.15.4 kompatibilna predajnika i softverskog radija sa implementiranim IEEE 802.15.4 prijemnikom. Jedan od predajnika se koristi za slanje paketa podataka na kojima se prati verovatnoća pojave greške, dok se drugi koristi kako bi stvarao koliziju na prijemniku. Računarska aplikacija, koja je razvijena za potrebe ovog sistema ima zadatak da generiše i prima pakete, prati i broji greške nastalih na „čip“ sekvencama, simbolima, bitovima između poslatih i primljenih paketa. Na osnovu prikupljenih grešaka određuje se verovatnoća greške u prenosu.

Tehničke karakteristike:

Bežična komunikacija: IEEE 802.15.4

Frekventni opseg: 2.4 GHz ÷ 2.5 GHz

Predajna snaga: -30 dBm ÷ 0 dBm

Žična mreža: Gigabit Ethernet

Tehničke mogućnosti:	Realizovani sistem generiše, šalje i prima pakete u skladu sa IEEE 802.15.4 standardom, poredi poslate sa primljenim paketima, broji nastale greške i određuje verovatnoću pojave greške u bežičnom prenosu kod IEEE 802.15.4 mreža.
Realizatori:	Pešović Uroš, Randić Siniša, Goran Dimić
Korisnici:	Realizovani sistem se koristi u laboratoriji za obradu signala i daljinsko upravljanje, Fakulteta za elektrotehniku, računarstvo i informatiku, Univerziteta u Mariboru u Sloveniji. Nabavkom softverskog radija za potrebe ovog projekta, sistem će biti korišćen u istraživačkom radu i na Fakultetu tehničkih nauka u Čačku i Institutu „Mihajlo Pupin“ u Beogradu.
Podtip rešenja:	Prototip (M85)

2. STANJE U SVETU

Određivanje verovatnoće greške u bežičnom prenosu, po pravilu se vrši za potrebe istraživanja na polju bežičnih komunikacija tako da se takvi sistemi komercijalno ne proizvode. Ovakvi sistemi se najčešće realizuju od strane istraživača koji ih neposredno koriste. Oni se realizuju korišćenjem komercijalno dostupnih komponenti koje se integrišu u jedan eksperimentalni sistem. Kako bi se postupak prikupljanja i obrade podataka ubrzao i automatizovao, računar je nezaobilazni deo jednog ovakvog sistema.

Realizovani uređaj predstavljen ovim tehničkim rešenjem pruža mogućnost merenja verovatnoće greške bežičnog prenosa u IEEE 802.15.4 mrežama, koje nastaju pod uticajem pozadinskog šuma, interferencije od strane drugih mreža kao i kolizija između uređaja unutar IEEE 802.15.4 mreže.

3. DETALJAN OPIS TEHNIČKOG REŠENJA

3.1 Uvod

Bez obzira što su digitalne bežične komunikacije otpornije na uticaj smetnji, one su ipak podložne smetnjama što se ogleda u pojavi grešaka pri prenosu korisnih informacija. Greške u bežičnim komunikacijama nastaju usled uticaja pozadinskog šuma i interferencije drugih mreža, kao i kolizije unutar mreže, kada uređaji ne poštuju pravo pristupa medijumu. Kako bi se povećala otpornost na smetnje, savremeni primopredajnici koriste tehnike proširenog spektra, što je i slučaj sa primopredajnicima kompatibilnim sa IEEE 802.15.4 standardom. Korišćenje ovakvih tehnika značajno povećava kompleksnost IEEE 802.15.4 primopredajnika, ali unosi i složenost u pogledu korišćenja matematičkog aparata potrebnog za određivanje očekivane verovatnoće pojave greške u bežičnom prenosu. U takvim situacijama najčešće se koriste empirijski modeli verovatnoće pojave greške bazirani na izmerenim podacima u realnim ili laboratorijskim uslovima.

Sistem predstavljen ovim tehničkim rešenjem namenjen je za merenje verovatnoće greške prenosa u IEEE 802.15.4 bežičnim mrežama, koje nastaju usled uticaja pozadinskog šuma, interferencije drugih mreža i kolizije paketa nastalih unutar IEEE 802.15.4 mreže.

3.2 Specifikacija sistema

3.2.1 Funkcionalni zahtevi

Sistem za određivanje verovatnoće greške bežičnog prenosa u IEEE 802.15.4 mrežama mora da poseduje sledeće funkcionalne karakteristike:

- **Transmisija paketa željenog sadržaja** – predajnik mora poslati sadržaj paketa koji dobija od strane računarske aplikacije u skladu sa IEEE 802.15.4 standardom.
- **Izbor predajne snage, radnog kanala i zadrške slanja paketa** – predajnik šalje primljeni paket specificiranim nivoom predajne snage, transmisionim kanalom i sa željenom zadrškom, dobijenom od strane računarske aplikacije.
- **Kreiranje kolizije paketa na prijemniku** – predajnik zadužen za stvaranje kolizije mora biti sinhronizovan sa predajnikom koji šalje paket.
- **Prijem i demodulacija primljenog paketa** – primljeni signal se na prijemniku demoduliše u skladu sa IEEE 802.15.4 standardom i dobijeni paket se šalje računarskoj aplikaciji.

- **Poređenje poslatog i primljenog paketa i brojanje grešaka** – poslati i primljeni paket se upoređuju kako bi se izbrojale greške na „čip“ sekvencama, simbolima, bitovima i u celim paketima
- **Automatizovan rad** – računarska aplikacija samostalno vodi postupak merenja verovatnoće greške kroz unapred određen broj iteracija određen od strane korisnika

3.2.2 Interfejsi

Realizovani sistem za komunikaciju sa predajnicima koristi virtuelnu serijsku vezu koja je implementirana korišćenjem USB CDC protokola na USB portu. Predajnicima je jednoznačno dodeljen odgovarajući virtuelni serijski port na osnovu svog deskriptora.

Prijemnik sa računarom komunicira putem Gigabina Ethernet-a, što podrazumeva da računar poseduje Gigabit Ethernet mrežni adapter. Softverski radio može biti direktno povezan sa računarom putem Cat5 ukrštenog kabla ili preko Gigabit Ethernet switch-a.

3.2.3 Uslovi rada i klimo – mehaničke karakteristike

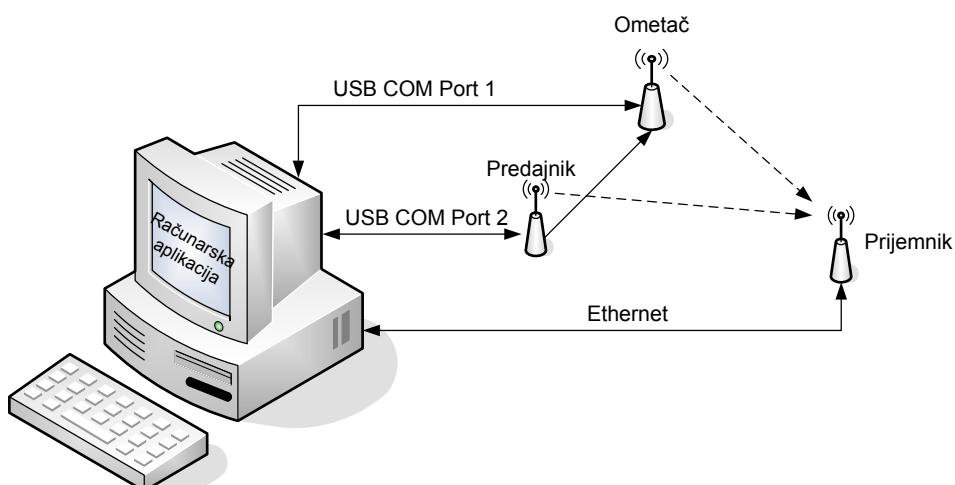
Sistem može raditi u opsegu radnih temperatura od 0°C do +55°C.

3.2.4 Cena

Cena sistema uključujući dva predajnika i softverski radio iznosi oko 2000 €

3.3 Arhitektura sistema

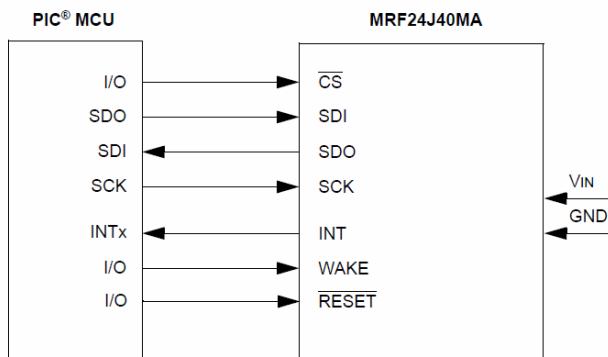
Sistem za određivanje verovatnoće greške u bežičnom prenosu poredi pakete poslate od strane predajnika sa paketima primljenim od strane prijemnika. Kako bi se simulirao uticaj kolizija usled istovremene transmisije sa drugog IEEE 802.15.4 predajnika, iskorišćen je još jedan predajnik koji ima ulogu ometača i koji šalje pakete podataka koji su slučajnog sadržaja (slika 1). Ometač je sinhronizovan sa predajnikom žičnom vezom kako bi započeo istovremenu transmisiju sa predajnikom i kako bi na prijemniku izazvao koliziju paketa. Paketi primljeni od strane prijemnika, šalju se u računarsku aplikaciju, gde se demodulišu kako bi se izdvojio koristan sadržaj i uporedio sa poslatim paketom. Poređenjem primljenih i poslatih paketa, računarska aplikacija broji nastale greške i određuje verovatnoću pojave greške u bežičnom prenosu.



Slika 1. Arhitektura sistema za merenje verovatnoće greške

3.3.1 Arhitektura predajnika

Radio predajnik namenjen je za slanje paketa koji se dobijaju od strane računarske aplikacije. Radio predajnik realizovan je korišćenjem razvojnog sistema OLIMEX P1343, baziranom na mikrokontroleru sa ARM Cortex M3 arhitekturom. Razvojni sistem povezan je sa računarom USB vezom preko koje se istovremeno i napaja. Razmena podataka sa računarom vrši se putem USB CDC protokola koji ovu vezu predstavlja kao virtuelni serijsku vezu. Razvojni sistem proširen je preko UEXT konektora komunikacionim adapterom na kome se nalazi Microchip MRF24J40MA, IEEE 802.15.4 kompatibilni primopredajnik. Komunikacija mikrokontrolera sa MRF24J40MA primopredajnikom odvija se putem četvorozične SPI magistrale i dodatnih ulazno/izlaznih signala (slika 2). U tabeli 1 dat je opis ulazno/izlaznih kontakata na UEXT konektoru za MRF24J40MA komunikacionu karticu.

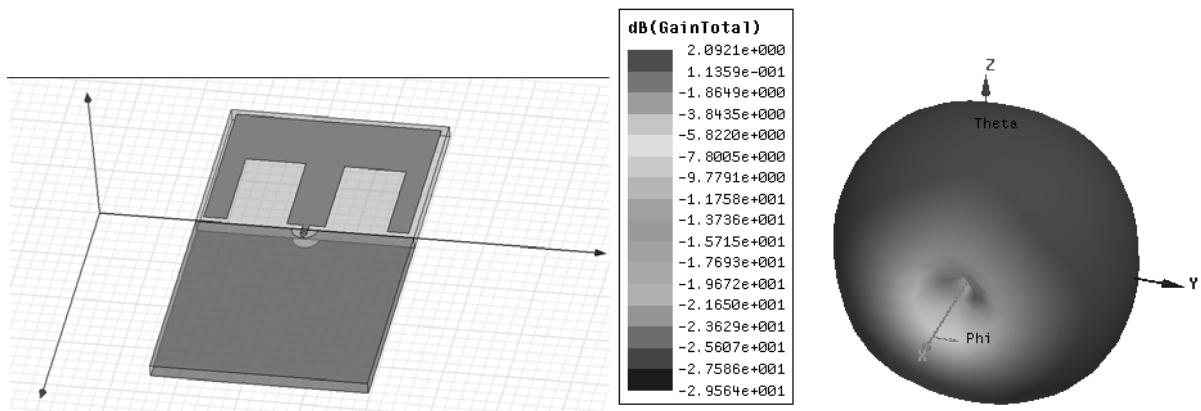


Slika 2. Interfejs mikrokontrolera sa MRF24J40MA primopredajnikom

Tabela 1. Opis ulazno/izlaznih kontakata MRF24J40MA primopredajnika

Kontakt	Simbol	Tip	Opis
1	VIN	Napajanje	Napajanje 3.3 V
2	GND	Napajanje	Masa
3	WAKE	Digitalni ulaz	Eksterno uključenje primopredajnika
4	INT	Digitalni izlaz	Signalizaciju prekida mikrokontroleru
5	RESET	Digitalni ulaz	Globalni hardverski reset
6	---	-----	-----
7	SDI (MISO)	Digitalni ulaz	Ulaz podataka serijskog interfejsa
8	SDO (MOSI)	Digitalni izlaz	Izlaz podataka serijskog interfejsa
9	SCK	Digitalni ulaz	Takt serijskog interfejsa
10	SSEL (CS)	Digitalni ulaz	Kontakt za aktivaciju SPI interfejsa

MRF24J40MA primopredajnik radi u frekventnom opsegu od 2.4 GHz. Ovaj frekventni opseg podeljen je u šesnaest kanala, pri čemu je brzina prenosa unutar jednog kanala 250kbps. Nominalna predajna snaga predajnika iznosi 1 mW (0 dBm), dok je osjetljivost prijemnika -94dBm, što omogućava prenos na razdaljinama do 120 m u otvorenom prostoru ili 30 m u zatvorenom prostoru. PCB antena, izrađena u gornjem bakarnom sloju, poseduje dijagram zračenja sličan dipolnoj anteni. Zračenje antene je najslabije duž centralne ose antene (X-ose), dok je u ravni normalnoj na ovu osu dijagram zračenja uniforman (slika 3). Kako bi se obezbedila pouzdana komunikacija sa prijemnikom, centralna X-osa antene, duž koje je zračenje antene najslabije, usmerena je vertikalno. Na taj način antena će imati uniformno zračenje u horizontalnoj ravni, na kojoj će se nalaziti prijemnik. Zahtevana orientacija antene zahteva povezivanje komunikacione kartice upravno na horizontalnu glavnu štampanu ploču OLIMEX P1343 razvojnog sistema.



Slika 3. Orientacija i dijagram zračenja MRF24J40MA primopredajnika

Računarska aplikacija preko USB virtuelnog serijskog porta šalje predajniku paket koji on treba da emituje, a koji se sastoji iz sledećih polja:

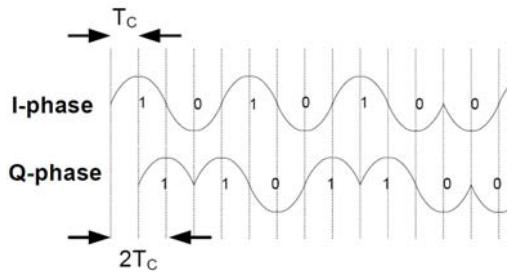
1. Dužina paketa (0 do 127 bajtova)
2. Sadržaj paketa (niz bajtova definisan dužinom paketa)
3. Kanal za slanje (kanali 11 do 26)
4. Predajna snaga (-36 dBm do 0 dBm)
5. Zadrška slanja paketa (10 do 2550 ms)
6. Provera tačnosti

Paket koji se šalje predajnikom, prvo se podeli na simbole koji su veličine 4 bita. Kako bi se implementirala tehnika proširenog spektra, svaki simbol se zameni odgovarajućom sekvencom od 32 „čipa“. Ove sekвенце „čipova“ sadrže jednak broj nula i jedinica i odabrane su tako da se što više razlikuju jedna od druge. Sekvence „čipova“ su podeljene u dve grupe sekvenci (C_0 do C_7 i C_8 do C_{15}), gde se sekvence iz jedne grupe formiraju cikličnim pomeranjem „čipova“ prethodne sekvence za četiri mesta u desno. „Čip“ sekvence druge grupe dobijaju se inverzijom vrednosti neparnih čipova odgovarajuće sekvene iz suprotne grupe sekvenci (C_0 u C_8 ; C_1 u C_9 ; ... ; C_7 u C_{15}). Tabela preslikavanja simbola u sekvene „čipova“ prikazana je u tabeli 2.

Tabela 2: Preslikavanje IEEE 802.15.4 simbola u čip sekvene

Simbol	Čip sekvenca	Simbol	Čip sekvenca
S_0 (0x0)	C_0 (0x744AC39B)	S_8 (0x8)	C_8 (0xDEE06931)
S_1 (0x1)	C_1 (0x44AC39B7)	S_9 (0x9)	C_9 (0xEE06931D)
S_2 (0x2)	C_2 (0x4AC39B74)	S_{10} (0xA)	C_{10} (0xE06931DE)
S_3 (0x3)	C_3 (0xAC39B744)	S_{11} (0xB)	C_{11} (0x06931DEE)
S_4 (0x4)	C_4 (0xC39B744A)	S_{12} (0xC)	C_{12} (0x6931DEE0)
S_5 (0x5)	C_5 (0x39B744AC)	S_{13} (0xD)	C_{13} (0x931DEE06)
S_6 (0x6)	C_6 (0x9B744AC3)	S_{14} (0xE)	C_{14} (0x31DEE069)
S_7 (0x7)	C_7 (0xB744AC39)	S_{15} (0xF)	C_{15} (0x1DEE0693)

Sekvence „čipova“ se potom modulišu O-QPSK HSS digitalnom modulacijom. Ova kvadratna modulacija koristi dva ortogonalna I/Q signala, gde „čipovi“ sa parnim indeksom modulišu I signal, a čipovi sa neparnim indeksom modulišu Q signal. Kvadratni impulsi oba signala oblikuju se množenjem sa polusinusoidom. Q signal se zakasni za period trajanja jednog „čipa“ nakon čega se sabira sa I signalom i moduliše na noseći signal od 2.4 GHz (slika 4). Korišćenjem ove modulacije ostvaruje se kontinualna promena faze signala što omogućava pojačavanje ovako modulisanih signala sa nelinearnim pojačivačima koji se koriste u energetski efikasnim IEEE 802.15.4 primopredajnicima.

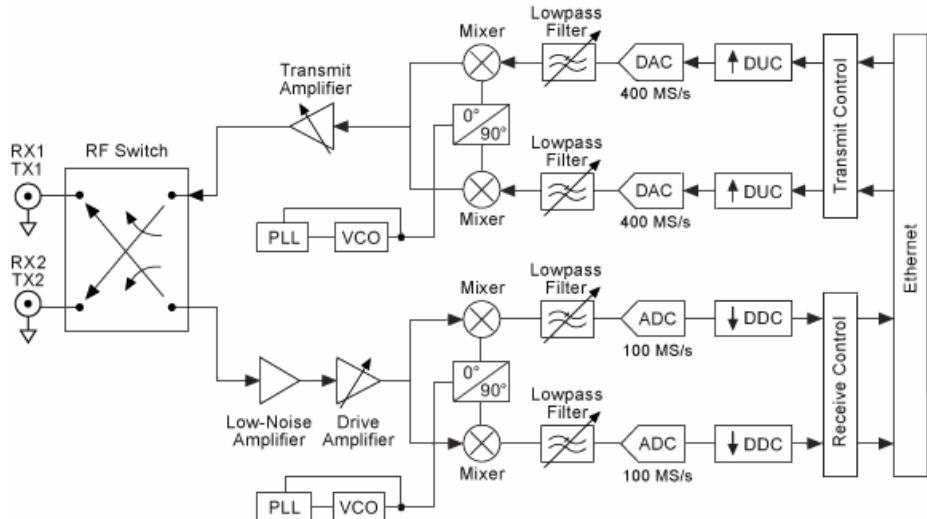


Slika 4. O-QPSK HSS modulacija čip sekvence S_0

3.3.2 Arhitektura prijemnika

Komercijalno dostupni IEEE 802.15.4 primopredajnici se realizovani kao monolitne komponente kod kojih nije moguć pristup unutrašnjim stepenima prijemnika. Korišćenjem softverskog radija omogućava se izrada bežičnih primopredajnika sa otvorenim pristupom svim delovima primopredajnika što je od značaja u istraživanju i brzom razvoju novih arhitektura primopredajnika. Softverski radio omogućava da se radio signali mogu direktno uvesti u računar kako bi se mogao pratiti njihov spektar, ili demodulacijom izdvojiti njihov koristan sadržaj.

Ettus USRP N210 softverski radio predstavlja programabilnu radio platformu zasnovanu na Xilinx® Spartan® 3A-DSP 3400 FPGA čipu na kome se može implementirati procesiranje radio signala. Ovaj softverski radio je modularna platforma kod koje je primopredajni modul realizovan u vidu izmenljivih primopredajnih adaptera koji omogućavaju rad u frekventnom opsegu od najnižih frekvencija do frekvencija od 6 GHz. Takođe, dva ili više softverskih radio uređaja mogu se spojiti u jedinstven MIMO (Multiple In-Multiple Out) sistem preko odgovarajućih konektora. Primopredajni adapteri su povezani sa FPGA kolo preko dvokanalnih A/D i D/A konvertora koji postižu brzine od 100 MS/s i 400MS/s respektivno. Softverski radio ostvaruje vezu sa računaram preko Gigabit-nog Ethernet adaptera koji omogućava brzinu prenosa radio signala do 50MS/s. FPGA kolo poseduje neiskorišćen prostor, na kojem se mogu implementirati procesno zahtevni moduli za prijemnu i za predajnu stranu, kako bi se povećala brzina obrade i odziva, a smanjila opterećenost računarske aplikacije. U ovom tehničkom rešenju korišćen je softverski radio NI USRP-2921 koji u osnovi predstavlja Ettus USRP N210 softverski radio sa integrisanim primopredajnim adapterom XCVR2450 koji podržava rad u frekventnim opsezima 2.4-2.5 GHz i 4.9-5.9 GHz. Maksimalna predajna snaga XCVR2450 adaptera iznosi 100 mW (20 dBm). Blok dijagram NI USRP-2921 softverskog radija prikazan je na slici 5.



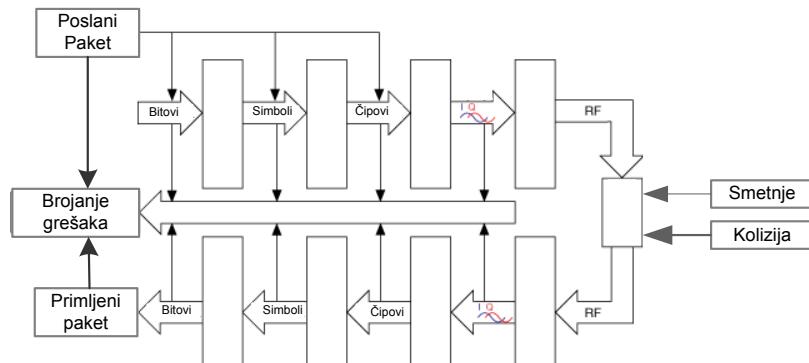
Slika 5. Blok dijagram NI USRP-2921 softverskog radija

NI USRP-2921 radio poseduje dve primopredajne antene koje su povezane sa ostatkom uređaja preko radio selektora. Primljeni radio signal se pojačava i demoduliše sa nosećim signalom određene frekvencije kako bi se izdvojio koristan signal. Pošto je u pitanju ortogonalna modulacija, dobijaju se dva ortogonalna signala, I i Q koji su fazno pomereni za $\pi/2$. Primljeni I/Q signali se filtriraju i digitalizuju 14-bitnim A/D konvertorima brzinom 100 MS/s. Digitalizovani I/Q signal se konvertuje željenom frekvencijom odabiranja i šalje u računar preko Gigabit-nog Ethernet – a. Maksimalna frekvencija odabiranja iznosi 25MS/s u režimu pune rezolucije (14-bitni mod) ili 50MS/s u režimu smanjene rezolucije (8-bitni mod). Tokom transmisije digitalni I/Q signali generisani od strane računarske aplikacije se konvertuju u signal frekvencije 400MS/s koji se dovodi na ulaz 16-bitnog D/A konvertora. Dobijeni analogni I/Q signal se moduliše signalom noseće frekvencije, pojačava se i šalje jednom od antena.

Softverski radio se povezuje sa računarcem preko Gigabit-nog Ethernet adaptera gde se može integrisati u Matlab i Labview aplikacije korišćenjem odgovarajućeg USRP drajvera. USRP drajver pruža mogućnost hardversko/softverske konfiguracije softverskog radija, kao i operacije prijema i transmisije podataka preko softverskog radija.

3.3.3 Arhitektura računarske aplikacije

Računarska aplikacija razvijena je u Matlab programskom paketu u vidu skript fajla bez grafičkog interfejsa. Uloga aplikacije je da generiše pakete za transmisiju predajnikom i da ih prima od strane prijemnika i da njihovim poređenjem u svim fazama uoči i izbroji greške nastale u bežičnom prenosu između predajnika i prijemnika(slika 6).



Slika 6. Uloga softverske aplikacije u sistemu

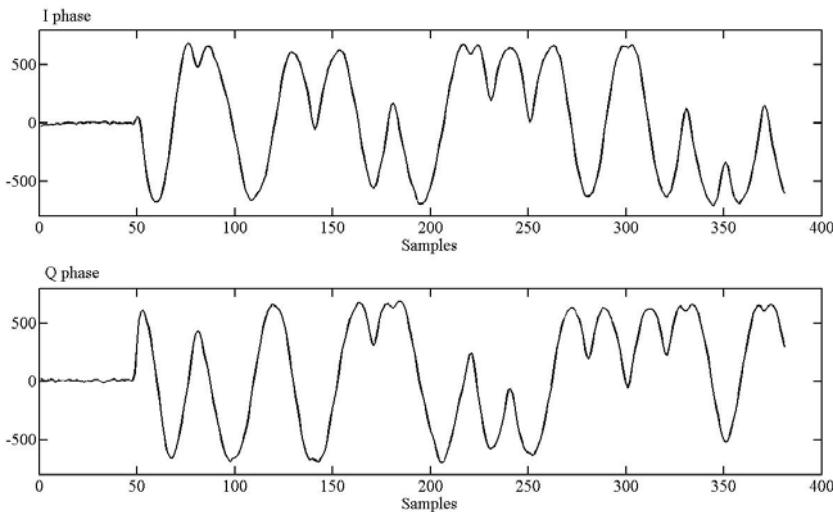
Aplikacija na početku inicijalizuje neophodne promenljive, kreira virtuelne serijske veze ka predajnicima i konfiguriše softverski radio za prijem poslatog paketa. Komunikacija sa predajnicima odvija se preko predefinisanih virtuelnih serijskih portova brzinom 115200 bps. Softverski radio se inicijalizuje kao objekat kojem se definiše IP adresa uređaja, centralna frekvencija, brzina odmeravanja i način prenosa signala. Centralna frekvencija kanala, određena brojem kanala, prikazana je jednačinom:

$$f = (k-11)*5 + 2405 \text{ MHz} \quad k = 11, 12, \dots, 26$$

Grupni prenos podataka omogućava prenos većeg broja odmeraka u jednom Ethernet paketu. Maksimalna veličina paketa sa I/Q signalima maksimalne rezolucije iznosi 362 odmerka i definisan je maksimalnom veličinom Ethernet paketa (MTU) koji iznosi 1492 bajta. Broj Ethernet paketa koji će se preneti u jednoj iteraciji iznosi 10000 paketa što odgovara ukupnom broju od 3620000 odmeraka, tj. vremenskom prozoru od oko 180 ms.

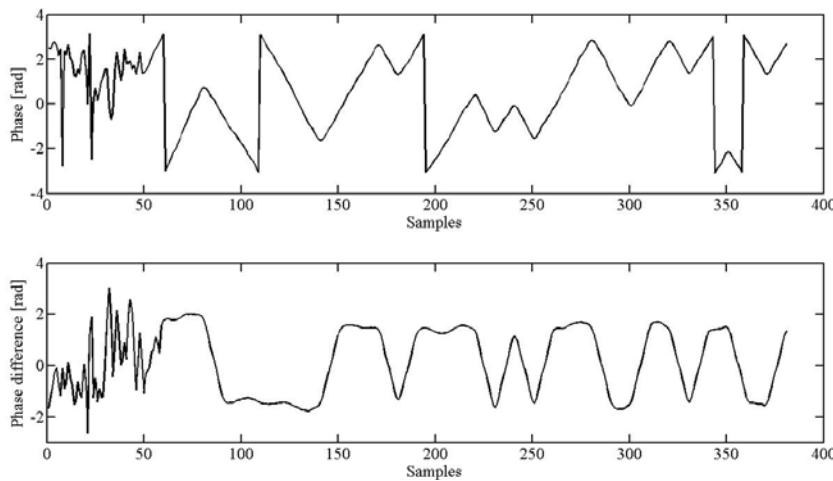
Softverski radio se koristi samo kao prijemnik, dok se sva obrada primljenih signala odvija u računarskoj aplikaciji.

Nakon inicijalizacije kreira se pseudoslučajni paket koji se serijskom vezom šalje predajniku. Predajniku se šalje dužina paketa i sadržaj paketa, kao i predajna snaga i kanal kojim će se slati paket. Takođe, predajniku se šalje i vremenska zadrška nakon koje će započeti slanje. Ovim se sprečava slanje paketa po prijemu, kako bi drugi pseudoslučajni paket bio predat i predajniku ometaču. Uspešno predati paket potvrđuje se računarskoj aplikaciji odgovarajućim kodom, nakon čega će započeti slanje paketa. Potom aplikacija započinje prijem signala sa softverskog radija, koji se prima u vidu grupa od 362 odmeraka I/Q signala u jednom Ethernet paketu. Početak prijema I/Q signala jednog paketa prikazan je na slici 7.



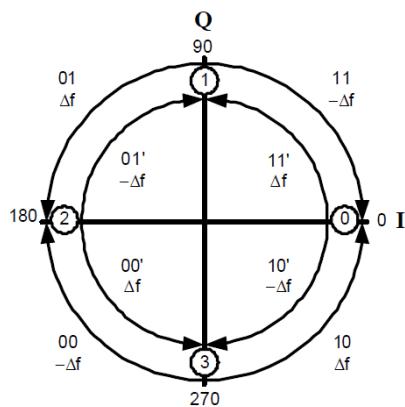
Slika 7. I/Q signal na početku prijema paketa

Nakon prijema sirovog I/Q signala, započinje proces fazne demodulacije kod koga se prvo određuje faza I/Q signala, a potom i promena faze u periodu trajanja jednog „čipa“ od $0.5 \mu\text{s}$. Faza signala i promena faze između dva „čipa“ prikazane su slikom 8.



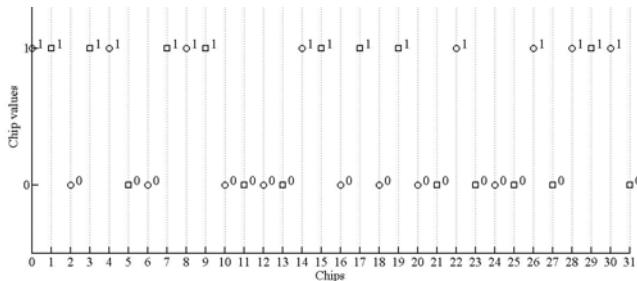
Slika 8. Faza i promena faze na početku prijema paketa

Izdvajanje korisnih informacija iz primljenog signala izvodi se korišćenjem tehnike diferencijalne detekcije, koja je prikazana na slici 9. Ukoliko je promena faze pozitivna, to znači da I/Q fazor obrće suprotno smeru kazaljke sati, a ukoliko je promena faze negativna, I/Q fazor se obrće u smeru kazaljke na satu.



Slika 9. Diferencijalno dekodiranje I/Q signala

Posmatranjem promene faze moguće je odrediti I i Q „čipove“ na osnovu prethodnih vrednosti „čipova“. Ukoliko se tokom perioda trajanja dva „čipa“ od 1 μ s, dogode dve suksesivne pozitivne ili negativne promene faze, doći će do promene vrednosti „čipa“; ukoliko se dogodi jedna pozitivna i jedna negativna promena faze, vrednost „čipa“ će ostati nepromenjena. Početne vrednosti I i Q sekvenci „čipova“ definisani su preambulom, koja se uvek šalje na početku paketa i koja je uvek jednaka „nultoj“ čip sekvenci. Na slici 10. prikazan je rezultat diferencijalnog dekodiranja primljenog signala iz koga se zapaža „nulta“ čip sekvenca koja predstavlja preambulu paketa.



Slika 10. Rezultat diferencijalnog dekodiranja preambule paketa

Primljena sekvenca od 32 „čipa“, poredi se sa svim 16 predefinisanim „čip“ sekvencima, pri čemu se kao rezultat uzima simbol čija je „čip“ sekvenca najsličnija primljenoj sekvenci. Cilj prijema preambule paketa, koja se sastoji od 7 „nultih“ čip sekvencima, je da se prijemnik sinhroniše sa dolazećim signalom. Ukoliko se primljena „čip“ sekvenca prambule ne dekodira kao nulta „čip“ sekvenca, potrebno je izvršiti fazno pomeranje odmeravanja, sve dok se kao rezultat ne dobije „nulta“ čip sekvenca. Kada se prijemnik sinhroniše sa primljenim signalom, nakon prijema simbola koji označava početak paketa, započinje prijem dužine paketa i samog sadržaja paketa.

Primljeni paket se poredi sa poslatim kroz sve stepene prijemnika, kako bi se uočile i prebrojale greške na „čipovima“, simbolima, bitovima i u paketima, tj. odredili parametri verovatnoća greške u IEEE 802.15.4 bežičnom prenosu. Ova sekvenca operacija se ponavlja za definisani broj iteracija od strane korisnika.

3.4 Verifikacija sistema

Verifikacija sistema izvršena je postupnom verifikacijom komponenti sistema: predajnika, prijemnika i računarske aplikacije.

3.4.1 Verifikacija predajnika

Hardversko/softverska verifikacija predajnika izvršena je prema sledećim procedurama:

- Prva procedura se odnosi proveru prisutnosti napajanja i ispravnog generisanog takta mikrokontrolera kada je MF24J40 komunikaciona kartica povezana sa mikrokontrolerom.
- Druga procedura se odnosi slanje predefinisanog paketa MRF24J40 radio primopredajnikom. Prijem poslatog paketa potvrđen je pomoću ZENA Network Analyzer uređaja za analizu saobraćaja u IEEE 802.15.4 mrežama.
- Treća procedura predstavlja proveru promene snage transmisije paketa na predajniku koja je potvrđena promenom snage primljenog paketa na ZENA Network Analyzer uređaju.
- Četvrta procedura predstavlja proveru promene kanala na kojem će predajnik slati pakete koja je potvrđena prijemom poslatih paketa na ZENA Network Analyzer uređaju na očekivanim kanalima.
- Petom procedurom provereno je funkcionisanje vremenske zadrške slanja paketa koje je potvrđeno praćenjem vremena prijema paketa pomoću ZENA Network Analyzer uređaja
- Šesta procedura predstavlja verifikaciju sinhronizacije slanja paketa sa predajnikom ometačom, koja je potvrđena kolizijom paketa na ZENA Network Analyzer uređaju.
- Sedma procedura predstavlja verifikaciju serijskog interfejsa. Predajniku je poslat paket koji on treba da pošalje, sa definisanim transmisionim kanalom, snagom transmisije i vremenskom zadrškom. Prijemnik je potvrdio uspešan prijem podataka odgovarajućim kodom.

3.4.2 Verifikacija prijemnika

Hardversko/softverska verifikacija prijemnika izvršena je prema sledećim procedurama:

- Prva procedura se odnosi proveru prisutnosti napajanja i funkcionalnog Ethernet interfejsa ka računaru.
- Druga procedura odnosi se na proveru prijema paketa poslatog od strane predajnika. Primljeni I/Q signali na softverskom radiju šalju se na računar preko Gigabit-nog Etherneta gde su posmatrani u vremenskom i frekventnom domenu.

3.4.3 Verifikacija računarske aplikacije

Softverska verifikacija računarske aplikacije izvršena je prema sledećim procedurama:

- Prva procedura se odnosi na inicijalizaciju i slanje paketa virtuelnom serijskom vezom koja je primljena od strane mikrokontrolerskog uređaja i vraćen nazad računarskoj aplikaciji.
- Druga procedura odnosi se na inicijalizaciju i prijem paketa sa softverskog radija koji je poslat od strane prijemnika.
- Treća procedura odnosi se na demodulaciju I/Q signala primljenih od strane softverskog radija. Primljeni signal je uspešno demodulisan i u potpunosti se poklapa sa paketom poslatim od strane prijemnika za uslov vrlo kvalitetnog prijema
- Četvrta procedura se odnosi na poređenje poslatog i primljenog kanala kao bi se uočile greške. Računarska aplikacija za istovetne pakete nije nalazila greške. Namernim izmenama na prijemnom paketu, aplikacija je uspevala da odredi tačan broj namerno generisanih grešaka na paketu.



Универзитет у Крагујевцу
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
Чачак

У Чачку, 29. јануара 2013. године

У име Факултета техничких наука у Чачку, Универзитета у Крагујевцу потврђује
се да је:

**Систем за одређивање вероватноће грешке бежичног преноса у IEEE 802.15.4
мрежама**

техничко решење у категорији М85 (прототип), реализован од стране Уроша Пешовића, Синише Ранђића (Факултет техничких наука у Чачку) и Горана Димића (Институт „Михајло Пупин“, Београд) коришћен за потребе истраживања на пројекту ТР32043 – Развој и моделовање енергетских ефикасних, адаптибилних, вишепроцесорских и вишесензорских система мале снаге, који је финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја. Резултати примене реализованог система представљени су домаћој и иностраној научној и стручној јавности. Одговарајуће референце су саставни део Извештаја о резултатима Пројекта у току друге године реализације.

Лабораторија за рачунарску технику

проф. др Синиша Ранђић

Декан Факултета техничких наука

проф. др Јеројлав Живанић

