



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Bojan Mrazovac

**Novo rešenje za detekciju prisustva i
kretanja ljudi u prostorijama na osnovu
analize signala u bežičnoj senzorskoj
mreži**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2016.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР :		
Идентификациони број, ИБР :		
Тип документације, ТД :	Монографска документација	
Тип записа, ТЗ :	Текстуални штампани материјал	
Врста рада, ВР :	Докторска дисертација	
Аутор, АУ :	Бојан Мразовац	
Ментор, МН :	проф. др Миодраг Темеринац	
Наслов рада, НР :	Ново решење за детекцију присуства и кретања људи у просторијама на основу анализе сигнала у бежичној сензорској мрежи	
Језик публикације, ЈП :	Српски / латиница	
Језик извода, ЈИ :	Српски	
Земља публиковања, ЗП :	Република Србија	
Уже географско подручје, УГП :	Војводина	
Година, ГО :	2016	
Издавач, ИЗ :	Ауторски репринт	
Место и адреса, МА :	Нови Сад; трг Доситеја Обрадовића 6	
Физички опис рада, ФО : (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	4/150/154/26/49/31/0	
Научна област, НО :	Електротехничко и рачунарско инжењерство	
Научна дисциплина, НД :	Рачунарска техника и рачунарске комуникације	
Предметна одредница/Кључне речи, ПО :	Детекција присуства и кретања људи, анализа базних компоненти, информациона ентропија, Фуријеова трансформација, индекс дисперзије, простирање радио таласа	
УДК		
Чува се, ЧУ :	У библиотеци Факултета техничких наука, Нови Сад	
Важна напомена, ВН :		
Извод, ИЗ :	Нерегуларност простирања радио таласа је уобичајени феномен који утиче на квалитет радио везе у оквиру бежичне мреже, резултујући различитим обрасцима простирања радио таласа. Ова теза даје предлог неколико поступака анализе простирања радио таласа у циљу без-сензорског откривања присуства и кретања људи унутар постојеће бежичне мреже. Индикатор примљене снаге радио сигнала представља основни елемент анализе, из ког се издвајају информационо, амплитудско и фреквентно обележје. Анализом наведених обележја могућа је реализација робусног поступка без-сензорске детекције људи која се може применити у различитим решењима амбијенталне интелигенције, захтевајући минималан број елемената физичке архитектуре, неопходних за успостављање кориснички свесног окружења.	
Датум прихватања теме, ДП :	11.09.2014	
Датум одбране, ДО :	11.02.2016	
Чланови комисије, КО :	Председник: проф. др Никола Теслић	
	Члан: проф. др Мирослав Поповић	
	Члан: проф. др Драган Кукољ	Потпис ментора
	Члан: проф. др Јован Ђорђевић	
	Члан, ментор: проф. др Миодраг Темеринац	



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :		
Identification number, INO :		
Document type, DT :	Monographic publication	
Type of record, TR :	Textual printed material	
Contents code, CC :	PhD thesis	
Author, AU :	Bojan Mrazovac	
Mentor, MN :	PhD Miodrag Temerinac	
Title, TI :	A novel solution for indoor human presence and motion detection in wireless sensor networks based on the analysis of radio signals propagation	
Language of text, LT :	Serbian	
Language of abstract, LA :	Serbian	
Country of publication, CP :	Republic of Serbia	
Locality of publication, LP :	Vojvodina	
Publication year, PY :	2016	
Publisher, PB :	Author's reprint	
Publication place, PP :	Novi Sad, Dositeja Obradovica sq. 6	
Physical description, PD : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	4/150/154/26/49/31/0	
Scientific field, SF :	Computing and Control Engineering	
Scientific discipline, SD :	Computer Engineering, Engineering of Computer Based Systems	
Subject/Key words, S/KW :	Human presence and motion detection, principal components analysis, information entropy, Fourier transform, dispersion index, radio propagation	
UC		
Holding data, HD :	The Library of Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia	
Note, N :		
Abstract, AB :	Radio irregularity is a common and non-negligible phenomenon that impacts the connectivity and interference in a wireless network, by introducing disturbances in radio signal's propagation pattern. In order to detect a possible presence of a human subject within the existing radio network sensorlessly, this thesis analyze the irregularity data expressed in a form of received signal strength variation. The received signal strength variation is decomposed into information, amplitude and frequency characteristics. The combination of these three characteristics analysis enables the definition of robust and cost-effective device-free human presence detection method that can be exploited for various ambient intelligence solutions, requiring the minimum hardware add-ons that are necessary for the establishment of a user aware environment.	
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	11.09.2014	
Defended on, DE :	11.02.2016	
Defended Board, DB :	President: PhD Nikola Teslic	
	Member: PhD Miroslav Popovic	
	Member: PhD Dragan Kukolj	Menthor's sign
	Member: PhD Jovan Djordjevic	
Member, Mentor:	PhD Miodrag Temerinac	

“Ako je neka tehnologija dovoljno napredna, ne može se razaznati da li je reč o tehnologiji ili magiji”

Arthur C. Clarke (1917 - 2008)

*Zahvaljujem se na saradnji, pomoći i dragocnim savetima
mom mentoru, prof. dr Miodragu Temerincu,
prof. dr Draganu Kukulju,
prof. dr Branislavu M. Todoroviću,
prof. dr Draganu Samardžiji,
kolegama doc. dr Milanu Bjelici, Bojanu Majstoroviću i Saši Vukosavljevu
za inspiraciju i nesebičnu pomoć tokom istraživanja,
mojim roditeljima i supruzi Aleksandri za svo strpljenje, bezrezervnu ljubav i podršku,
kolegama i osoblju RT-RK instituta, što su zajedno doprineli
stvaranju okruženja koje me je motivisalo tokom celokupnog istraživačkog rada.*

SADRŽAJ

Sažetak	XIII
Abstract	XV
UVOD	1
Predmet istraživanja.....	3
Cilj istraživanja	4
Naučni doprinos	4
Organizacija disertacije	5
POGLAVLJE 1.	7
Pregled stanja u oblasti	7
1.1 Dostupne senzorske tehnologije za detekciju ljudi	7
1.1.1 Vizualni senzori	9
1.1.2 Zvučni i ultrazvučni senzori	17
1.1.3 Infracrveni i mikrotalasni senzori	21
1.2 Postupci za detekciju prisustva i kretanja ljudi radio talasima.....	27
1.2.1 Osnovni pojmovi otkrivanja ljudi radio talasima i teorijska opravdanost postupka	27
1.2.2 Stanje u oblasti postupaka za RF detekciju prisustva i kretanja ljudi.....	29
POGLAVLJE 2.	35
Doprinosi disertacije u oblasti	35
2.1 Predlog postupaka za detekciju prisustva i kretanja ljudi	35
2.1.1 Agregacija podataka i utvrđivanje pragova detekcije.....	36
2.1.2 Algoritam minimalnog i maksimalnog odstupanja od srednje vrednosti	41
2.1.3 Primena baznih komponenti	45

2.1.4	Primena informacione entropije.....	50
2.1.5	Primena diskretne Furijeove transformacije i mera indeksa disperzije	51
2.1.6	Tok agregacije i obrade podataka programske podrške postupka RF detekcije	54
POGLAVLJE 3.		64
Verifikacija predstavljenih postupaka i rezultati ispitivanja.....		64
3.1	Sistem za eksperimentalnu verifikaciju postupaka rf detekcije	65
3.1.1	Centralna upravljačka jedinica.....	66
3.1.2	Pametne utičnice i pametni prekidači za osvetljenje	68
3.2	Rezultati ispitivanja.....	70
POGLAVLJE 4.		111
Zaključak i diskusija		111
Literatura		114

SPISAK TABELA

Tabela 1. Opis karakteristika optičkih kamera	13
Tabela 2. Opis karakteristika stereo kamera.....	14
Tabela 3. Opis karakteristika 3D TOF kamera.....	15
Tabela 4. Opis karakteristika 3D SL kamera.....	16
Tabela 5. Opis karakteristika zvučnih senzora	20
Tabela 6. Opis karakteristika ultrazvučnih senzora.....	21
Tabela 7. Opis karakteristika pasivnog infracrvenog senzora.....	24
Tabela 8. Opis karakteristika mikrotalasnih senzora.....	25
Tabela 9. Opis karakteristika predstavljenog postupka za RF detekciju ljudi.....	62
Tabela 10. Prostorne koordinate bežičnih čvorova i pozicija nepomične osobe u odnosu na koordinatni centar prostorije ispitivanja ZI (dato u cm).....	72
Tabela 11. Pragovi odstupanja vrednosti RSSI u okviru intervala dozvoljene varijacije i standardna devijacija, izračunati tokom inicijalizacije za radio veze od čvorova $N1$ i $N2$ u prostoriji ZI	75
Tabela 12. Pragovi odstupanja vrednosti RSSI u okviru intervala dovoljene varijacije i standardna devijacija, izračunati tokom inicijalizacije za radio veze od čvorova $N3$ i $N4$ u prostoriji ZI	75
Tabela 13. Greška detekcije kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (kretanju ili poziciji) u odnosu na broj odbiraka čije vrednosti pripadaju intervalu dozvoljene varijacije RSSI za čvorove $N1$ i $N2$ u prostoriji ZI	76

Tabela 14. Greška detekcije kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (kretanju ili poziciji) u odnosu na broj odbiraka čije vrednosti pripadaju intervalu dozvoljene varijacije RSSI za čvorove $N3$ i $N4$ u prostoriji $Z1$	77
Tabela 15. Greška odsustva kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (prostorija $Z1$ bez prisustva) u odnosu na broj odbiraka RSSI čije vrednosti prevazilaze interval dozvoljene varijacije RSSI za čvorove $N1$ i $N2$	78
Tabela 16. Greška odsustva kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (prostorija $Z1$ bez prisustva) u odnosu na broj odbiraka RSSI čije vrednosti prevazilaze interval dozvoljene varijacije RSSI za čvorove $N3$ i $N4$	78
Tabela 17. Prostorne koordinate bežičnih čvorova i pozicija nepomične osobe u odnosu na koordinatni centar prostorije ispitivanja $Z2$ (dato u cm)	86
Tabela 18. Pragovi odstupanja vrednosti RSSI u okviru intervala dovoljene varijacije i standardna devijacija, izračunati tokom inicijalizacije za radio veze od čvorova $N1$ i $N2$ u eksperimentalnoj prostoriji $Z2$	90
Tabela 19. Pragovi odstupanja vrednosti RSSI u okviru intervala dozvoljene varijacije i standardna devijacija, izračunati tokom inicijalizacije za radio veze od čvorova $N3$ i $N4$ u eksperimentalnoj prostoriji $Z2$	90
Tabela 20. Greška detekcije kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (kretanju ili poziciji) u odnosu na broj odbiraka čije vrednosti pripadaju intervalu dozvoljene varijacije RSSI za čvorove $N1$ i $N2$ u prostoriji $Z2$	91
Tabela 21. Greška detekcije kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (kretanju ili poziciji) u odnosu na broj odbiraka čije vrednosti pripadaju intervalu dozvoljene varijacije RSSI za čvorove $N3$ i $N4$ u prostoriji $Z2$	92
Tabela 22. Greška odsustva kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (prostorija $Z2$ bez prisustva) u odnosu na broj odbiraka RSSI čije vrednosti prevazilaze interval dozvoljene varijacije RSSI za čvorove $N1$ i $N2$	93
Tabela 23. Greška odsustva kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (prostorija $Z2$ bez prisustva) u odnosu na broj odbiraka RSSI čije vrednosti prevazilaze interval dozvoljene varijacije RSSI za čvorove $N3$ i $N4$	93
Tabela 24. Prostorne koordinate bežičnih čvorova i pozicija nepomične osobe, odnosno neživih objekata u odnosu na koordinatni centar prostorije ispitivanja $Z1$ (dato u cm)	101

Tabela 25. Prikaz vrednosti parametara disperzije frekventnog domena radio talasa RF detekcije tokom prisustva nepomične osobe u pozicijama $P1$ i $P2$, u odnosu na prisustvo objekata u istim pozicijama. Vrednosti se odnose na ceo vremenski interval dok se osoba ili objekat nalaze u odgovarajućoj poziciji.....	106
Tabela 26. Prostorne koordinate bežičnih čvorova i pozicija nepomične osobe u odnosu na koordinatni centar prostorije ispitivanja $Z3$ (dato u cm).....	107

SPISAK SLIKA

Slika 1. Dubinska slika dobavljena korišćenjem <i>Kinect</i> vizualnog senzora: a) izdvajanje objekata iz pozadine. Skaliranjem vrednosti parametra dubine na skalu boja od 0 do 255, svi objekti koji su bliži kameri imaju vrednosti bliže 255, a dalji imaju vrednosti bliže 0. b) upotrebom parametra dubine, preklopljeni objekti se jasno razlikuju.....	17
Slika 2. Distribuirana organizacija kao primer integracije postupaka RF detekcije prisustva i kretanja ljudi, ali i drugih objekata poput vozila.....	36
Slika 3. Centralizovana organizacija kao primer integracije postupaka RF detekcije prisustva i kretanja ljudi u sistemima kompleksnijeg odlučivanja.	37
Slika 4. Detekciona poruka – format zaglavlja i podataka.	55
Slika 5. Dijagram stanja i prelaska iz faze inicijalizacije u izvršnu fazu, uz generisanje funkcionalnog stanja u zavisnosti od prepoznatog prisustva.	56
Slika 6. Dijagram razmene podataka i naredbi u okviru centralizovanog pristupa detekcije.....	57
Slika 7. Dijagram razmene podataka i naredbi u okviru distribuiranog pristupa detekcije.....	58
Slika 8. Komunikacija i sinhronizacija između agregacione i izvršne niti.....	59
Slika 9. Blok dijagram algoritma opisanog postupka RF detekcije.....	60
Slika 10. OBLO infrastruktura: pametni prekidači za osvetljenje, pametna utičnica i centralna upravljačka jedinica za agregaciju i obradu odbiraka snage radio signala.....	66
Slika 11. Programaska podrška centralne upravljačke jedinice: RSSI jedinica za obradu je dodatni blok programske podrške neophodan za realizaciju postupaka RF detekcije ljudi.....	67
Slika 12. Sklop komponenti modula fizičke arhitekture pametne utičnice.	68

Slika 13. Sklop komponenti modula fizičke arhitekture pametnog prekidača za osvetljenje.	68
Slika 14. Programska podrška bežičnog čvora - pametne utičnice i prekidača za osvetljenje: RSSI jedinica za obradu je dodatno realizovan blok programske podrške neophodan za realizaciju postupaka RF detekcije ljudi.	69
Slika 15. Skica prostornog rasporeda prostorije ZI , u kojoj je ispitivana ispravnost postupaka za RF detekciju prisustva i kretanja ljudi. Simboli $N1 - N4$ označavaju bežične čvorove RF detekcije, dok simboli $P1 - P5$ označavaju prostorne pozicije nepomične osobe.	71
Slika 16. Dobavljene vrednosti RSSI tokom verifikacionog scenarija u prostoriji ZI za radio veze između čvorova $N1, N2$ i susednih čvorova.	73
Slika 17. Dobavljene vrednosti RSSI tokom verifikacionog scenarija u prostoriji ZI za radio veze između čvorova $N3, N4$ i susednih čvorova.	74
Slika 18. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji ZI , za dužinu niza od $p = 12$ odbiraka kliznog prozora matrice X	80
Slika 19. Greška detekcije u ZI za dužinu niza od $p = 12$ odbiraka kliznog prozora matrice X izračunata kao odnos ukupnog broja baznih komponenti tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.	80
Slika 20. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji ZI , za dužinu niza od $p = 24$ odbiraka kliznog prozora matrice X	81
Slika 21. Greška detekcije u ZI za dužinu niza od $p = 24$ odbiraka kliznog prozora matrice X izračunata kao odnos ukupnog broja baznih komponenti tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.	82
Slika 22. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji ZI , za dužinu niza od $p = 36$ odbiraka kliznog prozora matrice X	82
Slika 23. Greška detekcije u ZI za dužinu niza od $p = 36$ odbiraka kliznog prozora matrice X izračunata kao odnos ukupnog broja baznih komponenti tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.	83
Slika 24. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji ZI upotrebom CCIPCA inkrementalnog algoritma.	84

- Slika 25. Greška detekcije u $Z1$ analizom baznih komponenti izračunatih primenom CCIPCA postupka, data kao odnos ukupnog broja baznih komponenti izračunatih tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više..... 84
- Slika 26. Informaciona entropija baznih komponenti izračunata za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji $Z1$ 85
- Slika 27. Skica prostornog rasporeda prostorije $Z2$, u kojoj je ispitivana ispravnost postupaka za RF detekciju prisustva i kretanja ljudi. Simboli $N1 - N4$ označavaju bežične čvorove RF detekcije, dok simboli $P1 - P6$ označavaju prostorne pozicije nepomične osobe. 86
- Slika 28. Dobavljene vrednosti RSSI tokom verifikacionog scenarija u prostoriji $Z2$ za radio veze između čvorova $N1, N2$ i susednih čvorova. 87
- Slika 29. Dobavljene vrednosti RSSI tokom verifikacionog scenarija u prostoriji $Z2$ za radio veze između čvorova $N3, N4$ i susednih čvorova. 88
- Slika 30. Prosečna greška detekcije izračunata kao srednja vrednost grešaka detekcije u okviru postojećih radio veza između bežičnih čvorova tokom kretanja ili nepomičnog prisustva čoveka u nekoj od pozicija $P1 - P5$ u eksperimentalnim prostorijama $Z1$ i $Z2$ 93
- Slika 31. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji $Z2$, za dužinu niza od $p = 12$ odbiraka kliznog prozora matrice X 94
- Slika 32. Greška detekcije u $Z2$ za dužinu niza od $p = 12$ odbiraka kliznog prozora matrice X izračunata kao odnos ukupnog broja baznih komponenti tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više. 95
- Slika 33. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji $Z2$, za dužinu niza od $p = 24$ odbiraka kliznog prozora matrice X 95
- Slika 34. Greška detekcije u $Z2$ za dužinu niza od $p = 24$ odbiraka kliznog prozora matrice X izračunata kao odnos ukupnog broja baznih komponenti tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više. 96
- Slika 35. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji $Z2$, za dužinu niza od $p = 36$ odbiraka kliznog prozora matrice X 97

-
- Slika 36. Greška detekcije u $Z2$ za dužinu niza od $p = 36$ odbiraka kliznog prozora matrice X izračunata kao odnos ukupnog broja baznih komponenti tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.....97
- Slika 37. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji $Z2$ upotrebom CCIPCA inkrementalnog algoritma.....98
- Slika 38. Greška detekcije u $Z2$ analizom baznih komponenti izračunatih primenom CCIPCA postupka, data kao odnos ukupnog broja baznih komponenti izračunatih tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.98
- Slika 39. Informaciona entropija baznih komponenti izračunata za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji $Z2$99
- Slika 40. Skica prostornog rasporeda prostorije $Z1$, u kojoj je ispitivana ispravnost upotrebe indeksa disperzije za razlikovanje prisustva nepomičnog čoveka od objekta u istoj prostornoj poziciji. Simboli $N1 - N4$ označavaju bežične čvorove RF detekcije, dok simboli $P1$ i $P2$ označavaju prostorne pozicije nepomične osobe, odnosno objekta.....100
- Slika 41. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta verifikacije indeksa disperzije za razlikovanje prisustva nepomičnih ljudi od objekata u ispitnoj prostoriji $Z1$ upotrebom CCIPCA inkrementalnog algoritma.....101
- Slika 42. Greška detekcije ljudi i objekata u $Z1$ analizom baznih komponenti izračunatih primenom CCIPCA postupka, data kao odnos ukupnog broja baznih komponenti izračunatih tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.102
- Slika 43. Informaciona entropija baznih komponenti izračunata za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta za potrebe razlikovanja ljudi i objekata u ispitnoj prostoriji $Z1$: $P1$ i $P2$ predstavljaju ponašanje signala dok je čovek nepomično stajao u datim pozicijama, dok Objekat- $P1$ i Objekat- $P2$ predstavljaju ponašanje signala dok je objekat bio postavljen u istim pozicijama.103
- Slika 44. Spektralni domen niza usrednjenih magnituda odbiraka RSSI nakon primene FFT tokom eksperimenta razlikovanja prisustva nepomičnog čoveka i objekta: $P1$ i $P2$ su pozicije čoveka, $TP2$ je prelazak čoveka iz $P1$ u $P2$, dok $OP1$ i $OP2$ predstavljaju prisustvo

- objekta u pozicijama $P1$ i $P2$, a $TOP1$ i $TOP2$ tranzicije objekata ($TOP1$ – unošenje stolica u $OP1$, $TOP2$ – prenošenje stolica iz $OP1$ u $OP2$). 104
- Slika 45. Spektralni domen niza Medijanom filtriranih magnituda odbiraka RSSI nakon primene FFT tokom eksperimenta razlikovanja prisustva nepomičnog čoveka i objekta. 105
- Slika 46. Skica prostornog rasporeda prostorije $Z3$, u kojoj je ispitivana ispravnost postupaka za RF detekciju prisustva i kretanja ljudi. Simboli $N1 - N4$ označavaju bežične čvorove RF detekcije, dok simboli $P1 - P5$ označavaju prostorne pozicije nepomične osobe. 107
- Slika 47. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji $Z3$ upotrebom CCIPCA inkrementalnog algoritma. 108
- Slika 48. Greška detekcije ljudi i objekata u $Z3$ analizom baznih komponenti izračunatih primenom CCIPCA postupka, data kao odnos ukupnog broja baznih komponenti izračunatih tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više..... 109
- Slika 49. Informaciona entropija baznih komponenti izračunata za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji $Z3$ 109

SKRACENICE

2D	- <i>2-dimensional</i> , Dvodimenzionalno, (x, y) ose
3D	- <i>3-dimensional</i> , Trodimenzionalno, (x, y, z) ose
AD	- <i>Analog-to-digital</i> , Analogno-digitalno
AMDF	- <i>Average Magnitude Difference Function</i> , Funkcija prosečne razlike magnituda
AmI	- <i>Ambient Intelligence</i> , Ambijentalna Inteligencija
AP	- <i>Access Point</i> , Pristupna tačka radio mreže
CCD	- <i>Charge-Coupled Device</i> , Pravougaona matrica senzora
CCIPCA	- <i>Candid Covariance-free Incremental Principal Component Analysis</i> , Inkrementalna analiza baznih komponenti bez upotrebe kovarijacione matrice
CMOS	- <i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i> , Komplementarni metal-oksadni provodnik
DFT	- <i>Discrete Fourier Transform</i> , Diskretna Furijeova transformacija
DPFL	- <i>Device-free Passive Localisation</i> , Pasivna lokalizacija ljudi bez upotrebe prenosnih uređaja
FFT	- <i>Fast Fourier Transform</i> , Brza Furijeova transformacija
FPGA	- <i>Field Programmable Gate Arrays</i> , Konfigurabilno i programabilno integrisano kolo
GCC	- <i>Generalized Cross Correlation</i> , Generalizovana kros-korelacija
GMM	- <i>Gaussian Mixture Model</i> , Model sa Gausovim mešavinama
IR	- <i>Infrared</i> , Infracrveno
LED	- <i>Light-Emitting Diode</i> , Svetlosna dioda

LQI	- <i>Link Quality Indicator</i> , Indikator kvaliteta radio veze
M2M	- <i>Machine-to-Machine</i> , Mašina sa mašinom (komunikacija)
MSB	- <i>Most significant bits</i> , Biti najveće važnosti
P2P	- <i>Peer-to-peer</i> , Klijent-poslužilac komunikacija putem interneta
PCA	- <i>Principal components analysis</i> , Analiza baznih komponenti
PIR	- <i>Passive infrared</i> , Pasivni infracrveni
RF	- <i>Radio frequency</i> , Radio frekvencija
RSSI	- <i>Received signal strength indicator</i> , Indikator primljene snage signala
SFFT	- <i>Sparse Fast Fourier Transform</i> , Proređena brza Furijeova transformacija
SL	- <i>Structured Light</i> , Strukturirano osvetljenje
SNR	- <i>Signal-to-Noise Ratio</i> , Odnos signal šum
SoC	- <i>System-on-chip</i> , Sistem integrisan na čipu
STB	- <i>Set-Top Box</i> , Lokalni televizijski pretvarač
TDOA	- <i>Time Delay of Arrival</i> , Procena razlike vremena dolaska
TOF	- <i>Time-Of-Flight</i> , Vreme propagacije
USB	- <i>Universal Serial Bus</i> , Univerzalna serijska magistrala
VAD	- <i>Voice Activity Detection</i> , Otkrivanje glasovne aktivnosti
ViBE	- <i>Visual Background Extractor</i> , Vizualno izdvajanje pozadine
WSN	- <i>Wireless Sensors Networks</i> , Bežične senzorske mreže

Sažetak

U okviru doktorske disertacije realizovani su i ispitani postupci i algoritmi za detekciju prisustva i kretanja ljudi u zatvorenom prostoru bez upotrebe konvencionalnih senzorskih rešenja, već isključivo analizom osobina prostiranja radio talasa u prostoru. Za ovakav pristup dovoljno je postojanje mreže komunikacionih radio talasa, čije se osobine mogu dodatno iskoristiti u svrhu realizacije nove vrste senzora za otkrivanje ljudi. Međutim, negativni uticaji šuma i promena u okruženju, kao što je promena rasporeda statičnih objekata (npr. nameštaja) na kvalitet i ispravnost detekcije, predstavljaju osnovne nedostatke postojećih rešenja i jedan od glavnih uzroka zašto tehnologija detekcije prisustva i kretanja ljudi radio talasima nije još uvek komercijalno dostupna. Osnovna motivacija za istraživanje proizilazi upravo iz potrebe za unapređenjem postojećih metoda za detekciju ljudi i njihovu lokalizaciju radio talasima s ciljem da se realizuje rešenje koje će potisnuti uticaje šuma i poboljšati kvalitet i ispravnost detekcije.

Analizom osobina prostiranja radio talasa u okviru bežičnih senzorskih mreža, omogućena je realizacija naprednih statističkih modela neophodnih za implementaciju algoritama detekcije ljudi, optimizovanih za rad u realnom vremenu i primenljivih na širok spektar uređaja potrošačke elektronike, osposobljenih za bežičnu komunikaciju. Osnovna funkcionalnost bežičnih uređaja će se proširi mogućnošću detekcije prisustva i kretanja ljudi uz maksimalnu potisnutost uticaja šuma i iznenadnih promena u okruženju koje narušavaju ispravnost detekcije, a uz maksimalno održanje kvaliteta postojeće radio komunikacije.

Disertacija najpre daje pregled postojećih postupaka za detekciju prisustva i lokalizaciju ljudi u bežičnim senzorskim mrežama, sa posebnim osvrtom na klase statističkih modela obrade podataka koje su pogodne za primenu u namenskim računarskim sistemima za rad u realnom vremenu. Središte istraživanja je usmereno na numeričku obradu vrednosti indikatora primljene snage radio signala periodično očitanih sa svih uspostavljenih radio veza u oblasti detekcije. Nekorelisani odbirci snage radio signala se grupišu u zajedničku matricu snaga signala iz koje se

vrši ekstrakcija baznih komponenti neophodnih za dalju definiciju statističkih modela obrade podataka. Na taj način se dimenzionalnost sistema umanjuje, što je od velikog značaja za pojednostavljenje kompleksnosti obrade podataka, ali se održava neophodna varijabilnost prisutna u originalnom skupu odbiraka snage radio signala.

Kao rezultat doktorske disertacije, realizovan je metod detekcije prisustva i kretanja ljudi koji je u velikoj meri otporan na smetnje uslovljene preslušavanjem sa drugim radio talasima na istoj ili sličnim učestanostima, potom na smetnje izazvane uticajem ljudi ili objekata u blizini definisane zone detekcije, kao i na smetnje u okviru zone detekcije prouzrokovane promenom rasporeda statičnih objekata (promena pozadine – eng. *Background Update*). Kao kriterijum za poređenje teze sa postojećim rešenjima koriste se metrike za ocenu kvaliteta detekcije realizovanog rešenja, upravljivosti i kompleksnosti realizacije i integracije. Realizovani metod je jednostavan za implementaciju u finalni proizvod i optimizovan za integraciju i u sisteme skromnijih procesnih resursa.

Rezultujući postupak za detekciju prisustva i kretanja ljudi je integrisan u komercijalno dostupan sistem za inteligentno upravljanje stambenom električnom infrastrukturom – OBLO, razvijen na RT-RK Institutu za sisteme zasnovane na računaru i verifikovan je eksperimentalno. Rezultati ispitivanja potvrđuju mogućnost upotrebe radio talasa za detekciju kretanja i prisustva ljudi u objektima, proširujući osnovne funkcionalnosti bežičnih uređaja OBLO sistema sa sposobnošću detekcije prisustva i kretanja ljudi, bez potrebe za instalacijom bilo kakvih senzorskih uređaja za detekciju ljudi, već isključivo korišćenjem postojećih bežičnih uređaja i komunikacionih poruka između njih. Ovim je data i motivacija novim istraživačima da nastave sa daljim usavršavanjem detekcije prisustva ljudi radio talasima, koja bi u budućnosti mogla ravnopravno da parira, ali i da zameni čitav niz postojećih senzorskih tehnologija.

Abstract

Several methods and algorithms for indoor device-free human presence and motion detection have been proposed, implemented and verified during the research published in this thesis. Instead of using conventional human presence and motion detection sensors, the thesis explains the use of radio propagation characteristics for human detection in indoor environments. Such an approach requires the existence of active radio network, which main purpose as information transmitter can be extended with the human detection capability. However, the inherent noise caused by through-the-wall interferences associated with a human activity and various change of environmental properties, such as different furniture layout, can affect the radio propagation, by causing the increase of false detection alarms. Essentially, these are the main reasons why device-free human presence and motion detection technology is not yet commercially available. Therefore, the primary motivation for the research has been inspired with the need for the improvements of existing radio-based human detection and localization methods that would entirely suppress the noise and improve the detection quality.

The definition of advanced statistical models that describe the radio propagation patterns in a wireless environment is important for the realization of human detection algorithms optimized for real time appliances and applicable to a wide variety of wireless enabled consumer devices. As already mentioned, the primary functionality of such devices is extended with the human detection capability, including the ability to suppress the sudden peaks that can appear in the processed signal strength data, as a consequence of through-the-wall interferences or unexpected events in the environment that decrease the accuracy of the detection.

Foremost, the thesis gives an overview of available researches that are concerned with the topic of human presence and motion detection in wireless sensor networks, with the primary attention to the classes of data processing statistical models that are applicable to cost-effective and real-time embedded devices. The research is focused to numerical processing of RSSI

samples, periodically obtained from existing radio links in an area of interest. Uncorrelated RSSI samples are grouped into a single matrix used for principal components analysis, necessary for the definition of spatial radio waves propagation given through advanced statistical models. The system dimensionality can be decreased, which is important for the simplification of complex data processing, but the variability from the original data is preserved.

As a result, the thesis proposes the formulation and the implementation of a method for radio based human presence and motion detection which is resistant to different interferences from nearby radio frequencies, various noise caused by humans or other objects nearby the area of interest, or noise within the area of interest caused by the background update. The metrics used to compare the existing solutions with the proposed one include the quality of detection, usability and the complexity of the integration and the realization. The proposed method is simplified and optimized to be easily integrated into the final product, having the modest processing resources.

The proposed method for human detection is integrated into commercially available system for intelligent power control in residential electrical installations – OBLO, developed at the Institute for computer based systems, RT-RK. The testing results confirm the ability to extend OBLO with the detection capability, without the need for the installation of any conventional human detection sensors. The method only requires the enabled radio communication between wireless OBLO devices.

The results presented in this thesis should inspire the researches to continue with the further development and improvements of methods for radio based human detection. Even the initial goal was to improve the accuracy of radio based detection technology in regard to passive infrared, the results achieved should motivate the proposed detection technology to apply for a serious competition with more advanced human detection technologies, and to replace them in a near future.

UVOD

Razvoj inteligentnih računarskih sistema čiji je osnovni zadatak dobavljanje informacija i pružanje usluga, ali i obezbeđivanje komunikacije i zabave, konstantno evoluiraju prilagođavajući se korisniku, njegovim potrebama i navikama, a uz mogućnost predviđanja i njegovih želja. Ambijentalna Inteligencija (*eng. Ambient Intelligence - AmI*) predstavlja inovativan koncept koji se koristi za označavanje upravo takvih inteligentnih računarskih sistema koji omogućuju ljudima i uređajima da proaktivno interaguju jedni sa drugima, ali i sa okolinom u realnom vremenu (*Shadbolt, 2003*). Pouzdana i prirodna interakcija sa ljudima, kao i neprimetan izgled u okruženju predstavljaju osnovne prednosti AmI sistema u odnosu na ostale savremene uređaje i davaoce usluga. Počevši sa razvojem kasnih devedesetih kroz viziju jednostavne upotrebe sofisticiranih digitalnih sistema, AmI svoj upotrebnostni zenit predviđa između 2015. i 2020. godine. Pred ovu, veoma složenu oblast informacionih tehnologija, već su uveliko postavljeni različiti izazovi koji za krajnji cilj imaju zadatak da predvide i zadovolje svaku potrebu korisnika.

Sistemi pametnih kuća (*eng. Smart Home Systems*) predstavljaju jednu od najzastupljenijih komercijalnih instanci Ambijentalne Inteligencije. Koncipirani su tako da stambeni prostor učine prijatnijim i jednostavnijim za korišćenje i život. Zahvaljujući integrisanim mrežama bežičnih senzorskih uređaja, ovi sistemi prilagođavaju celokupnu infrastrukturu pametne kuće trenutnoj situaciji, pravovremeno interagujući sa korisnicima u stambenom okruženju, a sa ciljem da dopune i obogate uobičajene aktivnosti, uz minimalnu umešanost ili napor čoveka (*Harper, 2003; Jahn, 2010; Sundramoorthy, 2010; Chen, 2011; Chao, 2011; Pensas, 2009*).

Jedan od začetnika teorije “Sveprisutnosti računara” (*eng. Ubiquitous Computing*) je zaključio da tehnologije koje najviše utiču na svakodnevni život primetno nestaju iz okruženja (*Weiser, 1999*). Njihova upotreba može biti efikasna samo ako postanu deo svakodnevice, a da pri tom fizički nestanu iz vidokruga krajnjih korisnika, stvarajući takvu iluziju da korisnik više nije svestan da je i dalje on taj koji upravlja celokupnim sistemom. Upravo bežične senzorske

mreže (eng. *Wireless Sensors Networks - WSN*) u najvećoj meri doprinose da kompleksna infrastruktura inteligentnih sistema bude sveprisutna oko nas, ali nevidljivo utkana u okruženje izvršavajući svoja zaduženja nenametljivo i nedestruktivno, stimulišući ljudsku pažnju samo onda kada za to ima smisla (Wood, 2008; Faludi, 2010; Bjelica, 2013).

Konvencionalne bežične senzorske mreže koriste niz gotovih senzorskih uređaja dostupnih na tržištu, zasnovanih na različitim tehnologijama otkrivanja prisustva ili kretanja ljudi, prepoznavanja pokreta, prepoznavanja lica, ili nekih drugih događaja iz okruženja nevezano za prisustvo čoveka, poput promena ambijentalne temperature, dnevnog osvetljenja, vibracija, zvučnih pobuda, itd. (Ivanov, 2002; McGrath, 2013; Mrazovac 2011a; Kivimäki 2014). S obzirom da upotreba konvencionalnih senzorskih rešenja zahteva kompleksne postupke montaže, prikupljanja i obrade podataka, sama fizička arhitektura na kojoj su implementirane date senzorske funkcionalnosti zahteva znatnu procesnu snagu i specifične komunikacione sprege, što već inicijalno definiše njenu visoku tržišnu cenu. Pored visokih troškova izrade konvencionalnog senzorskog uređaja, prisutan je i niz tehnoloških nedostataka koji u određenim slučajevima mogu narušiti ispravnost detekcije. Problemi ispravne detekcije su naročito izraženi prilikom detekcije prisustva ljudi, posebno ukoliko su osobe nepomične u okruženju u kome se obavlja postupak detekcije (Benezeth, 2011). Takođe, promene u okruženju kao što su povećanje ambijentalne temperature ili vlažnosti vazduha, mogu kod određenih senzora, poput pasivnog infracrvenog senzora (eng. *Passive infrared - PIR*) dovesti do neispravne detekcije (Soyer, 2009). Ukoliko se detekcija prisustva ljudi obavlja prepoznavanjem i segmentacijom objekata iz slika tekućeg video sadržaja, pored relativno skupe opreme i procesno zahtevnih algoritama obrade video sadržaja, otežavajuću okolnost predstavlja i dinamika promena u pozadini iz koje se segmentacijom izdvaja čovek (Luke, 2008). Kod senzora zvuka, poput mikrofona ili mikrofonskih nizova, poznat je problem odjeka i šuma, ali i neophodnosti da čovek aktivno govori da bi bio detektovan i lokalizovan (Kukolj, 2005; Papp, 2007). Senzori koji detekciju ljudi zasnivaju na interpretaciji odjeka emitovanog zvučnog ili radio talasa poput sonara, radara, ultrazvučnih ili mikrotalasnih senzora, veoma su osetljivi na šum koji potiče od okolnih uređaja. Ovi senzori takođe zahtevaju i specifičnu montažu u prostoru koja bi im omogućila preglednost bez prepreka, poput nameštaja, što umanjuje upotrebnu vrednost ove vrste senzorske tehnologije u stambenom prostoru (Magori, 1994).

Zbog navedenih nedostataka postojećih konvencionalnih senzorskih tehnologija, u poslednje vreme se dosta pažnje posvećuje realizaciji nove generacije senzora, koji koriste isključivo komunikacione radio talase na učestanosti od 2.4 GHz za ispitivanje okruženja i prisustva ljudi i objekata u njemu. U ovoj oblasti je trenutno aktivno više različitih istraživanja koja ispituju problematiku detekcije prisustva ljudi i njihove lokalizacije na osnovu praćenja i

obrade varijacija indikatora primljene snage radio signala (*eng. Received Signal Strength Indicator - RSSI*), ili obradom podataka o vremenu i uglu propagacije radio signala na strani prijemnika. Za detekciju prisustva i kretanja ljudi radio talasima, postojeći algoritmi definišu jednostavne statističke modele prostiranja radio talasa, zasnovane na praćenju srednje kvadratne razlike, varijanse ili kovarijanse indikatora snage radio signala u svrhu zaključivanja da li je osoba prisutna u okruženju ili ne. Većina rešenja je usmerena ka lokalizaciji korisnika u određenoj oblasti, odnosno prostoriji, s tim da navedeni sistemi uglavnom mogu detektovati ili lokalizovati osobe koje se kreću, dok je prilikom mirovanja osoba u prostoriji veoma teško ispravno detektovati njihovo prisustvo. Spoljne smetnje uslovljene različitim događajima van zone detekcije radio talasima takođe mogu značajno uticati na propagaciju radio talasa unutar zone detekcije i narušiti ispravnost detekcije. Pod zonom detekcije se podrazumeva oblast ili prostorija ispunjena radio talasima koji na svojoj propagacionoj putanji nailaze na različite prepreke, uključujući i čoveka, čije prisustvo izaziva izražene varijacije RSSI koje daljom analizom obezbeđuju korisnu informaciju o prisustvu ili odsustvu čoveka, ili određenog objekta.

Postojeći algoritmi detekcije ljudi radio talasima u okviru bežičnih senzorskih mreža nisu još uvek dovoljno eksploatisani u komercijalne svrhe, mada se trend istraživanja u ovoj oblasti kreće u pravcu njihovog usavršavanja. U cilju unapređenja kvaliteta detekcije prisustva i kretanja ljudi radio signalima potrebno je istražiti mogućnosti realizacije kompleksnih statističkih modela koji bi uvećali robustnost sistema na spoljni šum, omogućili detekciju kako kretanja tako i nepomičnih osoba i razdvojili detekciju ljudskog bića od drugih objekata, a u isto vreme zadržali jednostavnost obrade ulaznih podataka. Neophodna jednostavnost operacija obrade ulaznih podataka omogućuje da se takvi modeli programski implementiraju i na računarima skromnijih procesnih resursa, ne narušavajući osnovnu funkcionalnost uređaja na kom su implementirani, kao ni odziv u realnom vremenu.

PREDMET ISTRAŽIVANJA

U okviru disertacije istražena je oblast senzorskih tehnologija za detekciju prisustva i kretanja ljudi u prostorijama, sa posebnom pažnjom usmerenom na ispitivanje postupaka za detekciju prisustva i kretanja ljudi u bežičnim senzorskim mrežama obradom varijacija snage komunikacionih radio signala na učestanosti od 2.4 GHz. Analizom postojećih postupaka detekcije prikupljene su informacije o trenutnim dostignućima, funkcionalnosti i složenosti rešenja i utvrđeni su konačni zahtevi koji odlikavaju ograničenja postavljena pred rešenje koje teži ka tržištu potrošačke elektronike i primeni u sistemima pametnih kuća. Razmotrena je primena različitih matematičkih modela i tehnika za obradu signala: srednja kvadratna razlika, varijansa i kovarijansa, analiza baznih komponenti (*eng. Principal Components Analysis*),

informaciona entropija i diskretna Furijeova transformacija. Određen je i skup metrika za ocenu kvaliteta, primenjen na optimalni model detekcije i upoređen sa postojećim rešenjima, ali i drugim senzorskim tehnologijama. Odgovarajući ambijent za sintezu pobuda je postavljen za analizu i razvoj programskog rešenja, optimizovanog za upotrebu u komercijalnim sistemima.

CILJ ISTRAŽIVANJA

Cilj istraživanja je da se pregledom dostupnih modela, algoritama i tehnika detekcije prisustva i kretanja ljudi radio talasima, odredi robustan statistički model, optimizovan za rad u realnom vremenu, koji će poslužiti i kao referenca pri budućem razvoju algoritama detekcije ljudi. Iz tog razloga biće predstavljena detaljna specifikacija definisanog modela i verifikacija obavljena kroz niz eksperimentalnih scenarija i primenu rešenja na realnoj platformi. S obzirom na težnju rešenja ka primeni u oblasti potrošačke elektronike, prilikom razvoja rešenja jedan od osnovnih zahteva jeste i mogućnost komercijalizacije. Shodno tome, velika pažnja je posvećena prevazilaženju osnovnih nedostataka postojećih metoda, kako kroz robustnost tako i kroz optimizaciju obrade, što će obezbediti veći potencijal za komercijalizaciju ove tehnologije.

Središte istraživanja je usmereno na definiciju i realizaciju kompleksnog statističkog modela obrade podataka, kroz grupnu (zbirnu) obradu vrednosti indikatora primljene snage radio signala očitanih sa svih uspostavljenih radio veza u određenoj oblasti detekcije. Nekorelisani odbirci indikatora snage radio signala, očitani sa radio veza mogu da se grupišu u zajedničku matricu snaga signala iz koje se vrši ekstrakcija baznih komponenti (*eng. Principal components*). Bazne komponente umanjuju dimenzionalnost sistema, a time i kompleksnost operacija obrade podataka, uz održanje varijabilnosti prisutne u originalnom skupu odbiraka RSSI.

Kao rezultat doktorske disertacije, realizovan je inovativni metod za detekciju ljudi koji zadovoljava uslove da mora biti otporan: na smetnje uslovljene preslušavanjem sa drugim radio talasima, na smetnje izazvane uticajem ljudi van zona detekcije, kao i na smetnje u zoni detekcije prouzrokovane rasporedom nameštaja. Istovremeno, metod je jednostavan za implementaciju u finalni proizvod i optimizovan za integraciju u sisteme skromnijih procesnih resursa. Teza je eksperimentalno dokazana primenom rezultujućeg metoda na komercijalnoj platformi za kućnu automatizaciju i inteligentno upravljanje potrošnjom električne energije.

NAUČNI DOPRINOS

Osnovni naučni doprinos disertacije odnosi se na oblast senzorskih tehnologija za detekciju prisustva i kretanja ljudi i to konkretno na oblasti detekcije ljudi radio talasima, ali i na oblast realizacije sistema pametnih kuća i ambijentalne inteligencije. Disertacija je rezultovala inovativnim, unapređenim modelom programske podrške metoda detekcije prisustva i kretanja

ljudi koji je eksperimentalno i praktično potvrđen i koji može da posluži kao osnova za buduća istraživanja u oblasti senzorskih tehnologija. Kroz disertaciju su takođe predstavljene ideje i načini primene i sinteze nekih jednostavnih statističkih modela i algoritama obrade koji daju očekivane i zadovoljavajuće eksperimentalne rezultate.

Mogućnosti primene metoda na osnovu dobijenih rezultata su višestruke i ogledaju se prvenstveno u realizaciji nove vrste senzora za jednostavnu integraciju u sisteme pametnih kuća, ambijentalne inteligencije, nadzora i zaštite u zatvorenim objektima i na otvorenom prostoru. Karakteristike statističkog modela datog metoda se takođe mogu iskoristiti i u vojnoj industriji za realizaciju radarskih sistema koji će biti otporniji na uticaje okruženja. Realizacijom i primenom inovativnog metoda detekcije na sistem pametnih kuća moguće je ukloniti čitav niz komercijalnih senzora za detekciju prisustva i kretanja ljudi, a pri tom održati dovoljno visok nivo senzorske inteligencije i nisku cenu troškova instalacije. Pri tom, celokupna senzorska inteligencija se može svesti samo na upotrebu bežičnih senzorskih mreža, i to prvenstveno radio komunikacionih poruka između postojećih bežičnih čvorova date mreže. Jednostavnost i optimizacija neophodnih numeričkih metoda obrade ulaznih podataka omogućuju da se rezultujući metod, dat u vidu robustnog algoritma detekcije, optimizovanog za rad u realnom vremenu, implementira na računarima skromnijih procesnih resursa ne narušavajući pouzdanost detekcije, niti odziv u realnom vremenu.

U okviru oblasti istraživanja ove disertacije objavljena su četiri rada u međunarodnim naučnim časopisima i više od 40 radova na domaćim i međunarodnim vodećim naučnim konferencijama. Objavljene su i četiri patentne prijave, od kojih je jedna već priznata kao patent, a koje obezbeđuju zaštitu intelektualne svojine originalnih rešenja do kojih se došlo tokom istraživanja u okviru ove disertacije.

ORGANIZACIJA DISERTACIJE

Disertacija je organizovana u četiri poglavlja.

U Poglavlju 1 izloženo je trenutno stanje u oblasti senzorskih tehnologija za detekciju prisustva i kretanja ljudi, njihovu lokalizaciju i praćenje. Obuhvaćene su i predstavljene neke od najzastupljenijih komercijalno dostupnih senzorskih tehnologija za detektovanje ljudi, poput vizualnih senzora, senzora zvučnih i ultrazvučnih pobuda, kao i infracrvenih senzora. Poseban naglasak je stavljen na senzore koji detektovanje ljudi zasnivaju na obradi devijacija radio talasa pri prostornoj propagaciji. U ovom poglavlju su definisani i osnovni nedostaci koji su prisutni u postojećim istraživanjima, kao i osnove na kojima se gradi konkretan doprinos disertacije. U poglavlju 2 opisani su inovativni postupci za unapređenje detekcije prisustva i kretanja ljudi, predstavljena je matematička formulacija modela propagacije radio talasa i njihova evolucija u

zavisnosti od kvaliteta ispravnosti detekcije. U poglavlju 3 izložena je eksperimentalna verifikacija predloženih postupaka detekcije ljudi. Opisan je OBLO sistem za inteligentno upravljanje kućnim električnim instalacijama i predstavljeni su rezultati postignuti primenom datih postupaka na uređaje OBLO sistema. Zaključak i kratka diskusija su dati u poglavlju 4, gde su iznesena zapažanja do kojih se došlo tokom realizacije ove disertacije, ali su date i smernice budućim istraživačima u ovoj oblasti.

POGLAVLJE 1.

PREGLED STANJA U OBLASTI

1.1 DOSTUPNE SENZORSKE TEHNOLOGIJE ZA DETEKCIJU LJUDI

Da bi sistem Ambijentalne Inteligencije bio u interakciji sa čovekom, on prvenstveno mora biti u interakciji sa okruženjem, odnosno svestan promena u njemu. Svaka promena je uslovljena pojavom neke pobude, koju sistem opaža i na nju odgovara određenom aktivnošću. U svrhu opažanja različitih pobuda potrebno je uvesti senzorske uređaje koji realizuju specifičnu tehnologiju neophodnu da pravovremeno otkrije određenu pobudu i njene osnovne karakteristike dojadi sistemu. Senzorski uređaj meri fizičke veličine i konvertuje ih u koristan signal čitljiv krajnjem sistemu koji ga integriše.

Za detektovanje prisustva i kretanja ljudi, odnosno njihovo lokalizovanje u prostoru koristi se nekoliko vrsta senzorskih tehnologija od kojih su trenutno najzastupljenije:

- Vizualna (optička),
- Zvučna i ultrazvučna,
- Infracrvena,
- Mikrotalasna,
- Detekcija prisustva i kretanja ljudi radio talasima.

Iako se razlikuju po mnoštvu parametara, počevši od fizičkih karakteristika tehnologije i postupka proizvodnje, pa do načina kako opažaju promene u okruženju, navedene senzorske tehnologije imaju zajedničku primenu u sistemima Ambijentalne Inteligencije, i to prvenstveno u aplikacijama: (1) bezbednosti i zaštite od uljeza (*eng. Security, Intruder detection*), (2) zaštite životne sredine i optimizacije potrošnje energije (*eng. Energy Awareness*), poput aplikacija za pametno upravljanje potrošnjom električne energije, (3) aplikacije koje povećavaju konformnost

života, prvenstveno sistemi za interakciju između čoveka i računara (*eng. Human-Computer Interaction*). S aspekta upotrebe u sistemima Ambijentalne Inteligencije, osnovne karakteristike koje razdvajaju senzorske tehnologije su: (1) postojanje graničnih zona detekcije, (2) interferencija sa drugim uređajima u blizini i uticaji spoljnih faktora (faktora okruženja), (3) cena i kompleksnost montaže, (4) domet, (5) mogućnosti detekcije prisustva, kretanja, lokalizovanja, identifikacije i određivanja fizičke aktivnosti korisnika.

U oktobru 2007. godine, Evropska unija je usvojila strategiju za podsticaj razvoja sistema pametnih kuća sa ciljem da u narednih deset do petnaest godina većina domaćinstava integriše takve sisteme u svoja okruženja (*Dokument E07- RMF-04-03, 2007*). Istraživanje sprovedeno od strane instituta *Berg Insight (2011)* koji se bavi analizom svetskog tržišta informacionih tehnologija, predviđa rast prihoda od prodaje sistema pametnih kuća u Sjedinjenim Američkim Državama, koje važe za najdinamičnije tržište, sa godišnjom stopom rasta od 33%, sa 2.3 milijarde dolara u 2010. do 9.5 milijardi dolara u 2015. godini. Dato predviđanje obuhvata i porast broja korisnika *M2M (eng. Machine-to-Machine)* usluga telekomunikacionih operatera sa godišnjim rastom od 85.6%, sa 0.25 miliona pristupa u 2010. do 5.5 miliona pristupa u 2015. godini, što će osigurati potrebu za usavršavanjem senzorskih uređaja ali i neophodnošću za umanjnjem cene određene senzorske tehnologije i samog senzorskog proizvoda. Po proceni kompanije *Zpryme (2009)* vrednost elektroenergetskog sektora, sa posebnom pažnjom na pametne distributivne mreže (*eng. Smart Grid*) u Sjedinjenim Američkim Državama će u tekućoj godini premašiti 42.8 milijardi dolara, što osigurava veliki potencijal multisenzorskim platformama na korisničkom nivou, naročito u oblasti integracije elektro-distributivne mreže sa krajnjim potrošačem (*Mrazovac, 2013d*), koja još uvek predstavlja granu *Smart Grid* industrije koja tek kreće da se ozbiljnije razvija. Procene su i da će vrednost svetskog tržišta *Smart Grid* industrije rasti sa 69.3 milijarde dolara u 2009. do 171.4 milijarde dolara do kraja 2014. godine.

Realizacijom ideja u oblasti pametnih kuća i sistema Ambijentalne Inteligencije se bavi mnoštvo svetskih kompanija, od kojih su najpoznatije: *Control4, Adhoco, Crestron, ADT, Vivint, Comcast/Xfinity* i *AMX*. Navedeni sistemi ne omogućuju detekciju prisustva ili kretanja ljudi korišćenjem već postojećih radio talasa, već zahtevaju instalaciju dodatnih senzorskih uređaja koji uglavnom obezbeđuju kvalitet ispravnosti detekcije srazmerno sa cenom samog proizvoda. Detekcija ljudi radio talasima predstavljena u ovoj tezi, omogućuje da se prevaziđu neki nedostaci prisutni u drugim konvencionalnim senzorskim tehnologijama.

Za kvalitetnu i isplativu saradnju sa bilo kojom kompanijom u pogledu ustupanja prava na korišćenje tehnologije, neophodno je zaštititi suštinske inovacije do kojih se došlo prilikom realizacije doktorske teze. U procesu zaštite intelektualne svojine za tehnologiju predstavljenu u doktorskoj tezi, podnete su četiri patentne prijave (*Mrazovac, 2011; 2012g; 2013a; 2014*) od

kojih je jedna potvrđena kao patent (*Mrazovac, 2011*). Patenti će pravno zaštititi komercijalnu eksploataciju opisane tehnologije, ali će drugim istraživačima obezbediti uvid i mogućnost da novim idejama unaprede korišćenje date tehnologije u različite svrhe.

Na osnovu navedenih istraživanja dinamičnosti tržišta, može se zaključiti da je potencijal svetskog tržišta senzorskih tehnologija veliki. Ukoliko se može ponuditi: (1) nova tehnologija koja je efikasna, (2) robustna tehnologija koja rešava veliki broj nedostataka postojećih senzorskih tehnologija, (3) tehnologija koja je jeftina i ne zahteva dodatne instalacije novih uređaja ili posebnu obuku krajnjih korisnika prilikom eksploatacije u svakodnevnom životu, onda takva tehnologija ima mogućnost za uspeh na turbulentnom tržištu potrošačke elektronike.

U narednim poglavljima će biti dat pregled najzastupljenijih tehnologija za detekciju prisustva i kretanja ljudi, kao i analiza njihovih karakteristika i nedostataka prilikom upotrebe u sistemima Ambijentalne Inteligencije. Posebna pažnja će biti usmerena na postupke i sisteme za detektovanje prisustva, kretanja i lokalizaciju ljudi analizom prostiranja radio talasa.

1.1.1 Vizualni senzori

Vizualni, odnosno foto-osetljivi senzori su uređaji koji pretvaraju svetlost u analogni električni signal. Na tržištu su ovi senzori uglavnom integrisani u okviru video kamera, stereo kamera i 3D kamera, te se često nazivaju i sensorima optičkih slika (*eng. Image Sensors*). Vizualni senzori najčešće koriste dve vrste tehnologija: CCD (*eng. Charge-Coupled Device*) i CMOS (*eng. Complementary Metal-Oxide Semiconductor*). Obe vrste senzora se sastoje iz matrice fotosenzitivnih dioda koje prevode prikupljene fotone u električni napon. Kod CCD senzora napon se obrađuje Analogno-digitalnim (AD) pretvaračem, neophodnim za klasifikaciju napona sa fotodioda na nivoe osvetljenja, dodeljujući svakom nivou binarnu vrednost. Fotodioda samo prikuplja svetlost, te je neophodan i dodatni filter boje koji svetlost prevodi u matrice određenog formata boje, tj. u optičku sliku. CMOS senzor koristi nekoliko tranzistora za svaku fotodiodu koji pojačavaju i prenose osvetljenje, omogućujući da se vrednost osvetljenja za svaku fotodiodu može pojedinačno očitati. Zbog toga što pojedinačna fotodioda u CMOS senzoru sadrži nekoliko tranzistora vezanih za nju, osetljivost CMOS čipa na svetlost je dosta niža, pošto veliki broj fotona ne osvetljava samo fotodiode već i same tranzistore. Zbog toga se CCD senzori koriste za uređaje kod kojih su neophodne kvalitetnije slike sa velikim brojem tačaka (*eng. Pixel*) i većom osetljivošću na osvetljenje. Međutim, proizvodnja CMOS senzora je znatno jeftinija, a i potrošnja električne energije napajanja CMOS senzora je znatno niža. CMOS senzori se i dalje usavršavaju kako bi se po kvalitetu približili CCD uređajima za određene primene, te je nesumnjivo da će uskoro preovladati na tržištu.

U sistemima Ambijentalne Inteligencije, vizualni senzori imaju širok spektar upotrebe počevši od detekcije prisustva i kretanja ljudi, lokalizacije, identifikacije, pa do prepoznavanja pokreta, odnosno aktivnosti korisnika. S obzirom na prirodu i kvalitet informacija koje obezbeđuju, vizualni senzori su većinom zastupljeni u aplikacijama za: (1) nadzor (*Valera, 2005*), (2) upravljanje velikim brojem ljudi (*eng. Crowd management*) (*Jacques Junior, 2010*), (3) analizu ponašanja potrošača (*eng. Customer behaviour analysis*) (*Krockel, 2012*), a u novije vreme pojavom komercijalno dostupnih i jeftinih senzorskih rešenja za takozvane “dubinske slike” (*eng. Depth images*) i za (4) realizaciju naprednih korisničkih sprega u okviru pametnih stambenih okruženja (*Zhang, 2012; Mrazovac, 2010*).

Raznovrsnost primene vizualnih senzora rezultuje nizom različitih postavki datih senzorskih uređaja (horizontalni vidokrug kamere, ptičija perspektiva, vidokrug od 180 stepeni, itd...) kao i različitih postupaka obrade slika, s ciljem da se utvrdi trenutna aktivnost ili pozicija korisnika u prostoru, a samim tim i njegovo prisustvo. Upotrebom stereo ili 3D kamere dodatno se obezbeđuje i parametar dubine (*eng. Depth*), koji je pogodan za trodimenzionalnu simulaciju prostora i koristan je za postupke obrade slika u kojima je neophodna nezavisnost od ugla i pozicije kamere. Jedan od najpopularnijih predstavnika interaktivnih senzora, koji uz mnoštvo vizualnih informacija obezbeđuje i parametar dubine jeste Microsoft Kinect (*Mrazovac, 2011a*).

Informacije o trenutnom stanju odgovarajućih pobuda u okruženju, poput prisustva čoveka, vizualni senzori obezbeđuju na osnovu niza slika, iz kojih se odgovarajućim postupcima obrade (*eng. Image processing*) mogu dobiti sve neophodne informacije. Tri najzastupljenije oblasti postupaka za obradu slika, koje se koriste za otkrivanje, odnosno detektovanje ljudi u okruženju obuhvataju: (1) postupke za uklanjanje pozadine (*eng. Background subtraction*), (2) postupke za prepoznavanja obrazaca u slici (*eng. Pattern matching and recognition*) i (3) postupke za otkrivanje objekata interesovanja obradom takozvanih dubinskih slika (*eng. Depth images*), koje uz uobičajene informacije o vrednosti boja svake tačke slike (*eng. Pixel*), dodatno obezbeđuju i parametar dubine za svaku pojedinačnu tačku.

Najveći broj postupaka za otkrivanje prisustva i kretanja ljudi obradom slika zasniva se na otkrivanju pokreta u slici primenom postupaka za uklanjanje pozadine. Razlog za veliku zastupljenost jeste u činjenici da ovi postupci omogućuju brzo pronalaženje i izdvajanje objekata interesovanja iz niza slika (*Teixeira, 2010*) i posebno su pogodni kada je pozadinski prizor, tj. scena statična ili se sporo menja. Nedostaci postupaka obrade slika zasnovanih na uklanjanju pozadine, koji narušavaju ispravnost i kvalitet detekcije ljudi obuhvataju: (1) prirodne oscilacije u intenzitetu tačaka slike, (2) uticaj osvetljenja, (3) postojanje dimanične pozadine sa učestalim promenama (npr. pomeranje zavesa usled pojačane cirkulacije vazduha u prostoriji), i (4) promene u prostornom položaju statičkih objekata koji se smatraju delom pozadine, kao što je

promena položaja elemenata nameštaja (*Teixeira, 2007*). Postojeća unapređenja postupaka za modelovanje pozadine poput GMM (*eng. Gaussian Mixture Model*) (*Stauffer, 1999*) i ViBE (*eng. Visual Background Extractor*) (*Barnich, 2011*) omogućila su da se neki od navedenih nedostataka prevaziđu, poput neutralisanja uticaja dinamične pozadine. Tek sa integracijom postupaka za uklanjanje pozadine sa dubinskim kamerama (*eng. Depth cameras*) odstranjen je uticaj osvetljenja, a tehnike otkrivanja objekata interesovanja su postale značajno robustnije (*Han, 2013*). Jedan od glavnih izazova koji istraživači u ovoj oblasti i dalje pokušavaju prevazići jeste eliminacija uticaja promene položaja statičnih objekata, poput elemenata nameštaja. Modeli pozadine poput GMM i ViBE periodično osvežavaju svoje karakteristike, prilagođavajući se promenama nastalim u pozadinskom okruženju, ali zahtevaju postojanje odgovarajuće fizičke arhitekture sa dovoljno snažnim procesnim resursima koji mogu adekvatno izvršavati date postupke za obradu slika. Ovakvi uređaji fizičke arhitekture imaju visoku tržišnu cenu, relativno su kompleksni za montažu i eksploataciju, a takođe zahtevaju i značajno poznavanje oblasti obrade slika da bi se mogli adekvatno koristiti.

Postupci zasnovani na prepoznavanju određenih obrazaca u slici su takođe dosta često korišćeni postupci obrade slika za otkrivanje prisustva i kretanja ljudi. Prednost ovih metoda jeste u tome što čak i u veoma dinamičnim okruženjima, sa mnoštvom promena u pozadini, nije potrebno prethodno odrediti model pozadine da bi se uspešno izdvojio objekat interesovanja. Uparivanje specifičnih obrazaca u okviru slika, a u svrhu izdvajanja objekata, može se obavljati zahvaljujući izobličenjima u slici prouzrokovanim promenama u položaju i osvetljenju objekata interesovanja na slici (*Mori, 2005*). Karakteristike objekata interesovanja se najčešće određuju korišćenjem algoritama za otkrivanje ivica u slici, uz kombinovanje sa metodama klasifikacije na osnovu određenih referentnih slika korišćenjem veštačke inteligencije i mašinskog učenja (*eng. Machine learning*). Međutim, visoka složenost izračunavanja kod navedenih postupaka zahteva i eksploataciju dovoljno snažnih računarskih sistema, s obzirom da obrada jednog okvira (*eng. Frame*) video sadržaja zahteva više od jedne sekunde na personalnom računaru standardnih procesnih performansi (*Dollar, 2010*).

Poslednjih godina, velika pažnja je usmerena ka upotrebi trodimenzionalnih vizualnih senzora i realizaciji postupaka za otkrivanje, prepoznavanje i praćenje objekata interesovanja obradom tzv. dubinskih slika (*Harville, 2004*). Dubinske slike obezbeđuju trodimenzionalnu percepciju prostora i objekata u njemu, pojednostavljuju segmentaciju objekata iz pozadine što je posebno korisno ukoliko su i pozadina i objekat iste boje, omogućuju uočavanje preklapanja više objekata, olakšavaju predikciju kretanja i prepoznavanje pokreta objekata interesovanja. Na tržištu su trenutno zastupljene tri vrste 3D vizualnih senzora: (1) stereo kamere, (2) TOF (*eng. Time-Of-Flight*) kamere, (3) SL (*eng. Structured Light*) kamere. Za razliku od dostupnih optičkih

kamera, 3D kamere generišu slike znatno niže rezolucije, ali su otporne na svetlosne refleksije i senke (Stürmer, 2008; Mrazovac, 2010) i kao takve su veoma korisne za najrazličitije scenarije detekcije prisustva i kretanja ljudi, kako u zatvorenom prostoru tako i napolju.

Stereo kamera je najstarija od trodimenzionalnih senzora i jedan od prvih takvih uređaja je predstavljen krajem devedesetih godina (Kanade, 1996). Stereo kamera koristi dva ili više sočiva od kojih svako ima sopstveni foto-osetljivi senzor. Istovremenom upotrebom više foto-senzora se simulira ljudski binokularni vid. Tipične binokularne kamere svoja sočiva postavljaju na rastojanju približno jednakom rastojanju ljudskih očiju (oko 6.35 cm). Kao i kod čoveka gledanje jednim okom, tzv. monokularno gledanje, koje je analogno 2D video kamerama, obezbeđuje informaciju o širini, visini i formi objekta. Međutim, binokularni vid dodatno obezbeđuje informaciju o međusobnom odnosu predmeta u prostoru, tačnije o njihovoj prostornoj dubini.


Sredinu prethodne decenije obeležila je pojava TOF i SL kamera. Uređaji zasnovani na TOF principu mere vreme putovanja svetlosti generisane od strane aktivnog svetlosnog izvora do objekta u polju posmatranja (Guomundsson, 2008; Kolb, 2008; Bevilacqua, 2006; Tanner, 2008). Uz poznatu konstantu brzine svetlosti, rastojanje se može izračunati direktno iz dužine trajanja putovanja svetlosti od izvora do objekta na putu svetlosnog talasa. Merenje dužine trajanja putovanja svetlosnog signala od TOF kamere do posmatranog objekta se postiže na sledeći način: TOF kamera se pozicionira na oblast posmatranja. Ugrađena 2D kamera obezbeđuje uvid u vidokrug TOF kamere, operativnog dometa do 5m. Korišćenjem ugrađenih LE (eng. *Light-Emitting*) dioda kamere moduliše se osvetljaj. Odaslana svetlost se odbija od objekat na koji naiđe u polju posmatranja. CCD/CMOS senzori kamere mere fazni pomeraj povratnog svetlosnog signala u svakoj tački posmatrane slike. Rastojanje za svaku tačku je određeno kao frakcija ciklusa modulisanog svetlosnog signala, od LED izvora pa do povratka na CCD/CMOS senzor. Osnovni princip funkcionisanja SL trodimenzionalnih kamera jeste projekcija posebnih matrica tačaka infracrvene svetlosti, koje se tako raspršuju po prostoru i izobličavaju pri nailasku na objekte u tom prostoru (Morano, 1998; Mrazovac, 2011a). Ovako projektovane slike se potom analiziraju dodatnom ugrađenom 2D kamerom, a naknadnom trigonometrijskom analizom uglova emitovane i reflektovane svetlosti od strane blokova fizičke arhitekture uređaja dobija se informacija o dubini tačaka na slici.

Od SL kamera, danas je komercijalno najzastupljeniji *Microsoft Kinect*, koji se na tržištu pojavio u okviru igračke konzole *Microsoft Xbox* i postigao uspeh od oko 10 miliona prodatih primeraka u samo prvih nekoliko meseci od pojave na tržištu, dok su TOF kamere, poput: *Canesta Vision*, *MESA Swissranger*, *PMD Technologies*, a ujedno i stereo kamere kao što je *Point Grey Bumblebee*, svoju upotrebu zadržale uglavnom u naučno-istraživačkim projektima. U poređenju sa TOF rešenjima, *Kinect* kamera omogućuje kraći opseg (optimalno do 3.5m

udaljenosti za rezoluciju prepoznatih objekata do 10cm, vizualno pokrivajući površinu od oko 6m²), uz izraženije prisustvo šuma na dubinskim slikama, ali se navedeni nedostaci kompenzuju ugrađenim algoritmima post-procesiranja. Značajan nedostatak *Kinect* kamere jeste što trenutno podržava isključivo USB (eng. *Universal Serial Bus*) komunikacionu spregu, što može narušiti postulate Ambijentalne Inteligencije o neprimetnoj integraciji senzora u pametni ambijent. Međutim, *Kinect* i dalje važi za jedan od najupotrebljivijih 3D vizualnih senzora u sistemima Ambijentalne Inteligencije.

Neke od tehničkih karakteristika 2D i 3D vizualnih senzora, značajne za upotrebn aspekt u sistemima Ambijentalne Inteligencije, navedene su u tabelama 1 - 4.

Tabela 1. Opis karakteristika optičkih kamera

Optičke kamere (2D)		
	Opseg detekcije objekata:	Od nekoliko centimetara do više stotina metara
	Komunikacione sprege:	USB, Ethernet, WiFi
	Cena (€):	20 – 1000
	Proizvođači:	Axis, Logitech, Pelco, Panasonic, Sony, Cisco, Honeywell,...
	Prednosti:	<ul style="list-style-type: none"> • Jednostavna upotreba • Velika ponuda na tržištu • Zrelost tehnologije • Mogućnost detekcije prisustva i kretanja ljudi (pokretnih i nepokretnih objekata) • Raznovrsnost sprežnih modula • Visoka rezolucija slika (1920x1080), a time i mogućnost detekcije manjih ili udaljenih objekata
	Nedostaci:	<ul style="list-style-type: none"> • Relativno visoka cena • Negativan uticaj osvetljenja na performanse • Neophodnost sprezanja sa računarima velike procesne snage za korišćenje robustnijih

		algoritama detekcije <ul style="list-style-type: none"> Nemogućnost detekcije vizualno preklapljenih objekata
--	--	--

Tabela 2. Opis karakteristika stereo kamera

Stereo kamere		
	Opseg detekcije objekata:	Optimalno do 5m, mada može da detektuje i objekte na udaljenosti od nekoliko desetina metara
	Komunikacione sprege:	USB, IEEE-1394a (<i>Firewire</i>), Ethernet
	Cena (€):	1000 – 3000
	Proizvođači:	Point Grey, FujiFilm, Vivitar, Meopta, Ensenso, ...
	Prednosti:	<ul style="list-style-type: none"> Jednostavna upotreba Poznata tehnologija Mogućnost detekcije prisustva i kretanja ljudi (pokretnih i nepokretnih objekata) Mogućnost detekcije vizualno preklapljenih objekata
Nedostaci:	<ul style="list-style-type: none"> Visoka cena Slaba komercijalna zastupljenost Neophodnost sprezanja sa računarima velike procesne snage za računanje nepodudarnosti (dispariteta) tačaka na slici, kao i za post-procesiranje zarad popravljavanja kvaliteta dubinskih slika Mala rezolucija slika (640x480), a time i umanjena mogućnost detekcije manjih ili udaljenih objekata Nizak protok okvira slika (<i>eng. Frame rate</i>) Negativan uticaj osvetljenja 	

Tabela 3. Opis karakteristika 3D TOF kamera



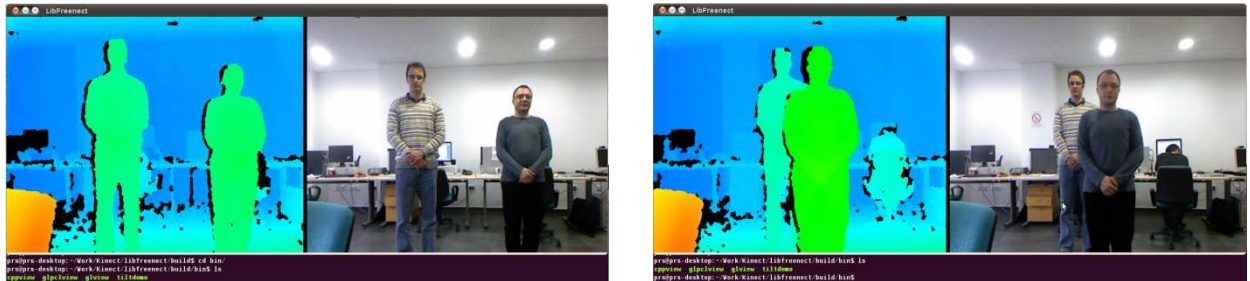
3D TOF (<i>Time-of-Flight</i>) kamere		
	Opseg detekcije objekata:	Od 1m do 5m (teorijski do 10m)
	Komunikacione sprege:	USB, Ethernet
	Cena (€):	2000 – 6000
	Proizvođači:	Mesa Imaging, Infineon, Canesta, Photonic Mixer Devices (PMD), Soft Kinetic
	Prednosti:	<ul style="list-style-type: none"> • Visoka robustnost detekcije • Mogućnost detekcije prisustva i kretanja ljudi (pokretnih i nepokretnih objekata) • Mogućnost detekcije vizualno preklapljenih objekata • Pored dubinskih slika, obezbeđene su optička RGB slika, kao i slika koja prikazuje spektar intenziteta osvetljenja (<i>eng. Grayscale</i>)
	Nedostaci:	<ul style="list-style-type: none"> • Visoka cena • Relativno nova tehnologija • Negativan uticaj na rad pri izloženosti direktnoj sunčevoj svetlosti • Nepostojanje bežične komunikacione sprege • Kratak opseg (domet) senzora • Mala rezolucija slika (176x144, 204x204), a time i umanjena mogućnost detekcije manjih ili udaljenih objekata • Uglavnom se mogu naručiti direktno od proizvođača (nezastupljene u standardnoj prodaji)

Tabela 4. Opis karakteristika 3D SL kamera

3D SL (<i>Structured Light</i>) kamere		
	Opseg detekcije objekata:	1m do 4m (teorijski do 8m)
	Komunikacione sprege:	USB
	Cena (€):	150
	Proizvođači:	Microsoft Kinect
	Prednosti:	<ul style="list-style-type: none"> • Visoka robustnost detekcije • Mogućnost detekcije prisustva i kretanja ljudi (pokretnih i nepokretnih objekata) • Mogućnost detekcije vizualno preklapljenih objekata • Relativno pristupačna cena • Pored dubinskih slika dostupne su i optičke slike rezolucije 640x480 • Uređaj dodatno integriše motor za promenu vidokruga kamere, kao i mikrofonski niz • Kinect se lako može kupiti u redovnoj prodaji • Jednostavna upotreba
Nedostaci:	<ul style="list-style-type: none"> • Nepostojanje različitih komunikacionih sprega (isključivo USB) • Sporiji odziv • Kratak opseg (domet) senzora • Razvojna programska podrška namenjena za korišćenje isključivo na Windows platformama (nezvanična verzija postoji i za Linux, ali nije odobrena od strane proizvođača) • Veoma nova tehnologija, sa postojanjem grešaka u razvojnoj programskoj podršci 	

Primer jedne dubinske slike dobavljene korišćenjem *Kinect* senzora prikazan je na Slici 1. Za potrebe detekcije prisustva i kretanja ljudi unutar pametnog ambijenta, *Kinect* predstavlja najbolje rešenje u okviru navedenih vizualnih senzora. Međutim, jedan od velikih nedostataka *Kinect* senzora jeste nepostojanje bežične komunikacione sprege, koja ga ograničava da bude montiran bilo gde u prostoru i neprimetno integrisan u pametno okruženje.



a)

b)

Slika 1. Dubinska slika dobavljena korišćenjem *Kinect* vizualnog senzora: a) izdvajanje objekata iz pozadine. Skaliranjem vrednosti parametra dubine na skalu boja od 0 do 255, svi objekti koji su bliži kameri imaju vrednosti bliže 255, a dalji imaju vrednosti bliže 0. b) upotrebom parametra dubine, preklapljeni objekti se jasno razlikuju.

Mogućnosti *Kinect* senzora su velike i prevazilaze zahteve postavljene pred senzorski uređaj sa ciljem da detektuje isključivo prisustvo i kretanje ljudi. Stoga *Kinect* senzor predstavlja suviše veliku investiciju za upotrebu u ambijentalnim scenarijima gde je isključivo neophodno pravovremeno otkriti kretanje ili prisustvo nepomične osobe.

1.1.2 Zvučni i ultrazvučni senzori

Primena zvučnih i ultrazvučnih senzora u sistemima Ambijentalne Inteligencije služi za otkrivanje prisustva i kretanja nekog objekta, kao i za određivanje rastojanja između senzora i objekta u okruženju. Zvučni senzori detektuju treperenje vazdušnog pritiska, odnosno akustične talase na učestanosti do 20 kHz koje potom pretvaraju u analogni, odnosno digitalni signal. Za otkrivanje akustičnih talasa na višim učestanostima koriste se ultrazvučni senzori. Mikrofon se najčešće koristi kao zvučni senzor. Nizom prostorno razdvojenih mikrofona je moguće odrediti i poziciju aktivnog govornika, odnosno izvora zvuka u prostoru (*Kwak, 2008; Nishiura, 2000; Griebel, 2001*). Na tržištu je dostupno više vrsta mikrofona koji se koriste kao zvučni senzori, a razlika u konstrukciji određuje njihovu osetljivost, ali i cenu. Postoji više vrsta mikrofona, a najčešće upotrebljavani su kondenzatorski i dinamički (*Borwick, 1990*). Kondenzatorski mikrofon je osetljiviji od dinamičkog i detektuje širi opseg učestanosti. Kondenzatorski mikrofon koristi kondenzator povezan sa baterijom da bi detektovao zvuk. Kada akustični talas

dopre do kondenzatora, menja se kapacitivnost brzinom učestanosti zvučnog talasa. Dinamički mikrofoni koriste magnet sa navojem žice. Kada se navoj pomera oko magneta pod dejstvom akustičnog talasa koji dopre do membrane mikrofona, dolazi do pomeranja elektrona unutar navojne žice i do stvaranja struje, koja se dalje prenosi u formi električnog audio signala. Kondenzatorski mikrofoni preciznije opažaju zvuk, dok su dinamički otporniji na buku, odnosno šum, što je neophodno znati prilikom projektovanja jednog sistema Ambijentalne Inteligencije.

Mnoštvo aplikacija koje interaguju sa ambijentom koriste mikrofone ugrađene u neke specifične uređaje poput pametnog telefona, s ciljem dobavljanja informacija o okruženju. Neke od takvih aplikacija su *Soundsense* (Lu, 2009) koja detektuje zvuk preko mikrofona pametnog telefona i na osnovu prepoznatih zvučnih pobuda generiše dnevnik aktivnosti korisnika, ili *Aditeur* (Nirjon, 2013) platforma za klasifikaciju akustičnih pobuda na mobilnim telefonima. Pored upotrebe mikrofona pametnih telefona, poznati su i akustični senzorski sistemi poput *BodyBeat* (Rahman, 2014) koje detektuju i klasifikuju zvukove koji ne proizilaze iz govora, ali su sastavni deo života, kao što su: kašljanje, kihanje ili disanje, ili *BodyScope* (Yatani, 2012) nosivi akustični sistem koji prepoznaje aktivnosti korisnika na osnovu zvukova koji dopiru iz predela grla. Prethodno navedene, a i mnoge druge aplikacije rešavaju jedan od osnovnih problema u oblasti upotrebe akustičnih senzora - problem lokalizacije izvora zvuka. Procena dolaznih pravaca zvuka, korišćenjem prostorno razdvojenih mikrofona, primenjuje se u svrhu lokalizacije aktivnog govornika. U praksi se najčešće koriste TDOA metode (eng. *Time Delay of Arrival*) zasnovane na proceni vremenskih kašnjenja između mikrofonskih signala (Julián, 2004). Dva tipična algoritma iz skupa TDOA metoda su: generalizovana kros-korelacija (eng. *Generalized Cross Correlation - GCC*) i AMDF (eng. *Average Magnitude Difference Function*). Generalizovana kros-korelacija (Knapp, 1976) se zasniva na lokalizaciji maksimuma kros-korelacione funkcije između ponderisanih mikrofonskih signala. Funkcija se ponderiše zbog povećanja robusnosti algoritma procene dolaznih pravaca na prisustvo šuma i odjeka u prostoriji. Metoda AMDF (Ross, 1974) računa prosek razlika signala u zvučnom okviru, udaljenih za određeni vremenski period. Na primeru fokusiranja kamere ka govorniku pri konferencijskim skupovima, upotrebljava se i metod maksimalne verovatnoće (Zhang, 2008) koji se praktično pokazao kao vrlo robusan uz minimizovane procesne zahteve. Zajedničko za sve metode detekcije izvora zvuka, u ovom slučaju prisutnog čoveka, jeste pretpostavka da je osoba aktivni govornik, odnosno izvor zvučnih pobuda.

U okruženju ispunjenom šumom, odnosno bukom, uveliko se umanjuje kvalitet detekcije prisustva ljudi korišćenjem mikrofona, pošto govor čoveka više nije dominantan zvuk i u tom slučaju je neophodno primeniti odgovarajuće VAD (eng. *Voice Activity Detection*) tehnike. Uobičajeni VAD sistem se sastoji iz dva osnovna bloka: blok koji izdvaja neophodne

karakteristike iz signala, koje se dalje prosleđuju u naredni blok koji na osnovu određenih pravila odlučuje da li je u pitanju govorni ili ne-govorni signal. Ukoliko je signal čist, bez šuma, ili je pak odnos signal-šum (*eng. Signal-to-Noise Ratio - SNR*) veoma visok, govor se lako može odrediti poređenjem nivoa snage govornog i ne-govornih signala. Na primer u sobi u kojoj nema glasne buke, govor se može vrlo lako odrediti. Ukoliko je govorni signal više zaprljan šumom, naročito ako su statističke karakteristike šuma slične govornom signalu, neophodno je primeniti određene metode filtriranja signala, poput potiskivanja odjeka (*eng. Echo Cancellation*), koje su mahom računski vrlo zahtevne i uslovljavaju upotrebu relativno skupih i preciznih mikrofona (*Šarić, 2014; Khoa, 2012; Luu, 2010*).

Ultrazvučni senzor je drugačije konstrukcije od mikrofona. Sastoji se iz odašiljača, odnosno izvora ultrazvučnih talasa i ultrazvučnog prijemnika. Odašiljač emituje ultrazvučni talas, kratke talasne dužine ali visoke osetljivosti, koji se odbija i od najsitnije elemente u okolini, pa čak i od defekte na samim tim elementima. Vreme koje protekne do trenutka kada se emitovani talas, reflektovan od okoline detektuje na prijemniku, određuje dužinu puta talasa iz čega se jednostavno može odrediti prisustvo, odnosno udaljenost nekog objekta od ultrazvučnog senzora. Opseg učestanosti na kojima ultrazvučni senzori mogu da ispituju okolinu je od 20 kHz do 75 kHz i zvuk na toj učestanosti je nečujan za ljudsko uvo. Prednost ultrazvučnih senzora u odnosu na optičke 2D kamere jeste u tome što mogu obezbediti trodimenzionalnu informaciju o okruženju ne zahtevajući posebne uslove osvetljenja, međutim procesiranje signala je u tom slučaju znatno složenije. Ujedno, ultrazvučni senzori su jeftiniji od optičkih senzora, ali i od mikrofona, tj. mikrofonskih nizova, te mogu predstavljati dobru alternativu.

Jedan od nedostataka ultrazvučnih senzora jeste da kvalitet ispitivanja okruženja zavisi od uglova zidova prostorije u kojoj se vrši ispitivanje prisustva ljudi, upravo zbog širokog ugla emitovanog talasnog snopa (*Kim, 2010*). Objekti koji imaju svojstva spekularnog odbijanja ultrazvučnih talasa narušavaju ispravnost ispitivanja okruženja (*Flynn, 1988*), te uglavnom objekti koji su normalni u odnosu na ultrazvučnu talasnu osu mogu biti pravilno detektovani (*Sabatini, 1995*). Dodatno, objekti do 0.5m udaljenosti od ultrazvučnog senzora se teško razaznaju, upravo zbog senzorske konstrukcije (*Mohammad, 2009*).

Zbog navedenih nedostataka, ultrazvučni senzori se često kombinuju sa infracrvenim senzorima (*eng. Infrared - IR*), da bi se međusobno dopunjavali i prevazišli nedostatke vezane za prelamanje odaslanih talasa u ambijentu. Takođe i ambijentalna temperatura ima negativan uticaj na ispravnost detekcije ultrazvučnim talasima. Brzina zvuka kroz vazduh pri temperaturi od 0°C iznosi 331.45 m/s i uvećava se za 0.607 m/s na svakih 1°C. Stoga je neophodna kompenzacija sa temperaturom okoline, te se ultrazvučni senzori neretko dopunjuju i sa temperaturnim senzorom.

Sinteza sa dodatnim sensorima različitih tehnologija, zahteva kompleksne procedure instalacije i obrade dobavljenih informacija, što uvodi dodatne troškove pri realizaciji pametnog ambijenta.

U tabelama 5 i 6 dat je pregled tehničkih karakteristika zvučnih i ultrazvučnih senzora, značajnih za upotrebn aspekt detekcije prisustva ljudi u sistemima Ambijentalne Inteligencije.

Tabela 5. Opis karakteristika zvučnih senzora


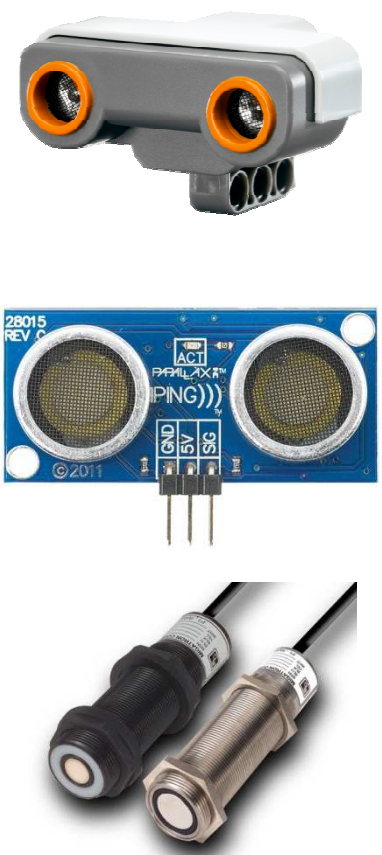
Mikrofon/mikrofonski niz		
	Opseg detekcije objekata:	3m do 5m (rang zavisi od kvaliteta, ali i nivoa buke/šuma)
	Komunikacione sprege:	USB, analogna audio sprega (<i>eng. Audio Input Device</i>), Firewire, Bluetooth
	Cena (€):	Od nekoliko desetina do par hiljada
	Proizvođači:	Sennheiser, Honeywell, Shure, Logitech, Genius
	Prednosti:	<ul style="list-style-type: none"> • Visoka robustnost detekcije • Jednostavna upotreba • Napredni algoritmi audio obrade mogu da potisnu eho, šum i znatno umanje uticaje okruženja • mikrofonski nizovi omogućuju otkrivanje lokacije govornika
	Nedostaci:	<ul style="list-style-type: none"> • Nepostojanje različitih komunikacionih sprege (isključivo USB) • Neophodni napredni algoritmi obrade zvuka (samim tim i više procesne snage) za precizne primene • osetljivost na položaj govornika • osetljivost na glasnoću govora • osetljivost na izvore šuma i odjeka u ambijentu • Prilično skupa kvalitetnija oprema

Tabela 6. Opis karakteristika ultrazvučnih senzora

Ultrazvučni senzor		
	Opseg detekcije objekata:	Od 0.5m do 3m (teorijski do 10m)
	Komunikacione sprege:	USB, analogne i digitalne izlazne linije
	Cena (€):	Od 25 evrasamo za senzorski modul do par stotina za kompletan ultrazvučni senzorski uređaj
	Proizvođači:	Devantech, Murata, SensComp, Omron, Banner, Turck
	Prednosti:	<ul style="list-style-type: none"> • Precizna detekcija i merenje rastojanja • Jednostavna upotreba • Prihvatljiva cena
Nedostaci:	<ul style="list-style-type: none"> • Neotpornost na promene temperature i strujanja vazduha, škripu vrata, pa čak i zvuk protoka vode kroz cevi i ventile • Uticaj rada nekih električnih uređaja na ispravnost detekcije • Sporiji odziv • Neki modeli imaju problem detekcije objekata do 0.5m udaljenosti • Nepravilna refleksija u prostorijama složene geometrije • Nepravilna refleksija u prostorijama u kojima se nalazi dosta mekog materijala koji apsorbuje ultrazvučne talase 	

1.1.3 Infracrveni i mikrotalasni senzori

Infracrveni senzori spadaju u komercijalno najzastupljeniju grupu senzora za otkrivanje pokreta, zbog jednostavnosti upotrebe, niske cene, dobre osetljivosti, male potrošnje i brzog

odziva. Dele se na pasivne i aktivne. Pasivni infracrveni senzori (*PIR*) detektuju emisiju infracrvene (*IR*) energije od strane objekata u okolini. Aktivni infracrveni senzori, poput *Kinect* 3D senzora, emituju infracrvenu svetlost obasjavajući okolinu i objekte u njoj, a potom odbijene infracrvene talase detektuju na prijemnoj strani. Posebna vrsta aktivnih infracrvenih senzora su tzv. “elektronske ograde”, čija se aktivnost zasniva na principu emitovanja usmerenog infracrvenog snopa iz fotodiode u pravcu prijemnika koji sadrži fotoelektričnu ćeliju. Presecanje infracrvenih snopova dovodi do toga da do prijemnika dopre manje od 90% emitovanih infracrvenih zraka u određenom vremenskom intervalu, što izaziva generisanja signala detekcije.

PIR senzor integriše piroelektrični element koji detektuje kretanje objekata mereći promene u emisiji infracrvene svetlosti tih objekata u odnosu na prostoriju (*McGrath, 2013; Soyer, 2009*). Piroelektrični element menja količinu svog naelektrisanja sa promenom temperature, odnosno promenom IR zračenja koje dopire na njega. S obzirom da svako telo emituje određeni nivo elektromagnetnog zračenja na temperaturi iznad apsolutne nule, što ono postaje toplije, to emituje i veći nivo. Kada se čovek, kao topao objekat, nađe u zoni nadzora PIR senzorom, detektuje se razlika u nivou emisije IR svetlosti u odnosu na okolinu, što predstavlja detekciju. Zbog potrebe da se detektuje pokret, tj. promena, a ne prosečan nivo zračenja, PIR detektor pokreta se sastoji iz dva elementa, koji su povezani tako da mogu da potiru jedan drugog. Ukoliko bilo koji njih detektuje više ili manje zračenja od drugog, stanje izlaza će se promeniti.

Za usmeravanje IR svetlosti na piroelektrični senzor koristi se Frenelovo (*Fresnel*) sočivo (*Davis, 2007*). Na bazi Frenelovog principa ulazna svetlost se deli kroz sistem sočiva, gde svako sočivo koncentriše IR energiju iz odgovarajuće zone detekcije u snop koji se usmerava na piroelektrični element. Frenelovo sočivo poboljšava osetljivost sistema, domet otkrivanja, kao i vidni opseg. Pošto je površina Frenelovog sočiva sačinjena iz više manjih segmenata, za istu žižnu daljinu, Frenelovo sočivo je manje, a time i jeftinije od običnog sfernog sočiva. Međutim, nedostatak Frenelovog sočiva je pojava slepih zona u vidnom polju sočiva koje se javljaju usled nehomogene strukture, a naročito su izražene na većim udaljenostima (*Janković, 2008*).

PIR senzori se uglavnom koriste za otkrivanje ulaska ili izlaska osoba iz određene prostorije, odnosno pojedinačnih oblasti prostorije, a najčešće u svrhu nadzora (*Moghavvemi, 2004*) ili automatskog upravljanja osvetljenjem (*Bai, 2008*). Iako vrlo popularni, PIR senzori imaju mnoštvo nedostataka. PIR senzori ne mogu odrediti broj ljudi u oblasti nadzora, niti njihovo rastojanje od senzora. Statični topli objekti, poput osoba koje nepomično stoje, sede ili leže ne mogu biti detektovani od strane PIR senzora. Takođe, vlažnost vazduha kao i porast temperature ambijenta (od 30°C pa naviše) izrazito negativno utiče na ispravnost detekcije pošto je razlika u toplotnoj emisiji između čoveka i ambijenta sve manja. Bljesak svetla i direktna sunčeva svetlost koja sadrži infracrveni spektar takođe negativno utiču na ispravnost detekcije,

povećavajući stepen netačnih alarmiranja (*eng. False alarms*). Stoga se često kombinuju sa drugim grupama senzora, poput optičkih kamera (*Cucchiara, 2007; Rajgarhia, 2004*) ili ultrazvučnih senzora (*Bai, 2010; Bai, 2013*), u cilju poboljšanja kvaliteta detekcije prisustva ili kretanja ljudi i optimizacije potrošnje električne energije napajanja. Evolucija PIR senzora je omogućila i realizaciju savremenih više-direkcionih 360° PIR senzora (*Yoshiike, 1999*), koji poseduju mogućnost nadzora prostora u radijusu od 360°, čineći dobru alternativu optičkim i 3D kamerama za potrebe otkrivanja ljudi, a po vrlo pristupačnoj ceni.

Mikrotalasni senzori emituju elektromagnetni talas u opsegu radio učestanosti (*eng. Radio Frequency - RF*), obično na oko 10.5 GHz ili 24 GHz. Talasna dužina od oko 3 cm omogućuje propagaciju kroz sitne čestice, poput čestica vodene pare, a pri tome je dovoljno kratka da se odbija od veće objekte kao što je čovek. Osnovna prednost u odnosu na druge tipove senzora kretanja, poput PIR senzora, jeste što mogu obuhvatiti veću oblast detekcije, odnosno veća rastojanja i to u širem temperaturnom opsegu i bez uticaja vlažnosti vazduha na ispravnost rada.

Uopšteno, mikrotalasni senzori se tretiraju kao aktivne senzorske komponente koje prekrivaju određenu oblast sa elektromagnetnim talasima pomoću kojih detektuju kretanje u njoj. Postoje dva tipa mikrotalasnih senzora: monostatički i bistatički. Monostatički mikrotalasni senzori sadrže predajnik i prijemnik u istom kućištu, dok su kod bistatičkih mikrotalasnih senzora predajnik i prijemnik fizički razdvojeni. Nakon refleksije frekventno modulisanog talasa od objekta na propagacionoj putanji, na prijemnoj strani poredi se fazna razlika između referentnog i primljenog signala, po principu Doplerovog efekta. Emitovani talas može biti frekventno ili amplitudski modulisan. Bistatički predajnik emituje usmereni snop radio talasa ka prijemniku, pri čemu se detektuje eventualna fluktuacija u jačini primljenog signala nastala usled kretanja nekog objekta u okviru zone detekcije. Prednost monostatičkih senzora jeste u tome što korisnik može lako položajem antene konfigurisati elektromagnetni talas da bude dug, kratak, uzan snop, odnosno ovalan i time odrediti područje detekcije po potrebi. Bistatički senzori mogu obuhvatiti znatno veće površine, ali zahtevaju čisto vidno polje bez postojanja statičnih prepreka, pa se takvi senzori uglavnom koriste na spoljnim površinama, dok se monostatički mikrotalasni senzori češće koriste unutar prostorija (*U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2011*).

Mikrotalasni senzori se često upotrebljavaju u sistemima za nadzor starijih ljudi, a u cilju pružanja adekvatne nege i brze pomoći u slučaju nekih iznenadnih situacija, poput padova (*Liu, 2011*). Mikrotalasni senzori omogućuju čak i nadzor ljudi na osnovu otkucaja srca ili mikropokreta tela prilikom disanja (*Li, 2010*). Mikrotalasni senzori takođe ispoljavaju određene nedostatke, s obzirom da reaguju na sve objekte koji reflektuju emitovanu mikrotalasnu energiju, stoga je neophodno kompenzovati ove nedostatke upotrebom naprednijih algoritama detekcije prisustva ljudi, na primer analizom signala u frekventnom domenu (*Alejos, 2009*). Zbog upotrebe

radio talasa visokih učestanosti koji lako prolaze kroz tanje zidove i zidove formirane od mekših materijala poput gipsa, mikrotalasni senzori mogu da pogrešno detektuju prisustvo osobe u susednoj prostoriji, kao da je ta osoba prisutna u prostoriji detekcije. Ukoliko je osoba bliže zidu koji razgraničava prostoriju detekcije od susedne prostorije, utoliko je veća verovatnoća pojave lažnih detekcija. Takođe, česta je interferencija između različitih mikrotalasnih senzora koji su montirani blizu jedan drugome, ali je česta i interferencija sa drugim izvorima elektromagnetnog zračenja bliskog mikrotalasnoj učestanosti (*Polivka, 2007*). Značajan funkcionalni nedostatak ispoljava teorijska činjenica da uljez kome je poznata zona detekcije, a pri tom se sporo kreće prekriven materijalom sa visokim stepenom apsorpcije, u velikoj verovatnoći će ostati neopažen od strane mikrotalasnog senzora. Naravno, potrebno je da se uljez kreće u idealnom luku, normalno na talasnu osu detektora, pri čemu sme da se kreće brzinom od nekoliko cm/s i bez skretanja sa idealne putanje. Upravo zbog ovakvih nedostataka, mikrotalasni senzori se uvezuju sa PIR (*Moshiri, 2007*) ili ultrazvučnim sensorom (*Ruser, 1999*), povećavajući stepen kvaliteta detekcije ljudi u sistemima Ambijentalne Inteligencije.


U tabelama 7 i 8 dat je pregled tehničkih karakteristika PIR i mikrotalasnih senzora, značajnih za upotrebn aspekt detekcije prisustva ljudi u sistemima Ambijentalne Inteligencije.

Tabela 7. Opis karakteristika pasivnog infracrvenog senzora

Pasivni infracrveni (PIR) senzor		
	Opseg detekcije objekata:	Do 10 m pod maksimalnim uglom od ± 15 stepeni
	Komunikacione sprege:	WiFi/Wireless (433/868 MHz), USB, analogne linije
	Cena (€):	Nekoliko € samo za senzorski modul; Od 10 pa naviše za ceo senzorski uređaj
	Proizvođači:	Siemens, Bircher, Paradox, Steinel, Optex, Leviton, Kube, ...
	Prednosti:	<ul style="list-style-type: none"> • Veliki broj proizvođača i velika zastupljenost na tržištu • Jednostavna upotreba i podešavanje osetljivosti i daljine detekcije • Niska cena • Visoka pouzdanost prilikom detekcije kretanja ljudi

		<ul style="list-style-type: none"> • Nepotrebna kalibracija pri promeni rasporeda nameštaja u prostoriji
	Nedostaci:	<ul style="list-style-type: none"> • Veliki uticaj temperature na ispravnost detekcije (optimalan rad na temperaturi između 15°C i 20°C) • Uticaj povećanja vlažnosti vazduha na ispravnost detekcije (neki modeli optimalno rade na 93%) • Negativan uticaj direktne sunčeve svetlosti • Nemogućnost detekcije nepomičnih objekata (čovjek koji sedi, leži ili stoji nepomično) • Neophodno je postojanje linije vidljivosti između senzora i objekta detekcije

Tabela 8. Opis karakteristika mikrotalasnih senzora

Mikrotalasni (radarski) senzor na Doplerovom principu		
	Opseg detekcije objekata:	Monostatički od 1 do 60m, bistatički do nekoliko stotina metara
	Komunikacione sprege:	Wireless, USB, analogne izlazne linije
	Cena (€):	Od nekoliko desetina do nekoliko stotina za bistatički senzorski uređaj
	Proizvođači:	Microwave Solutions, Wadeco, Trilink, Southwest Microwave
	Prednosti:	<ul style="list-style-type: none"> • Precizna detekcija kretajna • Precizno merenje rastojanja • Mogućnost detekcije puzanja i nepomičnih osoba • Jednostavna upotreba • Dobra otpornost na promene temperature i vlažnosti vazduha
	Nedostaci:	<ul style="list-style-type: none"> • Relativno viša cena za preciznije uređaje

		<ul style="list-style-type: none"> • Materijal sa visokim stepenom apsorpcije, može ostati neopažen • Interferencija sa drugim izvorima elektromagnetnog zračenja na sličnim učestanostima • Pojava lažnih detekcija zbog prolaska radio talasa kroz tanje zidove
--	--	--

Kroz prethodnu analizu tržišno najzastupljenijih senzorskih tehnologija, evidentno je da svaka tehnologija ima određene prednosti i nedostatke u odnosu na neku drugu. Usled navedenih nedostataka, različite senzorske tehnologije se često uparuju, uzajamno ispravljajući nedostatke drugog tipa senzora, a pri tome uvećavajući kvalitet interakcija između čoveka i inteligentnog okruženja, što i jeste njihov suštinski cilj. Primera radi, mikrotalasni senzori i pasivni infracrveni senzori su često par. PIR senzori su više osetljivi na bočne pokrete, dok su mikrotalasni senzori osetljiviji na kretanje u pravoj liniji sa osom prostiranja senzorskog radio talasa. U velikom broju slučajeva se uparuje i više senzorskih tehnologija uz obilno korišćenje metoda klasifikacije i odlučivanja (*Zhang, 2009a*). Princip senzorske sinergije tretira svaki senzor kao zasebnu jedinicu, koja u kompleksnom sistemu Ambijentalne Inteligencije dobavlja specifične informacije o percepciji okruženja na sebi svojstven način, poput različitih čula u ljudskom telu.

Međutim, pristup senzorske sinergije često zahteva znatne finansijske izdatke, koji su uvek nepopularni među potrošačima. Obrada mnoštva informacija koje pristižu sa različitih senzora zahteva računare dovoljno velike procesne snage. Pored toga, montiranje različitih senzorskih uređaja u okruženju je tehnološki zahtevna aktivnost i neophodno je prisustvo dobro obučene osobe. Upravo iz navedenih razloga, cilj ovog istraživanja je definicija, implementacija i integracija jednostavnog, efikasnog, jeftinog i pouzdanog postupka za otkrivanje prisustva i kretanja ljudi upotrebom sveprisutnih radio signala. Veliki broj uređaja u domaćinstvima je osposobljen za radio komunikaciju, te se optimalan pristup zasniva na iskoristivosti već prisutnih komunikacionih radio talasa za dodatne potrebe otkrivanja ljudi. Postupci za detekciju ljudi radio talasima opisani u ovom istraživanju su primenljivi na komunikacione radio talase između bilo koja, najmanje dva uređaja, koja razmenjuju informacije na učestanosti od 2.4 GHz.

U nastavku disertacije je opisano trenutno stanje u oblasti postupaka za detekciju prisustva i kretanja ljudi radio talasima, data je teorijska osnova opravdanosti ovakvog pristupa, opisani su statistički modeli detekcije i predstavljeni su rezultati verifikacije postupaka u realnim uslovima.

1.2 POSTUPCI ZA DETEKCIJU PRISUSTVA I KRETANJA LJUDI RADIO TALASIMA

1.2.1 Osnovni pojmovi otkrivanja ljudi radio talasima i teorijska opravdanost postupka

IEEE 802.15.4 je zvanični standard za bežičnu komunikaciju koja se najčešće upotrebljava u bežičnim senzorskim mrežama, konkretno u sistemima Ambijentalne Inteligencije. Standard definiše jednostavnu komunikaciju, optimizovanu za prenos podatka na kraćim rastojanjima, koja obezbeđuje protok podataka manjeg obima (*eng. Data Rate*) do 250 kbit/s, jednostavno i brzo uparivanje, kao i kratke komunikacione poruke, sa naglaskom na izrazito nisku potrošnju električne energije neophodnu za emitovanje i prijem radio talasa. Komunikacija se može obavljati na različitim opsezima učestanosti: 868 MHz (područje Evrope), 902 ili 928 MHz (područje SAD i Kanade), a za područje celog sveta najviše je zastupljen opseg od 2.4 GHz. Mreža može biti kreirana u formi P2P (*eng. Peer-to-peer*) ili zvezda topologije, uz postojanje najmanje jednog usklađivača, odnosno koordinatora mreže (*eng. Network Coordinator*). Svaki umreženi uređaj poseduje jedinstvenu 64-bitnu adresu, kojom se lako identifikuje u mreži. Navedeni standard služi kao osnova određenim komunikacionim protokolima poput *ZigBee* i *6LoWPAN*, koji su veoma česti u okviru realizacije sistema pametnih kuća i prikladni pošto uvode mrežastu topologiju (*eng. Mesh*), gde je svaki bežični uređaj osposobljen da se po potrebi ponaša kao mrežni usmerivač (*eng. Router*). Opseg od 2.4 GHz koriste još neki popularni protokoli, poput *Bluetooth*, zasnovani na IEEE 802.15.1 standardu. Navedeni opseg je od velike važnosti za realizaciju radio-frekventne detekcije prisustva i kretanja ljudi i u nastavku teze pažnja će biti posvećena isključivo 2.4 GHz opsegu radio učestanosti.

Indikator primljene snage radio signala (*RSSI*) predstavlja jedinicu mere snage prisutne u primljenom radio signalu i koristi se kao pouzdan parametar za estimaciju kvaliteta postojeće radio veze. Pored *RSSI* u upotrebi je i *LQI* (*eng. Link Quality Indicator*) koji je dugo vremena važio za jedini pouzdan parametar kvaliteta radio veze. Međutim, *Srinivasan (2006)* i *Oliveira (2012)* su potvrdili da je i *RSSI* jednako pouzdan parametar kvaliteta radio veze između dva susedna bežična uređaja, a koji se znatno jednostavnije može dobiti iz odgovarajućeg registra mikroprocesora radio prijemnika.

Pojam radio-frekventne (*eng. Radio Frequency - RF*) detekcije prisustva i kretanja ljudi u bežičnim senzorskim mrežama (*WSN*) unutar zatvorenog prostora, korišćenjem postupaka za obradu radio-kontekstualnih podataka na osnovu varijacija *RSSI* je aktuelna istraživačka tema (*Reggiani, 2013*). Pojam *RF* senzorske mreže potiče od činjenice da je sama mreža radio talasa u stvari senzor, koji koristi postojeće komunikacione radio talase za otkrivanje ljudi, kao i njihovu lokalizaciju u okruženju.

Prisustvo osobe unutar uspostavljenog radio komunikacionog polja između bežičnih uređaja koji komuniciraju na radio učestanosti od 2.4 GHz dovodi do pojave izraženih varijacija RSSI na strani prijemnika (*Graham, 2011*). Varijacije se javljaju usled uticaja efekata zasenčenja (*eng. Shadowing*) i slabljenja (*eng. Fading*) energije radio talasa prouzrokovanih prisustvom čoveka na propagacionoj putanji radio talasa između prijemnog i predajnog bežičnog uređaja (*Rappaport, 2001; Youssef, 2007*). S obzirom da se ljudsko telo najvećim delom sastoji iz vode, čija molekularna rezonancija optimalno apsorbuje energiju radio talasa na učestanosti od 2.4 GHz (*Nafarieh, 2008*), prisustvo čoveka na propagacionoj putanji radio talasa izaziva izraženije varijacije RSSI nego drugi objekti. Apsorpcija nije jedina pojava koja utiče na propagaciju radio talasa, a time i varijaciju RSSI. Pojave poput refleksije, difrakcije i raspršivanja radio talasa od objekte na propagacionoj putanji takođe utiču na promenu forme varijacije indikatora primljene snage radio signala. Refleksija i difrakcija od ljudski skelet, mišiće, kao i tokove telesnih tečnosti generišu specifičnu formu varijacije indikatora primljene snage radio signala što dodatno izdvaja čoveka od drugih objekata u procesu detekcije prisustva ljudi radio talasima u bežičnim senzorskim mrežama. U literaturi se navedeni fenomeni često grupišu i označavaju jedinstvenim nazivom - neregularnost prostiranja radio talasa (*eng. Radio irregularity*) (*Ababneh, 2009; Zhou, 2004; Lin, 2011*). Iako se uglavnom posmatra kao nedostatak bežičnih mreža, u ovoj tezi je opisana upotrebljivost neregularnosti prostiranja radio talasa za potrebe otkrivanja ljudi.

Komunikacija na učestanosti od 2.4 GHz je u manjoj meri osetljiva na meteorološke uticaje, pre svega na promenu temperature ambijenta (*Wennerström, 2013*). Međutim, osetljivost radio talasa je znatno manja nego kod drugih konvencionalnih senzorskih tehnologija, što je sa aspekta otkrivanja čoveka na osnovu analize varijacija RSSI zanemarljivo (*Boano, 2010*). Stoga se varijacija RSSI u okviru bežičnih senzorskih mreža može analizirati u cilju formiranja tzv. "radio slike" okruženja, na osnovu koje se može zaključiti o prisustvu osobe u prostoru. Pored minornih meteoroloških uticaja, faktori koji značajnije utiču na formiranje inicijalne varijacije RSSI u prostoru su: (1) uticaj okruženja i prisutnih objekata na fenomen prostiranja radio talasa kroz više putanja (*eng. Multipath*), (2) interferencija između radio talasa i prisustvo šuma (*eng. Background noise*), (3) karakteristike uređaja fizičke arhitekture i to prvenstveno primopredajnih antena, poput: tipa antene, predajne snage, osetljivosti prijemnika, odnosa signal šum, itd.

Pojam inicijalne varijacije RSSI podrazumeva varijaciju prisutnu pri uobičajenoj razmeni komunikacionih radio poruka, kada na prostiranje radio talasa ne utiče čovek svojim prisustvom, već isključivo meteorološki faktori, faktori okruženja i fizičke arhitekture. Analizom inicijalne varijacije RSSI formira se inicijalna radio slika okruženja, koja se može iskoristiti za dalja istraživanja kvaliteta radio mreža, a u slučaju ovog istraživanja i za postavljanje pragova detekcije, koji su objašnjeni u narednim poglavljima.

S obzirom da se radio talasi, posebno na učestanosti od 2.4 GHz, nesmetano prostiru kroz zidove uobičajenih građevinskih materijala, ukoliko se energija datih radio talasa koristi i za otkrivanje prisustva i kretanja ljudi, spoljni događaji mogu imati negativnog uticaja na ispravnost detekcije. Spoljni događaj može predstavljati prisustvo čoveka van prostorije u kojoj se obavlja proces detekcije, ali dovoljno blizu zidovima te prostorije, tako da njegovo prisustvo ili kretanje utiče na radio talase u prostoriji detekcije i uvodi neželjene fluktuacije RSSI. Unutrašnji događaj u ovom slučaju obuhvata uticaj okruženja unutar prostorije detekcije, koji podrazumeva uticaj statičnih objekata, poput elemenata nameštaja, koji na sebi svojstven način apsorbuju i odbijaju radio talase, uvodeći time dodatne smetnje, koje je neophodno ukloniti da bi se ispravno otkrilo prisustvo pokretnih i nepomičnih ljudi.

Da bi se u najvećoj meri potisnule navedene smetnje, prilikom obrade ulaznih podataka neophodno je uvesti određene transformacije, koje analiziranjem dobavljenih odbiraka RSSI mogu ekstrahovati korisne informacije u obliku specifičnih obrazaca ponašanja radio talasa (*eng. Data Mining*). Transformacioni procesi imaju za cilj da sažmu podatke, poput analize baznih komponenti, da podatke prevedu u informacioni domen, informacionom entropijom, ili u frekventni domen, Furijeovom transformacijom. Kao rezultat primenjenih transformacija na skup RSSI odbiraka, ponašanje radio talasa se može predstaviti sa tri osnovna obeležja: amplitudskim, informacionim i frekvencijskim, čime je dalje moguće utvrditi: (1) da li je u prostoriji u kojoj se obavlja proces detekcije prisutan čovek (ili više ljudi), (2) da li se čovek kreće ili miruje, (3) da li je na nekoj lokaciji prisutan čovek ili deo nameštaja (koji takođe uvodi jedan vid šuma u proces detekcije), (4) da li se čovek kreće unutar oblasti detekcije ili van nje.

1.2.2 Stanje u oblasti postupaka za RF detekciju prisustva i kretanja ljudi

Jedno od najranijih istraživanja o upotrebi varijacija RSSI za otkrivanje prisustva ljudi u mreži radio signala predstavio je *Woyach (2006)*, obrazlažući pojavu fenomena zasenčenja radio talasa usled prisustva ljudskog tela na direktnoj putanji talasnog prostiranja između prijemnika i predajnika. Data ideja je evoluirala u sistem za brojanje ljudi na otvorenom prostoru (*Puccinelli, 2011*) implementacijom postupka detekcije prolaska ljudi upotrebom bežičnih primopredajnih uređaja skromnijih procesnih resursa. Primopredajni uređaji kontinualno razmenjuju pakete, gde se za svaki primljeni paket očitava vrednost RSSI. Stabilnost uspostavljene radio veze data je u obliku intenziteta varijacija odbiraka RSSI. Ukoliko čovek svojim kretanjem prepreči putanju prostiranja radio talasa, stabilnost radio veze će biti narušena, što dovodi do pojave intenzivnijih varijacija RSSI. U domenu raspodele učestanosti (*eng. Frequency Distribution*) narušena stabilnost radio veze manifestuje se pojavom šiljaka (*eng. Peak*) u frekventno transformisanom nizu odbiraka RSSI. *Lee (2010)* je detaljno istražio izvodljivost otkrivanja uljeza karakterisanjem

fluktuacija RSSI, što je potom potvrđeno kroz realizaciju postupka automatskog brojanja ljudi unutar zatvorenog objekta (Lin, 2011). Na osnovu analize histograma apsolutnih vrednosti RSSI, odnosno standardne devijacije niza odbiraka, moguće je odrediti prisustvo čoveka, prvenstveno kroz njegovo kretanje koje uzrokuje da raspodela na histogramu obuhvata širi spektar vrednosti, što implicira porast standardne devijacije. Međutim, standardna devijacija različito varira u različitim okruženjima što potvrđuje nemogućnost definisanja univerzalne granične vrednosti u formi statistike jednodimenzionalnog niza. Predloženi pristup obuhvata analizu fluktuacije, tj. razlike između dva uzastopna odbirka RSSI, umanjujući time uticaj okruženja na propagacione karakteristike. Hussain (2008) je potvrdio opravdanost korišćenja varijacija RSSI za otkrivanje prisustva ljudi, verifikujući istovremenu pojavu devijacija RSSI sa alarmima svetlosnog senzora prilikom prolaska ljudi, pri čemu je dao prednost upotrebi RSSI u odnosu na indikator kvaliteta radio veze LQI. Za dati niz odbiraka računa se razlika srednje vrednosti i standardne devijacije, te ukoliko je vrednost narednog RSSI odbirka manja od razlike, detektovano je prisustvo.

Distribuirana obrada RSSI odbiraka istovremeno obezbeđuje zaključivanje o prisustvu čoveka, kao i lokalizaciju, odnosno praćenje putanje pokretnih individua (Kaltiokallio, 2010), pri čemu je potrošnja energije baterijskog napajanja minimizovana aktiviranjem transmisije radio signala po unapred utvrđenom sinhronizacionom rasporedu. Svaki bežični čvor nezavisno obrađuje primljene odbirke RSSI niskopropusnim filtrom prvog reda (eng. *First Order Low Pass Filter*) koji uklanja neželjene visoke učestanosti, a potom se poredi razlika između poslednjeg dobavljenog niza odbiraka i novoprimljenog, filtriranog. Ukoliko razlika prelazi unapred definisan prag, okida prvi alarm. Dodatni postupak računa kumulativnu sumu razlika više uzastopnih filtriranih nizova odbiraka RSSI. Ukoliko je kumulativna suma iznad predefinisiranog praga, okida potvrdni alarm, čime se odbacuje mogućnost pojave negativnih varijacija RSSI usled uticaja okruženja i fizičke arhitekture i smanjuje nivo lažnih detekcija (eng. *False Alarms*).

Analiza varijacija RSSI usled neregularnosti prostiranja radio talasa upotrebljava se i pri zaštiti vojnih objekata i nadzoru otvorenih površina. Predstavljeni sistem “*The Matrix*” (Uchida, 2010; Puzo, 2011) obezbeđuje trodimenzionalnu percepciju prostora i objekata u njemu, bilo da je u pitanju čovek ili vozilo, uz mogućnost određivanja veličine prisutnog objekta. Svaki čvor sistema komunicira sa okolnim čvorovima i skladišti dobavljene vrednosti RSSI. Kontrolni čvor periodično preuzima nizove vrednosti RSSI sa svih čvorova i poredi vrednosti odbiraka snage signala sa prethodno utvrđenim pragovima.

Youssef (2007), Deak (2011) i Patwari (2010) su utvrdili pojam pasivne lokalizacije ljudi bez potrebe za nošenjem primopredajnog uređaja (eng. *Device-free Passive Localisation - DFPL*). DFPL postupak se sastoji iz dve faze: trening i praćenje. U fazi treninga formira se radio mapa okruženja na osnovu vrednosti RSSI u pojedinim lokacijama okruženja. Vrednosti

sačuvane u radio mapi se potom porede u fazi praćenja sa tekućim vrednostima RSSI. Ukoliko je osoba prisutna u okruženju, dolazi do variranja RSSI i okida se odgovarajući događaj. Pojam radio lokalizacije korisnika upotrebom radio mapa predlaže i *Kosba (2009)*, takođe oslanjajući se na dve faze postupka detekcije: trening i praćenje. U toku faze treninga, korisnik se pozicionira u različitim delovima prostora detekcije, obezbeđujući informaciju o formi RSSI varijacija u tom delu prostora. Faza praćenja, na osnovu prethodno određenih formi RSSI u repnim tačkama prostora, pronalazi trenutno rastojanje korisnika od repnih tačaka, lokalizujući ga u prostoru. U fazi praćenja koristi se nekoliko postupaka obrade RSSI odbiraka: najbliži susedni u prostoru signala (*eng. Nearest Neighbor in Signal Space – NNSS*), Bajesova inverzija, praćenje Gausove raspodele i histogramska raspodela. Potvrđeno je da su probabilistički ne-parametarski postupci znatno nadmašili parametarske i determinističke, kako po performansama, tako i po ispravnosti.

Zhang (2007) predlaže RF senzorsku mrežu, operativnu na učestanosti od 870 MHz za praćenje ljudi unutar objekta, takođe po DFPL principu. Postupak pozicioniranja se zasniva na prikupljanju dinamike odbijenog signala u formi varijacija RSSI, uslovljenih pokretima osobe prisutne u okruženju. Postupak je proširen na realizaciju sistema raspodeljenog dinamičkog grupisanja (*eng. Distributed Dynamic Clustering*) koji omogućuje praćenje putanje kretanja više ljudi sa visokom pouzdanošću (*Zhang, 2009*). *Moussa (2009)* demonstrira DFPL princip upotrebljen za pasivno otkrivanje uljeza i njihovu lokalizaciju u prostoru računanjem pokretnog preseka (*eng. Moving Average*) varijacije RSSI. Analiza varijanse RSSI upotrebom statističkog modela u formi funkcije pozicije objekta u odnosu na predajnik i prijemnik bežične radio veze, na sličan način detektuje i lokalizuje korisnika (*Patwari, 2011*).

Radio tomografija (*Wilson, 2010, 2010a; Zhao, 2012*) analizira atenuaciju signala sa svih radio veza uspostavljenih između velikog broja bežičnih čvorova jedne radio mreže, a u cilju formiranja slike kretanja objekata unutar date radio mreže. Pokretni objekti se mogu precizno lokalizovati analizom forme RSSI u nizu tačaka prostora, bilo da su već prisutni unutar radio polja, odnosno ulaze, ili napuštaju dato polje radio talasa. Prednost radio tomografije je u tome što nije potrebna kalibracija pre eksploatacije postupka. Pored toga što zahteva postojanje velikog broja bežičnih čvorova, nedostatak radio tomografije je činjenica da objekti moraju sve vreme da se kreću da bi bili lokalizovani, što i nije od praktične primene u sistemima pametnih kuća, gde osoba može nepomično da stoji, sedi ili leži. Blizina zidova bežičnim čvorovima, odnosno refleksija i apsorpcija od zidove prostorije negativno utiču na ispravnost detekcije radio tomografijom, te su dalja unapređenja tema narednih istraživanja (*Wang, 2012; Bocca, 2014*).

Mogućnosti tehničke izvedbe postupaka i sistema za otkrivanje prisustva i kretanja ljudi, odnosno njihovo lokalizovanje, potvrđene su realizacijom tehničkih rešenja u vidu patenata i patentnih prijava. Dostupna patentna literatura dokumentuje više različitih statističkih modela,

zasnovanih uglavnom na jednodimenzionalnoj statistici. *Bao (2011)* opisuje postupak koji otkriva kretanje ljudi analizirajući odbijanje radio talasa od ljudsko telo. Navedenim postupkom je obezbeđeno kontinualno dobavljanje odbiraka RSSI sa svake uspostavljene radio veze u prostoriji ispunjenoj radio talasima sa okolnih bežičnih uređaja. Nad dobavljenim odbircima se potom računa srednja vrednost za određeni vremenski interval i dobijeni rezultat se poredi sa graničnim vrednostima RSSI određenim za svaku radio vezu pojedinačno tokom procesa kalibracije, kada u prostoriji nema prisutnih ljudi. Blok za prepozavanje prisustva ljudi koristi različite modele klasifikacije i statističke obrade odbiraka RSSI u svrhu zaključivanja o nečijem prisustvu, poput: skrivenih Markovljevih modela, neuronskih mreža, rasplinite logike (*eng. Fuzzy logic*) i Bajesovih mreža (*eng. Bayesian networks*). *Kobayashi (2007)* predlaže sistem u kom pristupna tačka (*eng. Access Point - AP*) bežično komunicira sa okolnim uređajima i na osnovu pojave fluktuacija RSSI koje odgovaraju inicijalno utvrđenim obrascima, donosi odluku o nečijem prisustvu. *Van Doorn (2013)* opisuje postupak i sistem za otkrivanje prisustva uljeza u određenoj oblasti, odnosno prostoriji ispunjenoj radio talasima. Veliki broj radio jedinica montiran je tako da u potpunosti okružuje oblast detekcije. Analizom srednje vrednosti i standardne devijacije odbiraka RSSI na svakoj radio vezi zasebno, a potom i poređenjem sa nominalnim vrednostima, kalibrisanim jednostavnim postupkom učitavanja RSSI vrednosti kada nema prisutnih ljudi, moguće je odrediti prisustvo uljeza.

Habib (2011; 2012) dodatno koristi indikator kvaliteta radio veze (*LQI*) i u kombinaciji sa RSSI analizira varijansu odbiraka na pojedinačnoj radio vezi. Nepomične osobe, kao i spori i kratki pokreti ljudi mogu ostati neopaženi u procesu otkrivanja i lokalizacije ljudi Radio tomografijom (*Joshi, 2010*), koja je prethodno analizirana u okviru aktuelnih istraživanja u oblasti. *Patwari i Wilson (2014)* opisuju postupak statističke inverzije sa primenom za DFPL lokalizaciju korisnika u prostoru senzorskih radio mreža. Postupak statističke inverzije omogućuje otkrivanje pomičnih i nepomičnih osoba praćenjem propagacije radio talasa kroz zidove prostorije od interesa, po fizičkim principima sličnim radarskoj tehnologiji. Međutim, ovakav postupak nije u potpunosti primenljiv u sistemima Ambijentalne Inteligencije. U takvim okruženjima neophodno je da se detekcija odnosi na određenu zonu prostora, odnosno prostoriju od interesa, te je prodiranje talasa kroz zidove osobina koju je u slučaju primene za detekciju ljudi neophodno ograničiti na određeni prostor, dok se istovremeno uobičajena komunikacija mora nesmetano obavljati u celokupnom dozvoljenom dometu radio signala. *Gauvreau (2008)* predlaže bežičnu senzorsku mrežu koja istovremeno koristi isti skup radio talasa kako za komunikaciju tako i za otkrivanje uljeza u prostoriji. Otkrivanje prisustva ljudi je zasnovano na detektovanju izraženih promena varijacije RSSI, koje se analiziraju u formi pokretnog proseka niza odbiraka RSSI i poredi sa unapred utvrđenim graničnim vrednostima, određenim od strane

iskusnog montažera prilikom postavke sistema. Granične vrednosti se ne određuju automatskom kalibracijom, što može narušiti ispravnost detekcije ukoliko se promeni raspored statičnih elemenata, poput elemenata nameštaja u prostoriji od interesa. Drugačiji raspored nameštaja će uticati na formu varijacija RSSI, različito za svaku postavku. Time će i ispravnost inicijalno utvrđenih graničnih vrednosti biti narušena, uz neophodno ponovno kalibrisanje vrednosti od strane montažera. Navedeni pristup takođe ne ograničava detekciju ljudi radio talasima unutar zidova prostorije od interesa, što nije u potpunosti primenljivo za otkrivanje ljudi u sistemima Ambijentalne Inteligencije. *Albert (2010)* opisuje postupak i sistem za otkrivanja kretanja ljudi praćenjem promene varijacija RSSI na pojedinačnoj, usmerenoj radio vezi. Za detekciju promena intenziteta RSSI, bežični mrežni uređaj koristi usmerenu antenu za prijem signala sa samo jednog predajnika. Upotrebom usmerene antene, uticaji okruženja su potisnuti, ali takav uređaj ne može ispravno komunicirati sa okolnim uređajima u širem uglu prostiranja radio talasa, što je od značaja za sisteme Ambijentalne Inteligencije, naročito ako je neophodno transformisati uređaj u usmerivač, zarad povećanja dometa ka drugim udaljenim uređajima ili preusmeravanja komunikacije u slučaju otkaza nekih bežičnih čvorova u mreži. Za sisteme Ambijentalne Inteligencije neusmerene (*eng. Omni-directional*) antene poseduju veću upotrebnu vrednost. *Patchell (2004)* predlaže postupak za otkrivanje prisustva ljudi na liniji prostiranja radio talasa, analizom amplitudskih i faznih pomeraja u primljenoj snazi radio signala. *Agrawala (2005)* opisuje postupak i sistem za otkrivanje uljeza analizom devijacija RSSI u odnosu na prethodno utvrđene granične vrednosti. Nedostatak datog postupka je takođe uslovljen upotrebom jednostavnog statističkog modela, zasnovanog na obradi varijacija RSSI u okviru jedne radio veze, što u realnim uslovima eksploatacije ne može obezbediti ispravnost detekcije u svakom trenutku, prvenstveno usled prljanja signala mnoštvom spoljnih uticaja, poput prisutnog šuma i uticaja okruženja. S obzirom da se radio talasi nesmetano prostiru i kroz zidove prostorije u kojoj se određuje prisustvo, ispravnost otkrivanja ljudi na osnovu analize promena RSSI po jednoj radio vezi, a nezavisno od trenutnog stanja ostalih radio veza će rezultovati netačnim odzivom sistema za prethodno navedene tehničke izvedbe u realnim uslovima. Uticaji kretanja ili prisustva drugih osoba sa suprotne strane zida uneće dodatni faktor apsorpcije, difrakcije ili refleksije radio talasa od ljudsko telo i izazvati pojavu lažnih detekcija.

Kompleksniji statistički model za detekciju ljudi radio talasima predlaže izračunavanje Calisove (*Constantino Tsallis*) entropije iz normalizovanog histograma skupa odbiraka RSSI (*DiStasio, 2011*). Rezultujuće entropijske vrednosti se filtriraju kliznim prozorom Medijan filtra. Nedostatak ovakvog pristupa je analiza promena RSSI na jednoj radio vezi, što kao i u prethodno navedenim tehničkim izvedbama, dovodi u pitanje ispravnost detekcije ljudi u realnim uslovima. Autor patenta navodi da je postupak eksperimentalno potvrđen u tzv. "gluvoj sobi", da bi se

maksimalno potisnuli spoljni uticaji. Gluve sobe nisu uobičajeni deo životnog prostora, stoga ovakav pristup zahteva značajan dodatni napor zarad unapređenja kvaliteta detekcije, da bi bio primenljiv u svakodnevnoj upotrebi. *Wilson (2012)* opisuje postupak agregacije distorzija RSSI za otkrivanje prisustva pomičnih i nepomičnih ljudi. Agregacija distorzija snage signala se predstavlja kao suma nezavisnih varijansi RSSI odbiraka, dobavljenih pojedinačno sa svake radio veze u toku određenog vremenskog intervala. Na ovaj način se sumiraju uticaji sa svih radio veza u jedinstven vektor agregacije, čije se vrednosti porede sa prethodno utvrđenim granicama. Opisana upotreba agregacije doprinosi u odeđenoj meri potiskivanju spoljnih uticaja, ali bi inicijalna agregacija ulaznih odbiraka, prvenstveno pre primene bilo kakve statističke obrade podataka, znatno poboljšala performanse detekcije, što će i biti potvrđeno ovom tezom.

Zbog navedenih nedostataka postojećih rešenja za radio-frekventnu detekciju prisustva i kretanja ljudi u okviru bežičnih senzorskih mreža, eksploatacija u komercijalne svrhe nije još dovoljno zastupljena, mada se trend istraživanja u ovoj oblasti kreće u pravcu usavršavanja postupaka detekcije. U cilju unapređenja kvaliteta RF detekcije ljudi, u okviru ove teze realizovani su složeni statistički modeli koji su uvećali robustnost sistema na neželjene spoljne uticaje i istovremeno zadržali jednostavnost obrade podataka. Uveden je niz transformacija i filtriranja izdvojenih baznih komponenti matrice snaga radio signala, prvenstveno algoritmima informacione entropije i brze Furijeove transformacije, ali i nekih inovativnih pristupa, poput određivanja indeksa disperzije, numerički optimizovanih za izvršavanje u realnom vremenu.

POGLAVLJE 2.

DOPRINOSI DISERTACIJE U OBLASTI

2.1 PREDLOG POSTUPAKA ZA DETEKCIJU PRISUSTVA I KRETANJA LJUDI

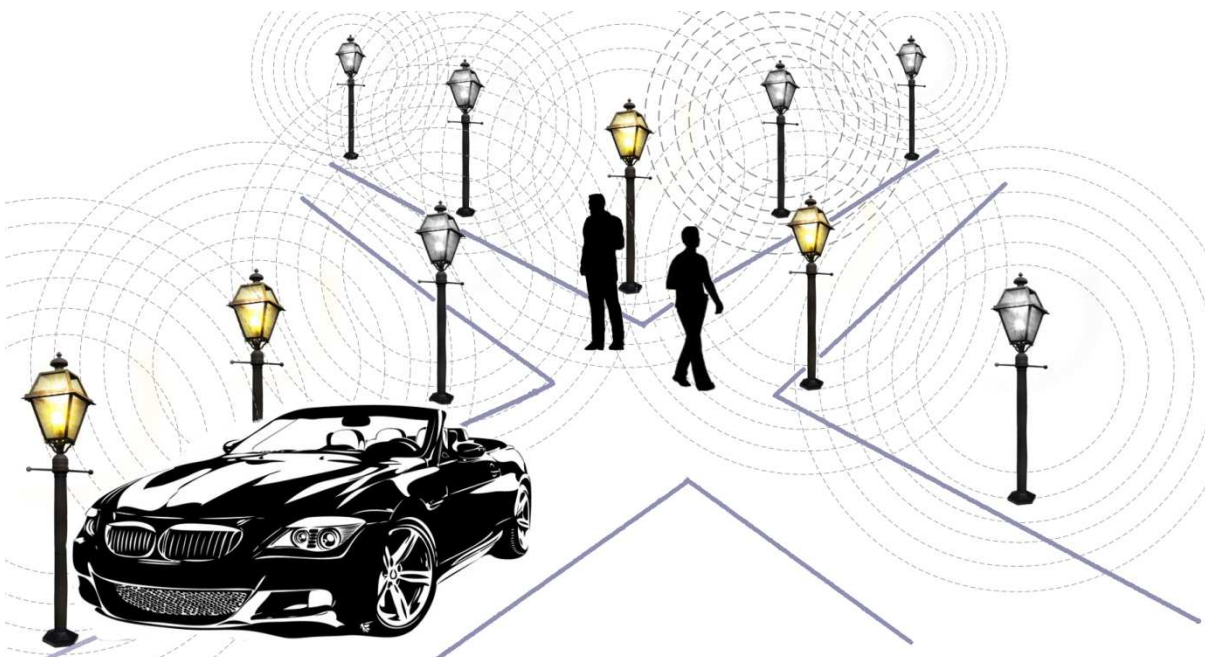
U svrhu kontinuiranog razvoja oblasti RF detekcije prisustva i kretanja ljudi, uvode se novi algoritmi namenjeni pronalaženju što jednostavnijeg načina realizacije i implementacije ovakvih sistema, povećanju njihove robustnosti i pouzdanosti. Detekcija ljudi, zasnovana na analizi varijacija periodično dobavljenih odbiraka RSSI, ne zahteva instalaciju dodatnih senzora, niti nošenje posebnih primopredajnih uređaja, već koristi isključivo postojeće komunikacione radio signale i promenu stanja primljene snage radio signala između stacionarnih bežičnih čvorova lokalne mreže. Time se umanjuje broj potrebnih uređaja fizičke arhitekture, uz očuvanje visokog stepena autonomnosti sistema za procese odlučivanja.

U nastavku teze, opisani su realizovani postupci, od najprostijeg Algoritma minimalnog i maksimalnog odstupanja od srednje vrednosti, u okviru kojeg su i pokazani osnovni nedostaci jednodimenzionalne statistike za realizaciju postupaka RF detekcije ljudi, pa do složene analize informacionog i frekventnog obeležja baznih komponenti zbirne varijacije snaga signala, koja izdvaja niz korisnih informacija iz skupa odbiraka RSSI. Svaki implementirani postupak je eksperimentalno proveren realizacijom okruženja Ambijentalne Inteligencije u okviru OBLO sistema za inteligentno upravljanje potrošnjom električne energije.

Svaki od postupaka obrade podataka je podeljen u dve osnovne faze: fazu agregacije podataka i fazu obrade. Agregacija je istovetna za sve postupke obrade podataka, dok će svaki od predstavljenih statističkih modela obrade podataka biti pojedinačno izložen, uz sve prednosti i mane u odnosu na spisak funkcionalnih zahteva postupka RF detekcije prisustva i kretanja ljudi.

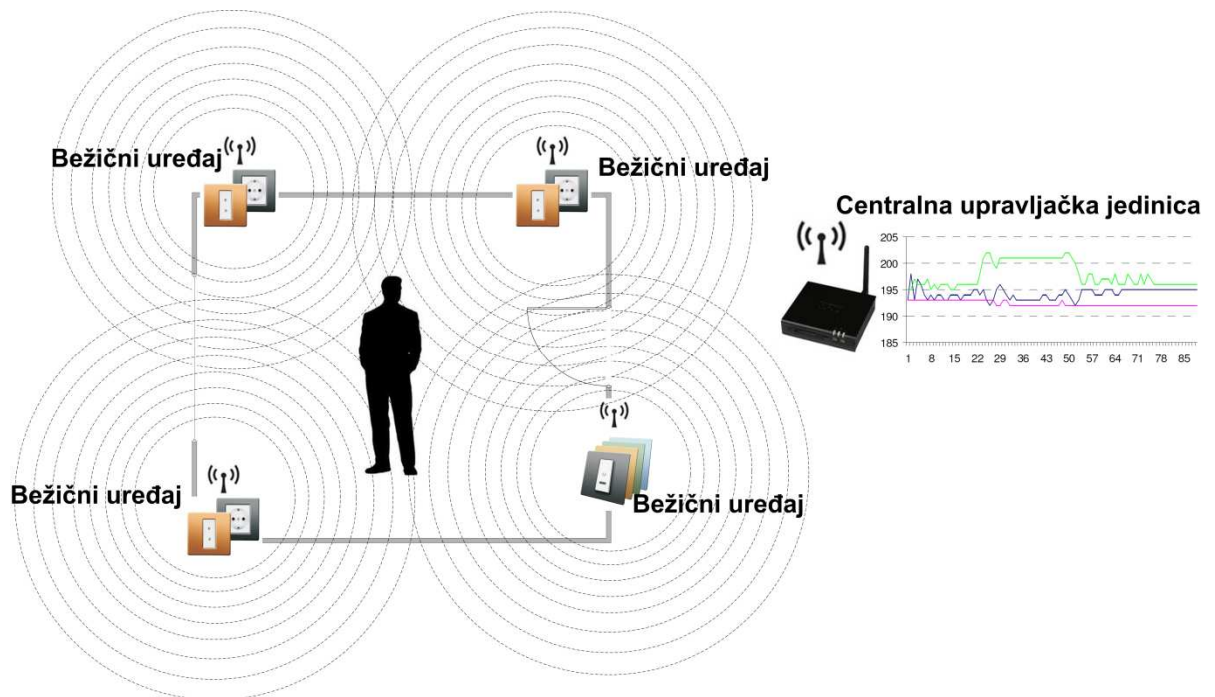
2.1.1 Agregacija podataka i utvrđivanje pragova detekcije

Agregacija odbiraka RSSI sa lokalne bežične mreže u okviru prostorije, odnosno oblasti od interesa, osnovna je faza realizacije svih postupaka za detekciju ljudi radio talasima. Nezavisno od naredne faze i metoda obrade sakupljenih odbiraka RSSI, sam proces agregacije je zajednički, a razlika postoji u smislu da li je krajnji sistem fizičke arhitekture koji integriše RF detekciju ljudi centralizovan ili distribuiran. Sistem se sastoji iz najmanje dva bežična stacionarna čvora koji međusobno razmenjuju komunikacione poruke, u kojima su sadržane vrednosti trenutne snage radio signala po svakoj uspostavljenoj radio vezi (*eng. Link*) u oblasti od interesa. Ukoliko je sistem distribuirano organizovan, tada se agregacija i obrada prikupljenih odbiraka obavlja na svakom od čvorova nezavisno. U slučaju da je sistem centralizovano organizovan, neophodna je integracija centralne upravljačke jedinice, koja upravlja razmenom detekcionih i upravljačkih poruka, sinhronizuje komunikaciju između bežičnih čvorova, prikuplja odbirke sa svih okolnih radio veza između bežičnih čvorova koji učestvuju u procesu detekcije ljudi i izvršava algoritme obrade sakupljenih odbiraka RSSI. Distribuirani pristup je prostiji i obezbeđuje obradu manjih skupova podataka, odnosno odbiraka dobavljenih sa radio veza koje je tekući čvor uspostavio sa okolnim čvorovima, pod uslovom da je jačina veze iznad određene vrednosti RSSI. Namena distribuirane organizacije je najčešće u slučaju sistema gde je potrebno doneti kratke upravljačke odluke, po principu signala 0 ili 1 (*true/false*) na osnovu otkrivenog prisustva ili kretanja čoveka. Primer jednog distribuiranog sistema (Slika 2) jeste automatsko upravljanje uličnom rasvetom u zavisnosti od prisustva ljudi i vozila u okolini bežične svetiljke (*Mrazovac, 2014a*).



Slika 2. Distribuirana organizacija kao primer integracije postupaka RF detekcije prisustva i kretanja ljudi, ali i drugih objekata poput vozila.

Odluke se donose na nivou kontrolera bežične svetiljke, u čijoj okolini je otkriveno prisustvo ljudi ili vozila, a za napredniju analizu podataka na udaljenom poslužiocu (*eng. Cloud Computing*) neophodna je integracija mrežnog usmerivača na jednoj od svetiljki. Centralizovana organizacija agregacije i obrade podataka (Slika 3) je neophodna za sisteme gde se donose odluke koje su deo nekog kompleksnijeg sistema upravljanja, poput sistema za automatsku optimizaciju potrošnje električne energije na nivou krajnjeg korisnika (*Mrazovac, 2012e*). Centralizovani pristup prikuplja i obrađuje znatno veće količine podataka, s obzirom da je centralna upravljačka jedinica odgovorna za automatizaciju upravljanja na nivou celog objekta.



Slika 3. Centralizovana organizacija kao primer integracije postupaka RF detekcije prisustva i kretanja ljudi u sistemima kompleksnijeg odlučivanja.

Sa aspekta implementacije opisanih postupaka detekcije ljudi radio talasima, bežični čvorovi, zajedno sa centralnom upravljačkom jedinicom su realizovani u obliku programske podrške koja se izvršava na personalnom ili namenskom računaru. Koja će biti krajnja namena uređaja fizičke arhitekture potpuno je proizvoljno, s obzirom da se svi postupci za RF detekciju ljudi predloženi u ovoj tezi, zasnivaju na identičnoj programskoj podršci fizičke arhitekture, koja uvodi dodatnu funkcionalnost u postojeći skup funkcionalnosti. Celokupna programska podrška je podeljena u dve celine: 1) upravljačka programska podrška, koja se izvršava na namenskom računaru (*eng. Firmware*) fizičke arhitekture bežičnog čvora i 2) programska podrška obrade podataka namenjena centralnoj upravljačkoj jedinici, odnosno čvoru distribuirane obrade. Oba organizaciona pristupa integrišu navedenu programsku podršku koja uspostavlja nekoliko faza neophodnih za korektnu detekciju prisustva ljudi: 1) početna faza merenja inicijalne snage radio

signala i postavljanja pragova detekcije, na osnovu varijacije RSSI kada se u prostoriji ne nalaze prisutne osobe; 2) detekcija prisustva ljudi u prostoriji na osnovu poređenja varijacije RSSI u odnosu na postavljene pragove detekcije; 3) generisanje upravljačke naredbe koja rezultira jednim od funkcionalnih stanja. Korisnik prilikom ulaska u uspostavljeno polje radio talasa razmene komunikacionih poruka između bežičnih čvorova remeti inicijalizovane vrednosti RSSI, odnosno pragove detekcije, što navodi algoritam da uđe u komparativnu fazu koristeći memorisane vrednosti pragova detekcije i novopristigle vrednosti sa uspostavljenih radio veza, te na osnovu rezultata komparacije generiše izlaz u obliku kontrolnog signala.

Prisustvo ljudi se otkriva analizom varijacija odbiraka RSSI nekim od opisanih algoritama obrade podataka koji dobavlja, a potom i obrađuje vrednosti indikatora snage primljenog radio signala sa svakog bežičnog čvora, određenog za učešće u procesu detekcije. Agregacija, kao korak pre obrade podataka, obezbeđuje kontinualan dotok odbiraka RSSI centralnoj upravljačkoj jedinici ili aktivnom čvoru distribuirane obrade. Algoritam obrade podataka se takođe može razdvojiti u dve faze: 1) fazu inicijalizacije koja kombinuje agregacioni i izvršni deo algoritma i 2) izvršnu fazu koja predstavlja centralni deo algoritma obrade podataka. Obe faze rade na sličan način, koristeći postupak periodičnog “prozivanja” dostupnih bežičnih čvorova.

Faza inicijalizacije podrazumeva da se određeni vremenski period sistem trenira bez prisustva čoveka, na način da bi u narednoj, izvršnoj fazi, mogao biti eksploatisan za generisanje funkcionalnih stanja. Pre inicijalnog koraka prozivke dostupnih bežičnih čvorova neophodno je utvrditi da li su čvorovi u odgovarajućem dometu, na osnovu jačine snage radio signala sa okolnih bežičnih čvorova, odnosno da li je dobavljena vrednost RSSI veća od predefinisane vrednosti, koju montažer u zavisnosti od veličine i oblika prostorije sam određuje merenjem. Ukoliko su svi bežični čvorovi u adekvatnom dometu radio signala, adrese bežičnih čvorova se verifikuju i upisuju u listu dostupnih čvorova detekcije na strani centralne upravljačke jedinice, ili aktivnog čvora distribuirane obrade. Generisanjem liste dostupnih čvorova detekcije ujedno se prikupljaju vrednosti RSSI dodeljene uz adresu svakog pojedinačnog bežičnog čvora, zarad određivanja pragova detekcije.

Proces određivanja pragova detekcije je neophodan za kreiranje inicijalne “radio slike” ambijenta i utvrđivanje graničnih vrednosti RSSI, čijim se prekoračenjem detektuje promena intenziteta varijacija RSSI i otkriva prisustvo ljudi u oblasti od interesa. Svaka značajna promena „radio slike“ ambijenta analizira se u odnosu na utvrđene pragove, s ciljem pravovremenog i korektnog otkrivanja prisustva i kretanja ljudi. U okviru ove teze opisani su postupci detekcije ljudi zasnovani na jednom ili na dva praga detekcije. Za određivanje pragova detekcije koristi se mehanizam periodičnog prozivanja bežičnih čvorova od strane centralne upravljačke jedinice, ili aktivnog čvora koji preuzima ulogu upravljačke jedinice u okviru distribuirane organizacije.

Centralna upravljačka jedinica proziva svaki bežični čvor ponaosob, koji joj šalje odgovor u vidu vektora izmerenih snaga radio signala sa uspostavljenih radio veza između prozvanog čvora i susednih bežičnih čvorova, koji su u dozvoljenom dometu radio signala sa prozvanim čvorom. Podrazumeva se da je lista adresa bežičnih čvorova generisana i verifikovana prilikom montaže sistema, s tim da je uvažen domet radio talasa sa svakog bežičnog čvora ka susednim i ka centralnoj upravljačkoj jedinici. Lista adresa bežičnih čvorova se u formi datoteke čuva na strani upravljačke jedinice i određuje redosled po kom se obavlja periodična prozivka, kako u fazi inicijalizacije, tako i u izvršnoj fazi.

Nakon što je prozvan, određeni čvor emituje (*eng. Broadcast*) detekcionu poruku u kojoj je sadržan vektor prethodno izmerenih vrednosti RSSI ka okolnim bežičnim čvorovima. Jedino prozvani čvor ima pravo emitovanja detekcione poruke ka centralnoj upravljačkoj jedinici, ali istovremeno i ka ostalim susednim čvorovima, koji “oslušuju” postojeću situaciju, s ciljem periodičnog osvežavanja svojih vektora RSSI. Svaki bežični čvor generiše vektor RSSI, odnosno vektor merenja snaga signala radio veza između njega i svih ostalih $(N-1)$ čvorova, gde je N ukupan broj čvorova koji učestvuju u detekciji ljudi u oblasti od interesa. Centralna upravljačka jedinica periodičnom prozivkom prikuplja generisane vektore RSSI u matricu $N \times (N-1)$ vrednosti snaga radio signala sa svih bežičnih čvorova. Radi uštede memorijskog prostora i optimizacije algoritama obrade, na strani centralne upravljačke jedinice uvek se čuva srednja vrednost RSSI, dobavljena tokom određenog vremenskog perioda, takozvanog perioda inicijalizacije. Nakon što istekne period inicijalizacije, čije se trajanje proizvoljno određuje i menja upotrebom upravljačke aplikacije, definišu se pragovi detekcije, kao rezultat faze inicijalizacije.

Matrica $N \times (N-1)$ vrednosti RSSI sa svih bežičnih čvorova formira se na način da svaka njena kolona predstavlja jednu radio vezu (*eng. Link*), dok svaka vrsta predstavlja jedan ciklus prozivke čvorova. Ciklus prozivke čvorova predstavlja određeni vremenski trenutak u kom se kontrolna upravljačka jedinica obraća svim čvorovima iz liste adresa bežičnih čvorova ponaosob, preuzimajući od njih vektore trenutnih stanja RSSI. Učestanost prozivanja čvorova može biti promenljiva, a eksperimentalno je utvrđeno da je optimalno vreme za prozivku narednog čvora iz liste na svakih $t = 100$ ms, što implicira da jedan ciklus prozivke σ traje $N \times t$ ms, odnosno učestanost odabiranja RSSI iznosi $((N \times t / s)^{-1})$ Hz, gde N predstavlja broj čvorova detekcije.

Faza inicijalizacije u distribuirano organizovanim sistemima se u određenoj meri razlikuje od centralizovane faze inicijalizacije. Osnovna razlika se ogleda u načinu upravljanja cikličnom prozivkom susednih čvorova. Vektor RSSI odbiraka se formira na svakom pojedinačnom čvoru, tako što određeni, vodeći čvor (*eng. Master*) pronade sve susedne, prateće čvorove (*eng. Slave*), koji su u opsegu radio veze sa njim. Svaki čvor može biti ili vodeći, ili prateći, u zavisnosti od sinhronizacionog takta, koji je zajednički za sve čvorove i generiše se posebnom jedinicom takta,

koja može biti realizovana kao nezavisni uređaj, ili kao deo programske podrške bežičnih čvorova. Nakon utvrđivanja trenutnog vodećeg čvora, ispita se jačina snage primljenog radio signala iz komunikacionih poruka dospelih sa okolnih, pratećih čvorova. Drugim rečima, vodeći čvor proverava da li je vrednost RSSI pristiglih poruka veća od očekivane minimalne vrednosti, utvrđene prilikom montaže sistema, a koju niz RSSI odbiraka mora zadovoljiti da bi se prateći čvor mogao smatrati susednim. Svi prateći čvorovi koji zadovoljavaju uslov da u okviru razmenjenih poruka sa vodećim čvorom sadrže vrednosti RSSI odbiraka barem za 30% veće od očekivane vrednosti, grupišu svoje adrese u listu adresa susednih, pratećih čvorova detekcije, koja se čuva na strani vodećeg čvora. Ispravan domet se potvrđuje 30% većom vrednošću od minimalne očekivane, da bi se odbacile nagle promene i mogući pojedinačni skokovi vrednosti RSSI, uslovljeni uticajem karakteristika okruženja na prostiranje radio talasa.

U fazi inicijalizacije vodeći čvor formira matricu vrednosti RSSI odbiraka na sličan način kao i centralna upravljačka jedinica. Svaka kolona matrice predstavlja po jednu radio vezu, dok svaka vrsta predstavlja po jedan ciklus prozivke susednih, pratećih čvorova. Ciklus prozivke čvorova predstavlja vremenski trenutak σ u kom se vodeći čvor obraća svim pratećim čvorovima ponaosob, preuzimajući od njih trenutni intenzitet RSSI odbiraka na datoj radio vezi. Učestanost prozivanja susednih čvorova t je takođe promenljiva, a jedan ciklus prozivke σ traje $N \times t$ ms, gde N predstavlja broj pratećih čvorova. Ukoliko prozvani prateći čvor ne odgovori duže od $t/5$ ms nakon što je prozvan, ponavlja se prozivka istog čvora. Ukoliko se nakon 5 ponavljanja dati čvor ne odazove (za puno vreme t), prelazi se na naredni čvor iz liste susednih pratećih čvorova, a privremeno preskočeni čvor se ponovo proziva tek u narednoj iteraciji prozivke σ . Ukoliko isti prateći čvor ne odgovori nakon najviše 5 iteracija, smatra se da je nastupio otkaz ili kvar fizičke arhitekture i dati čvor se uklanja iz liste susednih pratećih čvorova, a dalja prozivka se nastavlja ka preostalim pratećim čvorovima.

Suština periodične ciklične prozivke jeste da obezbedi kontinualan dotok odbiraka, koji predstavljaju trenutne vrednosti RSSI na svakoj radio vezi između susednih bežičnih čvorova u oblasti od interesa, čijom se daljom obradom, nekim od algoritama izloženih u okviru teze, mogu izvući određeni obrasci ponašanja RSSI, kojim se detektuje prisustvo ljudi.

U izvršnoj fazi, na identičan način se obavlja postupak cikličnog prozivanja, kao i u fazi inicijalizacije, s tim što se kontinualno pristigli odbirci RSSI porede sa inicijalno utvrđenim pragovima detekcije. Opisani koncept agregacije podataka, odnosno komunikacioni protokol po kome bežični čvorovi komuniciraju međusobno, ili sa centralnom jedinicom, pogodan je zbog dobre koordinacije i eliminisanja verovatnoće kolizije poruka, pošto u jednom trenutku samo jedan prozvani čvor emituje poruku ka centralnoj upravljačkoj jedinici i svim ostalim čvorovima, u odgovarajućem dometu radio signala, odnosno oblasti od interesa.

Agregacija odbiraka RSSI je univerzalan postupak, a način obrade odbiraka u izvršnoj fazi, kao i broj neophodnih pragova detekcije i način komparacije su specifični za svaki od algoritama koji su detaljno izloženi u nastavku teze. Algoritam minimalnog i maksimalnog odstupanja od srednje vrednosti zahteva postojanje dva praga detekcije, koji formiraju interval dozvoljene varijacije RSSI, u okviru koga intenzitet odbiraka RSSI ne ukazuje na prisustvo ljudi. Algoritmi primene baznih komponenti i informacione entropije zahtevaju postojanje samo jednog praga detekcije, dok indeks disperzije odbiraka RSSI u frekventnom domenu, zaključivanje o prisustvu ljudi izvodi bez upotrebe praga detekcije.

2.1.2 Algoritam minimalnog i maksimalnog odstupanja od srednje vrednosti

Indikator primljene snage radio signala u okviru niza komunikacionih poruka, razmenjenih između prijemnog i predajnog bežičnog uređaja u različitim okruženjima bez prisutnih ljudi, očekivano varira umanjanim intenzitetom oko srednje vrednosti odbiraka RSSI. Očekivana varijacija RSSI je posledica uticaja faktora okruženja, prisutnog šuma i fizičkih karakteristika primopredajnih jedinica bežičnih čvorova. Prisustvo čoveka u mreži radio talasa uzrokuje znatno intenzivnije varijacije RSSI i izraženija odstupanja od srednje vrednosti, što se može iskoristiti kao pouzdan indikator za otkrivanje ljudskog prisustva unutar mreže radio talasa.

Očekivana varijacija intenziteta RSSI odbiraka tokom intervala ω faze inicijalizacije, kada se sistem trenira za RF detekciju prisustva, bez ljudi prisutnih u okruženju, određuje interval dozvoljene varijacije indikatora snage radio signala. Interval dozvoljene varijacije RSSI je ograničen sa najvišim i najnižim odstupanjem vrednosti odbiraka RSSI od izračunate srednje vrednosti odbiraka tokom intervala ω . Tokom faze inicijalizacije, centralna upravljačka jedinica i bežični čvorovi međusobno razmenjuju poruke po opisanom principu prozivke, postavljajući trenutnu “radio sliku” datog okruženja. Dužina trajanja vremenskog intervala inicijalizacije ω nije striktno određena. Što duže traje, to će tačniji pragovi detekcije biti postavljeni. Obično se uzima da interval inicijalizacije ω traje jedan do dva minuta, u zavisnosti od dinamičnosti očekivanih varijacija RSSI, a ponajviše zbog konstrukcionog materijala zidova prostorije od interesa. Kao što je prethodno navedeno, optimalna vrednost intervala t prozivke čvorova iznosi 100 ms za svaki naredni čvor. Uobičajeni broj bežičnih čvorova detekcije, po jednoj prostoriji od interesa, standardnih dimenzija i rasporeda zidova, iznosi četiri, tako da su sve strane prostorije pokriveno radio talasima. Time je sistemu omogućeno da detektuje čoveka, makar se kretao kroz zonu detekcije brzinom atletskog trkača, a da se pri tom ne uvode prečesta prozivanja koja uzrokuju značajna opterećenja procesora centralne upravljačke jedinice, odnosno vodećeg čvora, rezultujući usporenim odzivom celokupnog sistema i narušenom ispravnošću RF detekcije (Mrazovac, 2012a; 2012b).

Kao rezultat agregacije odbiraka RSSI tokom intervala inicijalizacije ω , formira se matrica M odbiraka RSSI, u kojoj svaka kolona predstavlja kontinualni niz odbiraka RSSI sa jedne radio veze između dva bežična čvora, a svaka vrsta naredni ciklus prozivke susednih bežičnih čvorova. Vodeći računa o faktorima atenuacije, odnosno slabljenju snage radio signala usled rastojanja Pd i postojanja prepreka Pa na putanji prostiranja radio talasa, izračunavanje početne snage Po u nekom trenutku t i vrednost varijacije indikatora primljene snage radio signala $\Delta RSSI$ mogu se predstaviti izrazom (1):

$$\begin{aligned} \Delta RSSI &= P(t+1) - P(t) , \\ P(t) &= Po - Pd(t) - Pa(t) , \\ P(t+1) &= Po - Pd(t+1) - Pa(t+1) , \\ \Delta RSSI &= \begin{cases} prisustvo , & \Delta RSSI > Th2 \vee \Delta RSSI < Th1 \\ nema _ prisustva , & Th1 < \Delta RSSI < Th2 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

Po Frisovoj (*Harald T. Friis*) formuli prenosa radio signala, snaga primljenog signala Pr opada sa kvadratom rastojanja d između predajnika i prijemnika. Stoga se parametar slabljenja signala usled rastojanja Pd može aproksimirati izrazom (2):

$$Pd = \left(\frac{1}{d}\right)^2 \cdot Pt \cdot Gt \cdot Gr \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 , \quad (2)$$

gde Gt i Gr označavaju pojačanja predajne i prijemne antene, Pt označava emitovanu snagu predajnika, λ je talasna dužina, a d predstavlja rastojanje između predajnog i prijemnog čvora.

Faktor slabljenja snage radio signala usled postojanja prepreka Pa može se predstaviti kao gubitak snage signala usled apsorpcije i refleksije od zidove prostorije od interesa, po izrazu (3):

$$Pa = \sum_{i=1}^N k_i \cdot l_i , \quad (3)$$

gde k_i označava identifikator zida konstrukcionog tipa i u okviru prostorije od interesa, a l_i označava intenzitet atenuacije zida k_i . Na osnovu prethodno utvrđenih parametara koji utiču na varijaciju odbiraka RSSI, pragovi detekcije Th_{\min} i Th_{\max} intervala dozvoljene varijacije RSSI se iz matrice M izračunavaju za svaku radio vezu, na način opisan izrazom (4):

$$\begin{aligned} Th_{\min} &= \left(\left| \Delta RSSI_{\min} - \overline{\Delta RSSI} \right| / \Delta RSSI_{\min} \right) \cdot 100 \% , \\ Th_{\max} &= \left(\left| \Delta RSSI_{\max} - \overline{\Delta RSSI} \right| / \Delta RSSI_{\max} \right) \cdot 100 \% . \end{aligned} \quad (4)$$

Parametri $\Delta RSSI_{\min}$ i $\Delta RSSI_{\max}$ označavaju najmanju i najveću vrednost indikatora primljene snage radio signala u nizu odbiraka RSSI za svaku pojedinačnu radio vezu, odnosno kolonu matrice M , tokom trajanja intervala inicijalizacije ω . Parametar $\overline{\Delta RSSI}$ označava srednju

vrednost intenziteta svih odbiraka RSSI, dobavljenih tokom perioda inicijalizacije ω , u okviru svake radio veze zasebno. U granicama intervala dozvoljene varijacije RSSI, intenzitet snage radio signala može varirati, ali prisustvo ljudi neće biti detektovano. Kada čovek uđe u prostoriju od interesa, apsorpcija i refleksija radio talasa od ljudsko telo stimulišu intenzitet snage radio signala odbiraka u okviru svake radio veze, koji istupaju van intervala dozvoljene varijacije RSSI. Svaki prelazak pragova detekcije se tretira kao stanje u kom je otkriveno prisustvo ili kretanje čoveka u prostoriji od interesa. S obzirom da je intenzitet i forma varijacije odbiraka RSSI različit za različita okruženja, nemoguće je odrediti univerzalnu veličinu pragova detekcije. Stoga se koristi adaptivni pristup određivanja pragova detekcije predstavljen izrazom (4).

Periodično kalibrisanje pragova detekcije, kao integralni deo adaptivnog pristupa (4), je posebno važno za slučaj promene rasporeda prostornih elemenata u okviru prostorije od interesa, pošto svaka promena faktora okruženja utiče na formu i intenzitet varijacija odbiraka RSSI, a time i na vrednosti inicijalno utvrđenih pragova detekcije. Dodatni, kontrolni parametar devijacije intenziteta RSSI odbiraka je neophodan zbog povremene kalibracije pragova detekcije, a dat je izrazom (5), za n ciklusa prozivke:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (RSSI_i - \overline{RSSI})^2}, \quad \overline{RSSI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RSSI_i. \quad (5)$$

Ukoliko je devijacija intenziteta odbiraka RSSI izražena i konstantna tokom n ciklusa prozivke, a da je pri tom varijacija odbiraka RSSI u okviru intervala dozvoljene varijacije RSSI, detektuje se promena rasporeda nameštaja i ponavlja se korak određivanja pragova (5), na osnovu vrednosti odbiraka poslednjih n ciklusa prozivke.

U izvršnoj fazi kontinualno pristižu odbirci RSSI nakon svake iteracije perioda prozivke σ , računa se nova vrednost $\Delta RSSI$ i poredi sa prethodno utvrđenim pragovima, po izrazu (1). Kako bi pristigle vrednosti odbiraka snage radio signala bile što približnije idealno glatkoj krivoj, sa stanovišta obrade signala poželjno je izvršiti određenu vrstu tzv. “glačanja” signala primenom nisko propusnog rekurzivnog filtra (6). Time se izbegavaju kratki, iznenadni skokovi intenziteta RSSI odbiraka, koji su posledica uticaja okruženja, ali i izrazito niske učestanosti odabiranja, kojom se kompenzuje opterećenje procesora centralne upravljačke jedinice, tj. vodećeg čvora.

$$\Delta RSSI(t) = (1 - \alpha) RSSI(t-1) + \overline{RSSI(t)}', \quad \text{za } 0 < \alpha < 1 \quad (6)$$

gde $\overline{RSSI(t)}'$ predstavlja srednju vrednost indikatora primljene snage radio signala, posmatranu za n ciklusa prozivke σ , datu izrazom (7):

$$\overline{RSSI(t)}' = \sum_{i=1}^n \frac{RSSI(t)}{n}. \quad (7)$$

Izraz (7), sa aspekta razmatranja n uzastopnih vremenskih trenutaka, iziskuje dodatne memorijske zahteve na strani centralne upravljačke jedinice. Da bi se ovo ograničenje uklonilo, izrazi (6) i (7) se mogu predstaviti u formi (8) i (9):

$$\Delta RSSI(t) = (1 - \alpha_1)RSSI(t) + \alpha_1 \Delta RSSI(t-1), \quad (8)$$

$$\Delta RSSI(t) = (1 - \alpha_2)RSSI(t) + \alpha_2 \Delta RSSI(t-1). \quad (9)$$

Izrazom (8) se opisuje promena u snazi indikatora primljenog odbirka $\Delta RSSI$ na najmanje jednoj radio vezi, koja se glača u predefinisanim vremenskim intervalu t_1 . Pri tome usvojena vrednost koeficijenta zaboravljanja α_1 omogućava brzu promenu $\Delta RSSI$. Slično tome, izraz (9) opisuje promenu u snazi primljenog signala $\Delta RSSI$ na najmanje jednoj radio vezi koja se glača u predefinisanim vremenskim intervalu t_2 . Pri tome, usvojena vrednost koeficijenta zaboravljanja α_1 omogućava sporu promenu $\Delta RSSI$, za $t_1 < t_2$.

Prednost opisanog algoritma minimalnog i maksimalnog odstupanja od srednje vrednosti je u jednostavnosti operacija obrade podataka (Mrazovac, 2012f). Obrada podataka podrazumeva izračunavanje srednje vrednosti i standardne devijacije nad nizom odbiraka RSSI. Neophodne matematičke operacije se dovoljno brzo mogu izvršavati na većini dostupnih namenskih računarskih sistema, osposobljenih za bežičnu komunikaciju, te se predstavljeni algoritam može optimalno izvršavati u okviru distribuirane organizacije sistema RF detekcije (Mrazovac, 2012c). Međutim, razdvojena obrada nizova odbiraka dobavljenih sa svake radio veze nezavisno, nije u dovoljnoj meri otporna na spoljne smetnje. Ukoliko vrednosti odbiraka RSSI, dobavljenih sa samo jedne radio veze, pređu pragove detekcije, sistem će prepoznati prisustvo ljudi. Slučaj lažne, odnosno neželjene detekcije se može pojaviti u situaciji kada se čovek kreće sa druge strane zida prostorije od interesa. Ukoliko u prostoriji od interesa nema prisutnih ljudi, detekcija ne treba da bude prijavljena. S obzirom da se radio talasi nesmetano prostiru kroz zidove uobičajenih građevinskih materijala, uspostavljena radio veza između bežičnih čvorova najbližih navedenom zidu će biti ometena navedenim kretanjem čoveka. Stoga je neophodno analizirati varijacije RSSI na svim uspostavljenim radio vezama istovremeno, ponderisati ih u zavisnosti od imaginarnih linija vidljivosti između bežičnih čvorova, a u odnosu na blizinu zidova prostorije, ili skalirati vrednosti pragova detekcije da bi se minimizovali spoljni uticaji.

Shodno navedenom nedostatku algoritma minimalnog i maksimalnog odstupanja od srednje vrednosti, znatno efikasniji pristup u eliminaciji spoljnih uticaja je opisan kroz algoritam primene baznih komponenti i informacione entropije, koji su izloženi u nastavku teze. Središte istraživanja teze je usmereno na istovremenu, zbirnu obradu vrednosti indikatora primljene snage radio signala očitanih sa svih uspostavljenih radio veza u oblasti od interesa.

2.1.3 Primena baznih komponenti

Analiza baznih komponenti (*eng. Principal Components Analysis - PCA*) predstavlja jedan od najjednostavnijih i najrasprostranjenijih statističkih postupaka za ekstrahovanje relevantnih informacija iz velikih skupova podataka (*Jolliffe, 2002*). Dati postupak se primenjuje kada je veliki broj promenljivih u skupu redundantan, odnosno kada se veliki broj promenljivih odnosi na istu dimenziju, ne pružajući pri tom dodatnu informaciju, koja već nije obuhvaćena. PCA predstavlja redukciju ulaznih podataka i posebno je korisna kada su ulazne promenljive međusobno korelisane, omogućujući da se identifikuju obrasci ponašanja koji maksimalno ističu sličnosti i razlike među promenljivama. Redundanse, koje se javljaju među podacima mogu se jednostavno ukloniti, komprimujući ulazni skup podataka na znatno manji niz sopstvenih vrednosti, uz održanje što je više moguće varijabilnosti prisutne u ulaznom skupu podataka.

Nekorelisani odbirci RSSI, periodično dobavljeni opisanim postupkom agregacije podataka sa svih radio veza uspostavljenih u okviru prostorije od interesa, grupišu se u zajedničku matricu snaga signala M iz koje se vrši ekstrakcija baznih komponenti. Identično, kao i za algoritam minimalnog i maksimalnog odstupanja od srednje vrednosti, data matrica se formira na način da svaka njena kolona predstavlja jednu radio vezu, dok svaka vrsta predstavlja jedan kontinualni ciklus prozivke bežičnih čvorova. I u slučaju primene baznih komponenti, učestanost prozivanja svakog čvora je postavljena na 100 ms. Tako dobijeni ciklični odbirci RSSI se prvobitno slažu u matricu, a potom se mogu razdvojiti i na vektore odbiraka, u zavisnosti od primenjenog numeričkog postupka za određivanje baznih komponenti, poznatijih i kao sopstvene vrednosti.

Niz odbiraka RSSI, dobavljenih sa radio veze između dva susedna čvora grupiše se u vektor $linkKaCvoru_k$ čiji se elementi normalizuju u normiranu normalnu raspodelu, te novi transformisan niz ima nulto očekivanje i varijansu jednaku jedan (*eng. Zero-mean*):

$$linkKaCvoru_k = \begin{bmatrix} odbirak(1) \\ odbirak(2) \\ \dots \\ odbirak(N) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Elementi $odbirak(i)$ vektora $linkKaCvoru_k$ označavaju po jedan odbirak RSSI sa date radio veze, za brojač i koji uzima vrednosti od 1 do N , gde N predstavlja broj odbiraka u posmatranom intervalu. Brojač niza vektora k uzima vrednosti od 1 do $(K-1)$, za K koje je jednako broju svih susednih čvorova detekcije u oblasti od interesa. Radio veze ka preostalim čvorovima u oblasti od interesa se mogu predstaviti kao ansambl od $(K-1)$ radio veza. Ceo ansambl se kompaktnije može predstaviti kao matrica $N \times (K-1)$, koja definiše $(K-1)$ merenja slučajnog procesa:

$$Cvor_k = [linkKaCvoru_1 \quad linkKaCvoru_2 \quad \dots \quad linkKaCvoru_{k-1}]. \quad (11)$$

Nakon što su prikupljene vrednosti sa svih čvorova i sačuvane u matricu $Cvor_k$, može se generisati univerzalna $(K-1) \times K$ matrica X za sve radio veze sačuvane u pod-matricama $Cvor_k$:

$$X = [Cvor_1 \quad Cvor_2 \quad \dots \quad Cvor_K] , \quad (12)$$

čije vrste predstavljaju po jedan ciklus prozivanja, a kolone pojedinačnu radio vezu između dva susedna čvora detekcije. Nakon što su odbirci grupisani u matricu, neophodno je odrediti stepen odstupanja vrednosti snaga radio signala od srednjih vrednosti u odnosu na ostale radio veze. U tu svrhu se koristi kovarijansa $cov(z_i, z_j)$:

$$cov(z_i, z_j) = \frac{\sum_{s=1}^{K-1} (z_i(s) - \bar{z}_i)(z_j(s) - \bar{z}_j)}{((K-1) - 1)} , \quad (13)$$

$$i, j = [1, K] \wedge i \neq j ,$$

\bar{z}_i i \bar{z}_j predstavljaju srednje vrednosti vektora z_i i z_j :

$$\bar{z}_i = \frac{1}{K-1} \sum_{s=1}^{K-1} z_i(s), \quad \bar{z}_j = \frac{1}{K-1} \sum_{s=1}^{K-1} z_j(s) . \quad (14)$$

U narednom koraku je potrebno sve moguće kovarijanse između radio veza grupisati u matricu kovarijansi C_X :

$$C_X = \frac{1}{(K-1) - 1} XX^T . \quad (15)$$

Matrica C_X predstavlja skup korelacija između svih mogućih parova radio veza. Visoke vrednosti matrice indiciraju visoku redundansu, dok niske predstavljaju nižu redundansu. PCA predstavlja linearnu transformaciju koja preslikava podatke iz više-dimenzionalnog prostora u prostore nižih dimenzija, zadržavajući originalnu varijabilnost odbiraka indikatora primljene snage radio signala. Niži prostor je određen najjačim sopstvenim vrednostima i vektorima matrice, koji su poznatiji kao bazne komponente (*eng. Principal Components*) matrice C_X .

Sopstveni vektori (*eng. Eigenvectors*) matrice C_X su ne-nulti vektori, koji nakon množenja matricom C_X ostaju proporcionalni originalnom vektoru, ili postaju nule. Sopstvene vrednosti (*eng. Eigenvalues*) predstavljaju skalarnе veličine koje definišu prirodu transformacije (širenje, sažimanje, ili bez izmena) sopstvenog vektora nakon množenja matricom C_X .

Ako je W vektorski prostor i w je jedan vektor tog prostora, tada se w može definisati kao sopstveni vektor matrice C_X , sa sopstvenom vrednošću λ , ako je zadovoljen izraz (16):

$$C_X w = \lambda w . \quad (16)$$

Sopstvene vrednosti matrice C_X se mogu izračunati rešavanjem korena karakterističnog polinoma koji se može izvesti na osnovu izraza (17):

$$\det(C_X - \lambda I) = 0, \quad (17)$$

gde \det predstavlja funkciju determinante, a I jediničnu matricu dimenzija $K \times K$. Sopstveni vektori korespondiraju baznim komponentama, a sopstvene vrednosti korespondiraju varijansi baznih komponenti. Izračunati sopstveni vektori matrice C_X se potom sortiraju po sopstvenim vrednostima, od najvišeg ka najnižem, po redosledu po kojem se sortiraju bazne komponente na osnovu njihove značajnosti. Eliminacijom manje značajnih baznih komponenti, krajnji skup podataka će kao rezultat ove transformacije imati znatno manju dimenzionalnost nego originalni skup, odnosno matrica X , određena izrazom (12).

Poslednji korak algoritma baznih komponenti obezbeđuje formiranje karakterističnog vektora fv , koji se kreira preuzimanjem niza vrednosti najznačajnijeg sopstvenog vektora. Daljom analizom vektora fv može se otkriti prisustvo čoveka u oblasti od interesa. Oblast u kojoj nema prisutnih ljudi implicira manje intenzivnu varijaciju odbiraka RSSI, te su i vrednosti karakterističnog vektora veoma bliske vrednosti nula. Prisustvo ljudi indukuje porast intenziteta varijacija RSSI, a time i vrednosti karakterističnog vektora fv , sa znatno izraženom devijacijom od srednje vrednosti. Normiran skup ulaznih odbiraka obezbeđuje da se devijacija vrednosti karakterističnog vektora ne širi simetrično u odnosu na srednju vrednost, već se uvek širi samo na stranu porasta intenziteta, u zavisnosti od prisutne varijacije u originalnoj matrici X odbiraka RSSI. Time je omogućena upotreba samo jednog praga detekcije. Kao prag detekcije uzima se najveća vrednost odbirka karakterističnog vektora fv , izračunatog tokom faze inicijalizacije, kada se, kao i u slučaju algoritma minimalnog i maksimalnog odstupanja od srednje vrednosti, sistem trenira bez prisutnih ljudi u oblasti od interesa. U izvršnoj fazi, svi odbirci karakterističnog vektora fv , koji su iznad praga detekcije, ukazuju na ljudsko prisustvo, dok odbirci koji su po intenzitetu niži od praga detekcije ukazuju na oblast od interesa u kojoj nema prisutnih ljudi (Mrazovac, 2012; 2012d; 2013).

Sa aspekta numeričkog izračunavanja karakterističnog vektora baznih komponenti fv , rešavanje karakterističnog polinoma matrice X često može biti vremenski vrlo zahtevno i neprihvatljivo sa stanovišta obrade u realnom vremenu. Weng (2003) je predložio inkrementalni postupak (eng. *Candid Covariance-free Incremental Principal Component Analysis - CCIPCA*) za izračunavanje baznih komponenti iz niza podataka, bez upotrebe kovarijansne matrice, što je motivisano potrebom za povećanjem efikasnosti, u smislu brzine izračunavanja baznih komponenti. Postupak je naročito namenjen upotrebi u aplikacijama od kojih se zahteva da se izvršavaju u realnom vremenu. Vrednosti odbiraka cikličnih karakterističnih vektora se iterativno

popravljaju kontinualnim vrednostima odbiraka RSSI. CCIPCA algoritam se može opisati izrazom (18), u obliku pseudo-koda:

$$\begin{aligned}
 & \text{ZA } n = 1, 2, \dots \\
 & 1. \ u_1(n) = u(n). \\
 & 2. \ \text{ZA } i = 1, 2, \dots \min\{k, n\} \text{ RADI SLEDEĆE,} \\
 & \quad \text{(a) AKO JE } i = n, \ v_i(n) = u_i(n). \\
 & \quad \text{(b) U SUPROTNOM RADI,} \tag{18} \\
 & v_i(n) = \frac{n-1-l}{n} v_i(n-1) + \frac{1+l}{n} u_i(n) u_i^T(n) \frac{v_i(n-1)}{\|v_i(n-1)\|} \\
 & u_{i+1}(n) = u_i(n) - u_i^T(n) \frac{v_i(n)}{\|v_i(n)\|} \frac{v_i(n)}{\|v_i(n)\|}
 \end{aligned}$$

Karakteristične vrednosti se mogu izračunati po izrazu (19):

$$\lambda_i = \|v_i\|, \tag{19}$$

a karakteristični vektori po izrazu (20):

$$w_i = \frac{v_i}{\|v_i\|}. \tag{20}$$

Parametar l označava faktor zaboravljanja, dok n označava redni broj ulaznog odbirka. Parametar l uzima vrednosti od 2 do 4, što služi ubrzanju konvergencije karakterističnih vektora. U algoritmu se upotrebljavaju faktori, koji množe prethodno stanje sistema i ulaz algoritma. Pomenuti faktori imaju ulogu da pri inicijalizaciji izvršavanja algoritma daju veću važnost ulazu, dok se u narednim ciklusima izvršavanja smanjuje vrednost ulaza i povećava vrednost izlaza.

Prvih p ciklusa prozivke čvorova, tj. dobavljanja odbiraka RSSI vrednosti sa svake radio veze formiraju matricu $[K \times p]$ (K radio veza, u p ciklusa prozivke), koja se koristi za računanje prve sopstvene vrednosti λ , odnosno $u(n)$. Broj od p ciklusa nije striktno određen, što je veći p , precizniji je rezultat CCIPCA algoritma. Međutim, da bi inicijalizacija trajala kao i u slučaju algoritma minimalnog i maksimalnog odstupanja od srednje vrednosti, oko jedan minut, tj. 150 odbiraka pri učestanosti odabiranja od 2.5 Hz na primeru sa četiri čvora, optimalno je da barem polovina inicijalnih odbiraka RSSI posluži za predikciju prve bazne komponente.

Primena navedenog CCIPCA algoritma se zasniva na sledećoj proceduri: kada se popuni matrica X iz nje se, opisanim inkrementalnim postupkom, izračunaju sopstvene vrednosti. Iz matrice X se CCIPCA algoritmom ekstrahuje m sopstvenih vrednosti. U narednom koraku se odredi maksimalna vrednost iz dobijenih m vrednosti i ona predstavlja λ_1 . Nakon što je

izračunata λ_1 , nastupa naredni ciklus prozivke čvorova. U tom ciklusu se formira vektor $x[K]$ čije vrednosti predstavljaju po jedan novi odbirak sa svake radio veze između čvorova K i $(K-1)$:

$$x = \left[\text{cvor}_{1-1} \quad \text{cvor}_{1-2} \quad \dots \quad \text{cvor}_{K-(K-1)} \right], \quad (21)$$

Pošto algoritam zahteva normiranu normalnu raspodelu, pristigli vektor x se dopunjuje sa gornje strane vektorom koji predstavlja vektor srednjih vrednosti, izračunat za prethodno stanje matrice X po svakoj koloni (radio vezi) pojedinačno:

$$X = \left[\text{Cvor}_1 \quad \text{Cvor}_2 \quad \dots \quad \text{Cvor}_K \right] \Rightarrow \bar{x} = \left[\overline{X[1-1]}_1 \quad \overline{X[1-2]} \quad \dots \quad \overline{X[K-(K-1)]} \right] \quad (22)$$

$$X' = \begin{bmatrix} \overline{X[1-1]} & \overline{X[1-2]} & \dots & \overline{X[K-(K-1)]} \\ \text{cvor}_{1-1} & \text{cvor}_{1-2} & \dots & \text{cvor}_{K-(K-1)} \end{bmatrix}.$$

Pre narednog koraka neophodno je normirati vektore matrice na normalnu raspodelu:

$$u_i(n) = \left[\overline{X'[1-1]} \quad \overline{X'[1-2]} \quad \overline{X'[K-(K-1)]} \right], \quad (23)$$

iz kog se inkrementalnim postupkom izdvaja niz od dve sopstvene vrednosti i za sledeći korak se uvek uzima najveća. Postupak se potom ponavlja za svaki naredni ciklus, novim vektorom x . U daljem izračunavanju se iznova koriste srednje vrednosti odbiraka RSSI po kolonama iz predikcione matrice $X[K \times m]$, uz ponavljanje koraka opisanih izrazima (22) i (23).

Algoritam PCA, odnosno CCIPCA predstavljen je u obliku transformacije, koja preslikava skup odbiraka RSSI sa svih radio veza iz oblasti od interesa, u jedinstven vektor varijacija zbirne energije radio talasa. Odbirci se simultano obrađuju, stoga zbirna varijacija energije radio talasa omogućuje da u slučaju kada je manji skup radio talasa deformisan spoljnim uticajima, energija većine radio talasa obezbeđuje minimizaciju, ili pak potpuno potiskivanje šuma. Međutim, nizak stepen diskretizacije radio talasa dovodi do toga da nakon izračunavanja, određeni broj baznih komponenti poseduje niže vrednosti u odnosu na prag detekcije, iako bi u tom slučaju očekivano bilo detektovanje ljudskog prisustva. Pored toga, određeni građevinski materijali, poput lima i plastike, koji su česti u montažnim objektima, mogu uvesti dodatni oblik šuma na zbirnu energiju radio talasa. Plastika i lim, ugrađeni u zidove prostorije od interesa, formiraju Faradejev (*Michael Faraday*) kavez, u okviru kog apsorpcija i refleksija radio talasa od zidove prostorije daje drugačiji obrazac varijacije odbiraka RSSI, te je teže odrediti, a potom i zadovoljiti prag detekcije. Stoga je neophodno uvesti dodatno filtriranje baznih komponenti, uz moguću upotrebu filtra usrednjavanja vrednosti (*eng. Average*) ili Median filtra. U okviru ove teze, primenjena je informaciona entropija, kao forma naprednog i računski efikasnog filtra, s ciljem da u potpunosti ukloni sve nepravilnosti sadržane u nizu odbiraka RSSI, a uzrokovane grubom diskretizacijom sa velikim skokovima, ili distorzijom radio talasa usled specifičnosti građevinskog materijala.

2.1.4 Primena informacione entropije

U cilju maksimalnog potiskivanja šuma, uzrokovanog relativno grubom diskretizacijom i pojačanom distorzijom radio talasa usled uticaja specifičnih materijala, uvodi se filtracija baznih komponenti algoritmom informacione entropije (*Shannon, 1948*). U teoriji informacija, entropija predstavlja meru neodređenosti pridruženu diskretnoj slučajnoj promenljivoj, koja kvantifikuje očekivanu vrednost informacionog sadržaja, kada nije unapred poznata vrednost slučajne promenljive. Entropija se često definiše i kao očekivana vrednost količine informacija (*Gray, 2011*). Primena informacione entropije na odbirke Doplerovog radarskog signala, pokazuje veću robustnost detekcije na otvorenom prostoru, u uslovima pojačanog šuma usled guste i pokretne vegetacije, nego primena Furijeove transformacije na identičan skup odbiraka (*Andrić, 2013*). Utvrđivanje količine neuređenosti, primenom entropijskog filtra na niz sopstvenih vrednosti, omogućuje precizno razdvajanje slučajeva visoke neuređenosti nekoreliranih radio talasa, kao posledice diskretizacije i uticaja okruženja, od uticaja čoveka, koji uvodi uzajamnu uređenost varijacija RSSI većinskog ansambla postojećih radio talasa (*Mrazovac 2013c; 2013b*).

Kada se izračuna prvih j sopstvenih vrednosti karakterističnog vektora baznih komponenti f_v , s tim da je $j > 1$, moguće je primeniti algoritam informacione entropije. Sopstvene vrednosti, izračunate postupkom, opisanim izrazom (18) se potom transformišu u promenljive p_i :

$$p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^M \lambda_i}, \quad za \quad i = 1..M, \quad M > 1 \quad \wedge \quad \sum_{i=1}^M p_i = 1. \quad (24)$$

Promenljiva p_i označava verovatnoću pojave sopstvene vrednosti λ_i u okviru niza od M sopstvenih vrednosti vektora f_v . Odgovarajući filter i okvira ($1 < i < M$) se definiše dodeljujući svakoj verovatnoći p_i količinu informacije $I(p_i) = -\log_2 p_i$ koju ta verovatnoća nosi:

$$H = -\sum_{i=1}^M p_i \log_2 p_i. \quad (25)$$

Izraz (25) predstavlja formalnu definiciju informacione entropije. Što je veća vrednost M , postižu se bolji rezultati filtriranja, s tim što treba voditi računa da M ne bude suviše veliko, pošto krajnji sistem treba da odgovori dovoljno brzo, da bi bilo neprimetno krajnjem korisniku. Eksperimentalno je potvrđeno da se za vrednost $M = 10$ postižu optimalni rezultati, kako sa aspekta filtracije, tako i sa aspekta vremena čekanja (*eng. Latency*) tokom agregacije podataka i numeričkog izračunavanja baznih komponenti. Više vrednosti p_i korespondiraju nižoj vrednosti količine informacija. Niska vrednost informacione entropije potiče od manjeg broja sopstvenih

vrednosti koje imaju velike verovatnoće, dok visoka vrednost entropije potiče od niza sopstvenih vrednosti čije su verovatnoće približno jednake.

Postupak upotrebe informacione entropije takođe podrazumeva upotrebu jednog praga detekcije. Kao i u slučaju upotrebe baznih komponenti, neophodna je faza inicijalizacije, kada se određuje visina praga detekcije u zavisnosti od prirode prostiranja radio talasa u prostoriji od interesa, u kojoj nema prisutnih ljudi. Prag detekcije se određuje kao polovina najniže vrednosti izračunate entropije nad nizom sopstvenih vrednosti. U toku izvršne faze, sve vrednosti koje su iznad praga detekcije određuju prostoriju od interesa u kojoj nema prisutnih ljudi, dok sve vrednosti koje su niže od praga detekcije određuju prisustvo čoveka u prostoriji od interesa, bilo da se kreće ili sedi, leži, odnosno stoji nepomično.

Primena entropije uvećava ispravnost RF detekcije, a upotrebom inkrementalnog algoritma izračunavanja baznih komponenti znatno se umanjuje dužina trajanja obrade podataka u odnosu na uobičajeni pristup računanja baznih komponenti, transformacijom matrice RSSI odbiraka u karakteristični polinom. Jednostavnost i brzina obrade ulaznih podataka obezbeđuju da se takvo, numerički optimizovano rešenje, programski implementira i na računarima skromnijih procesnih resursa, ne narušavajući pouzdanost RF detekcije, niti brzinu odziva sistema u realnom vremenu. Međutim, informaciona entropija ne može jasno razlučiti da li je u određenoj zoni prostorije od interesa prisutan čovek ili element nameštaja. Primera radi, ukoliko osoba, neposredno pre napuštanja prostorije od interesa, pomeri stolicu tako da zaklanja direktnu vidljivost linije prostiranja radio talasa između svih čvorova detekcije u prostoriji, prepoznaće se prisustvo ljudi, što nije ispravno funkcionalno stanje. Stolica, ili bilo koji drugi element nameštaja će reflektovati i difraktovati radio talase, uvodeći poremećaje u očekivanoj varijaciji odbiraka RSSI. Stoga je neophodno dodatno analizirati intenzitet varijacija odbiraka RSSI u frekventnom domenu da bi se zaključilo da li postojeće varijacije potiču od nekog objekta nežive prirode, ili od prisustva čoveka. U tu svrhu uvodi se diskretna Furijeova transformacija i mera indeksa disperzije.

2.1.5 Primena diskretne Furijeove transformacije i mera indeksa disperzije

Kretanje ljudi i pomeranje delova tela uzrokuje znatno izražene varijacije RSSI, te u tom slučaju prethodno izloženi algoritmi RF detekcije mogu sa visokom pouzdanošću prepoznati ljudsko prisustvo u prostoriji od interesa. Prisustvo nepomičnog čoveka u prostoriji u kojoj nema gusto raspoređenih elemenata nameštaja, takođe se lako može prepoznati opisanim algoritmima. Međutim, u svakodnevnim okruženjima, različita vrsta i broj elemenata nameštaja može svojim prisustvom dodatno uticati na disperziju i refleksiju radio talasa, izazivajući time neželjene varijacije RSSI, koje upotrebom informacione entropije ili algoritma minimalnog i maksimalnog odstupanja od srednje vrednosti ne mogu jasno razgraničiti prisustvo nepomične osobe od

neživog objekta. Spektralna analiza varijacija RSSI odbiraka obezbeđuje razlikovanje prisustva nepomičnog čoveka od neživog objekta.

Furijeova (*Jean-Baptiste Joseph Fourier*) transformacija signala predstavlja jedan od najznačajnijih postupaka za spektralnu analizu neregularnih signala. Spektralnom analizom se svaki periodičan ili aperiodičan signal može razložiti na sumu sinusoidalnih komponenti, čije se učestanosti razlikuju kako za konačan iznos, kao što je to slučaj kod periodičnih signala, tako za beskonačno mali iznos kod aperiodičnih signala. Diskretna Furijeova transformacija (DFT) predstavlja Furijeovu transformaciju diskretnog i konačnog, odnosno periodičnog signala. DFT omogućuje efikasno filtriranje u frekvencijskom domenu, odnosno izdvajanje harmonijskih komponenti iz složenog signala. Diskretnom Furijevom transformacijom preslikava se signal iz vremenskog u spektralni domen, u kom je moguće otkriti specifične obrasce ponašanja signala, koje nije moguće prepoznati u vremenskom domenu.

Nedavna istraživanja su potvrdila da radio talasi mogu biti upotrebljeni za otkrivanje čak i najmanjih promena u okruženju, poput pomeranja ljudskog tela tokom disanja (*Kaltiokallio, 2014; Patwari, 2014a*). Mikropokreti ljudskog torzoa prilikom udisaja ili izdisaja uzrokuju neprimetne varijacije RSSI. Međutim, pošto je pri upotrebi četiri bežična čvora, što je optimalan broj čvorova detekcije za uobičajenu prostoriju površine oko 30 m², učestanost prozivke tokom agregacije RSSI odbiraka $f_s = 2.5$ Hz, a uz zadovoljenje Nihvistovog kriterijuma učestanosti odabiranja, spekar signala do polovine učestanosti f_s je dovoljan za identifikovanje komponente učestanosti disanja, koja se za zdravog čoveka kreće u opsegu od 0.2 Hz do 0.6 Hz (*Barnas, 1989*). Otkrivanjem komponente učestanosti disanja čoveka u frekventnom spektru RSSI odbiraka moguće je jasno razgraničiti odbirke RSSI koji identifikuju ljudsko prisustvo od prisustva neživog objekta na istoj poziciji u prostoriji od interesa (*Mrazovac, 2015*).

Agregacija odbiraka RSSI pre obrade izloženim algoritmom DFT se obavlja na sličan način opisan prethodnim postupcima. Dobavljeni ciklični odbirci RSSI se grupišu u matricu X opisanu izrazom (12), odnosno ansambl varijacija snage signala postojećih radio veza, iz kog se diskretnom Furijevom transformacijom prevode u spektralni domen. DFT se primenjuje nezavisno na svaku kolonu, odnosno niz odbiraka RSSI po jednoj radio vezi matrice X , i to u okviru unapred definisanog skupa, tj. prozora obrade, koji broji 2^m odbiraka RSSI, gde je m proizvoljan prirodan broj. Kako podaci, tj. odbirci RSSI, kontinualno pristižu u matricu X , nakon dobavljenih 2^m odbiraka svaka pojedinačna kolona se prevodi u frekventni domen numeričkim postupkom brze Furijeove transformacije (*eng. Fast Fopurier Transform - FFT*) ili oskudne brze Furijeove transformacije (*eng. Sparse Fast Fourier Transform - SFFT*). Sa aspekta brzine odziva sistema, zadovoljavajuće rezultate daju oba algoritma, mada će u budućnosti velika pažnja biti posvećena upotrebi SFFT. SFFT algoritam (*Hassanieh, 2012*) predstavlja inovativni numerički

pristup u spektralnoj analizi signala, koji postojeći signal, odnosno niz odbiraka RSSI, izražava kao težinsku sumu istog broja učestanosti, polazeći od činjenice da određena vrednost RSSI poseduje veći udeo u konačnom rezultatu, odnosno nizu odbiraka. Pojedine vrednosti odbiraka poseduju zanemarljivi udeo u konačnom rezultatu, pa se mogu ignorisati. SFFT algoritam detektuje težinu najučestalijih vrednosti u sekvenci odbiraka, te što je signal, odnosno sekvenca, oskudniji to je veće ubrzanje kojim SFFT algoritam rezultuje, a koje u odnosu na FFT može da bude 10, pa čak i do 100 puta.

Kompleksni brojevi, kao rezultat diskretne Furijeove transformacije, prevode se u niz magnituda po svakoj koloni matrice X , formirajući matricu Y , opisanu izrazom (26):

$$Y = \begin{bmatrix} \eta_{1-1}(t_0) & \eta_{1-2}(t_0) & \dots & \eta_{K-(K-1)}(t_0) \\ \eta_{1-1}(t_1) & \eta_{1-2}(t_1) & \dots & \eta_{K-(K-1)}(t_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \eta_{1-1}(t_m) & \eta_{1-2}(t_m) & \dots & \eta_{K-(K-1)}(t_m) \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Zatim se matrica Y transformiše u jednodimenzionalni niz y' , izrazom (27), na način da se sve vrednosti magnituda u jednakom vremenskom trenutku odabiranja t_m usrednje, bez obzira kojoj koloni, odnosno radio vezi pripadaju:

$$y' = \begin{bmatrix} \overline{\eta(t_0)} \\ \overline{\eta(t_1)} \\ \dots \\ \overline{\eta(t_m)} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Nad definisanim prozorom p odbiraka vektora y' , izračuna se indeks disperzije ψ , koji se definiše kao količnik kvadrata varijanse i srednje vrednosti niza p odbiraka vektora y' , gde je p prirodan broj. U zavisnosti od izračunate vrednosti indeksa disperzije, po izrazu (28), može se razlučiti da li je u prostoriji prisutan čovek ili neživi objekat, poput elementa nameštaja.

$$\psi = \frac{\delta^2}{\mu} \begin{cases} 0 < \psi \leq 1 & , \text{prisustvo objekta} \\ \psi > 1 & , \text{prisustvo čoveka} \end{cases} \quad (28)$$

Indeks disperzije (IP) opisuje prirodu učestanosti varijacije u snazi indikatora primljenog radio signala u frekventnom domenu. Parametar δ označava varijansu, a μ označava srednju vrednost odbiraka u vektoru y' usrednjenih magnituda, dobijenog frekventnom transformacijom originalne matrice agregacije X . Upotreba indeksa disperzije ne zahteva fazu inicijalizacije i određivanje praga detekcije. Za indeks disperzije spektra važi da je uvek pozitivan, odnosno spektar varijacije snage signala ima geometrijsku raspodelu ukoliko je prisutan čovek u oblasti pokrivenoj radio talasima. Ukoliko je umesto čoveka postavljen objekat u istu tu poziciju u

oblasti pokrivenoj radio talasima, indeks disperzije je pozitivan broj, ali manji od 1, te spektar varijacije snage signala poseduje binomnu raspodelu.

S obzirom da način na koji se detektuje prisustvo ljudi i razdvaja od prisustva objekata u prostoriji ne zahteva posebne računarske resurse, izloženi postupak je moguće izvršavati paralelno sa algoritmom informacione entropije baznih komponenti. Sama upotreba indeksa disperzije ne razgraničava u potpunosti prisustvo nepomične osobe od prostorije u kojoj nema prisutnih ljudi, pošto se uticaj okruženja i šuma ne može eliminisati parcijalnom analizom svake radio veze. Međutim, u kombinaciji sa informacionom entropijom moguće je u potpunosti razlučiti: (1) da li je u prostoriji od interesa prisutan čovek, (2) da li se čovek kreće ili miruje, (3) da li je došlo do promene lokacije ili gustine rasporeda nameštaja. Simultanom analizom ova dva parametra varijacije RSSI odbiraka, uz mogućnost primene rasplinite logike (*eng. Fuzzy logic*) ili klasifikatora odlučivanja, u najvećoj meri se otklanjaju spoljni uticaji, usredsređivanjem RF detekcije isključivo na prostoriju od interesa, uz uobičajenu radio komunikaciju koja se nesmetano, bez neočekivanih gubitaka prenosi kroz više prostorija pametne kuće.

2.1.6 Tok agregacije i obrade podataka programske podrške postupka RF detekcije

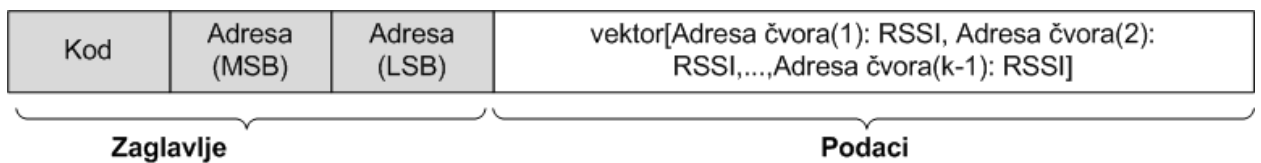
U prethodnim poglavljima izložena je evolucija statističkog modela opisanog postupka RF detekcije, počevši od jednostavne analize disperzije signala u odnosu na srednju vrednost, pa do informacione entropije baznih komponenti i indeksa disperzije frekventnog domena. Algoritmi i tehnike obrade signala u oblasti pokrivenoj elektromagnetnim talasima, koji se originalno koriste za bežičnu komunikaciju, a predstavljenim postupcima se dodatno mogu koristiti i za detekciju prisustva ljudi, mogu se implementirati na fizičkoj arhitekturi (ASIC, FPGA) programski (u višim programskim jezicima: *C/C++*, *Java*, *Actionscript*, *HTML*, *PHP*, *JavaScript*, *Lua*) ili kombinovano (*DSP*, *mikroprocesori*). Postupak emitovanja odbiraka RSSI i agregacije na prijemnoj strani je univerzalan za sve izložene algoritme, jedino se način obrade dobavljenih odbiraka razlikuje u zavisnosti od primenjenog algoritma.

Programska podrška bežičnih čvorova je implementirana u okviru *ZigBee* specifikacije IEEE 802.15.4 komunikacionog standarda, koja je komercijalno najzastupljenija u sistemima Ambijentalne Inteligencije. CC2530 kompilacija sistema na integrisanom kolu (*eng. System-on-chip - SoC*), proizvođača *Texas Instruments* (CC2530, *specifikacija*), uz podršku 8051 MCU jezgra, obezbeđuje drugu generaciju primopredajnih modula u okviru standarda IEEE 802.15.4 za *ZigBee* i *6LoWPAN* specifikacije komunikacionih protokola. Sa aspekta RF detekcije, od posebnog značaja je RSSI statusni registar. RSSI predstavlja estimiranu snagu primljenog RF signala, usrednjenu na periodu od osam simbola ($128\mu s$). Vrednost upisana u RSSI status registru

je osmobaritni broj u predstavi drugog komplementa. Za pretvaranje osmobaritne vrednosti u dBm (dB/mW) neophodno je izvršiti konverziju po izrazu (29):

$$RSSI [dBm] = \overline{RSSI[8bit] - 1} . \quad (29)$$

Periodično ažuriranje vektora vrednosti RSSI radio veze jednog bežičnog čvora ka ostalim čvorovima realizovano je na način da svaki čvor koji dobije zahtev od centralne upravljačke jedinice ili vodećeg čvora, za vektorom RSSI, emituje taj vektor kao grupnu poruku dostupnu svim bežičnim čvorovima u okolini, uključujući i centralnu upravljačku jedinicu. Okolni bežični čvorovi, nakon što prime grupnu poruku, ažuriraju vrednost RSSI za radio vezu sa adrese sa koje je poruka poslata. Grupna poruka koja sadrži vektor RSSI vrednosti se zove i detekciona poruka, a njen format je predstavljen na slici 4:



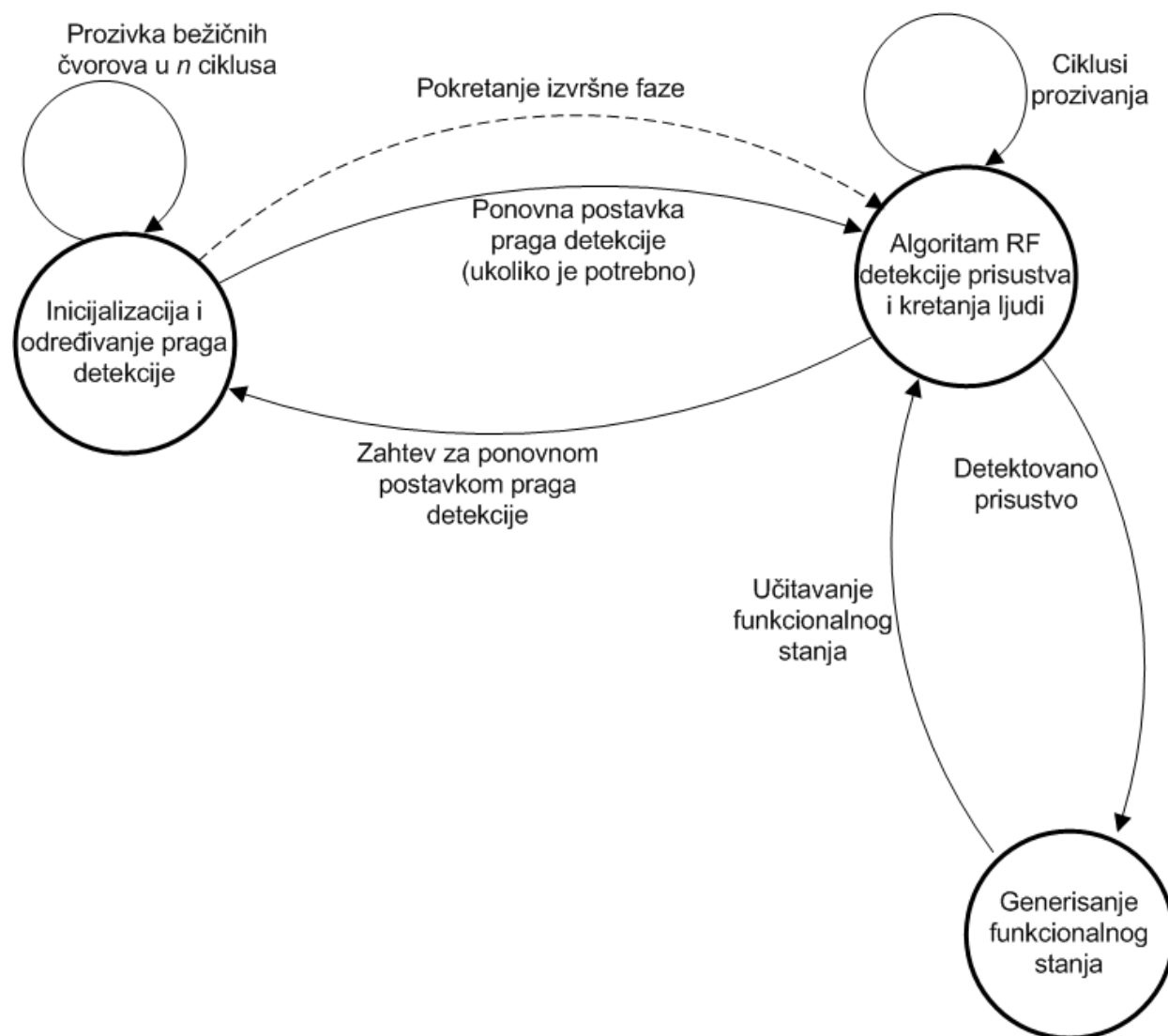
Slika 4. Detekciona poruka – format zaglavlja i podataka.

Ukoliko bežični čvor primi poruku sa kodom *0x0F*, zahteva se grupno emitovanje poruke koja sadrži trenutni vektor dobavljenih RSSI vrednosti. Realizovana funkcija pronalazi poziciju adrese u vektoru podataka čvora sa kojeg je poruka primljena i u odgovarajuće polje upisuje vrednost RSSI, dobavljenu iz RSSI statusnog registra, merenjem primljene snage radio signala tokom prijema poruke. Na ovaj način se ažurira vektor odbiraka RSSI prilikom prozivke svakog čvora, odnosno prilikom njegovog odgovora u obliku vektora adresa susednih bežičnih čvorova sa kojima su uspostavljene radio veze, a na kojima je trenutna snaga radio signala dobavljena i sačuvana u vidu pojedinačnog odbirka RSSI. Ukoliko određeni bežični čvor primi poruku sa kodom *0xF0*, odgovarajuća funkcija preuzima emitovanu poruku koja sadrži vektor adresa susednih čvorova sa kojima je prethodno prozvani čvor, emiter grupne poruke, uspostavio radio vezu. Po prijemu grupne poruke ažurira se lokalni vektor vrednosti koji se čuva na svakom čvoru ponaosob, očekujući narednu prozivku i poruku sa kodom *0x0F* kada ponavlja periodično emitovanje svoje grupne detekcione poruke.

Kako bi se u najvećoj meri otklonila suvišna i nepotrebna komunikacija između čvorova i centralne upravljačke jedinice i sprečila neželjena kolizija poruka, uklonjena je neophodnost potvrde prijema svake emitovane grupne poruke. S obzirom da je prozivka pojedinačnog čvora na 100 ms, podrazumeva se da će svaki čvor biti relativno brzo prozvan od strane centralne upravljačke jedinice, te ako i dođe do gubitka do 5 detekcionih poruka zaredom, neće se bitnije narušiti ispravnost rada sistema, jedino se može dogoditi da odziv kasni par sekundi, što je sa aspekta krajnjeg korisnika manje primetno.

Centralna upravljačka jedinica prikuplja redom sve grupne poruke sa kodom $0xF0$, koje sadrže vektore RSSI odbiraka od ciklično prozvanih čvorova. Svi dobavljeni odbirci RSSI smeštaju se u matricu čvorova, sastavljenu od adresa čvorova koji formiraju određenu radio vezu i većeg broja uzastopnih vrednosti RSSI odbiraka za datu radio vezu. Nad tako kreiranom matricom se dalje primenjuje jedan od prethodno opisanih algoritama obrade RSSI odbiraka, realizovan kroz opisane faze inicijalizacije i izvršavanja.

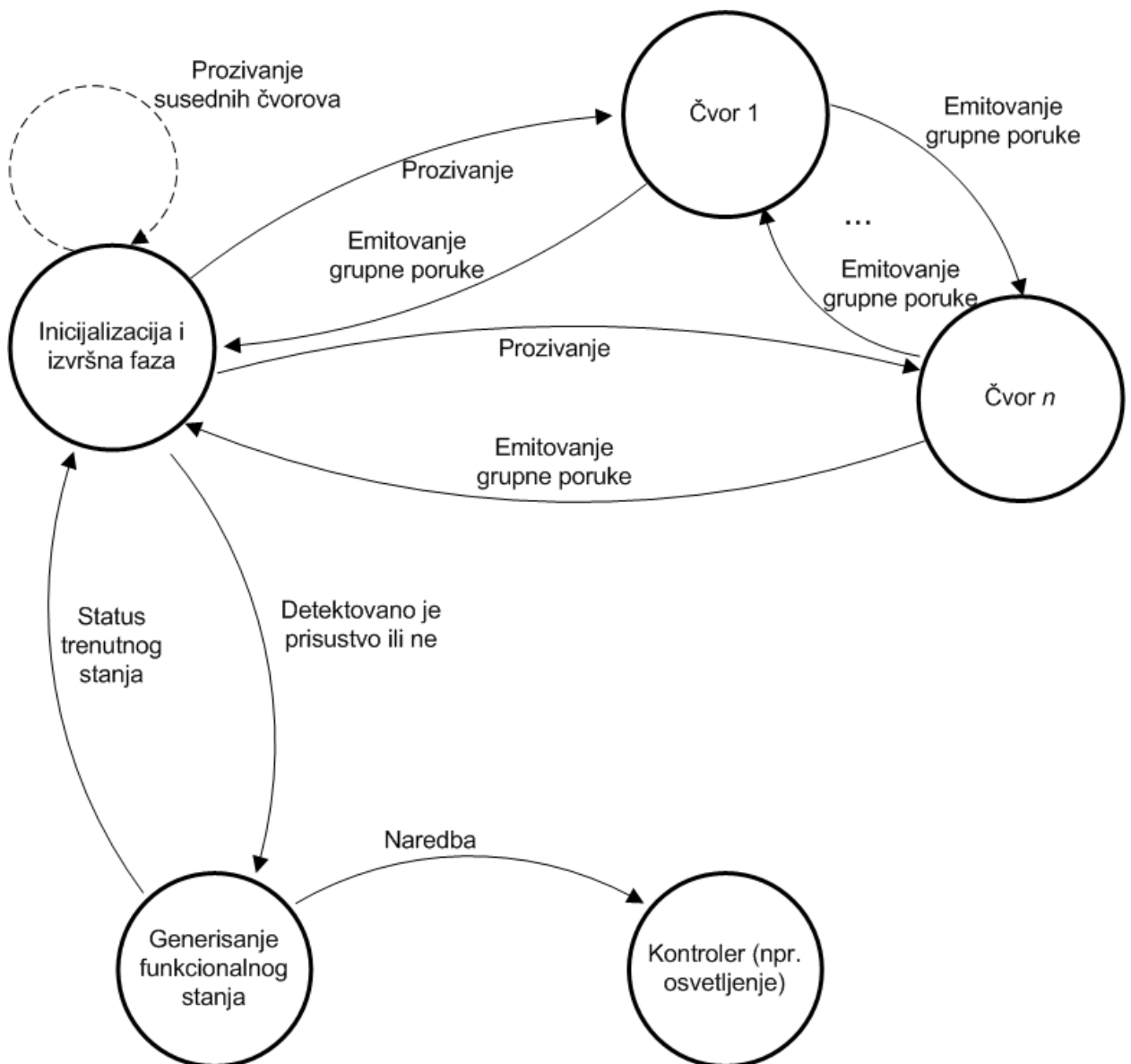
Svaki algoritam je programski realizovan kroz nekoliko stanja koja se smenjuju periodično ili u zavisnosti od prekidne komande koju generiše korisnik putem upravljačke aplikacije, a koja ima prioritet u odnosu na trenutno stanje izvršavanja. Regularna stanja obuhvataju: stanje inicijalizacije, stanje izvršavanja algoritma i stanje detektovanja ljudskog prisustva, tokom kojeg se generiše prethodno definisana upravljačka komanda. Dijagram stanja agregacije i obrade podataka algoritmima RF detekcije grafički je predstavljen na slici 5.



Slika 5. Dijagram stanja i prelaska iz faze inicijalizacije u izvršnu fazu, uz generisanje funkcionalnog stanja u zavisnosti od prepoznatog prisustva.

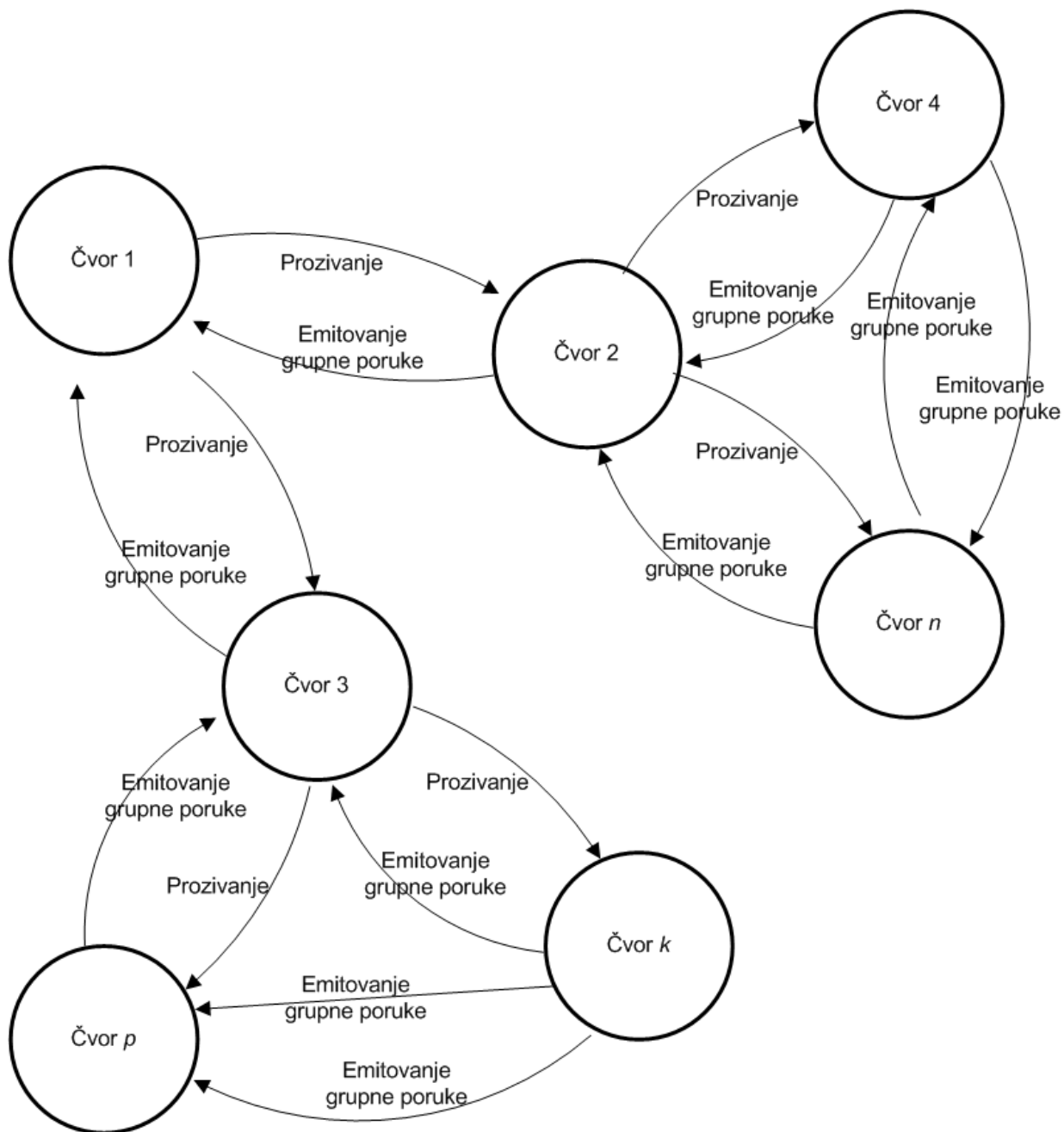
Faza inicijalizacije pokreće nit koja izvršava petlju u n definisanih koraka. Nakon n koraka inicijalizacije pokreće se izvršna nit, koja u okviru beskonačne petlje neprekidno dobavlja i obrađuje grupne detekcione poruke. Inicijalizaciona nit se privremeno obustavi dok se ne primi naredba za ponovno uspostavljanje praga detekcije. Nit inicijalizacije i izvršna nit se međusobno smenjuju i ni u kom slučaju se ne može istovremeno preklapati njihova aktivnost. Otkriveno prisustvo čoveka, pokreće signal prelaska u stanje generisanja funkcionalne naredbe, koje je vrlo kratko i služi za izdavanje funkcionalne komande jednom uređaju ili grupi uređaja, kao na primer uključi ili isključi osvetljenje u zavisnosti od prisustva čoveka.

Prethodno je izloženo da se opisani postupci RF detekcije mogu realizovati centralizovano ili distribuirano. Način centralizovane realizacije izloženih algoritama grafički je predstavljen na slici 6. Centralizovano upravljanje zahteva celokupnu logiku obrade RSSI odbiraka realizovanu na strani centralne upravljačke jedinice.



Slika 6. Dijagram razmene podataka i naredbi u okviru centralizovanog pristupa detekcije.

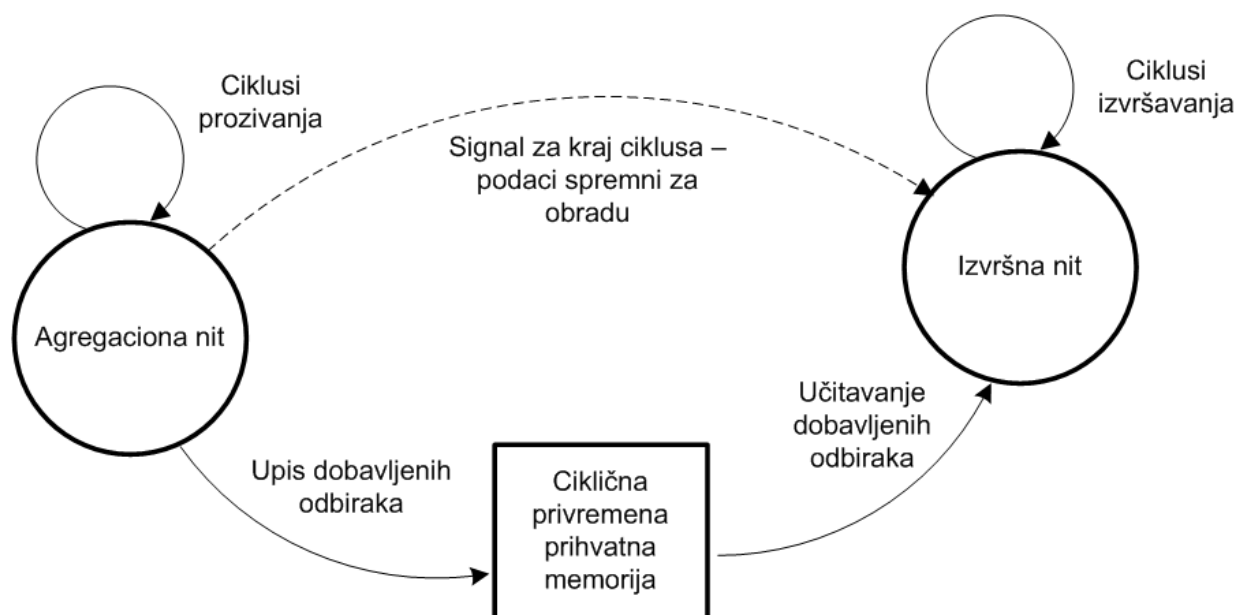
Centralna upravljačka jedinica proziva različite bežične čvorove, koji su međusobno grupisani po odgovarajućim oblastima od interesa. Svi čvorovi koji pripadaju istoj oblasti od interesa, sadrže odgovarajuću kombinaciju adresnih bita veće važnosti (*eng. Most significant bits - MSB*) predviđenu još prilikom fizičke instalacije sistema. Na taj način se ujedno obezbeđuje da samo bežični čvorovi iz iste prostorije od interesa učestvuju u RF detekciji u okviru te prostorije. Centralna upravljačka jedinica posredstvom obe niti - niti inicijalizacije i izvršne niti, aktivira blok za komunikaciju da bi kontinualno prozivala čvorove i prihvatila emitovane grupne poruke, dobivajući time odbirke RSSI. U vrednostima odbiraka RSSI je sadržana kompletna priroda ponašanja radio talasa u različitim okruženjima i pri različitim stanjima okruženja. Distribuirani pristup RF detekcije, kroz razmenu naredbi i poruka, grafički je predstavljen na slici 7.



Slika 7. Dijagram razmene podataka i naredbi u okviru distribuiranog pristupa detekcije.

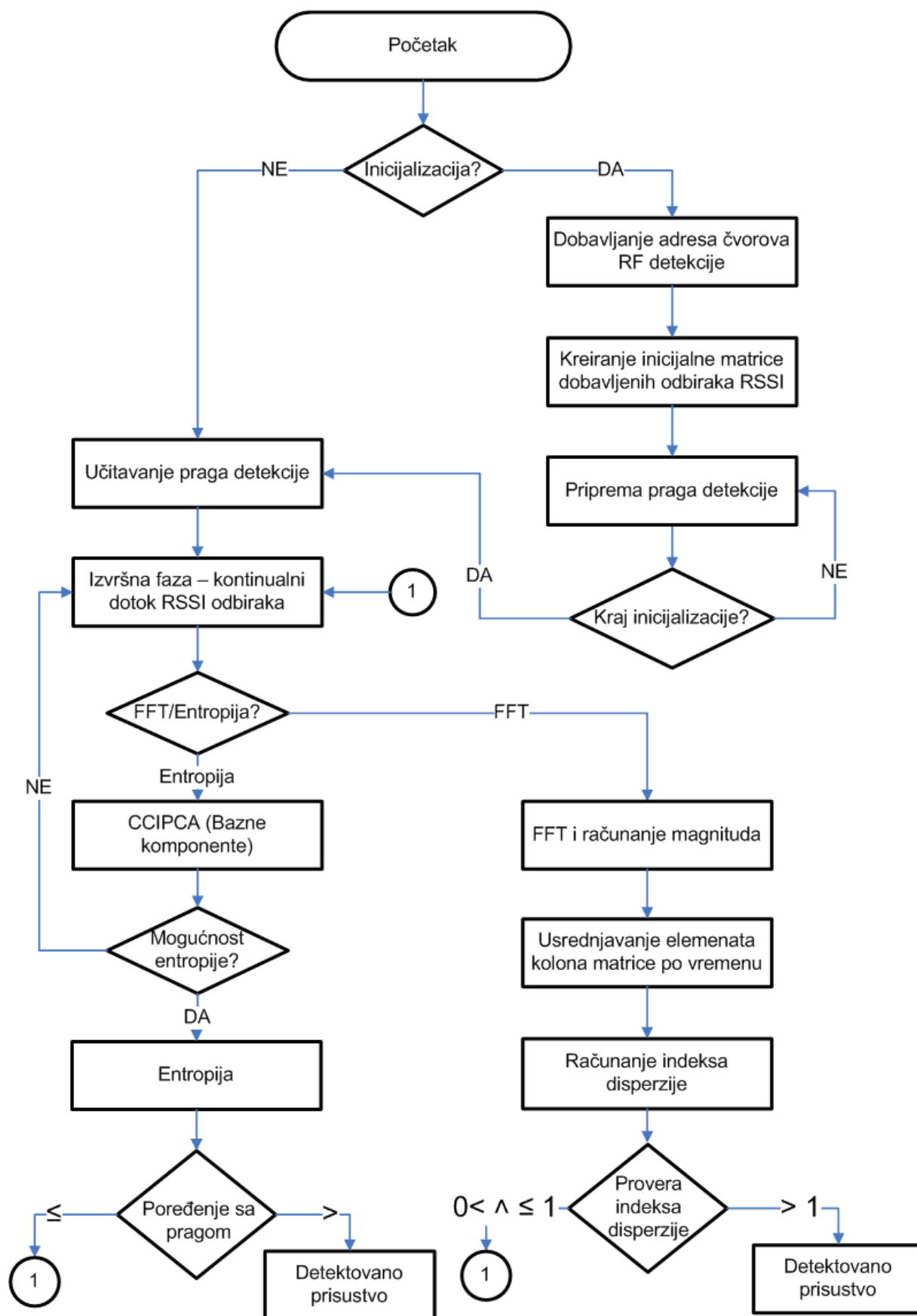
Distribuirani pristup u realizaciji RF detekcije na sličan način prikuplja i obrađuje podatke, s tim što ulogu centralne upravljačke jedinice preuzima jedan od čvorova koji u datom trenutku postaje vodeći čvor, dok su okolni čvorovi prateći čvorovi. Prelazak iz stanja pratećeg čvora u vodeći je regulisan sistemskim taktom, gde se po unapred utvrđenom redosledu (redni broj sadržan u adresi) određuje dužina trajanja prozivke i vodećeg stanja svakog bežičnog čvora. Kao i u slučaju centralizovanog upravljanja, gde MSB biti adrese bežičnog čvora određuju pripadnost prostoriji od interesa, tako i MSB biti adresa čvorova distribuiranog pristupa određuju pripadnost zoni detekcije. Time je omogućeno da istovremeno više čvorova bude aktivno u stanju vodećeg čvora, ali da ne mogu uticati jedni na druge pošto je za svaku zonu detekcije određena specifična kombinacija MSB bita adrese. S obzirom da je primarna namena distribuiranog pristupa RF detekcija prisustva ljudi na nivou ulične rasvete, olakšavajuća okolnost je u činjenici da su čvorovi detekcije fizički dovoljno udaljeni, a mali broj graničnih čvorova se međusobno razdvaja navedenim MSB bitima adrese.

Opisani postupci dobavljanja odbiraka RSSI, koji su sadržani u grupnim detekcionim porukama, obezbeđuju kontinualan dotok odbiraka RSSI u kojima je sadržana kompletna priroda ponašanja radio talasa u različitim okruženjima i pri različitim stanjima okruženja. Dalja obrada odbiraka RSSI zahteva optimizovane statističke modele, zasnovane na numerički efikasnim postupcima, poput opisanih CCIPA i FFT, odnosno SFFT, da bi se tokom narednog ciklusa prozivke, paralelno mogli obraditi kontinualno dobavljeni podaci. Paralelizacija agregacije i obrade podataka zahteva postojanje agregacione niti, koja je u neposrednoj vezi sa izvršnom niti, obezbeđujući kontinualno popunjavanje ciklične privremene prihvatne memorije (*eng. Buffer*), koju izvršna nit očitava nakon svakog ciklusa prozivke, odnosno signala od strane agregacione niti, preuzimajući pristigli vektor odbiraka RSSI (slika 8).



Slika 8. Komunikacija i sinhronizacija između agregacione i izvršne niti.

Blok dijagram algoritma, prikazan na slici 9, navodi sve faze algoritma obrade odbiraka RSSI, dajući kao rezultat statistički model opisan sa dva parametra: entropijom i indeksom disperzije.



Slika 9. Blok dijagram algoritma opisanog postupka RF detekcije.

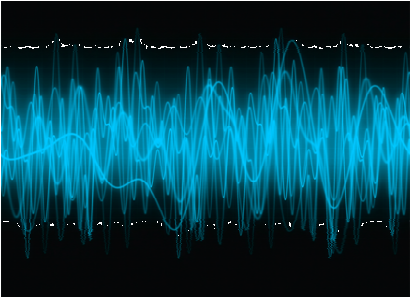
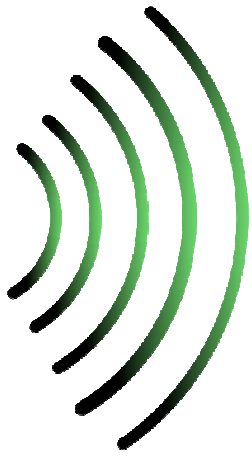
Krajnji statistički model prostora, u kom se devijacije radio talasa analiziraju u realnom vremenu za otkrivanje prisustva i kretanja ljudi, dat je u formi informacionog i frekvencijskog obeležja prostiranja radio talasa. Informaciona karakteristika jasno razdvaja prisustvo čoveka od prostorije u kojoj nema prisutnih ljudi, dok bazne komponente obezbeđuju dobru zaštitu od spoljnih uticaja. Indeks disperzije omogućuje visoku toleranciju, uz održanje kvaliteta detekcije pri promeni rasporeda elemenata u prostoriji od interesa. Konkurentnost operacija prikupljanja i obrade podataka, odnosno razdvajanje niti agregacije i izvršne obrade obezbeđuje dovoljno brz odziv sistema, što je sa korisničkog aspekta neophodno, posebno prilikom primene ove vrste senzora za sisteme Ambijentalne Inteligencije. U pametnim stambenim sistemima, poput sistema za automatsko upravljanje osvetljenjem, očekuje se skoro trenutno uključivanje osvetljenja u prostoriji od interesa nakon što je čovek ušao, kao i brzo isključivanje nakon što tu istu prostoriju napusti. Da bi sistem odgovorio dovoljno brzo, neophodno je optimizovati postupke obrade podataka, prvenstveno one računski najzahtevnije, kao što je u slučaju opisanog statističkog prostornog modela upravo izračunavanje baznih komponenti.

U okviru ovog istraživanja, izračunavanje informacione entropije i magnituda Furijeove transformacije je nezavisno, te konkurentnost izvršavanja ovih operacija nije uzimana u obzir. Za dalje istraživanje, ali i komercijalizaciju opisanog postupka RF detekcije, neophodno je paralelizovati izračunavanje ove dve karakteristike, a potom i programski analizirati njihove promene primenom klasifikatora, tehnika rasplinite (*eng. Fuzzy*) logike ili pak upotrebom veštačke inteligencije. Naravno, kompleksnija obrada podataka će zahtevati i jaču procesnu moć, te će u takvim primenama jedino centralizovana obrada podataka imati upotrebnu vrednost, upravo zbog procesne snage centralne upravljačke jedinice. Izbor centralizovanog ili distribuiranog pristupa ostaje na projektantima krajnjeg sistema Ambijentalne Inteligencije, da u skladu sa cenom, potrebama i zahtevima sistema, odrede koji će pristup primeniti.

Opisani postupak RF detekcije se može, ali i ne mora samostalno primeniti. Primarni cilj ove teze jeste da se uklone svi konvencionalni senzori za detekciju prisustva i kretanja ljudi, a da se upotrebe isključivo postojeći radio talasi. Međutim, to ne znači da se postupak RF detekcije ne može kombinovati i sa nekom od konvencionalnih tehnologija, poput vizualnih ili zvučnih, odnosno ultrazvučnih senzora, ali i drugih senzora čija namena nije detekcija ljudi.

Kao i ostale senzorske tehnologije i postupak RF detekcije prisustva i kretanja ljudi ima svoje prednosti i nedostatke, ali za tehnologiju koja tek počinje da se ozbiljnije istražuje inicijalni rezultati predviđaju značajan uspeh. U tabeli 9, naveden je skup karakteristika postupka RF detekcije ljudi, u zavisnosti od zaključaka do kojih se došlo tokom istraživanja u okviru ove disertacije, a koji potvrđuju da će RF detekcija ljudi u skorijoj budućnosti moći ravnopravno da parira i najkompleksnijim senzorskim sistemima, poput 3D senzora.

Tabela 9. Opis karakteristika predstavljenog postupka za RF detekciju ljudi

Senzor RF detekcije ljudi		
 	Opseg detekcije objekata:	Do 15 m (teorijski i do 40 m)
	Komunikacione sprege:	Zigbee/6LoWPAN/WiFi (2.4 GHz), USB, analogne linije
	Cena (€):	Programska podrška koja se ugrađuje u postojeće uređaje sa podrškom za radio komunikaciju, stoga ne postoji cena izvedbe fizičke arhitekture
	Proizvođači:	U fazi istraživanja, nije komercijalizovano. Istraživački centri: SPAN grupa – Univerzitet Juta, SAD; Univerzitet Alexandria, Egipat, Univerzitet Ulster, Severna Irska, UK.
	Prednosti:	<ul style="list-style-type: none"> • Izuzetno niska cena • Mogućnost primene na bilo koji uređaj osposobljen za bežičnu komunikaciju • Mogućnost detekcije kretanja ljudi • Mogućnost detekcije nepomičnih ljudi • Otpornost na ambijentalne uticaje (temperatura, vlažnost) • Mogućnost razlikovanja ljudi od neživih objekata • Mogućnost razlikovanja kućnih ljubimaca od ljudi • Mala potrošnja • Mogućnost istovremene radio komunikacije kroz više prostorija, uz ograničavanje detekcije na samo jednu prostoriju • Dobra otpornost za preslušavanje sa drugim radio učestanostima

	Nedostaci:	<ul style="list-style-type: none">• Neophodnost postojanja najmanje dva bežična čvora radi uspostavljanja radio veze, sa koje se mogu analizirati odbirci RSSI• Veće oblasti od interesa zahtevaju veći broj bežičnih čvorova (na primer za prostoriju površine 25-30 m² optimalna su četiri bežična čvora)• Trenutno je u fazi istraživanja, neophodan proces komercijalizacije i dodatne optimizacije algoritama• Negativan uticaj većih objekata sa vodom (akvarijumi)• Moguć negativan uticaj mikrotalasne rerne u blizini čvorova na ispravnost RF detekcije• Neophodno je stalno prisustvo aktivne mreže radio talasa, što je kontroverza i predmet sporenja naučnika po pitanju uticaja radio talasa na ljudsko zdravlje
--	------------	---

POGLAVLJE 3.

VERIFIKACIJA PREDSTAVLJENIH POSTUPAKA I REZULTATI ISPITIVANJA

Upotreba konvencionalnih senzorskih uređaja za realizaciju “pametnog” interaktivnog okruženja uglavnom podrazumeva kompleksne procedure montaže složenog senzorskog rešenja, kao i računski zahtevnu digitalnu obradu različitih pobuda, što definiše visoku cenu krajnjeg proizvoda. Izloženi statistički model radio okruženja omogućuje upravo smanjenje broja uređaja fizičke arhitekture, odnosno potpunu eliminaciju konvencionalnih senzorskih sistema za detekciju ljudi. Ovakav pristup realizaciji interaktivnog okruženja je primenljiv na različite instance sistema Ambijentalne Inteligencije, od kojih je za potrebe ispitivanja i verifikacije opisanog postupka detekcije ljudi izabran sistem za inteligentno upravljanje električnim instalacijama i potrošnjom električne energije u domaćinstvu – OBLO, razvijen na Istraživačko-razvojnem institutu RT-RK za sisteme zasnovane na računaru.

OBLO platforma obuhvata niz pametnih utičnica i prekidača za osvetljenje, koji su zajedno sa centralnom upravljačkom jedinicom umreženi u jedinstven sistem, koji omogućuje praćenje potrošnje i udaljenu kontrolu svakog električnog potrošača priključenog na OBLO infrastrukturu. Za potrebe automatizacije upravljačkih instrukcija, OBLO dodatno obezbeđuje različite sprege sa najraznovrsnijim sensorima. Verifikacija izloženog postupka RF detekcije, upotrebom OBLO infrastrukture, fokusirana je na upravljanje rasvetom u domaćinstvu, na način da se na osnovu događaja, odnosno RF pobuda o prisustvu ili odsustvu ljudi iz određene prostorije od interesa, generiše funkcionalno stanje o uključivanju ili isključivanju rasvete u datoj prostoriji.

Eksperimentalna verifikacija RF detekcije primenjene na OBLO je izvršena u prostorijama više objekata, sazidanih od raznovrsnih građevinskih materijala, čime se potvrdila mogućnost primene postupka RF detekcije ljudi u različitim stambenim okruženjima. U narednim poglavljima opisana je OBLO infrastruktura i predstavljeni su rezultati ispitivanja.

3.1 SISTEM ZA EKSPERIMENTALNU VERIFIKACIJU POSTUPAKA RF DETEKCIJE

Postojeća električna infrastruktura u stambenim i poslovnim objektima omogućuje kontrolu uključivanja i isključivanja priključenih električnih uređaja, najčešće na upit korisnika - manuelno. Manuelna kontrola uglavnom zavisi od navika i raspoloženja korisnika koji u znatnom broju slučajeva propuste da isključe neke od uređaja, poput osvetljenja, nakon napuštanja određene prostorije, što rezultuje povećanom potrošnjom električne energije, a samim tim i visokim računima. Ujedno, trend razvoja SMART GRID tehnologije dodatno podstiče potrebu za realizacijom sistema za spregu sa korisnikom koji omogućuje automatizovanu kontrolu uključivanja i isključivanja električnih uređaja, u zavisnosti od globalnih potreba električne mreže, ali i trenutnog stanja i potreba u samom domaćinstvu. Shodno navedenim zahtevima, na tržištu potrošačke elektronike u toku je ekspanzija sistema pametnih kuća. Zahvaljujući integrisanim mrežama bežičnih senzorskih uređaja, sistemi pametnih kuća su osposobljeni da prilagode celokupnu infrastrukturu trenutnim okolnostima, pravovremeno interagujući sa korisnicima u okruženju, na način koji ne remeti njihove svakodnevne aktivnosti ili navike. Unapređenje automatizacije upravljanja potrošnjom električne energije u domaćinstvu uz minimizaciju troškova realizacije krajnjeg sistema je postignuto kroz integraciju platforme za inteligentno upravljanje potrošnjom električne energije OBLO i postupaka RF detekcije ljudi u prostoriji od interesa, bez upotrebe drugih konvencionalnih senzorskih rešenja za detekciju ljudi.

U okviru OBLO sistema, ulogu bežičnih čvorova detekcije obavljaju bežične pametne utičnice i pametni prekidači za osvetljenje. Kao osnovna jedinica za obradu podataka koristi se centralna upravljačka jedinica, realizovana u obliku programske podrške implementirane na namenskom računaru. Centralna upravljačka jedinica podržava ožičene i bežične mrežne protokole (*Ethernet, Wi-Fi, ZigBee*). Pametne utičnice obezbeđuju napajanje električnih uređaja sa dvopolnom utičnicom, po standardu CEE 7/16, dizajniranom za napon do 250 V i struju do 2.5 A. Uz standardnu mogućnost uključivanja i isključivanja napajanja priključenom uređaju, lokalno ili daljinski, bežični čvorovi omogućuju i prenos struje do priključenog uređaja u određenom procentu, što se najčešće koristi za zamračivanje svetlosnog uređaja (*eng. Dimming*). Ugrađeni IEEE 802.15.4 primopredajnik CC2530 proizvođača *Texas Instruments*, koji radi na učestanosti od 2.4 GHz predstavlja osnovni modul neophodan za RF detekciju prisustva i kretanja ljudi. OBLO centralna upravljačka jedinica, pametna utičnica i pametni prekidači za osvetljenje su prikazani na slici 10. Bitno je napomenuti da su potrebna najmanje dva bežična čvora da bi se mogla obavljati RF detekcija prisustva i kretanja ljudi, analizom promena RSSI u okviru uspostavljene radio veze između navedenih čvorova. Posredstvom realizovanog portala “u oblaku” (*eng. Cloud*), omogućen je udaljeni pristup i kontrola svih priključenih uređaja putem *Android/iOS* pametnih telefona i tablet uređaja, internet stranica ili PC aplikacija.



Slika 10. OBLO infrastruktura: pametni prekidači za osvetljenje, pametna utičnica i centralna upravljačka jedinica za agregaciju i obradu odbiraka snage radio signala.

3.1.1 Centralna upravljačka jedinica

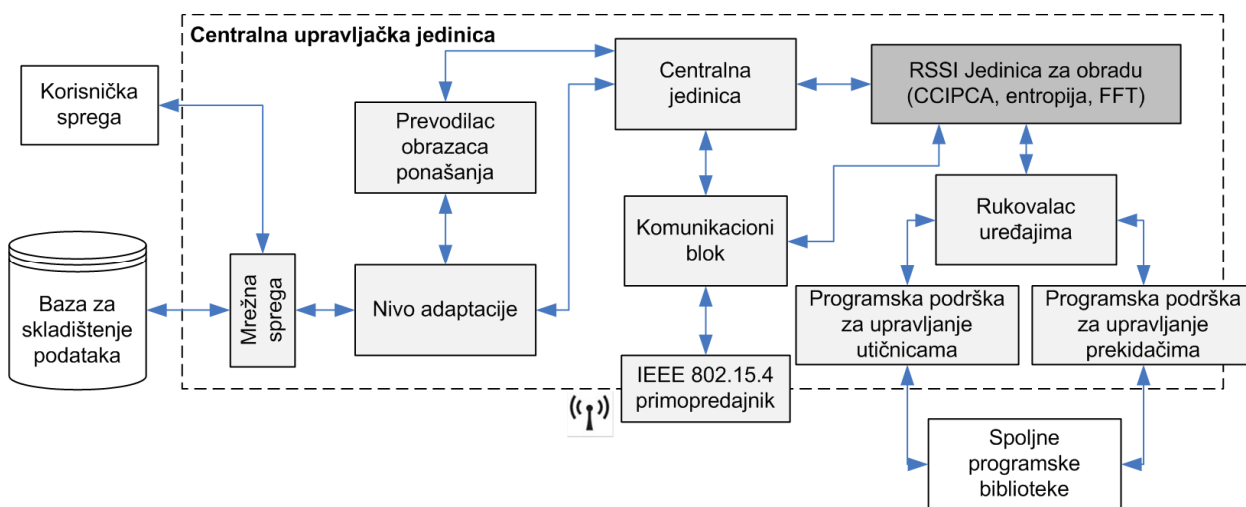
Centralna upravljačka jedinica je realizovana u formi programske podrške, koja omogućuje centralizovano i autonomno upravljanje i nadzor pametnih utičnica i pametnih prekidača, kao i niza dopunskih senzora, koji se po potrebi mogu integrisati u sistem. Autonomno upravljanje je omogućeno implementacijom prevodioca (*eng. Interpreter*) za *Lua* i *XML* obrasce (*eng. Script*) ponašanja koji opisuju odgovor sistema na spoljne događaje. Spoljni događaji pobuđuju kako konvencionalne senzore, tako i radio talase, koji u slučaju upotrebe postupka RF detekcije ljudi otkrivaju prisustvo čoveka, koje OBLO sistem tretira na način definisan obrascem ponašanja. U savremenim SMART GRID mrežama za naprednu kontrolu distribucije električne energije ka krajnjim korisnicima, centralni upravljački uređaj obavlja važnu funkciju posrednika kontrolnih događaja između elektrodistributivne mreže i samog sistema na nivou krajnjeg korisnika.

Programska podrška centralne upravljačke jedinice može biti jednostavno integrisana u okviru različitih POSIX uređaja, uključujući personalne računare i savremene televizijske prijemnike (*eng. Set-Top Box - STB*), obezbeđujući korisniku intuitivnu grafičku spregu. Trenutno rešenje je portabilno na *X86*, *MIPS* i *ARM* platforme. Centralni upravljački uređaj obezbeđuje spregu sa nekoliko najzastupljenijih mrežnih protokola u kućnoj automatizaciji kao što su: *TCP/IP*, *USB*, *Dali/DMX*, *Bluetooth* i *ZigBee*, neophodnih za interno umrežavanje krajnjih uređaja u sistemu, kao i za spoljnu komunikaciju sa elektrodistributivnim mrežama.

Sa funkcionalnog aspekta, centralni upravljački uređaj podržava:

- Nezavisan razvoj programskih rukovalaca krajnjim uređajima (*eng. Driver*) u obliku *Plug-In* struktura,
- Korisnički adaptivne obrasce ponašanja,
- Apstrakciju krajnjih uređaja,
- Mehanizam obrade spoljnih događaja,
- Sinhronu i asinhronu poruke u *JSON* formatu,
- Podršku servisima,
- Podršku udaljenim klijentskim aplikacijama.

Dizajn programske podrške centralne upravljačke jedinice predstavljen je na slici 11. Blok za rukovanje uređajima komunicira sa rukovaocima grupa uređaja, poput pametnih utičnica i prekidača za osvetljenje. Jedinica za obradu RSSI obrađuje pristigle detekcione poruke sa utičnica i prekidača, izdvaja očitane snage signala sa uspostavljenih radio veza i obrađuje ih nekim od prethodno opisanih postupaka RF detekcije. Komunikacioni blok sadrži vremenske odrednice za periodičnu prozivku bežičnih čvorova, te posreduje u razmeni i prijemu poruka posredstvom navedenih mrežnih protokola. Centralna jedinica povezuje sve navedene blokove u jedinstvenu celinu, uparuje ih i sinhronizuje internu međublokovsku komunikaciju.



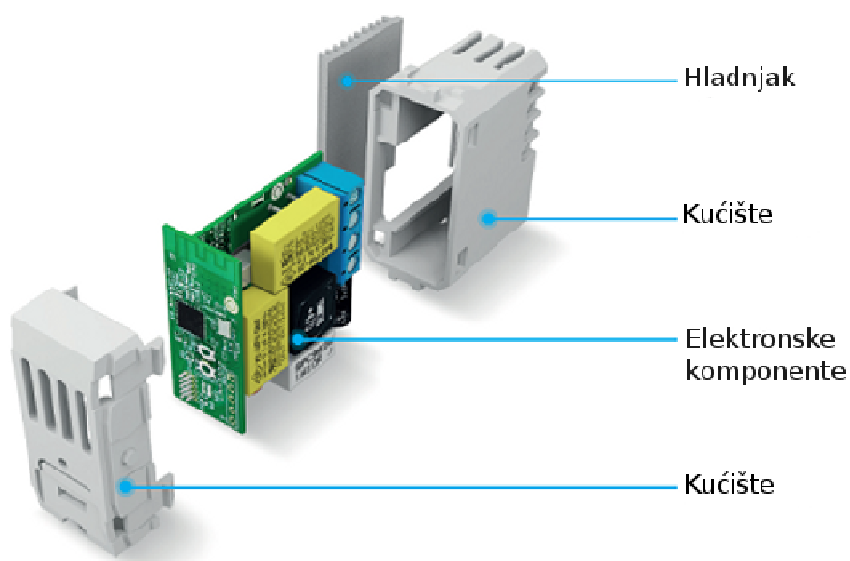
Slika 11. Programska podrška centralne upravljačke jedinice: RSSI jedinica za obradu je dodatni blok programske podrške neophodan za realizaciju postupaka RF detekcije ljudi.

Prevodilac obrazaca ponašanja je jedinstven blok, koji predstavlja jezgro inteligencije celokupnog sistema. *Bjelica (2010)* i *Mrazovac (2010; 2011b)* su među prvima predložili upotrebu obrazaca ponašanja za automatizaciju odziva sistema Ambijentalne Inteligencije na spoljne događaje. Obrasci ponašanja su dati u formi *Lua* i *XML* datoteka, čija je osnovna namena proširena podrškom za obradu spoljnih događaja, vremensku kontrolu, programske uslove i petlje. Upotrebom obrazaca ponašanja jednostavno se može izmeniti priroda odziva celokupnog

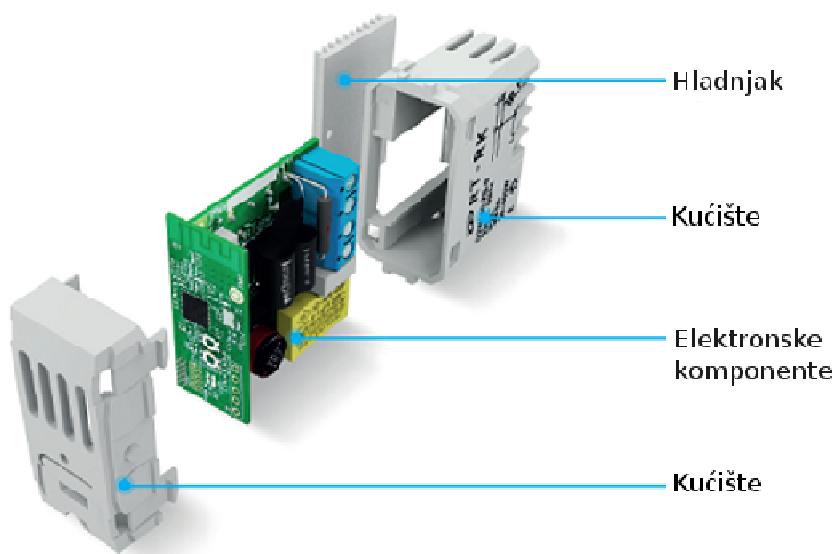
sistema, bez potrebe za ponovnim pokretanjem (*eng. Restart*), već jednostavno prekidanjem izvršavanja tekućeg obrasca, zamenom i pokretanjem prevođenja i izvršavanja drugog obrasca. Automatizacijom odziva na spoljne događaje, kako sa mreže tako i sa jedinica detekcije, obezbeđuje se inteligencija koja eliminiše nepotrebno rasipanje električne energije, a time i rasterećuje prenapregnut sistem elektrodistribucije i unapređuje očuvanje životne sredine.

3.1.2 Pametne utičnice i pametni prekidači za osvetljenje

Pametna utičnica i pametni prekidač za osvetljenje, prikazani na slikama 12 i 13, dodatno uz informacije o potrošnji električne energije priključenog uređaja ili svetlosnog izvora, kao i uključivanja ili isključivanja napajanja priključenom uređaju, obezbeđuju kontinualni dotok odbiraka RSSI centralnoj upravljačkoj jedinici.



Slika 12. Sklop komponenti modula fizičke arhitekture pametne utičnice.

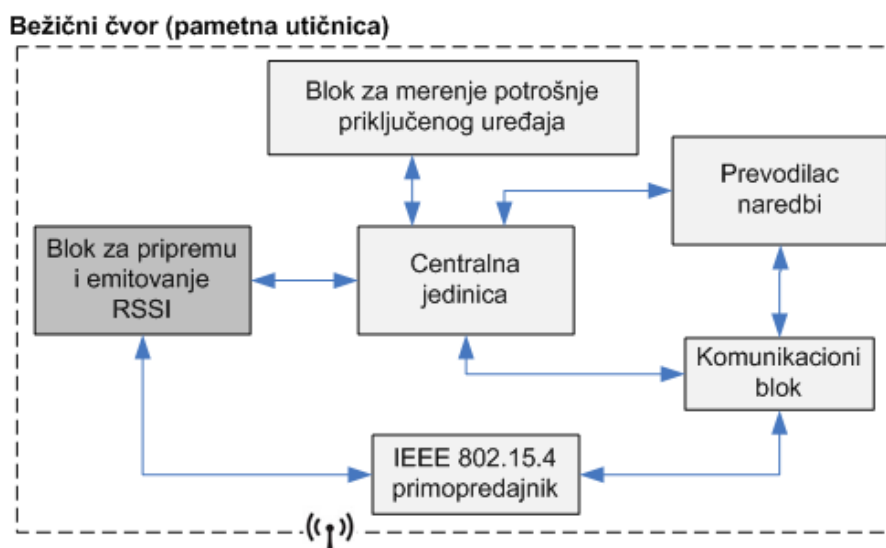


Slika 13. Sklop komponenti modula fizičke arhitekture pametnog prekidača za osvetljenje.

Elektronski sklop pametnih utičnica i prekidača za osvetljenje sastoji se iz prekidača naizmenične struje za kontrolu električnog napona u provodniku, RF primopredajnika, centralne jedinice, bloka za merenje potrošnje, ulaznih i izlaznih vodova, napajanja, tastera za ponovno pokretanje (*eng. Reset*) i LED (*eng. Light-emiting diode*) svetlosne lampice, odnosno indikatora rada samog uređaja. Blok za merenje potrošnje meri aktivnu i reaktivnu snagu utrošenu od strane priključenog uređaja, kao i električnu struju, napon i temperaturu. RF primopredajnik, usaglašen sa *ZigBee* protokolom, razmenjuje poruke sa okolnim čvorovima, centralnom upravljačkom jedinicom ili daljinskim upravljačem, direktno, ili posredno putem okolnih čvorova, koji obavljaju funkcionalnost mrežnog usmerivača (*eng. Router*) ukoliko je dati čvor suviše udaljen od centralne upravljačke jedinice.

Uz jačinu struje od 35 mA i napon od 3.3 V za pametnu utičnicu i 2.4 V za pametni prekidač, potrošnja električne energije pametnih utičnica za izvršavanje programske podrške i slanje komunikacionih poruka je 0.12 W, a za prekidače 0.08 W. Ove vrednosti su zanemarljive u odnosu na uštedu električne energije koju dati sistem omogućuje.

Programska podrška bežičnog čvora predstavljena je na slici 14. Prevodilac naredbi raščlanjuje i izvršava naredbe pristigle sa centralne upravljačke jedinice, čijim se izvršavanjem postavlja određeno funkcionalno stanje. Komunikacioni blok prihvata, priprema i pakuje komunikacione poruke. Blok za pripremu i emitovanje RSSI prikuplja odbirke RSSI sa okolnih čvorova, priprema vektore RSSI i formira detekcione poruke, dok IEEE 802.15.4 primopredajnik razmenjuje sve poruke sa okolinom, bilo komunikacione ili detekcione.



Slika 14. Programska podrška bežičnog čvora - pametne utičnice i prekidača za osvetljenje: RSSI jedinica za obradu je dodatno realizovan blok programske podrške neophodan za realizaciju postupaka RF detekcije ljudi.

S obzirom da se OBLO infrastruktura uklapa u očekivani trend rasta tržišta tehnologija pametnih kuća, moguća komercijalna eksploatacija se ogleda kroz realizaciju zajedničkih projekata i prodaju licenci za korišćenje specifičnih rešenja OBLO sistema. Na tržište je moguće izaći sa nekoliko mogućnosti: (1) licence za korisničke pakete posredstvom telekomunikacionih kompanija ili distributera električne energije, (2) zajednički projekti sa vodećim kompanijama uz prodaju patentnih licenci na korišćenje delova sistema, (3) nezavisni plasman OBLO sistema krajnjim korisnicima, s obzirom da je OBLO sistem potpuno autonoman i može se eksploatirati nezavisno od SMART GRID mreže ili telekomunikacionog operatera. Posredstvom potencijalnih poslovnih partnera, konkretno postojećih telekomunikacionih operatera i kompanija za distribuciju električne energije u zemlji ili inostranstvu, moguće je realizovati posebne korisničke pakete koji će obuhvatiti licenciranu prodaju OBLO platforme. Uz integraciju OBLO sistema sa postupcima RF detekcije ljudi, obezbediće se značajna funkcionalnost koja će proširiti osnovnu namenu OBLO platforme na viši nivo Ambijentalne Inteligencije.

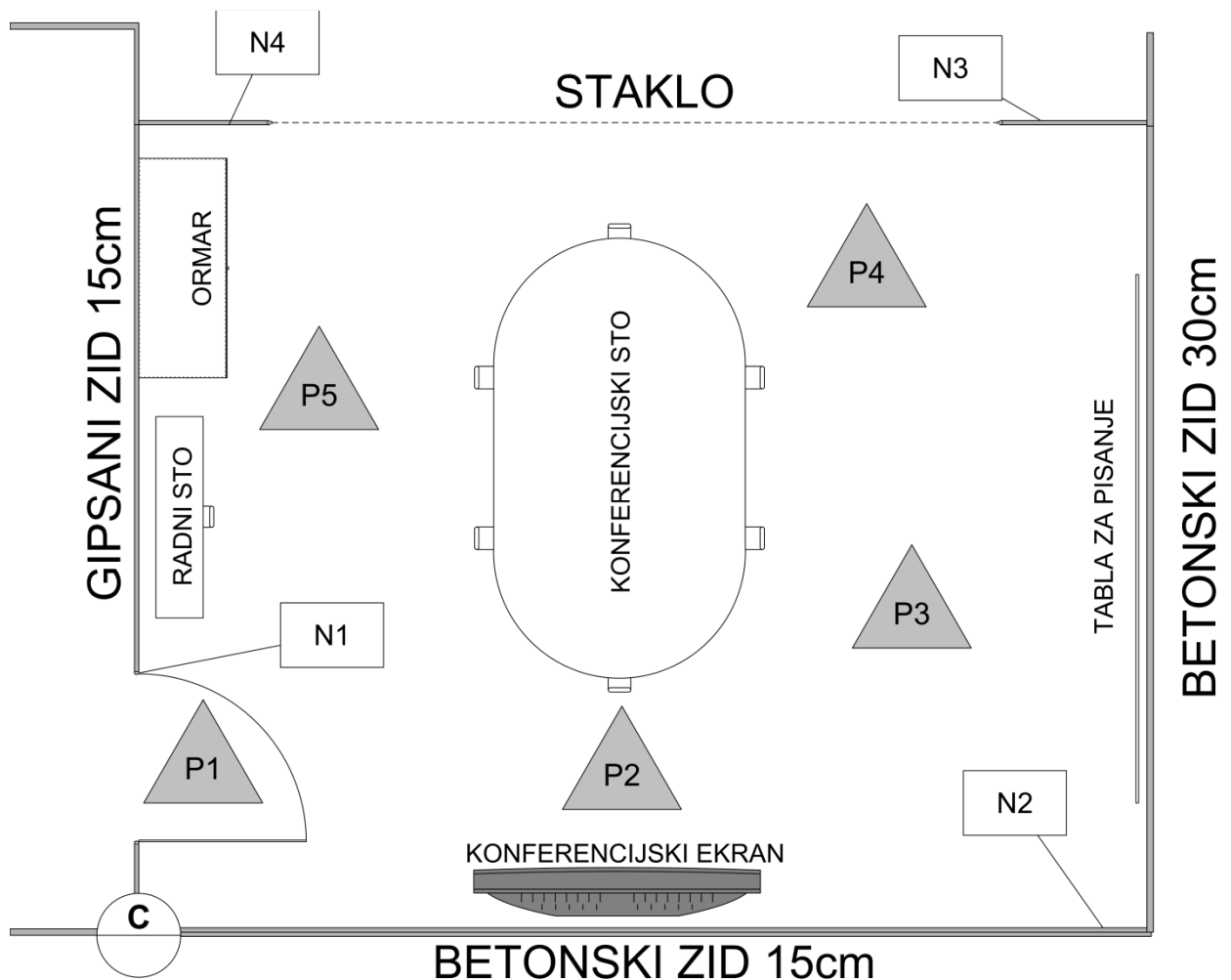
3.2 REZULTATI ISPITIVANJA

Tehnička ispravnost opisanih postupaka RF detekcije prisustva i kretanja ljudi je verifikovana u realnim uslovima, primenom u okviru OBLO sistema. Ispitivanja su imala za cilj da potvrde mogućnosti ispravne RF detekcije prisustva i kretanja ljudi u pojedinačnim prostorijama, kao i jasno razdvajanje prisustva ljudi od elemenata nameštaja na osnovu karakterističnih radio slika koje RSSI odbirci formiraju u zavisnosti od stanja ambijenta.

Opisani postupci RF detekcije su verifikovani u po jednoj, nasumično izabranoj prostoriji u okviru dva poslovna objekta i jednom stambenom objektu, različitog unutrašnjeg prostornog uređenja, različite debljine spoljnih i pregradnih zidova, kao i različitih građevinskih materijala od kojih su objekti sazidani. Prvi poslovni objekat je petospratna zgrada, sedište instituta RT-RK u ulici Narodnog fronta 23a, u Novom Sadu. Za potrebe eksperimentalne verifikacije u okviru navedene zgrade izabrana je prostorija koja predstavlja manju konferencijsku salu, u nastavku označena kao *Z1*. Prostorija *Z1* je pregradnim zidovima odvojena od susednih kancelarija i hodnika. Zgrada je popunjena zaposlenima, što znači da su svakodnevno prisutni uticaji prisustva i kretanja ljudi po različitim prostorijama i spratovima na radio talase koji se analiziraju u *Z1* za potrebe RF detekcije. Takođe, prisutan je veći broj različitih bežičnih protokola koji se svakodnevno koriste (*Bluetooth*, *ZigBee*, *Z-Wave*, *WiFi*, *GSM*,...), a koji uvode smetnje na radio talasima RF detekcije. Time su rezultati dobijeni u ovakvom okruženju znatno verodostojniji, te se njima u velikoj meri može potvrditi ili opovrgnuti ispravnost ispitivanog postupka.

Skica prostornog rasporeda *Z1* je predstavljena na slici 15. Spoljni zidovi se sastoje iz betonskih blokova debljine 30 cm, a unutrašnji pregradni zidovi su formirani od gipsanih ploča

debljine 1.5 cm, postavljenih na metalnu konstrukciju i izolovanih staklenom vunom, ukupne debljine zida oko 15 cm. Najveći deo zida ka ulici čini konstrukcija od stakla. Ukupna površina prostorije je približno 530×530 cm.



Slika 15. Skica prostornog rasporeda prostorije Z1, u kojoj je ispitivana ispravnost postupaka za RF detekciju prisustva i kretanja ljudi. Simboli N1 – N4 označavaju bežične čvorove RF detekcije, dok simboli P1 – P5 označavaju prostorne pozicije nepomične osobe.

U okviru prostorije Z1, montirana su četiri bežična čvora - tri pametne OBLO utičnice, na visini od 40 cm i jedan pametni OBLO prekidač za osvetljenje, na visini od 120 cm. Bežični čvorovi na slici 15 su označeni simbolima N1 – N4, dok simboli P1 – P5 označavaju prostorne pozicije u kojima je tokom ispitivanja prisutna osoba stajala nepomično. Rastojanje svakog bežičnog čvora, kao i svake od pozicija nepomične osobe, u odnosu na koordinatni centar prostorije ispitivanja (označen sa C u donjem levom uglu skice) dato je u tabeli 10. Ako je $C(x, y) = (0, 0)$ tada su i ostala rastojanja iz tabele 10, data kao uređeni parovi (x, y) koordinata, gde svaka koordinata predstavlja udaljenost od koordinatnog centra C, izraženo u cm.

Tabela 10. Prostorne koordinate bežičnih čvorova i pozicija nepomične osobe u odnosu na koordinatni centar prostorije ispitivanja ZI (dato u cm)

Naziv čvora	Koordinate čvora	Naziv pozicije	Koordinate pozicije
<i>N1</i>	(73, 211)	<i>P1</i>	(0, 78)
<i>N2</i>	(477, 54)	<i>P2</i>	(270, 75)
<i>N3</i>	(474, 428)	<i>P3</i>	(424, 254)
<i>N4</i>	(66, 519)	<i>P4</i>	(306, 420)
-	-	<i>P5</i>	(120, 255)

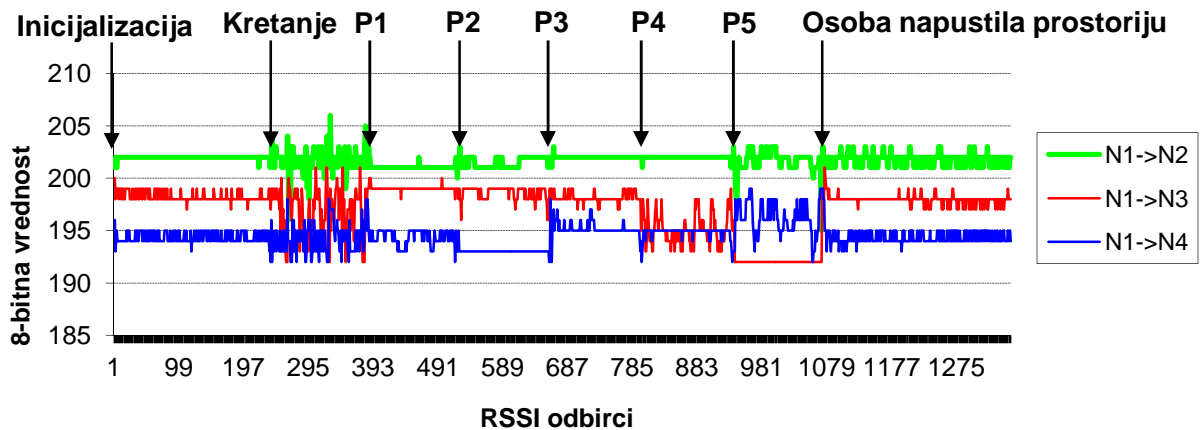
Za potrebe ispitivanja ispravnosti i upotrebljivosti opisanih postupaka RF detekcije, određen je scenario ponašanja osobe u okviru prostorije *ZI*. Po scenariju, inicijalnih jedan i po minut u prostoriji *ZI* nema prisutnih ljudi. Nakon perioda inicijalizacije, osoba uđe u prostoriju i nastavi da se neprekidno i nasumično kreće u trajanju od jedan minut. Nakon isteka perioda kretanja, osoba se zaustavi i miruje, bez i najmanjih pokreta, u svakoj od pozicija *P1* – *P5*, sa zadržavanjem po jedan minut u svakoj od navedenih pozicija. U poslednjoj fazi, osoba napušta prostoriju *ZI*, nastavljajući da se kreće sa druge strane pregradnog zida prostorije *ZI* uz gipsani i tanji betonski zid, dok se ponašanje radio talasa prati u trajanju od naredna dva minuta.

Prikupljene i neobrađene vrednosti indikatora primljene snage radio signala, dobavljene sa svake radio veze uspostavljene između bežičnih čvorova u okviru prostorije *ZI* tokom ispitnog scenarija prikazane su na slikama 16 i 17. Ukupan broj uspostavljenih radio veza je dvanaest (broj radio veza je jednak $(M-1) \times M$, gde M predstavlja broj bežičnih čvorova). Na osnovu prikazanih vrednosti RSSI može se intuitivno razgraničiti prisustvo osobe od stanja okruženja u kom nema prisutnih ljudi u prostoriji. Varijacije indikatora primljene snage radio signala su znatno izraženije kada se osoba kreće po prostoriji *ZI*, dok je tokom mirovanja izražena varijacija na onim radio vezama koje su najviše izložene uticaju apsorpcije, refleksije i difrakcije ljudskog tela na postojeće radio talase. Prilikom mirovanja osobe u eksperimentalnoj prostoriji *ZI*, vrednosti RSSI su dodatno podložne uticajima, kako spolja, tako i učestanosti odabiranja, stoga je neophodno definisati kompleksnije statističke modele koji će te uticaje potisnuti u najvećoj meri, obezbeđujući kvalitetnu detekciju.

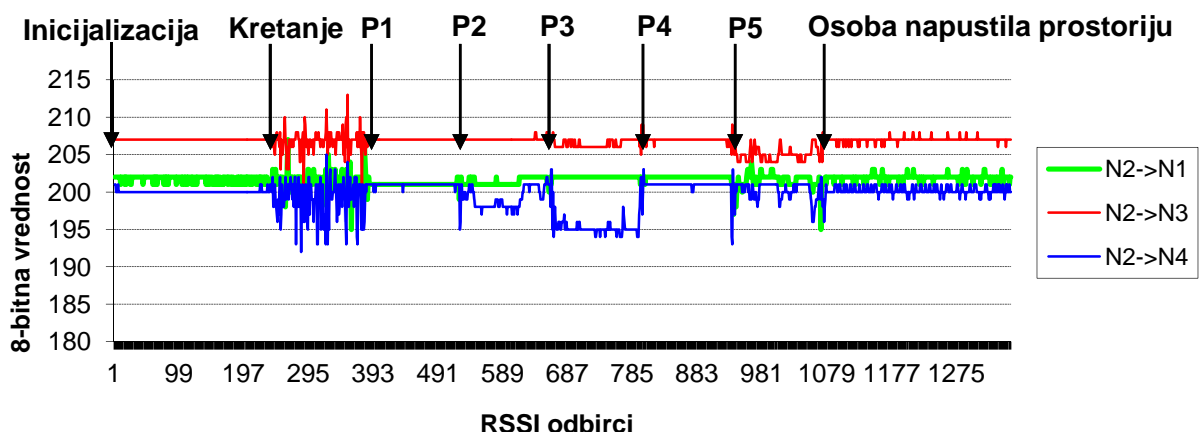
Prikupljene vrednosti RSSI su date u osmobaritnoj predstavi, u opsegu od 0 do 254, a u dBm se mogu prevesti izrazom (29). Na svakom pojedinačnom grafiku su predstavljeni odbirci RSSI dobavljeni sa radio veza, koje izabrani bežični čvor uspostavlja sa okolnim čvorovima. Sa grafika 16 se na osnovu eksperimenta može zaključiti da su u poziciji *P1* varijacije odbiraka

RSSI izražene uglavnom na radio vezi između čvorova $N1$ i $N4$, što se može objasniti refleksijom signala od ljudsko telo, koje se nalazi blizu čvorovima $N1$ i $N4$. U poziciji $P2$ čovek prekriva liniju prostiranja radio talasa između čvorova $N2$ i $N4$, apsorbujući većinu snage radio talasa, što dovodi do slabljenja intenziteta RSSI na radio vezama između ta dva čvora. Dodatno, prisustvo čoveka u poziciji $P2$ uvodi manje distorzije radio talasa na vezama između čvorova $N1$ i $N3$. Ljudsko telo ne prekriva radio veze između čvorova $N1$ i $N3$, kao u slučaju čvorova $N1$ i $N4$, ali blizina ljudskog tela reflektuje radio talase, uzrokujući time приметne varijacije RSSI. Prisustvo čoveka u poziciji $P3$ apsorbuje radio talase u okviru radio veza između čvorova $N2$ i $N4$, ali i reflektuje radio talase u okviru radio veza između čvorova $N3$ i $N4$, kao i $N1$ i $N4$. U poziciji $P4$ ljudsko telo apsorbuje radio talase između čvorova $N1$ i $N3$, dok u poziciji $P5$ dodatno reflektuje većinu radio talasa, izuzev radio talasa u okviru radio veza između čvorova $N3$ i $N4$, koji su znatno udaljeni od date pozicije.

Radio veze od N1

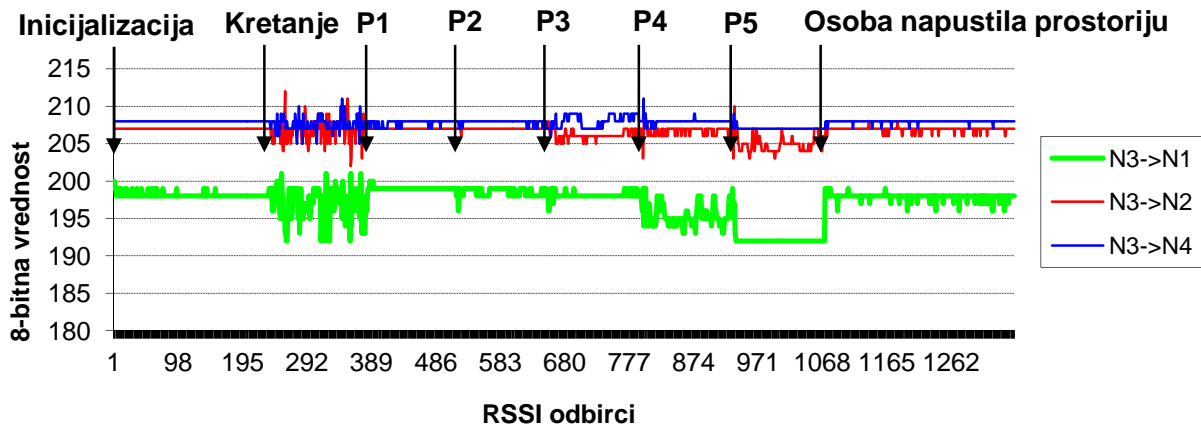


Radio veze od N2

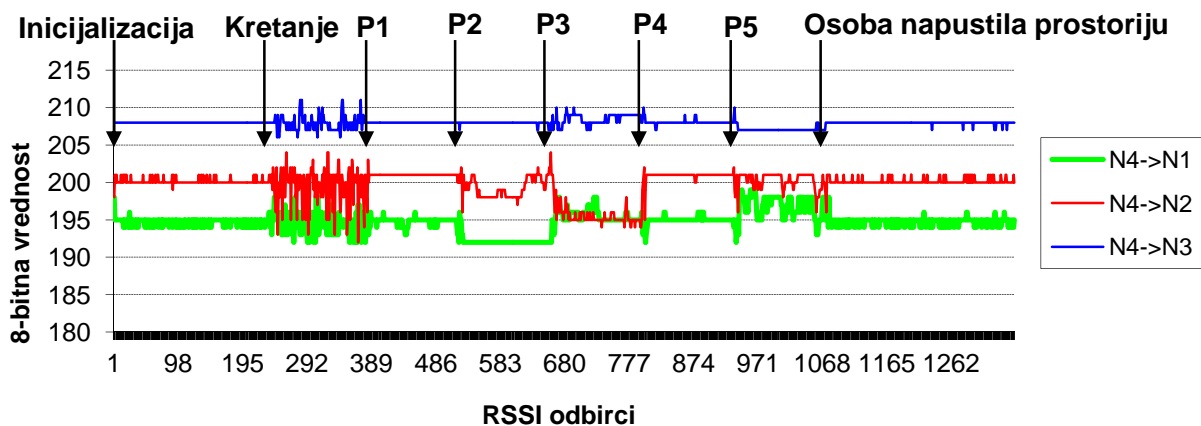


Slika 16. Dobavljene vrednosti RSSI tokom verifikacionog scenarija u prostoriji Z1 za radio veze između čvorova $N1$, $N2$ i susednih čvorova.

Radio veze od N3



Radio veze od N4



Slika 17. Dobavljene vrednosti RSSI tokom verifikacionog scenarija u prostoriji Z1 za radio veze između čvorova N3, N4 i susednih čvorova.

Vrednosti pragova Th_{\min} i Th_{\max} , koji definišu interval dozvoljene varijacije RSSI u odnosu na srednju vrednost, izračunati po izrazu (4), kao i standardna devijacija δ niza odbiraka RSSI, izračunata po izrazu (5), dati su u tabelama 11 i 12, za svaku radio vezu. Pragovi detekcije se računaju samo tokom perioda inicijalizacije, dok se u izvršnoj fazi pristigle vrednosti RSSI porede sa određenim gornjim i donjim granicama u cilju otkrivanja prisutnog čoveka. Vrednosti granica intervala dozvoljene varijacije RSSI se zaokružuju na najbližu celobrojnu vrednost.

Tabela 11. Pragovi odstupanja vrednosti RSSI u okviru intervala dozvoljene varijacije i standardna devijacija, izračunati tokom inicijalizacije za radio veze od čvorova $N1$ i $N2$ u prostoriji $Z1$.

Radio veza	$N1 \rightarrow N2$	$N1 \rightarrow N3$	$N1 \rightarrow N4$	$N2 \rightarrow N1$	$N2 \rightarrow N3$	$N2 \rightarrow N4$
Th_{\min}	0.49%	0.62%	0.71%	0.36%	0%	0.02%
Donja granica	201	197	193	201	207	200
Th_{\max}	0.006%	0.39%	0.32%	0.14%	0%	0.48%
Gornja granica	202	199	195	202	207	201
δ	0.11	0.45	0.51	0.45	0	0.18

Tabela 12. Pragovi odstupanja vrednosti RSSI u okviru intervala dovoljene varijacije i standardna devijacija, izračunati tokom inicijalizacije za radio veze od čvorova $N3$ i $N4$ u prostoriji $Z1$.

Radio veza	$N3 \rightarrow N1$	$N3 \rightarrow N2$	$N3 \rightarrow N4$	$N4 \rightarrow N1$	$N4 \rightarrow N2$	$N4 \rightarrow N3$
Th_{\min}	0.05%	0%	0%	0.39%	0.57%	0%
Donja granica	198	207	208	194	199	208
Th_{\max}	0.46%	0%	0%	0.64%	0.43%	0%
Gornja granica	199	207	208	196	201	208
δ	0.29	0	0	0.45	0.35	0

U izvršnoj fazi, svi odbirci RSSI, čije vrednosti prevazilaze gornju ili donju granicu intervala određuju prisustvo čoveka. Ukoliko su vrednosti odbiraka RSSI u okviru granica intervala, u prostoriji $Z1$ nema prisutnih ljudi. Međutim, niska učestanost odabiranja vrednosti

RSSI od 2.5 Hz dovodi do toga da neki odbirci RSSI imaju neodgovarajuće vrednosti koje se nalaze unutar intervala dozvoljene varijacije RSSI, iako je čovek prisutan u prostoriji. U tabelama 13 i 14, predstavljena je greška detekcije, koja se računa kao odnos ukupnog broja odbiraka RSSI i broja odbiraka koji se nalaze u okviru intervala dozvoljene varijacije, određujući odsustvo osobe iz prostorije, iako je osoba bila prisutna i kretala se po prostoriji, ili je stajala nepomično u nekoj od pozicija $P1 - P5$. Na osnovu tabela se može zaključiti da je najveća greška detekcije bila prisutna prilikom nepomičnog prisustva osobe u poziciji $P1$, koja je locirana na samom ulazu u prostoriju i najmanje je od svih ostalih navedenih pozicija uticala na radio talase u prostoriji. U ostalim pozicijama, a posebno u $P5$ greška detekcije je bila znatno niža. Kretanje čoveka po prostoriji $Z1$ je značajnije intenziviralo varijaciju vrednosti odbiraka RSSI, te standardna devijacija na radio vezi $N1 \rightarrow N3$ iznosi 2.34, a na istoj toj radio vezi tokom nepomičnog pozicioniranja osobe u $P2$ iznosi 0.46, dok u poziciji $P1$ iznosi 0.34. Pozicija mirovanja koja je uvela značajnije varijacije vrednosti odbiraka RSSI jeste $P5$, što se može videti i sa slike 17, te standardna devijacija za primer radio veze $N1 \rightarrow N4$ u toj poziciji iznosi 1.48. Bez obzira što se za određeno merenje, odnosno poziciju, intenzivira vrednost devijacije snage signala, učestanost odabiranja je takva da u datom trenutku mogu biti dobavljene različite vrednosti odbiraka RSSI, a u najvećem slučaju i one koje uvećavaju grešku detekcije.

Tabela 13. Greška detekcije kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (kretanju ili poziciji) u odnosu na broj odbiraka čije vrednosti pripadaju intervalu dozvoljene varijacije RSSI za čvorove $N1$ i $N2$ u prostoriji $Z1$.

Radio veza	$N1 \rightarrow N2$	$N1 \rightarrow N3$	$N1 \rightarrow N4$	$N2 \rightarrow N1$	$N2 \rightarrow N3$	$N2 \rightarrow N4$
Greška kretanje	76.77%	56.77%	72.26%	78.72%	47.52%	34.75%
Greška - $P1$	100%	99.2%	99.2%	98.59%	99.3%	100%
Greška - $P2$	98.6%	97.2%	98.6%	99.3%	94.37%	35.21%
Greška - $P3$	99.26%	100%	80.74%	100%	40.46%	0%
Greška - $P4$	99.3%	17.93%	98.62%	100%	94.2%	97.83%
Greška - $P5$	79.1%	0.75%	26.87%	85.31%	11.89%	69.23%

Tabela 14. Greška detekcije kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (kretanju ili poziciji) u odnosu na broj odbiraka čije vrednosti pripadaju intervalu dozvoljene varijacije RSSI za čvorove $N3$ i $N4$ u prostoriji $Z1$.

Radio veza	$N3 \rightarrow N1$	$N3 \rightarrow N2$	$N3 \rightarrow N4$	$N4 \rightarrow N1$	$N4 \rightarrow N2$	$N4 \rightarrow N3$
Greška kretanje	50.32%	47.13%	36.3%	59.6%	58.28%	43.71%
Greška - P1	100%	100%	81.03%	96.32%	99.26%	99.27%
Greška - P2	96.86%	94.97%	87.42%	2.16%	56.83%	94.25%
Greška - P3	97.08%	18.25%	35.04%	92.1%	3.6%	38.85%
Greška - P4	12.78%	64.67%	91.73%	99.3%	98.52%	94.07%
Greška - P5	0%	9.63%	2.22%	36.88%	92.2%	8.51%

Upravo zbog analize varijacije odbiraka RSSI na svakoj radio vezi nezavisno, u zavisnosti od učestanosti odabiranja, određene pozicije prisutne nepomične osobe mogu ostati neopažene. Prednost ovakvog postupka jeste u činjenici da je dovoljno da odbirci prevaziđu granice intervala najmanje na jednoj radio vezi, da bi bilo otkriveno prisustvo čoveka. Međutim, učestanost odabiranja je osnovni nedostatak. Što je veća učestanost, to je veće opterećenje obrade podataka, ali i veće opterećenje mrežnog saobraćaja, što rezultuje sporijim odzivom sistema, pa čak i značajnijim gubitkom mrežnih transportnih paketa. Ovakav postupak stoga ne može da bude primenljiv za realne sisteme Ambijentalne Inteligencije, ali se kao kompromis niskoj učestanosti može uvesti zbirna obrada vrednosti odbiraka RSSI, čime se koristi snaga većine radio veza za potiskivanje nedostataka niske učestanosti odabiranja, ali i spoljnih uticaja.

Postupak upotrebe intervala dozvoljene varijacije odbiraka RSSI ukazuje na dodatni nedostatak koji se javlja u slučaju kada u prostoriji $Z1$ nema prisutnih ljudi, ali se osoba kreće sa druge strane nekog od pregradnih zidova prostorije od interesa. Radio talasi se nesmetano prostiru kroz zidove, sa prisustvom zanemarljive atenuacije snage radio signala, ali su izloženi uticaju prisustva i kretanja ljudi iz susednih prostorija. U slučaju opisanog eksperimenta, nakon što osoba napusti prostoriju $Z1$ i nastavi da se kreće sa druge strane pregradnih zidova prostorije, takođe se javljaju varijacije odbiraka RSSI, koje prevazilaze granice intervala slobodne varijacije RSSI i uvode grešku detekcije odsustva.

Tabela 15. Greška odsustva kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (prostorija Z1 bez prisustva) u odnosu na broj odbiraka RSSI čije vrednosti prevazilaze interval dozvoljene varijacije RSSI za čvorove N1 i N2.

Radio veza	$N1 \rightarrow N2$	$N1 \rightarrow N3$	$N1 \rightarrow N4$	$N2 \rightarrow N1$	$N2 \rightarrow N3$	$N2 \rightarrow N4$
Greška odsustva	6.01%	0.71%	0.35%	4.64%	9.23%	5%

Tabela 16. Greška odsustva kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (prostorija Z1 bez prisustva) u odnosu na broj odbiraka RSSI čije vrednosti prevazilaze interval dozvoljene varijacije RSSI za čvorove N3 i N4.

Radio veza	$N3 \rightarrow N1$	$N3 \rightarrow N2$	$N3 \rightarrow N4$	$N4 \rightarrow N1$	$N4 \rightarrow N2$	$N4 \rightarrow N3$
Greška odsustva	8.74%	9.79%	3.85%	0%	0%	2.5%

Greška odsustva je znatno niža od greške detekcije, međutim njeno prisustvo takođe uvodi pojavu lažnih alarma detekcije što je neprihvatljivo sa stanovišta ispravnosti rada jednog sistema Ambijentalne Inteligencije. Međutim, zaključci koje je moguće izvesti na osnovu neregularnosti prostiranja radio talasa tokom eksperimenta u prostoriji Z1 mogu se upotrebiti za verifikaciju hipoteze da je upotrebom radio talasa moguće detektovati prisustvo čoveka:

- Vrednosti odbiraka RSSI u okviru radio veze u čijoj okolini nije prisutan čovek, variraju neznatno ili imaju konstantne vrednosti (što se može videti tokom perioda inicijalizacije).
- Ukoliko se čovek nalazi blizu bežičnog čvora, bez da prekriva liniju prostiranja radio talasa ka ostalim čvorovima, dolazi do pojave intenzivnih varijacija vrednosti odbiraka RSSI, što se objašnjava refleksijom radio talasa od ljudsko telo.
- Ukoliko čovek svojim telom zaklanja liniju prostiranja radio talasa između bežičnih čvorova, vrednosti odbiraka RSSI ne variraju intenzivno kao u prethodnom slučaju, ali imaju znatno niže vrednosti nego tokom faze inicijalizacije, što se objašnjava apsorpcijom i atenuacijom snage radio talasa usled prisustva ljudskog tela.

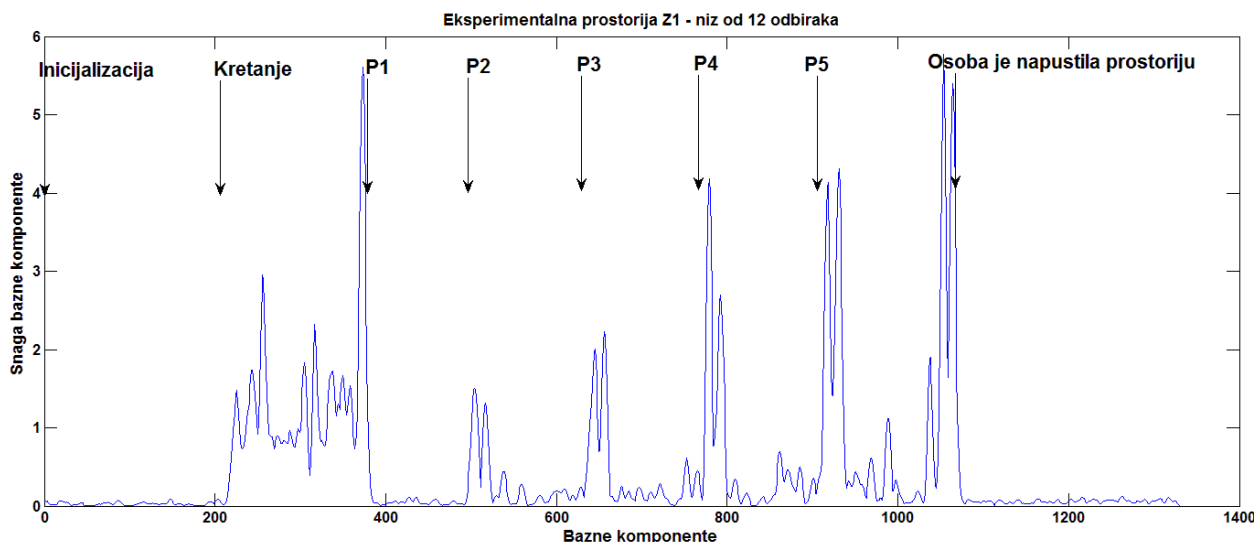
Usled navedenih nedostataka verifikovanog postupka pristupa se zbirnoj analizi svih radio talasa u okviru prostorije od interesa, time što se uvodi primena postupka analize baznih komponenti (PCA) odbiraka RSSI sa svih radio veza u okviru ispitne prostorije Z1. Pored

spoljnih uticaja, upotrebom baznih komponenti se minimizuje greška koja se javlja usled niske učestanosti odabiranja. Bazne komponente se mogu odrediti na dva načina: (1) izračunavanjem korena karakterističnog polinoma kovarijacione matrice, što je u zavisnosti od dimenzionalnosti matrice računski, a time i vremenski izuzetno zahtevno, ili (2) upotrebom inkrementalnog postupka za računanje baznih komponenti bez upotrebe kovarijacione matrice (*CCIPCA*).

Algoritam PCA obrade prikupljenih odbiraka zahteva formiranje kovarijacione matrice C_X koja analizira postojeće korelacije između svih parova uspostavljenih radio veza. Kovarijaciona matrica se formira po izrazu (15), transformacijom matrice X generisane od dobavljenih odbiraka RSSI sa svih uspostavljenih radio veza između bežičnih čvorova u prostoriji ZI tokom više ciklusa prozivke čvorova. Generisanje matrice X je opisano izrazom (12). S obzirom da vreme transformacije, a potom i izračunavanja korena karakterističnog polinoma kovarijacione matrice raste sa dimenzionalnošću matrice X , ispitivanja su obavljena upotrebom $p = 12, 24$ i 36 ciklusa, datih kroz niz odbiraka u svakoj koloni matrice, tako da se matrica X sastoji od $p \times 12$ odbiraka RSSI, gde je 12 konstantan broj radio veza u prostoriji ZI . S obzirom da je broj čvorova koji definiše broj kolona matrice X konstantan, broj ciklusa (vrsta) p matrice X određuje kvalitet algoritma detekcije, ali i vreme odziva, odnosno vreme izračunavanja baznih komponenti. Prvih p ciklusa prozivke čvorova tokom perioda inicijalizacije se koristi za izračunavanje inicijalnog niza baznih komponenti. Nakon svakog narednog ciklusa prozivke, na kraj prethodno popunjene matrice X dodaje se novopristigla vrsta od 12 odbiraka RSSI sa svake radio veze, a izračunavanje baznih komponenti se pomera za jednu vrstu ka dnu matrice X . Na taj način se formira klizni prozor od jedne vrste nad matricom X , nad kojim se izračunavaju bazne komponente upotrebom $(p-1)$ vrsta iz prethodnih ciklusa i jedne novopristigle vrste odbiraka RSSI tekućeg ciklusa. Nakon izračunavanja inicijalnog niza baznih komponenti, u daljem izračunavanju od interesa je samo bazna komponenta koja odgovara tekućem ciklusu prozivke.

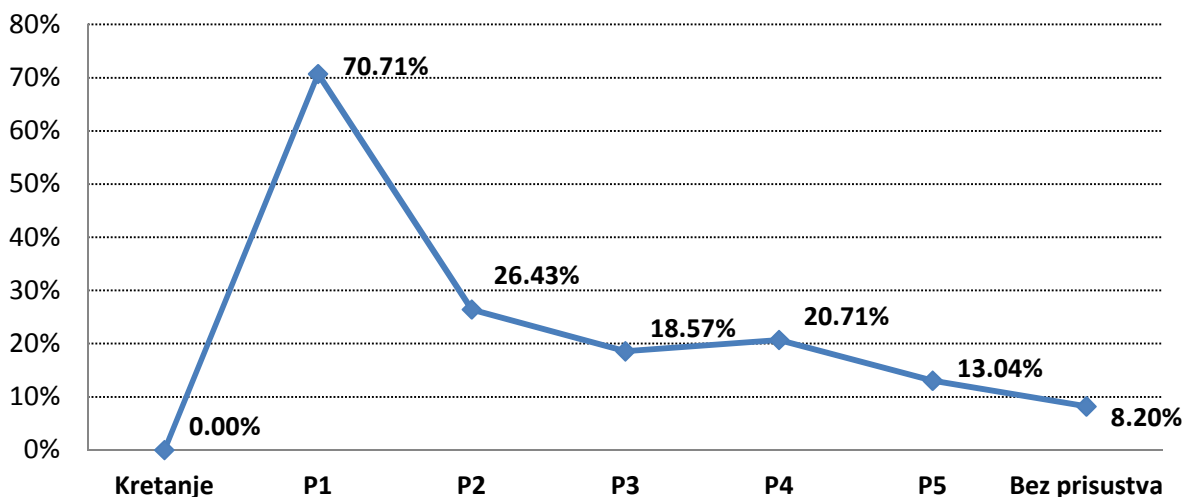
Kao i u postupku detekcije ljudi na osnovu analize odstupanja vrednosti odbiraka RSSI od intervala dozvoljene varijacije RSSI i analiza baznih komponenti zahteva postavljanje granične vrednosti tokom perioda inicijalizacije. Sve izračunate bazne komponente tokom perioda inicijalizacije se porede i ona sa najvećom snagom određuje granicu detekcije. Sve izračunate bazne komponente čije su vrednosti manje od granične vrednosti, određuju prostoriju u kojoj nema prisustva ljudi, a sve one čije su vrednosti veće određuju prisustvo čoveka u prostoriji. Analiza baznih komponenti odbiraka RSSI u cilju RF detekcije ljudi omogućuje upotrebu jedne granične vrednosti, što je prednost u odnosu na određivanje intervala varijacije koji dozvoljava dvosmernu varijaciju odbiraka RSSI. Vrednosti baznih komponenti, izračunatih tokom verifikacionog eksperimenta u prostoriji ZI su predstavljene na slikama 18, 20 i 22, za dužinu intervala $p = 12, 24$ i 36 odbiraka, respektivno. Uz bazne komponente, predstavljene su i greške

detekcije na slikama 19, 21 i 23 za dužine intervala od 12, 24 i 36 odbiraka kliznog prozora matrice X . Greška detekcije je data kao odnos ukupnog broja baznih komponenti izračunatih tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije. U slučaju prisustva, sve vrednosti baznih komponenti koje su niže od granice uvode grešku detekcije, dok u slučaju odsustva ljudi iz prostorije $Z1$, sve vrednosti baznih komponenti koje su više od granice detekcije uvode grešku odsustva.



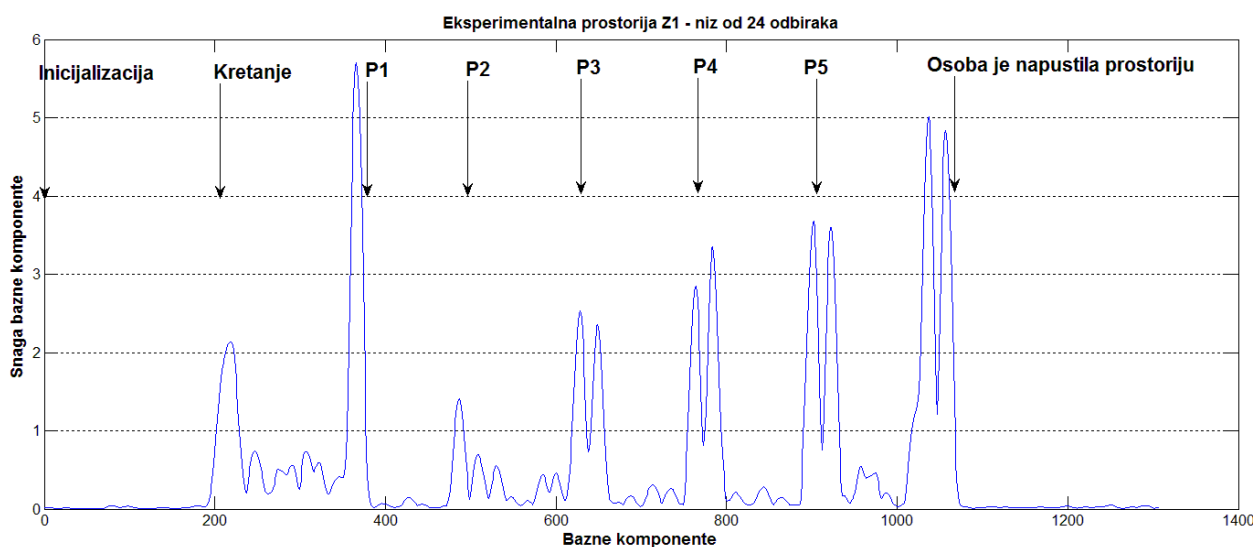
Slika 18. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji $Z1$, za dužinu niza od $p = 12$ odbiraka kliznog prozora matrice X .

Greška detekcije



Slika 19. Greška detekcije u $Z1$ za dužinu niza od $p = 12$ odbiraka kliznog prozora matrice X izračunata kao odnos ukupnog broja baznih komponenti tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.

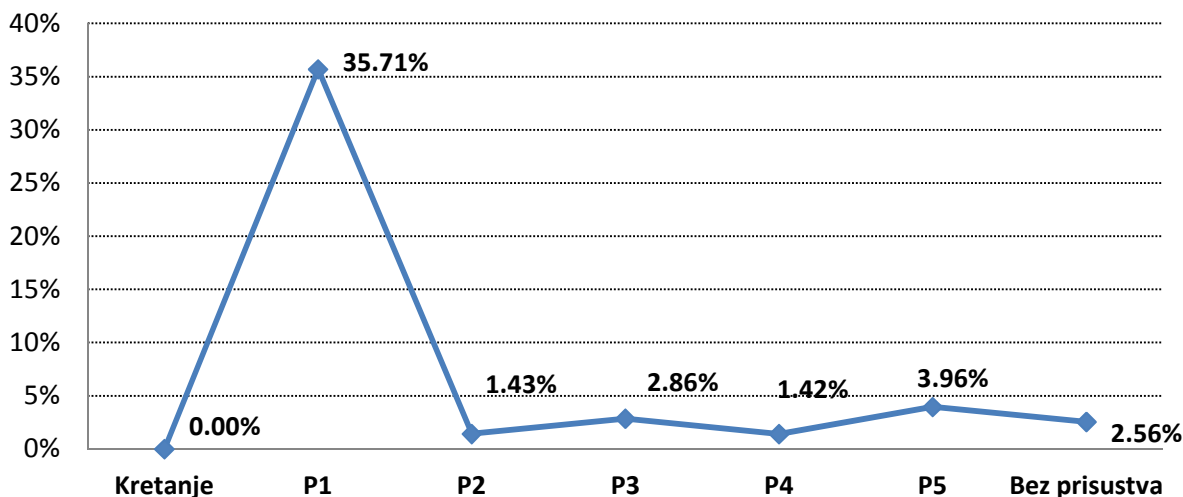
Na osnovu vrednosti baznih komponenti prikazanih na slici 18 i propagacije greške sa slike 19 može se zaključiti da pozicija $P1$ uvodi najveću grešku u proces RF detekcije, pošto je u toj poziciji čovek i najudaljeniji od postojećih radio talasa. Međutim, i u poziciji $P1$, ali i u ostalim pozicijama $P2 - P5$ greška detekcije je znatno niža nego analizom svake radio veze pojedinačno. Primetna pojava šiljaka na grafiku sa slike 18 tokom nepomičnog stajanja u pozicijama $P1$ do $P5$ je posledica tranzicije iz jedne pozicije u drugu, što dovodi do toga da se uvećava nekorelisanost radio talasa usled neravnomernog zasenčenja i slabljenja radio talasa od ljudsko telo. Kretanje se jasno može prepoznati sa greškom od 0%, ali u odnosu na postupak RF detekcije upotrebom intervala dozvoljene varijacije, greška odsustva se znatno umanjuje, pošto se umanjuje i uticaj čoveka sa druge strane zida prostorije $Z1$. Snaga većine radio talasa, koji nisu pobuđeni uticajem ljudskog tela, u velikoj meri umanjuje uticaje pojedinačnih radio talasa čiji je domet bliži pregradnim zidovima, rezultujući manjom greškom pri upotrebi zbirne obrade vrednosti odbiraka RSSI, nego u slučaju nezavisne obrade svake radio veze. Stoga se fokus obrade algoritma RF detekcije postavlja upravo na zbirnu, odnosno istovremenu obradu odbiraka RSSI sa svih uspostavljenih radio veza.



Slika 20. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji $Z1$, za dužinu niza od $p = 24$ odbirka kliznog prozora matrice X .

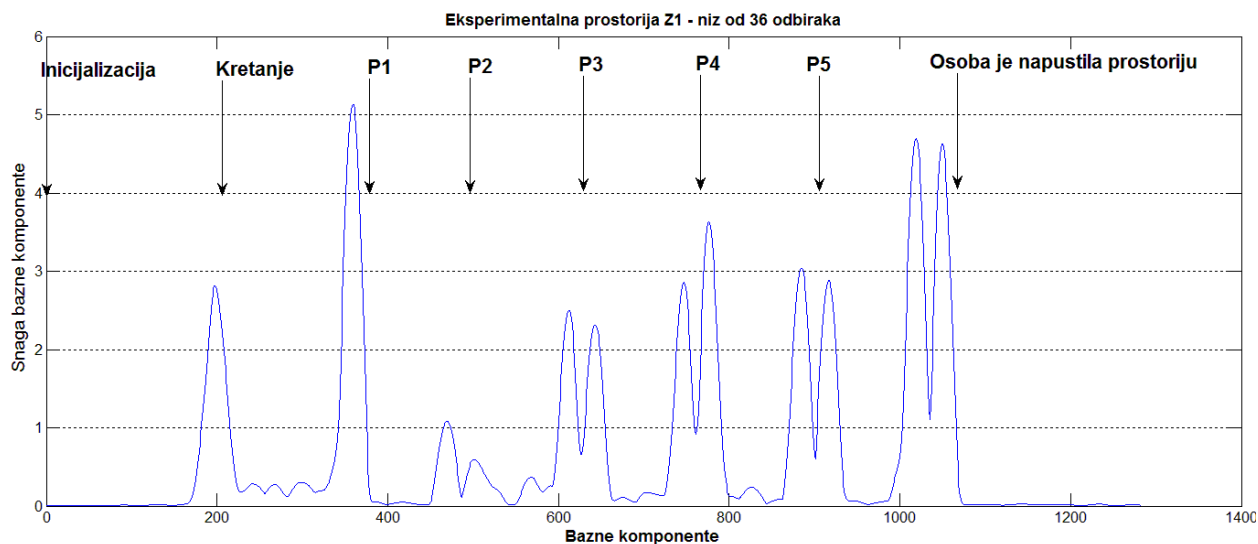
Bazne komponente, prikazane na slici 20, uz propagaciju greške sa slike 21 pokazuju znatno umanjene greške detekcije i odsustva za slučaj analize većeg broja ciklusa prozivke, u ovom slučaju za $p = 24$. Međutim, veći broj ciklusa formira matricu X veće dimenzionalnosti, te je izračunavanje baznih komponenti sporije, pa čak i neprihvatljivo sa aspekta odziva u realnom vremenu. Zbog sporijeg odziva dolazi do gomilanja odbiraka RSSI ukoliko je učestanost odabiranja 2.5 Hz, te je u ovom slučaju neophodno umanjiti učestanost prozivanja dva puta.

Greška detekcije



Slika 21. Greška detekcije u ZI za dužinu niza od $p = 24$ odbirka kliznog prozora matrice X izračunata kao odnos ukupnog broja baznih komponenti tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.

Izuzev u poziciji $P1$, procenat ispravnosti detekcije u ostalim pozicijama, uključujući i detekciju odsustva je preko 96% za $p = 24$, dok je procenat uspešnosti za $p = 36$ (slika 22) preko 99% (slika 23), ali je odziv sistema tri puta sporiji, pošto je učestanost odabiranja 0.83 Hz.

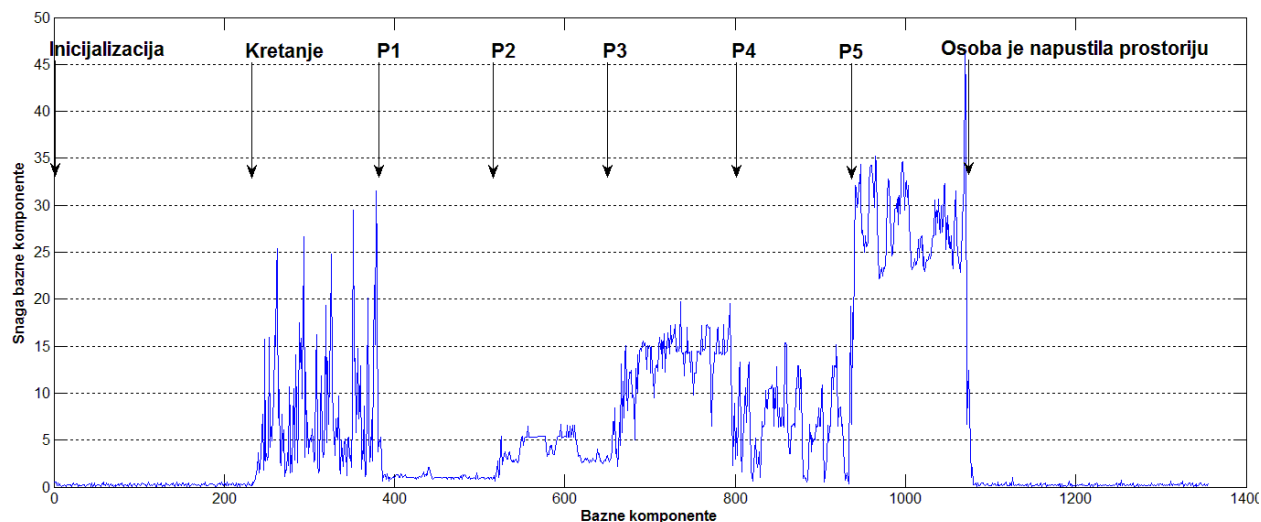


Slika 22. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji Z1, za dužinu niza od $p = 36$ odbiraka kliznog prozora matrice X .



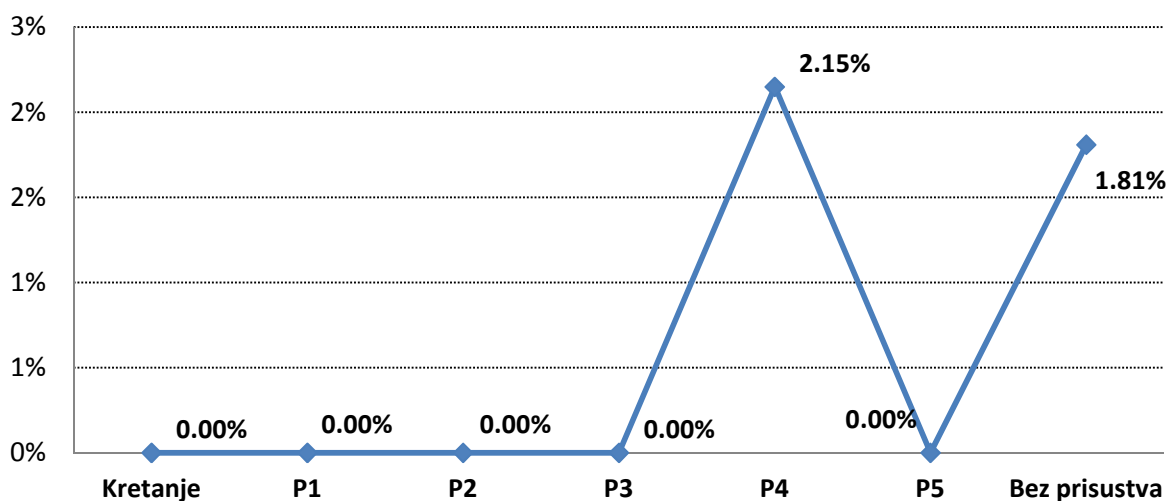
Slika 23. Greška detekcije u ZI za dužinu niza od $p = 36$ odbirka kliznog prozora matrice X izračunata kao odnos ukupnog broja baznih komponenti tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.

Sa aspekta upotrebe u realnom vremenu, algoritam za $p = 36$ je neupotrebljiv, pošto bi se za odluku sistema o prisustvu u okviru tekućeg ciklusa prozivke moralo čekati čak tri sekunde. Za $p = 12$, sistem obradi prikupljene odbirke RSSI za najviše 800 ms, a za $p = 24$ za najviše 1.5 s što je prihvatljivo ukoliko je broj prozivanih čvorova do četiri. Za više od četiri bežična čvora detekcije neophodno je uvećati učestanost odabiranja da bi sistem odgovorio za vreme prihvatljivo za krajnjeg korisnika, te je i izračunavanje baznih komponenti za $p = 24$ neupotrebljivo i 12 odbiraka intervala p dolazi u obzir, ali tada je prisutna veća greška detekcije, te je neophodno uvesti dodatno filtriranje. Dodatno filtriranje uvodi informacionu entropiju, odnosno izdvaja informacionu karakteristiku radio signala kojom se može odrediti prisustvo ljudi sa visokom tačnošću. Informaciona entropija dodatno potiskuje šum uzrokovan spoljnim uticajima. Ali pre uvođenja informacione entropije u proces odlučivanja, neophodno je ubrzati konvergenciju algoritma izračunavanja baznih komponenti zamenom PCA algoritma sa CCIPCA postupkom izdvajanja baznih komponenti bez transformacije u kovarijacionu matricu. Inkrementalni postupak izračunavanja baznih komponenti je u stanju da u jednom ciklusu izračuna bazne komponente na osnovu vrednosti prethodnog i tekućeg ciklusa za manje od 39 ms, što omogućuje širok spektar upotrebe različitih učestanosti odabiranja, posebno za veći broj bežičnih čvorova. Rezultat primene CCIPCA algoritma, pored brzine izvršavanja, jeste i znatno niža greška detekcije i greška odsustva, što se može videti sa slika 24 i 25. Granica detekcije je takođe izračunata tokom perioda inicijalizacije kao bazna komponenta najveće snage.



Slika 24. Bazne komponente izračunate za odбирke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji Z1 upotrebom CCIPCA inkrementalnog algoritma.

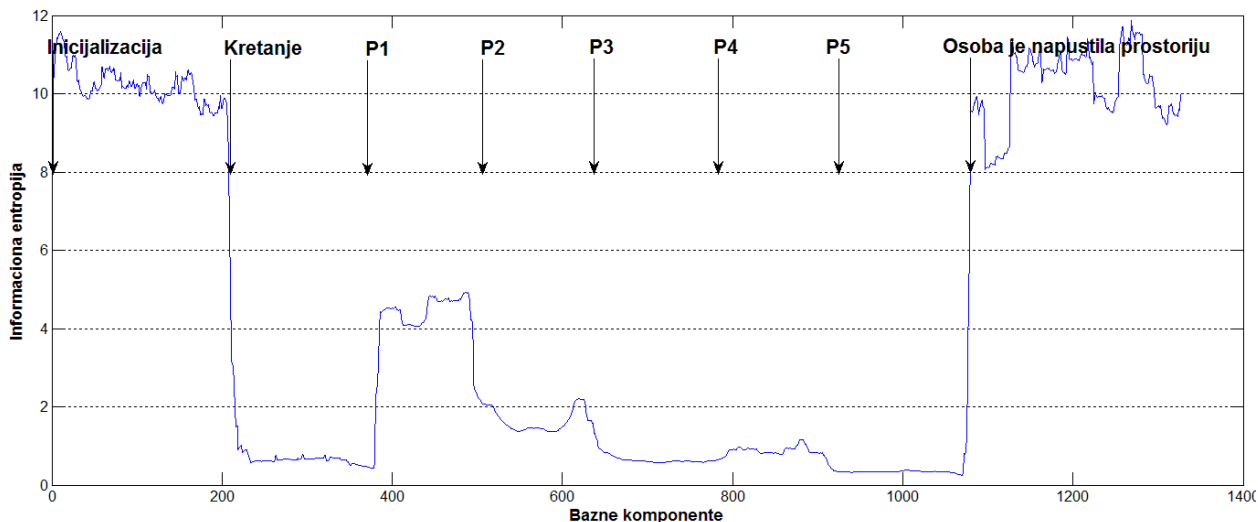
Greška detekcije



Slika 25. Greška detekcije u Z1 analizom baznih komponenti izračunatih primenom CCIPCA postupka, data kao odnos ukupnog broja baznih komponenti izračunatih tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.

Primena inkrementalnog postupka na isti skup odбирaka RSSI umanjila je greške u većini pozicija na 0%, kao i grešku odsustva na 1.81%. S ciljem potpunog uklanjanja grešaka detekcije i odsustva uvedena je transformacija baznih komponenti u informacijski domen predstavljena na slici 26. Informaciona entropija se primenjuje nad 10 izračunatih baznih komponenti, tako što se u svakom narednom ciklusu koristi devet vrednosti iz prethodnih ciklusa i jedna nova iz tekućeg

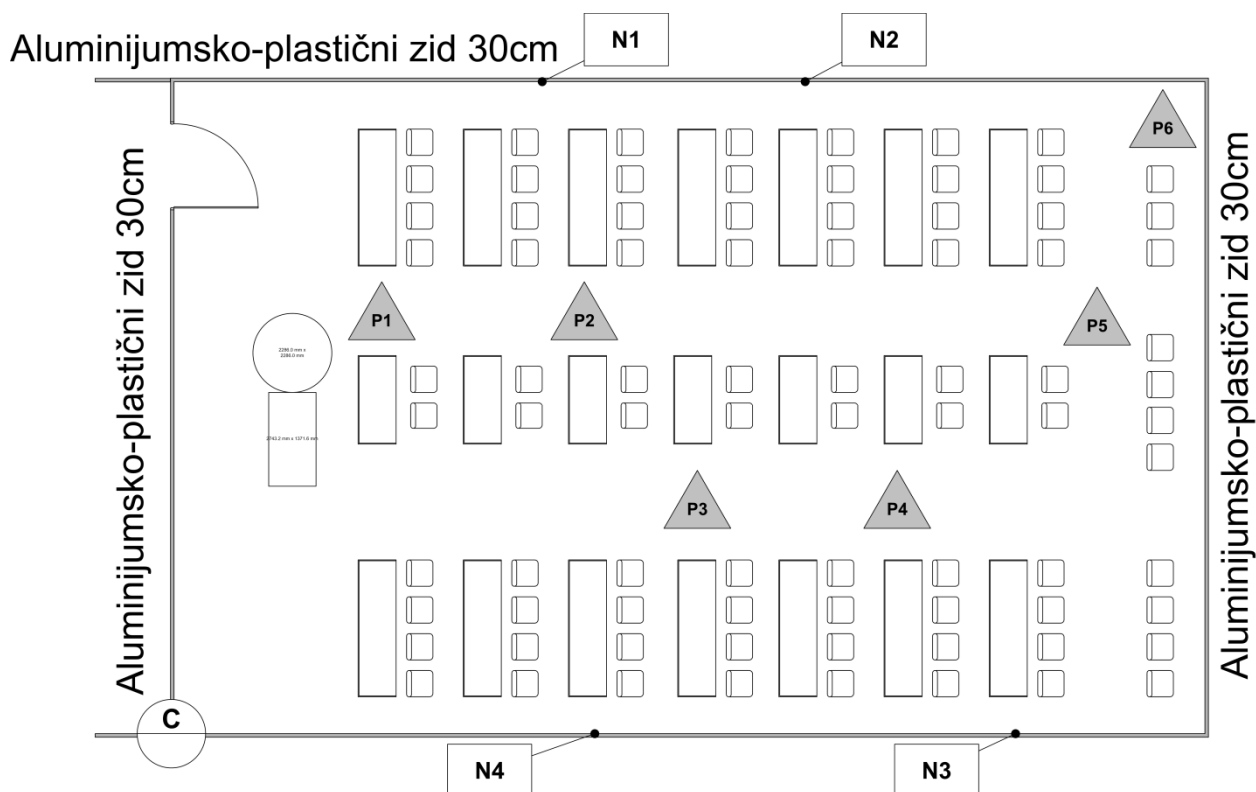
ciklusa. Vreme izračunavanja prve vrednosti informacione entropije je zanemarljivo, s obzirom da se izračunavanje vrši tokom faze inicijalizacije i nema značaja za krajnjeg korisnika. Vreme odziva sistema se povećava na najviše 52 ms za izračunavanje vrednosti entropije u svakom narednom ciklusu. Ako se za granicu detekcije uzme polovina najmanje vrednosti entropije tokom perioda inicijalizacije, greška detekcija u svim pozicijama je 0%, kao i greška odsustva. Na ovaj način se upotrebom entropije baznih komponenti u potpunosti uklanjaju spoljni šum i šum uzrokovan niskom učestanosti odabiranja.



Slika 26. Informaciona entropija baznih komponenti izračunata za odбирke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji Z1.

Dodatna verifikacija ispravnosti postupka RF detekcije ljudi je izvršena u prostoriji zgrade NIT, Instituta RT-RK, u Fruškogorskoj ulici 11a, u Novom Sadu. Ispitna prostorija, označena kao Z2, specifična je zbog same strukture zida koji predstavlja formu Faradejevog kaveza i narušava uobičajenu inicijalnu radio sliku ambijenta kakva se sreće u slučaju klasično građenih objekata. Za potrebe ispitivanja izabrana je veća prostorija, tačnije amfiteatar u okviru zgrade. Prostorni raspored bežičnih čvorova i pozicija nepomične osobe, kao i koordinate tih čvorova i pozicija u okviru prostorije Z2 dati su na slici 27 i u tabeli 17. Bežični čvorovi na slici 27 su označeni simbolima $N1 - N4$, dok simboli $P1 - P6$ označavaju prostorne pozicije u kojima je tokom ispitivanja prisutna osoba stajala nepomično. Pozicija $P6$ je sa razlogom izabrana da bude najudaljenija od bežičnih čvorova, da bi se proverio domet radio talasa RF detekcije.

U okviru prostorije Z2, takođe su montirana četiri bežična čvora - tri pametne OBLO utičnice, na visini od 40 cm i jedan pametni OBLO prekidač za osvetljenje, na visini od 120 cm. Rastojanje svakog čvora, kao i svake od pozicija nepomične osobe, u odnosu na koordinatni centar prostorije ispitivanja (označen sa C u donjem levom uglu skice) dato je u tabeli 17.



Slika 27. Skica prostornog rasporeda prostorije Z2, u kojoj je ispitivana ispravnost postupaka za RF detekciju prisustva i kretanja ljudi. Simboli $N1 - N4$ označavaju bežične čvorove RF detekcije, dok simboli $P1 - P6$ označavaju prostorne pozicije nepomične osobe.

Ako je $C(x, y) = (0, 0)$ tada su i ostala rastojanja iz tabele 17 data kao uređeni parovi (x, y) koordinata, gde svaka koordinata predstavlja udaljenost u cm od koordinatnog centra C .

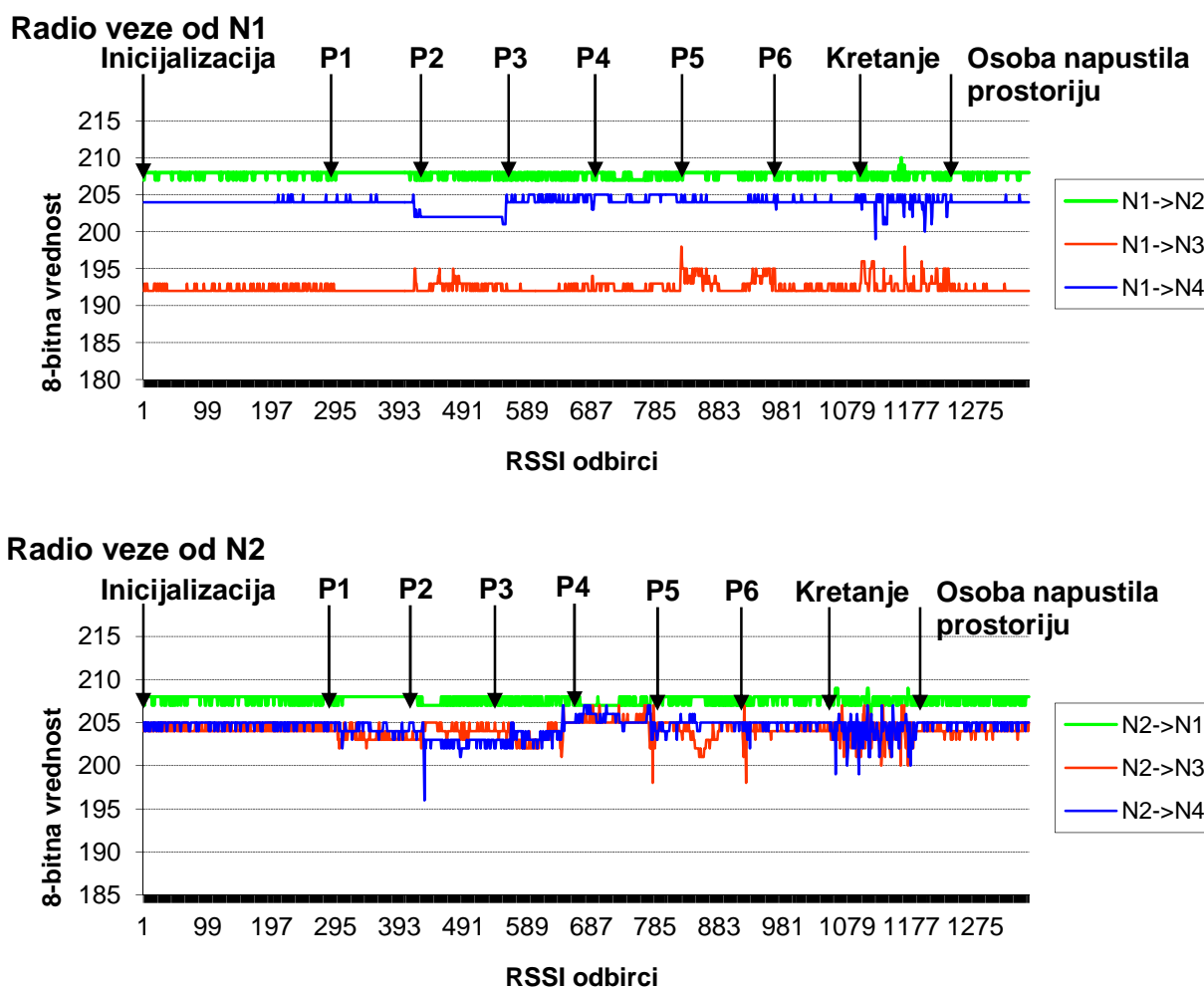
Tabela 17. Prostorne koordinate bežičnih čvorova i pozicija nepomične osobe u odnosu na koordinatni centar prostorije ispitivanja Z2 (dato u cm)

Naziv čvora	Koordinate čvora	Naziv pozicije	Koordinate pozicije
$N1$	(410,530)	$P1$	(220,305)
$N2$	(600,530)	$P2$	(410,305)
$N3$	(795,40)	$P3$	(500,150)
$N4$	(410,40)	$P4$	(690,150)
-	-	$P5$	(945,305)
-	-	$P6$	(955, 500)

Na osnovu ispitnog scenarija, inicijalnih dva minuta u prostoriji Z2 nema prisutnih ljudi i tokom tog perioda se određuju pragovi detekcije. Za razliku od prvog eksperimenta, gde su

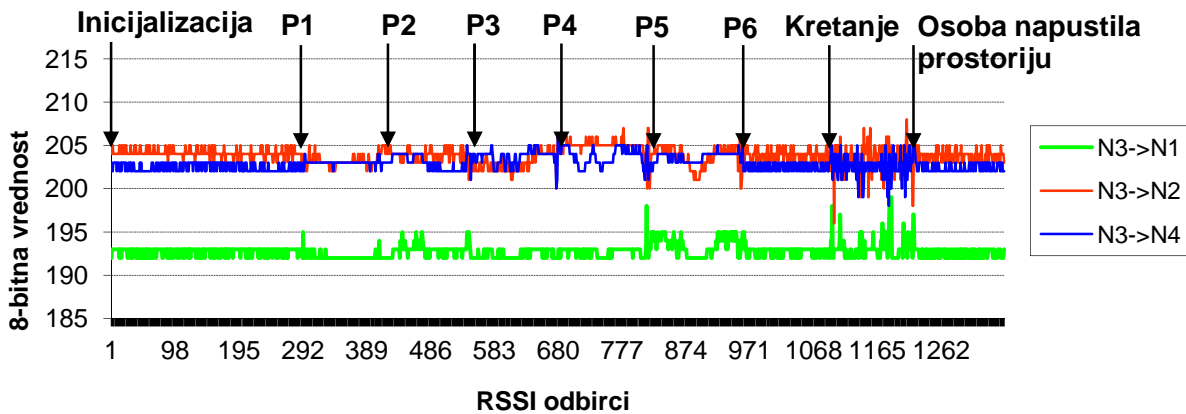
zidovi prostorije sa slike 15 bili izgrađeni od betonskih i gipsanih elemenata, u ovoj prostoriji zidovi su izgrađeni od kombinacije aluminijskih i plastičnih elemenata po formi industrijskog montažnog objekta. Eksperimentalni scenario je blago izmenjen u odnosu na prethodni. Kada uđe u prostoriju, osoba je nepomična u svakoj od pozicija $P1$ do $P6$, u trajanju od po jedan minut za svaku poziciju. Nakon isteka perioda mirovanja u definisanim pozicijama, osoba nastavlja da se neprekidno i nasumično kreće unutar prostorije, ukupno u trajanju od jedan minut i potom je napušta. Dalje ponašanje radio talasa se prati u trajanju od jedan minut nad prostorijom u kojoj nema prisutnih ljudi, ali se osoba kreće sa suprotne strane pregradnih zidova.

Prikupljene i neobrađene vrednosti indikatora primljene snage radio signala, dobavljene sa svake radio veze uspostavljene između bežičnih čvorova u okviru prostorije $Z2$ tokom ispitnog scenarija, prikazane su na slikama 28 i 29. Ukupan broj uspostavljenih radio veza je takođe dvanaest, odnosno $(M-1) \times M$, gde M predstavlja broj bežičnih čvorova.

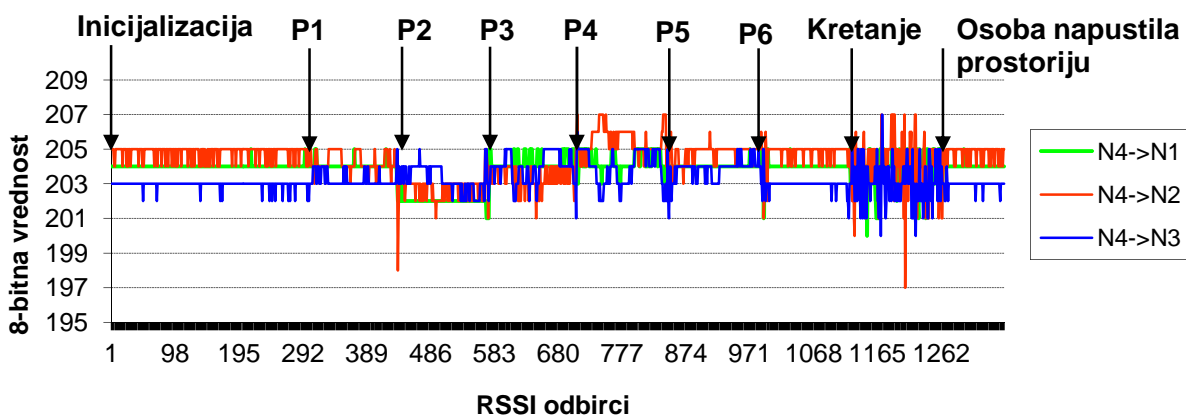


Slika 28. Dobavljene vrednosti RSSI tokom verifikacionog scenarija u prostoriji $Z2$ za radio veze između čvorova $N1$, $N2$ i susednih čvorova.

Radio veze od N3



Radio veze od N4



Slika 29. Dobavljene vrednosti RSSI tokom verifikacionog scenarija u prostoriji Z2 za radio veze između čvorova N3, N4 i susednih čvorova.

Na osnovu prikazanih vrednosti RSSI može se razgraničiti stanje okruženja u kom nema prisutnih ljudi, od prisustva osobe, a naročito osobe koja se kreće. Kao i u prethodnom eksperimentu, varijacije odbiraka RSSI su znatno izraženije kada se osoba kreće po prostoriji Z2, dok je tokom mirovanja izražena varijacija na onim radio vezama koje su najviše izložene uticaju apsorpcije, refleksije i difrakcije ljudskog tela na radio talase. U eksperimentalnoj prostoriji Z2, umanjen je uticaj spoljnog šuma koji potiče od objekata van prostorije od interesa, ali su radio talasi već inicijalno podložni uticajima refleksije od zidove prostorije Z2, naročito zbog same prirode konstrukcionih materijala. Pored uticaja prirode okruženja, odnosno prostorije Z2 na ispravnost RF detekcije, dodatne smetnje su uzrokovane niskom učestanosti odabiranja, stoga će identična analiza intervala dozvoljene varijacije odbiraka RSSI, kao i analiza baznih komponenti kombinovana sa informacionom entropijom biti primenjena u svrhu RF detekcije prisustva i kretanja ljudi tokom ovog ispitivanja.

Tokom eksperimenta u prostoriji *Z2* može se primetiti da već tokom perioda inicijalizacije odbirci RSSI imaju izraženiju varijaciju nego prilikom ogleda u prostoriji *Z1*, što je uslovljeno konstrukcionim materijalima zidova eksperimentalne prostorije. Tokom nepomičnog prisustva čoveka u poziciji *P1* primetne su manje varijacije odbiraka RSSI. U poziciji *P2* ljudsko telo je, zaklonivši radio veze između čvorova *N1* i *N4*, apsorbavalo većinu snage radio talasa navedene radio veze. Pozicija *P2* ima dodatnog, manjeg uticaja na radio veze između čvorova *N1* i *N3*, kao i *N2* i *N4*, time što prisutan čovek reflektuje radio talase uzrokujući manje izražene varijacije odbiraka RSSI. Tokom prisustva nepomične osobe u poziciji *P3* refleksija radio talasa između čvorova *N2* i *N4*, *N2* i *N3*, kao i *N3* i *N4* znatno utiče na pojavu varijacija odbiraka RSSI u oba smera radio veza između navedenih čvorova. Prisustvo ljudskog tela u poziciji *P4* uzrokuje snažnu refleksiju radio talasa između bežičnih čvorova *N2* i *N4*, kao i *N3* i *N4*. Istovremeno, radio talasi u okviru radio veza između čvorova *N2* i *N3* su u najvećoj meri apsorbirani od strane prisutnog, nepomičnog ljudskog tela u poziciji *P4*. Prisustvo nepomičnog ljudskog tela u poziciji *P5* uzrokuje izražene varijacije odbiraka RSSI na radio vezama između čvorova *N1* i *N3*. Naj snažniji uticaj prisustva čoveka u poziciji *P5* se primećuje u okviru radio veza između čvorova *N2* i *N3*. Kombinacija uticaja čoveka u poziciji *P5* sa inicijalnom refleksijom od postojeće građevinske materijale uzrokuje pojavu najizraženijih varijacija odbiraka RSSI tokom eksperimenta u pozicijama mirovanja. Posebno izabrana pozicija *P6* je najudaljenija tačka od svih bežičnih čvorova, te je korisna za utvrđivanje dometa radio talasa koji učestvuju u procesu RF detekcije. Kao što se može zaključiti na osnovu vrednosti odbiraka RSSI sa slika 28 i 29 ljudsko prisustvo u poziciji *P6* nije moguće ispravno odrediti upotrebom predloženih postupaka analize RSSI. Time se pozicija *P6* označava "nevidljivom" pozicijom za RF detekciju i smatra se da je van dometa radio talasa detekcije. Na samom kraju eksperimenta, čovek se neprekidno kreće kroz prostoriju *Z2* tokom jednog minuta, ali na način da njegovo kretanje bude bliže čvorovima *N2*, *N3* i *N4* i da ne zaklanja direktnu radio vezu između čvorova *N1* i *N2*. Nakon kretanja, čovek napušta prostoriju *Z2* i nastavlja da se kreće nasumično sa druge strane pregradnih zidova u trajanju od dodatnog minuta.

Vrednosti odstupanja od srednje vrednosti Th_{\min} i Th_{\max} , koji definišu interval dozvoljene varijacije RSSI u odnosu na srednju vrednost, izračunati po izrazu (4), kao i standardna devijacija δ niza odbiraka RSSI, izračunata po izrazu (5), dati su u tabelama 18 i 19, za svaku radio vezu u prostoriji od interesa *Z2*. Pragovi detekcije se takođe računaju samo tokom perioda inicijalizacije, dok se u izvršnoj fazi pristigle vrednosti RSSI porede sa određenim gornjim i donjim granicama u cilju otkrivanja prisustva čoveka. Vrednosti granica intervala dozvoljene varijacije RSSI se zaokružuju na najbližu celobrojnu osmobaritnu vrednost.

Tabela 18. Pragovi odstupanja vrednosti RSSI u okviru intervala dovoljene varijacije i standardna devijacija, izračunati tokom inicijalizacije za radio veze od čvorova $N1$ i $N2$ u eksperimentalnoj prostoriji $Z2$.

Radio veza	$N1 \rightarrow N2$	$N1 \rightarrow N3$	$N1 \rightarrow N4$	$N2 \rightarrow N1$	$N2 \rightarrow N3$	$N2 \rightarrow N4$
Th_{\min}	0.42%	0.11%	0.01%	0.39%	0.13%	0.39%
Donja granica	207	192	204	207	204	204
Th_{\max}	0.07%	0.41%	0.48%	0.1%	0.36%	0.1%
Gornja granica	208	193	205	208	205	205
δ	0.34	0.41	0.16	0.40	0.45	0.41

Tabela 19. Pragovi odstupanja vrednosti RSSI u okviru intervala dozvoljene varijacije i standardna devijacija, izračunati tokom inicijalizacije za radio veze od čvorova $N3$ i $N4$ u eksperimentalnoj prostoriji $Z2$.

Radio veza	$N3 \rightarrow N1$	$N3 \rightarrow N2$	$N3 \rightarrow N4$	$N4 \rightarrow N1$	$N4 \rightarrow N2$	$N4 \rightarrow N3$
Th_{\min}	0.38%	0.53%	0.23%	0.01%	0.87%	0.48%
Donja granica	192	203	202	204	203	202
Th_{\max}	0.14%	0.45%	0.26%	0.48%	0.11%	0.5%
Gornja granica	193	205	203	205	205	204
δ	0.44	0.51	0.5	0.12	0.44	0.28

U poređenju sa vrednostima pragova detekcije iz tabela 11 i 12, za eksperimentalnu prostoriju $Z1$, može se zaključiti da su odstupanja od srednje vrednosti Th_{\min} i Th_{\max} u prostoriji $Z2$ više nego u prostoriji $Z1$. U prostoriji $Z1$ odstupanje od 0% može se primetiti na čak četiri

radio veze, sa ukupnim prosekom odstupanja od 0.25% za donju granicu i 0.23% za gornju, dok je u prostoriji Z2 varijacija odbiraka RSSI izraženija i u proseku iznosi 0.33% za donju granicu i 0.29% za gornju granicu intervala dozvoljene varijacije odbiraka RSSI. Ova odstupanja su posledica izražene refleksije radio talasa o aluminijumsko-plastične zidove prostorije Z2.

Greška detekcije izračunata prilikom kretanja čoveka kroz prostoriju Z2, ili tokom nepomičnog stajanja u nekoj od pozicija $P1 - P6$ data je u tabelama 20 i 21. U poređenju sa vrednostima iz tabela 13 i 14, za greške detekcije tokom eksperimenta u prostoriji Z1 može se zaključiti da je greška detekcije znatno viša. Posebno je visoka greška detekcije u okviru radio veza između čvorova $N1$ i $N2$, gde je tokom mirovanja registrovana greška od 100%. Takođe se može uočiti da su pozicije $P2$ i $P5$ najuočljivije, odnosno imaju najmanju grešku detekcije.

Tabela 20. Greška detekcije kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (kretanju ili poziciji) u odnosu na broj odbiraka čije vrednosti pripadaju intervalu dozvoljene varijacije RSSI za čvorove $N1$ i $N2$ u prostoriji Z2.

Radio veza	$N1 \rightarrow N2$	$N1 \rightarrow N3$	$N1 \rightarrow N4$	$N2 \rightarrow N1$	$N2 \rightarrow N3$	$N2 \rightarrow N4$
Greška kretanje	96.23%	76.87%	83.58%	95.42%	42.75%	61.83%
Greška - $P1$	100%	100%	100%	100%	28.46%	93.07%
Greška - $P2$	100%	92.96%	0%	100%	90.29%	0%
Greška - $P3$	100%	100%	100%	100%	50.01%	49.88%
Greška - $P4$	100%	98.52%	98.49%	100%	70.43%	57.61%
Greška - $P5$	100%	58.9%	100%	100%	67.13%	90.91%
Greška - $P6$	100%	100%	99.24%	100%	93.33%	98.52%

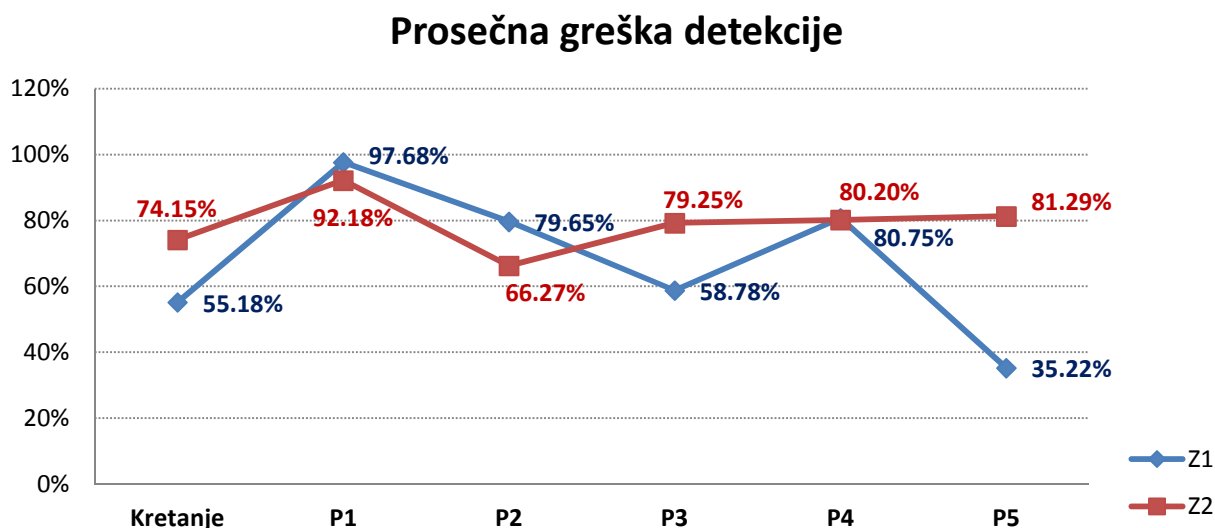
Greška detekcije tokom kretanja kroz prostoriju Z2 je viša nego tokom eksperimenta u prostoriji Z1, ali je prostorija Z2, pored toga što su zidovi izgrađeni od elemenata koji utiču na propagaciju radio talasa, skoro dva puta veće površine, te je za bolji kvalitet RF detekcije neophodno uvesti veći broj bežičnih čvorova. U prilog tome stoji činjenica da je greška detekcije nepomične osobe u poziciji $P6$ približno 99%, što znači da je skoro nemoguće detektovati

čoveka u toj poziciji sa opisanom postavkom sistema od četiri bežična čvora. Pozicija *P6* je najudaljenija od svih čvorova i najmanje utiče na propagaciju radio talasa trenutne postavke sistema. Rešenje je uvesti dodatne bežične čvorove i rasporediti ih po prostorijski na način da dometom radio talasa zahvate što je moguće više površine prostorijske *Z2*.

Tabela 21. Greška detekcije kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (kretanju ili poziciji) u odnosu na broj odbiraka čije vrednosti pripadaju intervalu dozvoljene varijacije RSSI za čvorove *N3* i *N4* u prostorijski *Z2*.

Radio veza	$N3 \rightarrow N1$	$N3 \rightarrow N2$	$N3 \rightarrow N4$	$N4 \rightarrow N1$	$N4 \rightarrow N2$	$N4 \rightarrow N3$
Greška kretanje	75.59%	69.29%	58.27%	78%	75.33%	76.67%
Greška - <i>P1</i>	98.54%	89.78%	97.81%	99.22%	100%	99.24%
Greška - <i>P2</i>	85.71%	98.32%	63.87%	0%	66.19%	97.84%
Greška - <i>P3</i>	100%	59.1%	28.79%	100%	90.98%	72.18%
Greška - <i>P4</i>	99.29%	87.32%	40.85%	95.04%	53.19%	61.7%
Greška - <i>P5</i>	47.59%	82.06%	38.62%	100%	97.9%	92.31%
Greška - <i>P6</i>	100%	99.22%	100%	97.67%	96.89%	99.23%

Na osnovu prethodna dva eksperimentalna scenarija u prostorijskim *Z1* i *Z2* potvrđeno je da se jednodimezionalna statistika ne može iskoristiti za realizaciju kvalitetnog i robustnog postupka RF detekcije ljudi, te se stoga pristupilo realizaciji postupka zbirne obrade svih radio veza. Prosečna greška detekcije prisustva i kretanja ljudi jednodimezionalnom statistikom, odnosno upotrebom intervala dozvoljene varijacije RSSI, za oba eksperimenta u *Z1* i *Z2* prikazana je na slici 30. Prosečna greška detekcije je izračunata kao srednja vrednost grešaka RF detekcije u okviru postojećih radio veza između bežičnih čvorova tokom kretanja ili nepomičnog prisustva čoveka u nekoj od pozicija *P1* – *P5*. Suviše visok stepen grešaka detekcije, čak i tokom kretanja, uslovljava potrebu za naprednijim statističkim modelom prostiranja radio talasa detekcije u okruženju, te se i u ovom eksperimentu predlaže analiza baznih komponenti.



Slika 30. Prosečna greška detekcije izračunata kao srednja vrednost grešaka detekcije u okviru postojećih radio veza između bežičnih čvorova tokom kretanja ili nepomičnog prisustva čoveka u nekoj od pozicija P1 – P5 u eksperimentalnim prostorijama Z1 i Z2.

Nakon što osoba napusti prostoriju Z2 i nastavi da se kreće sa druge strane pregradnih zidova prostorije, pojavljuju se minimalne varijacije odbiraka RSSI i to na svega dve radio veze. Greška odsustva je minimalna, prvenstveno zahvaljujući prirodi građevinskog materijala, koji u znatnoj meri blokira prostiranje radio talasa van prostorije, a time i umanjuje spoljne uticaje na radio talase u okruženju prostorije Z2, što se može videti iz tabela 22 i 23.

Tabela 22. Greška odsustva kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (prostorija Z2 bez prisustva) u odnosu na broj odbiraka RSSI čije vrednosti prevazilaze interval dozvoljene varijacije RSSI za čvorove N1 i N2.

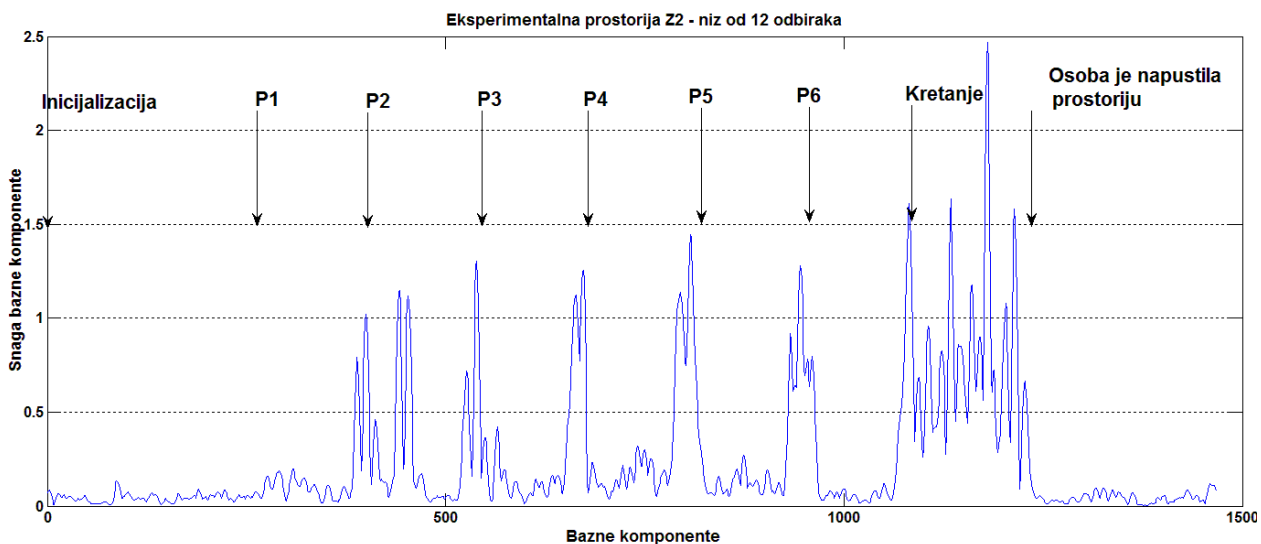
Radio veza	$N1 \rightarrow N2$	$N1 \rightarrow N3$	$N1 \rightarrow N4$	$N2 \rightarrow N1$	$N2 \rightarrow N3$	$N2 \rightarrow N4$
Greška odsustva	0%	0%	0%	0%	4.68%	0%

Tabela 23. Greška odsustva kao mera odnosa ukupnog broja odbiraka RSSI koji pripadaju jednom merenju (prostorija Z2 bez prisustva) u odnosu na broj odbiraka RSSI čije vrednosti prevazilaze interval dozvoljene varijacije RSSI za čvorove N3 i N4.

Radio veza	$N3 \rightarrow N1$	$N3 \rightarrow N2$	$N3 \rightarrow N4$	$N4 \rightarrow N1$	$N4 \rightarrow N2$	$N4 \rightarrow N3$
Greška odsustva	0%	0%	0.74%	0%	0%	0%

U cilju formiranja robustnijeg statističkog modela RF detekcije u okviru prostorije Z2, pristupa se kreiranju kovarijacione matrice C_X , po izrazu (15), koja upotrebom PCA postupka analizira postojeće korelacije između svih parova uspostavljenih radio veza. Na isti način kao i tokom eksperimenta u prostoriji Z1, ispitivanja su obavljena upotrebom $p = 12, 24$ i 36 nizova odbiraka RSSI dobavljenih u okviru ciklusa prozivke bežičnih čvorova, tako da se i u ovom slučaju matrica X sastoji od $p \times 12$ odbiraka RSSI, gde je 12 konstantan broj radio veza u prostoriji Z2. Tokom inicijalizacije se određuje granica detekcije. Sve bazne komponente se tokom inicijalizacije međusobno porede i ona sa najvećom snagom određuje granicu detekcije.

Vrednosti baznih komponenti, izračunatih tokom verifikacionog eksperimenta u prostoriji Z2 su predstavljene na slikama 31, 33 i 35, za dužinu intervala $p = 12, 24$ i 36 odbiraka, respektivno. Uz bazne komponente, predstavljene su i greške detekcije na slikama 32, 34 i 36 za dužine intervala od 12, 24 i 36 odbiraka kliznog prozora p matrice X . Na identičan način kao i tokom eksperimenta u prostoriji Z1, greška detekcije je data kao odnos ukupnog broja baznih komponenti izračunatih tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije. U slučaju prisustva, sve vrednosti baznih komponenti koje su niže od granice detekcije uvode grešku detekcije, dok u slučaju odsustva ljudi iz prostorije Z2, sve vrednosti baznih komponenti koje su više od granice detekcije uvode grešku odsustva.

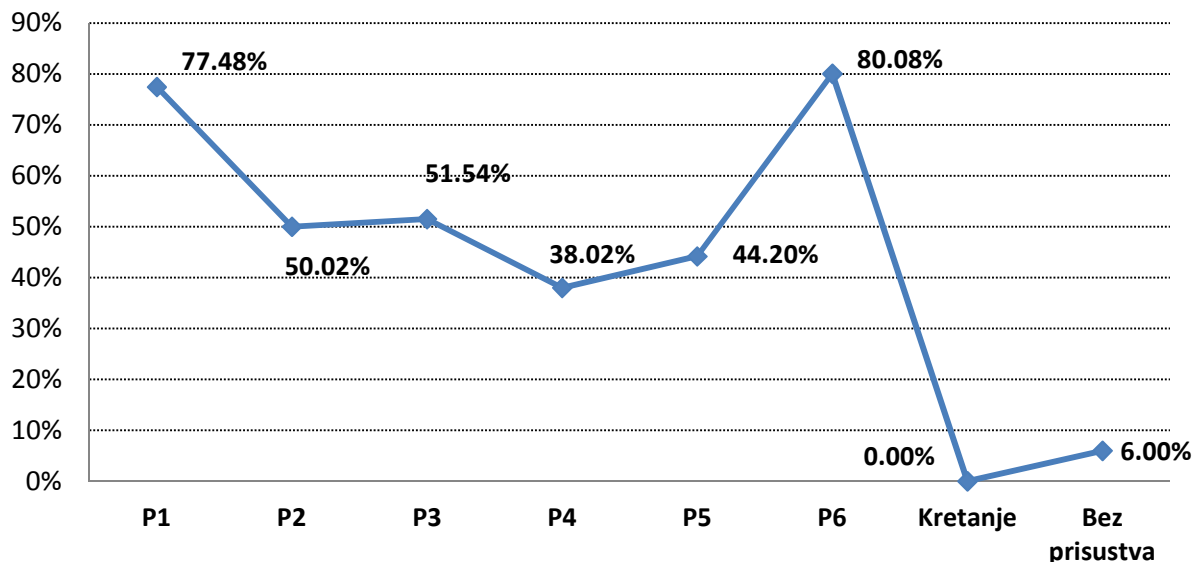


Slika 31. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji Z2, za dužinu niza od $p = 12$ odbiraka kliznog prozora matrice X .

Iako je inicijalna radio slika eksperimentalne prostorije Z2 izloženija uticaju okruženja, odnosno refleksije od zidove te prostorije, upotreba baznih komponenti u značajnoj meri uklanja šum prouzrokovan refleksijom, kao i šum prouzrokovan niskom učestanosti odabiranja odbiraka RSSI. Greška detekcije za klizni interval $p = 12$ je visoka u poziciji P1, koja je jedna od

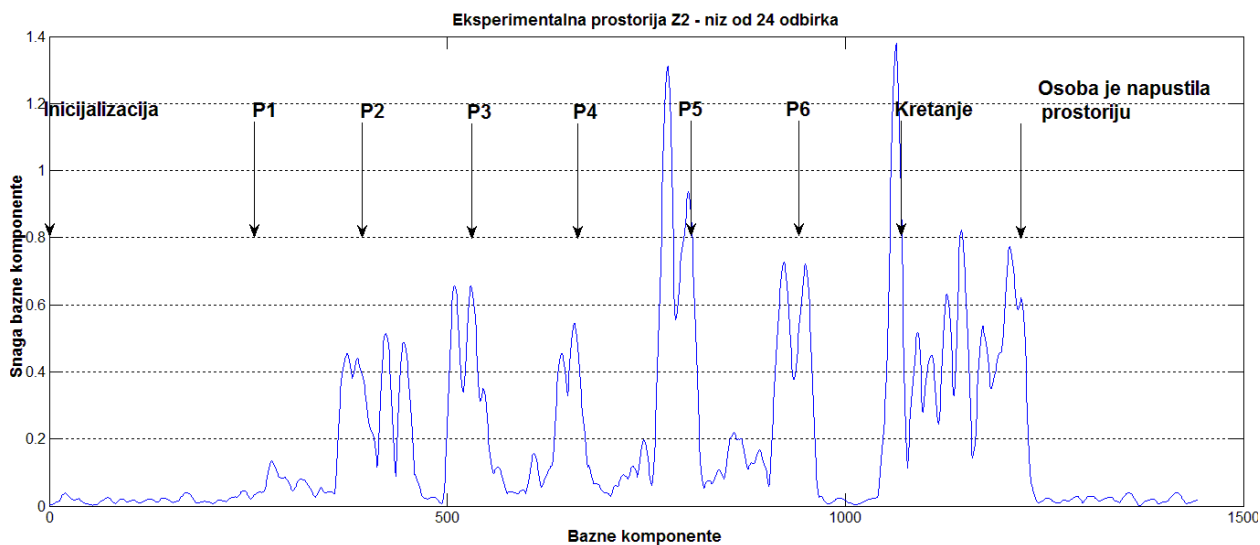
udaljenijih pozicija u kojoj je stacionirana nepomična osoba, ali je u dometu radio signala bežičnih čvorova detekcije. Za razliku od $P1$, pozicija $P6$ je van dometa i otud je greška detekcije najveća upravo u ovoj poziciji.

Greška detekcije



Slika 32. Greška detekcije u $Z2$ za dužinu niza od $p = 12$ odbiraka kliznog prozora matrice X izračunata kao odnos ukupnog broja baznih komponenti tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.

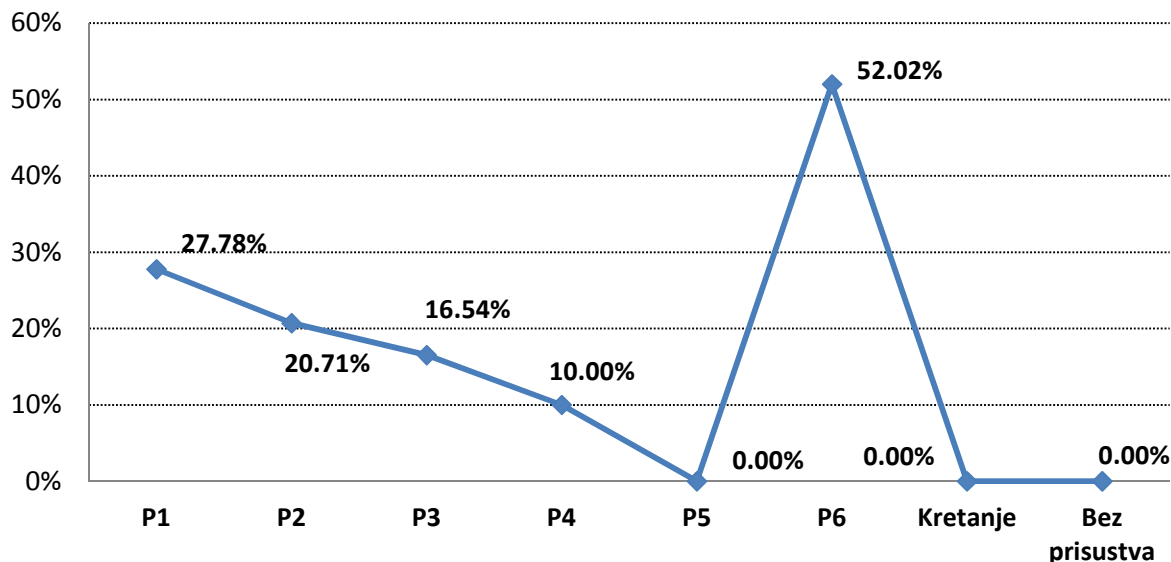
Uvećanje intervala p na 24 odbirka, prikazano na slici 33, dovodi do umanjjenja grešaka detekcije u svim tačkama, međutim vreme odziva sistema se uvećava.



Slika 33. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji $Z2$, za dužinu niza od $p = 24$ odbirka kliznog prozora matrice X .

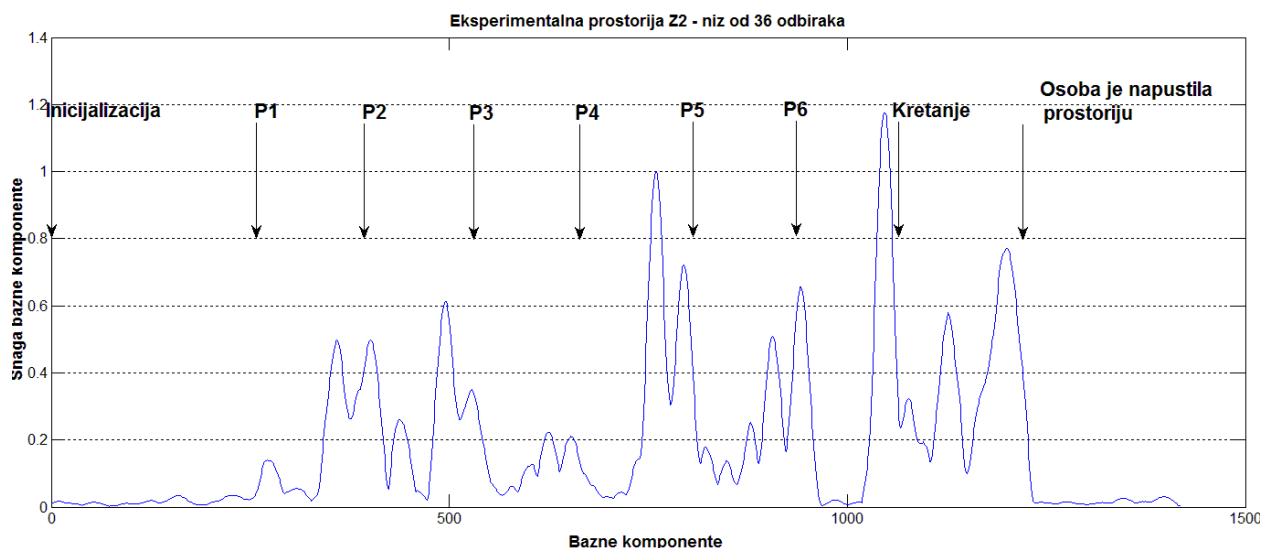
Za $p = 24$ kretanje se detektuje bez prijavljene greške, kao i odsustvo osobe iz prostorije Z2, što je i prikazano na slici 34. Greška detekcije nepomične osobe u ostalim pozicijama, izuzev u P6, se znatno umanjuje u odnosu na interval $p = 12$.

Greška detekcije



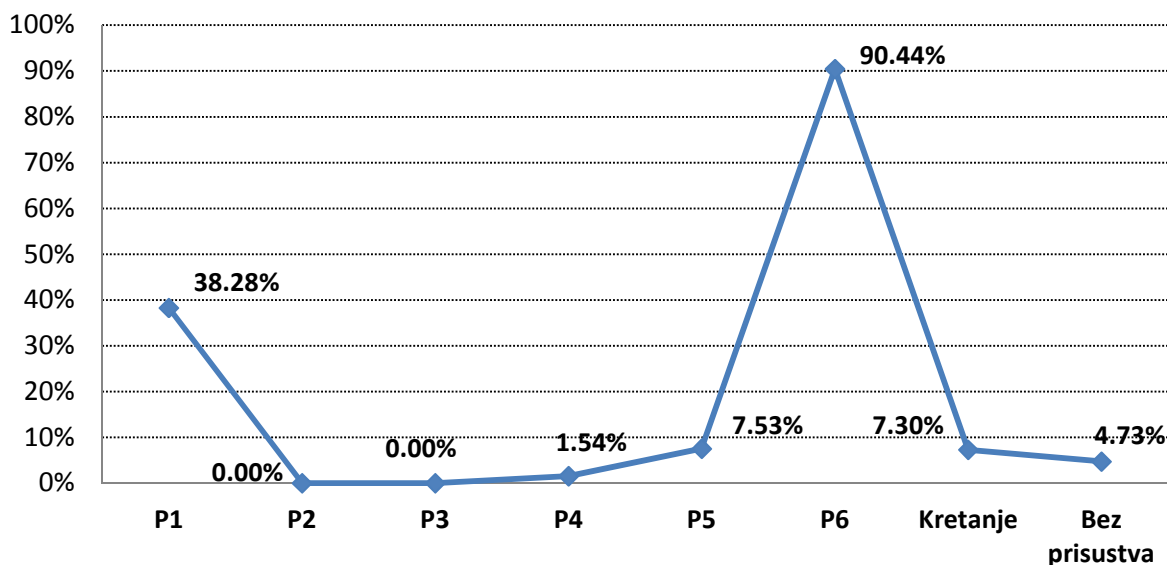
Slika 34. Greška detekcije u Z2 za dužinu niza od $p = 24$ odbirka klznog prozora matrice X izračunata kao odnos ukupnog broja baznih komponenti tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.

Najniža greška detekcije i odsustva se postiže za dužinu intervala $p = 36$ odbiraka, međutim prisustvo nepomične osobe u pozicijama P1 i naročito P6 se i dalje detektuje sa visokim stepenom greške, kao što je prikazano na slikama 35 i 36. S obzirom da je neophodno više od tri sekunde da na osnovu tekućeg ciklusa prozivke sistem izračuna vektor baznih komponenti, na osnovu kojeg se može zaključiti o prisustvu osobe u prostoriji, algoritam za $p = 36$ odbiraka je neupotrebljiv sa korisničkog aspekta upotrebe u realnom vremenu. Slično kao i tokom eksperimenta u prostoriji Z1, postupak obrade prikupljenih odbiraka RSSI zahteva oko 800 ms ukoliko je $p = 12$, a za $p = 24$ oko 1.5 s, što je prihvatljivo ukoliko je broj prozvanih čvorova najviše četiri. Međutim, pošto je prostorija Z2 površinski znatno veća od Z1, a i greška detekcije tokom prisustva čoveka u poziciji P6 potvrđuje da je za velike prostorije neophodno povećati domet RF detekcije uvođenjem dodatnih čvorova, četiri bežična čvora nisu dovoljna. Za više od četiri bežična čvora detekcije neophodno je uvećati učestanost odabiranja da bi sistem odgovorio za prihvatljiv vremenski period, ali je tada izračunavanje baznih komponenti za $p = 24$ suviše sporo i jedino 12 odbiraka intervala p je moguće obraditi u prihvatljivom vremenu, ali uz veću grešku detekcije, te je neophodno uvesti dodatno filtriranje informacionom entropijom.



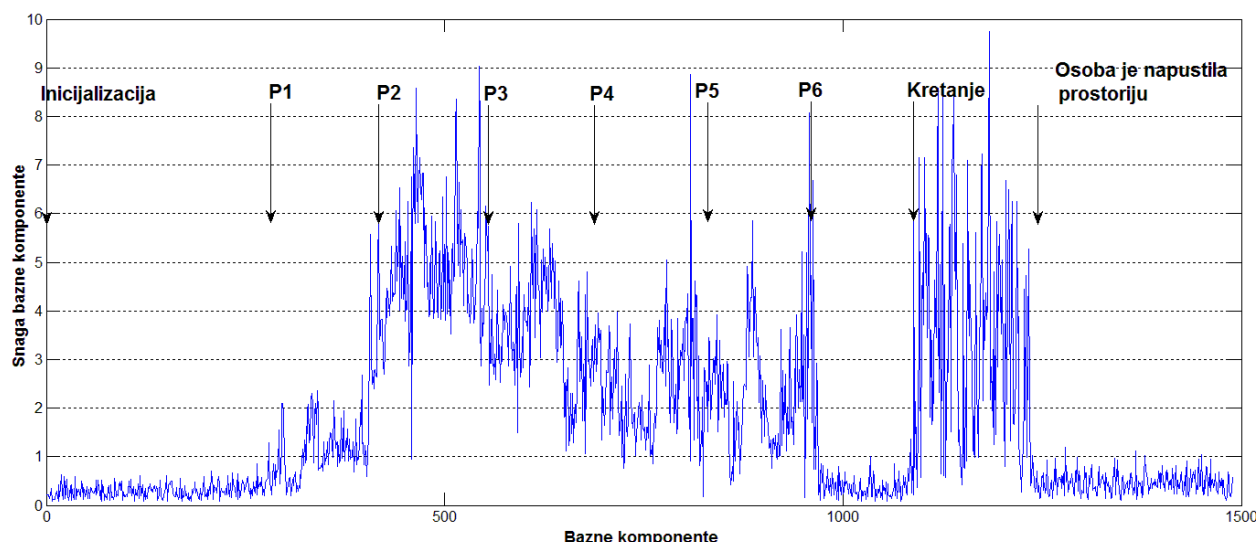
Slika 35. Bazne komponente izračunate za odбирke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji Z2, za dužinu niza od $p = 36$ odbiraka kliznog prozora matrice X .

Greška detekcije



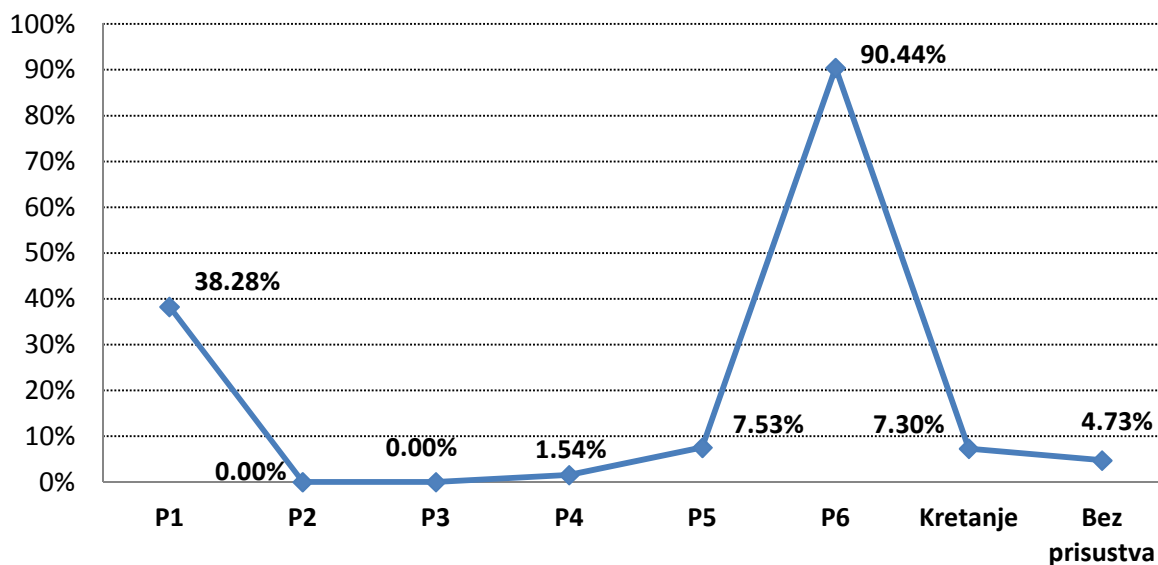
Slika 36. Greška detekcije u Z2 za dužinu niza od $p = 36$ odbiraka kliznog prozora matrice X izračunata kao odnos ukupnog broja baznih komponenti tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.

Zamena PCA sa CCIPA inkrementalnim postupkom ubrzava konvergenciju algoritma izračunavanja baznih komponenti približno 20 puta tokom jednog ciklusa prozivke čvorova. Rezultat primene CCIPCA algoritma, pored brzine izvršavanja, jeste i znatno niža greška detekcije i greška odsustva, što se može videti sa slika 37 i 38. Granica detekcije se izračunava tokom perioda inicijalizacije kao bazna komponenta najveće snage.



Slika 37. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji Z2 upotrebom CCIPCA inkrementalnog algoritma.

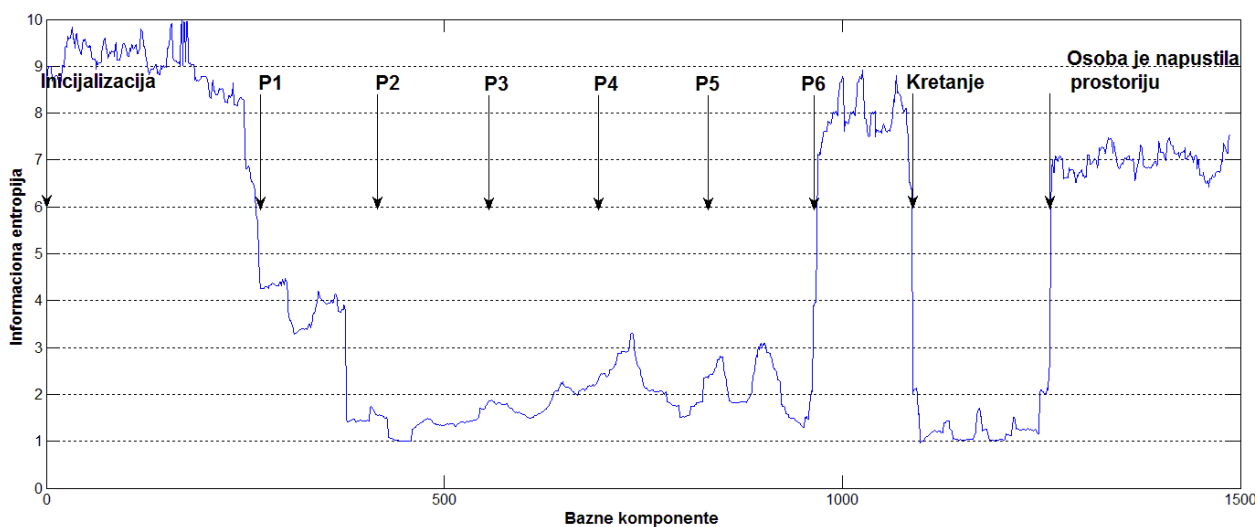
Greška detekcije



Slika 38. Greška detekcije u Z2 analizom baznih komponenti izračunatih primenom CCIPCA postupka, data kao odnos ukupnog broja baznih komponenti izračunatih tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.

Bazne komponente izračunate primenom CIPCA postupka u prostoriji Z2 sadrže određeni stepen greške, kako detekcije, tako i odsustva. Stoga se pristupa primeni informacione entropije kao dodatnog filtra koji popravlja kvalitet RF detekcije prisustva, kretanja i odsustva ljudi, čak i u okruženju specifične konstrukcije prirode kakva je prostorija Z2. Informaciona entropija

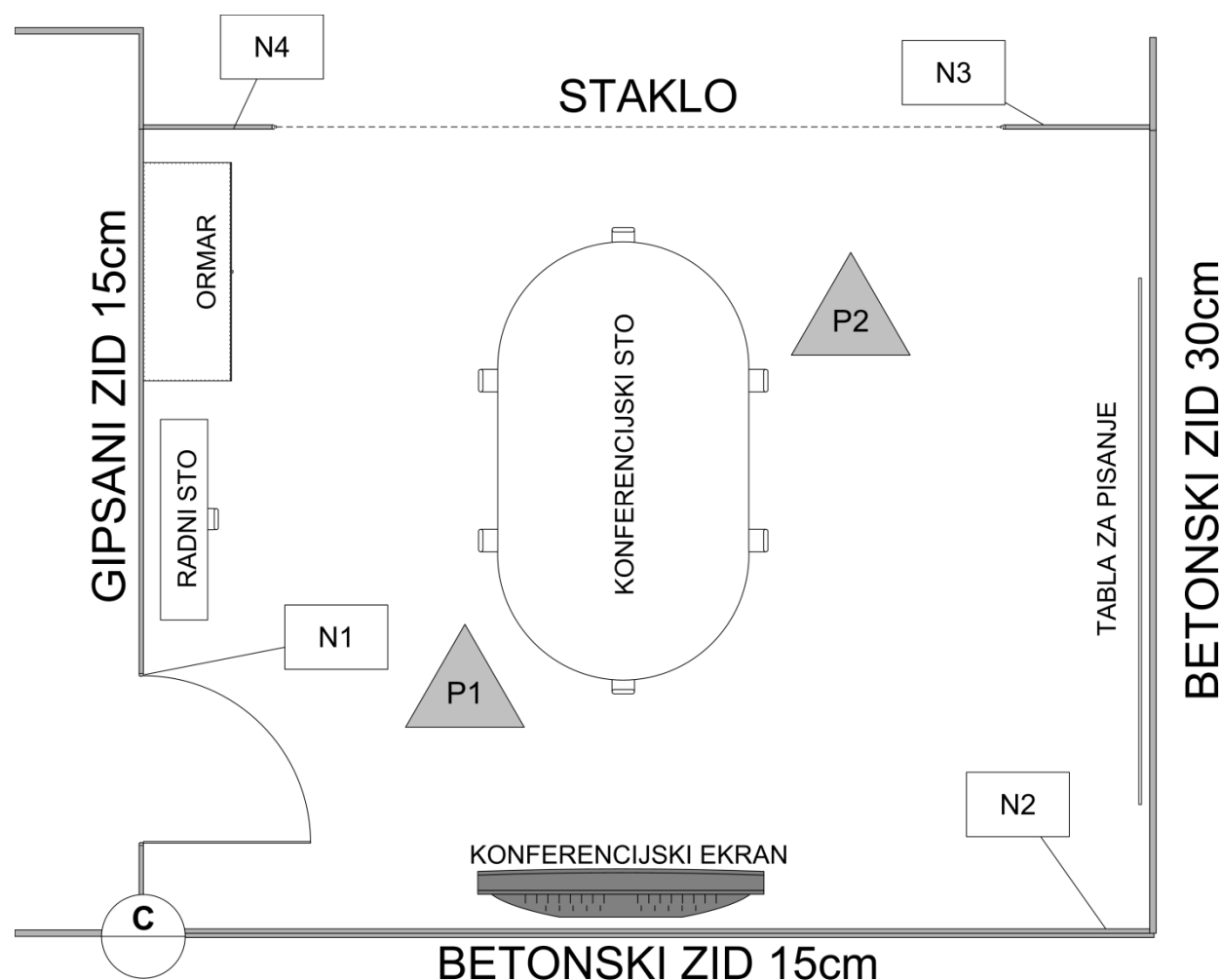
baznih komponenti odbiraka RSSI, prikupljenih u prostoriji Z2 prikazana je na slici 39. Ukoliko se kao granica detekcije upotrebljava polovina najmanje bazne komponente izračunate tokom perioda inicijalizacije, sve vrednosti entropije iznad granice detekcije predstavljaju odsustvo čoveka iz prostorije Z2, a sve vrednosti entropije koje su niže od granice detekcije predstavljaju detektovano prisustvo čoveka u prostoriji Z2. Za slučaj primene entropije, ukupna greška detekcije iznosi oko 12% i javlja se u potpunosti isključivo za poziciju P6, što je i očekivano, s obzirom da je ta pozicija van dometa RF detekcije, te informaciona entropija nema značajnijeg uticaja na ispravnost detekcije.



Slika 39. Informaciona entropija baznih komponenti izračunata za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji Z2.

Na primeru prethodno predstavljena dva ispitna scenarija potvrđeno je da informaciona entropija primenjena na niz baznih komponenti odbiraka RSSI u najvećoj meri potiskuje uticaje okruženja i posledice niske učestanosti odabiranja. Stoga se predstavljen statistički model može iskoristiti za pouzdanu detekciju prisustva i kretanja ljudi, bilo da se ljudi kreću ili su stacionirani nepomično u prostoriji od interesa. Takođe, prethodno opisana ispitivanja su potvrdila da se jednodimenzionalni statistički model ne može koristiti za ispravnu detekciju prisustva i kretanja ljudi. Pouzdana detekcija kretanja jeste moguća, kao na primeru fluktuacije uzastopnih odbiraka snage signala ili radio tomografije, što je opisano u poglavlju stanja u oblasti, međutim upotreba informacione entropije baznih komponenti dodatno omogućuje ispravnu detekciju prisustva nepomičnih ljudi, što je neophodno za kvalitetan sistem Ambijentalne Inteligencije. U realnim uslovima je sasvim očekivano da prisutna osoba može da sedi, leži ili stoji nepomično, a sistem je obavezan da je ispravno detektuje u svakom od tih stanja. Međutim, informaciona entropija ne može razlikovati u potpunosti nepomičnog čoveka od neživog predmeta te je neophodno uvesti dodatni parametar koji, kombinovan sa informacionom entropijom, obezbeđuje razlikovanje

nepomičnog čoveka od nekog objekta u istoj poziciji. U tu svrhu je uveden indeks disperzije, predstavljen izrazom (28). Za potrebe verifikacije ispravnosti upotrebe indeksa disperzije za razlikovanje čoveka od neživog objekta određen je ispitni scenario, izvršen u eksperimentalnoj prostoriji Z1. Inicijalno, prva dva minuta u prostoriji od interesa nema prisutnih ljudi. Potom ulazi čovek i naredna dva minuta se nasumično kreće kroz prostoriju bez zaustavljanja. Nakon perioda kretanja, čovek se pozicionira u poziciju *P1*, a potom i *P2*, sa slike 40, te u svakoj od njih stoji nepomično po dva minuta. U narednoj fazi čovek postavlja istovremeno po dve stolice, napravljene od kombinacije metala, drveta i sunđera, prvo u poziciju *P1*, a potom i u *P2*, u kojima ostaju po dva minuta. Sve vreme dok su stolice u navedenim pozicijama, u prostoriji nema prisutnih ljudi, ali nakon isteka dvominutnog perioda u poziciji *P1*, čovek nakratko ulazi u prostoriju i premešta stolice iz *P1* u *P2* i potom napušta prostoriju. Bez obzira na ulazak i izlazak čoveka iz prostorije zarad pozicioniranja stolica u određenu lokaciju, tok scenarija se ne prekida.



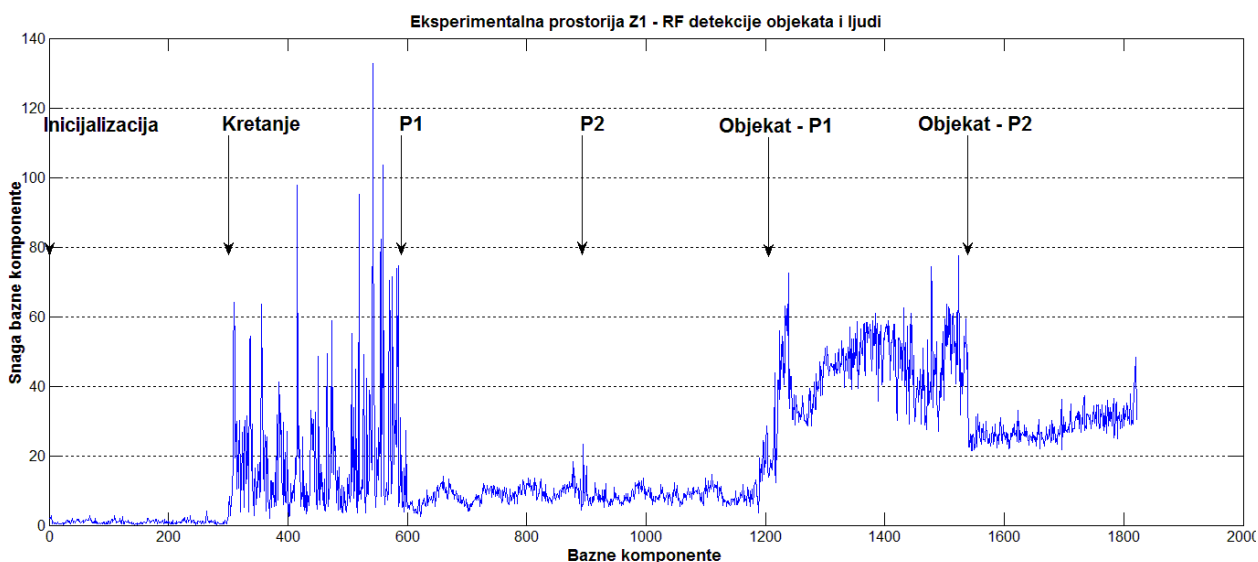
Slika 40. Skica prostornog rasporeda prostorije Z1, u kojoj je ispitivana ispravnost upotrebe indeksa disperzije za razlikovanje prisustva nepomičnog čoveka od objekta u istoj prostornoj poziciji. Simboli *N1* – *N4* označavaju bežične čvorove RF detekcije, dok simboli *P1* i *P2* označavaju prostorne pozicije nepomične osobe, odnosno objekta.

Za potrebe eksperimenta su takođe montirana četiri bežična čvora u prostoriji Z1 - tri pametne OBLO utičnice, na visini od 40 cm i jedan pametni OBLO prekidač za osvetljenje, na visini od 120 cm. Bežični čvorovi na slici 40 su označeni simbolima $N1 - N4$, dok simboli $P1$ i $P2$ označavaju prostorne pozicije u kojima je tokom ispitivanja prisutna osoba stajala nepomično ili su umesto čoveka bile postavljene stolice. Rastojanje svakog pojedinačnog bežičnog čvora, kao i svake od pozicija nepomične osobe, odnosno objekta, u odnosu na koordinatni centar prostorije Z1 (označen sa C u donjem levom uglu slike 40) dato je u tabeli 24.

Tabela 24. Prostorne koordinate bežičnih čvorova i pozicija nepomične osobe, odnosno neživih objekata u odnosu na koordinatni centar prostorije ispitivanja Z1 (dato u cm)

Naziv čvora	Koordinate čvora	Naziv pozicije	Koordinate pozicije
$N1$	(73, 211)	$P1$	(132, 93)
$N2$	(477, 54)	$P2$	(310, 416)
$N3$	(474, 428)	–	–
$N4$	(66, 519)	–	–

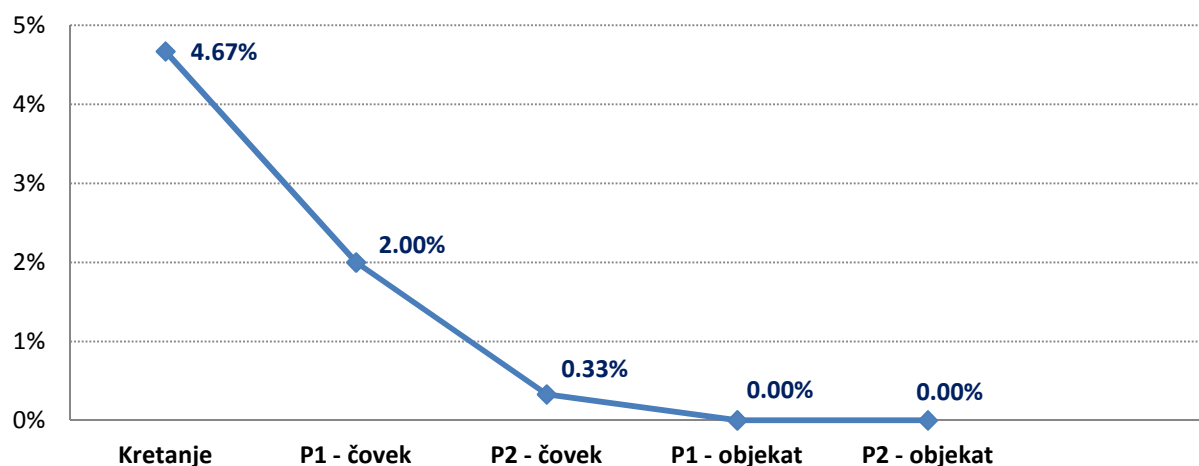
S obzirom da definicija RF modela prostora upotrebom jednodimezionalne statistike ne obezbeđuje pouzdanu detekciju ljudi, pristupa se analizi baznih komponenti, izračunatih upotrebom CCIPCA postupka. Niz baznih komponenti je prikazan na slici 41.



Slika 41. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta verifikacije indeksa disperzije za razlikovanje prisustva nepomičnih ljudi od objekata u ispitnoj prostoriji Z1 upotrebom CCIPCA inkrementalnog algoritma.

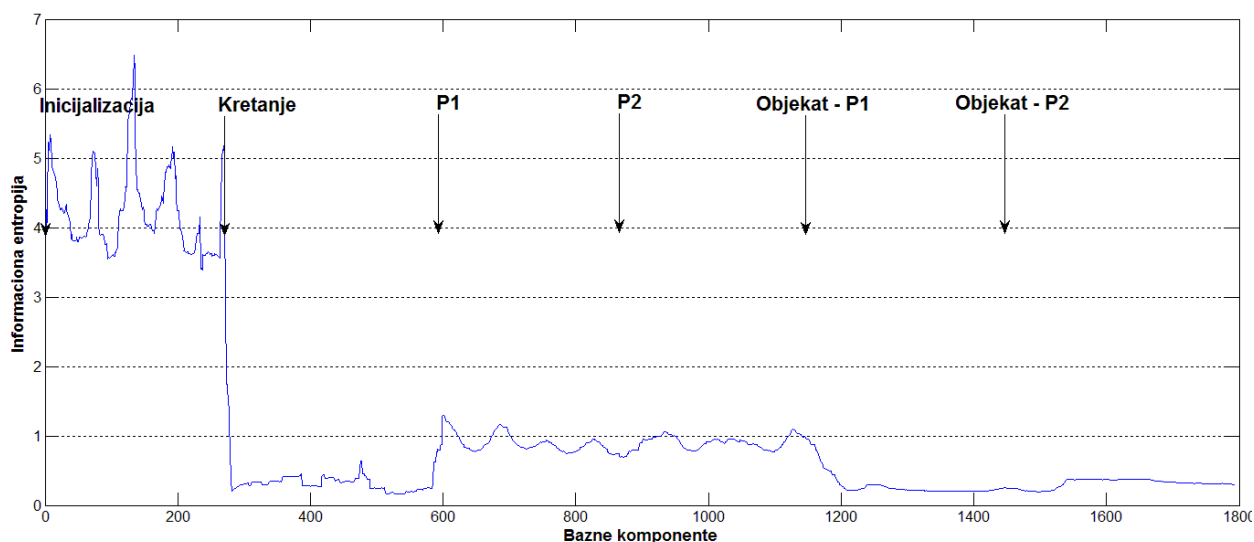
Na osnovu analize baznih komponenti jasno se razlikuje prostorija u kojoj nema prisutnih ljudi, od prostorije u kojoj se prisutna osoba kreće, ili stoji nepomično u nekoj od navedenih pozicija. Prisustvo objekata u pozicijama od interesa unutar eksperimentalne prostorije *ZI* prouzrokuje izraženije varijacije RSSI, što se sa aspekta baznih komponenti vidi u odnosu snaga za slučaj pozicioniranog objekta i slučaj prisutnog čoveka. Zbog prirode materijala od kojih su ispitni objekti formirani, prvenstveno zbog prisustva metalnih delova, dominantna je refleksija radio talasa koja se manifestuje snagom baznih komponenti koja je veća nego u slučaju prisustva čoveka u istim pozicijama. Prilikom prisustva čoveka, dominantna je apsorpcija energije radio talasa od molekule vode ljudskog tela, uz blagu refleksiju radio talasa, prvenstveno od ljudski skelet. Greška detekcije, iako niska, prisutna je tokom kretanja i prisustva nepomične osobe, dok se prisustvo objekata u istim pozicijama detektuje bez greške, kao što je prikazano na slici 42.

Prosečna greška detekcije



Slika 42. Greška detekcije ljudi i objekata u *ZI* analizom baznih komponenti izračunatih primenom CCIPCA postupka, data kao odnos ukupnog broja baznih komponenti izračunatih tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.

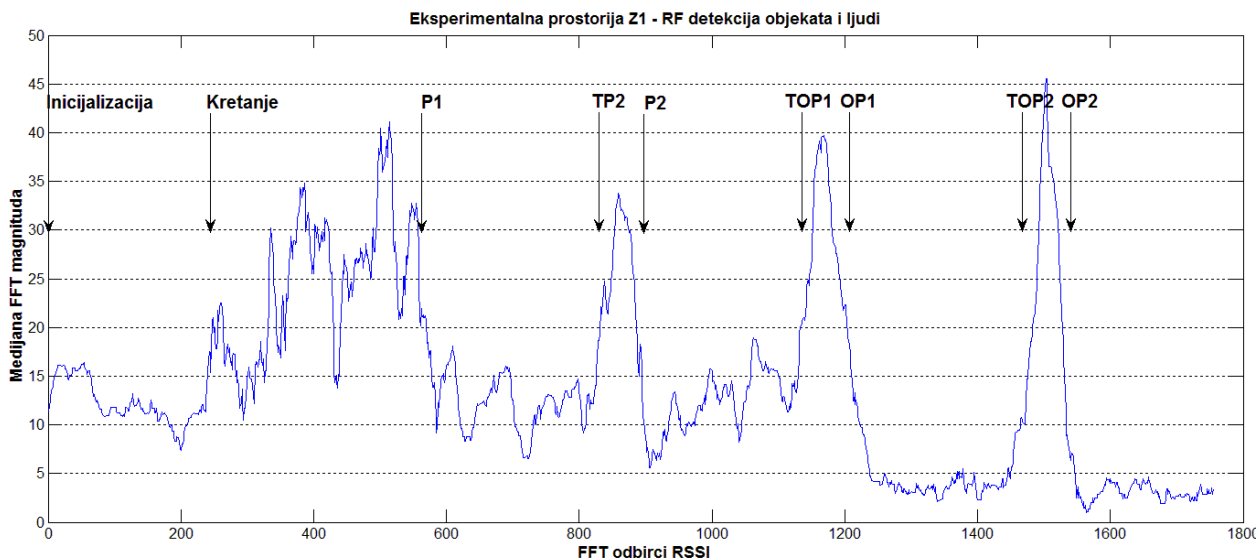
Da bi se uvećala ispravnost i poboljšao kvalitet RF detekcije ljudi na osnovu baznih komponenti odbiraka RSSI, primenjuje se informaciona entropija. Ukoliko se kao granica detekcije odredi polovina najniže vrednosti entropije baznih komponenti tokom perioda inicijalizacije, greška detekcije, kako čoveka, tako i objekta u prostoriji *ZI* je jednaka 0%. Radio slika formirana na osnovu informacione entropije baznih komponenti za navedeni eksperiment u prostoriji *ZI* prikazana je na slici 43.



Slika 43. Informaciona entropija baznih komponenti izračunata za odбирke RSSI dobavljene tokom eksperimenta za potrebe razlikovanja ljudi i objekata u ispitnoj prostoriji Z1: P1 i P2 predstavljaju ponašanje signala dok je čovek nepomično stajao u datim pozicijama, dok Objekat-P1 i Objekat-P2 predstavljaju ponašanje signala dok je objekat bio postavljen u istim pozicijama.

Nedostatak upotrebe informacione entropije baznih komponenti jeste činjenica da čovek, ali i drugi objekti (u konkretnom slučaju dve stolice) generišu nisku vrednost entropije u pozicijama od interesa, koja je znatno niža nego u slučaju da u tim pozicijama nema prisutnih ni ljudi ni objekata. Ovaj nedostatak se manifestuje u realnim uslovima na primeru kada čovek uđe u prostoriju od interesa, promeni raspored npr. elemenata nameštaja – pomeri stolicu, a potom napusti prostoriju. Iako čovek nije prisutan u prostoriji, pozicioniranje nekog objekta, poput stolice, u određenu poziciju, može narušiti očekivanu radio sliku okruženja i uzrokovati stanje prepoznatog prisustva čoveka, iako to nije ispravno stanje. Zbog toga se informaciona entropija može upotrebiti za pouzdanu detekciju prisustva i kretanja ljudi i objekata, sa značajnim stepenom otpornosti na negativne uticaje ambijentalnih smetnji. Međutim, za precizno razlikovanje prisustva nepomičnih ljudi od prisustva drugih objekata u određenim pozicijama prostorije od interesa neophodno je uvesti dodatni parametar – indeks disperzije frekventnog obeležja, opisan izrazom (28). Indeks disperzije sam ne daje dovoljno informacija o prisustvu ljudi, ali u kombinaciji sa informacionom entropijom može dati u potpunosti precizan odgovor da li je u prostoriji zaista prisutan nepomičan čovek, ili je samo došlo do promene rasporeda elemenata nameštaja. Određenim tehnikama rasplintane logike ili veštačke inteligencije, moguće je kombinovati ova dva parametra u cilju pravilnog zaključivanja o prisustvu, ali potencijalni postupci odlučivanja izlaze iz okvira ove disertacije i neće biti dalje razmatrani.

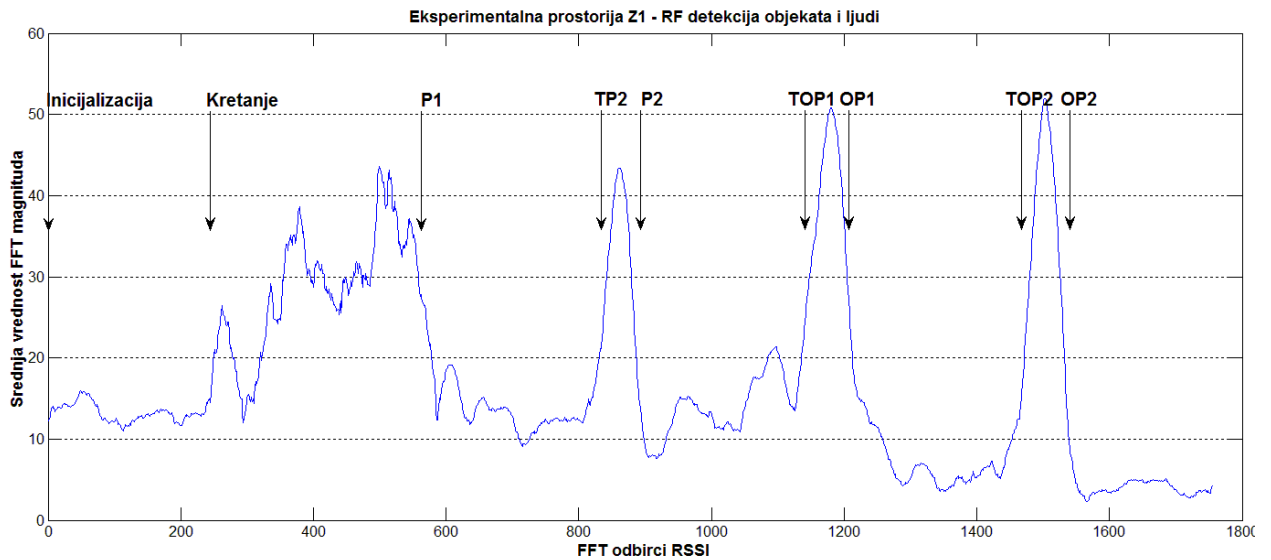
Frekventno obeležje radio talasa RF detekcije, predstavljeno u obliku indeksa disperzije poseduje karakteristične vrednosti koje se razlikuju za slučaj prisutnog nepomičnog čoveka od slučaja prisutnog objekta. Mikropokreti ljudskog torzoa tokom disanja, uzrokuju neintenzivne, ali blago primetne varijacije odbiraka RSSI, koje se u frekventnom domenu manifestuju povećanom varijansom odbiraka RSSI, što implicira porast vrednosti indeksa disperzije. Nizovi izračunatih vrednosti FFT magnituda tokom eksperimenta u *Z1* su prikazani na slikama 44 i 45. Na slici 44 je prikazan niz usrednjenih vrednosti magnituda, nakon primene brze Furijeove transformacije na ansambl radio talasa u okviru postojećih radio veza u prostoriji od interesa *Z1*. Usrednjavanje magnituda se vrši nad nizovima odbiraka RSSI, dobavljenim sa postojećih radio veza tokom istog ciklusa prozivke čvorova u *Z1*, koji su brzom Furijeovom transformacijom prevedeni u spektralni domen. Agregacija odbiraka RSSI je opisana izrazima (26) i (27).



Slika 44. Spektralni domen niza usrednjenih magnituda odbiraka RSSI nakon primene FFT tokom eksperimenta razlikovanja prisustva nepomičnog čoveka i objekta: *P1* i *P2* su pozicije čoveka, *TP2* je prelazak čoveka iz *P1* u *P2*, dok *OP1* i *OP2* predstavljaju prisustvo objekta u pozicijama *P1* i *P2*, a *TOP1* i *TOP2* tranzicije objekata (*TOP1* – unošenje stolica u *OP1*, *TOP2* – prenošenje stolica iz *OP1* u *OP2*).

Na slici 45 je prikazan identičan niz vrednosti magnituda FFT, ali je usrednjavanje vrednosti izvršeno upotrebom Medijan filtra, te su amplitude varijacija između susednih FFT odbiraka ublažene. U oba slučaja, usrednjavanje i Medijana jasno ističu razliku u magnitudama za slučaj prisustva čoveka, u odnosu na slučaj prisustva objekta. Kretanje čoveka po prostoriji *Z1* generiše specifičnu radio sliku u spektralnom domenu, međutim, prostorija u kojoj nema prisutnih ljudi generiše sličnu spektralnu sliku kao i prostorija u kojoj je prisutna nepomična osoba. S obzirom da tok eksperimenta nije prekidano da bi se čovek, odnosno objekat pomerio u

narednu poziciju, na slikama 44 i 45 se mogu videti i izraženiji šiljci, označeni sa $TP2$, $TOP1$ i $TOP2$, koji odgovaraju upravo navedenim tranzicijama koje su uslovljene ljudskim pokretima. Šiljak u nizu FFT magnituda $TP2$ se javlja zbog kretanja čoveka prilikom pomeranja iz pozicije $P1$ u $P2$. Šiljci $TOP1$ i $TOP2$ se javljaju prilikom unošenja stolica u prostoriju $Z1$, odnosno prenošenja stolica iz $OP1$ u $OP2$, respektivno. Bitno je naglasiti da su sa aspekta prostornih koordinata $P1 = OP1$ i $P2 = OP2$, jedino se imenovanje razlikuje radi razdvajanja na graficima.



Slika 45. Spektralni domen niza Medijanom filtriranih magnituda odbiraka RSSI nakon primene FFT tokom eksperimenta razlikovanja prisustva nepomičnog čoveka i objekta.

Naprednija analiza ponašanja signala u spektralnom domenu bi verovatno rezultovala prepoznavanjem i razdvajanjem prisustva čoveka od objekta, ali bi to zahtevalo posebne, računski zahtevne statističke analize. Stoga se pristupa upotrebi indeksa disperzije, koji je jednostavan za izračunavanje, a pri tom može dati vrlo precizan odgovor o tome da li spektralna slika odgovara prisustvu čoveka ili objekta. U kombinaciji sa informacionom entropijom koja daje odgovor o postojanju prisustva, indeks disperzije precizira šta je prisutno. U tabeli 25 su prikazane vrednosti indeksa disperzije, izračunate za pozicije $P1$ i $P2$ (odnosno njihove sinonime $OP1$ i $OP2$). Tokom izračunavanja indeksa disperzije, prethodno navedene tranzicije nisu uzimane u obzir, nego je analiziran isključivo niz FFT magnituda koje odgovaraju nepomičnom prisustvu čoveka ili objekta. Na osnovu vrednosti iz tabele 25 može se zaključiti da ukoliko je čovek prisutan u prostoriji, indeks disperzije je znatno veći od 1 i odbirci magnituda FFT se međusobno grupišu. Ukoliko je umesto čoveka prisutan neki drugi objekat, indeks disperzije ima pozitivnu vrednost manju od 1, a odbirci magnituda FFT su rasuti. Drugim rečima, odbirci magnituda FFT imaju binomnu raspodelu kada je prisutan neki objekat, a ukoliko je prisutan nepomičan čovek, odbirci magnituda FFT imaju negativnu binomnu ili geometrijsku raspodelu.

Tabela 25. Prikaz vrednosti parametara disperzije frekventnog domena radio talasa RF detekcije tokom prisustva nepomične osobe u pozicijama *P1* i *P2*, u odnosu na prisustvo objekata u istim pozicijama. Vrednosti se odnose na ceo vremenski interval dok se osoba ili objekat nalaze u odgovarajućoj poziciji.

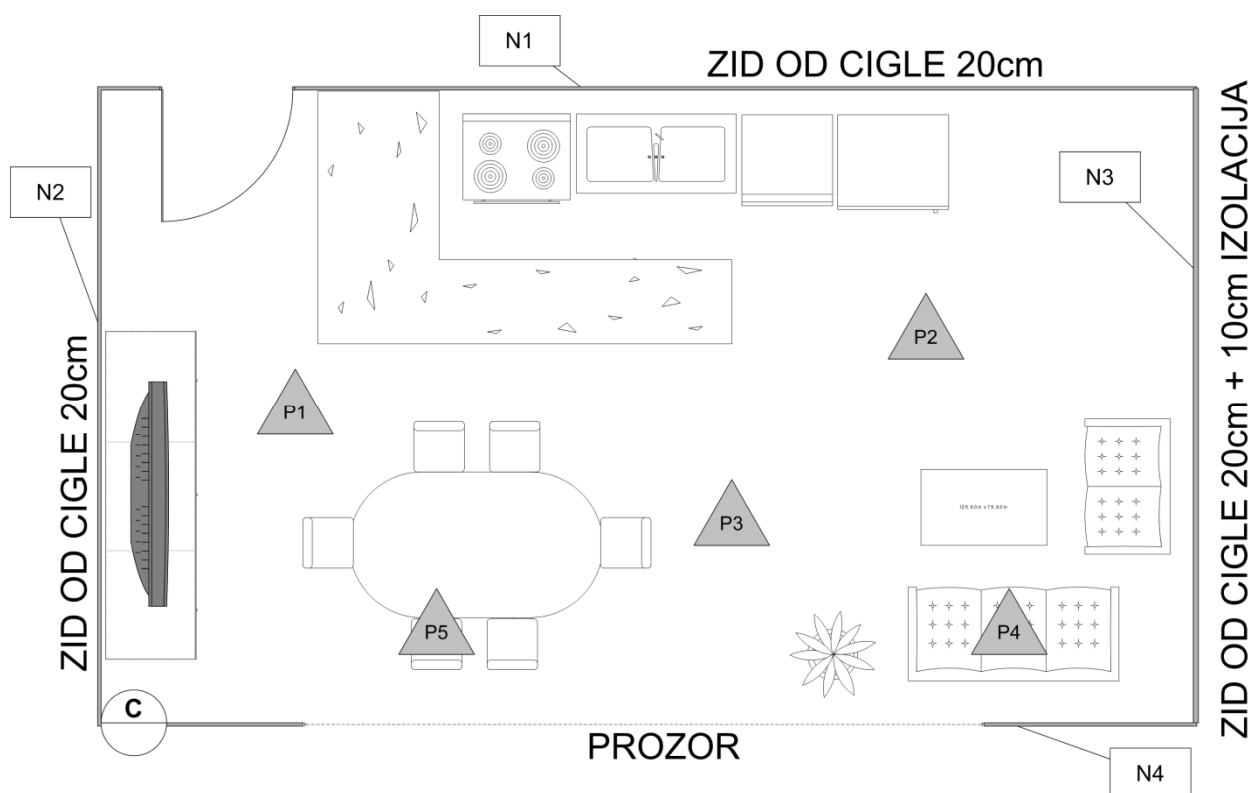
	Prisustvo nepomične osobe		Prisustvo objekata (stolice)	
	<i>FFT magnitude (srednja vrednost)</i>	<i>FFT magnitude (median)</i>	<i>FFT magnitude (srednja vrednost)</i>	<i>FFT magnitude (median)</i>
<i>P1 varijansa</i>	5.23	6.95	1.02	0.45
<i>P1 standardna devijacija</i>	2.29	2.64	1.01	0.67
<i>P1 srednja vrednost</i>	13.20	12.16	5.38	3.53
<i>P1 indeks disperzije</i>	2.07	3.97	0.19	0.06
<i>P2 varijansa</i>	12.81	9.13	0.59	0.63
<i>P2 standardna devijacija</i>	3.59	3.02	0.77	0.79
<i>P2 srednja vrednost</i>	13.91	12.37	3.93	3.04
<i>P2 indeks disperzije</i>	11.79	6.74	0.09	0.13

Za razliku od ostalih senzorskih tehnologija za detekciju ljudi, od kojih neke zahtevaju povremeno ažuriranje pozadine, kao što je optička kamera, indeks disperzije radio talasa u spektralnom domenu omogućuje da se bez obzira na trenutni raspored objekata u okruženju jasno razlikuje prisustvo ljudi od objekata. Time je postignut jedan od primarnih ciljeva ovog istraživanja - mogućnost da se definiše nova i jeftina senzorska tehnologija zasnovana na radio talasima, koja će svojim karakteristikama biti konkurentna ne samo pasivnoj infracrvenoj tehnologiji, već i mnogim naprednijim senzorskim tehnologijama.

Za potrebe eksperimentalne verifikacije postupaka RF detekcije u okviru stambenog prostora, izabrana je privatna dvospratna kuća. Ispitivanja su izvršena u spratnoj trpezarijskoj prostoriji, u nastavku označenoj kao Z3, u kojoj se nalazi najviše električnih uređaja koji mogu izazvati elektromagnetne smetnje i narušiti ispravnost RF detekcije. Skica prostornog rasporeda Z3 je predstavljena na slici 46. Spoljni zidovi se sastoje iz dva reda opeke ukupne debljine 37 cm, između kojih se nalazi izolacioni sloj mineralne vune, debljine 5 cm. Unutrašnji pregradni zidovi su formirani od giter opeke, debljine 15 cm.

U okviru prostorije Z3, montirana su četiri bežična čvora - tri pametne OBLO utičnice, na visini od 50 cm i pametni OBLO prekidač za osvetljenje, na visini od 100 cm. Bežični čvorovi

na slici 46 su označeni simbolima $N1 - N4$, dok simboli $P1 - P5$ označavaju prostorne pozicije u kojima je, tokom ispitivanja, prisutna osoba stajala nepomično, sedela ili ležala.



Slika 46. Skica prostornog rasporeda prostorije Z3, u kojoj je ispitivana ispravnost postupaka za RF detekciju prisustva i kretanja ljudi. Simboli $N1 - N4$ označavaju bežične čvorove RF detekcije, dok simboli $P1 - P5$ označavaju prostorne pozicije nepomične osobe.

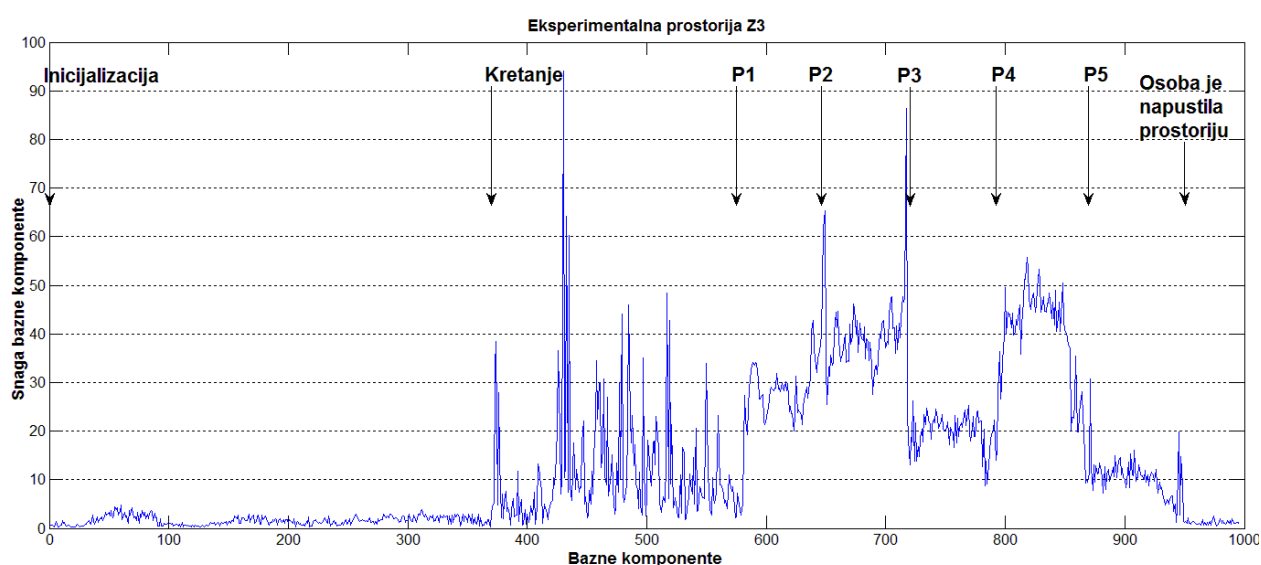
Rastojanje svakog bežičnog čvora, kao i svih pozicija nepomične osobe, u odnosu na koordinatni centar prostorije ispitivanja (označen sa C u donjem levom uglu skice) dato je u tabeli 26, gde svaka koordinata predstavlja udaljenost od koordinatnog centra C , izraženo u cm.

Tabela 26. Prostorne koordinate bežičnih čvorova i pozicija nepomične osobe u odnosu na koordinatni centar prostorije ispitivanja Z3 (dato u cm)

Naziv čvora	Koordinate čvora	Naziv pozicije	Koordinate pozicije
$N1$	(301,405)	$P1$	(98,212)
$N2$	(3,253)	$P2$	(486,248)
$N3$	(603,274)	$P3$	(371,172)
$N4$	(510,4)	$P4$	(512,55)
-	-	$P5$	(208,58)

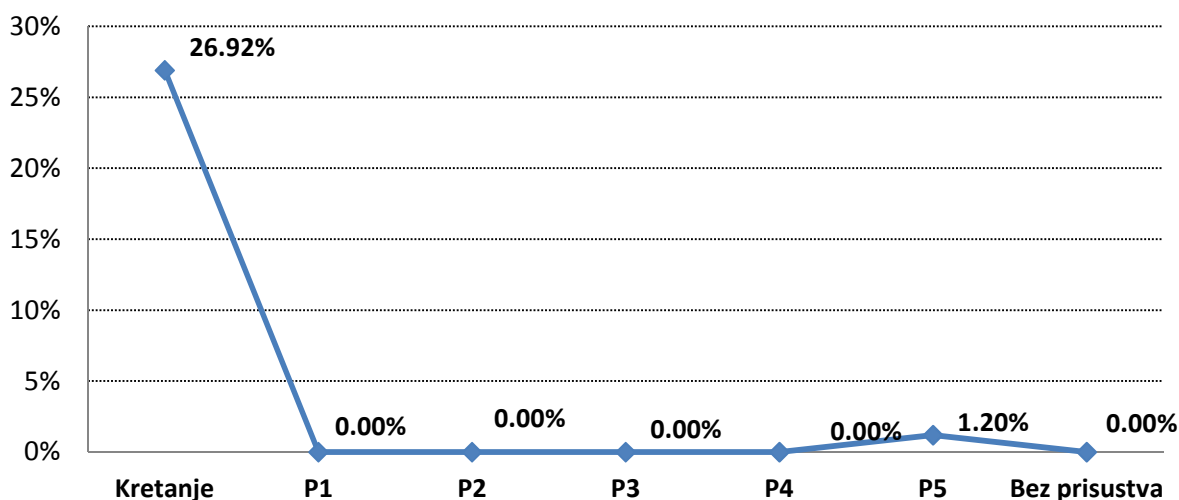
Utvrđeni scenario ponašanja osobe, za potrebe verifikacije postupaka RF detekcije, opisan je u nastavku. Inicijalnih dva i po minuta, nema prisutnih ljudi u prostoriji. Istovremeno, više ljudi se aktivno kreće po susednim prostorijama, koje su pregradnim zidovima odvojene od ispitne prostorije. Nakon perioda inicijalizacije, osoba uđe u prostoriju i nastavi da se neprekidno i nasumično kreće po prostoriji Z3 u trajanju od dva minuta. Nakon isteka perioda kretanja, osoba se zaustavi i miruje, bez i najmanjih pokreta, u svakoj od pozicija P1–P5, sa zadržavanjem po jedan minut u svakoj od navedenih pozicija, s tim da u pozicijama P1–P3 nepomično stoji, u poziciji P4 nepomično leži, a u poziciji P5 nepomično sedi. Na kraju eksperimenta, osoba napušta prostoriju Z3, a radio slika okruženja se prati u trajanju od jednog minuta. Opisanim eksperimentom se utvrđuje ponašanje radio talasa u situacijama kada osoba sedi ili leži, menjajući time formu objekta koji je neophodno otkriti, u odnosu na spektar radio talasa koji na taj objekat nailaze, raspršuju se od njega ili apsorbuju.

Analizom baznih komponenti snaga radio signala, učitanih sa radio veza između bežičnih čvorova u okviru prostorije Z3 može se potvrditi jasna razlika između radio slika okruženja u kom nema prisutnih ljudi, od okruženja u kom je prisutan čovek. Kretanje uzrokuje izraženiju varijaciju snaga signala, a time i veću varijabilnost baznih komponenti. Prisustvo nepomične osobe, bilo da stoji, sedi ili leži, takođe uzrokuje varijabilnost baznih komponenti, prvenstveno pod uticajem apsorpcije radio talasa od molekule vode ljudskog tela, bez obzira na formu koju telo zauzima u prostoru. Upravo greška detekcije, data na slici 48, koja je izuzetno niska tokom prisustva čoveka to i potvrđuje. Nešto viša greška detekcije prisutna tokom kretanja, posledica je učestanosti odabiranja, što je potvrđeno i prethodno opisanim eksperimentima. Informacionom entropijom se eliminiše greška uzrokovana diskretizacijom, što je predstavljeno na slici 49.



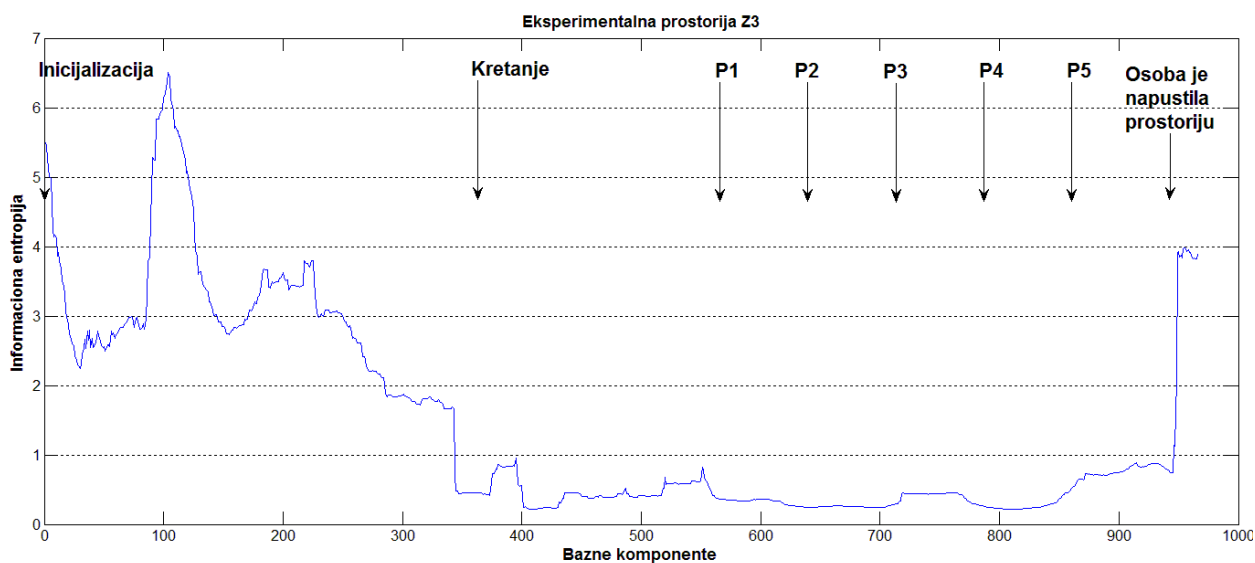
Slika 47. Bazne komponente izračunate za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji Z3 upotrebom CCIPCA inkrementalnog algoritma.

Prosečna greška detekcije



Slika 48. Greška detekcije ljudi i objekata u Z3 analizom baznih komponenti izračunatih primenom CCIPCA postupka, data kao odnos ukupnog broja baznih komponenti izračunatih tokom određene pozicije ili kretanja u odnosu na broj baznih komponenti čije vrednosti nedozvoljeno prelaze granicu detekcije – ukoliko su u slučaju prisustva niže, odnosno u slučaju odsustva više.

Informaciona entropija baznih komponenti odbiraka RSSI prikupljenih u prostoriji Z3 prikazana je na slici 49. Ukoliko se kao granica detekcije upotrebljava polovina najmanje bazne komponente, izračunate tokom perioda inicijalizacije, sve vrednosti entropije iznad granice detekcije predstavljaju odsustvo čoveka iz prostorije Z3, a sve vrednosti entropije koje su niže od granice detekcije predstavljaju detektovano prisustvo čoveka u prostoriji Z3.



Slika 49. Informaciona entropija baznih komponenti izračunata za odbirke RSSI dobavljene tokom eksperimenta u ispitnoj prostoriji Z3.

U slučaju opisanog eksperimenta, informaciona entropija u potpunosti filtrira grešku diskretizacije i omogućuje ispravnu RF detekciju ljudi. Optimizacija tehnika obrade dobavljenih odbiraka RSSI omogućuje primenu izloženog postupka za robusnu detekciju prisustva i kretanja ljudi u najraznovrsnijim scenarijima svakodnevnog života. Potvrđena je uspešna primena za detekciju kretanja i nepomičnih ljudi, bilo da stoje uspravno, sede ili leže. Eksperimentalno je potvrđena i visoka uspešnost prilikom razlikovanja prisustva ljudi od objekata, što otvara različite mogućnosti za buduća ispitivanja, s ciljem da se izložena RF detekcija ljudi u potpunosti komercijalizuje u skorijoj budućnosti, omogućujući da koncept “sveprisutnosti računarstva” postane naša svakodnevica.

POGLAVLJE 4.

ZAKLJUČAK I DISKUSIJA

Nepresušne potrebe i konkurentnost tržišta potrošačke elektronike ističu neophodnost stalnog razvoja i usavršavanja tehnologija. Ukoliko tehnologija može da ponudi jednostavnost upotrebe, nisku razvojnu i tržišnu cenu, a pri tom visok nivo efikasnosti u oblasti kojoj pripada, onda će takva tehnologija zasigurno imati uspeha. S obzirom da je tekuća decenija ključna za ekspanziju sistema Ambijentalne Inteligencije, svako unapređenje senzorskih tehnologija će pored naučne imati i veliku komercijalnu vrednost. Interakcija između čoveka i računara će postići jedan viši nivo, na kome čovek više neće biti svestan ogromnog broja uređaja, koji će biti skriveni u okruženju, ali će ispunjavati svaku njegovu želju ili čak pomisao. U cilju ostvarenja teorije “sveprisutnosti računara”, a u korak sa potrebama tržišta, predložena je inovativna tehnologija radio-frekventne detekcije prisustva i kretanja ljudi, koja bi u skorijoj budućnosti mogla, ako ne čak i da zameni, onda zasigurno da ozbiljno parira, kako po ceni, tako i po kvalitetu, mnogim postojećim senzorskim tehnologijama detekcije prisustva ljudi.

U okviru izložene doktorske disertacije detaljno su predstavljani realizovani postupci za detekciju prisustva i kretanja ljudi u zatvorenom prostoru na osnovu analize osobina prostiranja radio talasa. Osnovna motivacija za istraživanje je proizašla iz potrebe za unapređenjem metoda za detekciju ljudi i njihovu lokalizaciju radio talasima, a s ciljem da se realizuju rešenja koja će omogućiti kompetenciju sa konvencionalnim senzorskim tehnologijama, uz postavljanje jasnih smernica za buduća istraživanja. Jednom potvrđena kompetentnost će olakšati komercijalizaciju predstavljene tehnologije i obezbediti čvrstu osnovu za dalju evoluciju sistema Ambijentalne Inteligencije, kroz nevidljivu i nenametljivu interakciju između čoveka i računara.

Na osnovu predstavljenih rezultata izvršenih ispitivanja potvrđena je mogućnost detekcije prisustva i kretanja ljudi analizom prostiranja radio talasa u prostoru, prvenstveno primenom

višedimenzionalnog statističkog modela. Primenom realizovanog modela na postojeći sistem Ambijentalne Inteligencije u potpunosti je moguće ukloniti čitav niz konvencionalnih senzora za detekciju prisustva i kretanja ljudi, a da se pri tom celokupna senzorska inteligencija svede samo na upotrebu postojeće bežične mreže. Jednostavnost neophodnih numeričkih postupaka obrade ulaznih odbiraka snage radio signala omogućuje da se rezultujući postupak RF detekcije ljudi optimizuje za rad u realnom vremenu i implementira na računarima skromnijih procesnih resursa, ne narušavajući pouzdanost detekcije niti odziv u realnom vremenu.

Jednodimenzionalni model prostiranja radio talasa u okviru pojedinačne radio veze opisuje specifične obrasce ponašanja radio talasa u različitim okruženjima i u zavisnosti od ljudskog prisustva. Međutim, fizičke zakonitosti prostiranja radio talasa onemogućuju da se elementarni fenomen neregularnosti prostiranja radio talasa na učestanosti približnoj rezonanciji oscilovanja molekula vode ljudskog tela u potpunosti iskoristi za ispravno prepoznavanje prisustva ljudi. Shodno tome, izloženi model prostiranja radio talasa zahteva određene matematičke transformacije, koje obezbeđuju prevođenje ansambla više jednodimenzionalnih modela prostiranja radio talasa u jedinstven višedimenzionalni model, čime se prostor od interesa opisuje na način znatno otporniji na neželjene uticaje okruženja. Prevođenje ansambla odbiraka snage radio signala sa pojedinačnih radio veza u jedinstven vektor baznih komponenti najveće snage, omogućuje sažimanje redundantnih promenljivih, obezbeđujući identifikaciju obrazaca ponašanja koji u najvećem mogućem rasponu ističu sličnosti i razlike među promenljivama, uz održanje što je više moguće varijabilnosti prisutne u originalnom skupu ulaznih promenljivih.

Transformacioni matematički postupci prvenstveno imaju za cilj da sažmu ulazne promenljive i optimizuju ih za analizu, kojom se rezultujući višedimenzionalni model prostiranja radio talasa može predstaviti sa tri osnovna obeležja: amplitudskim, informacionim i frekvencijskim, čime se jednoznačno opisuje postojeća radio slika okruženja. Promena amplitude varijacija indikatora primljene snage radio signala nosi informaciju o disipaciji energije radio talasa, usled apsorpcije ili refleksije od objekte prisutne na propagacionoj putanji. Informaciona entropija baznih komponenti višedimenzionalnog modela potiskuje neželjeni šum, koji dopire izvan oblasti od interesa ili je uzrokovan diskretizacijom ulaznih promenljivih, omogućujući izuzetno visok stepen robustnosti RF detekcije ljudi. Indeks disperzije spektralnog domena uvodi mogućnost razlikovanja objekata žive i nežive prirode, prepoznajući mikropokrete ljudskog tela uslovljene neprekidnim disanjem. Kombinacijom navedena tri elementarna obeležja prostiranja radio talasa može se jasno razgraničiti da li je u prostoriji u kojoj se obavlja proces detekcije prisutan čovek, da li se kreće ili miruje i da li je izmenio karakteristike okruženja, bez da ta izmena utiče na tok i ispravnost RF detekcije. Upravo je nezavisnost od izmena karakteristika okruženja, odnosno ažuriranja pozadine, velika prednost izloženog postupka RF detekcije u

odnosu na ostale konvencionalne senzorske tehnologije. Veštačka inteligencija, prepoznavanje obrazaca i postupci odlučivanja obezbeđuju osnovu za efikasnu kombinaciju navedenih obeležja u cilju što preciznije analize stanja prisutnosti u okruženju, što ostavlja ovu oblast otvorenom za dalja istraživanja.

Literatura

- Ababneh, N. (2009). Radio irregularity problem in wireless sensor networks: New experimental results. *Proc. of IEEE Sarnoff Symposium*, 1-5.
- Agrawala, A.K., Youssef, M.A., Shahamat, L. (2005). Method and system for providing physical security in an area of interest. *Patentna prijava US2005055568*.
- Albert, D.E., Saltzstein, W.E. (2010). Methods, devices and security systems utilizing wireless networks and detection devices. *Rešenje o izdavanju patenta US7800496*.
- Alejos, A.V., Sanchez, M.G., Iglesias, D.R., Cuifias, I. (2009). Real-time method for human presence detection by using micro-Doppler signatures. *Proc. of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1-4.
- Andrić, M.S., Todorović, B.M. (2013). Information-Based Algorithm for Moving Object Detection. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 7(3), 304-311.
- Bai, Y. W., Ku, Y. T. (2008). Automatic room light intensity detection and control using a microprocessor and light sensors. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 54(3), 1173–1176.
- Bai, Y. -W., Shen, L. -S., Li, Z. -H. (2010). Design and Implementation of an Embedded Surveillance System by Use of Multiple Ultrasonic Sensors. *Proc. of 28th IEEE International Conference on Consumer Electronics*, 501-502.
- Bai, Y.-W., Cheng, C.-C., Xie, Z.-L. (2013). Use of a time-variation ultrasonic signal and PIR sensors to enhance the sensing reliability of an embedded surveillance system. *Proc. of 26th IEEE Canadian Conference Of Electrical And Computer Engineering (CCECE)*, 1-6.
- Bao, T. (2011). Wireless occupancy and day-light sensing. *Rešenje o izdavanju patenta US7884727*.

- Barnas, G. M., Mackenzie, C. F., Skacel, M., Hempleman, S. C., Wicke, K. M., Skacel, C. M., Loring, S. H. (1989). Amplitude Dependency of Regional Chest Wall Resistance and Elastance at Normal Breathing Frequencies. *American Review of Respiratory Disease*, 140(1), 25-30.
- Barnich, O., Van Droogenbroeck, M. (2011). ViBE: A universal background subtraction algorithm for video sequences. *IEEE Transactions on Image Processing*, 20(6), 1709-1724.
- Benezeth, Y., Laurent, H., Emile, B., Rosenberger, C. (2011). Towards a sensor for detecting human presence and activity. *Elsevier International journal on Energy and Buildings*, 43(2), 305-314.
- Berg Insight. (2011). Smart Homes and Home Automation. *M2M research series*.
- Bevilacqua, A., Di Stefano, L., Azzari, P. (2006). People Tracking Using a Time-of-Flight Depth Sensor. *Proc. of IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS '06)*, 89.
- Bjelica, M. (2013). Metode realizacije kontekstualnih platformi i kontekstualnih korisničkih sprega za primene u uređajima potrošačke elektronike. *Doktorska disertacija, Fakultet Tehničkih Nauka, Univerzitet u Novom Sad*.
- Bjelica, M. Z., Papp, I., Teslić, N., Coulon, J.-M. (2010). Set-top box-based home controller. *Proc. of 14th International Symposium on Consumer Electronics - ISCE*, 1-6.
- Boano, C. A., Brown, J., Tsiftes, N., Roedig, U., Voigt T. (2010). The impact of temperature on outdoor industrial sensornet applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 6(3), 451-459.
- Bocca, M., Luong, A., Patwari, N., Schmid, T. (2014). Dial It In: Rotating RF Sensors to Enhance Radio Tomography. *IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON 2014)*, 600-608.
- Borwick, J. (1990). Microphones Technology and Technique. *Focal Press, Oxford, UK*.
- CC2530, Specifikacija Sistema na Integrisanom Kolu. *Texas Instruments*, <http://www.ti.com/product/cc2530>, pristupljeno mart 2015.
- Chao, K.M., Shah, N., Matei, A., Zlamaniec, T., Li, W., Lo, C.C., Li, Y. (2011). Intelligent interactive system for collaborative green computing. *15th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD '11)*, 690-697.
- Chen, C.S. Lee, D.S. (2011). Energy saving effects of wireless sensor networks: A case study of convenience stores in Taiwan. *Sensors '11*, 11(2), 2013-2034.

- Cucchiara, R., Prati, A., Vezzani, R., Benini, L., Farella, E., Zappi, P. (2007). Using a wireless sensor network to enhance video surveillance. *Journal of Ubiquitous Computing and Intelligence (JUCI)*, 1(2), 187-196.
- Davis, A., Kühnlenz, F. (2007). Optical Design using Fresnel Lenses: Basic principles and some practical examples. *Optik & Photonik*, 2(4), 52–55.
- Deak, G., Curran, K., Condell, J. (2011). History Aware Device-free Passive (DfP) Localisation. *Image Processing & Communications Journal*, 16(3-4), 21-30.
- DiStasio, M.M., Bock, C.T. (2011). Entropic based activity passive detection and monitoring system. *Rešenje o izdavanju patenta US7940715*.
- Dollar, P., Belongie, S., Perona, P. (2010). The fastest pedestrian detector in the west. *Proc. of the British Machine Vision Conference*, 68.1-68.11.
- European Regulators' Group for Electricity and Gas, Smart Metering with a Focus on Electricity Regulation. (2007). *Dokument E07- RMF-04-03*.
- Faludi, R. (2010). Building Wireless Sensor Networks. *O'Reilly & Associates, Inc, Sebastopol, CA*.
- Flynn, A.M. (1988). Combining sonar and infrared sensors for mobile robot navigation. *The International Journal of Robotics Research*, 7(6), 5-14.
- Gauvreau, J.L. (2008). Wireless network system for the detection of intrusions. *Patentna prijava US2008143529*.
- Graham, B., Tachtatzis, C., Di Franco, F., Bykowski, M., Tracey, D. C., Timmons, N. F., Morrison, J. (2011). Analysis of the Effect of Human Presence on a Wireless Sensor Network. *International Journal of Ambient Computing and Intelligence (IJACI)*, 3(1), 1-13.
- Gray, R.M. (2011). Entropy and Information Theory. *Springer*.
- Griebel, S. M., Brandstein, M. S. (2001). Microphone array source localization using realizable delay vectors. *Proc. of IEEE Workshop on the Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA '01)*, 71–74.
- Guomundsson, S. A., Larsen, R., Aanaes, H., Pardo, M., Casas, J. R. (2008). TOF imaging in Smart Room Environments Towards Improved People Tracking. *Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW '08)*, 1-6.
- Habib, T.S., Habib, W.S. (2011). Intrusion detection and tracking system and methods, *Patentna prijava WO2011034721*.
- Habib, T.S., Habib, W.S., Teh-Kuang, L. (2012). An intrusion detection and tracking system. *Patentna prijava WO2012015688*.

- Han, J., Shao, L., Xu, D., Shotton, J. (2013), Enhanced computer vision with Microsoft Kinect Sensor: A review. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 43(5), 1318-1334.
- Harper, R. (2003). Inside the Smart Home. *Springer London, UK*.
- Harville, M. (2004). Stereo person tracking with adaptive plan-view templates of height and occupancy statistics. *Image and Vision Computing*, 22(2), 127–142.
- Hassanieh, H., Indyk, P., Katabi, D., Price, E. (2012). Simple and practical algorithm for sparse Fourier transform. *Proc. of the twenty-third Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA '12)*, 1183-1194.
- Hussain, S., Peters, R., Silver, D.L. (2008). Using received signal strength variation for surveillance in residential areas. *Proc. of SPIE*, vol. 6973, 1-6.
- IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.4-2011.html>, pristupljeno januar 2015.
- Ivanov, B., Ruser, H., Kellner, M. (2002). Presence detection and person identification in Smart Homes. *Proc. of International Conference on Sensors and Systems*, 80-85.
- Jacques Junior, J.C.S., Musse, S.R., Jung, C.R. (2010). Crowd analysis using computer vision techniques: a survey. *IEEE Signal Processing Magazine*, 27(5), 66–77.
- Jahn, M., Jentsch, M., Prause, C.R., Pramudianto, F., Al-Akkad, A., Reiners, R. (2010). The Energy Aware Smart Home. *Proc. of the 5th International Conference on Future Information Technology (FutureTech '10)*, 1-8.
- Janković, M., Vukosavljev, S. A., Radin, B. (2008). PIR senzor i sferno Fresnelovo sočivo kao sistem. *16. Telekomunikacioni forum TELFOR*, 995-998.
- Jolliffe, I.T. (2002). Principal Component Analysis. *Springer*.
- Joshi, S., Patwari, N., Wilson, A.J. (2010). Method and system for tracking objects using radio tomographic imaging. *Patentna prijava WO2010030956*.
- Julián, P., Andreou, A.G., Riddle, L., Shamma, S., Goldberg, D.H., and Cauwenberghs, G. (2004). A Comparative Study of Sound Localization Algorithms for Energy Aware Sensor Network Nodes. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, 51(4), 640-648.
- Kaltiokallio, O. H., Yigitler, R. J., Patwari, N. (2014). Non-invasive respiration rate monitoring using a single COTS TX-RX pair. *Proc. of the 13th international symposium on Information processing in sensor networks (IPSN '14)*, 59-70.
- Kaltiokallio, O., Bocca, M., Eriksson, L. (2010). Distributed RSSI processing for intrusion detection in indoor environments. *Proc. of 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '10)*, 404-405.

- Kanade, T., Yoshida, A., Oda, K., Kano, H., Tanaka, M. (1996). A Stereo Machine for Video-Rate Dense Depth Mapping and Its New Applications. *Proc. of the 1996 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '96)*, 196 - 202.
- Khoa, P. C. (2012). Noise Robust Voice Activity, *Master thesis, Nanyang Technological University*.
- Kim, S., Park, C., Lee, H., Lee, J. (2010). Trajectory Planning of Autonomous Robot Using Advanced Fuzzy Controller. *Proc. of IEEE International Conference on Information and Automation*, 482-485.
- Kivimäki, T., Vuorela, T., Peltola, P., Vanhala, J. (2014). A Review on Device-Free Passive Indoor Positioning Methods. *International Journal of Smart Home*, 8(1), 71-94.
- Knapp, C. H., Carter, G. C. (1976). The generalized correlation method for estimation of time delay. *IEEE Transactions on Sounds, Speech and Signal Processing*, 24(4), 320-327.
- Kobayashi, T. (2007). Monitoring system. *Rešenje o izdavanju patenta US7295109*.
- Kolb, A., Barth, E., Koch, R. (2008). ToF-sensors: New dimensions for realism and interactivity. *Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW '08)*, 1-6.
- Kosba, A. E., Abdelkader, A., Youssef, M. (2009). Analysis of a device-free passive tracking system in typical wireless environments. *Proc. of the 3rd International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS'09)*, 291-295.
- Krockel, J., Bodendorf, F. (2012). Visual customer behavior analysis at the point of sale. *International Journal on Advances in Systems and Measurements*, 5(3), 178–187.
- Kukolj, D., Janev, M.B., Papp, I., Teslić, N., Vukobrat, S. (2005). Speaker Localization under Echoic Conditions Applied to Service Robots. *Proc. of International Conference on Computer as a Tool (EUROCON '05)*, 1658-1661.
- Kwak, K., Kim, S. (2008). Sound source localization with the aid of excitation source information in home robot environments. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 54(2), 852-856.
- Lee, P.W.Q., Seah, W.K.G., Tan, H.P., Yao, Z. (2010). Wireless sensing without sensors - an experimental study of motion/intrusion detection using RF irregularity. *Journal of Measurement Science and Technology*, 21(12), 124007.
- Li, C., Lin, J. (2010). Recent advances in Doppler radar sensors for pervasive healthcare monitoring. *Proc. of the 22nd Asia-Pacific Microwave Conference*, 283–290.
- Lin, W.C., Seah, W.K.G., Li, W. (2011). Exploiting radio irregularity in the internet of things for automated people counting. *Proc. of the 22nd IEEE Symposium on Personal, Indoor, Mobile and Radio Communications (PIMRC '11)*, 1015 - 1019.

- Liu, L., Popescu, M., Skubic, M., Rantz, M., Yardibi, T., Cuddihy, P. (2011). Automatic fall detection based on Doppler radar motion signature. *Proc. of International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth)*, 222–225.
- Lu, H., Pan, W., Lane, N. D., Choudhury, T., Campbell, A. T. (2009). SoundSense: scalable sound sensing for people-centric applications on mobile phones. *Proc. of the 7th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys '09)*, 165-178.
- Luke, R.H., Anderson, D., Keller, J.M., Skubic, M. (2008). Human segmentation from video in indoor environments using fused color and texture features. *Technical Report, Electrical and Computer Engineering Department, University of Missouri, USA*.
- Luu, K. Y. (2010). Real-Time Noise-Robust Speech Detection, *Master thesis, Massachusetts Institute of Technology*.
- Magori, V. (1994). Ultrasonic sensors in air. *Proc. Of IEEE Ultrasonics Symposium*, 471-481.
- McGrath, M.J., Scanail, C.N. (2013). Sensor technologies: healthcare, wellness, and environmental applications. *ApressOpen*.
- Moghavvemi, M., Seng, L. C. (2004). Pyroelectric infrared sensor for intruder detection. *Proc. of IEEE Region 10 Conference TENCN '04 (Volume: D)*, 656–659.
- Mohammad, T. (2009). Using Ultrasonic and Infrared Sensors for Distance Measurement. *World Academy Of Science, Engineering And Technology, vol. 51*, 11-16
- Morano, R.A., Ozturk, C., Conn, R., Dubin, S., Zietz, S., Nissano, J. (1998). Structured light using pseudorandom codes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(3), 322-327.
- Mori, G., Belongie, S., Malik, J. (2005). Efficient shape matching using shape contexts. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(11), 1832-1837.
- Moshiri, B., Khalkhali, A.M., Momeni, H.R. (2007). Designing a home security system using sensor data fusion with DST and DSMT methods. *Proc. of FUSION '07*, 1-6.
- Moussa, M., Youssef, M. (2009). Smart services for smart environments: Device-free passive detection in real environments. *Proc. of IEEE PerCom'09*, 1-6.
- Mrazovac, B., Bjelica, M. Z., Kukolj, D., Vukosavljev, S., Todorović, B.M., Samardžija, D. (2012). System and Method for Passive Surveillance in Indoor Environments Based on Principal Components of the Signal Strength Variation. *Proc. of The third International Conference on Wireless Communications in Unusual and Confined Areas (ICWCUCA '12)*, 1- 6.

- Mrazovac, B., Bjelica, M., Papp, I., Stefanović, D. (2011). Metoda i sistem za bežičnu detekciju prisustva osoba u automatizaciji kućnih električnih instalacija. *Rešenje o priznanju patenta RS53536*.
- Mrazovac, B., Bjelica, M.Z., Kukolj, D., Todorović, B.M., Samardžija, D. (2012a). A Human Detection Method for Residential Smart Energy Systems Based on ZigBee RSSI Changes. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 58(3), 819-824.
- Mrazovac, B., Bjelica, M.Z., Kukolj, D., Todorović, B.M., Teslić, N. (2012b). A Human Detection Method for Residential Smart Energy Systems Based on Zigbee RSSI Changes. *Proc. of IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE '12)*, 110-111.
- Mrazovac, B., Bjelica, M.Z., Kukolj, D., Todorović, B.M., Vukosavljev, S. (2013). System Design for Passive Human Detection using Principal Components of the Signal Strength Space. *Computer Science and Information Systems (ComSIS)*, 10(1), 423-452.
- Mrazovac, B., Bjelica, M.Z., Kukolj, D., Todorović, B.M., Vukosavljev, S. (2012c). Human Presence Detection Using Radio Irregularity in Wireless Networks. *Proc. of the First International Conference on Sensor Networks (SENSORNETS '12)*, 5-14.
- Mrazovac, B., Bjelica, M.Z., Kukolj, D., Vukosavljev, S., Todorović, B.M. (2012d). System Design for Passive Human Detection using Principal Components of the Signal Strength Space. *Proc. of IEEE 19th International Conference and Workshops on Engineering of Computer Based Systems (ECBS '12)*, 164-172.
- Mrazovac, B., Bjelica, M.Z., Papp, I., Kovačević, V. (2010). Sistem za raspodeljenu reprodukciju video sadržaja zasnovanu na 3D lokalizaciji korisnika. *Zbornik radova konferencije ETRAN 2010*, 1-4.
- Mrazovac, B., Bjelica, M.Z., Papp, I., Teslić, N. (2011a). Smart Audio/Video Playback Control Based on Presence Detection and User Localization in Home Environment. *Proc. of the 2nd Eastern European Regional Conference on the Engineering of Computer Based Systems (ECBS-EERC '11)*, 44-53.
- Mrazovac, B., Bjelica, M.Z., Papp, I., Teslić, N., (2011b). Towards Ubiquitous Smart Outlets for Safety and Energetic Efficiency of Home Electric Appliances. *Proc. of International Conference on Consumer Electronics (ICCE '11)*, 324-328.
- Mrazovac, B., Bjelica, M.Z., Teslić, N., Papp, I., Temerinac, M. (2012e). Consumer-oriented Smart Grid for Energy Efficiency. *Proc. of VDE Kongress '12: Smart Grid - Intelligente Energieversorgung der Zukunft*, P_05.06.1- P_05.06.5.
- Mrazovac, B., Bjelica, M.Z., Todorović, B.M., Miljković, A., Samardžija, D. (2012f). Using Radio Irregularity for Increasing Residential Energy Awareness. *Telfor Journal*, 4(1), 31-36.

- Mrazovac, B., Jovanović, Z., Jovanović, S., Kuzmanović, M. (2013d). Smart radio technology for advanced home automation: A solution for the surveillance. *Proc. of 21th Telecommunications Forum TELFOR*, 420 – 423.
- Mrazovac, B., Kukolj, D., Papp, I., Samardžija, D. (2012g). Metod i sistem za bežičnu detekciju prisustva ljudi korišćenjem inkrementalnog postupka za određivanje baznih komponenti matrice snage radio signala i mehanizma zaključivanja sa rasplnutom logikom. *Patentna prijava RS20120285*.
- Mrazovac, B., Kukolj, D., Todorović, B. M., Samardžija, D. (2014). Postupak za razlikovanje prisustva ljudi od objekata u prostorijama sa bežičnom mrežom. *Patentna prijava RS20140638*.
- Mrazovac, B., Kukolj, D., Todorović, B. M., Samardžija, D., Bjelica, M. Z. (2013a). Metod za detekciju prisustva ljudi i zonalnu lokalizaciju u mrežama bežičnih uređaja korišćenjem distribuirane obrade informacione entropije snage radio signala. *Patentna prijava RS20130027*.
- Mrazovac, B., Todorović, B.M., Bjelica, M.Z., Kukolj, D. (2013b). Device-free indoor human presence detection method based on the information entropy of RSSI variations. *IET Electronics Letters*, 49(22), 1386-1388.
- Mrazovac, B., Todorović, B.M., Bjelica, M.Z., Kukolj, D. (2013c). Reaching the Next Level of Indoor Human Presence Detection: An RF Based Solution. *Proc. of 11th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS '13)*, 297 - 300.
- Mrazovac, B., Todorović, B.M., Kukolj, D., Samardžija, D. (2014a). A Solution for Enabling Intelligent Street Lighting in Smart Cities. *Proc. of VDE Kongress '24: Smart Cities – Intelligente Lösungen für das Leben in der Zukunft*, P_1.1 – P_1.5.
- Mrazovac, B., Todorović, B.M., Kukolj, D., Temerinac, M. (2015). Device-Free Human Presence Detection Using Frequency Domain. *Proc. of IEEE 1st International Workshop on Consumer Electronics*, 1-6.
- Nafarieh, A., Ilow, J. (2008). A Testbed for Localizing Wireless LAN Devices Using Received Signal Strength. *Proc. of 6th Annual Communication Networks and Services Research Conference (CNSR '08)*, 481–487.
- Nirjon, S., Dickerson, R.F., Asare, P., Li, Q., Hong, D., Stankovic, J.A., Hu, P., Shen, G., Jiang, X. (2013). Auditeur: a mobile-cloud service platform for acoustic event detection on smartphones. *Proc. of the 11th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys '13)*, 403-416.

- Nishiura, T., Yamada, T., Nakamura, S., Shikano, K. (2000). Localization of multiple sound sources based on a CSP analysis with a microphone array. *Proc. of IEEE ICASSP'00*, vol. 2, 1053–1055.
- Oliveira, T., Raju, M., Agrawal, D.P. (2012). Accurate Distance Estimation Using Fuzzy based combined RSSI/LQI Values in an Indoor Scenario: Experimental Verification. *Network Protocols and Algorithms Journal, Special Issue on 2nd IEEE Smart Communication Protocols and Algorithms*, 4(4), 174-199.
- Papp, I., Šarić, Z., Jovičić, S., Teslić, N. (2007). Adaptive microphone array for unknown desired speaker's transfer function. *Journal of Acoustic Society of America, Express Letters*, 122(2), 44-49.
- Patchell, J. (2004). Human detection device. *Patentna prijava WO2004008182*.
- Patwari, N., Wilson, A.J. (2014). Statistical inversion method and system for device-free localization in RF sensor networks. *Rešenje o izdavanju patenta US8818288*.
- Patwari, N., Wilson, J. (2010). RF sensor networks for device-free localization and tracking. *Proc. of the IEEE*, 98(11), 1961-1973.
- Patwari, N., Wilson, J. (2011). Spatial models for human motion-induced signal strength variance on static links. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 6(3), 791–802.
- Patwari, N., Wilson, J., Ananthanarayanan, S.P.R., Kasera, S.N., Westenskow, D.R. (2014a). Monitoring Breathing via Signal Strength in Wireless Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 13(8), 1774-1786.
- Pensas, H., Raula, H., Vanhala, J. (2009). Energy efficient sensor network with service discovery for smart home environments. *Proc. of 3rd International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM '09)*, 399-404.
- Polivka, J. (2007). An overview of microwave sensor technology. *High Frequency Electronics*, 6(4), 32-42.
- Puccinelli, D., Foerster, A., Puiatti, A., Giordano, S. (2011). Radio-based trail usage monitoring with low-end motes. *Proc. of the 7th IEEE International Workshop on Sensor Networks and Systems for Pervasive Computing (PerSens '11)*, 196-201.
- Puzo, E.L., Brenner, R.P., Walker, T.O., Anderson, C.R. (2011). The Matrix: a roadside wireless security system. *Proc. of Virginia Tech Symp. on Wireless Personal Communications*, 1-7.
- Rahman, T., Adams, A.T., Zhang, M., Cherry, E., Zhou, B., Peng, H., Choudhury, T. (2014). BodyBeat: a mobile system for sensing non-speech body sounds, *Proc. of the 12th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys '14)*, 2-13.

- Rajgarhia, A., Stann, F., Heidemann, J. (2004). Privacy-sensitive monitoring with a mix of IR sensors and cameras. *Proc. of the Second International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications*, 21–29.
- Rappaport, T. S. (2001). *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd Edition. *Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ*.
- Reggiani, L., Fiorina, J., Gezici, S., Morosi, S., Najar, M. (2013). Radio Context Awareness and Applications. *Journal of Sensors*, 2013, Article ID 491092, 1-12.
- Ross, M. J., Shaffer, H. L., Cohen, A., Freudberg, R., Manley, H. J. (1974). Average magnitude difference function pitch extractor. *IEEE Transactions on Sounds, Speech and Signal Processing*, 22(5), 353-362.
- Ruser, H., Von Jena, A., Magori, V., Trankler, H.R. (1999). A low cost ultrasonic microwave multisensor for robust sensing of velocity and range. *Proc. of 9th International Conference on Sensors, Transducers and Systems (Sensor '99)*, 255-260.
- Sabatini, A., Genovese, V., Guglielmelli, E., Mantuano, A., Ratti, G., Dario, P. (1995). A low-cost, composite sensor array combining ultrasonic and infrared proximity sensors. *Proc. of International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol. 3*, 120-126.
- Šarić, Z. M., Papp, I., Kukolj, D., Velikić, I., Velikić, G. (2014), Partitioned block frequency domain acoustic echo canceller with fast multiple iterations. *Digital Signal Processing, vol. 27*, 119-128.
- Shadbolt, N. (2003). Ambient Intelligence. *IEEE Intelligent Systems*, 18(4), 2-3.
- Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell Systems Technology Journal*, 27, 379-423 and 623-656.
- Soyer, E.B. (2009). Pyroelectric Infrared (PIR) Sensor Based Event Detection. *Master Thesis, The Institute of Engineering and Science of Bilkent University, Turkey*.
- Srinivasan, K., Levis, P. (2006). RSSI is under appreciated. *Proc. of 3rd Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets 2006)*, 1-5.
- Stauffer, C., Grimson, W.E.L. (1999). Adaptive background mixture models for real-time tracking. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol. 2*, 1-7.
- Stürmer, M., Penne, J., Hornegger, J. (2008). Standardization of Intensity-Values Acquired by Time-of-Flight-Cameras. *Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW '08)*, 1-6.
- Sundramoorthy, V., Liu, Q., Cooper, G., Linge, N., Cooper, J. (2010). DEHEMS: a user-driven domestic en-ergy monitoring system. *Proc. of Internet of Things (IOT '10)*, 1-8.

- Tanner, R., Studer, M., Zanolini, A., Hartmann, A. (2008). People Detection and Tracking with TOF Sensor. *Proc. of IEEE Fifth International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS '08)*, 356-361.
- Teixeira, T., Dublon, G., Savvides, A. (2010). A survey of human-sensing: Methods for detecting presence, count, location, track and identity. *ACM Computing Surveys*, vol. 5, 1-35.
- Teixeira, T., Savvides, A. (2007). Lightweight people counting and localizing in indoor spaces using camera sensor nodes. *ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras (ICDSC'07)*, 36-43.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission, Intrusion Detection Systems and Subsystems: Technical Information for NRC Licensees. (2011). *NUREG-1959*.
- Uchida, T. H., Smith, W. R., Murphy, C., Anderson, C. R. (2010). Development of a Passive Wireless Surveillance Network. *Proc. of Virginia Tech Symposium on Wireless Personal Communications*, 1-7.
- Valera, M., Velastin, S. (2005). Intelligent distributed surveillance systems: a review. *IEE Proceedings on Vision, Image and Signal Processing*, 152(2), 192-204.
- Van Doorn, E., Rangaswamy, S. (2013). Perimeter security system. *Rešenje o izdavanju patenta US8456304*.
- Wang, J., Gao, Q., Zhang, X., Wang, H. (2012). Device-free localisation with wireless networks based on compressive sensing. *IET Communications*, 6(15), 2395-2403.
- Weiser, M. (1999). The Computer for the 21st Century. *ACM Sigmobile: Mobile Computing and Communications Review*, 3(3), 3-11.
- Weng, J.G., Zhang, Y., Hwang, W.S. (2003). Candid Covariance-free Incremental Principal Component Analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(8), 1034-1040.
- Wennerström, H. (2013). Meteorological Impact and Transmission Errors in Outdoor Wireless Sensor Networks. *Dissertation for the degree of Licentiate of Philosophy in Computer Science*, Uppsala Universitet.
- Wilson, A. J. (2010a). Device-free localization with received signal strength measurements in wireless networks. *PhD dissertation, The University of Utah*.
- Wilson, A.J., Patwari, N.K. (2012). Systems and method of device-free motion detection and presence detection. *Patentna prijava WO2012082758*.
- Wilson, J., Patwari, N. (2010). Radio tomographic imaging with wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 9(5), 621-632.

- Wood, A., Stankovic, J.A., Virone, G., Selavo, L., He, Z., Cao, Q., Doan, T., Wu, Y., Fang, L., Stoleru, R. (2008). Context-aware wireless sensor networks for assisted living and residential monitoring. *IEEE Network*, 22(4), 26–33.
- Woyach, K., Puccinelli, D., Haenggi, M. (2006). Sensorless sensing in wireless networks: Implementation and measurements. *Proc. of WinMee'06*, 1-8.
- Yatani, K., Truong, K. N. (2012). BodyScope: a wearable acoustic sensor for activity recognition. *Proc. of ACM Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp '12)*, 341-350.
- Yoshiike, N., Morinaka, K., Hashimoto, K., Kawaguri, M., Tanaka, S. (1999). 360° direction type human information sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 77(3), 199-208.
- Youssef, M., Mah, M., Agrawala, A. (2007). Challenges: device-free passive localization for wireless environments. *Proc. of the 13th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, 222–229.
- Zhang, C., Florencio, D., Ba, D. E., Zhengyou Z. (2008), Maximum Likelihood Sound Source Localization and Beamforming for Directional Microphone Arrays in Distributed Meetings. *IEEE Transactions on Multimedia*, 10(3), 538-548.
- Zhang, D., Ma, J., Chen, Q., Ni, L.M. (2007). An RF-based system for tracking transceiver-free objects. *Proc. of IEEE PerCom'07*, 135-144.
- Zhang, D., Ni, L. M. (2009). Dynamic Clustering for Tracking Multiple Transceiver-Free Objects. *Proc. of the Seventh Annual IEEE International Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom '09)*, 1-8.
- Zhang, Y., Ji, Q. (2009a). Efficient Sensor Selection for Active Information Fusion. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 40(3), 719- 728.
- Zhang, Z. (2012). Microsoft kinect sensor and its effect. *IEEE Multimedia*, 19(2), 4-10.
- Zhao, Y. (2012). Localization of people using received signal strength measurements in wireless sensor networks. *PhD disertation, The University of Utah*.
- Zhou, G., He, T., Krishnamurthy, S., Stankovic, J.A. (2004). Impact of radio irregularity on wireless sensor networks. *Proc. of the 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys '04)*, 125-138.
- Zpryme Report. (2009). Smart Grid Market Could Double in Four Years. *Zpryme Smart Grid Market*.