



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
U NOVOM SADU



Ivana Šenk

**Model za lokalizaciju proizvoda primenom
tehnologija Interneta stvari**

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:	Ивана Шенк
Ментор, МН:	др Гордана Остојић, ванр. проф.
Наслов рада, НР:	Модел за локализацију производа применом технологија Интернета ствари
Језик публикације, ЈП:	српски
Језик извода, ЈИ:	српски/енглески
Земља публикација, ЗП:	Република Србија
Уже географско подручје, УГП:	Аутономна покрајина Војводина
Година, ГО:	2016
Издавач, ИЗ:	Ауторски репринт
Место и адреса, МА:	Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад
Физички опис рада, ФО: (поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)	6/187/110/60/80/0/0
Научна област, НО:	Мехатроника
Научна дисциплина, НД:	Мехатроника
Предметна одредница/Кључне речи, ПО:	Локализација, Интернет ствари, РФИД, бежичне сензорске мреже
УДК	
Чува се, ЧУ:	Библиотека Факултета техничких наука, Нови Сад, Р. Србија
Важна напомена, ВН:	
Извод, ИЗ:	У докторској дисертацији разматрана је могућност локализације производа применом технологија Интернета ствари. Постављен је модел за локализацију производа који примењује РФИД технологију и бежичне сензорске мреже. У оквиру модела, предложено је и реализован хибридни метод за локализацију производа који комбинује податке добијене методом најближих суседа и методом оптимизације ројем честица, а затим и хибридни метод за локализацију производа који комбинује податке добијене у РФИД систему и у бежичној сензорској мрежи. Могућности примене предложеног модела су експериментално испитане у симулираним системима и у лабораторијској околини са индустријским елементима.
Датум прихватања теме, ДП:	22.01.2015.
Датум одбране, ДО:	
Чланови комисије, КО:	Председник: др Драган Кукољ, ред. проф. Члан: др Љубомир Миладиновић, ред. проф. Члан: др Милован Лазаревић, ванр. проф. Члан: др Стеван Станковски, ред. проф. Члан, ментор: др Гордана Остојић, ванр. проф.
	Потпис ментора



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 :	Ivana Šenk
Mentor, MN :	Associate professor Gordana Ostojić, PhD
Title, TI :	A model for product localization based on Internet of Things technologies
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian/English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year, PY :	2016
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	6/187/110/60/80/0/0
Scientific field, SF :	Mechatronics
Scientific discipline, SD :	Mechatronics
Subject/Key words, S/KW :	Localization, Internet of Things, RFID, wireless sensor networks
UC	
Holding data, HD :	Library of Faculty of Technical Sciences, Trg D. Obradovića 6, Novi Sad, Serbia
Note, N :	
Abstract, AB :	<p>This dissertation discusses the possibilities of product localization based on Internet of things technologies. A model for product localization has been proposed based on RFID technology and wireless sensor networks. Within the model, a hybrid localization method which combines outputs from nearest neighbours method and particle swarm optimization for product localization has been proposed and developed, followed by a hybrid localization method which combines data from RFID system and wireless sensor network. The application possibilities for the proposed model have been experimentally tested in simulated systems and in laboratory conditions with industrial elements.</p>
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	22.01.2015.
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	President: Professor Dragan Kukolj, PhD
	Member: Professor Ljubomir Miladinović, PhD
	Member: Assoc. professor Milovan Lazarević, PhD
	Member: Professor Stevan Stankovski, PhD
	Member, Mentor: Assoc. professor Gordana Ostojić, PhD
	Mentor's sign

REZIME

Savremeni trendovi u automatizovanim sistemima uključuju integraciju sistema, uređaja i proizvoda u jedinstven informacioni sistem, koji se naziva Internet stvari. Tehnologije koje su pokretači Interneta stvari podrazumevaju postojanje pametnih uređaja koji mogu da imaju senzorske, procesorske i komunikacione podsisteme, a uključuju RFID tehnologiju, bežične senzorske mreže, kao i mnoge druge tehnologije. Sistemi koji su deo Interneta stvari treba da omogućće stalno praćenje i razmenu podataka među različitim objektima i sistemima, kako bi se obezbedile pravovremene informacije i unapredile mogućnosti upravljanja sistemom i nadzora sistema. Jedan od neophodnih preduslova za uspostavljanje Interneta stvari je poznavanje pozicije objekata koji su njegov deo.

U okviru ove disertacije razmatrana je mogućnost lokalizacije proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari, sa naglaskom na primeni RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža. Postavljen je model za lokalizaciju proizvoda koji se zasniva na referentnom modelu Interneta stvari, a uključuje specifičnosti primene navedenih tehnologija za lokalizaciju proizvoda u industrijskom okruženju, a prvenstveno u prostorima za skladištenje proizvoda. U okviru modela predložena su i realizovana dva hibridna metoda za lokalizaciju proizvoda: hibridni metod PF_WKNN_PSO koji koristi samo podatke izmerene u RFID sistemu ili u bežičnoj senzorskoj mreži, a zasniva se na fuziji podataka dobijenih primenom metoda najbližih suseda i metoda optimizacije rojem čestica, i hibridni metod PF_RFID_WSN koji se zasniva na fuziji podataka dobijenih primenom metoda PF_WKNN_PSO u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži. Mogućnosti primene predloženih hibridnih metoda eksperimentalno su ispitane u simuliranim sistemima, kao i u okviru dva test okruženja u laboratorijskoj okolini sa industrijskim elementima. Kako bi se formirao uzorak za poređenje rezultata, u istim eksperimentalnim uslovima ispitana su i četiri nehibridna metoda za lokalizaciju proizvoda, a zatim su upoređeni dobijeni parametri tačnosti i preciznosti lokalizacije. Utvrđeno je da se predloženim hibridnim metodima dobijaju parametri tačnosti i preciznosti lokalizacije koji su, u zavisnosti od ispitivanog slučaja, ili bolji ili u nivou najboljih postignutih rezultata pojedinačnim metodima, odnosno da se dobija pouzdaniji sistem za lokalizaciju proizvoda nego sistemi koji primenjuju samo jedan metod ili tehnologiju za lokalizaciju proizvoda.

ABSTRACT

Current trends in research related to automated systems involve integration of systems, devices and products in a unique information system, which is referred to as the Internet of Things, or IoT. Technologies that support the development of the Internet of Things presume the existence of smart devices with sensory, processing and communication capabilities, and, among other technologies, include RFID technology and wireless sensor networks. Systems within the Internet of Things should enable constant tracking and data exchange among various objects and systems in order to provide adequate information and enhance the possibilities for system control and supervision. One of the necessary preconditions for establishing the Internet of Things is knowing the position of objects that are part of it.

This dissertation discusses the possibilities of product localization based on Internet of Things technologies, focused on RFID technology and wireless sensor networks. A model for product localization based on these technologies is proposed, which is based on the Internet of Things Reference Model, but emphasizes specific aspects of application of RFID technology and wireless sensor networks for product localization in industrial conditions, primarily in product storage locations. Within the proposed model, two hybrid methods for product localization were introduced and developed: a hybrid method PF_WKNN_PSO which uses only the data acquired within the RFID system or the wireless sensor network and is based on data fusion of positions estimated by the nearest neighbour method and particle swarm optimization, and a hybrid method PF_RFID_WSN which is based on data fusion of positions estimated by the PF_WKNN_PSO method in the RFID system and in the wireless sensor network. The application possibilities for the developed methods were experimentally tested in simulated systems and in two test beds in laboratory conditions with industrial elements. In order to assess the results, four non-hybrid methods for product localization were also tested within the same experimental conditions, and the calculated accuracy and precision of various methods was compared. Based on the results, it was concluded that the proposed hybrid methods provide localization accuracy and precision parameters that are, depending on the tested case, either better or at least on the same level as the best parameters gained by other methods, which shows that the proposed localization system is more reliable than systems that apply only one method or one technology.

ZAHVALNICA

Rad na ovoj disertaciji finansijski je podržalo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, kroz projekte III46001 i TR35001, kao i Pokrajinski sekretarijat za nauku i tehnološki razvoj AP Vojvodine kroz projekat 451-1948.

Pre svega, želim da se zahvalim svojoj mentorki, prof. Gordani Ostojić, na svim komentarima, smernicama i kritikama, kao i na podršci tokom naše dosadašnje saradnje. Takođe, zahvalnost dugujem i prof. Stevanu Stankovskom, kao i dragim kolegama iz našeg istraživačkog tima, među kojima posebno Laciju, Branetu, Srđanu i Nikoli, na svim diskusijama, idejama, sugestijama, kao i na pozitivnoj radnoj atmosferi i vedrom duhu, kojima su mi olakšali i ispunili dosadašnji rad.

Zatim, želim da se zahvalim svojoj porodici i prijateljima, koji su uvek bili uz mene, pružali mi podršku i razumevanje, pogotovo u mnogim trenucima kada nisam imala vremena za sve.

Na kraju, posebnu zahvalnost dugujem svom suprugu Endreu, koji je verovao u mene, gurao me napred i pomagao mi, preuzimajući pri tome na sebe mnoge moje obaveze, čime mi je omogućio da provedem brojne sate ispred računara i ovo istraživanje privedem kraju.

Hvala.

Ivana

SADRŽAJ

REZIME	i
ABSTRACT	ii
ZAHVALNICA	iii
SPISAK SLIKA	vi
SPISAK TABELA	xi
<u>1</u> UVOD	1
1.1 MOTIVACIJA I PREDMET ISTRAŽIVANJA	3
1.2 CILJ ISTRAŽIVANJA I HIPOTEZE	7
1.3 STRUKTURA DISERTACIJE	8
<u>2</u> OSNOVNA TEORIJSKA RAZMATRANJA SA PREGLEDOM LITERATURE	10
2.1 RFID TEHNOLOGIJA	10
2.1.1 RFID tag	12
2.1.2 RFID čitač	14
2.1.3 Principi rada u RFID sistemima	15
2.1.4 Standardi u RFID sistemima	16
2.2 BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE	17
2.2.1 Bežični senzorski moduli	20
2.2.2 Senzorske pločice	22
2.2.3 Principi rada u bežičnim senzorskim mrežama	22
2.2.4 Programiranje bežičnih senzorskih modula i TinyOS	24
2.3 SISTEMI I TEHNOLOGIJE ZA LOKALIZACIJU	24
2.3.1 Merenja za lokalizaciju u RF bežičnim sistemima	26
2.3.2 Metodi za lokalizaciju u RF bežičnim sistemima	29

2.3.3 Procena lokalizacionog metoda	43
-------------------------------------	----

3 MLPIS - MODEL ZA LOKALIZACIJU PROIZVODA PRIMENOM TEHNOLOGIJA INTERNETA

STVARI	45
---------------	-----------

4 EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

4.1 OPREMA ZA EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

4.1.1 RFID sistem	66
-------------------	----

4.1.2 Bežična senzorska mreža	66
-------------------------------	----

4.2 APLIKACIJA ZA PRIKUPLJANJE PODATAKA

4.3 PRVA FAZA ISTRAŽIVANJA

4.3.1 Postavka eksperimenta	70
-----------------------------	----

4.3.2 Multilateracija	79
-----------------------	----

4.3.3 Metod najbližih suseda	82
------------------------------	----

4.3.4 Optimizacija rojem čestica	92
----------------------------------	----

4.3.5 Čestični filter	102
-----------------------	-----

4.4 DRUGA FAZA ISTRAŽIVANJA

4.4.1 Realizacija hibridnih metoda za lokalizaciju proizvoda predloženih u okviru modela MLPIS111	
---	--

4.5 TREĆA FAZA ISTRAŽIVANJA

4.5.1 Postavka eksperimenta	138
-----------------------------	-----

4.5.2 Metod najbližih suseda	141
------------------------------	-----

4.5.3 Metod optimizacije rojem čestica	145
--	-----

4.5.4 Metod PF_WKNN_PSO	148
-------------------------	-----

4.5.5 Metod PF_RFID_WSN	151
-------------------------	-----

5 DISKUSIJA

6 ZAKLJUČCI I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA

LITERATURA

SPISAK SLIKA

Slika 1. Osnovne komponente RFID sistema	11
Slika 2. Komponente RFID čitača	14
Slika 3. Bežična senzorska mreža.....	17
Slika 4. Komponente bežičnog senzorskog modula	20
Slika 5. Trijangulacija	32
Slika 6. Trilateracija.....	32
Slika 7. Multilateracija	33
Slika 8. Referentni model Interneta stvari	47
Slika 9. Osnovna hijerarhijska struktura modela MLPIS za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari	48
Slika 10. Prvi nivo modela MLPIS.....	50
Slika 11. Drugi nivo modela MLPIS.....	52
Slika 12. Treći nivo modela MLPIS.....	56
Slika 13. Četvrti nivo modela MLPIS.....	57
Slika 14. Peti nivo modela MLPIS.....	59
Slika 15. Šesti nivo modela MLPIS.....	61
Slika 16. Sedmi nivo modela MLPIS	63
Slika 17. Grafički korisnički interfejs aplikacije za prikupljanje podataka	68
Slika 18. Test laboratorija	71
Slika 19. Merno polje u test laboratoriji sa referentnim i mernim tačkama.....	72
Slika 20. RSSI mape za četiri referentne tačke u RFID sistemu u test laboratoriji	73
Slika 21. RSSI mape za četiri referentne tačke u bežičnoj senzorskoj mreži u test laboratoriji.....	73
Slika 22. Pozicije test tačaka u test laboratoriji – nasumično raspoređene test tačke (levo), tačke duž putanje 1 (sredina) i tačke duž putanje 2 (desno)	74
Slika 23. Funkcije propagacije signala u RFID sistemu (levo) i bežičnoj senzorskoj mreži (desno)	75
Slika 24. Raspodela izračunatih grešaka za izmerene RSSI vrednosti po rastojanju na kom su izmerene i odgovarajuća normalna raspodela; levo – RFID sistem, desno – bežična senzorska mreža.....	76
Slika 25. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod multilateracije u RFID sistemu; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	81

Slika 26. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod multilateracije u bežičnoj senzorskoj mreži; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	82
Slika 27. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda za RSSI vrednosti u mernim tačkama u RFID sistemu; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	84
Slika 28. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda za RSSI vrednosti u test tačkama u RFID sistemu; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulacione RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	85
Slika 29. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod najbližih suseda u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, za broj suseda $k=19$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	86
Slika 30. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod najbližih suseda u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama, za broj suseda $k=19$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	87
Slika 31. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda za RSSI vrednosti u mernim tačkama u bežičnoj senzorskoj mreži; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	89
Slika 32. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda za RSSI vrednosti u test tačkama u bežičnoj senzorskoj mreži; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	89
Slika 33. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod najbližih suseda u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, za broj suseda $k=14$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	90
Slika 34. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod najbližih suseda u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama, za broj suseda $k=14$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	92
Slika 35. Bilinearna interpolacija RSSI vrednosti u jednom kvadratu merne mreže.....	93
Slika 36. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja čestica za RSSI vrednosti u mernim tačkama u RFID sistemu.....	95
Slika 37. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja čestica za RSSI vrednosti u test tačkama u RFID sistemu.....	95
Slika 38. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod optimizacije rojem čestica u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, za broj čestica $M=20$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	96
Slika 39. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod optimizacije rojem čestica u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama, za broj čestica $M=20$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	97
Slika 40. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja čestica za RSSI vrednosti u mernim tačkama u bežičnoj senzorskoj mreži.....	99

Slika 41. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja čestica za RSSI vrednosti u test tačkama u bežičnoj senzorskoj mreži.....	99
Slika 42. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod optimizacije rojem čestica u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, za broj čestica $M=55$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema	100
Slika 43. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod optimizacije rojem čestica u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama, za broj čestica $M=55$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema	101
Slika 44. Kumulativna funkcija raspodele greške za čestični filter u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema	105
Slika 45. Kumulativna funkcija raspodele greške za čestični filter u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u slučajno raspoređenim test tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema	106
Slika 46. Kumulativna funkcija raspodele greške za čestični filter u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u različitim uzorcima test tačkama u realnom sistemu; R – RSSI vrednosti izmerene u slučajno raspoređenim test tačkama, P1, P2 –RSSI vrednosti izmerene u test tačkama duž putanje kretanja proizvoda.....	107
Slika 47. Kumulativna funkcija raspodele greške za čestični filter u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	108
Slika 48. Kumulativna funkcija raspodele greške za čestični filter u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u slučajno raspoređenim test tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema	110
Slika 49. Kumulativna funkcija raspodele greške za čestični filter u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u različitim uzorcima test tačkama u realnom sistemu; R – RSSI vrednosti izmerene u slučajno raspoređenim test tačkama, P1, P2 –RSSI vrednosti izmerene u test tačkama duž putanje kretanja proizvoda.....	110
Slika 50. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO sa $PMT = 0,5$, u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema	121
Slika 51. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO sa $PMT = 0,5$, u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u slučajno raspoređenim test tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	122
Slika 52. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO sa $PMT = 0,5$, u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u različitim uzorcima test tačkama u realnom sistemu; R – RSSI vrednosti izmerene u slučajno raspoređenim test tačkama, P1, P2 –RSSI vrednosti izmerene u test tačkama duž putanje kretanja proizvoda.....	123

Slika 53. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO sa $PMT = 0,5$, u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	129
Slika 54. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO sa $PMT = 0,5$, u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u slučajno raspoređenim test tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema	131
Slika 55. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO sa $PMT = 0,5$, u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u različitim uzorcima test tačaka u realnom sistemu; R – RSSI vrednosti izmerene u slučajno raspoređenim test tačkama, P1, P2 – RSSI vrednosti izmerene u test tačkama duž putanje kretanja proizvoda.....	131
Slika 56. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod FP_RFID_BSM, za RSSI vrednosti u mernim tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	135
Slika 57. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod FP_RFID_BSM, za RSSI vrednosti u test tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema.....	137
Slika 58. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod FP_RFID_BSM, za RSSI vrednosti u različitim uzorcima test tačaka u realnom sistemu; R – RSSI vrednosti izmerene u slučajno raspoređenim test tačkama, P1, P2 – RSSI vrednosti izmerene u test tačkama duž putanje kretanja proizvoda.....	137
Slika 59. Montažna linija u laboratoriji MI-G3-Lab.....	139
Slika 60. Merno polje sa referentnim i mernim tačkama u industrijskoj laboratoriji	140
Slika 61. RSSI mape za četiri referentne tačke u RFID sistemu u industrijskoj laboratoriji.....	140
Slika 62. RSSI mape za četiri referentne tačke u bežičnoj senzorskoj mreži u industrijskoj laboratoriji	140
Slika 63. Pozicije test tačaka u industrijskoj laboratoriji.....	140
Slika 64. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda u RFID sistemu	142
Slika 65. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod najbližih suseda u RFID sistemu.....	142
Slika 66. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda u bežičnoj senzorskoj mreži.	144
Slika 67. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod najbližih suseda u bežičnoj senzorskoj mreži	144
Slika 68. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja čestica u RFID sistemu	145
Slika 69. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod optimizacije rojem čestica u RFID sistemu	146
Slika 70. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja čestica u bežičnoj senzorskoj mreži.	147
Slika 71. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod optimizacije rojem čestica u bežičnoj senzorskoj mreži.....	148
Slika 72. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO u RFID sistemu.....	150

Slika 73. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži	151
Slika 74. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod FP_RFID_BSM	153
Slika 75. Uporedna analiza parametara tačnosti i preciznosti za merne tačke u simuliranim sistemima	166
Slika 76. Uporedna analiza parametara tačnosti i preciznosti za test tačke u simuliranim sistemima	166
Slika 77. Uporedna analiza parametara tačnosti i preciznosti za merne tačke u test laboratoriji.....	167
Slika 78. Uporedna analiza parametara tačnosti i preciznosti za test tačke u test laboratoriji.....	167
Slika 79. Uporedna analiza parametara tačnosti i preciznosti za merne tačke u industrijskoj laboratoriji	168
Slika 80. Uporedna analiza parametara tačnosti i preciznosti za test tačke u industrijskoj laboratoriji	168

SPISAK TABELA

Tabela 1. Izračunati parametri funkcija propagacije signala	75
Tabela 2. Parametri normalne raspodele koja odgovara raspodeli izračunatih grešaka za izmerene RSSI vrednosti po rastojanju na kom su izmerene.....	76
Tabela 3. Parametri normalne raspodele koja odgovara raspodeli izračunatih grešaka za simulirane RSSI vrednosti po rastojanju na kom su simulirane	77
Tabela 4. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod multilateracije u RFID sistemu, dati u [m].....	80
Tabela 5. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod multilateracije u bežičnoj senzorskoj mreži, dati u [m].....	82
Tabela 6. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod najbližih suseda u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama za broj suseda $k=19$, dati u [m]	86
Tabela 7. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod najbližih suseda u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama za broj suseda $k=19$, dati u [m]	87
Tabela 8. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod najbližih suseda u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama za broj suseda $k=14$, dati u [m].....	91
Tabela 9. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod najbližih suseda u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama za broj suseda $k=14$, dati u [m]	91
Tabela 10. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod optimizacije rojem čestica u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama za broj čestica $M=20$, dati u [m].....	96
Tabela 11. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod optimizacije rojem čestica u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama za broj čestica $M=20$, dati u [m]	98
Tabela 12. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod optimizacije rojem čestica u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama za broj čestica $M=55$, dati u [m]	100
Tabela 13. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod optimizacije rojem čestica u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama za broj čestica $M=55$, dati u [m].....	101
Tabela 14. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za čestični filter u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, dati u [m]	104
Tabela 15. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za čestični filter u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama, dati u [m].....	106
Tabela 16. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za čestični filter u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, dati u [m]	108
Tabela 17. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za čestični filter u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama, dati u [m].....	109
Tabela 18. Verovatnoća da se stvarna pozicija proizvoda nalazi na rastojanju d od koordinata dobijenih primenom metoda najbližih suseda	112

Tabela 19. Verovatnoća da se stvarna pozicija proizvoda nalazi na rastojanju d od koordinata dobijenih primenom metoda optimizacije rojem čestica.....	113
Tabela 20. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za predloženi metod PF_WKNN_PSO u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu merenja u realnom sistemu, dati u [m]	116
Tabela 21. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu merenja u realnom sistemu, dati u [m]	117
Tabela 22. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu simuliranih sistema, dati u [m].....	118
Tabela 23. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu simuliranih sistema, dati u [m]	119
Tabela 24. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO sa $PMT = 0,5$, u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, dati u [m]	120
Tabela 25. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO sa $PMT = 0,5$, u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama, dati u [m]	122
Tabela 26. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu merenja u realnom sistemu, dati u [m]	125
Tabela 27. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu merenja u realnom sistemu, dati u [m].....	126
Tabela 28. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu simuliranih sistema, dati u [m]	127
Tabela 29. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu simuliranih sistema, dati u [m]	128
Tabela 30. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO sa $PMT = 0,5$, u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, dati u [m]	128
Tabela 31. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO sa $PMT = 0,5$, u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama, dati u [m].....	130
Tabela 32. Verovatnoća da se stvarna pozicija proizvoda nalazi na rastojanju d od koordinata dobijenih primenom metoda PF_WKNN_PSO	132
Tabela 33. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod FP_RFID_BSM, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, dati u [m]	134
Tabela 34. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod FP_RFID_BSM, za RSSI vrednosti u test tačkama, dati u [m].....	136

Tabela 35. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod najbližih suseda u RFID sistemu, za broj suseda $k=4$, dati u [m]	143
Tabela 36. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod najbližih suseda u bežičnoj senzorskoj mreži, za broj suseda $k=4$, dati u [m].....	143
Tabela 37. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod optimizacije rojem čestica u RFID sistemu, za broj čestica $M=20$, dati u [m]	146
Tabela 38. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod optimizacije rojem čestica u bežičnoj senzorskoj mreži, za broj čestica $M=20$, dati u [m].....	147
Tabela 39. Verovatnoća da se stvarna pozicija proizvoda nalazi na rastojanju d od koordinata dobijenih primenom metoda najbližih suseda i optimizacije rojem čestica	149
Tabela 40. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u RFID sistemu, dati u [m].....	149
Tabela 41. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži, dati u [m]	150
Tabela 42. Verovatnoća da se stvarna pozicija proizvoda nalazi na rastojanju d od koordinata dobijenih u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži	152
Tabela 43. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod FP_RFID_BSM, dati u [m]	152
Tabela 44. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za simulirane vrednosti u mernim tačkama za metode testirane u prvoj fazi istraživanja, dati u [m]	157
Tabela 45. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za simulirane vrednosti u test tačkama za metode testirane u prvoj fazi istraživanja, dati u [m]	157
Tabela 46. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u mernim tačkama u test laboratoriji za metode testirane u prvoj fazi istraživanja, dati u [m].....	158
Tabela 47. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u test tačkama u test laboratoriji za metode testirane u prvoj fazi istraživanja, dati u [m].....	158
Tabela 48. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za simulirane vrednosti u mernim tačkama, dati u [m]	160
Tabela 49. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za simulirane vrednosti u test tačkama, dati u [m].....	160
Tabela 50. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u mernim tačkama u test laboratoriji, dati u [m].....	161
Tabela 51. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u test tačkama u test laboratoriji, dati u [m]	161
Tabela 52. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u mernim tačkama u industrijskoj laboratoriji, dati u [m]	162

Tabela 53. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u test tačkama u industrijskoj laboratoriji, dati u [m].....	162
Tabela 54. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za simulirane vrednosti u mernim tačkama, dati u [m]	164
Tabela 55. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za simulirane vrednosti u test tačkama, dati u [m].....	164
Tabela 56. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u mernim tačkama u test laboratoriji, dati u [m].....	164
Tabela 57. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u test tačkama u test laboratoriji, dati u [m]	165
Tabela 58. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u mernim tačkama u industrijskoj laboratoriji, dati u [m]	165
Tabela 59. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u test tačkama u industrijskoj laboratoriji, dati u [m].....	165
Tabela 60. Uporedni pregled vrednosti greške lokalizacije za različite metode iz literature.....	170

1 UVOD

Razvoj tehnologija u oblasti automatizacije u današnje vreme podrazumeva povezivanje fizičkih objekata i sistema u jedinstven informacioni sistem i formiranje takozvanog Interneta stvari (engl. *Internet of Things, IoT*). Internet stvari se zasniva na razvoju različitih grana nauke i tehnike sa ciljem povezivanja informacija i dobijanja znanja o objektima u svetu koji nas okružuje u svakom trenutku vremena. Sve više proizvoda i uređaja dobija senzorske, procesorske ili komunikacione podsisteme, koji im omogućavaju da se povežu i da međusobno komuniciraju. Ovakvi proizvodi i uređaji se često nazivaju „pametni proizvodi“ ili „pametni uređaji“. Umrežavanjem novih pametnih uređaja, ali i tradicionalnih mašina i uređaja uz pomoć komunikacionih podsistema, omogućava se lakša identifikacija objekata, njihovo praćenje, lokalizacija, podstiče se integracija i doprinosi se optimizaciji postojećih sistema.

Razvoj Interneta stvari je usko povezan sa razvojem tehnologija za automatsku identifikaciju, prvenstveno RFID tehnologije (engl. *Radio Frequency Identification*, identifikacija putem radio frekvencije), koja se uveliko koristi za identifikaciju i praćenje širokog spektra proizvoda, sistema, kao i ljudi i životinja. Međutim, danas Internet stvari ne podrazumeva samo povezivanje (jednostavnih) pasivnih objekata kao što su RFID tagovi, već i aktivnih „pametnih objekata“ koji predstavljaju autonomne objekte koji sadrže senzorske, procesorske i komunikacione podsisteme [1]–[4]. Objekti koji pripadaju Internetu stvari mere i prikupljaju podatke iz svoje okoline, obrađuju ih, razmenjuju i povezuju u jedinstveni sistem. Tehnologije koje su sastavni deo Interneta stvari obuhvataju različite žične i bežične

komunikacije i umrežavanje, veštačku inteligenciju, mikroelektroniku, senzorske mreže, uređaje sa niskom potrošnjom energije, tehnologije za obradu signala, fuziju podataka, tehnologije koje obezbeđuju bezbednost i privatnost podataka, kao i razne druge informacione tehnologije [2], [5]–[7].

Danas se razvijaju različiti sistemi koji potpomažu razvoj Interneta stvari, kako u industrijskoj tako i u neindustrijskoj okolini, sa ciljem da čoveku poboljšaju životno i radno okruženje, da dobija potrebne informacije u pravom trenutku, da mu olakšaju praćenje, nadzor i upravljanje sistemima. U oblasti u kojima se primenjuju i razvijaju ovakvi sistemi spadaju: automatizacija, industrijska proizvodnja, transport i logistika, zdravstvo, saobraćaj, identifikacioni sistemi, sistemi za sledljivost proizvoda, pametne kuće, poljoprivreda, zaštita životne sredine [2], [4], [5], [8]–[10], itd. Nacionalni obaveštajni savet SAD predviđa da će do 2025. godine u Internet stvari biti umrežene mnoge svakodnevne stvari, kao što su pakovanja prehrambenih proizvoda, nameštaj, dokumenti, i mnoge druge [4].

Povezivanje objekata u Internet stvari često zahteva poznavanje tačne pozicije objekta u prostoru, naročito u slučajevima kada su podaci koji su dobijeni o objektu ili njegovoj okolini, kao na primer merenja različitih uslova okoline, beznačajni ukoliko nema informacije o poziciji objekta [11], [12], ili kada je potrebno znati poziciju proizvoda na kraju njegovog životnog veka kako bi se omogućila reciklaža proizvoda [13]. Među sistemima koji treba da nađu svoje mesto u Internetu stvari, svakako se nalaze sistemi za lokalizaciju proizvoda u toku njihove proizvodnje, montaže, pakovanja, skladištenja poluproizvoda i gotovih proizvoda, transporta, distribucije i prodaje, koji bi mogli da obezbede tačnu i preciznu informaciju gde se određeni proizvod nalazi u realnom vremenu. U ovakvim sistemima, pojedinačni proizvodi bi trebalo da postanu „pametni objekti“ koji bi se integrisali u Internet stvari, tako što bi se na svaki proizvod dodao podsistem za njegovu identifikaciju i komunikaciju sa okolinom. Postoje različite tehnologije koje se koriste za lokalizaciju proizvoda, a među njima, u današnje vreme, veliki značaj imaju bežične tehnologije [14]. Kako je u današnjim industrijskim sistemima sve češća upotreba RFID tehnologije za identifikaciju proizvoda, kako u proizvodnji, tako i prilikom skladištenja, transporta i distribucije, odnosno u čitavom lancu snabdevanja, nameće se ideja za upotrebom ove tehnologije i za lokalizaciju proizvoda. RFID tehnologija je zasnovana na RF komunikaciji, te iako je u osnovi namenjena za identifikaciju objekata i prenos podataka o proizvodu, na osnovu svojstava samog RF signala u RFID sistemu mogu se dobiti dodatne informacije koje

se mogu iskoristiti za lokalizaciju objekata. Primer svojstva RF signala koje je moguće primeniti u sistemima za lokalizaciju je RSSI vrednost (engl. *Received Signal Strength Indicator*, indikator jačine primljenog signala), koja omogućava estimaciju rastojanja između predajnog i prijemnog uređaja. Druga bežična tehnologija koja pripada tehnologijama Interneta stvari, a koja postaje sve zastupljenija kako u industrijskim, tako i u neindustrijskim uslovima, su bežične senzorske mreže (engl. *Wireless Sensor Networks*, WSN). Osnovna namena bežičnih senzorskih mreža je distribuirano prikupljanje podataka sa senzora raspoređenih u mernom prostoru, što omogućava sticanje uvida o merenim parametrima na većem području nego što je moguće na osnovu merenja pojedinačnog senzora, kao i slanje izmerenih podataka sa distribuiranih senzora bežičnim putem do centralnog senzorskog čvora i njihovu integraciju u jedinstveni sistem, sa ciljem da se dobije što bolja slika stanja u prostoru. Kao i u RFID sistemima, i bežične senzorske mreže komuniciraju RF signalima, koji osim prenosa osnovnih senzorskih podataka omogućavaju i merenje svojstava RF signala, kao što je RSSI vrednost, pomoću kojih je moguće vršiti lokalizaciju proizvoda u prostoru. Budući da i primena RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža ima svoje prednosti i nedostatke, može se pretpostaviti da je integracijom podataka dobijenih primenom ove dve tehnologije u jedinstveni sistem moguće iskoristiti prednosti svake od ove dve tehnologije i tako dobiti tačniji, precizniji i pouzdaniji sistem za lokalizaciju proizvoda.

1.1 Motivacija i predmet istraživanja

Globalizacija tržišta zahteva sve više partnera u lancu snabdevanja i sve više lokacija za proizvodnju i skladištenje proizvoda, kao i bolju povezanost među partnerima, što treba da omogući uspostavljanje sistema za sledljivost proizvoda u toku njegovog životnog ciklusa [8], [15]. Sledljivost proizvoda, odnosno njegovo praćenje od nastanka sirovine do dolaska do potrošača, od suštinske je važnosti u današnjim lancima snabdevanja, posebno u industrijama kvarljive i opasne robe, kao što je slučaj u prehrambenoj, medicinskoj ili hemijskoj industriji [8], [9], [16], [17]. Sistemi za sledljivost proizvoda treba da omoguće pristup svim podacima u toku životnog ciklusa proizvoda, uključujući podatke o mestu, datumu i načinu nastanka proizvoda, uslova pri proizvodnji, skladištenju i transportu proizvoda, roku trajanja proizvoda, mogućnosti reciklaže, itd. Potreba za sistemima za sledljivost proizvoda, kao i sve veća potreba na tržištu za proizvodima koji su prilagođeni

željama i potrebama krajnjeg kupca uzrokuju sve komplikovanije upravljanje lancima snabdevanja [15]. Procesi u lancu snabdevanja kod gotovo svih učesnika u lancu uključuju skladištenje proizvoda ili poluproizvoda i upravljanje zalihama, pri čemu mogu da nastanu veliki operativni troškovi za proizvođače, distributere i prodavce. Kako bi se ovi troškovi smanjili, a povećale mogućnosti za uspostavljanje sistema za sledljivost proizvoda, mnoge kompanije uvode automatizovane sisteme u svoje prostore za skladištenje [18], a sa druge strane, brojna istraživanja se bave razvojem novih metoda za planiranje i upravljanje prostorima za skladištenje [19]. Proizvodi u prostorima za skladištenje se u tradicionalnim sistemima obično postavljaju na određeno mesto, pri čemu se pozicija na koju je proizvod postavljen beleži u informacionom sistemu, što često dovodi do grešaka u unosu pozicije proizvoda i uzrokuje dodatne troškove [18]. Ovakav sistem za postavljanje proizvoda može da dovede i do malog stepena iskorišćenja kapaciteta prostora, nagomilavanja predmeta u određenom delu prostora za skladištenje, itd. Kako bi se povećao stepen iskorišćenja prostora za skladištenje, moguće je uvesti sisteme koji vrše nasumičnu raspodelu proizvoda u prostoru [20], što iziskuje i postavljanje pouzdanog sistema za lokalizaciju proizvoda. Sistemi za lokalizaciju proizvoda su neophodni i u slučajevima kada je u određenom prostoru potrebno diferencirati različite proizvode kako bi se nad tačno određenim proizvodom mogle vršiti operacije [18], što je od posebnog značaja u automatizovanim ili robotizovanim sistemima. Osim toga, sistemi za lokalizaciju proizvoda omogućavaju i bolji nadzor i upravljanje sistemima, budući da pružaju rešenje za automatizovano praćenje stanja inventara proizvoda u realnom vremenu, odnosno optimizaciju upravljanja proizvodima koji se već nalaze u prostoru za skladištenje i proizvodima koje je potrebno postaviti na odgovarajuću poziciju u slobodnom delu prostora. Osim lokalizacije proizvoda u prostorima za skladištenje, neophodno je omogućiti lokalizaciju proizvoda i u čitavom lancu snabdevanja [21], odnosno i prilikom proizvodnje, transporta i distribucije proizvoda, kako bi se omogućilo funkcionisanje sistema za sledljivost proizvoda tokom svih faza njegovog životnog ciklusa.

Proces lokalizacije je moguće definisati kao proces određivanja nepoznate pozicije objekta zasnovan na merenjima u njegovoj okolini [22]. Lokalizaciju proizvoda u zatvorenom prostoru moguće je postići primenom različitih sistema, među koje spadaju sistemi koji koriste različita senzorska merenja (npr. ultrazvučna, infracrvena merenja, itd), obradu slike ili snimka, sistemi zasnovani na primeni bežičnih tehnologija (npr. bežičnih lokalnih

računarskih mreža, bežičnih senzorskih mreža, RFID tehnologije, blutut tehnologije, itd), kao i mnogi drugi sistemi [18], [23]–[25].

RFID tehnologija se prvenstveno primenjuje za identifikaciju proizvoda na osnovu podataka koji su upisani u memoriji RFID taga, pri čemu omogućava preciznu identifikaciju tačno određenog proizvoda, umesto samo vrste proizvoda kao što je slučaj pri primeni bar koda ili sistema zasnovanih na obradi slike, što RFID sistemima daje veliku prednost u industrijskim sistemima [26]. Međutim, identifikacija proizvoda primenom RFID tehnologije obično daje samo informaciju da se određeni RFID tag nalazi u dometu RFID čitača, ali ne daje i tačnu informaciju o poziciji datog taga u prostoru. Ovakvu identifikaciju je moguće iskoristiti za lokalizaciju proizvoda uz primenu drugih sistema za detekciju tačne pozicije proizvoda (npr. sistema za detekciju prisustva primenom kapacitivnih ili optičkih senzora, sistema za obradu slike ili snimka sa kamere, itd), dok se identitet tačno određenog proizvoda utvrđuje očitavanjem podataka sa RFID taga [27]. Postoje i komercijalno dostupni RFID čitači koji imaju ugrađenu mogućnost očitavanja svojstava RF signala u RFID sistemu istovremeno sa očitavanjem jedinstvenog koda RFID taga. Najčešće svojstvo signala koje se može izmeriti ovakvim čitačima je RSSI vrednost, pa je to i parametar koji se obično primenjuje za lokalizacione sisteme zasnovane na RFID tehnologiji [28], [29]. Lokalizacija proizvoda na osnovu RFID tehnologije je naročito opravdana u sistemima u kojima se RFID tagovi već primenjuju za obeležavanje i identifikaciju proizvoda [18], što je čest slučaj u toku proizvodnje, skladištenja, transporta i prodaje proizvoda. U dosadašnjim sistemima koji primenjuju RFID tehnologiju za lokalizaciju, najčešće se koriste aktivni RFID sistemi, gde RFID tagovi imaju sopstveno napajanje i omogućavaju veliki domet očitavanja (do ~100 m) [30]. Međutim, sve veći broj istraživanja predlaže i primenu pasivnih RFID sistema, koji su prvenstveno prihvatljivi zbog niske cene i pasivnog napajanja RFID tagova iz RF polja čitača [18]. Pasivni RFID sistemi mogu imati različiti domet očitavanja tagova, a najpogodniji sistemi u primenama kada je potrebno obezbediti što veći domet očitavanja su UHF (engl. *ultra-high frequency*, ultra visoko frekventni) RFID sistemi, koji imaju domet očitavanja RFID tagova i do 10 m, pri čemu njihova instalacija zahteva najmanje izmene i remećenje rada u postojećim sistemima [10].

Sa druge strane, bežične senzorske mreže se sastoje od mnoštva bežičnih senzorskih modula, koji vrše distribuirano prikupljanje senzorskih podataka iz okoline, međusobno komuniciraju i dele podatke o merenju različitih senzorskih veličina iz okoline, čime podaci

iz celokupnog prostora stižu do krajnjeg bežičnog senzorskog modula odnosno do upravljačkog ili nadzornog sistema. Osim ove osnovne primene bežičnih senzorskih mreža, moguće ih je primeniti i u sistemima za lokalizaciju proizvoda korišćenjem nekog od svojstava RF signala, pri čemu se najčešće koristi RSSI vrednost koju je moguće očitati pri uobičajenoj razmeni podataka između bežičnih senzorskih modula, mada se u nekim primenama za lokalizaciju koriste i druga svojstva signala [24]. Budući da bežični senzorski moduli poseduju sopstveno napajanje, domet komunikacije je veći nego u slučaju RFID sistema (i do 300 m), pa su pogodni za primene u kojima je potrebno vršiti lokalizaciju na većem prostoru.

Za lokalizaciju proizvoda primenom RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža moguće je primenjivati različite metode. Merenje RSSI vrednosti ili nekog drugog svojstva RF signala omogućava estimaciju rastojanja između predajnika i prijemnika signala. Međutim, u realnom okruženju u kom postoje različite smetnje za prostiranje RF signala, kao što su: apsorpcija, slabljenje, refleksija signala, interferencija više različitih signala i prostiranje signala po više putanja (engl. *multi-path propagation*), javljaju se velike greške u estimaciji rastojanja. Kako bi se ove greške prevazišle, primenjuju se različiti metodi za lokalizaciju proizvoda kojima se poboljšava mogućnost estimacije pozicije proizvoda u prostoru, sa ili bez direktnog računanja rastojanja, među koje spadaju deterministički metodi, kao što su: multilateracija, ROC (engl. *ring overlapping circle*), *MinMax*, kNN (engl. *k-nearest neighbours*, metod k najbližih suseda), zatim metodi zasnovani na verovatnoći, kao što su: Bajesovo zaključivanje (engl. *Bayesian inference*), maksimalna verodostojnost (engl. *Maximum likelihood*, ML), Kalmanov filter, čestični filter, kao i različiti metodi optimizacije, veštačke inteligencije, itd [18], [22]–[24], [31]. Kako bi se odredile performanse određenog metoda, moguće je koristiti sledeće parametre za procenu: tačnost, preciznost, brzina izvršavanja, složenost, skalabilnost, robustnost i cena [24]. U zatvorenim prostorima do danas ne postoji metod za lokalizaciju proizvoda primenom RFID tehnologije ili bežičnih senzorskih mreža koji ostvaruje najbolje performanse u svakom sistemu. Razni autori koji se bave istraživanjima u oblasti lokalizacije proizvoda primenom RFID tehnologije ili bežičnih senzorskih mreža kao moguće buduće pravce istraživanja navode iznalaženje novih ili hibridnih metoda, kombinacija postojećih metoda ili kombinacija više različitih tehnologija za lokalizaciju proizvoda [18], [23], [24], [32], [28], [29], [33], [34]. Sistemi za lokalizaciju koji kombinuju primenu RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža predstavljeni su u

radovima [35]–[37], pri čemu je utvrđeno da hibridni sistemi ove dve tehnologije mogu da dovedu do boljih estimacija pozicije proizvoda nego korišćenje svake tehnologije pojedinačno. Međutim, u ovim hibridnim sistemima lokalizacija proizvoda se vrši samo primenom bežičnih senzorskih mreža, dok je primena RFID tehnologije ograničena na detekciju RFID tagova u dometu RFID čitača, čime je utvrđeno da se određeni tag nalazi u odgovarajućem delu prostora. Slično ovim istraživanjima, i u radovima [41] i [42] autori predlažu sisteme koji primenom RFID tehnologije, odnosno detekcijom RFID tagova, samo određuju oblast u okviru prostora za skladištenje proizvoda u kojoj se proizvod nalazi, s tim što tačnu poziciju određuju računarskom vizijom. Istraživanja [45] i [46] predstavljaju sistem za lokalizaciju proizvoda u okviru prostora za skladištenje koji na osnovu promene čitljivosti RFID taga omogućava estimaciju pozicije proizvoda. Bežične senzorske mreže su primenjene za lokalizaciju paleta i transportnih sredstava u okviru prostora za skladištenje proizvoda u istraživanjima predstavljenim u radovima [43] i [44].

Na osnovu svega navedenog, ukazuje se potreba za sprovođenjem istraživanja koje će razmotriti i uporediti parametre različitih metoda za lokalizaciju proizvoda primenom RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža, a zatim razviti hibridni metod koji bi na što bolji način iskoristio prednosti koje svaka od navedenih tehnologija Interneta stvari pruža. Takođe, potrebno je i postaviti model za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari koji bi definisao način primene razvijenog hibridnog metoda u okviru prostora za skladištenje u industrijskim uslovima.

1.2 Cilj istraživanja i hipoteze

Krajnji cilj istraživanja u okviru ove disertacije je određivanje pogodnog metoda za lokalizaciju proizvoda u industrijskom okruženju, prvenstveno u prostorima za skladištenje proizvoda, primenom tehnologija Interneta stvari, na osnovu fuzije podataka dobijenih primenom RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža koja koristi prednosti svake od ovih tehnologija radi što tačnije i preciznije lokalizacije proizvoda. Za dostizanje ovog cilja, neophodno je istražiti i uporediti postojeće metode za lokalizaciju proizvoda, koji koriste sisteme koji primenjuju RFID tehnologiju ili bežične senzorske mreže, kao i istražiti metode za integraciju lokalizacionih metoda. Kao rezultat istraživanja očekuje se dobijanje tačnijeg i preciznijeg sistema za lokalizaciju, budući da su ovi parametri od presudne važnosti u prostorima za skladištenje proizvoda.

Na osnovu postavljenih ciljeva i analize trenutnog stanja u oblasti lokalizacije proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari, mogu se postaviti sledeće hipoteze istraživanja:

H1. Moguće je postaviti model za lokalizaciju proizvoda kombinovanom primenom RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža u prostoru za skladištenje proizvoda.

H2. Moguće je razviti hibridni metod za lokalizaciju proizvoda kombinovanom primenom različitih lokalizacionih metoda koji obezbeđuje tačniju i precizniju lokalizaciju proizvoda nego primena pojedinačnih lokalizacionih metoda.

H3. Moguće je razviti hibridni metod za lokalizaciju proizvoda kombinovanom primenom RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža koji dovodi do tačnije i preciznije lokalizacije proizvoda nego primena samo jedne od navedenih tehnologija.

1.3 Struktura disertacije

Disertacija je organizovana u 6 poglavlja.

Prvo poglavlje daje uvod u oblast istraživanja, kao i predmet i ciljeve istraživanja sprovedenog u okviru disertacije.

Drugo poglavlje daje osnovna teorijska razmatranja sa aktuelnim stanjem u oblasti istraživanja. U okviru drugog poglavlja, predstavljene su tehnologije koje su potrebne za sprovođenje istraživanja: RFID tehnologija i bežične senzorske mreže, a zatim različiti metodi lokalizacije objekata u zatvorenim prostorima, sa posebnim akcentom na metode lokalizacije objekata primenom RFID tehnologije ili bežičnih senzorskih mreža. Takođe, opisani su parametri koji mogu da se koriste za procenjivanje lokalizacionog algoritma. Potpoglavlja drugog poglavlja uključuju i aktuelna istraživanja u okviru datih podoblasti.

Treće poglavlje daje predlog modela za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari, koji se zasniva na kombinovanoj primeni RFID tehnologije i bežične senzorske mreže. U okviru modela, predložen je hibridni metod koji primenom čestičnog filtra vrši fuziju podataka dobijenih metodom metoda najbližih suseda i optimizacije rojem čestica u slučaju kada se koristi samo jedna od tehnologija Interneta stvari, kao i hibridni metod koji primenom čestičnog filtra vrši fuziju podataka dobijenih odvojeno u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži. U okviru trećeg poglavlja predstavljena je osnovna ideja ovih hibridnih metoda, dok su detalji njihove realizacije dati u četvrtom poglavlju.

Četvrto poglavlje opisuje metodologiju eksperimentalnog istraživanja i daje eksperimentalne rezultate. U okviru ovog poglavlja, predstavljene su različite faze istraživanja, navedena je oprema koja je korišćena u istraživanju, kao i način prikupljanja uzoraka za eksperimente. Obrazloženo je koji postojeći metodi za lokalizaciju proizvoda su odabrani za implementaciju u prvoj fazi istraživanja, i na koji način su realizovani, a zatim je u drugoj fazi istraživanja detaljno obrazložen i način implementacije hibridnih metoda predloženih u okviru modela za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari. Nakon prikaza rezultata dobijenih primenom predloženih hibridnih metoda u okviru druge faze istraživanja, predstavljena je i treća faza eksperimentalnih istraživanja, u kojoj su rezultati dobijeni u okviru prve i druge faze istraživanja provereni i u laboratorijskom okruženju sa industrijskim elementima. Prikazani su dobijeni eksperimentalni rezultati istraživanja u okviru različitih faza istraživanja, sa datim komentarima i napomenama, bez detaljne analize samih rezultata.

Peto poglavlje uključuje detaljnu analizu dobijenih rezultata eksperimentalnih istraživanja i diskusiju koja prati postavljene hipoteze istraživanja. Data je analiza predstavljenog modela za lokalizaciju i hibridnih lokalizacionih metoda koji su u okviru njega predloženi, pri čemu su rezultati upoređeni i sa prethodno razvijenim sistemima. Diskutovane su prednosti i nedostaci predloženog rešenja, navedene su mogućnosti za dodatna poboljšanja, kao i mogućnosti primene dobijenih rezultata.

Šesto poglavlje daje zaključke koji su izvedeni na osnovu rada i istraživanja u okviru ove disertacije, sa posebnim naglaskom na doprinose disertacije, kao i otvorena nova istraživačka pitanja i pravce istraživanja.

Na kraju disertacije dat je spisak naučne i stručne literature koja je korišćena u okviru disertacije.

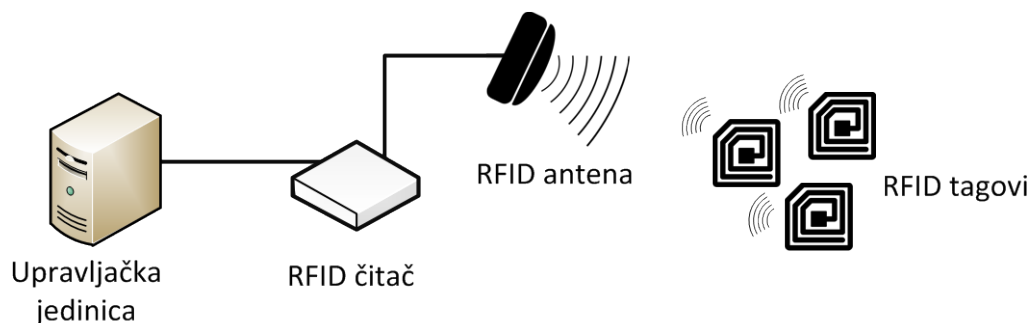
2 OSNOVNA TEORIJSKA RAZMATRANJA SA PREGLEDOM LITERATURE

Ovo poglavlje obuhvata potrebna znanja, tehnologije i metode, koje su neophodne za razumevanje i razvoj modela za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari, sa pregledom aktuelne literature i trenutnim stanjem u oblasti. Predstavljani su neophodni koncepti za razumevanje RFID tehnologije, bežičnih senzorskih mreža, kao i metoda lokalizacije, sa naglaskom na metode lokalizacije koji mogu da koriste merenja parametara signala iz RFID sistema ili bežičnih senzorskih mreža.

2.1 RFID tehnologija

RFID je tehnologija za beskontaktnu automatsku identifikaciju objekata putem radio talasa. RFID tehnologija spaja znanja iz različitih oblasti, kao što su: elektromagnetika, telekomunikacije, poluprovodnička tehnologija, zaštita podataka i kriptografija, proizvodnja, automatizovani sistemi, kao i mnoge druge povezane oblasti [44]. Primenom RFID tehnologije mogu se identifikovati različiti objekti, ali isto tako i živa bića, odnosno praktično je moguće identifikovati bilo šta što postoji u svetu koji nas okružuje. Identifikacija primenom RFID tehnologije podrazumeva primenu RFID taga, koji predstavlja elektronsku oznaku koja je nosilac podataka za identifikaciju i kojim se obeležava objekat koji je potrebno identifikovati, i RFID čitača, odnosno uređaja koji može da detektuje prisustvo

RFID tagova u svojoj okolini i očitava podatke sa njih. U neophodne komponente RFID sistema, pored RFID taga i čitača, spada i sistem za obradu podataka, koji preko čitača prihvata primljene podatke sa tagova, i skladišti ih ili obrađuje prema potrebi, kao i odgovarajuća komunikaciona infrastruktura koja omogućava komunikaciju među komponentama sistema [45]–[48]. Slika 1 prikazuje RFID sistem sa neophodnim komponentama.



Slika 1. Osnovne komponente RFID sistema

RFID sistemi su počeli da se razvijaju neposredno pre i za vreme drugog svetskog rata, međutim njihova komercijalna upotreba nije bila moguća dok nije došlo do naglog razvoja elektronike i integriranih kola, i razvoja novih materijala i tehnologija koji su doveli do minijaturizacije komponenti, kao i njihove masovne proizvodnje [49]–[51]. Samim tim se i cena komponenti RFID sistema značajno smanjila, čime su RFID sistemi postali ekonomski isplativi i omogućen je prodor RFID tehnologije u široku upotrebu. Nagli razvoj RFID sistema započeo je od sredine 90-ih godina XX veka [52], a veliki doprinos širenju RFID tehnologije su zatim donele megakorporacije koje su uvele ovu tehnologiju za označavanje proizvoda umesto postojeće barkod tehnologije. Prva je bila kompanija Volmart (engl. *Wal-Mart*) u SAD-u, koja je 2003. godine zatražila od svojih 100 najvećih dobavljača da počnu da koriste RFID tagove na paletama i proizvodima najkasnije do početka 2005. godine, a odmah zatim i Ministarstvo odbrane SAD-a (engl. *Department of Defence*) koje je zahtevalo od svih svojih dobavljača da na svojim paletama i proizvodima postavljaju pasivne RFID tagove [48]–[50], [52]. Nakon toga, sličan zahtev je u SAD podnela i korporacija Target, koja je tražila od svojih dobavljača da obeleže proizvode i palete RFID tagovima do juna 2005. godine [50]. Ubrzo su RFID tehnologiju za obeležavanje proizvoda uveli i [50], [53]: Albertsons, Metro AG i Tesco, prodavnica elektronike Best Baj (engl. *Best Buy*), a zatim i mnogi drugi. RFID tehnologija je počela da se primenjuje i za lične dokumente (pasoše, zdravstvene knjižice), automatsku naplatu putarine, upravljanje pristupom parkinzima, garažama, zgradama ili

ograđenim delovima grada, kontrolu radnog vremena u preduzećima, karte u prevozu putnika, izdavanje knjiga u bibliotekama, praćenje prtljaga na aerodromima, identifikaciju životinja, kao i u mnogim drugim oblastima [6], [10], [47]–[49], [51], a nove primene RFID tehnologije se razvijaju svakodnevno. Zbog ovako široke oblasti primene, RFID tehnologija donosi mnoge prednosti i omogućava optimizaciju različitih sistema, automatizacijom procesa i razvojem novih procesa koji se često nazivaju i pametni procesi, koji se povezuju i sa ostalim procesima u okviru sistema i omogućavaju automatizovane reakcije na događaje [53]. Samim tim, RFID tehnologija je jedna od najvažnijih tehnologija koje treba da doprinesu umrežavanju objekata i njihovom povezivanju u Internet stvari.

2.1.1 RFID tag

RFID tag predstavlja elektronsku oznaku, koja je nosilac podataka za identifikaciju u RFID sistemu. RFID tag obično sadrži mikročip sa memorijom, RF antenu za prijem i slanje signala, kao i bateriju ili drugi vid napajanja po potrebi, a može se naći u kućištima različitih oblika i od različitih materijala, pri čemu su najčešći RFID tagovi u obliku ID kartice, nalepnice, etikete, diska, staklenog kućišta (cevičice), plastičnog kućišta, priveska za ključeve, a mogu biti i specifičnog oblika za određenu namenu [45], [47].

Među najvažnije karakteristike RFID taga spada način njegovog napajanja, pa se tako RFID tagovi mogu podeliti na: pasivne, polupasivne i aktivne tagove [46], [48]. Pasivni tagovi nemaju sopstveni izvor napajanja, već energiju za napajanje prikupljaju iz elektromagnetnog polja RFID čitača. Kako bi se ovog postiglo, antena pasivnog RFID taga mora biti odgovarajuće geometrije tako da omogući prikupljanje energije iz okoline, a da pri tome vrši i primanje podataka sa RFID čitača i slanje podataka RFID čitaču, zbog čega se kao antene pasivnih RFID tagova koriste razne varijante antenskih namotaja, dipolnih i dualnih dipolnih antena. Polupasivni i aktivni RFID tagovi kao izvor napajanja koriste bateriju, pri čemu aktivni tagovi za napajanje uvek koriste bateriju, dok polupasivni tagovi bateriju koriste za napajanje samo kada vrše operacije na tagu, dok za komunikaciju sa RFID čitačem koriste energiju elektromagnetnog polja čitača. Pošto aktivni tagovi imaju sopstveni izvor napajanja, nije neophodno da budu u elektromagnetnom polju čitača da bi uspostavili komunikaciju, što omogućava veliki domet očitavanja podataka, čak i do nekoliko stotina metara. Polupasivni tagovi koriste sopstveno napajanje za većinu operacija, pa se takođe mogu očitavati većom brzinom i sa veće udaljenosti nego pasivni tagovi.

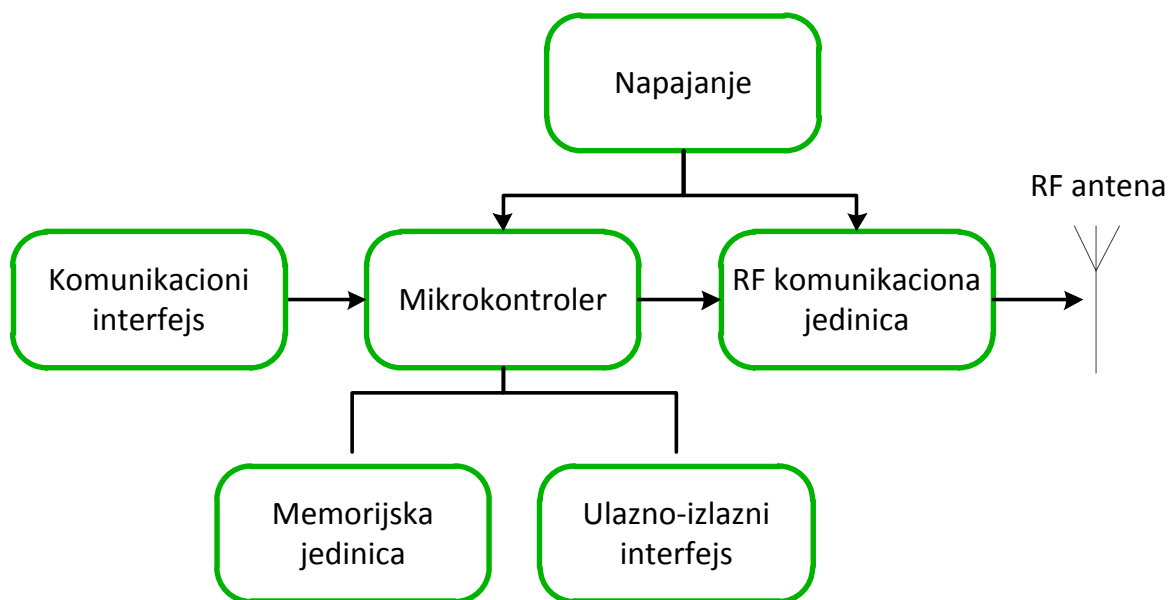
Centralna komponenta RFID taga je mikročip sa memorijom, koji prima naredbe od RFID čitača, obrađuje zahtev i šalje traženi odgovor. U najjednostavnijoj varijanti RFID taga, po prijemu naredbe od RFID čitača, šalje se unapred pripremljen povratni signal. Naprednije varijante mogu da šalju različite podatke sačuvane u memoriji, dok trenutno najnaprednije varijante mogu i da vrše računске operacije i verifikaciju podataka, kao i enkripciju podataka radi veće bezbednosti sistema.

U zavisnosti od mogućnosti zapisivanja podataka u RFID tag, RFID tagovi se mogu podeliti na [45], [46], [48]: RO (engl. *read-only*, moguće je samo čitati podatke koji su upisani u memoriju), WORM (engl. *write once read many*, moguće je samo jednom upisati podatak u memoriju, a čitati ga više puta) i RW tagove (engl. *read-write*, moguće je i upisivati podatke u memoriju i čitati ih iz nje). RO RFID tagovi često kao jedini upisan podatak imaju jedinstveni identifikator, odnosno serijski broj RFID taga, koji se upisuje u memoriju prilikom proizvodnje taga, pa se zbog toga mogu primenjivati samo kada nije potrebno dodavati informacije o proizvodu koji je obeležen datim tagom. WORM RFID tagovi omogućavaju upisivanje korisničkih podataka, s tim što je podatke moguće upisati samo jednom, ili kod nekih tagova određen broj puta (do 100). RW RFID tagovi omogućavaju najširu primenu, budući da omogućavaju upisivanje podataka u memoriju čak i do 1.000.000 puta [45], što omogućava ažuriranje upisanih podataka u memoriji tokom vremena. RFID tagovi često imaju kombinaciju RO i RW memorije, tako da je u RO memoriju upisan jedinstveni identifikator taga prilikom proizvodnje, dok je RW memorija namenjena za dodatne korisničke podatke.

Kapacitet memorije RFID taga se obično kreće od nekoliko bajta do nekoliko kilobajta. RFID tag može da sadrži različite podatke o objektu kojem je pridružen, pri čemu u memoriji RFID taga mogu biti upisani samo osnovni podaci za identifikaciju taga, kao što je UID (engl. *Unique ID*, jedinstveni identifikator), ili i različiti korisnički podaci (na primer: naziv, sastav, rok trajanja proizvoda, itd). Postoje i jednobitni tagovi [45], koji se koriste za elektronsku zaštitu proizvoda (engl. *Electronic Article Surveillance, EAS*) u prodavnicama, i služe za sprečavanje krađe, međutim oni se ne smatraju RFID tagovima u užem smislu, jer nemaju upisane nikakve podatke o proizvodima već se koriste samo za detekciju da li se tag nalazi u polju čitača ili ne.

2.1.2 RFID čitač

Kako bi se podaci u sistemu mogli očitavati sa RFID taga ili upisivati u memoriju taga, neophodna komponenta RFID sistema je RFID čitač. RFID čitač se uobičajeno sastoji od (slika 2): upravljačke jedinice (mikrokontrolera), memorijske jedinice, RF komunikacione jedinice (primopredajnika), RF antene, napajanja, komunikacionog interfejsa i eventualno ulazno-izlaznog interfejsa za dodatne senzore, aktuatore ili indikatore [46].



Slika 2. Komponente RFID čitača

Mikrokontroler RFID čitača komunicira sa centralnom upravljačkom jedinicom RFID sistema putem odgovarajućeg komunikacionog interfejsa, šalje zahteve za očitavanje podataka sa RFID tagova ili upis podataka u tagove RF komunikacionoj jedinici i vrši prijem i obradu podataka sa tagova. RF komunikaciona jedinica preko antene RFID čitača šalje signale koji sadrže u sebi odgovarajuću naredbu RFID tagovima, i prima povratni signal sa RFID taga preko antene čitača, koji prosleđuje mikrokontroleru čitača. U memoriji RFID čitača upisani su podaci za podešavanje parametara RFID čitača i antene, kao i za privremeno smeštanje trenutno očitanih podataka sa RFID tagova. Komunikacioni interfejs RFID čitača za komunikaciju sa centralnom upravljačkom jedinicom RFID sistema najčešće omogućava serijsku komunikaciju, dok čitači novije generacije sve češće omogućavaju i mrežnu komunikaciju i imaju implementirane više komunikacione protokole. Ulazno-izlazni interfejs nije neophodna komponenta RFID čitača, a ukoliko postoji omogućava povezivanje dodatnih senzora, aktuatora ili identifikatora.

Antena RFID čitača šalje RF signal sa naredbama u okolinu čitača, i prima odgovore sa RFID tagova. Antena može da bude integrisani deo čitača ili zasebna komponenta. RFID čitač može da ima jednu ili više antena, a može da ima i zasebne antene za slanje i prijem podataka. Elektromagnetno polje antene određuje zonu očitavanja RFID tagova, odnosno polje u kom se podaci sa RFID tagova mogu pročitati ili upisati na tag [46], a obično je najjače u regionu oblika elipsoida ispred antene [53]. Zona očitavanja RFID tagova zavisi i od polarizacije antene, koja može biti linearno ili kružno polarizovana [46]. Linearno polarizovane antene imaju veći domet, ali užu zonu očitavanja od kružno polarizovanih antena, i veoma su osetljive na orijentaciju RFID taga. Kružno polarizovane antene su pogodne za primenu kada orijentacija RFID taga nije poznata, s tim što je domet očitavanja podataka sa tagova tada manji.

2.1.3 Principi rada u RFID sistemima

Komunikacija radio talasima u RFID sistemu može da se odvija na različitim frekvencijama, pri čemu se najčešće koriste [45], [46]: niska frekvencija (engl. *low frequency*, LF) od 125 do 134 kHz, visoka frekvencija (engl. *high frequency*, HF) od 13,56 MHz, izuzetno visoka frekvencija (engl. *ultrahigh frequency*, UHF) od 860 do 930 MHz i mikrotalasna frekvencija od 2,45 GHz. Od odabrane frekvencije u RFID sistemu zavise i potrebne dimenzije i geometrija RFID antene i RFID taga, kao i domet očitavanja antene. Frekvencija u RFID sistemu utiče i na mogućnost očitavanja podataka sa RFID taga postavljenog na objekat ili u blizini objekata od određenih materijala, kao što su metal i tečnost, pri čemu najveće smetnje usled prisustva ovakvih objekata nastaju u UHF i mikrotalasnim sistemima [48], [54]. Neke od tipičnih primena za LF sisteme su identifikacija kućnih ljubimaca ili identifikacija objekata sa visokim sadržajem vode, za HF sisteme tipična primena je u sistemima za kontrolu pristupa ili identifikaciju pojedinačnih objekata, za UHF sisteme tipična primena je u identifikaciji kutija, grupnih pakovanja i paleta, dok je za mikrotalasne sisteme tipična primena za identifikaciju vozila i u sistemima gde je potreban veliki domet očitavanja [47], [54].

Za prenos signala u RFID sistemu koristi se digitalno modulisan signal [51]. Za modulaciju signala u pasivnim RFID sistemima nije moguće primeniti jednostavne tipove modulacije, kao što je npr. „*on-off*“ modulacija, u kojoj prilikom slanja dugačkog niza „0“ ne postoji elektromagnetno polje, i samim tim RFID tagovi gube napajanje. Tada se primenjuju

drugačiji tipovi modulacije, kod kojih sadržaj poslanog signala ne utiče na postojanje elektromagnetnog polja, pri čemu je uobičajeno kodovanje binarnih simbola pre modulacije tako da svaki simbol uključuje slanje signala i pauzu određenog trajanja, čime se obezbeđuje određeni nivo snage elektromagnetnog polja i pri dugačkim nizovima nula.

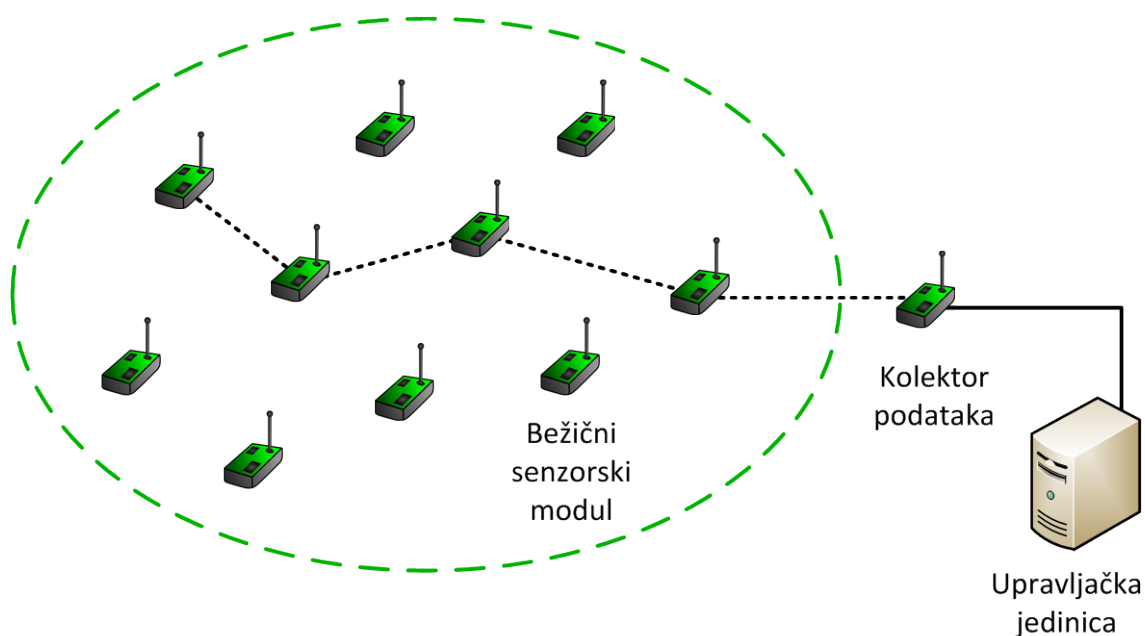
Komunikacija u RFID sistemu između RFID čitača i RFID taga može biti uspostavljena u bliskom ili dalekom polju antene. Blisko polje (engl. *near field*) antene čitača je prostor oko antene koji je prečnika jedne talasne dužine radio talasa koji emituje antena, i u ovom polju komunikacija se zasniva na elektromagnetnoj indukciji [45], [46], [52], [54]. Prostor van bliskog polja je daleko polje (engl. *far field*), i u ovom polju komunikacija se zasniva na refleksiji radio talasa, odnosno slanju povratnog signala sa RFID tagova (engl. *backscattered signal*) [45], [46], [52], [54], [55]. Komunikacijau bliskom polju je karakteristična za pasivne RFID sistemi na LF i HF frekvencijama, dok je komunikacija u dalekom polju karakteristična za sisteme na UHF i mikrotalasnim frekvencijama.

2.1.4 Standardi u RFID sistemima

Standardi u RFID sistemima su neophodni kako bi se uskladila frekvencija rada, komunikacione protokoli, format podataka, organizacija memorije, itd. između uređaja različitih proizvođača. Primenjuju se dve vrste standarda, standardi definisani od strane organizacije ISO i EPCglobal. Među najvažnije standarde spadaju serija standarda ISO 18000 [56], čiji delovi definišu referentnu arhitekturu i opšte parametre, kao i parametre za određene frekvencije: frekvencije manje od 135 kHz (LF), frekvencija 13,56 MHz (HF), frekvencija 2,45 GHz, frekvencije od 860 MHz do 960 MHz (UHF), kao i frekvencija 433 MHz za aktivne tagove. Pored ISO 18000, među najvažnije standarde u RFID sistemima spadaju i ISO 14443 [57] i ISO 15693 [58], koji definišu komunikacione protokole za kratkodometne sisteme, kao i različiti dodatni standardi za posebne primene. Druga vrsta standarda koja se koristi u RFID sistemima je EPCglobal [59], koji definiše hardver, komunikacione protokole, mrežnu infrastrukturu, softver i format podataka. U RFID zajednici teži se objedinjavanju standarda, pa je tako EPC Gen 2 protokol za UHF frekvencije izjednačen sa ISO 18000-6c standardom.

2.2 Bežične senzorske mreže

Bežične senzorske mreže (slika 3) podrazumevaju mreže minijaturnih autonomnih senzorskih uređaja koji u sebi imaju integrisane mogućnosti senzorskih merenja, obrade podataka i RF komunikacije (komunikacije na radio frekvenciji) [60]. Ovi senzorski uređaji, koji se često nazivaju bežični senzorski moduli, omogućavaju merenje različitih uticaja u okruženju, kao što su temperatura, vlažnost vazduha, osvetljenje, zvuk, hemijske supstance, prisustvo određenih objekata, jačina električnog i magnetnog polja, ultrazvuka, infracrvenih zraka, itd, a zatim slanje izmerenih podataka bežičnim putem do centralne upravljačke aplikacije sistema [61], [62].



Slika 3. Bežična senzorska mreža

Bežični senzorski moduli su obično malih dimenzija, niske cene i niske potrošnje energije [60], [61], mogu biti napajani baterijama ili drugim izvorima energije, kao što je solarna energija, pri čemu im je životni vek, u zavisnosti od primene, od nekoliko meseci do nekoliko godina [60]. Svaki bežični senzorski modul može da izmeri stanje određene merene veličine u svojoj okolini, da obradi dobijene podatke u odgovarajućoj meri, i zatim da prosledi izmerene i obrađene podatke ka centralnoj upravljačkoj aplikaciji sistema. Moguće je direktno slanje podataka, ali je u cilju očuvanja energije uobičajeno slanje podataka preko drugih bežičnih senzorskih modula u okolini tzv. „multihop“ komunikacijom (komunikacijom u više skokova, odnosno prenosom od jednog do drugog modula). Bežični senzorski moduli preko kojih se vrši komunikacija mogu da vrše i fuziju senzorskih

podataka, kako bi odstranili podatke sa greškama, ili izvukli zaključke iz dobijenih podataka sa više senzora ili tokom određenog vremenskog perioda, a zatim da ovakve obrađene podatke prosleđuju ka centralnoj upravljačkoj aplikaciji sistema [61]. Bežični senzorski moduli komuniciraju bežičnim putem sa ostalim modulima, i poseduju mogućnost samoorganizacije u bežičnu senzorsku mrežu. Predviđaju se mreže sa nekoliko hiljada bežičnih senzorskih modula, koje bi u potpunosti mogle da izmene način čovekovog života i rada [63].

Bežične senzorske mreže su se razvile zahvaljujući naglom razvoju različitih tehnologija, među kojima su: MEMS tehnologija (engl. *micro-electro-mechanical systems*, mikro-elektromehanički sistemi), koja omogućava da se senzori i njihovi delovi smeste u minijaturne čipove; digitalna elektronika, koja omogućava da mikrokontroleri imaju dovoljne resurse da mogu da obrade podatke sa senzora; kao i komunikacione i informacione tehnologije, koje omogućavaju slanje podataka sa senzora drugim bežičnim senzorskim modulima, odnosno glavnoj upravljačkoj aplikaciji sistema [60], [62]. Predviđa se da će dalji razvoj senzorske tehnologije, materijala i koncepata dodatno smanjiti dimenzije, težinu i cenu pojedinačnih senzorskih modula, kao i da će se povećati njihova vremenska rezolucija i tačnost, čime će se olakšati integracija mnoštva senzora u razne sisteme kako bi se unapredile njihove performanse i životni vek, a smanjili troškovi [62].

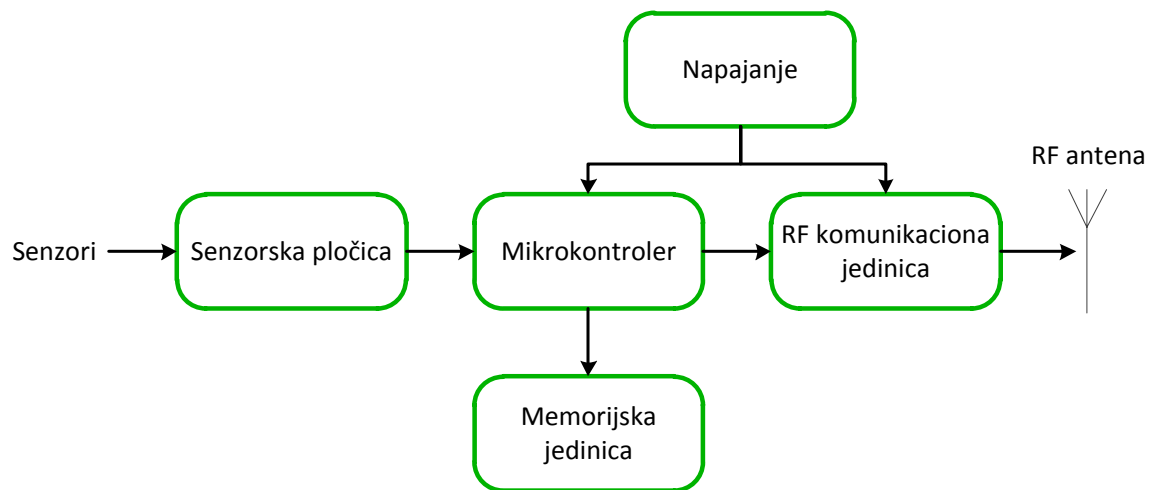
Razvoj bežičnih senzorskih mreža je počeo u vojnoj industriji, daleko od današnje primene u industriji i korisničkim aplikacijama. Sistem koji se smatra početkom današnjih bežičnih senzorskih mreža je SOSUS (engl. *Sound Surveillance System*, sistem za nadzor zvuka), sistem koji se sastojao od zvučnih senzora raspoređenih na strateškim pozicijama na dnu Atlantskog i Tihog okeana, a koji je razvijen od strane vojske SAD 1950-tih godina za detekciju i praćenje podmornica SSSR-a [64], [65]. Ovaj sistem se i danas koristi, za nadzor podvodnog života i vulkanskih aktivnosti [64], [65]. Iako je istraživanje bilo fokusirano na ostvarivanje vojnih ciljeva, tokom razvoja ovog sistema postavljeni su temelji razvoja ključnih tehnologija za moderne senzorske mreže. Međutim, početkom razvoja savremenih bežičnih senzorskih mreža smatra se razvoj programa Distribuiranih Senzorskih Mreža (engl. *Distributed Sensor Networks, DSN*) koji je pokrenula agencija DARPA (engl. *Defense Advanced Research Projects Agency*, agencija za napredne odbrambene istraživačke projekte) oko 1980. godine, kojim su formalno započeta istraživanja u primeni distribuiranih bežičnih senzorskih mreža [64]–[66]. U to vreme je već postojao ARPANET, mreža koja je

predstavljala početak interneta, sa oko 200 povezanih uređaja na univerzitetima i istraživačkim institutima, i nastala je ideja da se razvijeni komunikacioni sistem proširi na sistem distribuiranih senzora [64]. Distribuirane senzorske mreže su zamišljene kao mreže mnoštva minijaturnih senzora koji autonomno funkcionišu, ali i komuniciraju međusobno, i to tako da svaki senzor šalje informacije drugom senzoru koji na najbolji način može da iskoristi poslate informacije [66]. Iako su istraživači od početka razmatrali mreže sa velikim brojem malih senzora, tehnologije za realizaciju malih senzorskih modula nisu bile spremne, budući da su senzori u to vreme bili veličine kutije za cipele i veći, a komunikacione tehnologije, pogotovo bežične, nisu bile dostupne u današnjem smislu [64], [66]. Na radionici o distribuiranim senzorskim mrežama 1978. godine su identifikovane ključne potrebne tehnologije za razvoj bežičnih mreža: senzori, komunikacioni protokoli, obrada podataka i potrebni algoritmi, distribuirani softver, veštačka inteligencija i tehnike za rešavanje distribuiranih problema [64]. Sa razvojem distribuiranih senzorskih mreža i njihovim prodorom u akademsku zajednicu kroz partnerske univerzitete na programu, tehnologija bežičnih senzorskih mreža je uskoro počela da se razvija i u akademskim i civilnim naučnim istraživanjima [65]. Početkom XXI veka, napredak u računarskim i komunikacionim tehnologijama, uključujući MEMS tehnologiju, bežične mreže, procesore niske cene i potrošnje energije, izazvao je značajan razvoj istraživanja bežičnih senzorskih mreža i doveo ih bliže prvobitnoj viziji [64], [66]. U ovome je ponovo doprineo istraživački program agencije DARPA, SensIT (engl. *Sensor Information Technology*, informaciona tehnologija senzora), kojim su razvijene nove tehnike umrežavanja za izuzetno dinamična *ad hoc* okruženja, kao i tehnike za obradu podataka sa mreže kako bi se dobile korisne, pouzdane i pravovremene informacije iz distribuirane senzorske mreže [64]. Danas postoje mnogi proizvođači komercijalno dostupnih bežičnih senzorskih modula, kao i dodataka u vidu senzorskih pločica sa sensorima za merenja raznih vrednosti iz okoline, a bežične senzorske mreže nalaze primenu za nadzor kvaliteta vazduha, detekciju požara u šumama, prevenciju prirodnih katastrofa, stanice za vremensku prognozu, distribuciju električne energije, tretmane otpadnih voda, fabričku automatizaciju, proizvodnju, zdravstveni sektor, zaštitu životne sredine, bezbednost hrane, pametne prostore, itd, a predviđaju se i primene u daljinskom upravljanju grejanjem, osvetljenjem, medicinskom nadzoru, automatskoj kupovini namirnica, ličnoj zdravstvenoj dijagnostici, brizi o deci, itd. [62], [63], [65] Razvojem bežičnih senzorskih mreža, organizacija IEEE je definisala standard IEEE 802.15.4,

na osnovu kog je i ZigBee alijansa objavila standard ZigBee koji definiše skup komunikacionih protokola višeg nivoa za primenu u bežičnim senzorskim mrežama [66]. Mnogi danas prisutni bežični senzorski moduli su usvojili ovaj standard za komunikaciju (npr. MicaZ, IRIS, Telos/Tmote, itd.), što omogućava rad heterogenih bežičnih senzorskih mreža u kojima se koriste različite platforme [67].

2.2.1 Bežični senzorski moduli

Bežični senzorski moduli su imbedid sistemi (engl. *embedded system*) [60], [66], [67] koji se uobičajeno sastoje od mikrokontrolera, memorijske jedinice, RF komunikacione jedinice (koja se često naziva radio čip), RF antene, zatim baterije ili nekog drugog vida napajanja, dodatnih komponenti, kao i ugrađenih senzora ili mogućnosti povezivanja dodatne senzorske pločice (slika 4). Kako bi modul mogao da se koristi u bežičnoj senzorskoj mreži, neophodno mu je obezbediti što veću autonomnost, pa je tako za svaku od komponenti bežičnog senzorskog modula veoma važno voditi računa kako o performansama, tako i o energetskej efikasnosti.



Slika 4. Komponente bežičnog senzorskog modula

Mikrokontroler za bežični senzorski modul mora da ispunjava određene uslove [60], [68], kao što su mala potrošnja struje, odgovarajući napon napajanja, niska cena, mogućnost priključivanja dovoljnog broja dodatnih komponenti. Takođe, budući da je neophodno obezbediti što dužu funkcionalnost individualnog modula, što se često postiže ulaženjem u stanje spavanja mikrokontrolera (engl. *sleep mode*) kad god je to moguće, važno je da mikrokontroler može brzo da uđe u režim spavanja, kao i da se brzo vrati u režim normalnog rada. Takođe, za bežični senzorski modul je pogodno da mikrokontroler ima što veću

toleranciju za napon napajanja, tako da može ispravno da funkcioniše i kada baterije izgube svoj puni kapacitet. Memorija bežičnog senzorskog modula ne mora biti velika, često je dovoljna i ugrađena memorija u mikrokontroleru, a moguće je koristiti i dodatne fleš (engl. *flash*) ili SRAM (engl. *Static random-access memory*) memorije, u zavisnosti od toga da li podatke treba čuvati duži vremenski period sa što manjom potrošnjom energije (fleš memorija), ili je potrebno obezbediti veću brzinu upisa i čitanja podataka iz memorije (SRAM memorija).

RF komunikaciona jedinica (radio čip) je takođe od ključnog značaja za funkcionisanje bežičnog senzorskog modula. Rad ove jedinice često koristi najveću energiju, kako prilikom slanja, tako i prilikom primanja podataka [60], [68]. Ukoliko je komunikaciona jedinica stalno u aktivnom stanju (spremna za slanje ili prijem podataka), ona koristi energiju čak i kada ne šalje niti prima podatke (u stanju pripravnosti), zbog čega je važno postaviti ovu jedinicu u režim spavanja kada se ne šalju podaci i ne očekuje se prijem podataka [60], [68]. Postoje različiti algoritmi za sinhronizaciju komunikacije među bežičnim senzorskim modulima, po kojima modul može odrediti kada tačno treba da očekuje prijem podataka, i da u skladu sa tim aktivira RF komunikacionu jedinicu [60]. Rastojanje na kojem je moguće izvršiti komunikaciju između dva bežična senzorska modula je određeno jačinom izlaznog signala, kao i osetljivošću prijemne strane RF komunikacione jedinice, pojačanja antene, itd [60], [68]. Kako bi bežični senzorski moduli mogli da komuniciraju sa ostatkom bežične senzorske mreže, za RF komunikaciju se obično koriste omnidirekzione antene putem kojih moduli mogu da komuniciraju podjednako u svim pravcima, iako bi se usmerenim antenama mogla postići veća rastojanja za komunikaciju [60], [68]. Brzina prenosa podataka (engl. *bitrate*) od 10 do 100 Kbps je zadovoljavajuća u bežičnim senzorskim mrežama, pri čemu veće brzine prenosa podataka zahtevaju kraće intervale u kojima je komunikaciona jedinica aktivna, čime se povećava energetska efikasnost.

Bežični senzorski moduli se često napajaju AA baterijama, međutim životni vek ovakvih modula je obično samo par dana ukoliko se ne koriste neki od metoda za uštedu energije [63]. Budući da je u većini sistema neophodan duži životni vek modula, istražuju se i mnoge druge mogućnosti, kao što je upotreba solarnih ćelija ili sistema koji koriste energiju vetra ili pokreta, korišćenje baterija većeg kapaciteta ili većeg broja baterija, korišćenje komponenti unutar modula koje troše minimalnu količinu energije, itd, kao i implementacija režima spavanja za određene komponente koje u datom trenutku nisu neophodne za funkcionalnost

modula [63], [66]. Ograničen izvor napajanja u velikoj meri utiče na principe rada u bežičnim senzorskim mrežama, kako na rad pojedinačnog modula, tako i na načine prenosa podataka među modulima, gde se često mora žrtvovati kvalitet prenosa podataka i količina podataka kako bi se uštedela energija [69].

2.2.2 Senzorske pločice

Senzorske pločice su dodaci za bežične senzorske module, koji mogu da se postave na modul i povežu se sa njim, a na sebi mogu da sadrže različite senzore, kao i dodatke za izradu prototipova gde se mogu povezati dodatni korisnički senzori [67]. Neki senzorski moduli imaju već ugrađene senzore na sebi, i kod takvih modula obično nije moguće povezivanje dodatnih senzorskih pločica [67]. Među najčešće senzore koji se koriste u bežičnim senzorskim mrežama spadaju [69] senzori za: temperaturu, vlažnost vazduha, pokret, osvetljenje, pritisak, sastav zemljišta, nivo buke, prisustvo objekata, brzinu, smer kretanja objekta, kao i mnogi drugi.

2.2.3 Principi rada u bežičnim senzorskim mrežama

Bežični senzorski moduli koji pripadaju bežičnoj senzorskoj mreži su raspoređeni u prostoru u kojem se mere određeni senzorski podaci (slika 3). Svaki modul ima mogućnost da meri i prikuplja podatke iz svoje okoline, kao i da ih šalje prema centralnoj upravljačkoj jedinici sistema, koja je povezana sa posebnim bežičnim modulom koji se naziva kolektor podataka (engl. *sink, gateway*) [67]. Kako bi se podaci prosledili od udaljenog bežičnog senzorskog modula do kolektora podataka, obično je neophodan prenos podataka u više skokova (engl. *multi-hopping*) [67], odnosno prenos podataka preko više usputnih bežičnih senzorskih modula. Dakle, bežični senzorski moduli imaju dve funkcije, merenje i slanje podataka iz svoje okoline, i prosleđivanje podataka izmerenih na drugim bežičnim senzorskim modulima, koji su u nekom od skokova tokom prenosa ka kolektoru podataka stigli do modula. Takođe, prilikom prenosa podataka, moduli mogu i da obrađuju podatke, vrše fuziju senzorskih podataka, kako bi odstranili podatke sa greškama, ili izvukli zaključke iz dobijenih podataka sa više senzora ili tokom određenog vremenskog perioda, a zatim da ovakve obrađene podatke prosleđuju ka kolektoru podataka i centralnoj upravljačkoj jedinici sistema [69], [70]. U okviru bežične senzorske mreže, neki od modula mogu da imaju ulogu prikupljanja podataka iz određenog dela prostora, pri čemu oni služe kao kolektori podataka

za taj deo prostora, skupljaju podatke od modula u okolini i vrše agregaciju primljenih senzorskih podataka, koje zatim prosleđuju ka glavnom kolektoru podataka i centralnoj upravljačkoj jedinici sistema [61]. Na ovaj način izbegava se višestruko slanje istih ili sličnih podataka od više modula koji se nalaze u određenom delu prostora, čime se štedi energija i količina podataka za prenos. Bežični senzorski moduli mogu biti raspoređeni u prostoru na tačno određene pozicije, ili mogu biti nasumično raspoređeni [69] (npr. razbacani u polje iz aviona), pri čemu moraju da imaju sposobnost samoorganizacije u bežičnu senzorsku mrežu, kao i pronalaženja puteva za komunikaciju od modula do kolektora podataka i centralne upravljačke jedinice.

Kada su podaci spremni za slanje, prvo se izvršava neki od MAC protokola (engl. *media access control*, kontrola pristupa medijumu) na nivou veze OSI (eng. *Open Systems Interconnection*) modela, koji obezbeđuje da bežični senzorski moduli mogu da šalju i primaju podatke bez konflikta sa susednim modulima [60]. Ovi protokoli određuju pravila i raspored komunikacije, budući da u jednom trenutku samo jedan par modula može da komunicira na određenoj frekvenciji, u svom dometu [60], [63]. Zatim, neki od protokola za rutiranje na nivou mreže OSI modela pronalazi optimalnu putanju kojom se podaci šalju do krajnje destinacije [60], obično do kolektora podataka i centralne upravljačke jedinice sistema. U bežičnim senzorskim mrežama ne mogu se koristiti standardni protokoli za rutiranje, poput IP (Internet Protokol) koji podrazumeva stabilne veze između uređaja, što u bežičnim senzorskim mrežama nije slučaj budući da se komunikacija odvija bežičnim putem kod kog su visoki nivoi grešaka pri prenosu podataka [60], [63]. Zbog toga se razvijaju posebni protokoli za rutiranje u bežičnim senzorskim mrežama, kod kojih bežični senzorski modul na početku komunikacije obično osluškuje okolinu i formira tabele susednih modula, pri čemu beleži na kojoj udaljenosti se određeni sused nalazi, koliko ima preostale energije, koliko je kašnjenje pri komunikaciji preko tog suseda, kao i procenu kvaliteta veze sa susedom, a zatim pri komunikaciji odlučuje kako da komunicira na osnovu formiranih tabela [60], [63]. U okviru komunikacije, izuzetno je važna i vremenska sinhronizacija između pošiljaoca i primaoca podataka [60], kako bi se obezbedila mogućnost što bolje raspodele vremena između režima spavanja i aktivnog režima u bežičnom senzorskom modulu i omogućila maksimalna ušteda energije.

Među najčešće frekvencije radio talasa koje se koriste u bežičnim senzorskim mrežama spadaju: 433 MHz (npr. mica2, Cricket, BTnode), 868 MHz (npr. mica, mica2, EyesIFX), 916

MHz (npr. WeC, rene, rene2, dot, mica2, BTnode, TEHU-1121), i 2,4 GHz (npr. micaz, TelosB/Tmote, SHIMMER, Sun SPOT, IRIS, V-Link, TEHU-1121, NI WSN-3202, Imote, Imote2, Stargate) [67].

2.2.4 Programiranje bežičnih senzorskih modula i TinyOS

Programiranje bežičnih senzorskih modula se obično vrši preko namenskog programatora, koji može da koristi različite interfejse za povezivanje sa računarom, kao što su Ethernet (engl. *Ethernet*), bežična mreža, USB (engl. *Universal Serial Bus*) i drugi serijski portovi [67]. Pojedini bežični senzorski moduli mogu da se programiraju samo putem programatora, dok neki imaju i mogućnost direktnog programiranja povezivanjem sa računarom.

Tokom godina, razvijeno je nekoliko softverskih platformi namenjenih za programiranje bežičnih senzorskih modula [67], a među njima je najprihvaćeniji TinyOS operativni sistem [71], [72]. Kao što mu i naziv nagoveštava, TinyOS (engl. *tiny operating system*, sićušni operativni sistem) je dizajniran tako da zauzima što manje memorije, odnosno zauzima manje od 400 bajta memorije [72]. Implementiran je u programskom jeziku NesC, koji je dijalekt programskog jezika c, u kojem se programiraju i bežični senzorski moduli [66], [71], [72].

TinyOS je operativni sistem otvorenog koda (engl. *open source*), razvijen na arhitekturi zasnovanoj na komponentama, koja minimizuje veličinu programskog koda i obezbeđuje fleksibilnu platformu za implementaciju novih komunikacionih protokola [60], [66], [67], [72]. Komponente mogu biti mrežni protokoli, distribuirani servisi, drajveri za senzore ili alati za akviziciju podataka [66], [67]. Postoji osnovni skup ugrađenih komponenti, koji se može i proširivati ili menjati u zavisnosti od potreba korisnika [67]. TinyOS je operativni sistem zasnovan na događajima, što između ostalog omogućava korišćenje dobrih strategija za upravljanje potrošnjom energije u modulima [67], [72].

2.3 Sistemi i tehnologije za lokalizaciju

Razvojem Interneta stvari, koji dovodi do umrežavanja fizičkih objekata i sistema u jedinstven informacioni sistem, i lokalizacija objekata primenom tehnologija Interneta stvari dobija sve veću pažnju među istraživačima, budući da povezivanje objekata u Internet stvari

često zahteva poznavanje tačne pozicije objekta u prostoru. Ova istraživanja su posebno važna za lokalizaciju proizvoda prilikom transporta, proizvodnje, u logistici, zdravstvenim sistemima, sistemima za nadzor, itd, ali i za lokalizaciju: osoba, materijala, alata u različitim okruženjima, kao i za pozicioniranje autonomnih vozila, mobilnih robota i slično. Sistemi za lokalizaciju objekata se često nazivaju i sistemi za lokalizaciju u realnom vremenu (engl. *Real Time Locating System, RTLS*), koji su standardom [73] definisani kao kombinacija hardvera i softvera koji se koristi za kontinualno određivanje pozicije u prostoru objekata i resursa koji su opremljeni uređajima za praćenje unutar sistema, u realnom vremenu. Ovo praktično znači da je za lokalizaciju objekata potrebno kreirati hardverski i softverski sistem koji omogućava određivanje pozicije objekata obeleženih na određen način unutar potrebnog prostora. Iako se sistemi za lokalizaciju nazivaju i sistemi za lokalizaciju u realnom vremenu, oni često zbog fizičkih ograničenja sistema i tehnologija koje se koriste nisu u pravom smislu sistemi u realnom vremenu, u kojima bi bilo kakva promena u sistemu trebalo da se očitava trenutno, bez vremenskog kašnjenja, s tim što u mnogim primenama u suštini nije neophodno da sistem bude u pravom smislu u realnom vremenu, već da očitava promene u sistemu sa što manjim (dozvoljenim) kašnjenjem.

Sistemi za lokalizaciju mogu da budu zasnovani na jednoj tehnologiji, ili da budu hibridni sistemi dve ili više tehnologija kojima je moguće izmeriti više podataka i potencijalno dobiti tačniju i precizniju sliku o okolini. Među najpopularnije tehnologije za lokalizaciju spada GPS (engl. *Global Positioning System*, globalni pozicioni sistem), koji se zasniva na radio komunikaciji između GPS uređaja (primopredajnika) i 24 satelita koji se nalaze oko Zemlje [74]. Neophodno je da GPS uređaj uspostavi komunikaciju sa najmanje četiri satelita, na osnovu čega se određuje udaljenost između GPS uređaja i satelita, a zatim se određuje pozicija, brzina, kao i nadmorska visina posmatranog objekta na kojem se nalazi GPS uređaj. Ukoliko se komunikacija uspostavi sa više satelita, lokalizacija GPS uređaja je tačnija. GPS sistem funkcioniše odlično na otvorenom prostoru, sa greškom do nekoliko metara, koja je za tu namenu prihvatljiva uzevši u obzir veličinu čitavog sistema. Međutim, u zatvorenim prostorima, GPS sistem nailazi na poteškoće zbog ograničenog dometa unutar građevinskih objekata, a pored toga, u zatvorenim prostorima je obično potrebna veća tačnost lokalizacije, koja se ne može postići GPS sistemom. Zbog toga, u zatvorenim prostorima se obično primenjuju druge tehnologije, među koje spadaju različite bežične tehnologije, zvuk, ultrazvuk, infracrvena svetlost, laser, računarska vizija, i druge [18], [32]. U

okviru ove disertacije, biće dat pregled sistema za lokalizaciju objekata primenom tehnologija Interneta stvari, sa posebnim osvrtom na sisteme u kojima se lokalizacija vrši primenom RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža.

2.3.1 Merenja za lokalizaciju u RF bežičnim sistemima

Budući da se u RF bežičnim sistemima signali prenose radio talasima, za lokalizaciju je moguće koristiti različite parametre radio signala, kao što su [22], [24], [25], [32], [75]:

- RSSI – indikator jačine primljenog signala,
- ToA – vreme prijema signala (engl. *Time of Arrival*),
- TDoA – vremenska razlika prijema signala (engl. *Time difference of Arrival*),
- AoA – ugao prijema signala (engl. *Angle of Arrival*),
- DoA – pravac prijema signala (engl. *Direction of Arrival*),
- RToF – vreme odziva (engl. *Roundtrip Time of Flight*),
- PoA – faza primljenog signala (engl. *Phase of Arrival*),
- PDoA – razlika u fazi primljenog signala (engl. *Phase Difference of Arrival*).

Ukoliko ne postoji hardverska i softverska mogućnost merenja nijednog od navedenih parametara, moguće je ipak proceniti razdaljinu nekim drugim parametrima. Ovo se često dešava u slučaju RFID sistema u kojem čitač nema mogućnost merenja nijednog od navedenih parametara. Tada je moguće koristiti broj očitavanja taga (engl. *tag readcount*) kao indikator jačine signala. Broj očitavanja taga je definisan kao broj uspešnih očitavanja podataka sa taga u određenom broju pokušaja očitavanja od strane čitača [18]. U ovom pristupu koristi se pretpostavka da što je tag bliži anteni čitača, biće više puta očitano u određenom broju iteracija, odnosno da veći broj očitavanja taga ukazuje na veću jačinu signala. Takođe, moguće je proceniti razdaljinu određenog taga od čitača promenom izlazne snage predajne antene [55], pri čemu se za različite izlazne snage dobija podatak da li je tag očitano ili ne, čime se može proceniti na kojem rastojanju prestaje mogućnost očitavanja taga i zaključiti da se tag nalazi na tom rastojanju sa određenom verovatnoćom. Ovakve estimacije rastojanja mogu da se koriste tokom istraživanja, budući da ne zahtevaju dodatni hardver sa mogućnošću očitavanja nekog od parametara radio signala, međutim nemaju veliku praktičnu primenu u realnim sistemima, pošto ovakva procena rastojanja dugo traje

(potrebno je pokušati očitavanje taga određeni broj puta, često 100 ili više, ili menjati izlaznu snagu predajne antene više puta i pri svakoj promeni pokušati očitati tag), i samim tim sistem ne bi mogao da radi ni približno u realnom vremenu.

2.3.1.1 RSSI

Indikator jačine primljenog signala, RSSI, koristi se za merenje jačine signala između dva uređaja, odnosno procenjuje jačinu signala na prijemu na osnovu poznate emitovane snage predajnika. Na osnovu izmerene jačine signala, mogu se izračunati gubici pri prenosu signala, na osnovu kojih se dalje može proceniti rastojanje primenom teorijskih ili empirijskih modela [60], [76]. Kao indikator jačine primljenog signala, RSSI vrednost se predstavlja kao bezdimenzioni broj, pri čemu se jačina signala predstavlja kao broj u opsegu od 0 do $RSSI_{max}$, gde opseg RSSI vrednosti zavisi od proizvođača opreme. Međutim, često se smatra da je sama jačina signala RSSI vrednost, i tada je vrednost data u jedinici dBm, koja označava jačinu signala izraženu u decibelima u odnosu na 1 mW. RSSI je jedan od najčešće korišćenih parametara signala za lokalizaciju.

Lokalizacija koja se zasniva na merenju RSSI vrednosti je obično finansijski isplativija i jednostavnija za instalaciju u odnosu na lokalizaciju na osnovu merenja drugih parametara, pošto uređaji koji imaju mogućnost RF komunikacije već imaju ugrađenu mogućnost merenja jačine signala, pa samim tim nije potrebno instalirati dodatni hardver u sistemu [41], [76]. S druge strane, na tačnost merenja jačine signala u velikoj meri utiču uslovi okoline [60], budući da primljeni signal ne mora uvek biti očekivani direktan signal od predajnika do prijemnika, već može biti i reflektovani signal, oslabljeni signal, signal koji se prostire po više putanja ili signal pod uticajem interferencije drugih signala. Kako bi se prevazišao ovaj nedostatak, metodi za lokalizaciju koji uključuju merenje RSSI vrednosti često koriste formiranje takozvane RSSI mape sistema kao pripreme faze za lokalizaciju [41], pri čemu se u određenim pozicijama sistema mere i snimaju RSSI vrednosti, a kasnije, prilikom lokalizacije, ove snimljene vrednosti se koriste za poređenje sa novim izmerenim vrednostima, čime se dobija ili verifikuje tražena pozicija. Međutim, i ovakav pristup ima nedostatke, jer priprema faza dugo traje, i potrebno ju je ponavljati u slučaju da se okolina izmeni u većoj meri u odnosu na prvobitno stanje sistema.

2.3.1.2 ToA

Vreme prijema signala, ToA, koristi se za merenje vremena od momenta slanja signala sa predajnika do momenta primanja signala na prijemniku. Na osnovu ovog vremena i poznate brzine prostiranja signala, može se proceniti rastojanje između prijemnika i predajnika. Ukoliko ima više prijemnika u sistemu koji mere isti signal, moguće je koristiti i varijaciju TDoA, vremensku razliku prijema signala, koja posmatra razliku u vremenu između slanja signala sa predajnika do momenta primanja signala na različitim prijemnicima [41].

Lokalizacija koja se zasniva na merenju ToA ili TDoA vrednosti je obično robustnija od lokalizacije zasnovane na merenju RSSI u odnosu na uticaje okoline, jer je izmereno vreme prvo vreme kada je signal stigao do prijemnika, odnosno vreme po najkraćoj putanji prostiranja signala između predajnika i prijemnika. Nedostaci merenja ToA su u tome što je često potrebno obezbediti dodatni hardver koji će meriti i sinhronizovati vreme između predajnika i prijemnika ili dodatne mehanizme za sinhronizaciju, budući da je tačna sinhronizacija vremena od suštinskog značaja za lokalizaciju [41], kao i visoke procesorske mogućnosti kako bi se mogle izmeriti male razlike u vremenu [60].

2.3.1.3 AoA

Ugao prijema signala, AoA, koristi se za određivanje pravca prostiranja signala. Sličan parametar je i DoA, pravac prijema signala. Za merenje AoA vrednosti, potrebno je više prijernih jedinica na prijemniku, ili rotirajuća prijerna jedinica, kako bi bilo moguće odrediti pod kojim uglom je signal primljen [41], [60]. Potrebno je izmeriti AoA vrednost sa više predajnika kako bi se odredila tražena pozicija.

Ukoliko u sistemu postoji refleksija signala, ili prostiranje signala po više putanja, AoA gubi na tačnosti, jer je moguće da signal koji je primljen nije originalni signal.

2.3.2 Metodi za lokalizaciju u RF bežičnim sistemima

U zatvorenim prostorima je veoma teško modelovati prostiranje radio talasa¹, budući da usled postojanja različitih objekata u okolini postoje razne smetnje, kao što su apsorpcija, slabljenje, refleksija signala, interferencija više različitih signala, kao i prostiranje signala po više putanja. Osnovni model prostiranja radio talasa je sadržan u Frisovoj jednačini prenosa signala [77], koja je primenljiva u slobodnom prostoru, bez prepreka i na osnovu koje jačina signala opada sa kvadratom rastojanja između predajnika i prijemnika:

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r \lambda^2}{16\pi^2 d^2 L}, \quad (1)$$

gde je P_r snaga primljenog signala, P_t emitovana snaga predajne antene, G_t pojačanje predajne antene, G_r pojačanje prijemne antene, $L \geq 1$ faktor koji predstavlja hardverske gubitke u sistemu koji nemaju veze sa propagacionim gubicima, λ talasna dužina, a d rastojanje između predajne i prijemne antene [18]. Parametri G_t , G_r i L često imaju vrednost 1 pa se mogu izostaviti iz jednačine (1).

U zatvorenim prostorima često se koristi model zasnovan na log-normalnoj raspodeli propagacionog slabljenja (engl. *path loss*), po kom se jačina primljenog signala P na rastojanju d izračunava kao [22], [35], [37], [78], [79]:

$$P(d) = P_0 - 10 \cdot n \cdot \log_{10} \frac{d}{d_0} + X_\sigma, \quad (2)$$

gde je P_0 jačina primljenog signala (izražena u dBm) na referentnom rastojanju d_0 , n je indeks propagacionog slabljenja koji zavisi od okruženja, a X_σ je šum merenja koji predstavlja slučajan uticaj prepreke.

Međutim, do danas ne postoji model propagacije radio talasa koji u potpunosti odgovara primeni u zatvorenim prostorima, u kojima postoje različite smetnje i prostiranje radio talasa je neuniformno. Kako bi se ovaj problem prevazišao, razvijaju se različiti metodi za lokalizaciju koji umanjuju greške prilikom merenja. Mnogi od metoda za lokalizaciju su

¹ Iako je moguće koristiti različite parametre radio signala za procenu rastojanja između prijemnika i predajnika, kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, u okviru disertacije će nadalje, ukoliko nije drugačije naglašeno, biti korišćena procena na osnovu jačine primljenog signala, odnosno RSSI vrednosti, ali treba napomenuti da su metodi i algoritmi univerzalni i u slučajevima kada se koriste drugi parametri signala.

primenljivi u svim RF bežičnim sistemima, ali postoje i specifični metodi koji su primenljivi samo u sistemima koji primenjuju određenu tehnologiju. U nastavku će biti predstavljeni neki od metoda koji mogu da se koriste u RFID sistemima i bežičnim senzorskim mrežama. Metodi za lokalizaciju uključuju merenja nekog od parametara signala između više uređaja, i u nastavku će stacionarni uređaji koji vrše merenje parametara biti nazvani *referentne tačke*, a mobilni uređaj, povezan sa objektom za koji je potrebno odrediti poziciju u prostoru, *tražena tačka*. Referentne tačke bi u slučaju RFID sistema bile antene RFID čitača preko kojih se mere parametri signala, a u slučaju bežične senzorske mreže stacionarni bežični senzorski moduli postavljeni na tačno određena mesta u prostoru, dok bi tražena tačka u slučaju RFID sistema bio RFID tag postavljen na objekat za koji se određuje pozicija u prostoru, a u slučaju bežične senzorske mreže, mobilni bežični senzorski modul postavljen na objekat.

2.3.2.1 Deterministički metodi

Deterministički metodi za lokalizaciju su metodi koji za određene ulazne vrednosti uvek daju isto rešenje, odnosno čiji algoritam nakon obrade ulaznih podataka uvek daje iste izlazne vrednosti. U determinističke metode spadaju: trijagulacija, trilateracija, multilateracija, metod najbližih suseda, ROC, MinMax, itd. Ovi metodi su često primenjivani u eksperimentalnim istraživanjima za lokalizaciju proizvoda, bilo u svom osnovnom obliku ili uz određene dodatke.

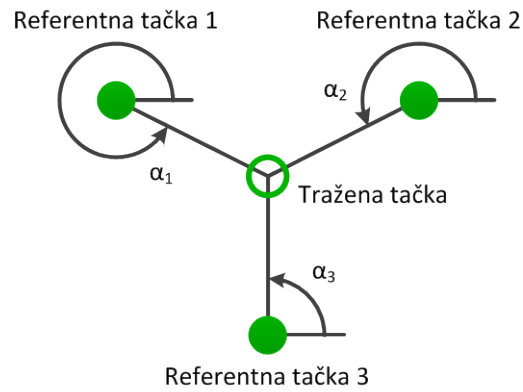
U radu [18] prikazani su rezultati primene metoda multilateracije za lokalizaciju pasivnih UHF RFID tagova na otvorenom prostoru bez prepreka, pri čemu je dobijena srednja vrednost greške od 0,19 m. Autori u radu [80] uporedno ispituju više metoda, među kojima su metod multilateracije, ROC i MinMax, u bežičnoj senzorskoj mreži u realnom okruženju, i respektivno dobijaju srednje vrednosti greške od 3 m, 4,1 m i 2,2 m, uz primenu 5 referentnih tačaka za lokalizaciju mobilnog bežičnog senzorskog modula. Rad [81] daje predlog primene metoda trilateracije za lokalizaciju proizvoda u tri dimenzije u RFID sistemu, uz korišćenje četiri RFID antene i referentnih RFID tagova raspoređenih u prostoru, koji omogućavaju povećanje tačnosti estimacije rastojanja između traženog RFID taga i RFID antene. Uporedna analiza metoda ROC, MinMax i metoda najbližih suseda data je u radu [23], gde su navedeni metodi primenjeni u bežičnoj senzorskoj mreži u laboratorijskom okruženju i na gradilištu, i respektivno su dobijene greške od 1,69 m, 1,2 m i 1,45 m. U radu [30] predstavljena je ideja

korišćenja referentnih RFID tagova u prostoru koji se koriste kao najbliži susedi u metodu najbližih suseda umesto unapred snimljenih vrednosti. Sistem je realizovan sa aktivnim RFID tagovima, i dobijena je srednja vrednost greške od 1,09 m. Autori u radu [82] primenjuju metod najbližih suseda u pasivnom RFID sistemu, kao i poboljšanu varijantu metoda najbližih suseda u kojoj se susedi odabiraju tako što se izlazne snage RFID antena postepeno menjaju sve dok se ne detektuje traženi RFID tag, a zatim se uzimaju referentni RFID tagovi koji su u tom slučaju detektovani. Primenom metoda najbližih suseda dobijena je srednja vrednost greške od približno 0,6 m, a primenom poboljšanog metoda srednja vrednost greške je smanjena na 0,33 m. Metod najbližih suseda je primenjen i u radu [83], uz poboljšanja primenom algoritama nenadgledanog učenja u toku pripremne faze i tehnika redukcije dimenzija podataka nakon izvršene estimacije pozicije. Metod je primenjen u bežičnoj senzorskoj mreži, sa 5 referentnih bežičnih senzorskih modula i u najboljem ispitivanom slučaju dobijena je srednja vrednost greške lokalizacije od 1,2 m. Autori u radu [84] takođe primenjuju metod najbližih suseda u bežičnoj senzorskoj mreži, pri čemu dobijaju srednju vrednost greške od približno 0,5 m.

U nastavku će biti predstavljeni neki od determinističkih metoda koji se često koriste u sistemima za lokalizaciju.

2.3.2.1.1 Trijangulacija

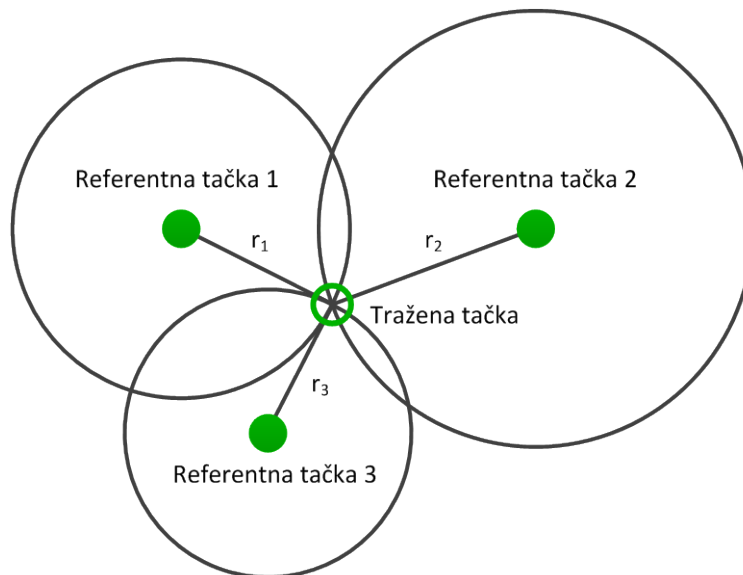
Trijangulacija (slika 5) je geometrijski metod u kojem se za određivanje pozicije tražene tačke koristi AoA [60]. Određuju se uglovi prijema signala od referentnih tačaka do tražene tačke (α_1 , α_2 i α_3 na slici 5) a zatim se pozicija tražene tačke računa na osnovu trigonometrijskih jednačina. Ovaj metod se retko koristi, budući da je za dobijanje AoA potreban dodatni hardver, i da se gubi na tačnosti ukoliko u sistemu postoji refleksija signala, ili prostiranje signala po više putanja.



Slika 5. Trijagulacija

2.3.2.1.2 Trilateracija

Trilateracija (slika 6) je geometrijski metod koji vrši estimaciju koordinata tražene tačke na osnovu rastojanja između tražene tačke i tri referentne tačke [60]. Oko svake referentne tačke se opiše kružnica čiji je poluprečnik jednak rastojanju do tražene tačke, a tražena tačka se nalazi u preseku sve tri kružnice.

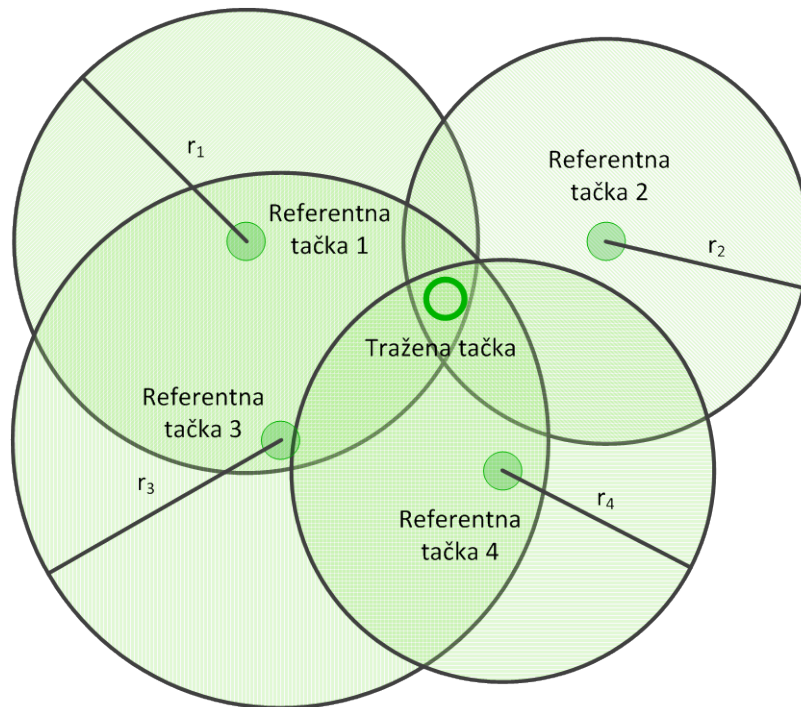


Slika 6. Trilateracija

2.3.2.1.3 Multilateracija

Multilateracija (slika 7) vrši estimaciju koordinata na osnovu rastojanja između tražene tačke i više od tri referentne tačke [18], [60]. Za primenu ovog metoda, potrebno je postaviti model prostiranja signala u određenom prostoru na osnovu kog se vrši estimacija rastojanja između tražene i referentne tačke. Kada okolina nije idealna, kao što je slučaj u zatvorenim

sistemima, potrebno je odabrati model prostiranja signala koji u najvećoj meri može da kompenzuje prisutne smetnje.



Slika 7. Multilateracija

Ukoliko se referentne tačke R_k , $k=1,2,\dots,n$ nalaze na poznatim koordinatama $(x_k, y_k)^t$, i izvršena je estimacija rastojanja r_k , $k=1,2,\dots,n$ između tražene tačke sa nepoznatim koordinatama (x, y) i referentnih tačaka, može se uspostaviti sledeći sistem jednačina [18]:

$$\begin{cases} r_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \\ r_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \\ \dots \\ r_n^2 = (x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 \end{cases} \quad (3)$$

Ukoliko se od prve jednačine oduzme svaka sledeća, dobija se sledeći sistem jednačina:

$$\begin{cases} (x_1 - x_2)x + (y_1 - y_2)y = b_{21} \\ (x_1 - x_3)x + (y_1 - y_3)y = b_{31}, \\ \dots \\ (x_1 - x_n)x + (y_1 - y_n)y = b_{n1} \end{cases} \quad (4)$$

pri čemu je $b_{i1} = \frac{1}{2}(x_1^2 - x_i^2 + y_1^2 - y_i^2 + r_i^2 - r_1^2)$, a $i=2,3,\dots,n$.

¹ Za sve metode pretpostavlja se da se lokalizacija objekta vrši u dvodimenzionalnom prostoru (ravni), međutim metodi se mogu jednostavno proširiti tako da se lokalizacija vrši i u trodimenzionalnom prostoru.

Sistem jednačina (4) može da se zapiše i u matričnom obliku kao:

$$AX = b, \quad (5)$$

pri čemu je:

$$A = \begin{bmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 \\ x_1 - x_3 & y_1 - y_3 \\ \dots & \dots \\ x_1 - x_n & y_1 - y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_{21} \\ b_{31} \\ \dots \\ b_{n1} \end{bmatrix}.$$

Ukoliko ne bi postojala greška pri estimaciji rastojanja r_k , sistem sa tri referentne tačke bi dao jedinstveno rešenje, odnosno metod multilateracije bi mogao da se svede na metod trilateracije. Međutim, pošto su greške pri estimaciji rastojanja na osnovu RSSI vrednosti uvek prisutne, potrebno je koristiti više referentnih tačaka kako bi se dobila tačnija estimacija traženih koordinata. Sistem jednačina tako postaje predeterminisan, a da bi se odredile koordinate tražene tačke sistem jednačina može da se predstavi kao linearni problem najmanjih kvadrata:

$$\text{Min} \|AX - b\|^2, \quad (6)$$

koji je moguće rešiti kao [60], [85]:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T b. \quad (7)$$

Multilateracija je algoritam koji je jednostavan za programiranje i zahteva malo računarskih resursa, zbog čega je primenjen u mnogim istraživanjima [18].

2.3.2.1.4 Metod najbližih suseda

Metod najbližih suseda se zasniva na pretpostavci da ukoliko su dve tačke bliže u prostoru, utoliko je razlika u izmerenoj jačini signala među njima manja [18], na osnovu čega se dalje pretpostavlja da se pozicija tražene tačke može odrediti na osnovu poznatih RSSI vrednosti u tačkama u njegovoj okolini. Kako bi bile poznate RSSI vrednosti u prostoru, moguće je unapred formirati mapu RSSI vrednosti određene rezolucije, tako što se u određenim tačkama u prostoru snime RSSI vrednosti, koje se kasnije koriste kao vrednosti za poređenje, ili postaviti dodatne tačke za poređenje koje omogućavaju ažuriranje RSSI mape tokom vremena.

Za određivanje nepoznate pozicije tražene tačke u prostoru, potrebno je odrediti RSSI vrednosti između tražene i referentnih tačaka, a zatim iz RSSI mape izdvojiti najbliže tačke na osnovu njihovih RSSI vrednosti. Blizina tražene tačke sa RSSI vrednostima s_j i tačke za koju su snimljene RSSI vrednosti s_{ij} , $j=1,2,\dots,n$ može se odrediti kao euklidsko rastojanje RSSI vrednosti po sledećoj formuli:

$$d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (s_j - s_{ij})^2}, \quad (8)$$

gde vrednosti za $j=1,2,\dots,n$ predstavljaju RSSI vrednosti do referentnih tačaka, za svaku susednu tačku i . Na osnovu izračunatih euklidskih rastojanja, odabira se određen broj najbližih susednih tačaka koje se uzimaju u razmatranje. Kako bi se faktorizovao uticaj pojedinih izabranih susednih tačaka, za svaku od tačaka moguće je odrediti normalizovani težinski koeficijent w_i po formuli:

$$w_i = \frac{1 / \sqrt{\sum_{j=1}^n (s_{ij} - s_j)^2}}{\sum_{i=1}^k \left(1 / \sqrt{\sum_{j=1}^n (s_{ij} - s_j)^2} \right)}, \quad (9)$$

gde je n broj referentnih tačaka, a k broj najbližih suseda koji se uzimaju u razmatranje.

Nepoznate koordinate tražene tačke (x, y) mogu se zatim odrediti na osnovu sledećih jednačina:

$$\begin{cases} x = \sum_{i=1}^k w_i x_i \\ y = \sum_{i=1}^k w_i y_i \end{cases}, \quad (10)$$

gde su (x_i, y_i) , $i=1,2,\dots,k$ koordinate tačaka koje su izabrane kao najbliži susedi, a w_i , $i=1,2,\dots,k$ odgovarajući težinski koeficijenti. Ovaj metod ne koristi direktnu estimaciju rastojanja između tražene tačke i referentnih tačaka, zbog čega je pogodan za lokalizaciju u neidealnim okruženjima.

2.3.2.2 Metodi optimizacije

Za lokalizaciju proizvoda moguće je koristiti i različite metode optimizacije, a budući da su lokalizacioni sistemi obično nelinearni i sadrže slučajne komponente, dobar izbor su

metaheuristički metodi optimizacije [86], koji ne pretražuju čitav prostor stanja, već se rešenja dobijaju metodom pokušaja i pogrešaka kako bi se dobila zadovoljavajuća rešenja u razumnom vremenu. Kod ovih metoda ne postoji garancija da je dobijeno rešenje zaista optimalno, ali često jeste, ili je dovoljno blizu optimumu da bi bilo prihvaćeno. Metaheuristički metodi su često zasnovani na nekom procesu ili ponašanju iz realnog sveta, a među njih spadaju: simulirano kaljenje (engl. *simulated annealing*), evolutivni metodi kao što su genetski algoritmi, zatim metodi zasnovani na inteligenciji roja, kao što su optimizacija rojem čestica (engl. *particle swarm optimization, PSO*), optimizacija kolonijom mrava, optimizacija kolonijom pčela, i mnogi drugi.

Za postavku bilo kog problema optimizacije u sistemu za lokalizaciju proizvoda, potrebno je odrediti funkciju cilja, ili kriterijum optimalnosti na osnovu kojeg će se vršiti optimizacija, koja uzima u obzir trenutno izmerene RSSI vrednosti, a može i ne mora da uzima u obzir snimljenu RSSI mapu prostora.

U radovima [87] i [88] autori su primenili metode optimizacije rojem čestica i optimizacije kolonijom bakterija za lokalizaciju bežičnih senzorskih modula u simuliranoj bežičnoj senzorskoj mreži. Kao kriterijum optimalnosti korišćena je razlika proračunatog rastojanja između modula i simuliranog merenja rastojanja, pri čemu je za simulirano merenje rastojanja korišćeno pravo rastojanje, sa dodatim šumom od 2 do 5%. Izračunate srednje vrednosti greške su se kretale od 0,04 m do 0,22 m za optimizaciju rojem čestica, i od 0,03 do 0,18 m za optimizaciju kolonijom bakterija, pri čemu optimizacija kolonijom bakterija zahteva više računarskih resursa i ima duže vreme izvršavanja algoritma. Budući da u literaturi nije pronađen slučaj korišćenja optimizacije rojem čestica za lokalizaciju u realnom sistemu za bežičnu senzorsku mrežu, niti za lokalizaciju u RFID sistemu, ovaj metod će biti detaljnije opisan i korišćen kao predstavnik metoda optimizacije.

2.3.2.2.1 Optimizacija rojem čestica

Optimizacija rojem čestica [89]–[93] je metod za pretragu i optimizaciju koji je zasnovan na ponašanju roja životinjskih društava koja nemaju vođu, kao što su jata ptica, riba, i slično. U ovim društvima, životinje pronalaze hranu slučajnošću, tako što jedinka koja je najbliža izvoru hrane (rešenju problema) prenosi informaciju ostalim jedinkama, i one kreću da je prate i time i same dolaze u bolju situaciju. Optimizacija rojem čestica se sastoji od roja, odnosno skupa čestica, u kom svaka čestica predstavlja jedno moguće rešenje problema.

Čestice ovog skupa se iterativno kreću kroz prostor stanja u potrazi za najboljom pozicijom u tom prostoru (optimumom), na osnovu informacija o najboljoj prethodnoj poziciji date čestice i najboljoj prethodnoj poziciji njenih suseda.

U optimizaciji rojem čestica, svaka čestica ima svoju poziciju $x_k^{[m]}$ u prostoru stanja i brzinu $v_k^{[m]}$ u trenutku k , pri čemu je $1 \leq m \leq M$, a M ukupan broj čestica u roju. Inicijalizacija algoritma se vrši proizvoljnim postavljanjem čestica $x_k^{[m]}$ u prostoru stanja, pri čemu je uobičajena uniformna raspodela čestica. Optimalan broj čestica zavisi od samog problema koji se rešava, ali uglavnom je zadovoljavajući broj čestica između 20 i 100 [90]. Za procenu koliko je pozicija čestice dobra, potrebno je odrediti kriterijum optimalnosti, funkciju $f(x)$ koja ima optimum u poziciji koja predstavlja globalno rešenje problema. Na osnovu kriterijuma optimalnosti, za svaku česticu je potrebno odrediti koliko joj je dobra pozicija u datom trenutku, i sačuvati najbolju dosadašnju poziciju date čestice $pbest^{[m]}$ (engl. *particle best*). Takođe, potrebno je sačuvati dosadašnju najbolju poziciju bilo koje čestice $gbest$ (engl. *global best*). Algoritam se izvršava iterativno dok se ne postigne zadovoljavajuća vrednost za $gbest$, ili se postigne maksimalni predviđeni broj iteracija k_{max} . U svakoj iteraciji proračunavaju se pozicije i brzine svih čestica, na osnovu sledećih jednačina:

$$v_{k+1}^{[m]} = w_k \cdot v_k^{[m]} + c_1 r_1 (pbest^{[m]} - x_k^{[m]}) + c_2 r_2 (gbest - x_k^{[m]}), \quad (11)$$

$$x_{k+1}^{[m]} = x_k^{[m]} + v_{k+1}^{[m]}, \quad (12)$$

gde koeficijent w_k predstavlja inercijalni faktor (w_k se obično inicijalno postavlja na vrednost 0,9, a zatim u svakoj iteraciji smanjuje tako da u iteraciji k_{max} vrednost bude 0,4 [94]–[96]), koeficijenti c_1 i c_2 su pozitivne konstante (često je $c_1 = c_2 = 2$ [90], [91]), a r_1 i r_2 slučajni brojevi uniformne raspodele iz intervala [0,1]. Na ovaj način, čestice se kreću kroz prostor tako što prate optimalne čestice, čime u narednoj iteraciji teže da postignu bolju poziciju od trenutne.

2.3.2.3 Metodi zasnovani na teoriji verovatnoće

Nesigurnost merenja parametara u bežičnim sistemima uslovlila je korišćenje metoda zasnovanih na teoriji verovatnoće kod kojih se ne dobija jedno, sigurno rešenje, već se dobija skup rešenja sa dodeljenim verovatnoćama da je neko rešenje pravo rešenje sistema. U ove

metode spadaju Bajesovo zaključivanje, maksimalna verodostojnost, razne varijante Kalmanovog filtra, čestični filter, itd.

U radu [18] primenjeno je Bajesovo zaključivanje za lokalizaciju pasivnih UHF RFID tagova na otvorenom prostoru bez prepreka, i dobijena je srednja vrednost greške od 0,37 m. Metod maksimalne verodostojnosti primenjen je u radu [23] u bežičnoj senzorskoj mreži u laboratorijskom okruženju i na gradilištu, gde je postignuta srednja vrednost greške od 2,52 m, kao i u radu [80] u bežičnoj senzorskoj mreži u laboratorijskom okruženju, gde je postignuta srednja vrednost greške od 2,4 m. Autori u radu [28] prikazuju studiju primene metoda maksimalne verodostojnosti u UHF RFID sistemu u fuziji sa snimcima sa kamere i podacima sa laserskog senzora udaljenosti, pri čemu navode da je uključivanje podataka iz RFID sistema poboljšalo sistem za lokalizaciju za 11,1%. Rad [97] poredi parametre dobijene metodima maksimalne verodostojnosti, Kalmanovog filtra i proširenog Kalmanovog filtra simulacijama u bežičnoj senzorskoj mreži, pri čemu prošireni Kalmanov filter daje bolje rezultate od oba metoda sa kojima je poređen. U radu [98] data je uporedna studija primene proširenog i nederivacijskog Kalmanovog filtra za lokalizaciju RFID tagova u simuliranom sistemu, pri čemu je za prošireni Kalmanov filter dobijena srednja vrednost greške od 0,66 m, a za nederivacijski Kalmanov filter 0,23 m. U radu [99] istih autora dodatno su prikazani rezultati simulacija za nederivacijski Kalmanov filter. Rad [78] prikazuje primenu hibridnog metoda koji koristi RSSI podatke iz bežične senzorske mreže i podatke o detekciji tagova u HF i UHF RFID sistemu kao ulazne parametre proširenog Kalmanovog filtra. U ovom radu postignuta je srednja vrednost greške lokalizacije od 1,81 m. Autori u radu [35] primenjuju prošireni Kalmanov filter i čestični filter u hibridnom sistemu koji koristi RSSI vrednosti izmerene u bežičnoj senzorskoj mreži za četiri referentne tačke i podatke o detekciji referentnih RFID tagova. Za prošireni Kalmanov filter dobijena je srednja vrednost greške od približno 0,92 m, dok je za čestični filter srednja vrednost greške 1,1 m. U radu [29] je primenjen čestični filter u okviru hibridnog metoda, u kom se koriste RSSI vrednosti u UHF RFID sistemu u kombinaciji sa podacima o detekciji RFID taga, i dobijena je srednja vrednost greške od približno 0,4 m.

U nastavku će biti predstavljeni neki od metoda zasnovani na teoriji verovatnoće koji mogu da se koriste u sistemima za lokalizaciju.

2.3.2.3.1 Bajesovo zaključivanje

Bajesovo pravilo zaključivanja (engl. *Bayesian inference*) je statistički metod zaključivanja u kojem se na osnovu merenja, opservacija ili dokaza menja pretpostavljena verovatnoća da je neka postavljena hipoteza tačna [18].

Za pretpostavljene koordinate tražene tačke x , i merenje z , Bajesova teorema, ili Bajesovo pravilo, glasi:

$$P(x|z) = \frac{P(z|x) \cdot P(x)}{P(z)}, \quad (13)$$

gde je $P(x|z)$ a posteriori verovatnoća, odnosno verovatnoća da se tražena tačka nalazi na koordinatama x pri merenju z , $P(z|x)$ verovatnoća merenja, odnosno verovatnoća da se za koordinate x izmeri vrednost z , $P(x)$ je a priori verovatnoća, odnosno pretpostavljena verovatnoća da se tražena tačka nalazi na koordinatama x pre merenja z , a $P(z)$ je ukupna verovatnoća merenja z , koja se može izračunati kao:

$$P(z) = \sum_i P(z|x_i) \cdot P(x_i), \quad (14)$$

gde su x_i , $i=1...n$ sve moguće koordinate tražene tačke. Ovaj odnos se naziva i pravilo totalne verovatnoće.

Uzastopnim računanjem a posteriori verovatnoće, nakon određenog broja iteracija dobija se sve veća verovatnoća da se tražena tačka nalazi na određenim koordinatama. Jedna od prednosti Bajesovog zaključivanja je to što omogućava izmenu verovanja o poziciji tražene tačke na osnovu dinamičkih podataka o jačini signala sa referentnih tačaka [18]. Na Bajesovom zaključivanju su zasnovani razni metodi za estimaciju stanja sistema, koji mogu da se primene za lokalizaciju proizvoda, a od kojih će biti opisani Kalmanov filter i čestični filter.

2.3.2.3.2 Kalmanov filter

Kalmanov filter [100], [101] je jedan od najpopularnijih savremenih metoda za estimaciju stanja dinamičkih sistema. Svoju popularnost stekao je zbog veoma intuitivne formulacije prostora stanja, estimacije zasnovane na predikciji i korekciji, i strukture rekurzivnog filtra, kao i zbog jednostavnosti u implementaciji na digitalnim procesorima. Kalmanov filter je zasnovan na matematičkom modelu dinamičkog sistema:

$$x_{k+1} = F \cdot x_k + B \cdot u_k + G \cdot w_k \quad (15)$$

$$z_k = H \cdot x_k + D \cdot u_k + v_k, \quad (16)$$

gde je x_k vektor stanja u trenutku k , u_k upravljački vektor dinamičkog sistema u trenutku k (za lokalizaciju objekata u prostoru, u_k je vektor kretanja objekta), z_k je vektor merenja u trenutku k , w_k je beli Gausov šum procesa u trenutku k , sa nultom očekivanom vrednošću i kovarijansom Q , v_k je beli Gausov šum merenja u trenutku k , sa nultom očekivanom vrednošću i kovarijansom R , F je prelazna matrica koja menja stanje x iz trenutka k u $k+1$, B je pojačanje ulaza, H je model merenja, odnosno matrica koja mapira prostor stanja u prostor merenja, a D je matrica direktnog upravljanja ulazom. U postavci modela, matrice B i D se često izostavljaju kada ne postoji eksplicitno upravljanje sistemom.

Pri postavci modela, neophodno je odrediti matricu H , pretpostaviti kovarijansu R . Kada je poznat vektor merenja z_k , potrebno je odrediti ili pretpostaviti vektor x_k , *a priori* estimaciju stanja u trenutku k pre nego što je izvršena korekcija stanja pomoću podataka merenja, kao i matricu P_k , *a priori* kovarijansu greške stanja, odnosno estimacije.

Kalmanov filter vrši estimaciju stanja u dva koraka, korekcijom trenutnog stanja pomoću podataka merenja i predikcijom sledećeg stanja na osnovu trenutnog stanja.

Korekcija trenutnog stanja x'_k pomoću podataka merenja odvija se u nekoliko koraka. Za početak treba proračunati grešku merenja:

$$y_k = z_k - H \cdot x_k \quad (17)$$

Kalmanovo pojačanje K se proračunava kao:

$$K = P_k \cdot H^T \cdot S^{-1}, \quad (18)$$

pri čemu je kovarijansa greške, ili kovarijansa inovacija:

$$S = H \cdot P_k \cdot H^T + R \quad (19)$$

Estimacija novog (*posteriori*) stanja sistema je:

$$x'_k = x_k + (K \cdot y_k), \quad (20)$$

a *posteriori* kovarijanse:

$$P'_k = (I - K \cdot H) \cdot P_k, \quad (21)$$

gde je I jedinična matrica.

Drugi korak Kalmanovog filtra podrazumeva predikciju sledećeg stanja sistema na osnovu trenutnog stanja, na sledeći način:

$$x_{k+1} = F \cdot x'_k + u_k \quad (22)$$

$$P_{k+1} = F \cdot P'_k \cdot F^T + G \cdot Q \cdot G^T. \quad (23)$$

Kalmanov filter je filter za predikciju u linearnim sistemima, i podrazumeva da su vektori sledećeg stanja i merenja u jednačinama (15) i (16) linearne funkcije argumenata, sa dodatim Gausovim šumom, kao i da početna pretpostavka ima normalnu raspodelu. Kako u praksi u mnogim slučajevima uslovi linearnosti nisu ispunjeni, razvijeni su napredniji filteri koji omogućavaju prevazilaženje nelinearnosti. Najčešće korišćen je prošireni Kalmanov filter (engl. *extended Kalman filter, EKF*), kod kojeg vektori sledećeg stanja i merenja zavise od nelinearnih funkcija f i h , respektivno:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (24)$$

$$z_k = h(x_k) + v_k, \quad (25)$$

Za razliku od Kalmanovog filtra, koji daje tačno određeno uverenje, prošireni Kalmanov filter proračunava samo aproksimaciju stvarnog uverenja koju predstavlja Gausovom raspodelom. Osnovna ideja proširenog Kalmanovog filtra je linearizacija nelinearnih funkcija u okolini posmatrane tačke, razvojem u Tejlorov red prvog stepena. Tačka oko koje se vrši linearizacija treba da bude najverovatnija tačka u datom trenutku, pa se zato uzima očekivana vrednost Gausove raspodele za trenutno stanje sistema, μ_k . Za funkciju f , razvoj u Tejlorov red izgleda ovako:

$$f(x_k, u_k) \approx f(\mu_k, u_k) + f'(\mu_k, u_k)(x_k - \mu_k) + \text{članovi višeg stepena}, \quad (26)$$

pri čemu se za EKF članovi višeg stepena zanemaruju, i funkcija f postaje:

$$f(x_k, u_k) = f(\mu_k, u_k) + F_k(x_k - \mu_k). \quad (27)$$

Matrica F_k je dimenzija $n \times n$, gde je n dimenzija vektora stanja. Budući da je ova matrica matrica parcijalnih izvoda, naziva se Jakobijan.

Linearizacija se na isti način odvija i za funkciju merenja h , pri čemu se funkcija razvija u Tejlorov red u okolini tačke $\bar{\mu}_k$, najverovatnijeg stanja u trenutku k :

$$h(x_k) \approx h(\bar{\mu}_k) + h'(\bar{\mu}_k)(x_k - \bar{\mu}_k) + \text{članovi višeg stepena}, \quad (28)$$

odnosno, nakon zanemarivanja članova višeg stepena, funkcija h postaje:

$$h(x_k) = h(\bar{\mu}_k) + H_k(x_k - \bar{\mu}_k). \quad (29)$$

Kada su nelinearne funkcije linearizovane, uspostavlja se algoritam za prošireni Kalmanov filter analogno algoritmu običnog Kalmanovog filtra.

Korekcija trenutnog stanja pomoću podataka merenja izračunava se na sledeći način:

$$y_k = z_k - h(\bar{\mu}_k) \quad (30)$$

$$K = P_k \cdot H_k^T \cdot s^{-1}, \quad (31)$$

$$s = H_k \cdot P_k \cdot H_k^T + R \quad (32)$$

Estimacija novog (*posteriori*) stanja sistema je:

$$\mu_k = \bar{\mu}_k + K \cdot y_k, \quad (33)$$

a *posteriori* kovarijanse:

$$P'_k = (I - K \cdot H_k) \cdot P_k. \quad (34)$$

Predikcija sledećeg stanja sistema na osnovu trenutnog stanja izračunava se na sledeći način:

$$\bar{\mu}_{k+1} = f(u_k, \mu_k) \quad (35)$$

$$\bar{P}_{k+1} = F_k \cdot P'_k \cdot F_k^T + Q. \quad (36)$$

2.3.2.3.3 Čestični filter

Čestični filter (engl. *particle filter*) [101] aproksimira a posteriori stanje sistema konačnim brojem parametara. Ideja ovog filtra je predstavljanje a posteriori stanja skupom slučajnih uzoraka stanja sistema, odnosno raspodela stanja nije predstavljena parametarskim oblikom (funkcijom), već skupom uzoraka uzetih iz ove raspodele, zbog čega je moguće predstaviti mnogo širi prostor raspodela nego što je, na primer, prostor Gausovih raspodela. Čestični filter samim tim omogućava implementaciju Bajesovog filtriranja u sistemima kod kojih su prelazna funkcija stanja, procesni i senzorski šum modelovani nelinearnim funkcijama [102].

Kod čestičnog filtra, uzorci a posteriori raspodele stanja nazivaju se čestice, i obeležavaju se kao:

$$X_k := x_k^{[1]}, x_k^{[2]}, \dots, x_k^{[M]}. \quad (37)$$

Svaka čestica $x_k^{[m]}$, gde je $1 \leq m \leq M$, je jedna hipoteza stvarnog stanja sistema u trenutku k . M je ukupan broj čestica u skupu čestica X_k , pri čemu je uobičajeno da ovaj broj bude velik, na primer $M=1000$.

Ideja čestičnog filtra je da se verovanje o stanju sistema aproksimira skupom čestica X_k , pri čemu je verovatnoća da određena čestica bude uključena u skupu čestica X_k (odnosno njen težinski koeficijent $w_k^{[m]}$) proporcionalna njenom a posteriori verovanju u Bajesovom filtru.

$$w_k^{[m]} \sim P \left(x_k^{[m]} \mid z_{1:k}, u_{1:k} \right). \quad (38)$$

Posledično, što je deo prostora gušće naseljen česticama, to je veća verovatnoća da se stvarno stanje sistema nalazi u tom delu prostora.

Kao i kod Kalmanovog filtra, čestični filter vrši estimaciju sledećeg stanja sistema na osnovu trenutnog stanja. Inicijalizacija filtra se vrši proizvoljnim postavljanjem čestica $x_k^{[m]}$ u prostoru stanja, pri čemu je $1 \leq m \leq M$, a M ukupan broj čestica, koji je uobičajeno veći od 100. Ova inicijalna raspodela može biti uniformna, ili određena nekim a priori verovanjem o stvarnom stanju sistema. Da bi se vršila estimacija sledećeg stanja sistema, potrebno je odrediti težinske faktore za svaku česticu u sistemu, koji odgovaraju verovatnoći da data čestica predstavlja stvarno stanje sistema. Zatim se skup čestica X_{k+1} formira odabiranjem čestica iz skupa X_k sa verovatnoćom proračunatom u prethodnom koraku. Na ovaj način, čestice koje imaju veću verovatnoću da predstavljaju stvarno stanje sistema bivaju odabrane više puta, a one koje imaju manju verovatnoću manje puta, ili čak ne budu odabrane za novi skup čestica. Na ovaj način, iterativno se dolazi do sve tačnije estimacije stanja sistema.

2.3.3 Procena lokalizacionog metoda

Za procenu lokalizacionog metoda, nije dovoljno posmatrati samo tačnost lokalizacije, već je potrebno voditi računa i o drugim faktorima, kao što su [24], [31]: preciznost lokalizacije, kompleksnost lokalizacionog sistema, skalabilnost sistema, robustnost sistema, kao i cena praktične implementacije lokalizacionog metoda.

Tačnost lokalizacije je najvažniji zahtev lokalizacionog sistema, i pokazuje koliki je *bias* lokalizacije. Obično se određuje na osnovu srednje vrednosti greške lokalizacije [18], [23],

koja predstavlja srednju vrednost Euklidskog rastojanja između izračunate i stvarne pozicije proizvoda.

Preciznost lokalizacije određuje konzistentnost lokalizacionog sistema, odnosno pokazuje kolika je varijansa lokalizacije. Obično se određuje na osnovu kumulativne funkcije raspodele (CDF, engl. *cumulative distribution function*) greške lokalizacije koja pokazuje sa kolikom verovatnoćom se postiže određena greška lokalizacije [23], [84], [103], ili na osnovu standardne devijacije greške lokalizacije [18].

Kompleksnost lokalizacionog sistema može da se odnosi na kompleksnost algoritma, hardverske postavke, ili kompleksnost u toku rada sistema. Obično se procenjuje na osnovu vremena potrebnog za izvršavanje algoritma, kao i stope lokalizacije, odnosno vremena čekanja između merenja i izračunavanja pozicije.

Robustnost sistema podrazumeva otpornost sistema na greške, npr. u slučajevima kada se izmeri vrednost van predviđenih granica ili kada su neke vrednosti nedostupne usled smetnji u prenosu signala, problema sa hardverom, itd.

Skalabilnost sistema se odnosi na mogućnost proširenja sistema na veći prostor za lokalizaciju, na veći broj proizvoda za lokalizaciju na određenom prostoru ili na veću dimenzionalnost sistema (sa dvodimenzionalnog na trodimenzionalno).

Cena sistema treba da uključi finansijska sredstva potrebna za realizaciju sistema, kao i vreme potrebno za postavku sistema, energetska potrošnja sistema i/ili njegovih delova, potreban prostor za postavku sistema.

Kod procene lokalizacionog metoda, nije moguće obezbediti da svi faktori budu optimalni, već je neophodno prihvatiti kompromis u zavisnosti od potreba konkretnog sistema. Za lokalizacione sisteme je najčešće najvažnije da daju što tačniju i precizniju poziciju proizvoda, pa se ostali faktori često žrtvuju u njihovu korist.

3 MLPIS - MODEL ZA LOKALIZACIJU PROIZVODA PRIMENOM TEHNOLOGIJA INTERNETA STVARI

Model koji se predlaže ima za cilj dobijanje što tačnijeg i preciznijeg sistema za lokalizaciju proizvoda u prostoru korišćenjem adekvatnih tehnologija Interneta stvari, kao i integraciju ovog sistema u postojeće procese i okolinu, kako bi se u potpunosti ostvarila paradigma Interneta stvari. Na taj način omogućava se bolje upravljanje čitavim sistemom u kom se proizvodi nalaze, kroz automatizaciju raspodele proizvoda u prostoru i vršenja inventara proizvoda, automatizaciju procesa koji zahtevaju poznavanje pozicije proizvoda u prostoru, odnosno automatizovano rukovanje proizvodima u prostoru. Određivanjem pozicije proizvoda u prostoru, posledično je moguće pratiti i stanje okoline u kojoj se proizvod nalazi, čime se povećavaju mogućnosti upravljanja proizvodima, kao i praćenje proizvoda tokom različitih faza životnog ciklusa proizvoda, odnosno, kao krajnji cilj, moguće je povećati ili bolje iskoristiti vrednost sistema i samih proizvoda. Određivanje pozicije proizvoda u prostoru, zajedno sa uslovima okoline u kojima se proizvod nalazi, je i preduslov za obezbeđivanje sledljivosti proizvoda, koja u današnje vreme poprima sve veći značaj, posebno kod prehrambenih, medicinskih i hemijskih proizvoda, kojima je vek trajanja ograničen, i obavezno je njihovo skladištenje i čuvanje pod striktno definisanim uslovima.

Model za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari je u osnovi osmišljen za prostore za skladištenje proizvoda, ali ga je, uz neznatna prilagođavanja, moguće primeniti i u proizvodnim sistemima, montažnim sistemima, tokom transporta, u prodajnim objektima i slično. Osim toga, uz modifikacije, model je moguće primeniti i za lokalizaciju ljudi (radnika, posetilaca objekta, pacijenata u bolnicama, dece u vrtiću, i sl.) u okviru zatvorenog sistema, kao i za lokalizaciju životinja u sistemima u kojima je potrebno određivanje njihove pozicije (u ograđenom prostoru, u zoološkom vrtu, na farmi, i sl.). U nastavku će model biti opisan u svom osnovnom obliku, odnosno za primenu u prostorima za skladištenje proizvoda.

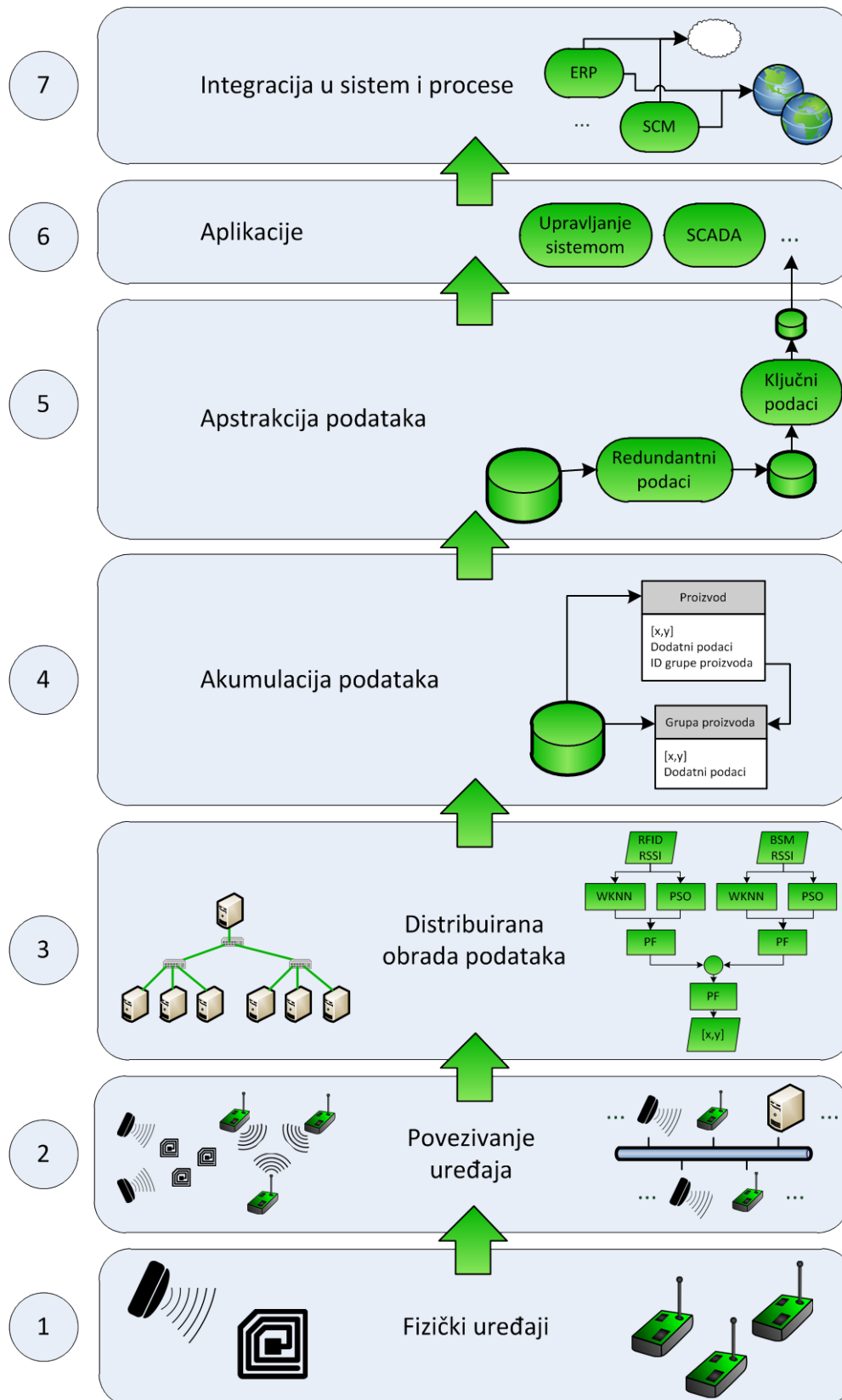
Kao osnova za razvoj modela uzet je Referentni model Interneta stvari [104], koji je predložen na Svetskom forumu Interneta stvari 2014. godine, i sastoji se iz sedam nivoa (slika 8). Prvi, najniži nivo Referentnog modela Interneta stvari je fizički nivo, i obuhvata objekte koji treba da postanu deo Interneta stvari, odnosno različite uređaje, senzore, aktuatore, mašine, itd. Drugi nivo je nivo veze, koji obezbeđuje komunikaciju među uređajima i obradu podataka. Treći nivo obuhvata distribuiranu obradu i transformaciju podataka. Četvrti nivo obezbeđuje akumulaciju, odnosno skladištenje podataka. Peti nivo uključuje apstrakciju podataka, agregaciju i pristup podacima. Šesti nivo je nivo aplikacije, koji omogućava upravljanje sistemom, analizu stanja sistema, nadzor sistema, i sl. Najviši, sedmi nivo uključuje saradnju i deljenje sadržaja među ljudima, kao i uključivanje poslovnih procesa.

Model za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari (MLPIS) je u skladu sa Referentnim modelom Interneta stvari, a predlaže hijerarhijsku strukturu u čijim nivoima su integrisane specifične tehnologije i metode za lokalizaciju proizvoda. Osnovna hijerarhijska struktura modela je prikazana na slici 9, a u daljem tekstu će biti detaljnije opisani pojedinačni nivoi predloženog modela.



Slika 8. Referentni model Interneta stvari

Na najnižem nivou modela MLPIS, nivou fizičkih uređaja, nalaze se uređaji neophodni za lokalizaciju proizvoda (slika 10), pri čemu je potrebno definisati tehnologije Interneta stvari koje se koriste za lokalizaciju proizvoda, kao i koji konkretni uređaji se koriste, i na koji način. Analizom različitih tehnologija Interneta stvari, modelom MLPIS se predlaže korišćenje dve tehnologije u kombinaciji, RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža. RFID tehnologija je odabrana zbog svoje sve veće prisutnosti u obeležavanju proizvoda, čime se smanjuje potreba za dodatnim obeležavanjem svakog pojedinačnog proizvoda dodatnim tagom (bilo RFID tagom ili tagom potrebnim za korišćenje neke druge tehnologije), zatim zbog svoje mogućnosti da očitava podatke beskontaktno u dometu antene, čime se postiže automatizovano očitavanje podataka o proizvodu, kao i zbog mogućnosti pasivnog napajanja tagova, čime se omogućava dugotrajnost sistema bez potrebe za održavanjem svakog taga (npr. izmenom baterija nakon određenog vremenskog intervala).



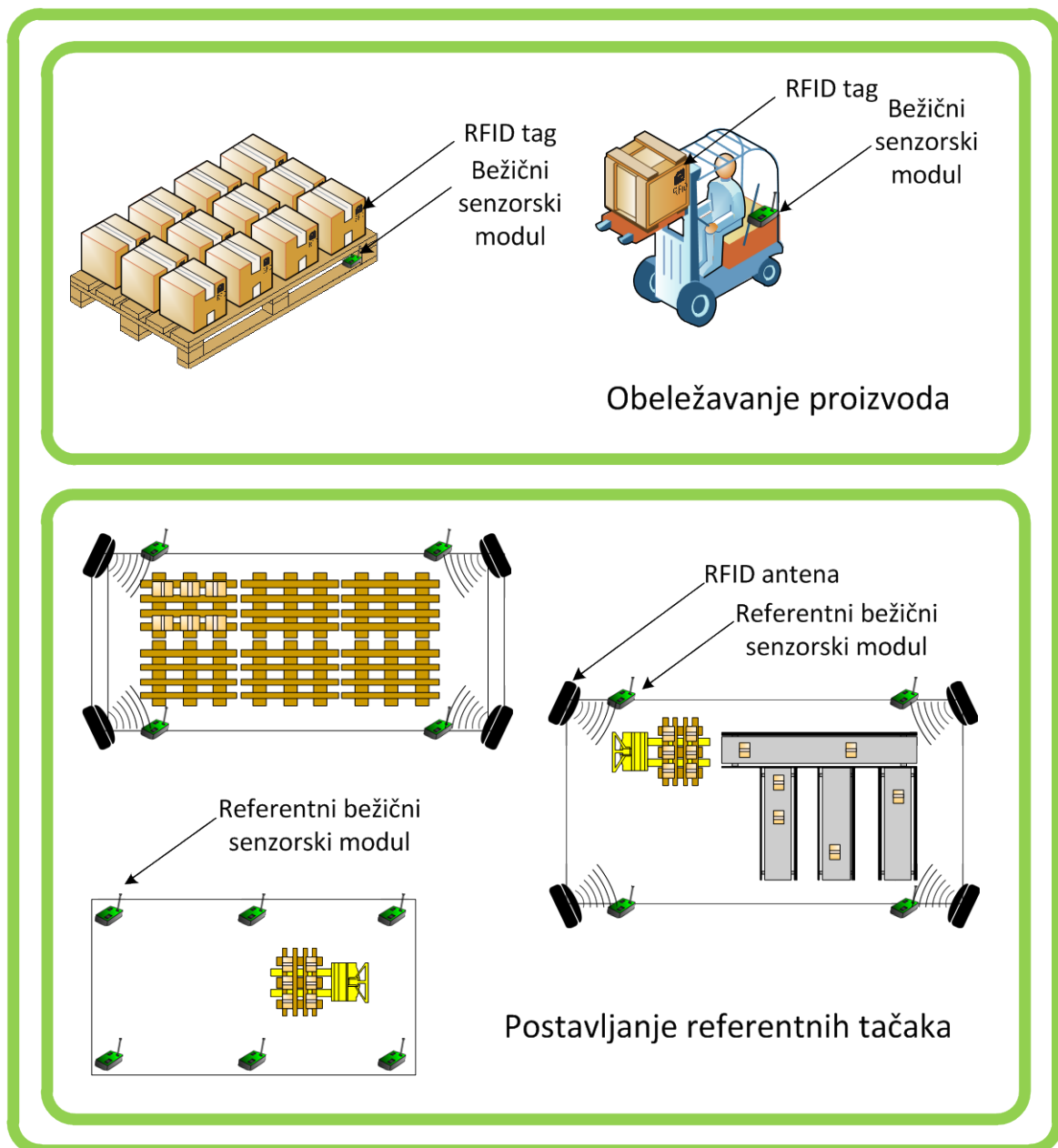
Slika 9. Osnovna hijerarhijska struktura modela MLPIS za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari

Za primenu u MLPIS, odabran je UHF RFID sistem, budući da on omogućava najveći domet očitavanja pasivnih tagova, koji upotrebom odgovarajućih antena dostiže do desetaka metara od antene. Sa druge strane, bežične senzorske mreže omogućavaju distribuirano pokrivanje velikih prostora, što je često potrebno u sistemima za praćenje proizvoda koji se kreću kroz sistem, kao i zbog mogućnosti dodatnih senzorskih očitavanja u prostoru, čime se mogu pratiti zahtevani parametri u okruženju proizvoda (npr. temperatura, vlažnost vazduha, osvetljenje, itd). Bežična senzorska mreža takođe omogućava i distribuirano sakupljanje i prenos podataka u prostoru, što je moguće iskoristiti i za prenos podataka o poziciji proizvoda koja je lokalno dobijena korišćenjem kombinovanog sistema primenom RFID tehnologije i bežične senzorske mreže.

U okviru modela MLPIS predlaže se obeležavanje svakog pojedinačnog proizvoda RFID tagom, kako bi se mogla odrediti pozicija tačno određenog proizvoda, a, budući da je cena bežičnih senzorskih modula i dalje relativno visoka, kao i da zahtevaju dodatno napajanje, njihova upotreba se predlaže za grupe proizvoda, kao što je slučaj kod grupnih pakovanja, paleta, kontejnera, sistema za transport proizvoda u prostoru i slično. Na ovaj način omogućava se i ponovna upotreba bežičnog senzorskog modula kada proizvodi povezani sa njime prođu kroz sistem i nisu više prisutni u njemu, dodeljivanjem modula novoj grupi proizvoda. Prilikom postavljanja pojedinačnog proizvoda u grupu proizvoda, u informacionom sistemu je neophodno povezati podatke sa njegovog RFID taga sa podacima bežičnog senzorskog modula kojim je obeležena grupa proizvoda. Na taj način, lokalizacijom grupe proizvoda preko bežičnog senzorskog modula, koji joj je dodeljen, okvirno se određuje pozicija pojedinačnog proizvoda, dok je kombinacijom sa podacima sa RFID taga koji mu je dodeljen moguće preciznije odrediti poziciju samog proizvoda ukoliko postoji potreba za tim. Osim pojedinačnih prednosti korišćenja RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža, kombinacijom podataka dobijenih korišćenjem ove dve tehnologije dobija se dodatna dobit u vidu pouzdanijeg, tačnijeg i preciznijeg sistema za lokalizaciju.

Dakle, najniži nivo modela MLPIS predviđa korišćenje RFID tagova i bežičnih senzorskih modula kao „stvari“ Interneta stvari, odnosno objekata koji treba da postanu deo Interneta stvari. Za očitavanje podataka sa njih, potrebno je uspostaviti sistem koji omogućava korišćenje metoda za lokalizaciju proizvoda putem ove dve tehnologije. Za to je neophodno postaviti stacionarne referentne tačke sa poznatom pozicijom, na osnovu kojih se određuje pozicija nepoznate, tražene tačke, odnosno proizvoda.

U RFID sistemu referentne tačke predstavljaju RFID antene koje očitavaju podatke sa RFID tagova, dok su u bežičnoj senzorskoj mreži referentne tačke stacionarni bežični senzorski moduli, koji komuniciraju sa mobilnim bežičnim senzorskim modulima čija pozicija se traži. Kako bi proizvodi bili adekvatno locirani, neophodno je postaviti dovoljan broj referentnih tačaka u prostoru. Antene UHF RFID sistema omogućavaju očitavanje RFID tagova u dometu od desetak metara ispred antene, pa se predlaže da se antene postavje u pravougaonu mrežu u prostoru u ravni paralelnoj sa podom, pri čemu bi se antene nalazile u



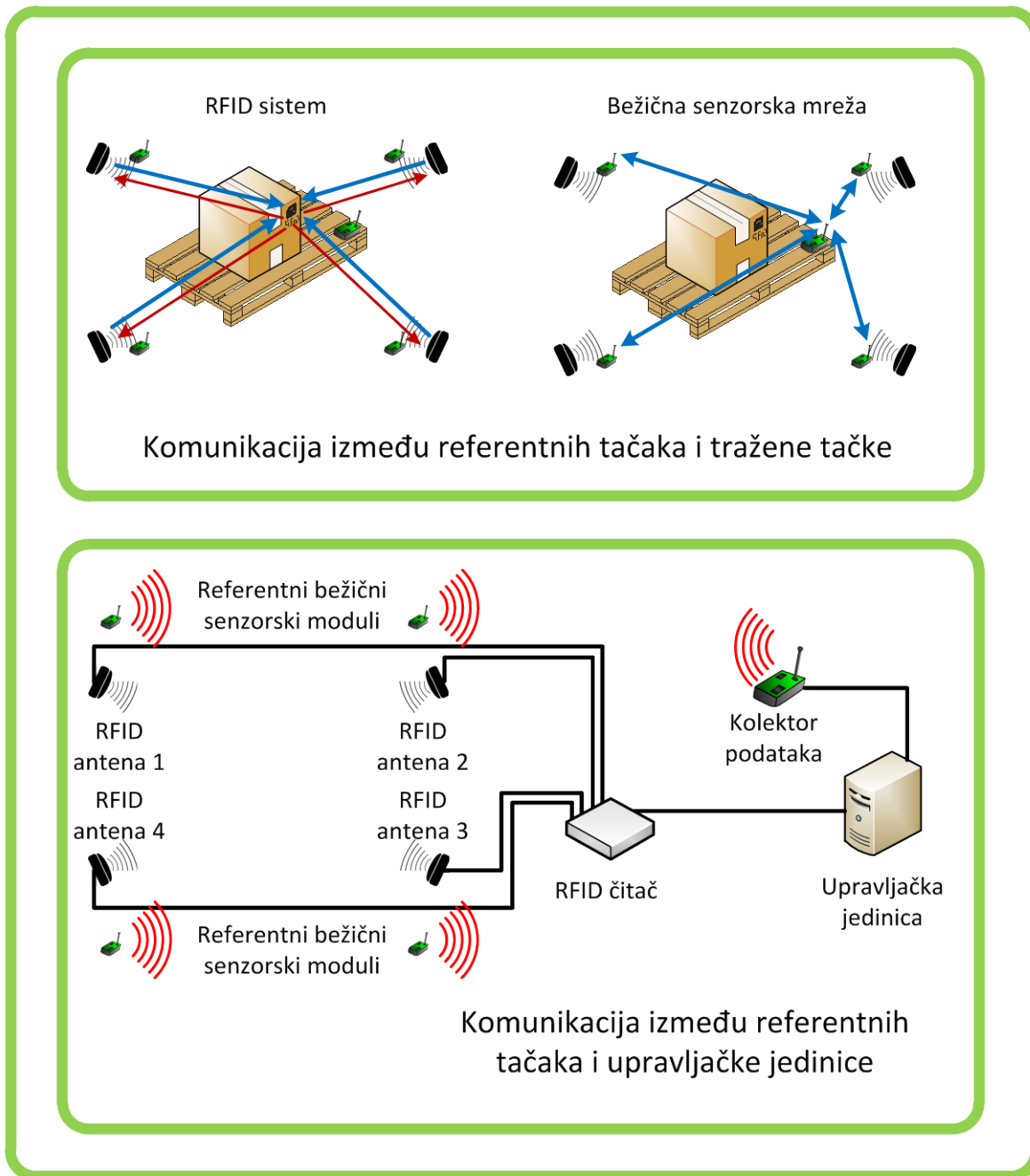
Slika 10. Prvi nivo modela MLPIS

temenima zamišljenih pravougaonika čija dijagonala ne sme da prelazi maksimalni domet korišćenih antena. Sa druge strane, bežični senzorski moduli imaju veći domet očitavanja, te je moguće napraviti ređu mrežu referentnih tačaka, ali se predlaže da mreža bude istih dimenzija kao i mreža korišćena za RFID sistem kako bi se olakšala integracija dobijenih podataka.

Implementacija ovog nivoa modela moguća je na više načina, u zavisnosti od potreba i mogućnosti samog sistema. U slučaju da je lokalizaciju potrebno precizno vršiti u čitavom sistemu, potrebno je celokupni prostor podeliti na celine, i za svaku celinu postaviti referentne tačke za RFID sistem i bežičnu senzorsku mrežu. Ovakva postavka zahteva velika početna ulaganja, ali daje najpouzdaniji sistem za lokalizaciju. Moguće je i samo u određenim delovima sistema vršiti potpunu lokalizaciju proizvoda primenom RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža, a u ostatku sistema rasporediti samo referentne tačke za bežičnu senzorsku mrežu, i pomoću njih vršiti lokalizaciju grupe proizvoda, umesto svakog pojedinačnog proizvoda. Na ovaj način, u delu sistema gde su postavljene samo referentne tačke iz bežične senzorske mreže, moguće je referentne tačke postaviti i na većem međusobnom rastojanju, budući da je domet komunikacije bežičnih senzorskih modula veći od dometa očitavanja RFID antena. U tom slučaju, potrebno je na ulazu u sistem postaviti polje za snimanje ulaznih proizvoda, koje bi sadržalo i RFID antene i stacionarne bežične senzorske module kao referentne tačke. U ovom polju bi se snimali podaci o ulaznim proizvodima i njihovoj poziciji u grupi proizvoda koja je obeležena bežičnim senzorskim modulom, kako bi se kasnije pozicija određenog proizvoda mogla odrediti na osnovu pozicije grupe proizvoda kojoj pripada.

Drugi nivo modela MLPIS (slika 11), nivo povezivanja uređaja, zahteva pre svega komunikaciju između referentnih bežičnih senzorskih modula koji su stacionarni na tačno određenim pozicijama, i mobilnih bežičnih senzorskih modula na nepoznatim pozicijama, kao i između referentnih tačaka u RFID sistemu, RFID antena, koje se nalaze na tačno određenim pozicijama, i RFID tagova na nepoznatim pozicijama. U bežičnoj senzorskoj mreži, ova komunikacija se odvija direktno, tako što svaka referentna tačka komunicira sa mobilnim bežičnim senzorskim modulom, i međusobnim slanjem poruka očitava i RSSI vrednost između tražene tačke i date referentne tačke, kao i propratne podatke ukoliko je potrebno. U RFID sistemu, svaka RFID antena očitava RSSI vrednost sa RFID taga koji je

postavljen na proizvod čija se pozicija traži, kao i dodatne podatke sa RFID taga ukoliko je potrebno. U oba slučaja komunikacija se odvija bežično.



Slika 11. Drugi nivo modela MLPIS

Osim toga, potrebno je obezbediti i komunikaciju između referentnih tačaka i upravljačke jedinice, koja može biti žična ili bežična. Upravljačka jedinica treba da bude povezana sa svim referentnim tačkama sa kojih treba da prikuplja podatke, RFID čitačima koji putem RFID antena očitavaju podatke sa RFID tagova na pojedinačnim proizvodima čije

pozicije treba odrediti, kao i stacionarnim bežičnim senzorskim modulima koji prikupljaju podatke sa mobilnih bežičnih senzorskih modula postavljenih za svaku grupu proizvoda. Stacionarne RFID antene su direktno povezane sa RFID čitačem, koji je dalje povezan sa upravljačkom jedinicom nekim od interfejsa i protokola koje čitač omogućava. U bežičnoj senzorskoj mreži, stacionarni bežični senzorski moduli bežično komuniciraju sa kolektorom podataka, koji je opet povezan sa upravljačkom jedinicom nekim od interfejsa i protokola koji su mu dostupni. Upravljačka jedinica za određeni deo sistema se dalje povezuje, žično ili bežično, sa glavnom upravljačkom jedinicom celog sistema u kom se vrši lokalizacija proizvoda.

Treći nivo modela MLPIS (slika 12), nivo distribuirane obrade podataka, podrazumeva distribuiranu obradu i transformaciju podataka na krajevima mreže, umesto u jednom centralnom uređaju sistema. Kako bi se ovo postiglo, modelom se predlaže postavljanje posebne upravljačke jedinice za svaki deo prostora koji bi mogao da funkcioniše kao posebna celina sistema, koja bi vršila prikupljanje i obradu podataka za lokalizaciju proizvoda u datom delu prostora, a zatim bi prosleđivala podatke dalje susednim jedinicama i centralnoj upravljačkoj jedinici sistema. Ovakav pristup omogućava modularnost sistema, jednostavno dodavanje novih delova ukoliko je potrebno proširenje sistema, ili aktiviranje i deaktiviranje delova sistema u zavisnosti od potrebe. Takođe, na ovaj način delovi sistema postaju nezavisni jedni od drugih, pa je tako pojednostavljeno korišćenje opreme različitih proizvođača, različitih komunikacionih protokola unutar delova sistema, a jedino je potrebno obezbediti da upravljačke jedinice sistema međusobno komuniciraju po jedinstvenom protokolu i dele dobijene podatke o pozicijama proizvoda u sistemu. U ovom nivou potrebno je definisati i sam način prikupljanja i obrade podataka, odnosno metod koji će biti korišćen za lokalizaciju proizvoda. Predlaže se korišćenje hibridnog metoda PF_RFID_WSN¹, koji odvojeno izračunava koordinate proizvoda u RFID sistemu i koordinate grupe proizvoda pomoću bežične senzorske mreže, a zatim vrši fuziju dobijenih podataka. Ovaj hibridni metod prvo u svakom od ova dva sistema integriše podatke dobijene metodom

¹ PF_RFID_WSN (skr.) – hibridni metod koji primenom čestičnog filtra (PF) vrši fuziju podataka dobijenih lokalizacijom u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži (WSN)

najbližih suseda i metodom optimizacije rojem čestica, i to metodom PF_WKNN_PSO¹.
Skrraćena verzija algoritma za metod PF_WKNN_PSO je sledeća:

Algoritam za metod PF_WKNN_PSO za RFID sistem:

inicijalizacija čestičnog filtra:

za M od 1 do 1000 : $(x, y)^{[m]} \rightarrow$ odaberi slučajne koordinate (uniformna raspodela u prostoru)

za svaku od referentnih tačaka u RFID sistemu:

izmeri RSSI vrednost do RFID taga postavljenog na proizvod

$(x, y)_{WKNN}$ = lociraj proizvod metodom najbližih suseda na osnovu izmerenih RSSI vrednosti

$(x, y)_{PSO}$ = lociraj proizvod metodom optimizacije rojem čestica na osnovu izmerenih RSSI vrednosti

$(x, y)_{RFID}$ = izvrši fuziju podataka čestičnim filtrom na osnovu $(x, y)_{WKNN}$ i $(x, y)_{PSO}$:

za M od 1 do 1000 :

odredi težinske koeficijente $w_{WKNN}^{[m]}$ i $w_{PSO}^{[m]}$ na osnovu verovatnoće da je pozicija čestice prava pozicija proizvoda na osnovu procena pozicije $(x, y)_{WKNN}$ i $(x, y)_{PSO}$

odredi težinski koeficijent $w^{[m]} = w_{WKNN}^{[m]} \cdot w_{PSO}^{[m]}$

normalizuj $w^{[m]}$

kreiraj novi skup čestica tako da se svaka čestica $x^{[m]}$ nađe u skupu sa verovatnoćom $w^{[m]}$

$(x, y)_{RFID}$ = srednja vrednost x i y koordinata svih čestica u skupu čestica

Algoritam za metod PF_WKNN_PSO za bežičnu senzorsku mrežu:

inicijalizacija čestičnog filtra:

za M od 1 do 1000 : $(x, y)^{[m]} \rightarrow$ odaberi slučajne koordinate (uniformna raspodela u prostoru)

za svaku od referentnih tačaka u bežičnoj senzorskoj mreži:

izmeri RSSI vrednost do mobilnog bežičnog senzorskog modula postavljenog na grupu proizvoda

$(x, y)_{WKNN}$ = lociraj proizvod metodom najbližih suseda na osnovu izmerenih RSSI vrednosti

$(x, y)_{PSO}$ = lociraj proizvod metodom optimizacije rojem čestica na osnovu izmerenih RSSI vrednosti

$(x, y)_{BSM}$ = izvrši fuziju podataka čestičnim filtrom na osnovu $(x, y)_{WKNN}$ i $(x, y)_{PSO}$:

za M od 1 do 1000 :

odredi težinske koeficijente $w_{WKNN}^{[m]}$ i $w_{PSO}^{[m]}$ na osnovu verovatnoće da je pozicija čestice prava pozicija proizvoda na osnovu procena pozicije $(x, y)_{WKNN}$ i $(x, y)_{PSO}$

odredi težinski koeficijent $w^{[m]} = w_{WKNN}^{[m]} \cdot w_{PSO}^{[m]}$

normalizuj $w^{[m]}$

kreiraj novi skup čestica tako da se svaka čestica $x^{[m]}$ nađe u skupu sa verovatnoćom $w^{[m]}$

$(x, y)_{BSM}$ = srednja vrednost x i y koordinata svih čestica u skupu čestica

¹ PF_WKNN_PSO (skr.) – hibridni metod koji primenom čestičnog filtra (PF) vrši fuziju podataka dobijenih lokalizacijom metodima najbližih suseda (WKNN) i optimizacije rojem čestica (PSO)

Metodi najbližih suseda i optimizacije rojem čestica vrše estimaciju koordinata proizvoda, odnosno grupe proizvoda u prostoru u datom trenutku na osnovu trenutno izmerenih RSSI vrednosti. Zatim, primenom čestičnog filtra, vrši se fuzija podataka na osnovu izračunatih vrednosti koordinata u prostoru, koji se pritom indirektno integrišu i sa dosadašnjim vrednostima, koje su izračunate pri prethodnim merenjima RSSI vrednosti, odnosno sa predikcijom kretanja proizvoda u prostoru na osnovu prethodno izračunatih koordinata. Nakon ovih koraka, dobijaju se koordinate pozicije proizvoda na osnovu merenja u RFID sistemu, kao i pozicije grupe proizvoda na osnovu podataka u bežičnoj senzorskoj mreži. Koordinate pozicije grupe proizvoda su izdvojene kao izlazni podaci, u slučajevima kada je potrebno odrediti poziciju grupe proizvoda samo na osnovu podataka iz bežične senzorske mreže (npr. ukoliko su u toku kretanja proizvoda kroz prostor postavljene samo referentne tačke za bežičnu senzorsku mrežu, kako bi se smanjila ulaganja u sistem). Zatim, kako bi se postigla što pouzdanija lokalizacija proizvoda, predlaže se kombinovana primena bežičnih senzorskih mreža i RFID tehnologije, što podrazumeva fuziju podataka dobijenih svakom od ove dve tehnologije. Fuzija podataka se i u ovom slučaju vrši primenom čestičnog filtra, metodom PF_RFID_WSN, čija skraćena verzija algoritma je sledeća:

Algoritam za metod PF_RFID_WSN:

inicijalizacija čestičnog filtra:

za M od 1 do 1000: $(x, y)^{[m]} \rightarrow$ odaberi slučajne koordinate (uniformna raspodela u prostoru)

$(x, y) =$ izvrši fuziju podataka čestičnim filtrom na osnovu $(x, y)_{RFID}$ i $(x, y)_{BSM}$:

za M od 1 do 1000:

odredi težinske koeficijente $w_{RFID}^{[m]}$ i $w_{BSM}^{[m]}$ na osnovu verovatnoće da je pozicija čestice prava pozicija proizvoda na osnovu procena pozicije $(x, y)_{RFID}$ i $(x, y)_{BSM}$

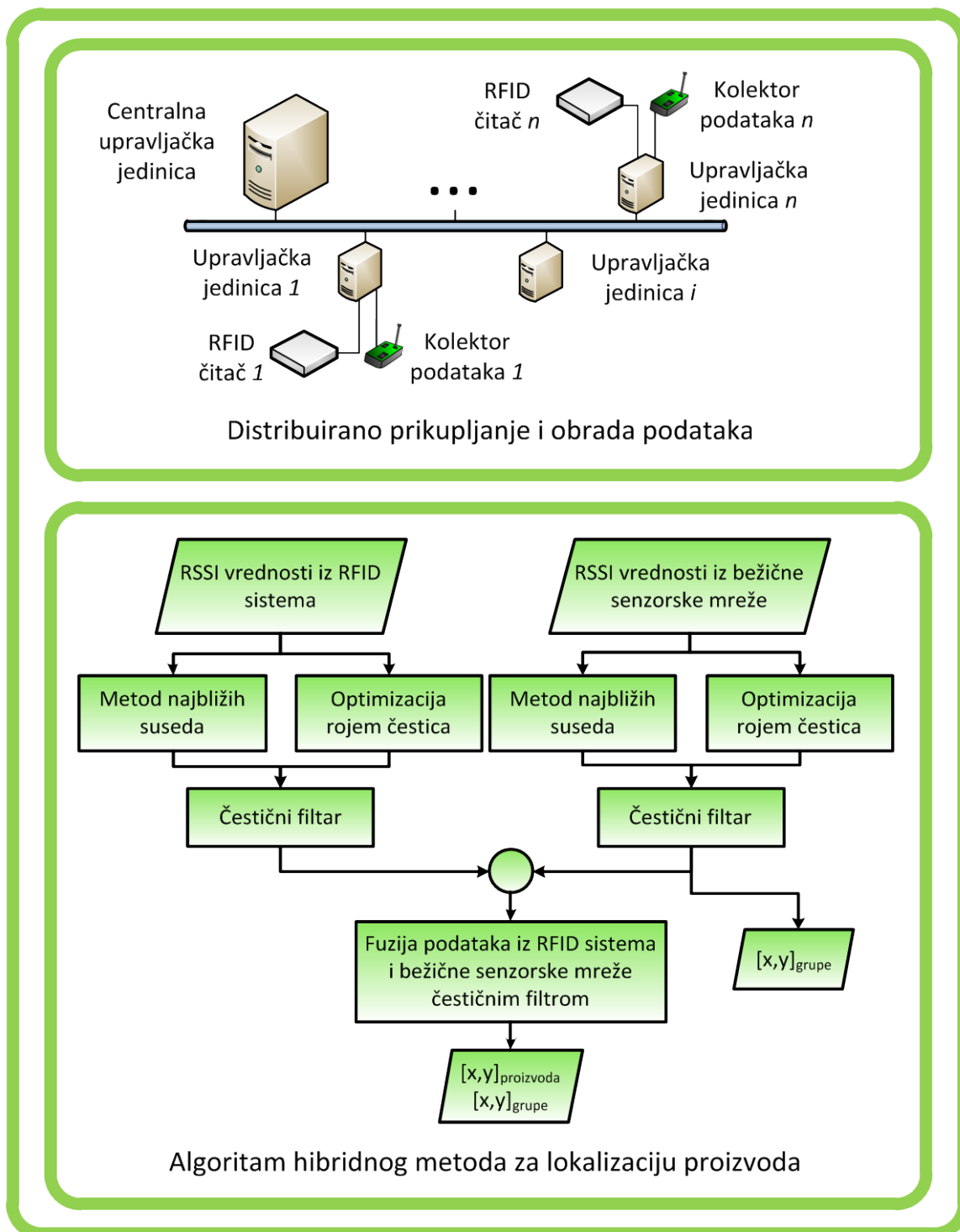
odredi težinski koeficijent $w^{[m]} = w_{RFID}^{[m]} \cdot w_{BSM}^{[m]}$

normalizuj $w^{[m]}$

kreiraj novi skup čestica tako da se svaka čestica $x^{[m]}$ nađe u skupu sa verovatnoćom $w^{[m]}$

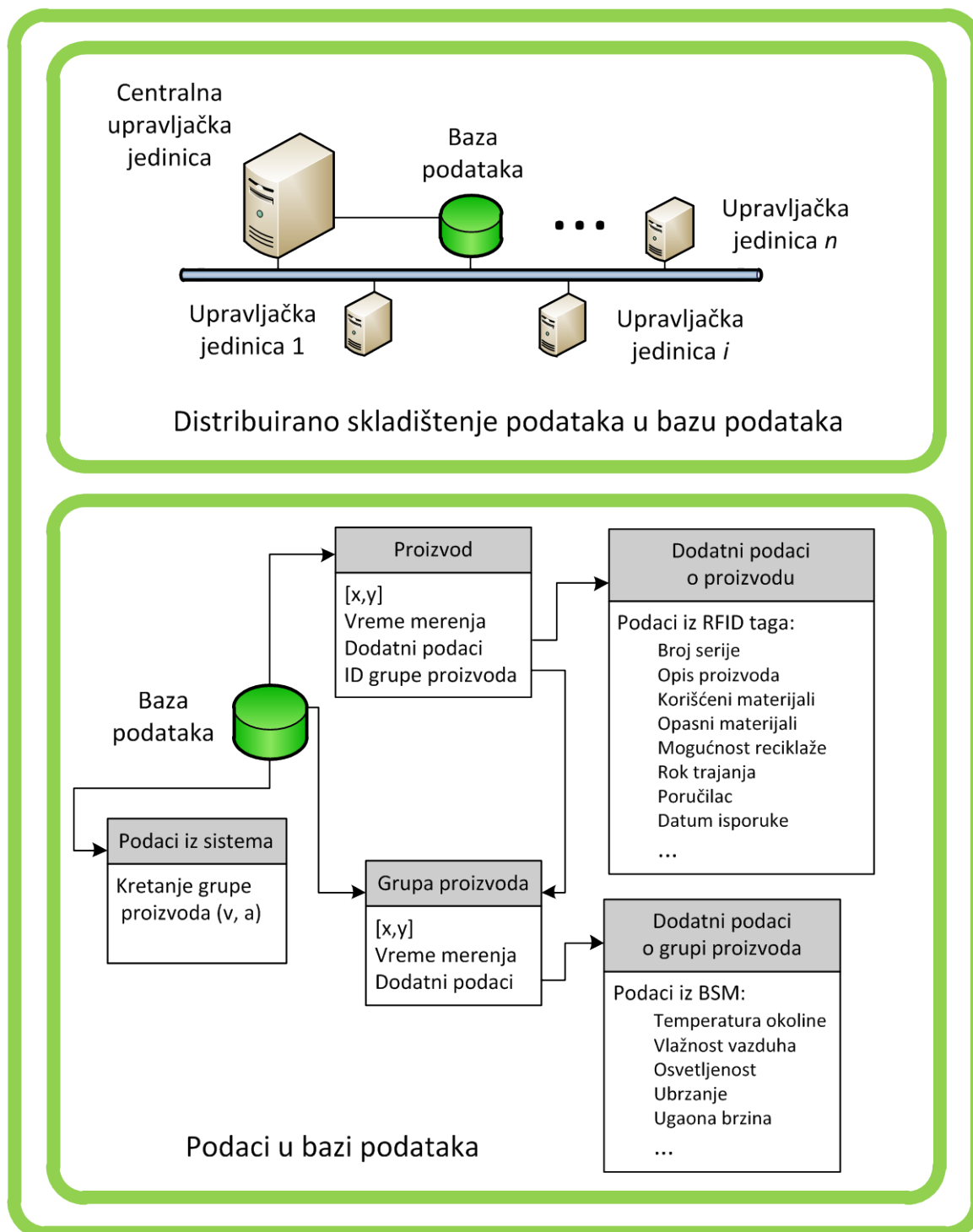
$(x, y) =$ srednja vrednost x i y koordinata svih čestica u skupu čestica

Nakon izvršenja algoritma ovog hibridnog metoda, kao izlaz dobijaju se koordinate pozicije pojedinačnih proizvoda, kao i koordinate pozicije grupe proizvoda u prostoru. Detaljno objašnjenje i način realizacije metoda PF_RFID_WSN i PF_WKNN_PSO dato je u okviru poglavlja 4.4.1.



Slika 12. Treći nivo modela MLPIS

Četvrti nivo modela MLPIS (slika 13), nivo akumulacije podataka, obuhvata objedinjavanje i skladištenje podataka za lokalizaciju proizvoda dobijenih u trećem nivou u centralnu bazu podataka sistema. Ovaj nivo je neophodan kako bi se sistematizovalo znanje



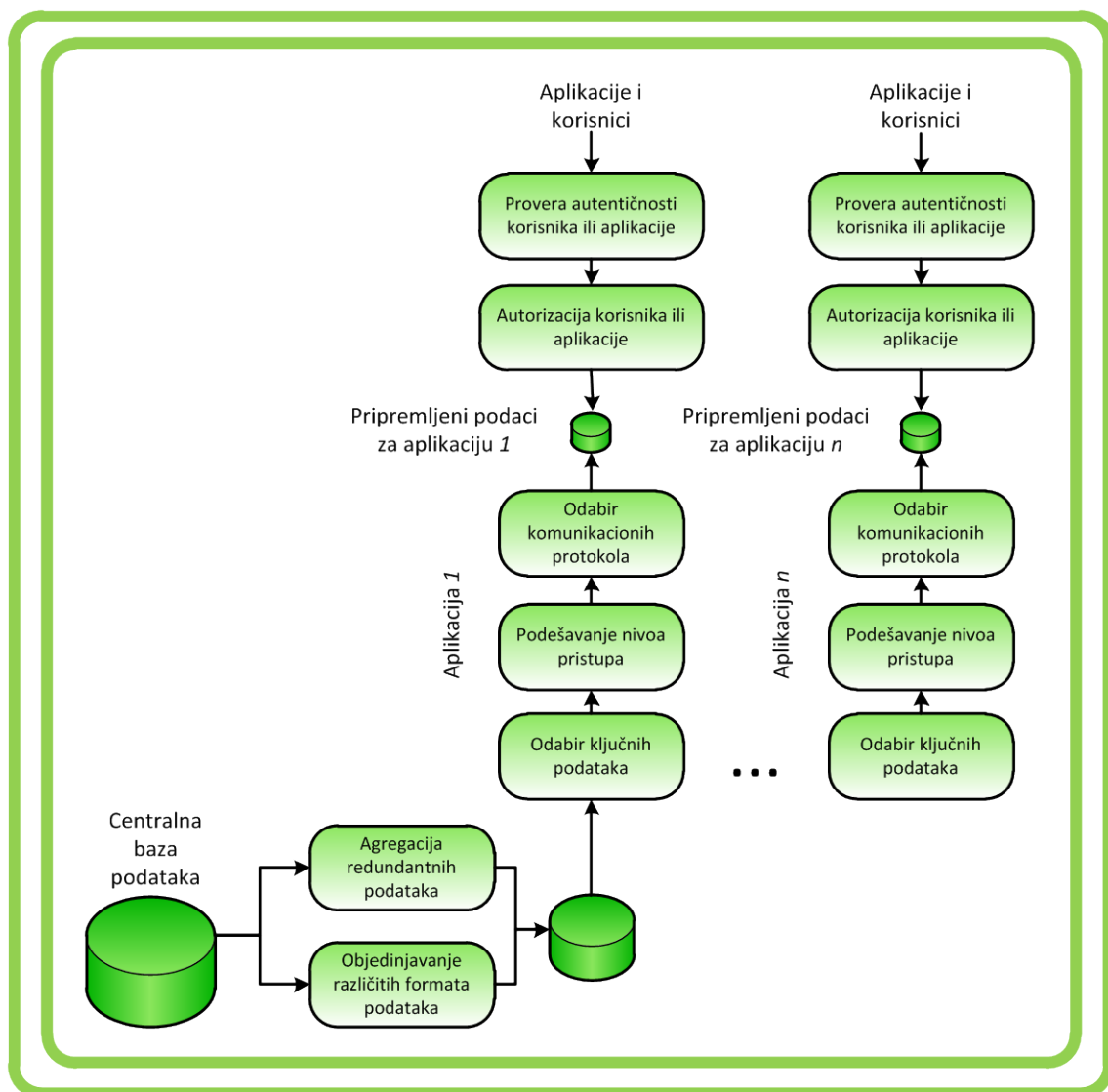
Slika 13. Četvrti nivo modela MLPIS

o sistemu dobijeno iz različitih delova sistema preko distribuiranih upravljačkih jedinica, kao i da bi se omogućio dalji pristup ovim podacima višim nivoima modela.

Baza podataka u četvrtom nivou modela omogućava prelazak sa podataka koji se dobijaju u realnom vremenu u prva tri nivoa na skladištene podatke kojima je moguće i kasnije pristupiti iz različitih aplikacija na višim nivoima modela u trenucima u kojima su im ti

podaci potrebni. Baza podataka je i direktno povezana sa centralnom upravljačkom jedinicom sistema, kako bi se omogućio nesmetan pristup podacima u bazi podataka centralnoj upravljačkoj jedinici. U bazi podataka potrebno je da budu podaci o pojedinačnim proizvodima i njihovim dobijenim pozicijama u prostoru, zatim o grupisanju proizvoda u grupe proizvoda, kao i dobijene pozicije grupa proizvoda u prostoru, odnosno potrebno je da budu zapisane koordinate pozicije proizvoda ili grupe proizvoda u svim merenim trenucima. Osim toga, moguće je povezati i dodatne podatke o proizvodima ili delovima sistema, dobijene očitavanjima sa RFID tagova ili različitim senzorskim merenjima. Za svaki proizvod moguće je uz RSSI vrednosti potrebne za računanje koordinata pozicije proizvoda u prostoru, očitati i dodatne podatke zapisane u RFID tagu postavljenom na proizvod. Dodatni podaci mogu da sadrže na primer: broj serije proizvoda, opis proizvoda, vrste materijala i/ili sirovine sadržane u proizvodu i/ili pakovanju proizvoda, napomene o opasnostima (opasan materijal koji se nalazi u proizvodu i/ili pakovanju proizvoda, alergeni sadržani u proizvodu u slučaju prehrambenih proizvoda, itd.), mogućnost reciklaže proizvoda, rok trajanja proizvoda za proizvode sa ograničenjem trajanja, podaci o poručiocu proizvoda, datumu isporuke, itd. Za grupu proizvoda, moguće je na osnovu merenja u bežičnoj senzorskoj mreži obezbediti i podatke o okolini, kao što su temperatura, vlažnost vazduha, osvetljenost prostora, podatke o kretanju proizvoda očitane sa inercijalnih senzora, kao i razne druge podatke dobijene na osnovu merenja u zavisnosti od potreba konkretnog sistema. U ovom nivou potrebno je i obezbediti povezivanje sistema za lokalizaciju proizvoda sa postojećim informaciono-komunikacionim sistemom kako bi se u bazi podataka integrisali podaci iz sistema za lokalizaciju proizvoda sa ostalim dostupnim podacima o datom proizvodu, kao i o celokupnom sistemu, što je neophodno za uspostavljanje Interneta stvari u pravom smislu. Ukoliko postoje podaci o upravljanju kretanjem proizvoda ili grupe proizvoda u sistemu, moguće ih je integrisati u metod za lokalizaciju proizvoda u trećem nivou, kako bi se još više povećala tačnost i preciznost sistema za lokalizaciju.

Peti nivo modela MLPIS (slika 14), odnosno nivo apstrakcije podataka, obuhvata apstrakciju podataka, izuzimanje važnih podataka i određivanje pristupa podacima. Budući da nisu svim višim aplikacijama neophodni svi podaci koji postoje u bazi podataka celokupnog sistema, treba minimizovati količinu podataka koja je dostupna svakoj pojedinačnoj aplikaciji, kako bi se omogućio razvoj što jednostavnijih aplikacija sa što boljim učinkom, a posledično i čitav sistem brže i efikasnije funkcionisao. Da bi se to postiglo, u ovom nivou je prvenstveno potrebno uravnotežiti i ujediniti sve dostupne podatke u bazi podataka, pogotovo ukoliko formati podataka iz različitih izvora (upravljačkih jedinica, postojećeg informaciono-komunikacionog sistema) nisu identični. Takođe, ukoliko je potrebno, na ovom nivou se vrši i agregacija redundantnih podataka.



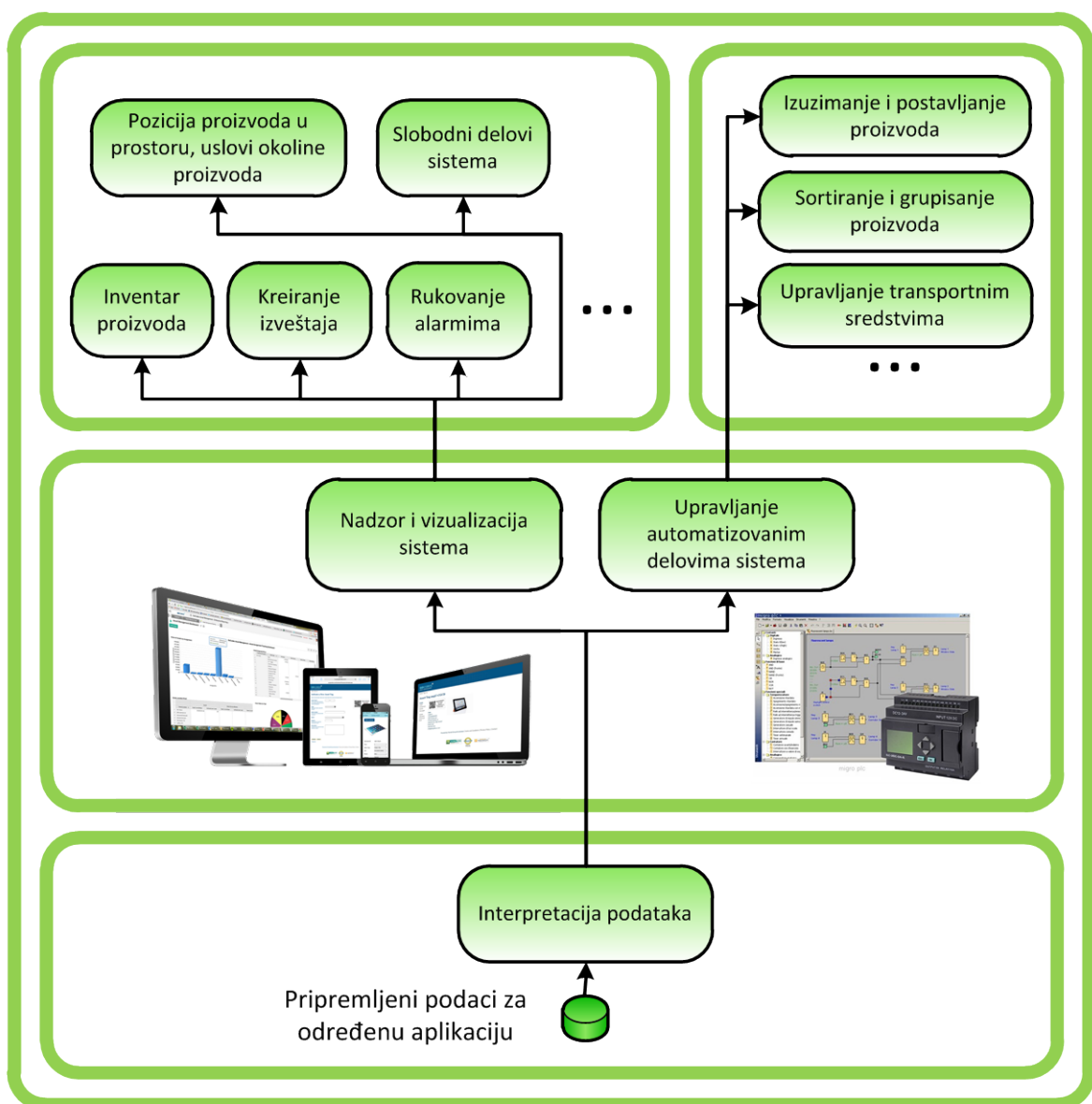
Slika 14. Peti nivo modela MLPIS

Osim toga, potrebno je obezbediti i mogućnost pristupa podacima odgovarajućim komunikacionim protokolima koje različite aplikacije podržavaju. Zatim, treba omogućiti odabir ključnih podataka za aplikacije višeg nivoa, i podešavanje nivoa pristupa podacima u bazi podataka u skladu sa tim, pri čemu treba obezbediti da aplikacija višeg nivoa dobija sve neophodne podatke. Potrebno je i ujediniti sve podatke za svaku aplikaciju višeg nivoa na jednom mestu, kopiranjem odabranih ključnih podataka na namensku bazu ili deo baze podataka za određenu aplikaciju, ili omogućavanjem pristupa ključnim podacima toj aplikaciji kroz virtualizaciju podataka. Osim podešavanja formata podataka, agregacije podataka, omogućavanja komunikacije sa bazom podataka po određenim protokolima, odabira ključnih podataka i omogućavanja pristupa podacima aplikacijama viših nivoa, neophodno je osigurati i zaštitu tih podataka od neovlašćenog korišćenja, odnosno obezbediti odgovarajuću autorizaciju i proveravanje autentičnosti korisnika i aplikacija koji pristupaju podacima.

Šesti nivo modela MLPIS je nivo aplikacija (slika 15), koji je od velike važnosti za praktične primene sistema za lokalizaciju proizvoda. Aplikacije na ovom nivou komuniciraju sa bazom podataka uzimajući ključne podatke koji su izdvojeni za datu aplikaciju u petom nivou modela. Na osnovu baze podataka, na ovom nivou vrši se suštinska interpretacija podataka i upotreba dobijenih informacija. Konkretno, poznavanjem pozicije proizvoda i grupa proizvoda, kao i okolnosti u kojima se proizvod ili grupa proizvoda nalazi u određenom trenutku, moguće je postaviti kvalitetan nadzor sistema, obezbediti optimizaciju upravljanja sistemom, kao i omogućiti analizu podataka iz sistema, kreiranje izveštaja, obradu alarmnih događaja (najčešće neželjenih ili opasnih situacija), itd. Potrebno je obezbediti aplikacije za nadzor, vizualizaciju i upravljanje čitavog sistema, kao i njegovih pojedinih delova. U zavisnosti od primene, neophodno je u svakom trenutku znati stanje inventara proizvoda, gde i pod kojim uslovima se koji proizvod nalazi, koji delovi sistema su slobodni za nove proizvode, itd. Zatim, potrebno je omogućiti kreiranje izveštaja nakon određenog vremenskog intervala (jednom dnevno, jednom nedeljno, itd), ili po zahtevu korisnika. Izveštaji predstavljaju arhivu podataka i događaja koji su se odvijali u sistemu u datom vremenskom intervalu. Ovi izveštaji omogućavaju i naknadnu analizu podataka, kao i ponašanja čitavog sistema. Dalje, važno je omogućiti obradu alarmnih događaja, odnosno rukovanje stanjima u kojima neka vrednost prekorači postavljeni prag, npr. ukoliko u inventaru nestane određenog proizvoda, ukoliko temperatura u okolini proizvoda pređe

određenu granicu, itd. U ovim slučajevima, neophodno je obezbediti aplikaciju koja će alarm proslediti do odgovorne osobe ili upravljačkog sistema, kako bi se razrešilo alarmno stanje.

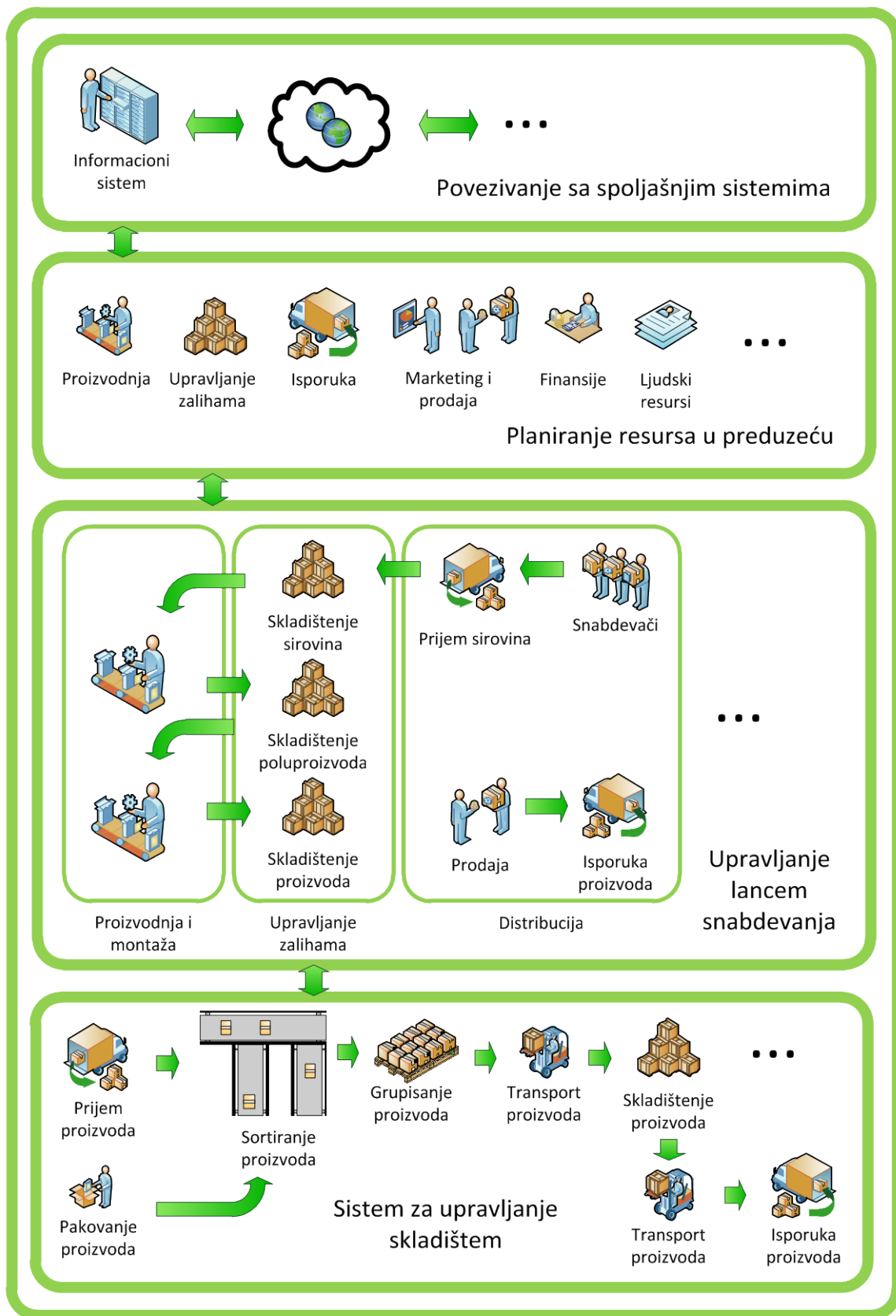
Zatim, u slučaju automatizovanog sistema za rukovanje proizvodima, neophodno je upravljačkom uređaju (koji može biti programabilno logički kontroler, industrijski računar, i slično) proslediti podatke o pozicijama proizvoda, kretanju proizvoda i stanju u okolini proizvoda, potrebne za upravljanje sistemom i delovima sistema (pokretnim trakama, transportnim sredstvima, automatizovanim sistemima za izuzimanje, sortiranje, slaganje i grupisanje proizvoda, itd), kako bi se u aplikaciji za upravljanje sistemom mogao optimizovati proces. Osim toga, moguće je kreirati i povezati i aplikacije za pametne uređaje,



Slika 15. Šesti nivo modela MLPIS

kao što su PDA (engl. *personal digital assistant*) uređaji, pametni telefoni, displeji, i slično, pomoću kojih bi se omogućio i nadzor i upravljanje delovima sistema sa različitih mesta u toku procesa, odnosno gde god da je to neophodno.

Sedmi, najviši nivo modela MLPIS (slika 16), nivo integracija u sistem i procese, omogućava integraciju sistema za lokalizaciju proizvoda sa ostalim poslovnim procesima u sistemu i uključivanje ljudi u procese, kao i dalje povezivanje sa internetom kako bi se u potpunosti postigla paradigma Interneta stvari. U šestom nivou koriste se specifične aplikacije za određene namene, kao što je nadzor ili upravljanje sistemom, dok je u ovom, sedmom nivou akcent stavljen na povezivanje različitih aplikacija i uključivanje svih učesnika u procesu, kako bi se dobili poboljšani poslovni procesi i olakšala kolaboracija i poslovno odlučivanje. U ovom nivou potrebno je integrisati sistem za lokalizaciju proizvoda u postojeće poslovne informacione sisteme, kao što su WMS (engl. *Warehouse Management System*, sistem za upravljanje skladištem), SCM (engl. *Supply Chain Management*, upravljanje lancem snabdevanja), ERP (engl. *Enterprise Resource Planning*, planiranje resursa u preduzeću), itd. Sistem za upravljanje skladištem omogućava rukovanje svim podsystemima u vezi sa skladištenjem proizvoda, među koje spadaju prijem proizvoda, pakovanje proizvoda, sortiranje pristiglih proizvoda, grupisanje proizvoda u grupna pakovanja i paletiranje proizvoda, transport proizvoda kroz sistem za skladištenje proizvoda, skladištenje proizvoda, isporuka proizvoda, itd. Upravljanje lancem snabdevanja obuhvata i upravljanje prostorom za skladištenje proizvoda, ali i uopšteno upravljanje zalihama, od sirovina, preko poluproizvoda, do gotovih proizvoda, zatim sisteme za preuzimanje sirovina, poluproizvoda, ili proizvoda, proizvodnju i montažu proizvoda, distribuciju proizvoda, prodaju, transport, isporuku, i sve povezane sisteme. U najširem smislu, planiranje resursa u preduzeću, odnosno ERP sistemi, omogućavanju praćenje svih procesa unutar sistema, gde spadaju i upravljanje zalihama, proizvodnja, distribucija, marketing i prodaja, nabavke, menadžment ljudskih resursa, finansije, itd. U svakom od ovih sistema, sistem za lokalizaciju proizvoda u prostoru je od velikog značaja, budući da obezbeđuje ne samo poznavanje trenutnog inventara proizvoda, već i konkretne pozicije proizvoda u prostoru, podatke o grupisanju proizvoda i pozicije grupa proizvoda u prostoru, a može da da i podatke o specifičnim podacima u vezi sa proizvodom, kao što su podaci o okolini, među kojima se mogu naći temperatura, vlažnost vazduha, i slično, zatim podaci upisani u RFID tag kojim je proizvod obeležen, podaci o kretanju proizvoda kroz sistem, itd.



Slika 16. Sedmi nivo modela MLPIS

U ovom nivou podrazumeva se i povezivanje informacionih sistema sa spoljašnjim sistemima, pri čemu se podaci mogu razmenjivati direktno sa drugim zainteresovanim sistemima, ili preko sve zastupljenijeg računarstva u oblaku (engl. *cloud computing*), koje omogućava deljenje resursa postavljanjem podataka i aplikacija na servere na udaljenim lokacijama, uz omogućavanje pristupa podacima i aplikacijama u oblaku krajnjim korisnicima i sistemima. Na ovaj način obezbeđuje se integracija podataka, procesa, sistema i ljudi, čime se teži ka omogućavanju sledljivosti proizvoda tokom svih faza životnog veka i kvalitetnog upravljanja životnim ciklusom proizvoda.

U okviru eksperimentalnih istraživanja u ovoj disertaciji, akcenat je dat na tri najniža nivoa predstavljenog modela MLPIS za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari, koji su od suštinske važnosti za uspostavljanje sistema za lokalizaciju proizvoda u prostoru, odnosno na same tehnologije i uređaje koji se koriste, metod za lokalizaciju proizvoda, kao i distribuirano prikupljanje i obradu podataka za lokalizaciju proizvoda, budući da je za uspostavljanje modela neophodno prvo obezbediti funkcionisanje ova tri najniža nivoa, uskladiti uređaje i tehnologije koje se koriste i postaviti odgovarajući metod za lokalizaciju proizvoda koji koristi podatke dobijene na osnovu odabranih tehnologija.

4 EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Eksperimentalno istraživanje za lokalizaciju proizvoda sprovedeno je u tri faze. U prvoj fazi eksperimentalnog istraživanja testirani su različiti lokalizacioni metodi zasnovani na primeni RFID tehnologije ili bežičnih senzorskih mreža. Zatim je sprovedena druga faza eksperimentalnog istraživanja, u kojoj su testirani hibridni metodi PF_WKNN_PSO i PF_RFID_WSN predloženi u okviru modela MLPIS za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari. Pri testiranju ovih hibridnih metoda rezultati su poređeni sa rezultatima dobijenim u prvoj fazi istraživanja. U trećoj fazi istraživanja, rezultati iz prve dve faze istraživanja eksperimentalno su provereni u laboratoriji sa industrijskim elementima. Svi metodi i analize su realizovani u softverskom paketu MATLAB.

4.1 Oprema za eksperimentalno istraživanje

Za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari, odabrane su dve tehnologije, RFID tehnologija i bežične senzorske mreže, a kao parametar signala koji se koristi u eksperimentima je odabran RSSI. Samim tim, kako bi se realizovalo eksperimentalno istraživanje bilo je neophodno obezbediti odgovarajuću opremu koja omogućava merenje RSSI vrednosti primenom RFID tehnologije i primenom bežičnih senzorskih mreža.

4.1.1 RFID sistem

RFID sistem koji je korišćen za eksperimentalna istraživanja u obe faze je razvojni sistem zasnovan na čitaču M6E proizvođača ThingMagic [105].

Čitač M6E je imbedid UHF čitač pasivnih RFID tagova, koji omogućava izbor frekvencije od 860 do 960 MHz, kako bi se ispoštovale različite regulative širom sveta. Ovaj čitač podržava više protokola za očitavanje podataka sa tagova, osnovna verzija podržava protokol EPCglobal Gen 2, odnosno ISO 18000-6C, a opciono čitač podržava i protokole ISO 18000-6B i IP-X. Prilikom identifikacije taga, ovaj čitač automatski očitava RSSI vrednost za dati tag, i ona se može iščitati direktno u jedinici dBm. Čitač omogućava povezivanje do četiri antene, sa mogućnošću posebnih podešavanja nivoa za čitanje i upisivanje podataka, od 5 dBm do 31,5 dBm, i postiže maksimalno rastojanje očitavanja podataka do 9 m sa antenom od 6 dBi, pri čemu omogućava simultano očitavanje do 750 RFID tagova u sekundi. Radna temperatura ovog čitača obuhvata opseg od -40°C do 60°C. Komunikacija između čitača i računara se može ostvariti putem RS-232 serijskog porta ili USB porta. U okviru istraživanja, M6E RFID čitač je korišćen u okviru razvojnog sistema proizvođača, M6E-DEVKIT (engl. *development kit*, razvojni sistem), koji omogućava jednostavno povezivanje i korišćenje funkcija čitača. Za programiranje aplikacije za komunikaciju sa čitačem, moguće je koristiti API podršku (engl. *application programming interface*, aplikacioni programski interfejs) za programske jezike C, C# ili Java.

RFID tagovi koji su korišćeni u okviru istraživanja su tagovi SURVIVOR proizvođača CONFIDEX, po standardu EPC Gen 2 (18000-6C), koji omogućavaju očitavanje podataka i kada su postavljeni na metalne i na nemetalne površine. Ovi tagovi su dimenzija 155 x 26 x 14,5 mm, imaju 128 bita EPC memorije i 512 bita dodatne memorije, i omogućavaju očitavanje podataka čak do 18 m na metalnim površinama, odnosno do 16 m na nemetalnim površinama, pri temperaturi od -35°C do 65°C.

4.1.2 Bežična senzorska mreža

Za postavljanje bežične senzorske mreže korišćeni su bežični senzorski moduli UCMote Proton B DRD ChipAnt, proizvođača Unicomp Informatics Kft [106], a kao kolektor podataka (sink) korišćen je UCMote Proton Base istog proizvođača.

UCMote Proton B DRD ChipAnt bežični senzorski moduli su razvojni moduli zasnovani na mikrokontroleru Atmel ATmega128RFA1, sa mogućnošću komunikacije na dve frekvencije, 2,4 GHz preko ugrađenog radio čipa u mikrokontroleru i 784/868/915 MHz preko Atmel AT86RF212 radio čipa. Za napajanje moduli koriste 2 AA baterije od 1,2-1,5 V, bez mogućnosti punjenja, ili spoljašnje napajanje preko USB porta. Spoljašnje dimenzije modula su 57 mm x 31 mm x 20 mm, a masa modula bez baterija je 14 g. Domet komunikacije ovih modula je preko 300 m na frekvenciji od 2,4 GHz, a preko 450 m na frekvenciji od 784/868/915 MHz.

UCMote Proton Base modul je namenski kolektor podataka, koji je izuzetno malih spoljašnjih dimenzija od 65,5 mm x 23 mm x 14 mm, i mase 12 g sa kućištem. Nema svoje napajanje, već se napaja isključivo putem USB porta. Takođe je zasnovan na mikrokontroleru Atmel ATmega128RFA1, i može da komunicira na frekvenciji od 2,4 GHz preko ugrađenog radio čipa u mikrokontroleru. Domet komunikacije mu je preko 300 m. Sa računarnom komunicira putem USB porta, serijskom RS-232 vezom.

Bežični senzorski moduli mogu da se programiraju u programskom jeziku nesC, i imaju podršku za TinyOS operativni sistem od verzije TinyOS 2.1.2. Za programiranje im nije potreban poseban programator, već se programiraju povezivanjem preko USB porta, korišćenjem pokretača operativnog sistema (engl. *bootloader*).

Program koji je korišćen za programiranje bežičnih senzorskih modula je realizovan kao u [107] i [108]. Program je identičan za referentne module i za mobilni bežični senzorski modul, i na osnovu zahteva od aplikacije na računaru, vrši očitavanje RSSI vrednosti između određenih bežičnih senzorskih modula, traženi broj puta. U eksperimentima je RSSI vrednost merena po 100 puta između mobilnog bežičnog senzorskog modula (tražene tačke) i svakog od referentnih bežičnih senzorskih modula (referentnih tačaka). Kolektor podataka iz bežične senzorske mreže koristi standardni TinyOS program „*BaseStation*“, koji prosleđuje komande primljene sa računara bežičnim senzorskim modulima, i obrnuto, čime omogućava prenos podataka sa bežičnih senzorskih modula do aplikacije na računaru.

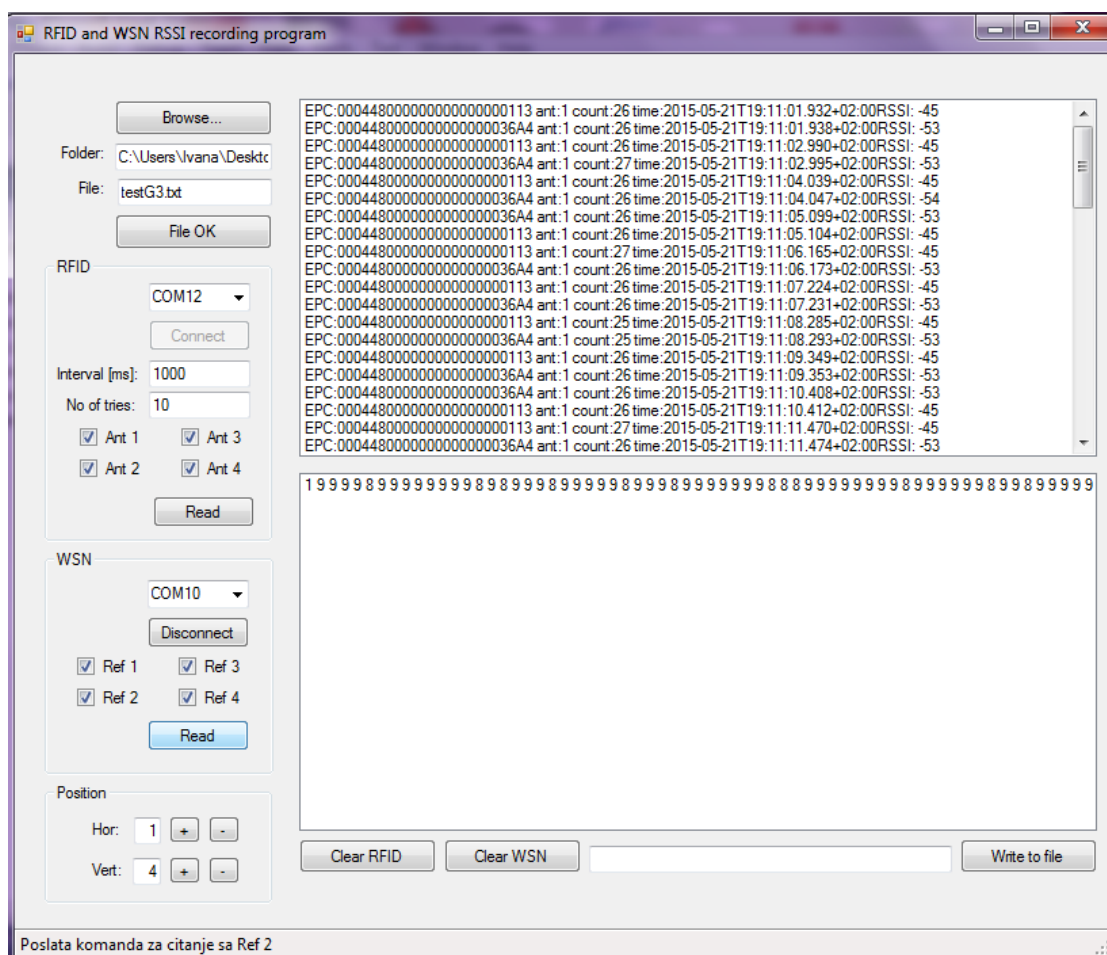
Prilikom slanja svake poruke između bežičnih senzorskih modula, moguće je očitati i odgovarajuću RSSI vrednost. RSSI vrednost je u mikrokontroleru Atmel ATmega128RFA1 predstavljena kao petobitni bezimeni broj [109] koji predstavlja indikator jačine prijemnog signala u koracima od 3 dBm u opsegu od 0 do 28, pri čemu vrednost 0 odgovara realnoj RSSI

vrednosti od -90 dBm, dok je za ostale vrednosti moguće izračunati realnu RSSI vrednost na osnovu sledeće formule:

$$RSSI = (-90 + 3 \cdot RSSI_{izmereno}) [dBm]. \quad (39)$$

4.2 Aplikacija za prikupljanje podataka

Kako bi se omogućilo prikupljanje RSSI podataka iz RFID sistema i iz bežične senzorske mreže, razvijena je namenska aplikacija u programskom jeziku C#. Ova aplikacija omogućava komunikaciju sa RFID čitačem i kolektorom podataka iz bežične senzorske mreže, obradu primljenih poruka i izdvajanje RSSI vrednosti, kao i njihovo snimanje u odgovarajući fajl. Na slici 17 prikazan je ekran aplikacije za prikupljanje podataka u toku rada.



Slika 17. Grafički korisnički interfejs aplikacije za prikupljanje podataka

U aplikaciji je inicijalno potrebno podesiti lokaciju tekstualnog fajla u koji se snimaju RSSI podaci, a zatim odrediti virtuelne COM (engl. *Communication port*, odnosi se na RS-232

serijski port) portove na kojima su povezani RFID čitač i kolektor podataka iz bežične senzorske mreže (u primeru na slici 17, RFID čitač je povezan na portu COM12, a kolektor podataka na portu COM10).

Za RFID čitač M6E, API podrška obezbeđuje različite funkcije za komunikaciju sa čitačem. Za očitavanje RSSI vrednosti koristi se funkcija za očitavanje podataka sa RFID tagova u dometu antene čitača, koja kao ulazni parametar uzima vremenski interval u kojem je potrebno očitavati podatke. Na ovaj način, može da se očita EPC kôd RFID taga (jedinstveni serijski broj RFID taga kod tagova po standardu EPC Gen 2), RSSI vrednost za dati tag, broj očitavanja taga (engl. *tag readcount*), kao i sa koje antene su podaci očitani. U aplikaciji je moguće podesiti vremenski interval u kom treba da se vrši očitavanje podataka sa RFID tagova u dometu antene čitača, kao i broj ponavljanja. U primeru na slici 17 vremenski interval je postavljen na 1 s, a broj ponavljanja na 10. Osim toga, moguće je obeležiti koje antene RFID čitača se koriste za očitavanje podataka, pri čemu su u primeru na slici korišćene sve četiri dostupne antene. Trenutna merenja se prikazuju u gornjoj listi u aplikaciji, i automatski se zapisuju u fajl koji je određen pri pokretanju aplikacije, sa naznakom „RFID“.

Za bežičnu senzorsku mrežu, korišćena je standardna serijska komunikacija, putem koje se šalje odgovarajuća komanda u skladu sa programom za komunikaciju u kolektoru podataka. Slično kao za antene u RFID sistemu, i kod bežične senzorske mreže je moguće obeležiti koje referentne tačke (referentni bežični senzorski moduli) se koriste za merenje RSSI vrednosti sa mobilnog bežičnog senzorskog modula. U primeru na slici korišćene su četiri referentne tačke. Za svaku referentnu tačku, očitavanje RSSI vrednosti se vrši po 100 puta. Trenutna merenja se prikazuju u donjoj listi u aplikaciji, i automatski se zapisuju u fajl koji je određen pri pokretanju aplikacije, sa naznakom „WSN“.

RSSI podaci u RFID sistemu se očitavaju i zapisuju u jedinici dBm, a u bežičnoj senzorskoj mreži kao bezimena brojeva u intervalu [0,28], koji je moguće kasnije pretvoriti u RSSI vrednost u jedinici dBm primenom jednačine (39).

Prilikom snimanja RSSI podataka, potrebno je podesiti poziciju u prostoru na kojoj se nalazi predmet, a zatim započeti očitavanje podataka iz RFID sistema i bežične senzorske mreže aktiviranjem tastera „Read“. Pozicija predmeta u prostoru je određena koordinatama (Hor, Vert), koje označavaju udaljenost od koordinatnog početka po dve ose, u ravni

paralelnoj sa podom. Ukoliko se snimanje podataka vrši za nepoznatu poziciju predmeta, kao pozicija predmeta se mogu podesiti koordinate (-1, -1), koje označavaju poziciju van mernog prostora, što će u kasnijoj obradi podataka označavati nepoznatu poziciju predmeta.

Osim toga, u aplikaciji je ostavljeno jedno slobodno tekstualno polje, putem kog se mogu upisati napomene u fajl ukoliko je potrebno, aktiviranjem tastera „*Write to file*“.

4.3 Prva faza istraživanja

U okviru prve faze istraživanja, vršeno je eksperimentalno ispitivanje lokalizacionih metoda koji su odabrani za implementaciju kao reprezentativni metodi, kako bi se formirao uzorak za poređenje rezultata novog hibridnog metoda predloženog u okviru modela MLPIS.

4.3.1 Postavka eksperimenta

Podaci za eksperimentalno istraživanje u prvoj fazi istraživanja su prikupljeni na osnovu snimanja RSSI vrednosti u RFID sistemu i bežičnoj senzorskoj mreži u eksperimentalnom okruženju u test laboratoriji. Kao test laboratorija odabrana je učionica MI-G3-1A na Mašinskom institutu Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu (slika 18). U ovoj učionici nalaze se stolovi i stolice čije konstrukcije su izrađene od metala, kao i stolovi sa didaktičkom elektropneumatskom opremom koji sadrže i uređaje koji se primenjuju u realnim industrijskim procesima, tako da je u ovom prostoru moguće modelovati opšti slučaj okruženja sa prisustvom metala, kao velikog izvora smetnji u bežičnim sistemima kao što su RFID sistemi ili bežične senzorske mreže. Na ovaj način, moguće je dobiti uvid u mogućnosti primene različitih lokalizacionih metoda sa realnim merenjima RSSI vrednosti u opštem slučaju.

Merenjem i zapisivanjem RSSI vrednosti formirane su RSSI mape za RFID sistem i bežičnu senzorsku mrežu, u dve dimenzije u ravni koja je paralelna sa podom, kako bi se pokazale mogućnosti različitih metoda za lokalizaciju, kao i predloženog modela za lokalizaciju proizvoda. Jednostavnim proširenjem metoda za lokalizaciju, moguće je uključiti trodimenzionalnu mapu prostora i dobiti potpunu lokalizaciju proizvoda u prostoru.

Merno polje u test laboratoriji je određeno postavljanjem četiri RFID antene u četiri temena kvadrata koji je određen u ravni paralelnoj sa podom, pri čemu je svaka strana kvadrata 4,5 m, što je ograničeno dimenzijama same prostorije. RFID antene predstavljaju

referentne tačke za RFID sistem, kojima se meri RSSI signal sa RFID tagova koji se kreću u prostoru. RFID antene su postavljene na visini od 145 cm, pod uglom od 45°, tako da domet antena obuhvati što veći deo mernog polja. Osim RFID sistema, postavljene su i četiri referentne tačke za merenje RSSI signala u bežičnoj senzorskoj mreži, tj. četiri referentna bežična modula koji mere RSSI vrednosti sa petog, mobilnog bežičnog senzorskog modula koji se kreće u prostoru. Referentni bežični moduli su postavljeni duž paralelnih stranica kvadrata koji određuje merni prostor, na rastojanju od 1 m od temena kvadrata, na visini od 75 cm. Merno polje sa referentnim tačkama prikazano je na slici 19.

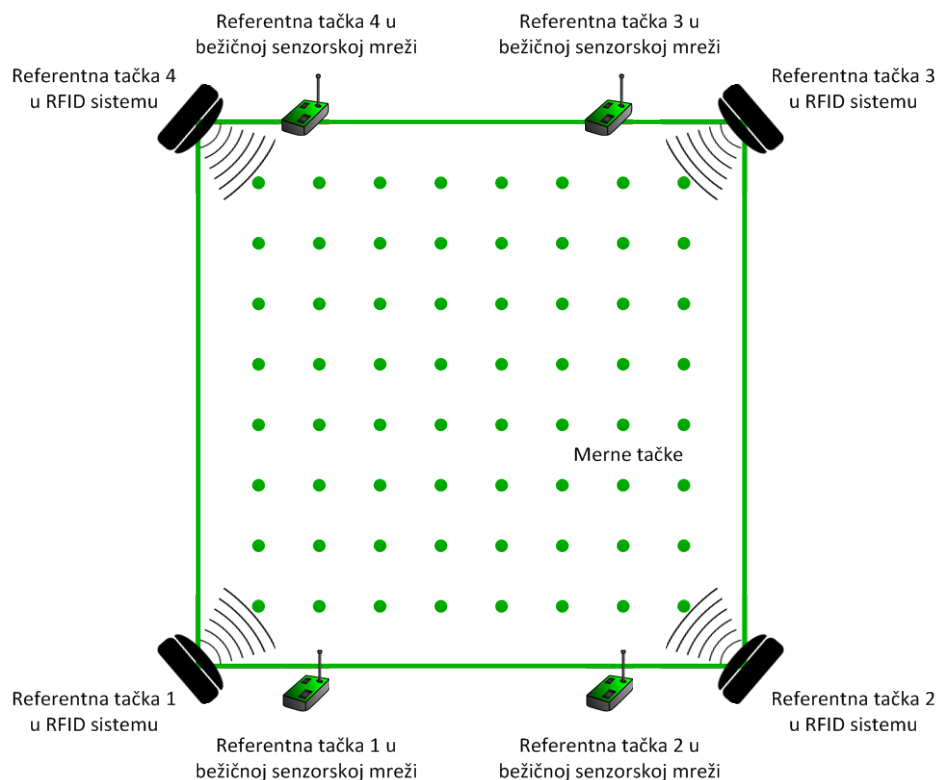
Merenje RSSI vrednosti je izvršeno u mernim tačkama koje su raspoređene po kvadratnoj mreži u ravni paralelnoj sa podom, na visini od 75 cm, sa temenima kvadrata mreže postavljenim na svakih 0,5 m. Kao proizvod čiju poziciju je potrebno odrediti korišćena je kartonska kutija dimenzija 39 x 27 x 24,5 cm. Na kutiju su postavljena dva RFID taga, na dužim bočnim stranama kutije u gornjem desnom uglu, kako bi se za svaku mernu tačku dobila dva različita skupa merenja RSSI vrednosti. Na centru gornje površine kutije



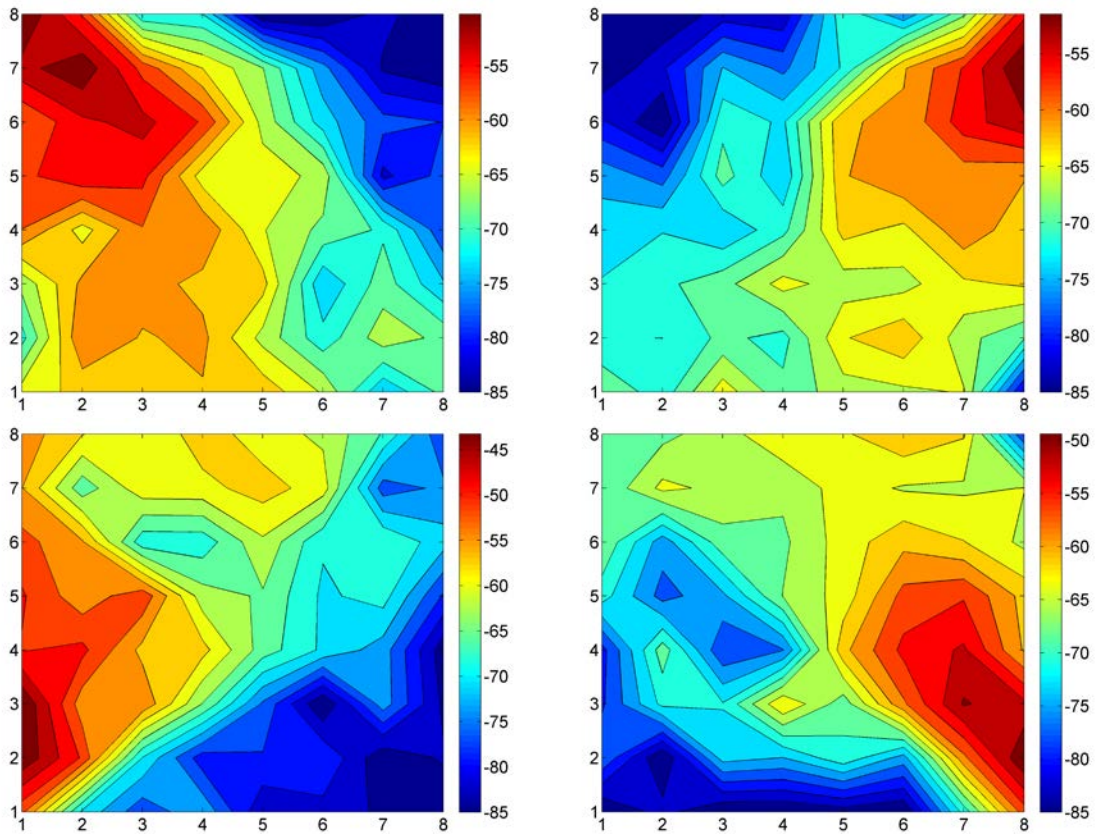
Slika 18. Test laboratorija

postavljen je mobilni bežični senzorski modul, za koji se vrši merenje RSSI vrednosti u bežičnoj senzorskoj mreži. Kutija sa postavljenim RFID tagovima i bežičnim senzorskim modulom je redom postavljena u svaku od mernih tačaka, i izmerene su odgovarajuće RSSI vrednosti. U korišćenom RFID sistemu, moguće je meriti prosečnu RSSI vrednost u zadatom vremenskom intervalu, uz podatak o broju uspešnih očitavanja RFID taga (i njegove RSSI vrednosti) u tom vremenskom intervalu, pa je za svaku mernu tačku izmereno po 10 prosečnih RSSI vrednosti za vremenski interval od po 1 sekund, dok je za bežičnu senzorsku mrežu moguće meriti diskretne RSSI vrednosti, pa je izmereno po 100 RSSI vrednosti za svaku mernu tačku.

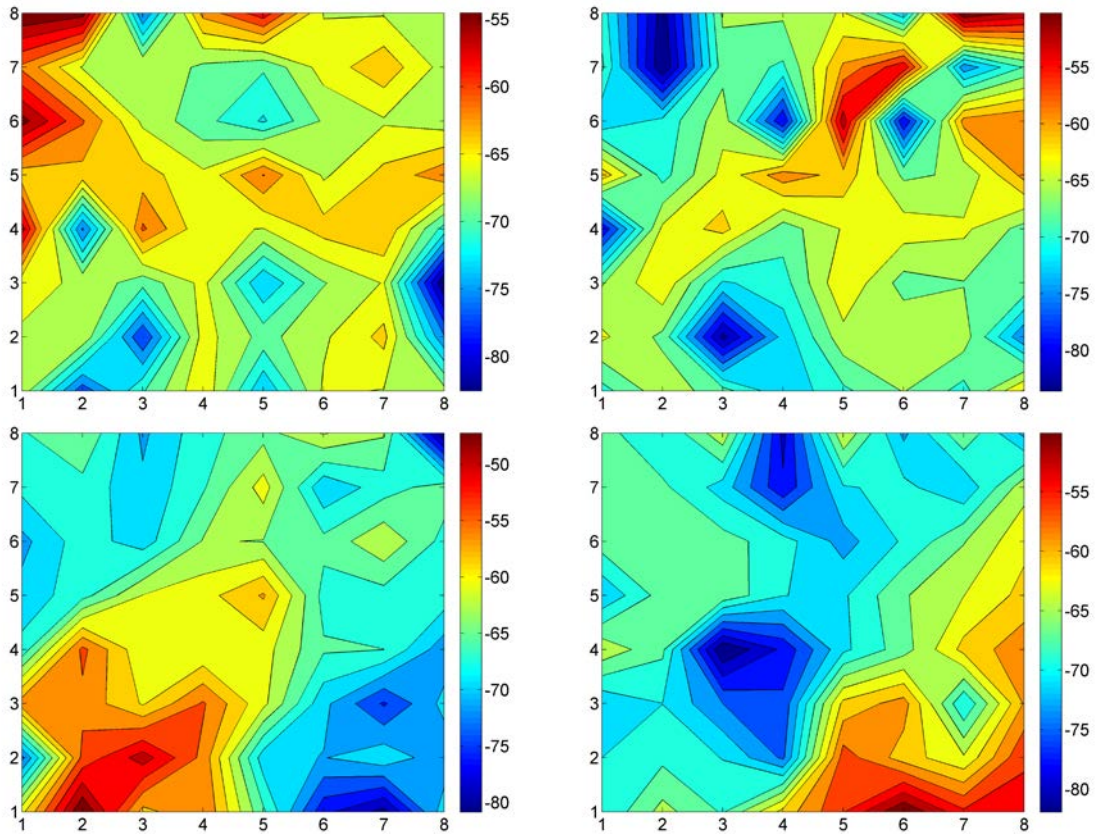
Kada su izmerene RSSI vrednosti u svim mernim tačkama, formirane su RSSI mape za RFID sistem i bežičnu senzorsku mrežu (slike 20 i 21), tako što je za svaku mernu tačku izračunata srednja vrednost izmerenih RSSI vrednosti u odnosu na svaku referentnu tačku. Za RFID sistem, srednja vrednost je izračunata kao srednja vrednost svih izmerenih RSSI vrednosti za oba RFID taga postavljena na kutiji, dok je za bežičnu senzorsku mrežu izračunata srednja vrednost svih RSSI vrednosti izmerenih za datu poziciju za mobilni



Slika 19. Merno polje u test laboratoriji sa referentnim i mernim tačkama



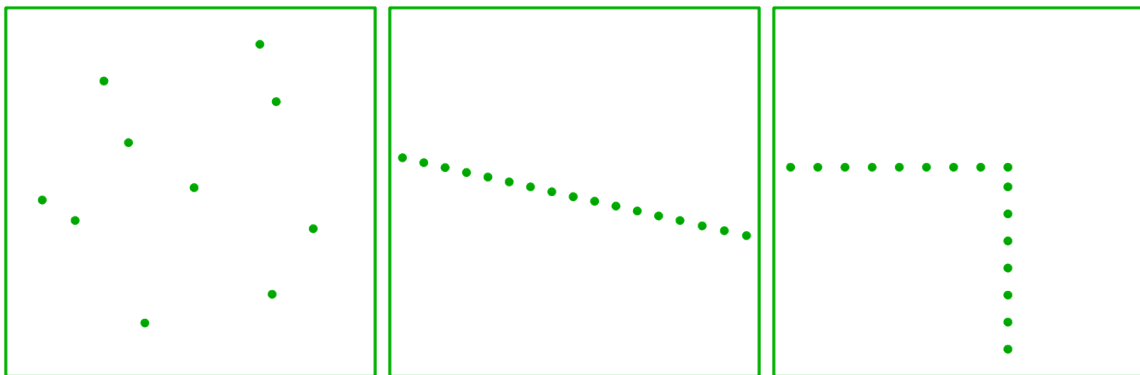
Slika 20. RSSI mape za četiri referentne tačke u RFID sistemu u test laboratoriji



Slika 21. RSSI mape za četiri referentne tačke u bežičnoj senzorskoj mreži u test laboratoriji

bežični modul. Na osnovu RSSI mapa prikazanih na slikama 20 i 21, vidi se da je signal jači (crvene zone) u blizini mesta na kojima su postavljene referentne tačke (RFID antene ili referentni bežični senzorski moduli), a da jačina signala postepeno opada sa rastojanjem između tražene tačke i referentne tačke. Takođe, vidi se da opadanje RSSI vrednosti sa rastojanjem nije pravilno, što je i očekivano za realni prostor u kome postoje smetnje za propagaciju radio signala.

Osim merenja RSSI vrednosti u mernim tačkama, izmerene su i RSSI vrednosti u test tačkama, koje se ne nalaze u temenima kvadrata merne mreže i moguće ih je koristiti za dodatna testiranja lokalizacionih metoda. Snimljena su tri različita uzorka test tačaka, jedan uzorak od 10 nasumično raspoređenih test tačaka, i dva uzorka test tačaka raspoređenih po određenim putanjama, gde test tačke predstavljaju uzastopne pozicije predmeta pri kretanju po odgovarajućoj putanji. Snimljene su RSSI vrednosti za dve različite putanje, od kojih je jedna pravolinijska, a druga pravolinijska sa zaokretom od 90°. Pozicije test tačaka za sva tri snimljena uzorka prikazane su na slici 22.



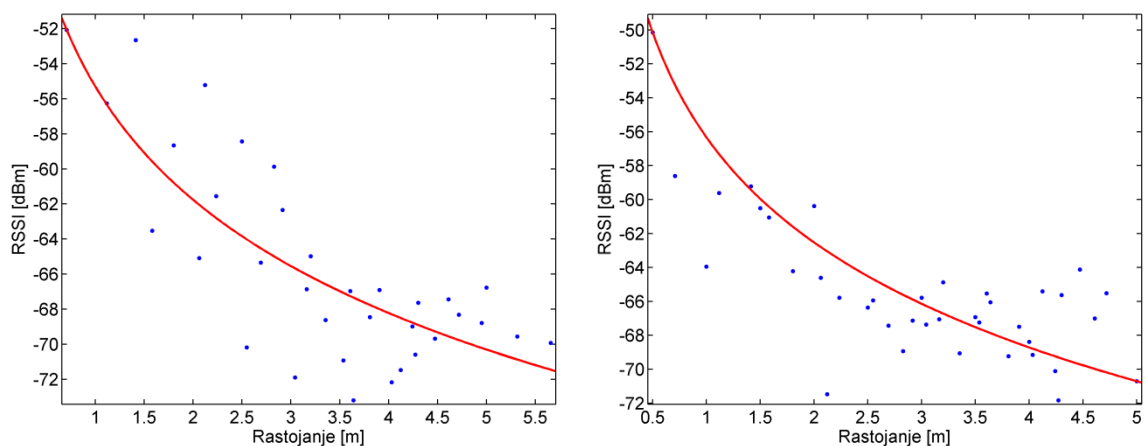
Slika 22. Pozicije test tačaka u test laboratoriji – nasumično raspoređene test tačke (levo), tačke duž putanje 1 (sredina) i tačke duž putanje 2 (desno)

Nakon formiranja RSSI mape za RFID sistem i bežičnu senzorsku mrežu, na osnovu izmerenih RSSI vrednosti kreirani su i simulacioni uzorci za eksperimente. Izračunata su rastojanja od stacionarnih tačaka u kojima su merene određene RSSI vrednosti, a zatim su uz pomoć MATLAB alata za fitovanje krive (engl. *curve fitting toolbox*) određene funkcije propagacije signala u datom prostoru. U ovom alatu moguće je odabrati različite uobičajene oblike funkcije (kao što su eksponencijalne, polinomske, itd.), ili postaviti proizvoljni (engl. *custom*) oblik funkcije. Za modelovanje propagacije signala, kao osnovni oblik funkcije podešena je log-normalna raspodela propagacionog slabljenja na osnovu jednačine (2). Kada su učitani odnosi RSSI vrednosti i rastojanja na kojima su izmerene, kao i osnovni oblik

funkcije, dobijeni su parametri za jačinu primljenog signala P_0 i indeks propagacionog slabljenja n kao u tabeli 1. Dobijene funkcije propagacije signala sa prikazanim stvarnim izmerenim RSSI vrednostima u eksperimentalnoj okolini prikazane su na slici 23.

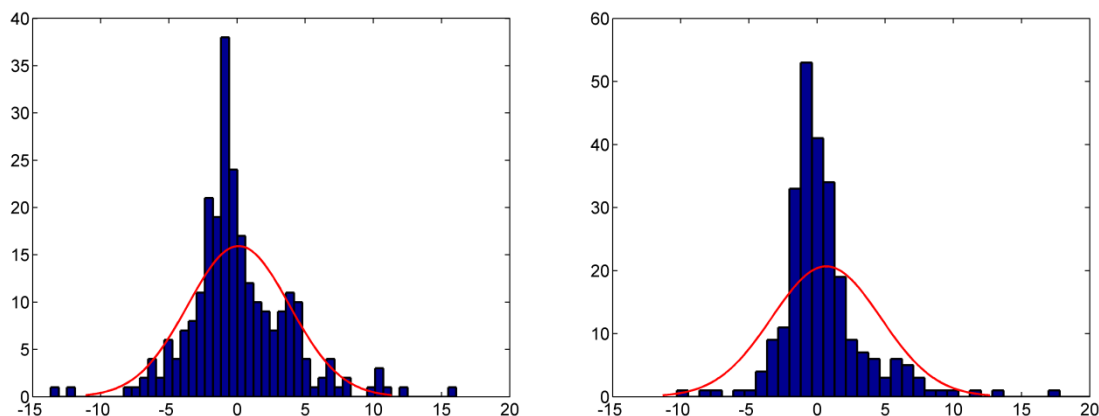
Tabela 1. Izračunati parametri funkcija propagacije signala

	P_0	n
RFID sistem	-52,06 (postavljeno na osnovu izmerene RSSI vrednosti na najbližem merenom rastojanju od referentnih tačaka od 0,7 m)	2,15
Bežična senzorska mreža	-50,14 (postavljeno na osnovu izmerene RSSI vrednosti na najbližem merenom rastojanju od referentnih tačaka od 0,5 m)	2,06



Slika 23. Funkcije propagacije signala u RFID sistemu (levo) i bežičnoj senzorskoj mreži (desno)

Na osnovu dobijenih funkcija propagacije signala, izračunate su greške merenja za sve izmerene RSSI vrednosti u odnosu na rastojanje između RFID taga i antena RFID čitača, odnosno između referentnih bežičnih senzorskih modula i mobilnog modula. Raspodela izračunatih grešaka za RFID sistem i bežičnu senzorsku mrežu predstavljena je kao histogram greške i prikazana na slici 24. Na slici se vidi da raspodela grešaka i za RFID sistem i za bežičnu senzorsku mrežu odgovara normalnoj (Gausovoj) raspodeli, pri čemu su parametri raspodele μ i σ dati u tabeli 2 i za RFID sistem i za bežičnu senzorsku mrežu.



Slika 24. Raspodela izračunatih grešaka za izmerene RSSI vrednosti po rastojanju na kom su izmerene i odgovarajuća normalna raspodela; levo – RFID sistem, desno – bežična senzorska mreža

Tabela 2. Parametri normalne raspodele koja odgovara raspodeli izračunatih grešaka za izmerene RSSI vrednosti po rastojanju na kom su izmerene

	μ	σ
RFID sistem	0,11	3,74
Bežična senzorska mreža	0,67	3,99

Na osnovu dobijenih funkcija propagacije signala i raspodela grešaka za RFID sistem i bežičnu senzorsku mrežu, formirane su i simulacione RSSI mape za testiranja lokalizacionih metoda koje zadržavaju parametre koji su dobijeni za realna merenja u test laboratoriji. Simulacione RSSI mape su formirane na osnovu jednačine (2), sa parametrima datim u tabeli 1, uz dodavanje šuma merenja X_σ koji je određen na osnovu parametara datim u tabeli 2. Takođe, na ovaj način su simulirane i RSSI vrednosti za testiranje lokalizacionih metoda, a koje predstavljaju uzastopne pozicije predmeta tokom kretanja kroz prostor u kom se vrši lokalizacija. Simulacione mape i vrednosti za proveru uspešnosti lokalizacionih metoda formirane su kako bi se olakšalo testiranje različitih metoda, odnosno kako bi se povećale mogućnosti testiranja sa što više različitih vrednosti. I za RFID sistem i za bežičnu senzorsku mrežu formirana su po tri različita skupa RSSI mapa.

Kao i kod izmerenih RSSI vrednosti, i za simulirane RSSI vrednosti izračunate su greške u odnosu na rastojanje između simulirane pozicije RFID taga i antena RFID čitača, odnosno između referentnih bežičnih senzorskih modula i mobilnog modula. Raspodela izračunatih grešaka za RFID sistem i bežičnu senzorsku mrežu u simuliranim sistemima predstavljena je, analogno greškama za realno izmerene vrednosti, kao histogram greške, pri čemu je dobijena

normalna (Gausova) raspodela sa parametrima koji dati u tabeli 3. Na osnovu poređenja dobijenih parametara u tabelama 2 i 3, vidi se da simulirane RSSI mape po parametrima približno odgovaraju RSSI mapama sa realno izmerenim RSSI vrednostima, što znači da je moguće očekivati da simulirani sistemi daju realnu procenu mogućnosti primene različitih lokalizacionih metoda.

Tabela 3. Parametri normalne raspodele koja odgovara raspodeli izračunatih grešaka za simulirane RSSI vrednosti po rastojanju na kom su simulirane

	Simulacija br.	μ	σ
RFID sistem	1	0,12	3,74
	2	0,13	3,74
	3	0,11	3,67
Bežična senzorska mreža	1	0,36	3,88
	2	0,43	4,13
	3	0,39	3,97

U okviru prve faze eksperimentalnih istraživanja, realizovani su odabrani metodi za lokalizaciju proizvoda primenom RFID tehnologije ili bežičnih senzorskih mreža. Od determinističkih metoda koji određuju poziciju proizvoda direktnim računanjem, odabrani su multilateracija i metod najbližih suseda, kao neki od najčešće korišćenih metoda koji se sreću u literaturi. Među metodama optimizacije, odabrana je optimizacija rojem čestica kao predstavnik metaheurističkih metoda koji mogu da vrše optimizaciju u nelinearnim sistemima sa slučajnim vrednostima. Među metodima koji su zasnovani na verovatnoći, odabran je čestični filter, koji je najpogodniji za sisteme sa slučajnim vrednostima i nelinearne procese, uzevši u obzir da raspodela izmerenih RSSI vrednosti nije Gausova, i da je sistem nelinearan. Svi odabrani metodi za lokalizaciju su primenjeni na simuliranim i na realno izmerenim podacima koji su podeljeni u sledeće uzorke podataka, pri čemu su u zavisnosti od konkretnog metoda i njegovih specifičnosti korišćeni neki ili svi uzorci podataka:

- RRPT (RFID REALNE POZNATE TAČKE) – RSSI vrednosti koje su izmerene u test laboratoriji u mernim tačkama (slika 19), odnosno u tačkama za koje postoje snimljeni RSSI podaci u RSSI mapi, u RFID sistemu. U ovom uzorku je odabrano

po 10 izmerenih skupova vrednosti za svaku mernu tačku, tako da ukupno ima 640 skupova RSSI vrednosti;

- RRNTR (RFID REALNE NEPOZNATE TAČKE RANDOM) – RSSI vrednosti koje su izmerene u test laboratoriji u slučajno raspoređenim test tačkama (slika 22 levo), odnosno u tačkama za koje ne postoje snimljeni RSSI podaci u RSSI mapi, u RFID sistemu;
- RRNTP (RFID REALNE NEPOZNATE TAČKE PUTANJA) – RSSI vrednosti koje su izmerene u test laboratoriji u test tačkama duž dve putanje kretanja proizvoda (slika 22, sredina i desno), u RFID sistemu;
- RSPT (RFID SIMULACIONE POZNATE TAČKE) – RSSI vrednosti koje su simulirane u mernim tačkama, odnosno u tačkama za koje postoje snimljeni RSSI podaci u RSSI mapi, za RFID sistem. U ovom uzorku je odabrano po 10 skupova vrednosti za svaku mernu tačku, tako da ukupno ima 640 skupova RSSI vrednosti;
- RSNTR (RFID SIMULACIONE NEPOZNATE TAČKE RANDOM) – RSSI vrednosti koje su simulirane u test tačkama, odnosno u tačkama za koje ne postoje snimljeni RSSI podaci u RSSI mapi, za RFID sistem. U ovom uzorku je nasumično odabrano po 1000 test tačaka u mernom prostoru, koje predstavljaju uzastopne merene vrednosti u toku kretanja traženog proizvoda kroz prostor;
- BRPT (BSM REALNE POZNATE TAČKE) – RSSI vrednosti koje su izmerene u test laboratoriji u mernim tačkama (slika 19), odnosno u tačkama za koje postoje snimljeni RSSI podaci u RSSI mapi, u bežičnoj senzorskoj mreži. U ovom uzorku je odabrano po 10 izmerenih skupova vrednosti za svaku mernu tačku, tako da ukupno ima 640 skupova RSSI vrednosti;
- BRNTR (BSM REALNE NEPOZNATE TAČKE RANDOM) – RSSI vrednosti koje su izmerene u test laboratoriji u slučajno raspoređenim test tačkama (slika 22 levo), odnosno u tačkama za koje ne postoje snimljeni RSSI podaci u RSSI mapi, u bežičnoj senzorskoj mreži;
- BRNTP (BSM REALNE NEPOZNATE TAČKE PUTANJA) – RSSI vrednosti koje su izmerene u test laboratoriji u test tačkama duž putanje kretanja proizvoda (slika 22, sredina i desno), u bežičnoj senzorskoj mreži;
- BSPT (BSM SIMULACIONE POZNATE TAČKE) – RSSI vrednosti koje su simulirane u mernim tačkama, odnosno u tačkama za koje postoje snimljeni RSSI

podaci u RSSI mapi, za bežičnu senzorsku mrežu. U ovom uzorku je odabrano po 10 skupova vrednosti za svaku mernu tačku, tako da ukupno ima 640 skupova RSSI vrednosti;

- BSNTR (BSM SIMULACIONE NEPOZNATE TAČKE RANDOM) – RSSI vrednosti koje su simulirane u test tačkama, odnosno u tačkama za koje ne postoje snimljeni RSSI podaci u RSSI mapi, za bežičnu senzorsku mrežu. U ovom uzorku je nasumično odabrano po 1000 test tačaka u mernom prostoru, koje predstavljaju uzastopne merene vrednosti u toku kretanja traženog proizvoda kroz prostor.

U nastavku će biti navedeni detalji realizacije svakog od realizovanih metoda.

4.3.2 Multilateracija

Metod multilateracije je primenjen direktno i za RFID sistem i za bežičnu senzorsku mrežu, budući da su u oba slučaja referentne tačke postavljene na odgovarajući način, u četiri tačke koje u potpunosti određuju merni prostor. Za ovaj metod nije neophodna mapa RSSI vrednosti, ali je potrebno postaviti model propagacije signala u prostoru na osnovu kog se može odrediti rastojanje između tražene pozicije proizvoda i pozicije svake referentne tačke na osnovu izmerenih RSSI vrednosti. U ovu svrhu, određene su inverzne funkcije za funkcije propagacije opisane u poglavlju 4.3.1 koje odgovaraju jednačini (2) sa parametrima datim u tabeli 1. Inverzna funkcija za određivanje rastojanja na osnovu izmerene RSSI vrednosti u RFID sistemu je:

$$d = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot 10^{\frac{-52,06 - RSSI}{21,48}}, \quad (40)$$

a u bežičnoj senzorskoj mreži:

$$d = \frac{1}{2} \cdot 10^{\frac{-50,14 - RSSI}{20,6}}. \quad (41)$$

Kada je na osnovu izmerene RSSI vrednosti i jednačine (40) odnosno (41) izračunato rastojanje d , na osnovu jednačine (7) izračunavaju se koordinate tražene pozicije.

4.3.2.1 Primena metoda multilateracije u RFID sistemu

Metod multilateracije je primenjen na dva uzorka podataka, RRPT i RSPT, budući da ovaj metod ne zavisi od snimljene RSSI mape, te ne postoji podela na tačke za koje postoje

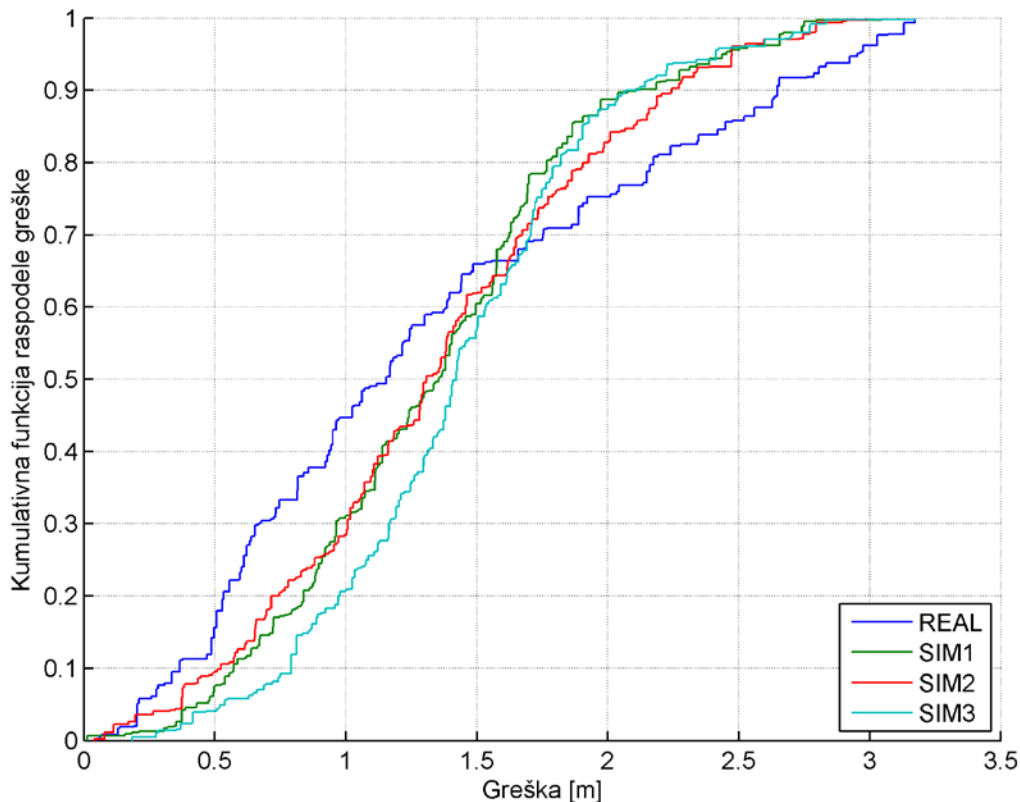
snimljene RSSI vrednosti u RSSI mapi i za koje te vrednosti ne postoje. Metod je testiran sa 640 različitih merenja RSSI vrednosti u realnom sistemu, i tri skupa od po 640 različitih simuliranih vrednosti. U tabeli 4 prikazani su deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka. Srednja vrednost greške u simuliranim sistemima je unutar 1,43 m, dok je u realnom sistemu 1,33 m.

Kako bi se proverila preciznost metoda, formirana je kumulativna funkcija raspodele greške, koja je prikazana na slici 25. Kumulativna funkcija raspodele greške pokazuje da je u simuliranim sistemima moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 1,42 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,24 m sa verovatnoćom od 90%. Za realno izmerene vrednosti u test laboratoriji, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 1,15 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,65 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 4. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod multilateracije u RFID sistemu, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1 ¹	1,34	1,35	0,59	0,01	3,11
	2	1,35	1,31	0,65	0,04	2,99
	3	1,43	1,42	0,53	0,18	3,17
Izmerene RSSI vrednosti		1,33	1,15	0,85	0,05	3,17

¹ Brojevi 1,2 i 3 kod simuliranih RSSI vrednosti označavaju za koji od tri simulirana sistema su dobijeni parametri u odgovarajućem redu tabele.



Slika 25. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod multilateracije u RFID sistemu; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

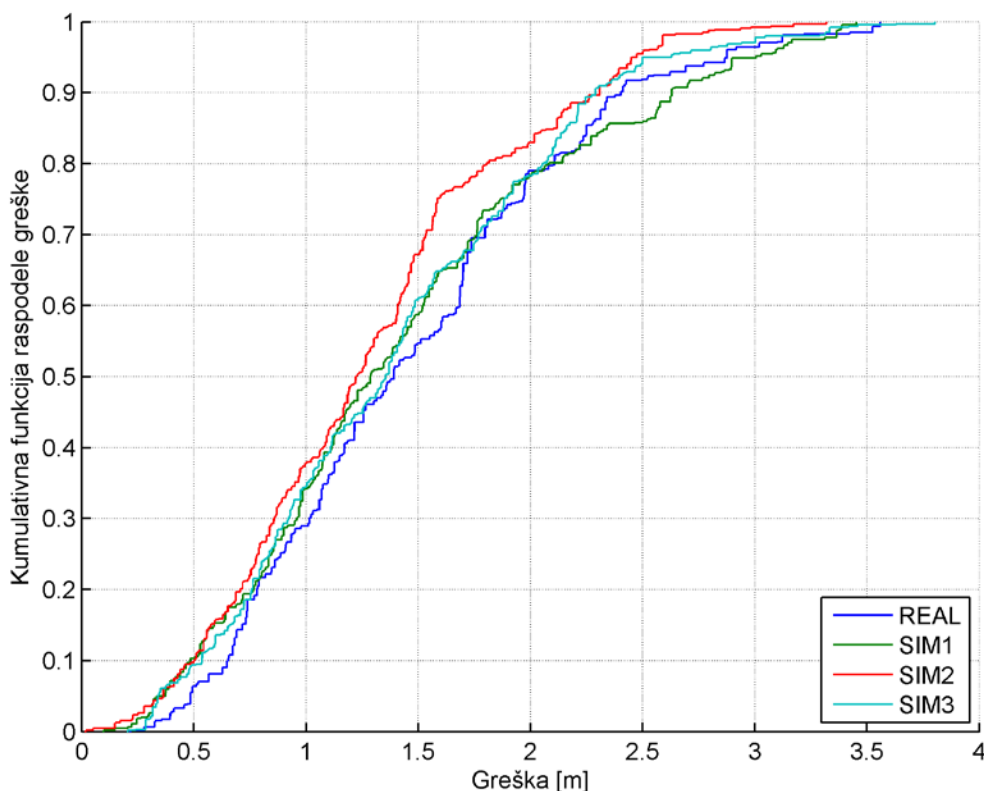
4.3.2.2 Primena metoda multilateracije u bežičnoj senzorskoj mreži

Kao i u RFID sistemu, i u bežičnoj senzorskoj mreži metod multilateracije je primenjen na dva uzorka podataka, BRPT i BSPT. Metod je testiran sa 640 različitih merenja RSSI vrednosti u realnom sistemu, i tri skupa od po 640 različitih simuliranih vrednosti. U tabeli 5 prikazani su deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka. Srednja vrednost greške u simuliranim sistemima je unutar 1,44 m, dok je za realan sistem srednja vrednost greške 1,48 m.

Za određivanje preciznosti metoda, formirana je kumulativna funkcija raspodele greške, prikazana na slici 26. Kumulativna funkcija raspodele greške pokazuje da je u simuliranim sistemima moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 1,36 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,63 m sa verovatnoćom od 90%. Za realno izmerene vrednosti u test laboratoriji, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 1,39 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,4 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 5. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod multilateracije u bežičnoj senzorskoj mreži, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	1,44	1,29	0,79	0,1	3,45
	2	1,29	1,22	0,65	0,02	3,32
	3	1,4	1,36	0,71	0,21	3,8
Izmerene RSSI vrednosti		1,48	1,39	0,72	0,22	3,56



Slika 26. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod multilateracije u bežičnoj senzorskoj mreži; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

4.3.3 Metod najbližih suseda

Metod najbližih suseda je realizovan kao metod najbližih suseda sa težinskim koeficijentima. Na početku se računaju euklidska rastojanja RSSI vrednosti, između tražene tačke sa trenutno izmerenom RSSI vrednošću i svih RSSI vrednosti snimljenih u RSSI mapi sistema, na osnovu jednačine (8). Na ovaj način se za svaku tačku u RSSI mapi dobija jedinstven parametar, na osnovu sve četiri izmerene RSSI vrednosti u odnosu na referentne

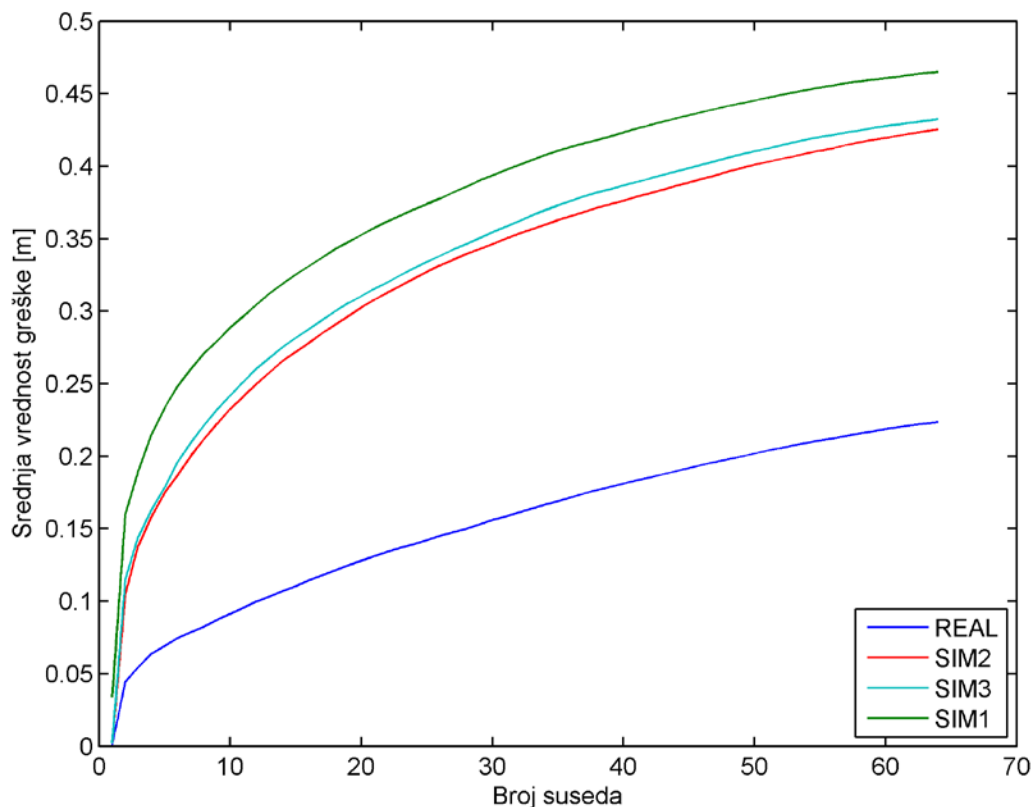
tačke. Zatim se sortiraju vrednosti izračunatih parametara za sve tačke u RSSI mapi u rastućem redosledu, i odabira se odgovarajući broj najbližih suseda, odnosno odgovarajući broj tačaka sa najnižim vrednostima izračunatih parametara. Broj najbližih suseda u eksperimentima je variran od 1 do 64, što je maksimalan broj tačaka u RSSI mapi. U slučaju kada se koristi samo jedan najbliži sused, zapravo se samo određuje tačka iz merne mreže sa najmanjim RSSI euklidskim rastojanjem, dok se sa povećanjem broja suseda pokriva veći deo mernog prostora i dobija veća integracija različitih prostornih faktora koji mogu da utiču na propagaciju signala. Kada su odabrane odgovarajuće tačke kao najbliži susedi, izračunavaju se njihovi težinski koeficijenti na osnovu jednačine (9), a zatim i koordinate tražene tačke na osnovu jednačine (10).

4.3.3.1 Primena metoda najbližih suseda u RFID sistemu

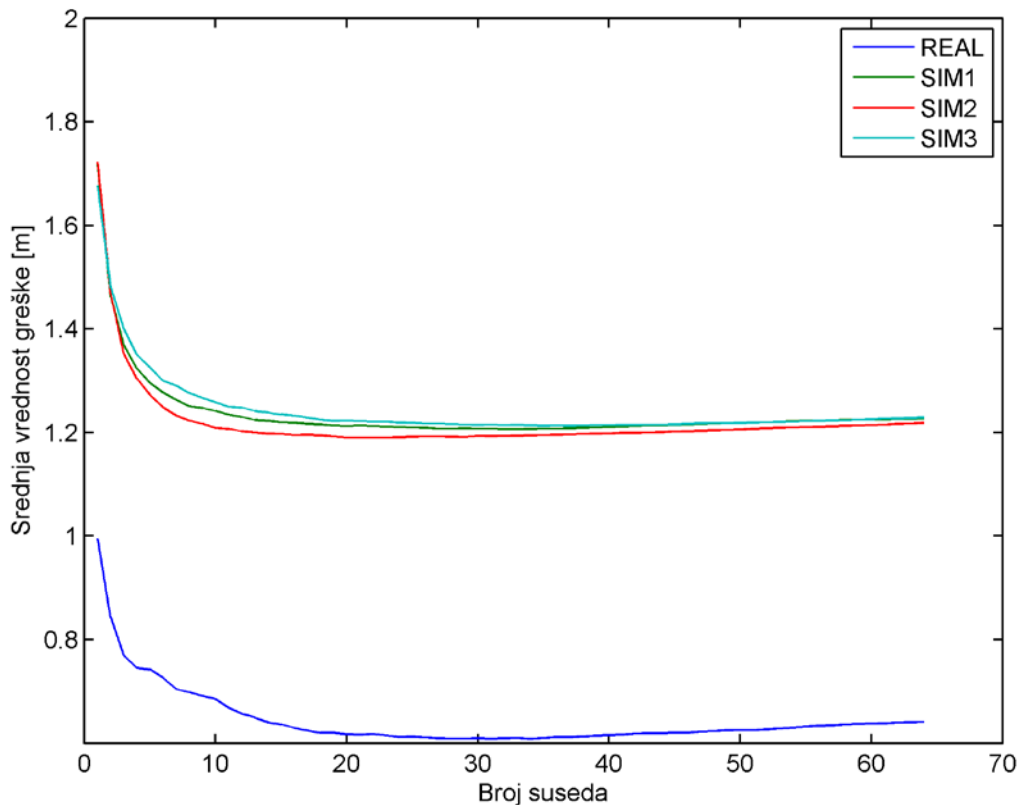
Metod najbližih suseda je primenjen na uzorcima RRPT i RSPT, za RSSI vrednosti izmerene ili simulirane u mernim tačkama za koje postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi, kao i na uzorcima RRNTR i RSNTR, za RSSI vrednosti izmerene ili simulirane u test tačkama za koje ne postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi.

Kako bi se odredio optimalan broj najbližih suseda, analizirane su srednje vrednosti greške pri lokalizaciji metodom najbližih suseda sa brojem suseda od 1 do 64. Slika 27 prikazuje zavisnost izračunate srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda koji je korišćen, u slučaju RSSI vrednosti koje su izmerene ili simulirane u mernim tačkama, za koje postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi, pri čemu se vidi da je u ovom slučaju greška lokalizacije najmanja kada se koristi samo jedan najbliži sused, odnosno kada se tražena pozicija samo odabira iz skupa pozicija mernih tačaka. Što je veći broj suseda korišćen, lokalizacija postaje lošija, odnosno greška se povećava. Ovo je i očekivan rezultat za uzorak uzet na mernim tačkama, za koji se dodavanjem više suseda zapravo dobija lošija lokalizacija nego prostim odabiranjem jedne tačke iz skupa mernih tačaka, pošto se i drugim susedima uzetim u obzir dodeljuju odgovarajući težinski faktori, koji u kombinaciji sa njihovim pozicijama pomeraju poziciju tražene tačke dalje od pozicije merne tačke koja predstavlja stvarnu poziciju proizvoda. Kako u realnom sistemu proizvod ne bi mogao uvek da se nalazi na tačno određenim tačkama, vršeno je i testiranje metoda na test tačkama, za koje ne postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi, a zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda koji je korišćen prikazan je na slici 28. Za razliku od uzorka uzetom na mernim

tačkama, za uzorak uzet na test tačkama vidi se da dolazi do izražaja prava karakteristika metoda najbližih suseda da se sa povećanjem broja suseda greška lokalizacije smanjuje. Međutim, greška se smanjuje samo do određenog nivoa, a zatim ponovo počinje da se povećava. Kako bi se odredio minimalan broj suseda koji daje zadovoljavajuće rezultate, a da pri tome broj suseda bude što manji kako bi i u slučaju kada se proizvod nalazi u mernim tačkama greška lokalizacije bila što manja, tražen je broj suseda za koji je srednja vrednost greške manja od srednje vrednosti greške prethodnog broja suseda za $|\varepsilon| < 0,001$ m. Iako se srednje vrednosti greške za simulirane podatke i za realno izmerene vrednosti razlikuju, u oba slučaja se dobija isti broj suseda za koji je ispunjen uslov da je $|\varepsilon| < 0,001$ m, a taj broj suseda je $k=19$, i dalje su prikazani detaljni rezultati pri primeni metoda najbližih suseda sa $k=19$ suseda i za uzorke sa vrednostima u mernim tačkama i za uzorke sa vrednostima u test tačkama.



Slika 27. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda za RSSI vrednosti u mernim tačkama u RFID sistemu; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema



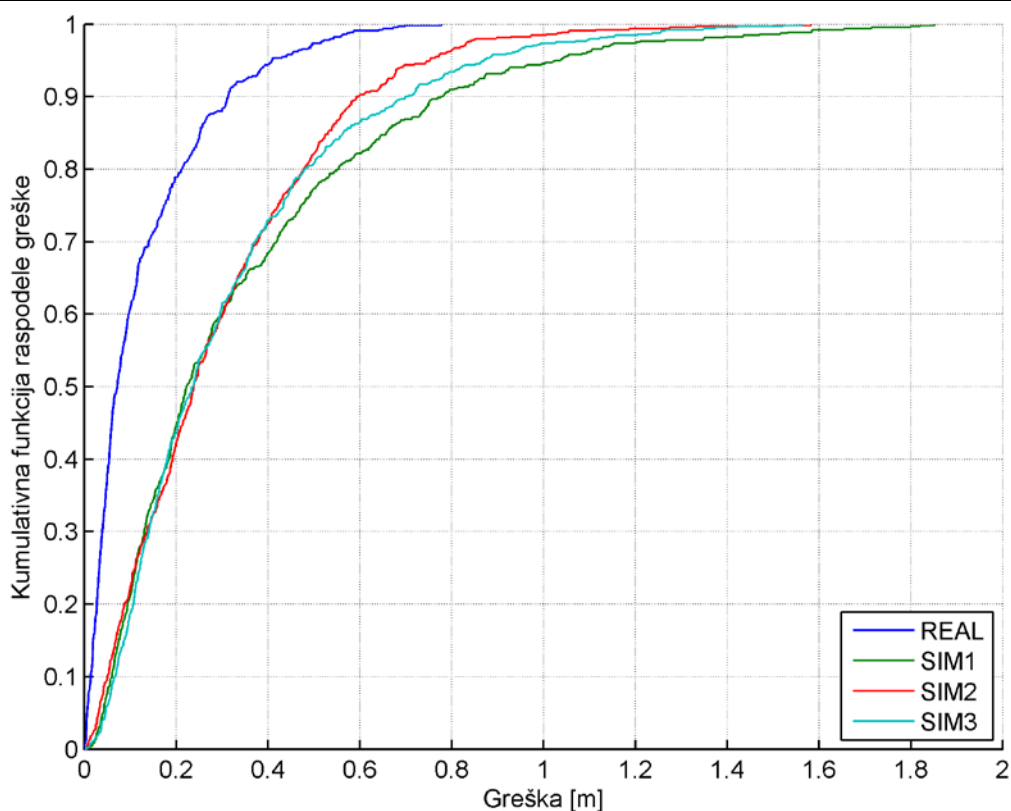
Slika 28. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda za RSSI vrednosti u test tačkama u RFID sistemu; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulacione RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

Tabela 6 prikazuje deskriptivne statističke pokazatelje izračunatih grešaka za uzorke RRPT i RSPT za broj suseda $k=19$, na osnovu kojih se vidi da je srednja vrednost greške u realnom sistemu 0,12 m, dok je kod simuliranih sistema unutar 0,34 m.

Za proveru preciznosti metoda, formirana je kumulativna funkcija raspodele greške, koja je prikazana na slici 29. Kumulativna funkcija raspodele greške pokazuje da je u simuliranim sistemima moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 0,24 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,77 m sa verovatnoćom od 90%. Za realno izmerene vrednosti u test laboratoriji, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,07 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,31 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 6. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod najbližih suseda u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama za broj suseda $k=19$, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	0,34	0,22	0,33	0,01	1,85
	2	0,3	0,24	0,24	0,01	1,58
	3	0,32	0,24	0,27	0	1,56
Izmerene RSSI vrednosti		0,12	0,07	0,13	0	0,78



Slika 29. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod najbližih suseda u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, za broj suseda $k=19$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

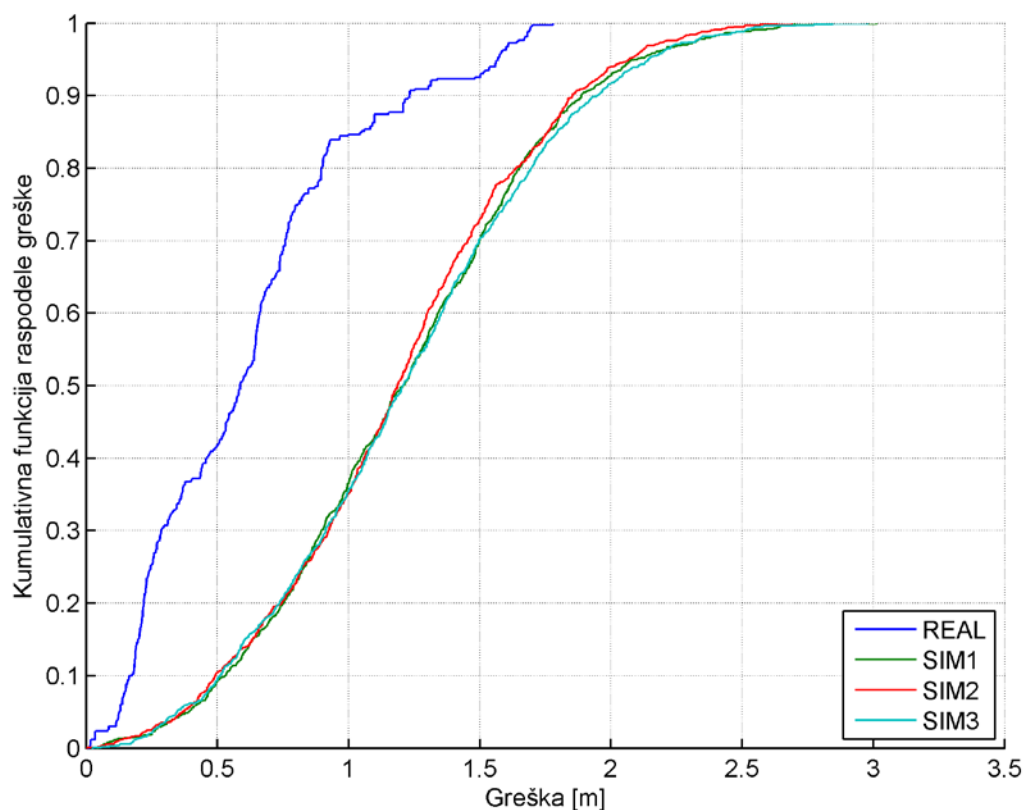
Za proveru metoda na uzorcima RRNTR i RSNTR, tabela 7 prikazuje deskriptivne statističke pokazatelje izračunatih grešaka za broj suseda $k=19$. Srednja vrednost greške u realnom sistemu je 0,62 m, dok je kod simuliranih sistema srednja vrednost greške unutar 1,22 m.

Kumulativna funkcija raspodele greške je prikazana na slici 30. Kumulativna funkcija raspodele greške pokazuje da je u simuliranim sistemima moguće odrediti poziciju proizvoda

unutar 1,21 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,95 m sa verovatnoćom od 90%. Za realno izmerene vrednosti u test laboratoriji, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,59 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,23 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 7. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod najbližih suseda u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama za broj suseda $k=19$, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Varijansa	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	1,21	1,21	0,56	0,53	0,04	3,01
	2	1,19	1,19	0,52	0,51	0	2,69
	3	1,22	1,21	0,58	0,54	0,03	2,98
Izmerene RSSI vrednosti		0,62	0,59	0,35	0,42	0,01	1,78

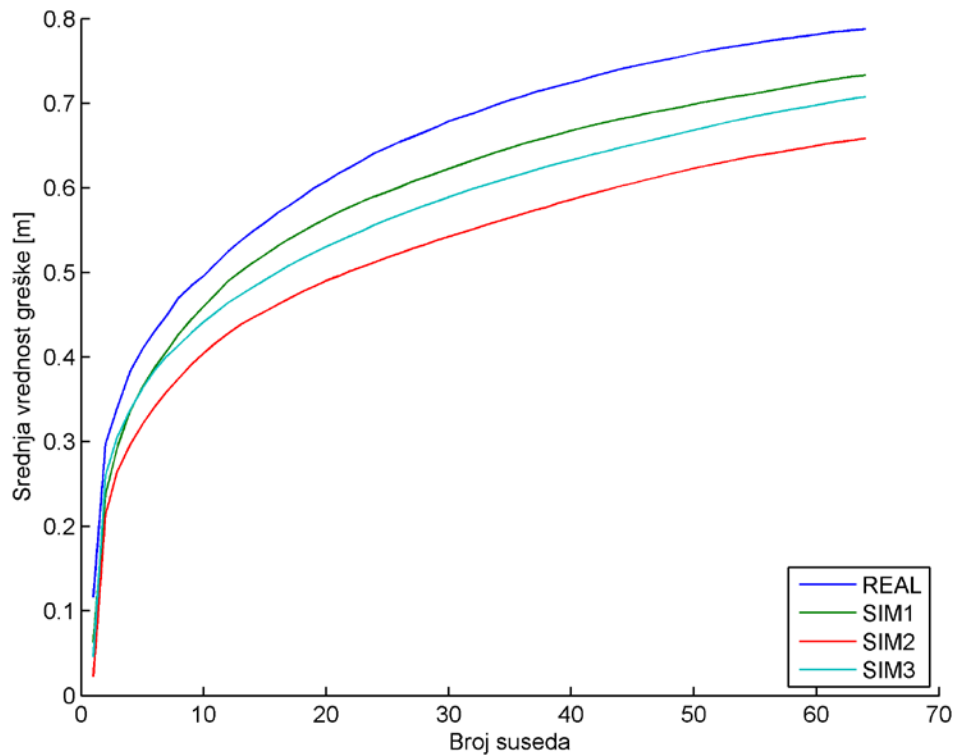


Slika 30. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod najbližih suseda u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama, za broj suseda $k=19$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

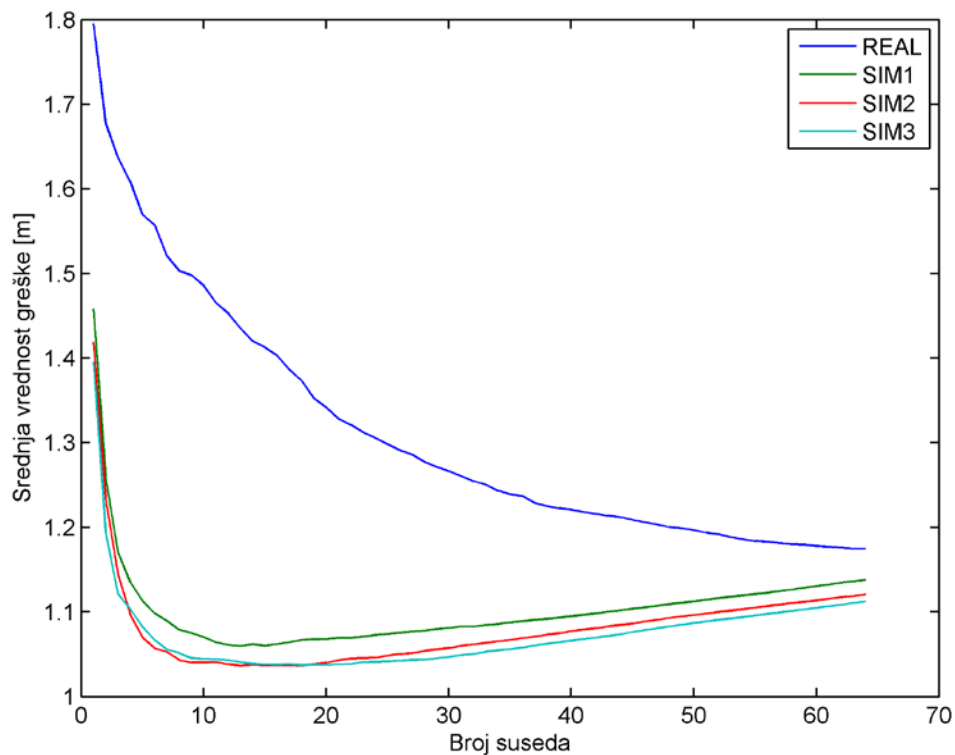
4.3.3.2 Primena metoda najbližih suseda u bežičnoj senzorskoj mreži

Kao i u RFID sistemu, metod najbližih suseda je testiran na uzorcima RSSI vrednosti izmerenim ili simuliranim u mernim tačkama, za koje postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi, BRPT i BSPT, kao i na uzorcima RSSI vrednosti izmerenim ili simuliranim u test tačkama, za koje ne postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi, BRNTR i BSNTR.

Analizirane su srednje vrednosti greške pri lokalizaciji metodom najbližih suseda sa brojem suseda od 1 do 64. Slika 31 prikazuje zavisnost izračunate srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda koji je korišćen u slučaju RSSI vrednosti koje su izmerene ili simulirane u mernim tačkama, za koje postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi. Kao i u RFID sistemu, u ovom slučaju je greška lokalizacije najmanja u slučaju kada se koristi samo jedan najbliži sused. Kako u realnom sistemu proizvod ne bi mogao uvek da se nalazi na tačno određenim tačkama, vršeno je i testiranje metoda na test tačkama, za koje ne postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi, a zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda u ovom slučaju prikazana je na slici 32. Ovde se ponovo vidi da dolazi do izražaja prava karakteristika metoda najbližih suseda da se sa povećanjem broja suseda greška lokalizacije smanjuje. Kod simuliranih sistema, kao i u RFID sistemu, greška se smanjuje samo do određenog nivoa, a zatim ponovo počinje da se povećava. Međutim, za realno izmerene vrednosti greška konstantno opada do vrednosti $k=64$. Broj suseda za koji je srednja vrednost greške manja od srednje vrednosti greške prethodnog broja suseda za $|\varepsilon| < 0,001$ m je u ovom slučaju $k=14$ za simulirane sisteme. Za realni sistem srednja vrednost greške mnogo brže opada, tako da je odabrana granica $|\varepsilon| < 0,01$ m, kako bi se obezbedila što manja računaska kompleksnost sistema i što manja greška u mernim tačkama (kod kojih greška raste sa porastom broja suseda). Za ovu vrednost $|\varepsilon|$, kao potreban broj suseda dobija se ponovo $k=14$. Dalje su prikazani detaljni rezultati pri primeni metoda najbližih suseda sa $k=14$ i za uzorke sa vrednostima u mernim tačkama i za uzorke sa vrednostima u test tačkama.



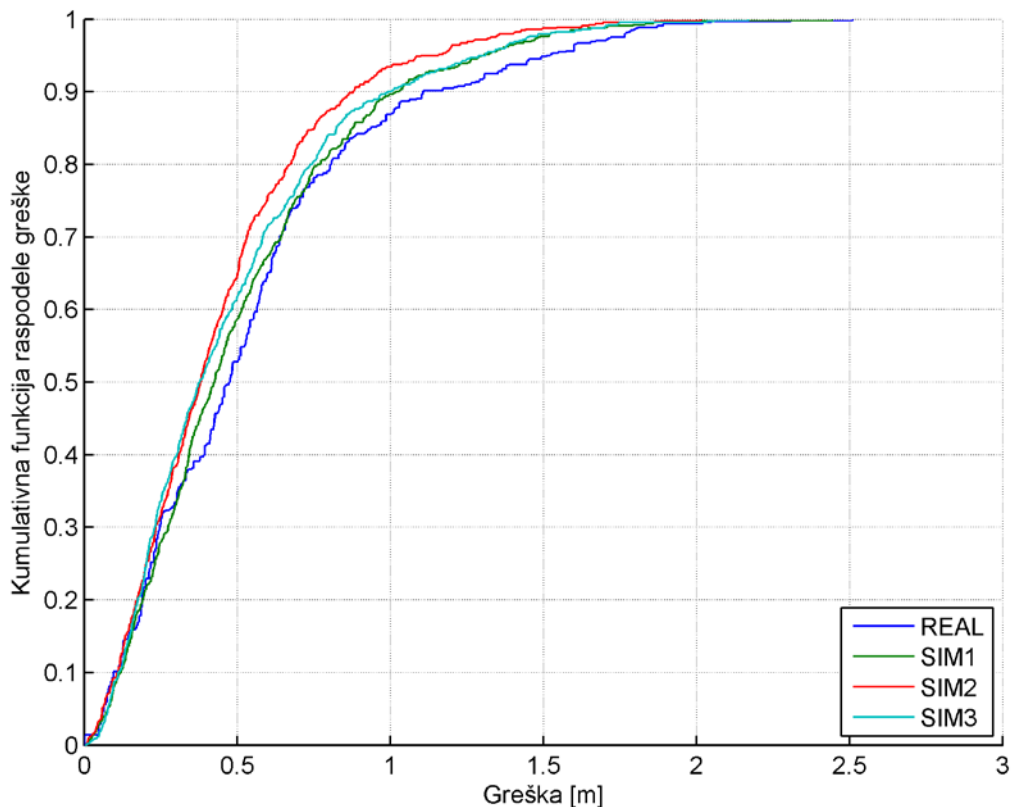
Slika 31. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda za RSSI vrednosti u mernim tačkama u bežičnoj senzorskoj mreži; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema



Slika 32. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda za RSSI vrednosti u test tačkama u bežičnoj senzorskoj mreži; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

Tabela 8 prikazuje deskriptivne statističke pokazatelje izračunatih grešaka za uzorke BRPT i BSPT za broj suseda $k=14$, na osnovu kojih se vidi da je srednja vrednost greške u realnom sistemu 0,55 m, dok je kod simuliranih sistema unutar 0,51 m.

Kumulativna funkcija raspodele greške je prikazana na slici 33, i pokazuje da je u simuliranim sistemima moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 0,43 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,02 m sa verovatnoćom od 90%. Za realno izmerene vrednosti u test laboratoriji, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,48 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,11 m sa verovatnoćom od 90%.



Slika 33. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod najbližih suseda u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, za broj suseda $k=14$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

Tabela 8. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod najbližih suseda u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama za broj suseda $k=14$, dati u [m]

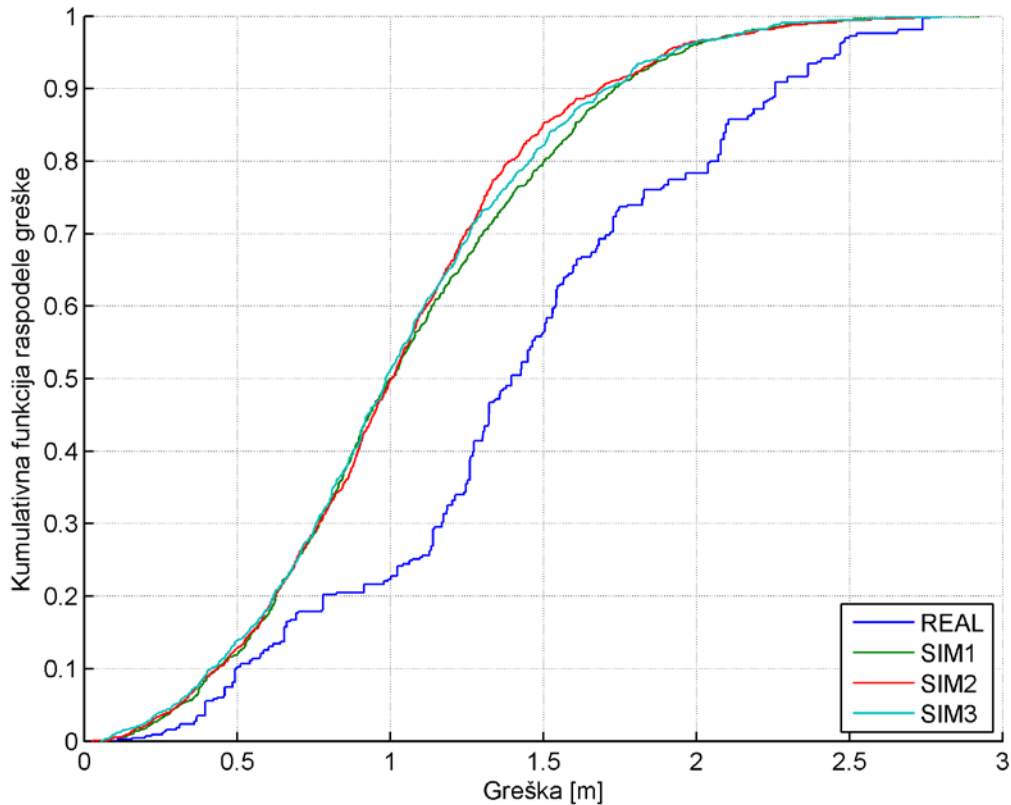
		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	0,51	0,43	0,38	0,01	2,44
	2	0,45	0,38	0,33	0,01	2,02
	3	0,48	0,38	0,37	0,01	2,17
Izmerene RSSI vrednosti		0,55	0,48	0,43	0	2,51

Za proveru metoda na uzorcima BRNTR i BSNTR, Tabela 9 prikazuje deskriptivne statističke pokazatelje izračunatih grešaka za broj suseda $k=14$. Srednja vrednost greške u realnom sistemu je 1,42 m, dok je kod simuliranih sistema srednja vrednost greške unutar 1,06 m.

Kumulativna funkcija raspodele greške je prikazana na slici 34. Kumulativna funkcija raspodele greške pokazuje da je u simuliranim sistemima moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 1,01 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,73 m sa verovatnoćom od 90%. Za realno izmerene vrednosti u test laboratoriji, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 1,4 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,26 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 9. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod najbližih suseda u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama za broj suseda $k=14$, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	1,06	1	0,5	0,07	2,92
	2	1,04	1,01	0,48	0,03	2,73
	3	1,04	0,99	0,49	0,06	2,86
Izmerene RSSI vrednosti		1,42	1,40	0,61	0,11	2,76



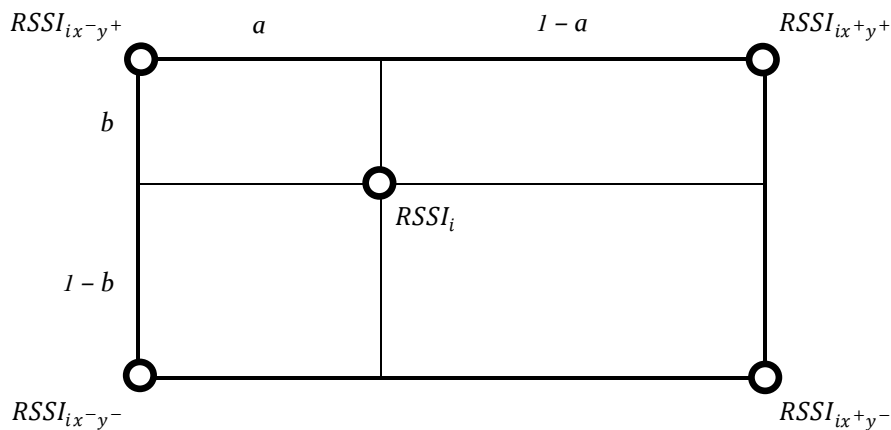
Slika 34. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod najbližih suseda u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama, za broj suseda $k=14$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

4.3.4 Optimizacija rojem čestica

Za optimizaciju rojem čestica, potrebno je generisati populaciju čestica $x_k^{[m]}$, koje predstavljaju x i y koordinate svih čestica, odnosno hipoteze stanja sistema u trenutku k , kao i njihove brzine $v_k^{[m]}$, gde je $1 \leq m \leq M$, a M ukupan broj čestica u roju. Skup čestica je formiran slučajnim odabiranjem tačaka (čestica) u prostoru, sa uniformnom raspodelom. Broj čestica u skupu X_k u eksperimentima je variran od 20 do 100, sa korakom od 5 čestica.

Kriterijum optimalnosti koji je postavljen za optimizaciju rojem čestica zasniva se na euklidskom rastojanju između bilinearne interpolacije RSSI vrednosti okolnih tačaka, snimljenih u RSSI mapi, i izmerenih RSSI vrednosti za svaku od četiri referentne tačke. Kriterijum optimalnosti je postavljen na osnovu pretpostavke da se, usled malih rastojanja između susednih tačaka u mernoj mreži RSSI mape, propagacija signala unutar jednog mernog polja vrši približno linearno po obe ose. Bilinearna transformacija dodeljuje RSSI vrednosti traženoj tački unutar mernog polja na osnovu RSSI vrednosti u okolnim tačkama iz

merne mreže i rastojanja između tražene tačke i okolnih tačaka, tako da RSSI vrednosti za tačku iz merne mreže koja je najbliža traženoj tački imaju najveći udeo, a RSSI vrednosti za tačku iz merne mreže koja je najdalja od tražene tačke najmanji udeo u izračunatim RSSI vrednostima za traženu tačku. Odnos koji određuje ovaj udeo je linearan po svakoj osi, tako da se kombinacijom dve ose dobija bilinearna interpolacija. Slika 35 prikazuje jedan kvadrat merne mreže, sa obeleženim mernim tačkama, traženom tačkom i odgovarajućim rastojanjima između njih, koja su potrebna za postavljanje jednačine bilinearne interpolacije. Kada su bilinearnom interpolacijom izračunate RSSI vrednosti za traženu tačku, kriterijum optimalnosti (jednačina (42)) predstavlja euklidsko rastojanje između izračunatih i izmerenih RSSI vrednosti. Što su izračunate vrednosti bliže izmerenim, euklidska razlika je manja, tako da se u optimizacionom problemu traži minimum kriterijuma optimalnosti.



Slika 35. Bilinearna interpolacija RSSI vrednosti u jednom kvadratu merne mreže

$$f(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \left(\begin{aligned} &(1-a) \cdot \left((1-b) \cdot RSSI_{ix^-y^-} + b \cdot RSSI_{ix^-y^+} \right) + \dots \\ &(a) \cdot \left((1-b) \cdot RSSI_{ix^+y^-} + b \cdot RSSI_{ix^+y^+} \right) - RSSI_i \end{aligned} \right)^2} \quad (42)$$

Metod optimizacije rojem čestica zasniva se na iterativnom računanju kriterijuma optimalnosti za sve čestice u skupu X_b , zatim određivanja parametara za $pbest^{[m]}$ i $gbest$, i primeni jednačina (11) i (12). Za koeficijente w_k , c_1 , c_2 , r_1 i r_2 korišćene su preporučene uobičajene vrednosti. Algoritam se završava kada se izvrši određeni broj iteracija, ili kada $f(gbest)$ postane manje od postavljene granice. U eksperimentima je broj iteracija postavljen na vrednost 50, a granica za $f(gbest)$ postavljena na 0,01.

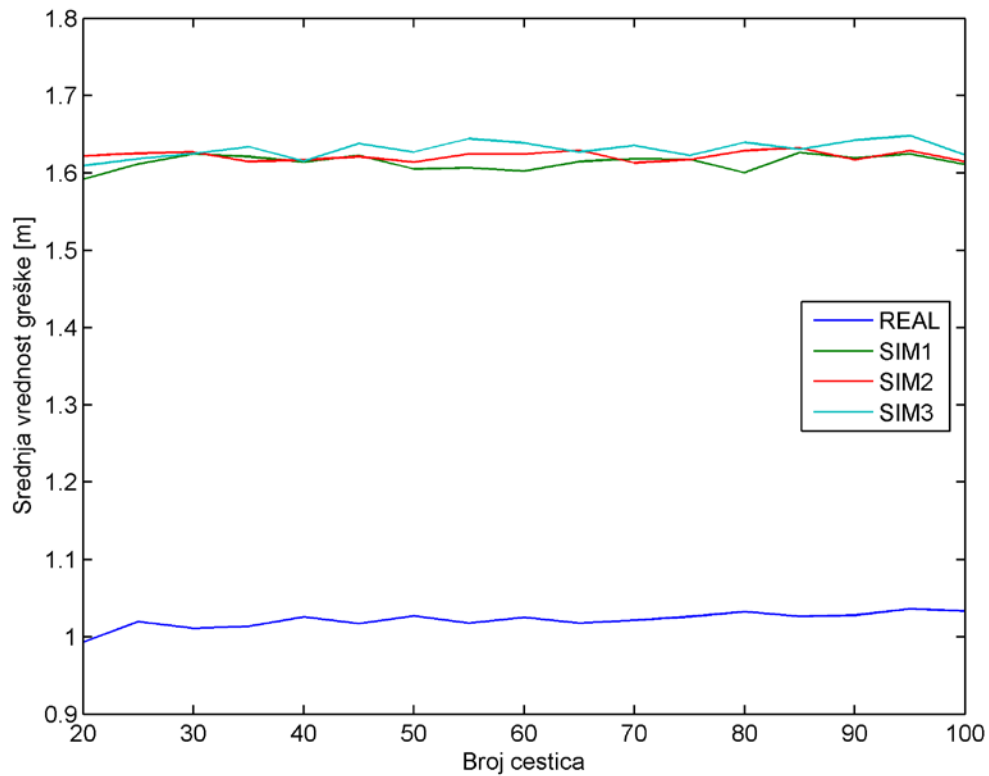
4.3.4.1 Primena metoda optimizacije rojem čestica u RFID sistemu

Metod optimizacije rojem čestica je primenjen na uzorcima RRPT i RSPT, za RSSI vrednosti izmerene ili simulirane u mernim tačkama za koje postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi, kao i na uzorcima RRNTR i RSNTR, za RSSI vrednosti izmerene ili simulirane u test tačkama za koje ne postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi.

Na početku je potrebno odrediti broj čestica koje će biti korišćene u realizaciji metoda. Kako bi se odredio optimalan broj čestica, analizirane su srednje vrednosti greške lokalizacije sa brojem čestica od 20 do 100, što je uobičajeni raspon za broj čestica koji se koristi u ovom metodu. Slika 36 prikazuje zavisnost izračunate srednje vrednosti greške lokalizacije i broja čestica koji je korišćen, u slučaju RSSI vrednosti koje su izmerene ili simulirane u mernim tačkama, za koje postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi. Na slici se vidi da sa porastom broja čestica u realnom sistemu nema značajne razlike srednje vrednosti greške, dok kod simuliranih vrednosti srednja vrednost greške opada, međutim ne značajno. Na slici 37 prikazana je zavisnost izračunate srednje vrednosti greške lokalizacije i broja čestica u slučaju RSSI vrednosti koje su izmerene ili simulirane u test tačkama. U ovom slučaju vidi se da broj čestica nije od velikog značaja za srednju vrednost greške. Kako bi se obezbedilo što brže izvršavanje algoritma, odabran je minimalan broj čestica, $M=20$, pri čemu je na taj način obezbeđeno da razlika između srednje vrednosti greške i minimalne srednje vrednosti greške koja je dobijena pri testiranjima u realnom sistemu bude u granicama od $|\varepsilon| < 0,01$ m. Dalje su prikazani rezultati za broj čestica $M=20$.



Slika 36. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja čestica za RSSI vrednosti u mernim tačkama u RFID sistemu



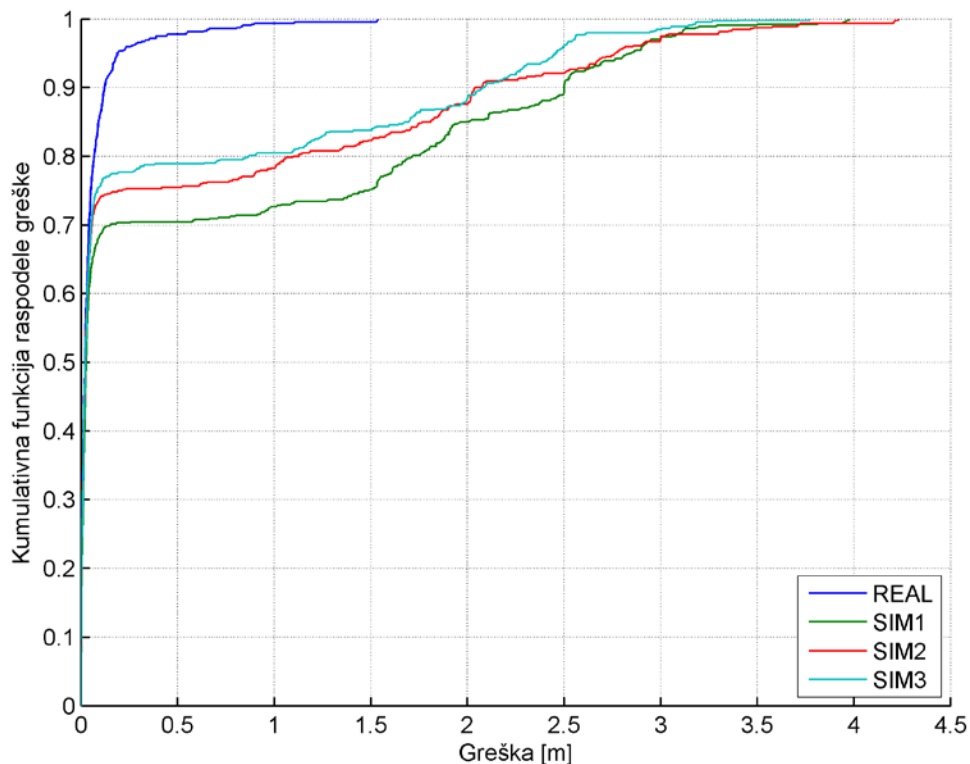
Slika 37. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja čestica za RSSI vrednosti u test tačkama u RFID sistemu

Tabela 10 prikazuje deskriptivne statističke pokazatelje izračunatih grešaka za uzorke RRPT i RSPT za broj suseda $M=20$, koji pokazuju da je srednja vrednost greške u realnom sistemu 0,06 m, dok je kod simuliranih sistema unutar 0,64 m.

Slika 38 prikazuje kumulativnu funkciju raspodele greške, gde se vidi da je u realnom sistemu moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 0,02 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,12 m sa verovatnoćom od 90%. Za simulirane sisteme moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,03 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,5 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 10. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod optimizacije rojem čestica u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama za broj čestica $M=20$, dati u [m]

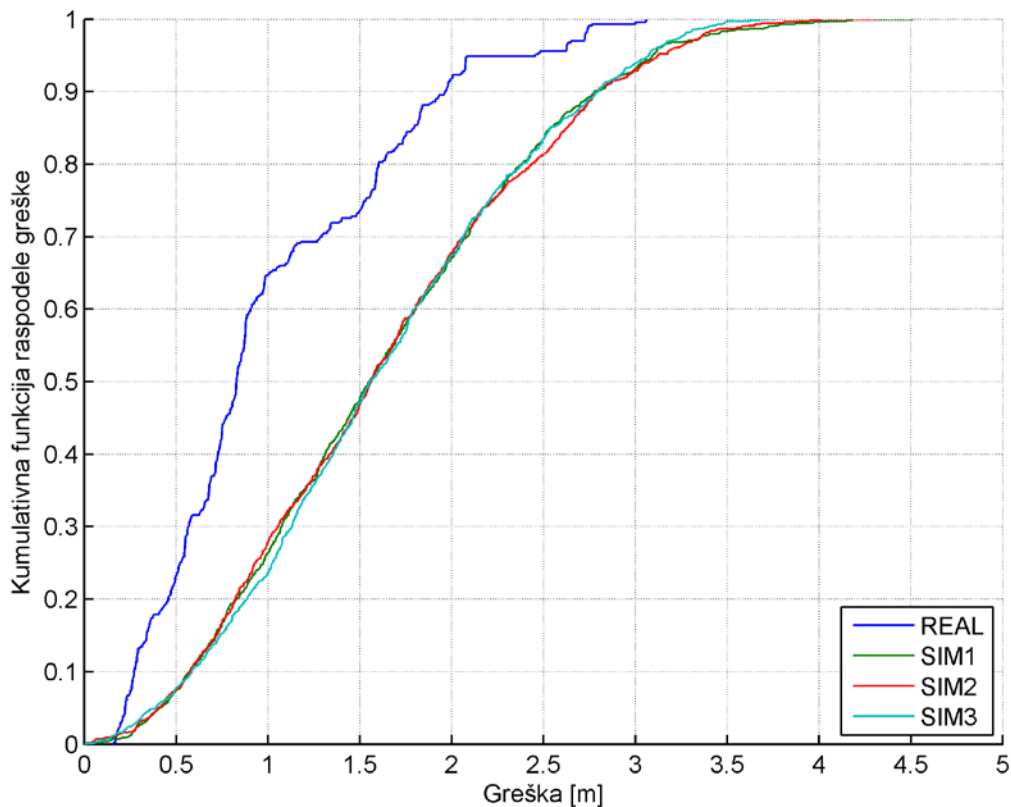
		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	0,64	0,03	1,03	0	3,98
	2	0,51	0,02	0,96	0	4,23
	3	0,44	0,02	0,86	0	3,77
Izmerene RSSI vrednosti		0,06	0,02	0,15	0	1,54



Slika 38. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod optimizacije rojem čestica u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, za broj čestica $M=20$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

Za proveru metoda za RSSI vrednosti izmerene u test tačkama, tabela 11 prikazuje deskriptivne statističke pokazatelje izračunatih grešaka za broj čestica $M=20$. Srednja vrednost greške u realnom sistemu je 1,01 m, dok je kod simuliranih sistema srednja vrednost greške 1,63 m.

Slika 39 prikazuje kumulativnu funkciju raspodele greške, na osnovu koje se vidi da je u realnom sistemu moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 0,83 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,96 m sa verovatnoćom od 90%. Za simulirane sisteme, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 1,56 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,8 m sa verovatnoćom od 90%.



Slika 39. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod optimizacije rojem čestica u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama, za broj čestica $M=20$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

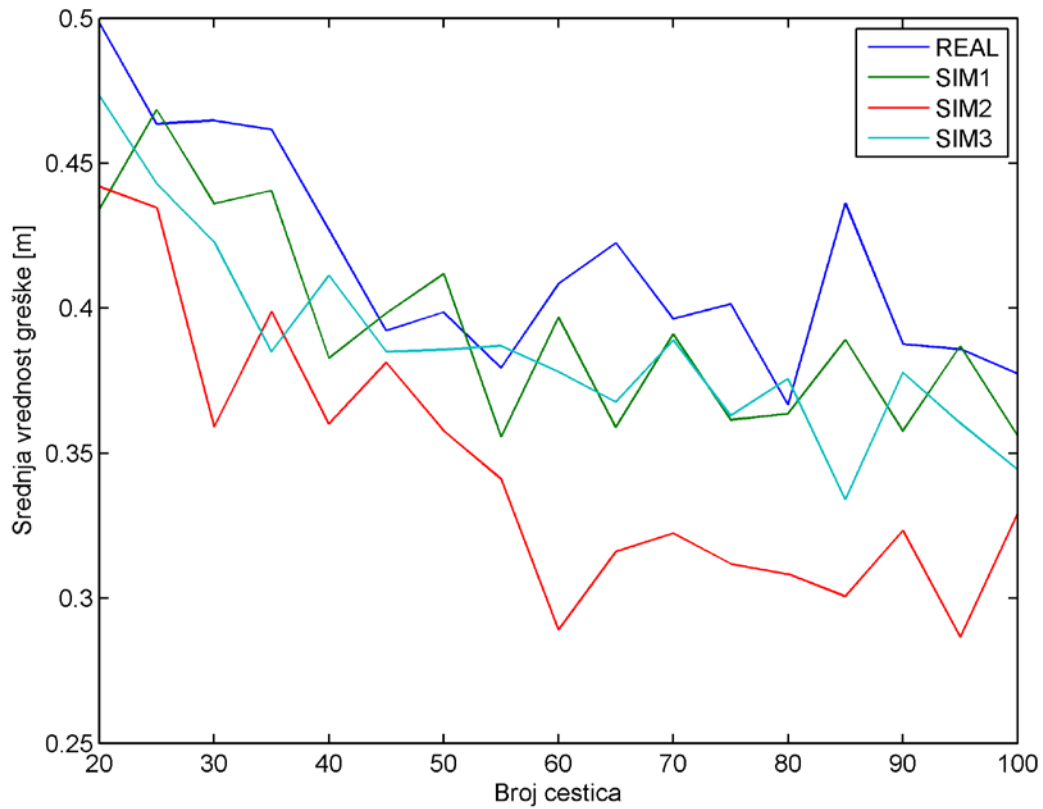
Tabela 11. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod optimizacije rojem čestica u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama za broj čestica $M=20$, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	1,63	1,55	0,84	0	4,51
	2	1,63	1,56	0,85	0,01	4,31
	3	1,63	1,55	0,81	0	3,76
Izmerene RSSI vrednosti		1,01	0,83	0,66	0,16	3,06

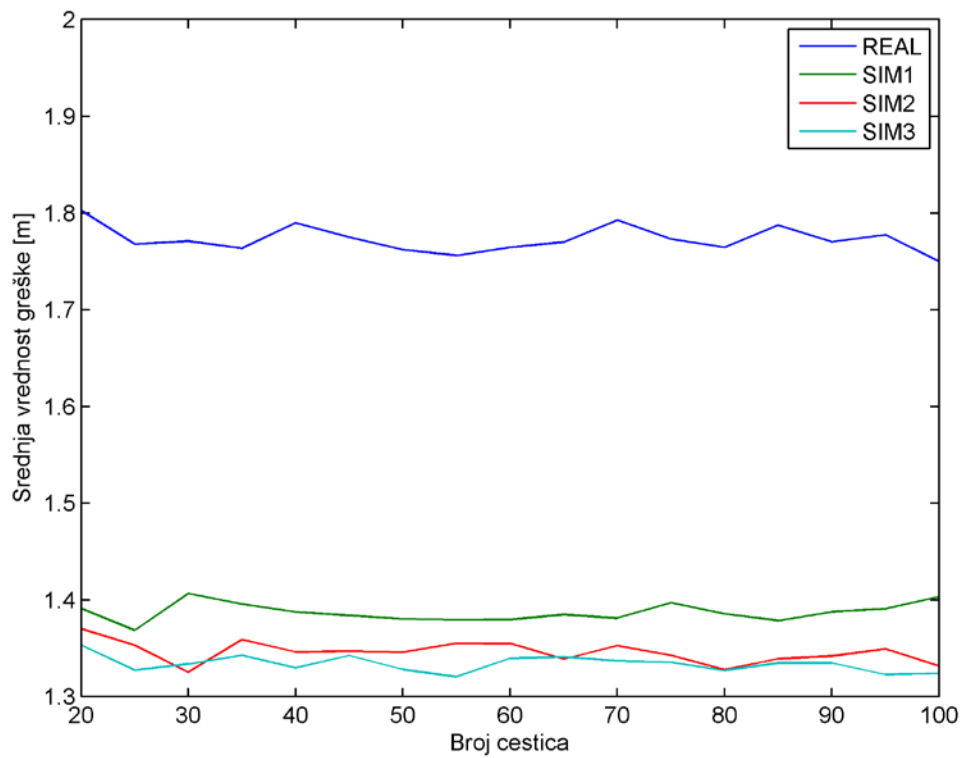
4.3.4.2 Primena metoda optimizacije rojem čestica u bežičnoj senzorskoj mreži

Kao i u RFID sistemu, metod optimizacije rojem čestica je testiran na uzorcima RSSI vrednosti izmerenim ili simuliranim u mernim tačkama, za koje postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi, BRPT i BSPT, kao i na uzorcima RSSI vrednosti izmerenim ili simuliranim u test tačkama, za koje ne postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi, BRNTR i BSNTR.

Kako bi se odredio optimalan broj čestica, i ovde je analizirana zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije u odnosu na broj čestica, što je prikazano na slici 40 za RSSI vrednosti izmerene ili simulirane u mernim tačkama i slici 41 za RSSI vrednosti izmerene ili simulirane u test tačkama. Na slici 40 se vidi da za merne tačke sa porastom broja čestica opada srednja vrednost greške lokalizacije, dok se na slici 41 vidi da je za test tačke razlika u srednjoj vrednosti greške u odnosu na korišćeni broj čestica neznatna. Analizom je ustanovljeno da se zadovoljavajući rezultati dobijaju za broj čestica $M=55$, budući da je na taj način i za merne i za test tačke obezbeđeno da razlika između srednje vrednosti greške i minimalne srednje vrednosti greške koja je dobijena u testiranjima u realnom sistemu bude u granicama od $|\varepsilon| < 0,01$ m. Dalje su prikazani rezultati za broj čestica $M=55$.



Slika 40. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja čestica za RSSI vrednosti u mernim tačkama u bežičnoj senzorskoj mreži



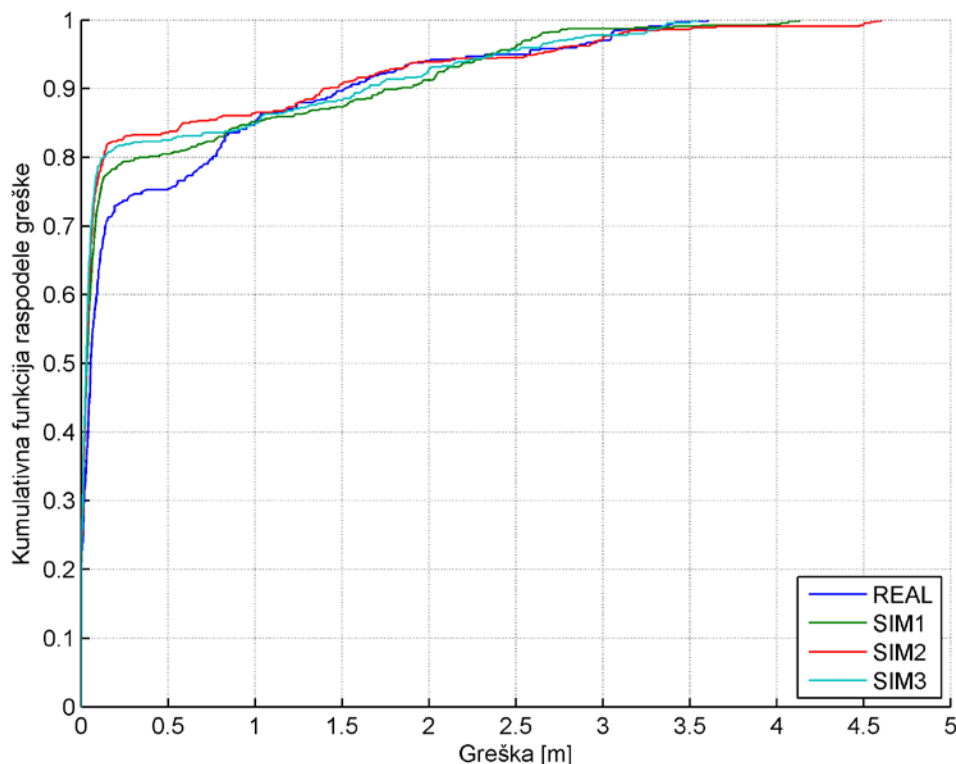
Slika 41. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja čestica za RSSI vrednosti u test tačkama u bežičnoj senzorskoj mreži

Tabela 12 prikazuje deskriptivne statističke pokazatelje izračunatih grešaka za uzorke BRPT i BSPT za broj suseda $M=55$, na osnovu kojih se vidi da je srednja vrednost greške u realnom sistemu 0,42 m, dok je kod simuliranih sistema unutar 0,39 m.

Slika 42 prikazuje kumulativnu funkciju raspodele greške, koja pokazuje da je u realnom sistemu moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 0,06 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,51 m sa verovatnoćom od 90%. Za simulirane sisteme moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,04 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,82 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 12. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod optimizacije rojem čestica u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama za broj čestica $M=55$, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	0,39	0,04	0,8	0	4,13
	2	0,35	0,03	0,83	0	4,6
	3	0,36	0,03	0,79	0	3,55
Izmerene RSSI vrednosti		0,42	0,06	0,77	0	3,61



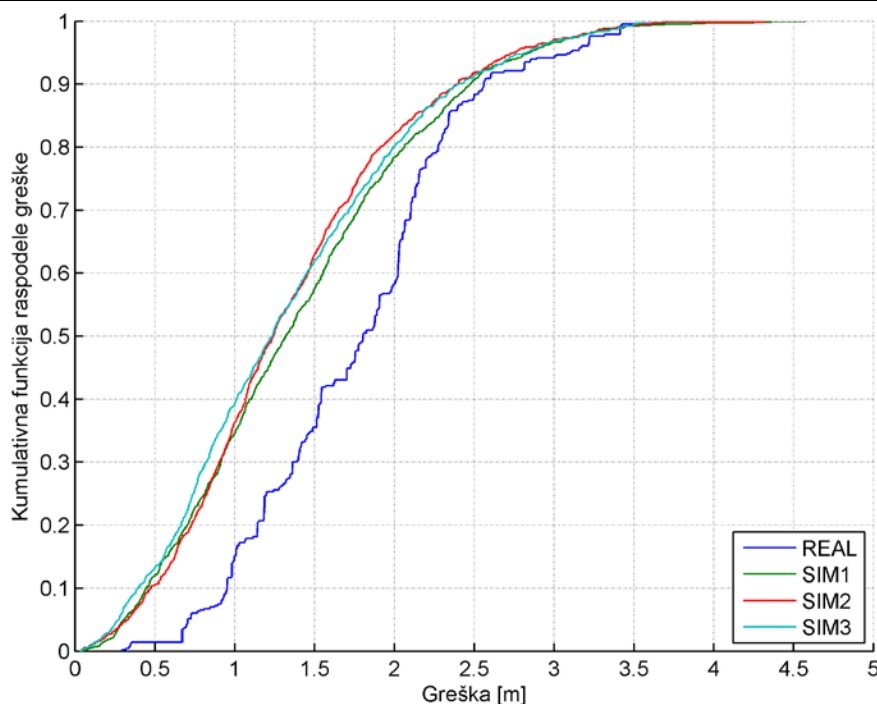
Slika 42. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod optimizacije rojem čestica u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, za broj čestica $M=55$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

Za proveru metoda za RSSI vrednosti izmerene u test tačkama, tabela 13 prikazuje deskriptivne statističke pokazatelje izračunatih grešaka za broj čestica $M=55$. Srednja vrednost greške u realnom sistemu je 1,01 m, dok je kod simuliranih sistema srednja vrednost greške 1,63 m.

Slika 43 prikazuje kumulativnu funkciju raspodele greške, na osnovu koje se vidi da je u realnom sistemu moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 1,8 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,56 m sa verovatnoćom od 90%. Za simulirane sisteme, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 1,32 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,49 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 13. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod optimizacije rojem čestica u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama za broj čestica $M=55$, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	1,41	1,32	0,78	0,04	4,57
	2	1,35	1,25	0,74	0,04	4,34
	3	1,34	1,24	0,77	0,04	3,87
Izmerene RSSI vrednosti		1,77	1,8	0,67	0,29	3,69



Slika 43. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod optimizacije rojem čestica u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama, za broj čestica $M=55$; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

4.3.5 Čestični filtar

Skup čestica za čestični filtar je formiran slučajnim odabiranjem tačkaka (čestica) u prostoru, sa uniformnom raspodelom. Broj čestica u skupu X_k u eksperimentima je postavljen na $M=1000$.

Verovatnoća da čestica $x^{[m]}$ bude uključena u skup čestica u narednoj iteraciji je predstavljena preko težinskog koeficijenta $w^{[m]}$, koji je za svaku česticu izračunat preko verovatnoće u susednim mernim tačkama (temenima kvadrata merne mreže, kao na slici 35), na način opisan u nastavku.

Kako bi se odredila verovatnoća merenja određenih RSSI vrednosti u temenu kvadrata, tražena je raspodela odstupanja izmerenih RSSI vrednosti u odnosu na srednju RSSI vrednost za sve merne tačke. Kako bi se utvrdila ova raspodela, prvo su za svaku mernu tačku izračunata odstupanja svih izmerenih RSSI vrednosti u odnosu na srednju RSSI vrednost u određenoj tački. Zatim je formiran histogram izračunatih odstupanja zbirno za sve merne tačke, čime je utvrđena raspodela mogućih odstupanja izmerenih RSSI vrednosti u odnosu na srednju vrednost koja je snimljena u RSSI mapi. Na osnovu formiranog histograma utvrđeno je da je raspodela normalna, sa parametrima $\mu = 0$ i $\sigma = 0,84$ za RFID sistem, odnosno $\mu = 0$ i $\sigma = 1,15$ za bežičnu senzorsku mrežu. Na osnovu ovih raspodela, za svako od temena kvadrata određena je verovatnoća da je trenutno izmerene RSSI vrednosti do svake od četiri referentne tačke moguće izmeriti u datoj mernoj tački (temenu kvadrata), a budući da su ove verovatnoće međusobno statistički nezavisne, ukupna verovatnoća da su sve četiri RSSI vrednosti izmerene u datoj mernoj tački (temenu kvadrata) je zatim izračunata kao proizvod dobijenih verovatnoća:

$$P(RSSI_{xy}) = \prod_{i=1}^4 P(RSSI_{ixy}), \quad (43)$$

gde se $RSSI_{xy}$ odnosi na $RSSI_{x^-y^+}$, $RSSI_{x^-y^-}$, $RSSI_{x^+y^+}$ i $RSSI_{x^+y^-}$, a $1 \leq i \leq 4$ na RSSI vrednost izmerenu do i -te referentne tačke.

Verovatnoća da merenje RSSI vrednosti za poziciju čestice $x^{[m]}$ bude jednako merenju RSSI vrednosti u susednoj mernoj tački predstavljena je preko parametara a i b (slika 35), tako da je:

$$\begin{aligned}
P(RSSI = RSSI_{x^-y^+}) &= (1 - a) \cdot (1 - b), \\
P(RSSI = RSSI_{x^-y^-}) &= (1 - a) \cdot b, \\
P(RSSI = RSSI_{x^+y^+}) &= a \cdot (1 - b), \\
P(RSSI = RSSI_{x^+y^-}) &= a \cdot b,
\end{aligned} \tag{44}$$

a zatim je ukupni težinski koeficijent $w^{[m]}$ za česticu $x^{[m]}$ izračunat preko pravila totalne verovatnoće, kao:

$$w^{[m]} = \sum_4 P(RSSI_{xy}) \cdot P(RSSI = RSSI_{xy}), \tag{45}$$

a zatim normalizovan:

$$w^{[m]} = \frac{w^{[m]}}{\sum_{m=1}^M w^{[m]}}. \tag{46}$$

Dakle, verovatnoća da čestica bude uključena u skupu čestica X_{k+1} je veća ukoliko je veća i verovatnoća da su trenutno izmerene RSSI vrednosti izmerene u okolini trenutno pretpostavljene pozicije čestice.

Kada su određeni težinski koeficijenti, novi skup čestica se formira tako da se svaka čestica pojavljuje u novom skupu sa verovatnoćom $w^{[m]}$. Izbor čestica je realizovan na sledeći način, predložen u [101]. Sve čestice su raspoređene u krugu sa vrednostima u intervalu $[0,1]$, tako da svaka čestica zauzima onoliki interval (deo kruga) koliki joj je težinski koeficijent dodeljen. Odabira se jedan slučajan realni broj β u intervalu $0 < \beta < 2 \cdot w_{max}$, gde je w_{max} najveći težinski koeficijent u iteraciji k , i jedan slučajan ceo broj i u intervalu $[0, M]$. Zatim se odabira čestica $x^{[i]}$ na osnovu odabranog slučajnog broja i , i proverava se da li je $w^{[i]} > \beta$. Ukoliko jeste, čestica $x^{[i]}$ se priključuje skupu X_{k+1} . Ukoliko je težinski koeficijent $w^{[i]}$ manji od β , β se smanjuje za $w^{[i]}$, a i se povećava za jedan. Na ovaj način, svaka čestica biva odabrana tako da se u novom skupu X_{k+1} pojavljuje srazmerno svojoj verovatnoći, odnosno težinskom koeficijentu $w^{[m]}$.

Kod čestičnog filtra, ukoliko su uzastopna merenja veoma slična može doći do smanjenja skupa čestica na svega jednu ili nekoliko čestica (mogućih stanja sistema). Ovo se može desiti ukoliko se merenja vrše suviše često, ili ukoliko se predmet određeno vreme ne kreće kroz prostor. Za prvi slučaj moguće je vršiti merenja u većem vremenskom intervalu,

međutim za drugi slučaj ovo ne bi donelo rezultate, i skup čestica bi se nakon nekoliko iteracija suviše smanjio, i kasnije ne bi mogao da predstavi nastale promene. Kako bi se ovo predupredilo, postavljena je provera varijanse za čestice u trenutnom skupu. U eksperimentima je proveravana varijansa težinskih koeficijenata $w^{[m]}$, pri čemu je granica varijanse postavljena na 10^{-6} .

Kako kretanje predmeta u prostoru nije poznato, česticama se u svakom trenutku dodeljuju slučajne brzine kretanja tako da se čestica između dva merna trenutka može pomeriti maksimalno 0,5 m.

4.3.5.1 Primena čestičnog filtra u RFID sistemu

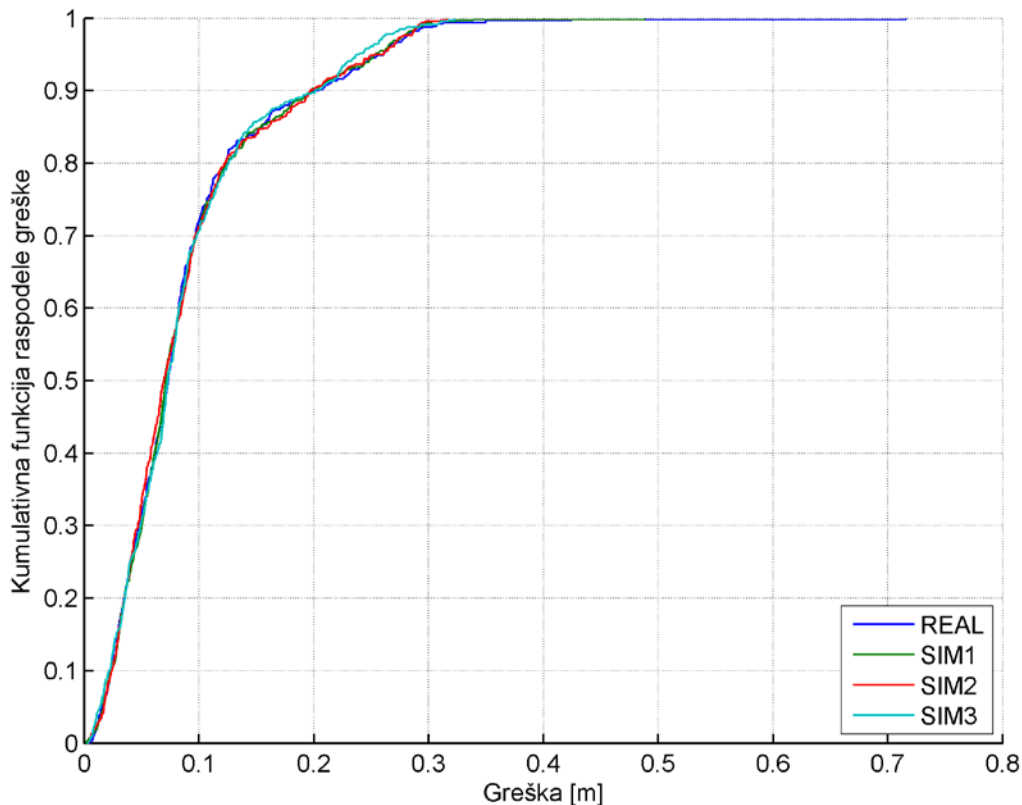
Čestični filtar je primenjen na uzorcima RRPT i RSPT, za RSSI vrednosti u mernim tačkama za koje postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi, kao i na uzorcima RRNTR i RSNTR, za vrednosti izmerene ili simulirane u test tačkama za koje ne postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi, a budući da je ovo metod koji se odnosi i na praćenje putanje predmeta, primenjen je i na uzorku RRNTP, koji sadrži RSSI vrednosti snimljene duž dve putanje u mernom prostoru.

Tabela 14 prikazuje deskriptivne statističke pokazatelje izračunatih grešaka za uzorke RRPT i RSPT, na osnovu kojih se vidi da je srednja vrednost greške i u realnom sistemu i u simuliranim sistemima 0,09 m.

Kumulativna funkcija raspodele greške je prikazana na slici 44, i pokazuje da je i u realnom sistemu i u simuliranim sistemima moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 0,07 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,2 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 14. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za čestični filtar u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	0,09	0,07	0,07	0	0,49
	2	0,09	0,07	0,07	0	0,32
	3	0,09	0,07	0,07	0	0,32
Izmerene RSSI vrednosti		0,09	0,07	0,07	0	0,72



Slika 44. Kumulativna funkcija raspodele greške za čestični filter u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

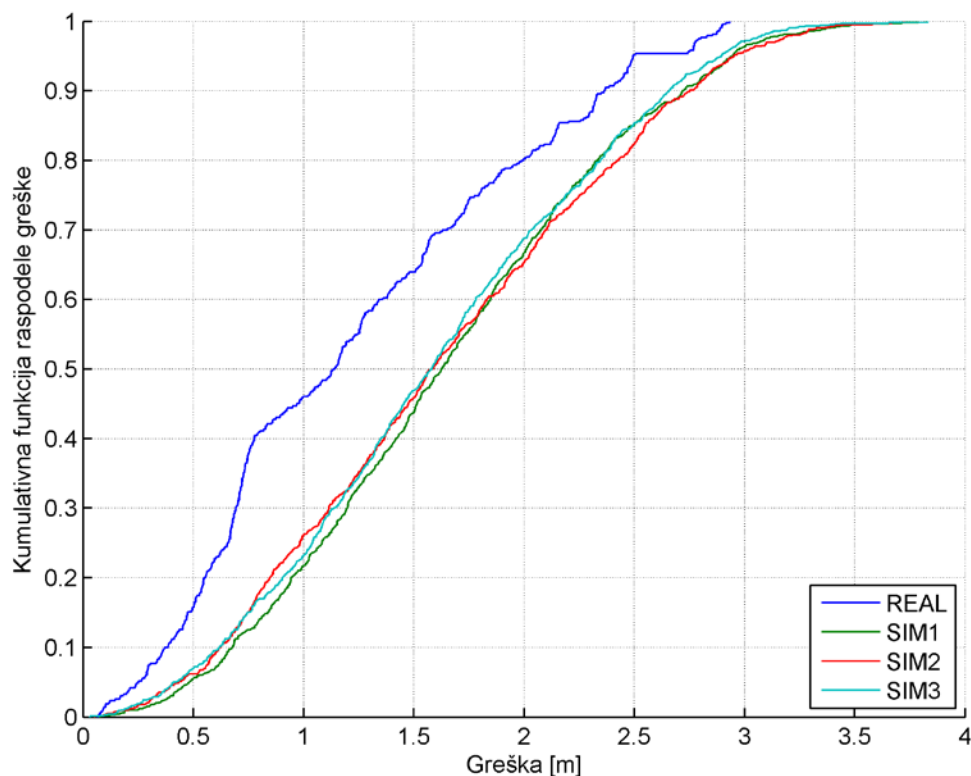
Za test tačke, odnosno uzorke RRNTR, RRNTP i RSNTR, tabela 15 daje deskriptivne statističke pokazatelje izračunatih grešaka. Srednja vrednost greške u realnom sistemu je 1,24 m za vrednosti u slučajno raspoređenim tačkama (R), dok je za uzorak za putanju 1 (P1) srednja vrednost 0,63 m, a za putanju 2 (P2) je 1,35 m. Kod simuliranih sistema, srednja vrednost greške je unutar 1,66 m.

Na slici 45 prikazana je kumulativna funkcija raspodele greške za simulirane sisteme i slučajno raspoređene test tačke u realnom sistemu, na osnovu koje se vidi da je u simuliranim sistemima moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 1,63 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,75 m sa verovatnoćom od 90%, dok je za slučajno raspoređene test tačke u realnom sistemu moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 1,14 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,36 m sa verovatnoćom od 90%. Kako bi se prikazala preciznost sistema duž putanje kretanja predmeta, na slici 46 je prikazana kumulativna funkcija raspodele greške za tri slučaja u realnom sistemu, kada su test tačke slučajno raspoređene u prostoru (R) i kada su postavljene duž dve različite putanje (P1 i P2). Na ovoj slici se vidi da je u slučaju putanje

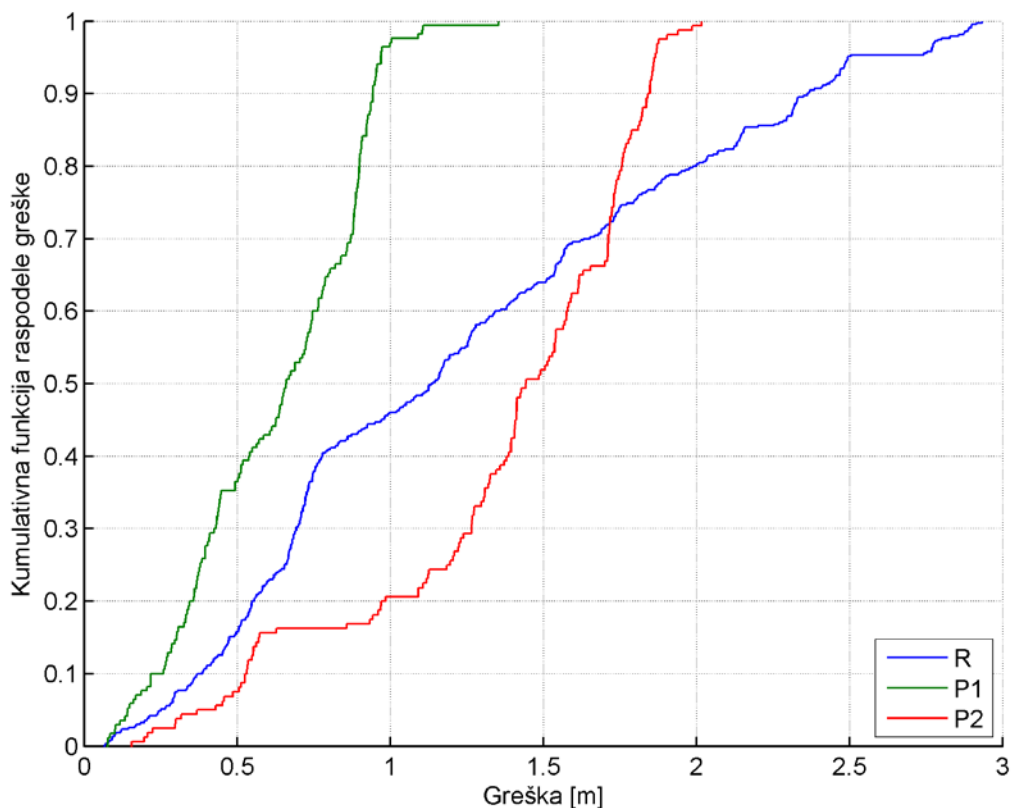
1 moguće odrediti poziciju predmeta unutar 0,66 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,94 m sa verovatnoćom od 90%. Za putanju 2, moguće je odrediti poziciju predmeta unutar 1,44 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,84 m sa verovatnoćom od 90%. Sporam slučajno raspoređenih test tačaka, vidi se da je u slučaju test tačaka na putanji smanjena maksimalna greška lokalizacije, kao i greška pri verovatnoći od 90%.

Tabela 15. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za čestični filtar u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	1,66	1,63	0,75	0,08	3,82
	2	1,64	1,59	0,8	0,05	3,72
	3	1,61	1,58	0,76	0,03	3,83
Izmerene RSSI vrednosti	R	1,24	1,14	0,75	0,07	2,93
	P1	0,63	0,66	0,28	0,08	1,35
	P2	1,35	1,44	0,47	0,16	2,02



Slika 45. Kumulativna funkcija raspodele greške za čestični filtar u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u slučajno raspoređenim test tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema



Slika 46. Kumulativna funkcija raspodele greške za čestični filter u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u različitim uzorcima test tačkama u realnom sistemu; R – RSSI vrednosti izmerene u slučajno raspoređenim test tačkama, P1, P2 –RSSI vrednosti izmerene u test tačkama duž putanje kretanja proizvoda

4.3.5.2 Primena čestičnog filtra u bežičnoj senzorskoj mreži

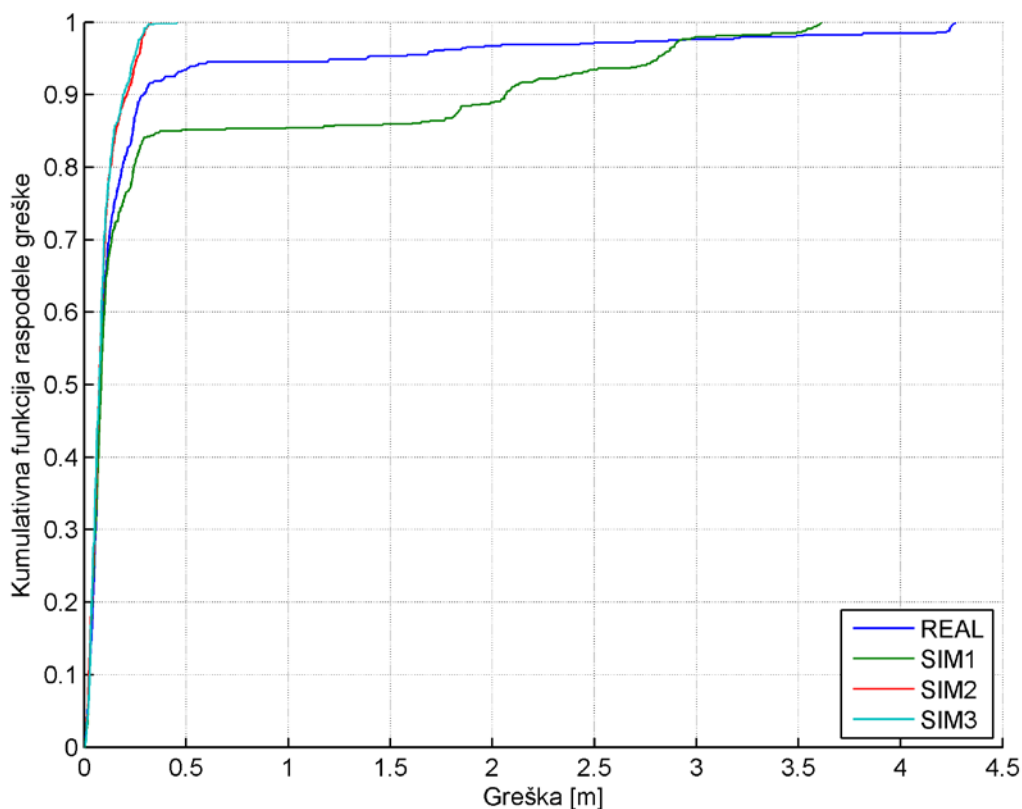
Kao i u RFID sistemu, i u bežičnoj senzorskoj mreži čestični filter je primenjen na uzorcima BRPT i BSPT, za RSSI vrednosti u mernim tačkama za koje postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi, kao i na uzorcima BRNTR, BRNTP i BSNTR, za vrednosti izmerene ili simulirane u slučajno raspoređenim test tačkama i test tačkama duž dve putanje, za koje ne postoje snimljene vrednosti u RSSI mapi.

Tabela 16 prikazuje deskriptivne statističke pokazatelje izračunatih grešaka za uzorke u mernim tačkama, BRPT i BSPT, na osnovu kojih se vidi da je srednja vrednost greške i u realnom sistemu i u simuliranim sistemima 0,09 m.

Kumulativna funkcija raspodele greške je prikazana na slici 47, i pokazuje da je i u realnom sistemu i u simuliranim sistemima moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 0,08 m sa verovatnoćom od 50%, dok je u realnom sistemu moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 0,29 m sa verovatnoćom od 90%, a u simuliranim sistemima unutar 2,06 m.

Tabela 16. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za čestični filter u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	0,44	0,08	0,87	0	3,61
	2	0,09	0,07	0,07	0	0,31
	3	0,09	0,07	0,07	0	0,45
Izmerene RSSI vrednosti		0,25	0,08	0,67	0	4,27



Slika 47. Kumulativna funkcija raspodele greške za čestični filter u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

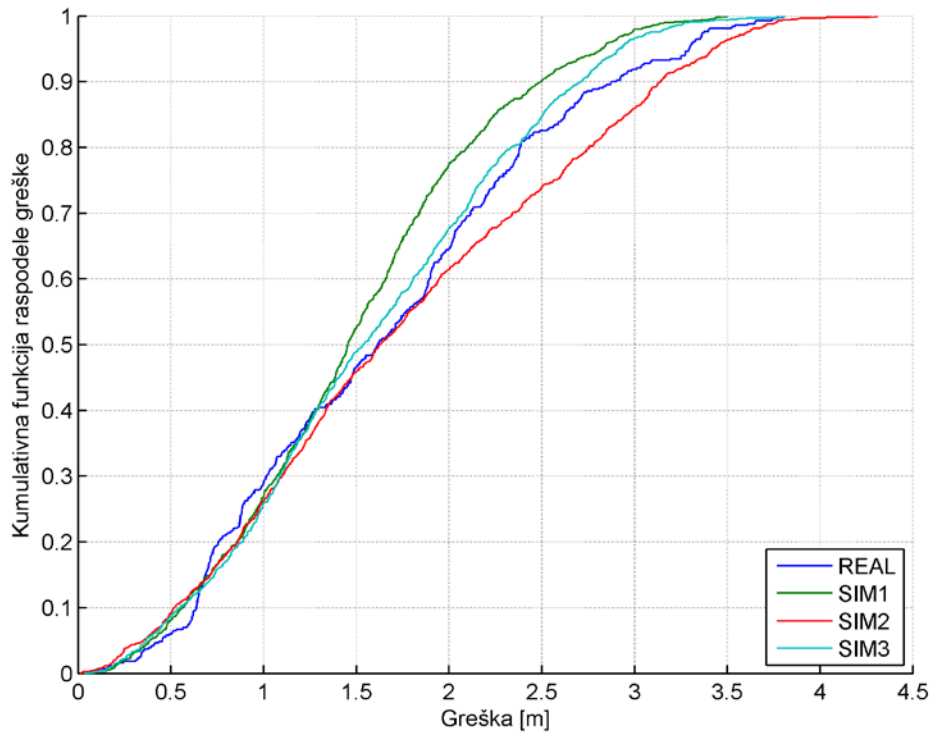
Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za uzorke BRNTR, BRNTP i BSNTR su dati u tabeli 17. Srednja vrednost greške u realnom sistemu za vrednosti u slučajno raspoređenim tačkama (R) je 1,65 m, dok je za putanju 1 (P1) srednja vrednost 1,26 m, a za putanju 2 (P2) 1,86 m. Kod simuliranih sistema, srednja vrednost greške je unutar 1,76 m.

Na slici 48 prikazana je kumulativna funkcija raspodele greške za simulirane sisteme i slučajno raspoređene test tačke u realnom sistemu, na osnovu koje se vidi da je u

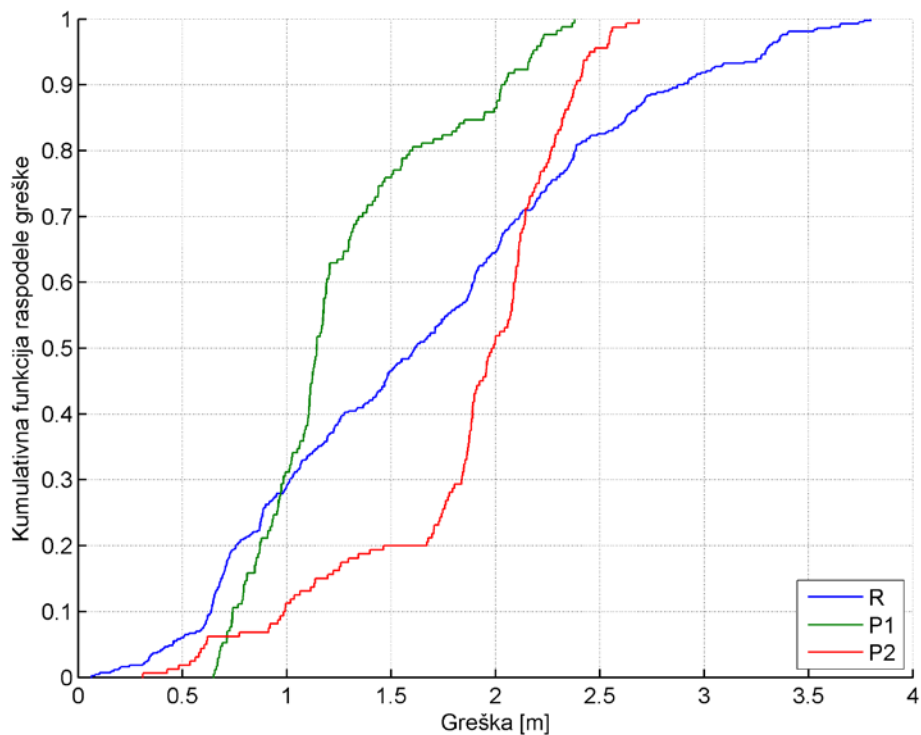
simuliranim sistemima moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 1,63 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 3,13 m sa verovatnoćom od 90%, dok je za slučajno raspoređene test tačke u realnom sistemu moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 1,61 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,87 m sa verovatnoćom od 90%. Slika 49 prikazuje kumulativnu funkciju raspodele greške za tri slučaja u realnom sistemu, kada su test tačke slučajno raspoređene u prostoru (R) i kada su postavljene duž dve različite putanje (P1 i P2). Vidi se da je u slučaju putanje 1 moguće odrediti poziciju predmeta unutar 1,14 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,03 m sa verovatnoćom od 90%, a za putanju 2, unutar 1,99 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,38 m sa verovatnoćom od 90%. Kao i u slučaju RFID sistema, i u bežičnoj senzorskoj mreži se pokazuje da je u slučaju test tačaka duž putanja smanjena maksimalna greška lokalizacije, kao i greška pri verovatnoći od 90%, u odnosu na slučajno raspoređene test tačke.

Tabela 17. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za čestični filter u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	1,49	1,45	0,71	0,05	3,5
	2	1,76	1,63	0,97	0,02	4,31
	3	1,6	1,54	0,79	0,04	3,81
Izmerene RSSI vrednosti	R	1,65	1,61	0,87	0,06	3,8
	P1	1,26	1,14	0,45	0,65	2,38
	P2	1,86	1,99	0,53	0,31	2,69



Slika 48. Kumulativna funkcija raspodele greške za čestični filter u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u slučajno raspoređenim test tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema



Slika 49. Kumulativna funkcija raspodele greške za čestični filter u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u različitim uzorcima test tačaka u realnom sistemu; R – RSSI vrednosti izmerene u slučajno raspoređenim test tačkama, P1, P2 –RSSI vrednosti izmerene u test tačkama duž putanje kretanja proizvoda

4.4 Druga faza istraživanja

U okviru druge faze istraživanja, ispitivan je hibridni metod za lokalizaciju proizvoda, koji je predložen u okviru modela MLPIS za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari. Eksperiment je vršen nad istim RSSI podacima prikupljenim u test laboratoriji i simuliranim RSSI podacima kao u prvoj fazi istraživanja, kako bi se utvrdila opravdanost korišćenja predloženog metoda u odnosu na metode ispitane u prvoj fazi istraživanja. Metod koji je predložen sastoji se prvenstveno u fuziji podataka dobijenih primenom metoda najbližih suseda i metoda optimizacije rojem čestica, kako bi se iskoristile prednosti svakog od ovih metoda. Fuzija podataka se vrši primenom čestičnog filtra, koji kao ulaz koristi izlazne koordinate iz metoda najbližih suseda i metoda optimizacije rojem čestica. Ovaj deo metoda nazvan je PF_WKNN_PSO. Zatim, metod uključuje i fuziju podataka dobijenih primenom RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža, takođe primenom čestičnog filtra, koji kao ulaz koristi koordinate izračunate metodom PF_WKNN_PSO, dobijene fuzijom podataka iz metoda najbližih suseda i metoda optimizacije rojem čestica posebno za RFID sistem i za bežičnu senzorsku mrežu. Ovaj deo metoda nazvan je PF_RFID_WSN.

4.4.1 Realizacija hibridnih metoda za lokalizaciju proizvoda predloženih u okviru modela MLPIS

U okviru modela MLPIS predložena su dva hibridna metoda, metod PF_WKNN_PSO koji primenom čestičnog filtra vrši fuziju podataka dobijenih metodom najbližih suseda i metodom optimizacije rojem čestica u slučaju kada se za lokalizaciju primenjuje samo RFID tehnologija ili bežična senzorska mreža, i metod PF_RFID_WSN koji kombinuje ove dve tehnologije, odnosno primenjuje čestični filter za fuziju podataka dobijenih metodom PF_WKNN_PSO za svaku tehnologiju pojedinačno. U nastavku će biti dati detalji realizacije ova dva metoda, uz navedene eksperimentalne rezultate dobijene primenom ovih metoda u simuliranim sistemima i u test laboratoriji.

4.4.1.1 Metod PF_WKNN_PSO – Fuzija podataka dobijenih metodom najbližih suseda i metodom optimizacije rojem čestica

Prvi deo metoda za lokalizaciju proizvoda koji je predložen u okviru modela MLPIS za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari zasniva se na primeni čestičnog filtra na izlaznim koordinatama dobijenim metodima najbližih suseda i optimizacije rojem čestica, odnosno primeni metoda PF_WKNN_PSO. Načini implementacije metoda najbližih suseda i optimizacije rojem čestica detaljno su prikazani u poglavljima 4.3.3 i 4.3.4. Ovi metodi kao izlazne podatke daju procenu koordinata pozicije proizvoda u prostoru, uz određenu grešku, čija kumulativna funkcija raspodele je prikazana na slikama 29 i 30 za RFID sistem i slikama 33 i 34 za bežičnu senzorsku mrežu za metod najbližih suseda, kao i na slikama 38 i 39 za RFID sistem i slikama 42 i 43 za bežičnu senzorsku mrežu za metod optimizacije rojem čestica. Na osnovu ovih kumulativnih funkcija raspodele, određene su verovatnoće da se stvarna pozicija proizvoda nalazi na rastojanju do 0,5 m, od 0,5 do 1 m, od 1 do 1,5 m, od 1,5 do 2 m, od 2 do 2,5 m, od 2,5 do 3 m i od 3 do 3,5 m od procenjenih koordinata, i za RFID sistem i za bežičnu senzorsku mrežu, za oba metoda, kako za merne tačke, tako i za test tačke. Dobijeni parametri su prikazani u tabelama 18 i 19.

Tabela 18. Verovatnoća da se stvarna pozicija proizvoda nalazi na rastojanju d od koordinata dobijenih primenom metoda najbližih suseda

	Realni sistem				Simulirani sistem			
	RFID sistem		Bežična senzorska mreža		RFID sistem		Bežična senzorska mreža	
	Merne tačke	Test tačke	Merne tačke	Test tačke	Merne tačke	Test tačke	Merne tačke	Test tačke
$d < 0,5$ m	0,97	0,42	0,53	0,1	0,82	0,11	0,65	0,13
$0,5$ m $< d < 1$ m	0,03	0,43	0,34	0,12	0,16	0,24	0,28	0,37
1 m $< d < 1,5$ m	0	0,08	0,08	0,34	0,02	0,38	0,06	0,35
$1,5$ m $< d < 2$ m	0	0,07	0,04	0,22	0	0,21	0,01	0,11
2 m $< d < 2,5$ m	0	0	0,01	0,19	0	0,06	0	0,03
$2,5$ m $< d < 3$ m	0	0	0	0,03	0	0	0	0,01
3 m $< d < 3,5$ m	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 19. Verovatnoća da se stvarna pozicija proizvoda nalazi na rastojanju d od koordinata dobijenih primenom metoda optimizacije rojem čestica

	Realni sistem				Simulirani sistem			
	RFID sistem		Bežična senzorska mreža		RFID sistem		Bežična senzorska mreža	
	Merne tačke	Test tačke	Merne tačke	Test tačke	Merne tačke	Test tačke	Merne tačke	Test tačke
$d < 0,5 \text{ m}$	0,98	0,23	0,75	0,01	0,75	0,08	0,84	0,11
$0,5 \text{ m} < d < 1 \text{ m}$	0,01	0,42	0,1	0,14	0,04	0,2	0,03	0,25
$1 \text{ m} < d < 1,5 \text{ m}$	0,01	0,08	0,05	0,21	0,04	0,19	0,04	0,27
$1,5 \text{ m} < d < 2 \text{ m}$	0	0,19	0,04	0,23	0,05	0,21	0,03	0,19
$2 \text{ m} < d < 2,5 \text{ m}$	0	0,04	0,01	0,29	0,04	0,13	0,01	0,1
$2,5 \text{ m} < d < 3 \text{ m}$	0	0,04	0,02	0,06	0,05	0,12	0,02	0,05
$3 \text{ m} < d < 3,5 \text{ m}$	0	0	0,03	0,06	0,03	0,07	0,03	0,03

Kada su metodima najbližih suseda i optimizacije rojem čestica dobijene procene pozicije proizvoda u prostoru, za fuziju dobijenih podataka predlaže se primena čestičnog filtra. Osim što vrši fuziju podataka, čestični filter takođe obezbeđuje i praćenje prethodnih stanja sistema, odnosno prethodnih pozicija proizvoda u prostoru. Broj čestica u skupu X_k za čestični filter je postavljen na $M=1000$, a čestice su inicijalno nasumično postavljene u prostoru, sa uniformnom raspodelom. Težinski koeficijent $w^{[m]}$ za svaku česticu $x^{[m]}$, $1 \leq m \leq M$, odnosno verovatnoća da čestica $x^{[m]}$ bude uključena u skup čestica u narednoj iteraciji X_{k+1} izračunava se na osnovu verovatnoće da se stvarne koordinate pozicije proizvoda nalaze na rastojanju na kom se čestica $x^{[m]}$ nalazi od procenjenih pozicija proizvoda. Ova verovatnoća se dobija posebno za metod najbližih suseda kao težinski koeficijent $w_{WKN}^{[m]}$ i za metod optimizacije rojem čestica kao težinski koeficijent $w_{PSO}^{[m]}$, na osnovu parametara datih u tabelama 18 i 19, a ukupan težinski koeficijent se zatim izračunava kao:

$$w^{[m]} = w_{WKN}^{[m]} \cdot w_{PSO}^{[m]}. \quad (47)$$

Kako nije moguće znati da li se proizvod u datom trenutku nalazi na nekoj od mernih tačaka ili ne, uzimaju se vrednosti za merne i test tačke u određenom odnosu verovatnoće da

se proizvod nalazi ili ne nalazi na poziciji neke od mernih tačaka, tako da parametri iz tabela 18 i 19 učestvuju u težinskim koeficijentima $w_{WKNN}^{[m]}$ i $w_{PSO}^{[m]}$ proporcionalno odabranom odnosu, po pravilu totalne verovatnoće:

$$\begin{aligned} w_{WKNN}^{[m]} &= w_{WKNN_MT}^{[m]} \cdot P_{MT} + w_{WKNN_TT}^{[m]} \cdot (1 - P_{MT}), \\ w_{PSO}^{[m]} &= w_{PSO_MT}^{[m]} \cdot P_{MT} + w_{PSO_TT}^{[m]} \cdot (1 - P_{MT}), \end{aligned} \quad (48)$$

gde je P_{MT} verovatnoća da se proizvod nalazi na poziciji neke od mernih tačaka, $w_{WKNN_MT}^{[m]}$ je parametar verovatnoće za metod najbližih suseda za merne tačke, $w_{WKNN_TT}^{[m]}$ je parametar verovatnoće za metod najbližih suseda za test tačke, $w_{PSO_MT}^{[m]}$ je parametar verovatnoće za metod optimizacije rojem čestica za merne tačke, a $w_{PSO_TT}^{[m]}$ je parametar verovatnoće za metod optimizacije rojem čestica za test tačke. U eksperimentima su testirane različite varijante odnosa verovatnoće da se proizvod nalazi i ne nalazi na poziciji merne tačke, pri čemu su uzete vrednosti iz skupa $P_{MT} = \{0,1, 0,25, 0,5, 0,75, 0,9\}$. Testirana je varijanta u kojoj se koriste parametri dobijeni u simuliranim sistemima, kao i varijanta u kojoj se koriste parametri dobijeni sa realno merenim RSSI vrednostima u test laboratoriji. Parametri iz simuliranih sistema su značajni za slučaj kada nije moguće vršiti kalibraciju metoda za određeni sistem, dok se parametri iz realnog sistema mogu primeniti nakon inicijalne kalibracije metoda, primenom metoda najbližih suseda i optimizacije rojem čestica za lokalizaciju proizvoda u određenom broju tačaka i analizom dobijenih grešaka lokalizacije. Kada su određeni svi težinski koeficijenti $w^{[m]}$, normiraju se kao u jednačini (46), a zatim se novi skup čestica formira tako da se svaka čestica pojavljuje u novom skupu sa verovatnoćom $w^{[m]}$, na način koji je opisan za primenu čestičnog filtra u poglavlju 4.3.5. Kako ne bi došlo do osiromašenja uzorka čestica, postavljena je granica za varijansu težinskih koeficijenata na 10^{-8} , i novi skup čestica se uzorkuje jedino kada je varijansa trenutnog skupa čestica veća od postavljene granice.

Kao i kod primene običnog čestičnog filtra (poglavlje 4.3.5), budući da kretanje proizvoda u prostoru nije poznato, česticama se u svakom trenutku dodeljuju slučajne brzine kretanja tako da se čestica između dva merna trenutka može pomeriti za maksimalno 0,5 m.

4.4.1.1.1 Primena metoda PF_WKNN_PSO u RFID sistemu

Predloženi metod PF_WKNN_PSO za fuziju podataka dobijenih metodom najbližih suseda i optimizacijom rojem čestica primenjen je na uzorcima RRPT i RSPT, za RSSI vrednosti izmerene ili simulirane u mernim tačkama, kao i na uzorcima RRNTR, RRNTP i RSNTR, za RSSI vrednosti izmerene ili simulirane u test tačkama. Metod je testiran sa parametrima verovatnoće koji su dobijeni na osnovu reprezentativnih merenja u realnom sistemu, kao i na osnovu parametara verovatnoće koji su dobijeni na osnovu simuliranih sistema, koji su prikazani u tabelama 18 i 19. Prvo će biti prikazani rezultati dobijeni na osnovu merenja u realnom sistemu, a zatim na osnovu simuliranih sistema.

U tabeli 20 prikazani su deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u RFID sistemu, za RSSI vrednosti izmerene ili simulirane u mernim tačkama, za sve testirane varijante, odnosno za sve vrednosti iz skupa $P_{MT} = \{0,1, 0,25, 0,5, 0,75, 0,9\}$, sa parametrima verovatnoće dobijenih na osnovu merenja u realnom sistemu. Radi bolje preglednosti tabele, za simulirane sisteme su date maksimalne vrednosti za sva tri simulirana sistema. Kao što je i očekivano za uzorke RRPT i RSPT, za RSSI vrednosti izmerene ili simulirane u mernim tačkama, greška lokalizacije opada kako se verovatnoća da se proizvod nalazi u nekoj od mernih tačaka P_{MT} povećava, i najbolji rezultati i za simulirane sisteme i za realni sistem se dobijaju za $P_{MT} = 0,9$.

Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za metod PF_WKNN_PSO u RFID sistemu za RSSI vrednosti izmerene ili simulirane u test tačkama prikazani su u tabeli 21, za sve testirane varijante, odnosno za sve vrednosti iz skupa $P_{MT} = \{0,1, 0,25, 0,5, 0,75, 0,9\}$, sa parametrima verovatnoće dobijenih na osnovu merenja u realnom sistemu. Kao i u tabeli 20, i ovde su radi preglednosti dati maksimalni dobijeni rezultati za sva tri simulirana sistema, a za realni sistem samo rezultati dobijeni za uzorak RRNTR. Na osnovu dobijenih rezultata, vidi se da kod test tačaka nema velike razlike u dobijenim vrednostima parametara greške lokalizacije u zavisnosti od parametra P_{MT} , s tim što postoji mali porast maksimalne greške sa porastom parametra P_{MT} .

Analogno eksperimentima sa parametrima verovatnoće dobijenih na osnovu merenja u realnom sistemu, izvršeni su i eksperimenti sa parametrima verovatnoće dobijenim na osnovu simuliranih sistema, a odgovarajući parametri greške lokalizacije za RSSI vrednosti u mernim i u test tačkama su dati respektivno u tabelama 22 i 23. Značajno je primetiti da su

Tabela 20. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za predloženi metod PF_WKNN_PSO u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu merenja u realnom sistemu, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
$P_{MT} = 0,1$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,55	0,52	0,26	0,04	1,76
Izmerene RSSI vrednosti	0,38	0,39	0,13	0,02	0,72
$P_{MT} = 0,25$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,41	0,35	0,27	0,01	1,7
Izmerene RSSI vrednosti	0,22	0,21	0,12	0,01	0,67
$P_{MT} = 0,5$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,33	0,24	0,27	0,01	1,65
Izmerene RSSI vrednosti	0,17	0,17	0,1	0	0,5
$P_{MT} = 0,75$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,31	0,23	0,25	0,02	1,48
Izmerene RSSI vrednosti	0,16	0,16	0,09	0,01	0,5
$P_{MT} = 0,9$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,28	0,22	0,21	0,02	1,38
Izmerene RSSI vrednosti	0,16	0,16	0,09	0	0,55

Tabela 21. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu merenja u realnom sistemu, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
$P_{MT} = 0,1$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,19	1,21	0,48	0,07	2,59
Izmerene RSSI vrednosti	0,76	0,72	0,44	0,01	2,46
$P_{MT} = 0,25$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,17	1,2	0,48	0,09	2,65
Izmerene RSSI vrednosti	0,74	0,69	0,44	0,04	2,5
$P_{MT} = 0,5$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,16	1,2	0,48	0,09	2,68
Izmerene RSSI vrednosti	0,74	0,65	0,45	0,09	2,52
$P_{MT} = 0,75$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,16	1,18	0,48	0,07	2,74
Izmerene RSSI vrednosti	0,77	0,67	0,46	0,07	2,51
$P_{MT} = 0,9$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,14	1,15	0,48	0,05	2,75
Izmerene RSSI vrednosti	0,77	0,68	0,45	0,04	2,57

Tabela 22. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu simuliranih sistema, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
$P_{MT} = 0,1$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,2	1,22	0,36	0,23	1,95
Izmerene RSSI vrednosti	1,02	1,05	0,25	0,27	1,59
$P_{MT} = 0,25$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,47	0,38	0,33	0,02	1,82
Izmerene RSSI vrednosti	0,28	0,26	0,15	0,02	1,22
$P_{MT} = 0,5$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,28	0,22	0,21	0,02	1,36
Izmerene RSSI vrednosti	0,17	0,16	0,1	0	0,95
$P_{MT} = 0,75$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,27	0,22	0,2	0,01	1,25
Izmerene RSSI vrednosti	0,16	0,16	0,09	0	0,59
$P_{MT} = 0,9$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,25	0,21	0,18	0,01	1,2
Izmerene RSSI vrednosti	0,16	0,16	0,09	0	0,49

Tabela 23. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu simuliranih sistema, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
$P_{MT} = 0,1$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,27	1,28	0,53	0,05	3,08
Izmerene RSSI vrednosti	1,03	0,96	0,37	0,27	2,14
$P_{MT} = 0,25$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,24	1,27	0,49	0,09	2,63
Izmerene RSSI vrednosti	0,91	0,83	0,51	0,05	2,71
$P_{MT} = 0,5$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,21	1,23	0,48	0,04	2,55
Izmerene RSSI vrednosti	0,84	0,77	0,5	0,04	2,66
$P_{MT} = 0,75$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,18	1,2	0,48	0,13	2,64
Izmerene RSSI vrednosti	0,8	0,72	0,47	0,02	2,67
$P_{MT} = 0,9$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,17	1,2	0,48	0,12	2,62
Izmerene RSSI vrednosti	0,8	0,71	0,47	0,03	2,65

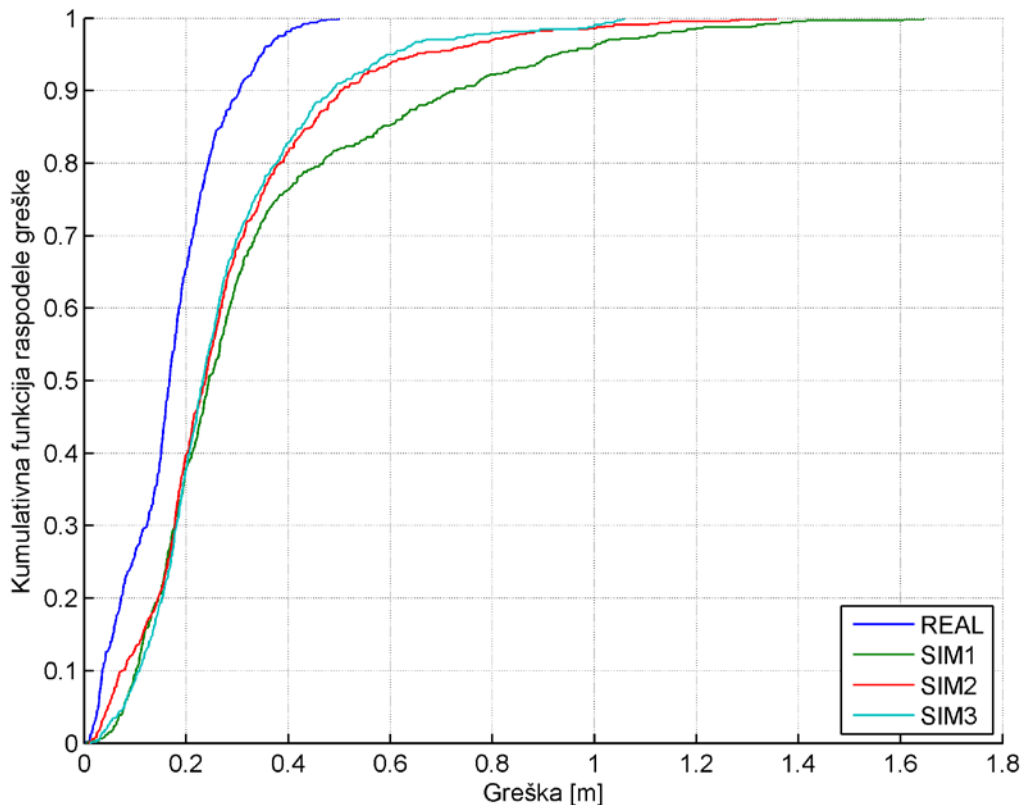
dobijeni parametri u tabelama 22 i 23 veoma slični parametrima datim u tabelama 20 i 21, odnosno parametri grešaka lokalizacije su neznatno lošiji uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih u simuliranim sistemima, što znači da je moguće koristiti parametre verovatnoće dobijene u simuliranim sistemima kada ne postoji mogućnost kalibracionih merenja u realnom sistemu. U nastavku istraživanja biće korišćeni parametri greške lokalizacije izračunati uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu merenja u realnom sistemu.

Kako u eksperimentalnom sistemu nije poznat odnos vremena koje proizvod provodi u mernim tačkama i u ostalim delovima sistema, u nastavku istraživanja će se koristiti parametri dobijeni za $P_{MT} = 0,5$, s tim što bi za konkretan sistem u kom se metod primenjuje bilo moguće koristiti i druge vrednosti za parametar P_{MT} .

Za odabrani parametar $P_{MT} = 0,5$, tabela 24 daje uporedan prikaz parametara greške lokalizacije za svaki od tri simulirana sistema i realan sistem, a slika 50 odgovarajuće kumulativne funkcije raspodele greške, za uzorke RSSI vrednosti izmerene ili simulirane u mernim tačkama. Srednja vrednost greške u simuliranim sistemima je unutar 0,33 m, dok je u realnom sistemu 0,17 m. U simuliranim sistemima, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,24 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,73 m sa verovatnoćom od 90%, dok je za realne sisteme moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 0,17 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,3 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 24. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO sa $P_{MT} = 0,5$, u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	0,33	0,24	0,27	0,01	1,65
	2	0,28	0,24	0,2	0,01	1,36
	3	0,27	0,23	0,17	0,01	1,06
Izmerene RSSI vrednosti		0,17	0,17	0,1	0	0,5



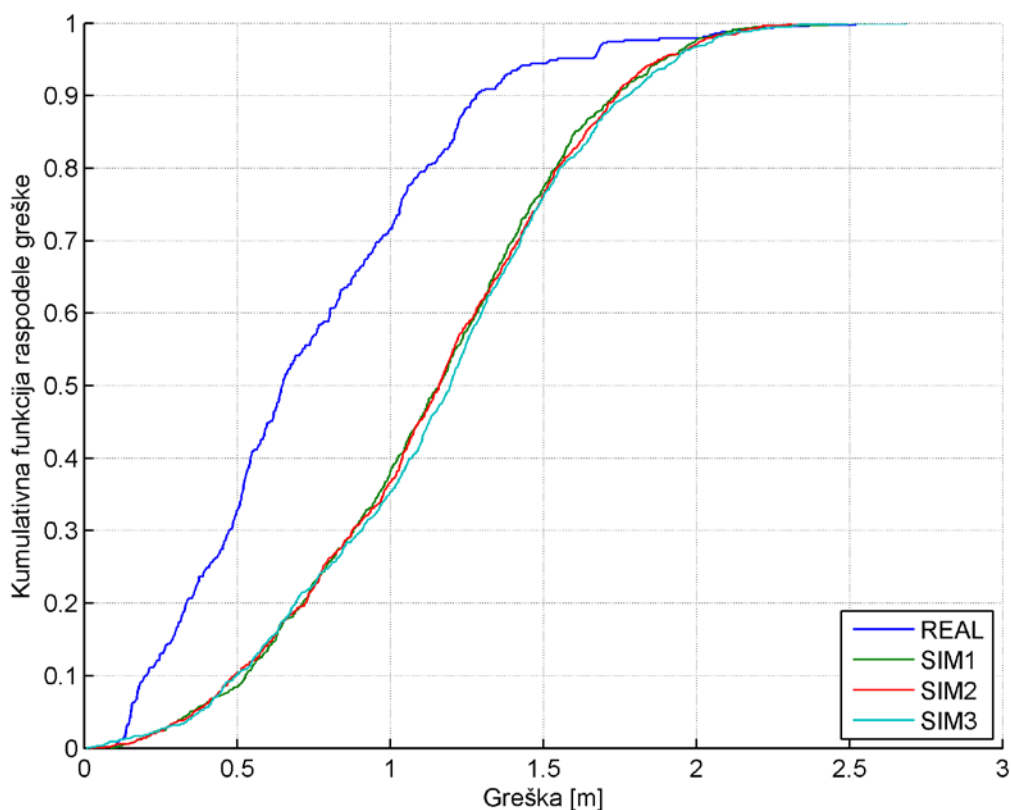
Slika 50. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO sa $P_{MT} = 0,5$, u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u mernim tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

Zatim, tabela 25 daje uporedan prikaz parametara greške lokalizacije za svaki od tri simulirana sistema i tri slučaja u realnom sistemu, za slučajno raspoređene tačke u prostoru (R), tačke duž putanje 1 (P1) i putanje 2 (P2). Slika 51 prikazuje odgovarajuće kumulativne funkcije raspodele greške, za uzorke RSSI vrednosti simulirane u test tačkama i izmerene u slučajno raspoređenim test tačkama, dok slika 52 prikazuje kumulativne funkcije raspodele greške uporedno za tri slučaja u realnom sistemu, kada su test tačke slučajno raspoređene u prostoru (R) i kada su postavljene duž dve različite putanje (P1 i P2). Srednja vrednost greške u simuliranim sistemima je unutar 1,16 m, dok je u realnom sistemu za vrednosti u slučajno raspoređenim tačkama (R) 0,74 m, za putanju 1 (P1) srednja vrednost je 0,55 m, a za putanju 2 (P2) 0,83 m. Kod simuliranih sistema, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 1,2 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,78 m sa verovatnoćom od 90%. U realnom sistemu, za vrednosti u slučajno raspoređenim tačkama moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,65 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,28 m sa verovatnoćom od 90%, za putanju 1 unutar 0,54 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,99 m sa verovatnoćom od 90%, a za

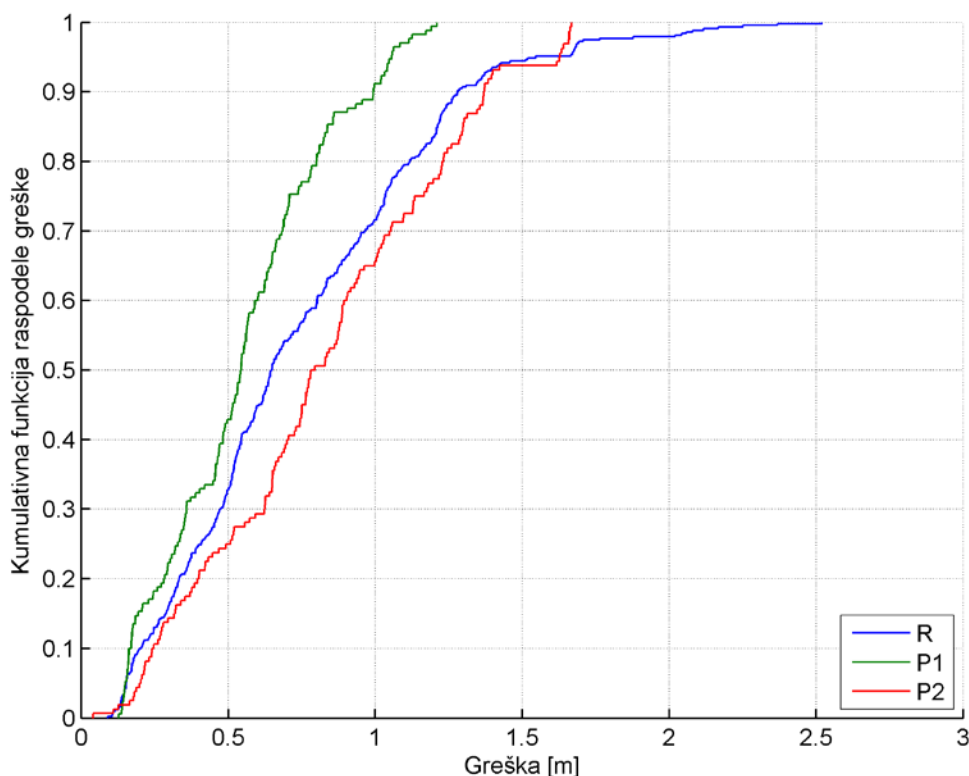
putanju 2 unutar 0,79 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno unutar 1,37 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 25. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO sa $P_{MT} = 0,5$, u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u test tačkama, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	1,14	1,16	0,46	0,09	2,55
	2	1,14	1,16	0,47	0,03	2,43
	3	1,16	1,2	0,48	0,01	2,68
Izmerene RSSI vrednosti	R	0,74	0,65	0,45	0,09	2,52
	P1	0,55	0,54	0,28	0,13	1,21
	P2	0,83	0,79	0,42	0,04	1,67



Slika 51. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO sa $P_{MT} = 0,5$, u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u slučajno raspoređenim test tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema



Slika 52. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO sa $P_{MT} = 0,5$, u RFID sistemu, za RSSI vrednosti u različitim uzorcima test tačkama u realnom sistemu; R – RSSI vrednosti izmerene u slučajno raspoređenim test tačkama, P1, P2 –RSSI vrednosti izmerene u test tačkama duž putanje kretanja proizvoda

4.4.1.1.2 Primena metoda PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži

Kao i u RFID sistemu, i u bežičnoj senzorskoj mreži predloženi metod PF_WKNN_PSO za fuziju podataka dobijenih metodom najbližih suseda i metodom optimizacije rojem čestica primenjen je za RSSI vrednosti izmerene ili simulirane i u mernim i u test tačkama, odnosno na uzorcima BRPT i BSPT, kao i BRNTR, BRNTP i BSNTR. Analogno eksperimentima u RFID sistemu, i ovde je metod testiran i sa parametrima verovatnoće koji su dobijeni u realnom sistemu i sa parametrima koji su dobijeni u simuliranim sistemima, i to za sve vrednosti odnosa vremena provedenog u mernim tačkama i u ostatku prostora iz skupa $P_{MT} = \{0,1, 0,25, 0,5, 0,75, 0,9\}$.

Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži, uz korišćenje parametara verovatnoće koji su dobijeni u realnom sistemu, dati su respektivno u tabelama 26 i 27 za RSSI vrednosti u mernim i u test tačkama. Radi preglednosti, prikazani su maksimalni dobijeni rezultati za sva tri simulirana sistema, a u tabeli 27 za realni sistem prikazani su samo rezultati za uzorak RRNTR. Na osnovu

rezultata, može se zaključiti da za merne tačke greška lokalizacije opada kako se verovatnoća da se proizvod nalazi u nekoj od mernih tačaka P_{MT} povećava, dok za test tačke greška lokalizacije raste sa porastom parametra P_{MT} , kao što je i očekivano.

Zatim, izvršeni su i eksperimenti sa parametrima verovatnoće dobijenim na osnovu simuliranih sistema. Tabele 28 i 29, respektivno, prikazuju dobijene parametre greške lokalizacije za RSSI vrednosti u mernim i u test tačkama. Kao i u RFID sistemu, i ovde je moguće zaključiti da su parametri prikazani u tabelama 28 i 29 veoma slični parametrima prikazanim u tabelama 26 i 27, pri čemu parametri verovatnoće dobijeni u simuliranim sistemima dovode do neznatno većih grešaka lokalizacije. Samim tim, moguće je koristiti i parametre verovatnoće dobijene u simuliranim sistemima kada nije moguće obezbediti probna merenja za kalibraciju sistema u realnom okruženju. U nastavku istraživanja, biće korišćeni parametri greške lokalizacije izračunati uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu merenja u realnom sistemu.

Kako za RFID sistem, tako će se i za bežičnu senzorsku mrežu u nastavku istraživanja koristiti parametri koji se dobijaju za $P_{MT} = 0,5$, budući da nije poznat procenat vremena u kojem se proizvod nalazi u mernim tačkama u realnom sistemu. U zavisnosti od sistema u kom se metod primenjuje, potrebno je odrediti konkretnu vrednost za parametar P_{MT} .

Tabela 26. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu merenja u realnom sistemu, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
$P_{MT} = 0,1$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,49	1,58	0,41	0,27	2,42
Izmerene RSSI vrednosti	1,44	1,53	0,41	0,19	2,29
$P_{MT} = 0,25$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,36	1,44	0,38	0,27	2,36
Izmerene RSSI vrednosti	1,32	1,39	0,37	0,11	2,13
$P_{MT} = 0,5$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,3	0,22	0,32	0,02	2,17
Izmerene RSSI vrednosti	0,32	0,25	0,23	0,01	1,43
$P_{MT} = 0,75$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,27	0,21	0,25	0,01	1,56
Izmerene RSSI vrednosti	0,29	0,23	0,21	0,01	1,49
$P_{MT} = 0,9$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,28	0,22	0,23	0,01	1,44
Izmerene RSSI vrednosti	0,3	0,23	0,24	0,01	1,57

Tabela 27. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu merenja u realnom sistemu, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
$P_{MT} = 0,1$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,44	1,47	0,58	0,06	2,9
Izmerene RSSI vrednosti	1,15	1,14	0,64	0,02	2,51
$P_{MT} = 0,25$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,26	1,34	0,53	0,08	2,6
Izmerene RSSI vrednosti	1,2	1,19	0,54	0,01	2,32
$P_{MT} = 0,5$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,18	1,21	0,46	0,08	2,46
Izmerene RSSI vrednosti	1,33	1,32	0,66	0,02	2,74
$P_{MT} = 0,75$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,09	1,11	0,44	0,09	2,39
Izmerene RSSI vrednosti	1,39	1,38	0,62	0,05	2,99
$P_{MT} = 0,9$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,06	1,07	0,43	0,08	2,32
Izmerene RSSI vrednosti	1,4	1,38	0,63	0,03	3,03

Tabela 28. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu simuliranih sistema, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
$P_{MT} = 0,1$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,94	1,01	0,36	0,05	2,05
Izmerene RSSI vrednosti	0,94	0,97	0,27	0,05	1,79
$P_{MT} = 0,25$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,63	0,56	0,35	0,06	1,77
Izmerene RSSI vrednosti	0,6	0,57	0,28	0	1,39
$P_{MT} = 0,5$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,31	0,23	0,28	0,02	1,67
Izmerene RSSI vrednosti	0,32	0,25	0,24	0,02	1,55
$P_{MT} = 0,75$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,28	0,22	0,27	0,01	1,65
Izmerene RSSI vrednosti	0,3	0,24	0,24	0,02	1,58
$P_{MT} = 0,9$					
Simulirane RSSI vrednosti	0,28	0,23	0,22	0,02	1,52
Izmerene RSSI vrednosti	0,29	0,24	0,23	0	1,64

Tabela 29. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih na osnovu simuliranih sistema, dati u [m]

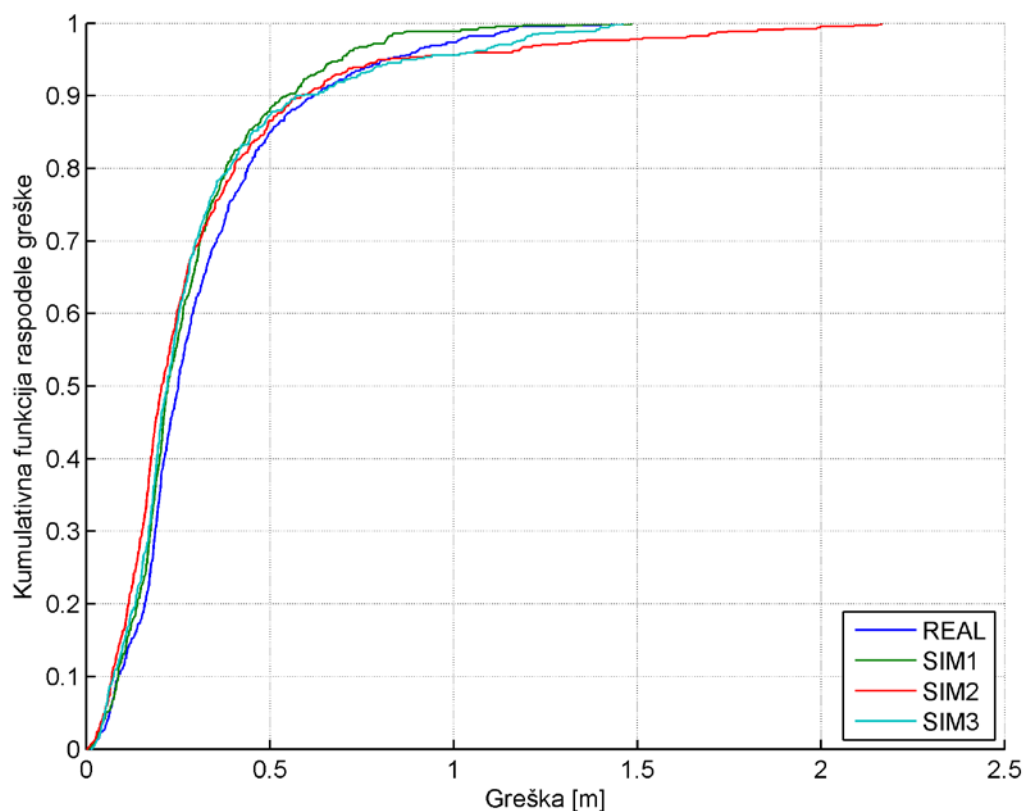
	Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
$P_{MT} = 0,1$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,19	1,23	0,49	0,05	2,59
Izmerene RSSI vrednosti	1,25	1,3	0,57	0,06	2,45
$P_{MT} = 0,25$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,15	1,18	0,46	0,07	2,42
Izmerene RSSI vrednosti	1,31	1,3	0,59	0,07	2,7
$P_{MT} = 0,5$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,08	1,1	0,44	0,04	2,38
Izmerene RSSI vrednosti	1,35	1,27	0,62	0,09	2,98
$P_{MT} = 0,75$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,04	1,06	0,43	0,06	2,35
Izmerene RSSI vrednosti	1,39	1,37	0,63	0,08	3,02
$P_{MT} = 0,9$					
Simulirane RSSI vrednosti	1,04	1,05	0,42	0,03	2,39
Izmerene RSSI vrednosti	1,41	1,37	0,62	0,07	3

U tabeli 30 prikazani su parametri greške lokalizacije za sva tri simulirana sistema i za realan sistem u test laboratoriji, sa odabranim parametrom $P_{MT} = 0,5$, za uzorke RSSI

vrednosti simulirane ili izmerene u mernim tačkama, a slika 53 prikazuje kumulativne funkcije raspodele greške u ovom slučaju. Srednja vrednost greške u simuliranim sistemima je unutar 0,3 m, a u realnom sistemu je 0,32 m. Za simulirane sisteme, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,22 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,58 m sa verovatnoćom od 90%. U realnom sistemu moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,25 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,62 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 30. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO sa $P_{MT} = 0,5$, u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	0,28	0,22	0,2	0,01	1,49
	2	0,3	0,21	0,32	0	2,17
	3	0,3	0,22	0,26	0,02	1,46
Izmerene RSSI vrednosti		0,32	0,25	0,23	0,01	1,43

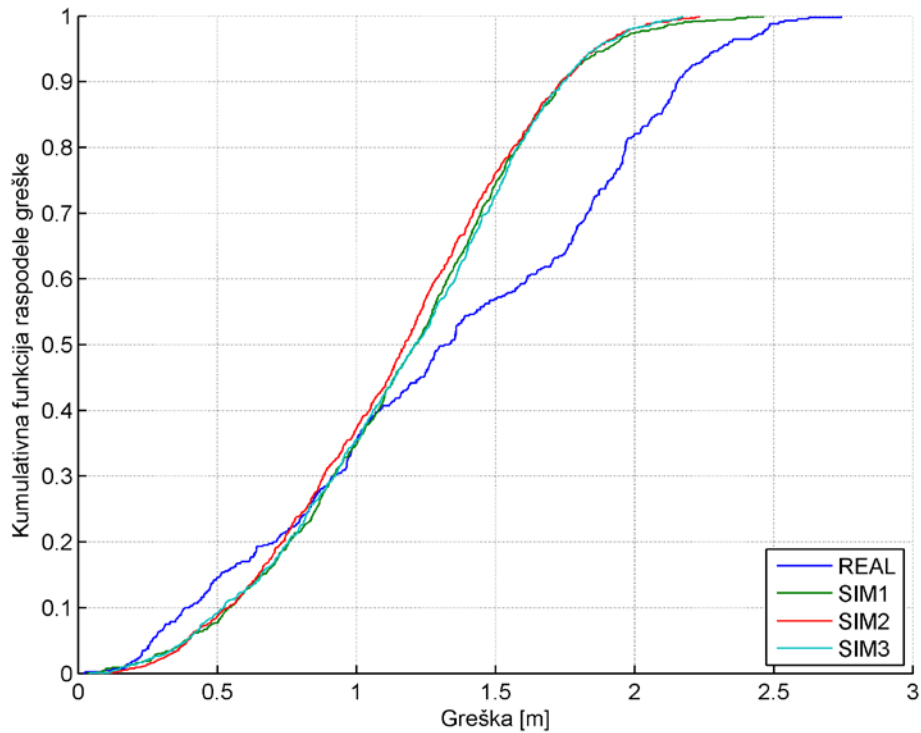


Slika 53. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO sa $P_{MT} = 0,5$, u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u mernim tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

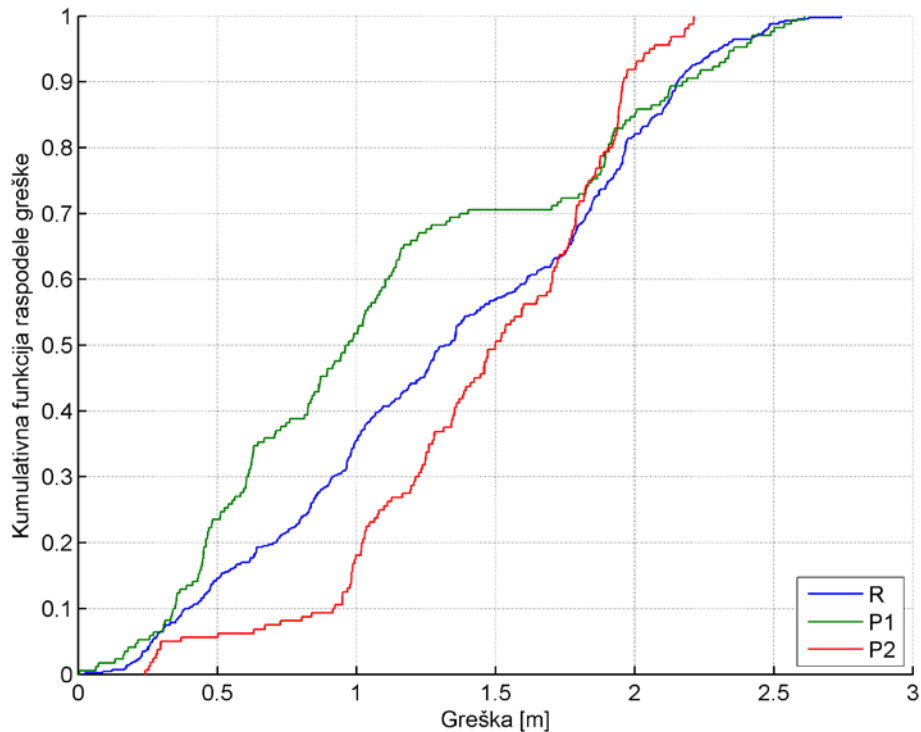
Za slučaj test tačaka, izračunati parametri greške lokalizacije su prikazani u tabeli 31 za sva tri simulirana sistema, i za sva tri testirana slučaja u realnom sistemu, za slučajno raspoređene tačke u prostoru (R), tačke duž putanje 1 (P1) i putanje 2 (P2). Na slici 54 su prikazane kumulativne funkcije raspodele greške za simulirane sisteme i za slučajno raspoređene test tačke u realnom sistemu, a na slici 55 kumulativne funkcije raspodele greške za sva tri testirana slučaja u realnom sistemu, odnosno u slučaju kada su test tačke slučajno raspoređene u prostoru (R) i kada su postavljene duž dve različite putanje (P1 i P2). Srednja vrednost greške u simuliranim sistemima ne prelazi 1,18 m, dok je u realnom sistemu za vrednosti u slučajno raspoređenim tačkama (R) 1,33 m, za putanju 1 (P1) srednja vrednost je 1,12 m, a za putanju 2 (P2) 1,45 m. Za simulirane sisteme, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 1,21 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,74 m sa verovatnoćom od 90%. U realnom sistemu, za vrednosti u slučajno raspoređenim tačkama moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 1,32 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,16 m sa verovatnoćom od 90%, za putanju 1 unutar 0,97 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 2,17 m sa verovatnoćom od 90%, a za putanju 2 unutar 1,5 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno unutar 1,96 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 31. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO sa $P_{MT} = 0,5$, u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u test tačkama, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Simulirane RSSI vrednosti	1	1,18	1,21	0,46	0,04	2,47
	2	1,15	1,17	0,45	0,08	2,23
	3	1,17	1,21	0,46	0,04	2,17
Izmerene RSSI vrednosti	R	1,33	1,32	0,66	0,02	2,74
	P1	1,12	0,97	0,7	0,01	2,61
	P2	1,45	1,5	0,48	0,24	2,21



Slika 54. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO sa $P_{MT} = 0,5$, u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u slučajno raspoređenim test tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema



Slika 55. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO sa $P_{MT} = 0,5$, u bežičnoj senzorskoj mreži, za RSSI vrednosti u različitim uzorcima test tačaka u realnom sistemu; R – RSSI vrednosti izmerene u slučajno raspoređenim test tačkama, P1, P2 – RSSI vrednosti izmerene u test tačkama duž putanje kretanja proizvoda

4.4.1.2 Metod PF_RFID_WSN – Fuzija podataka dobijenih u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži

Nakon fuzije podataka dobijenih metodima najbližih suseda i optimizacije rojem čestica metodom PF_WKNN_PSO, metod za lokalizaciju proizvoda koji je predložen u okviru modela MLPIS za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari podrazumeva i fuziju podataka dobijenih primenom RFID tehnologije i bežične senzorske mreže, odnosno primenu metoda PF_RFID_WSN. Kao ulazni parametri za metod PF_RFID_WSN, koriste se izlazne koordinate metoda PF_WKNN_PSO, posebno u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži, na kojima se ponovo primenjuje čestični filtar kao metod za fuziju podataka.

Na osnovu kumulativnih funkcija raspodele greške lokalizacije za merne i test tačke u RFID sistemu i bežičnoj senzorskoj mreži (slike 50, 51, 53 i 54) određene su verovatnoće da se stvarna pozicija proizvoda nalazi na rastojanju do 0,5 m, od 0,5 do 1 m, od 1 do 1,5 m, od 1,5 do 2 m, od 2 do 2,5 m, od 2,5 do 3 m i od 3 do 3,5 m od procenjenih koordinata, i za RFID sistem i za bežičnu senzorsku mrežu, kako za merne tačke, tako i za test tačke, a dobijeni parametri su prikazani u tabeli 32.

Tabela 32. Verovatnoća da se stvarna pozicija proizvoda nalazi na rastojanju d od koordinata dobijenih primenom metoda PF_WKNN_PSO

	Realni sistem				Simulirani sistem			
	RFID sistem		Bežična senzorska mreža		RFID sistem		Bežična senzorska mreža	
	Merne tačke	Test tačke	Merne tačke	Test tačke	Merne tačke	Test tačke	Merne tačke	Test tačke
$d < 0,5 \text{ m}$	1	0,33	0,85	0,15	0,9	0,11	0,87	0,09
$0,5 \text{ m} < d < 1 \text{ m}$	0	0,39	0,12	0,21	0,09	0,26	0,09	0,28
$1 \text{ m} < d < 1,5 \text{ m}$	0	0,22	0,03	0,21	0,01	0,39	0,02	0,39
$1,5 \text{ m} < d < 2 \text{ m}$	0	0,04	0	0,25	0	0,21	0,02	0,22
$2 \text{ m} < d < 2,5 \text{ m}$	0	0,02	0	0,17	0	0,03	0	0,02
$2,5 \text{ m} < d < 3 \text{ m}$	0	0	0	0,01	0	0	0	0
$3 \text{ m} < d < 3,5 \text{ m}$	0	0	0	0	0	0	0	0

Kao metod za fuziju podataka o poziciji proizvoda koji su dobijeni u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži unutar metoda PF_RFID_WSN predlaže se korišćenje čestičnog filtra, koji pored fuzije podataka takođe i prati kretanje proizvoda tokom vremena, odnosno u novu estimaciju pozicije proizvoda uključuje i prethodnu estimaciju.

Čestični filter je postavljen kao i u slučaju metoda PF_WKNN_PSO. Broj čestica je postavljen na $M=1000$, a čestice su inicijalno nasumično raspoređene u prostoru sa uniformnom raspedelom. Težinski koeficijent $w^{[m]}$ za svaku česticu se izračunava kao:

$$w^{[m]} = w_{RFID}^{[m]} \cdot w_{WSN}^{[m]} \quad (49)$$

gde su $w_{RFID}^{[m]}$ i $w_{WSN}^{[m]}$ težinski koeficijenti za RFID sistem i bežičnu senzorsku mrežu, koji se dobijaju na osnovu parametara datih u tabeli 32 i odabranog parametra P_{MT} koji predstavlja verovatnoću da se proizvod nalazi u poziciji neke od mernih tačaka, i to na sledeći način:

$$\begin{aligned} w_{RFID}^{[m]} &= w_{RFID_MT}^{[m]} \cdot P_{MT} + w_{RFID_TT}^{[m]} \cdot (1 - P_{MT}), \\ w_{WSN}^{[m]} &= w_{WSN_MT}^{[m]} \cdot P_{MT} + w_{WSN_TT}^{[m]} \cdot (1 - P_{MT}), \end{aligned} \quad (50)$$

gde su $w_{RFID_MT}^{[m]}$ i $w_{RFID_TT}^{[m]}$ parametri verovatnoće dobijeni na osnovu tabele 32 za merne i test tačke u RFID sistemu, a $w_{WSN_MT}^{[m]}$ i $w_{WSN_TT}^{[m]}$ su parametri verovatnoće dobijeni na osnovu tabele 32 za merne i test tačke u bežičnoj senzorskoj mreži.

Kako je u realizaciji metoda PF_WKNN_PSO odabran parametar $P_{MT} = 0,5$, on je korišćen i za dobijanje težinskih koeficijenata $w_{RFID}^{[m]}$ i $w_{WSN}^{[m]}$, s tim što je u zavisnosti od potreba konkretnog sistema moguće podesiti i bilo koju drugu vrednost u intervalu $[0,1]$. Testirana je mogućnost lokalizacije proizvoda uz korišćenje parametara iz tabele 32 dobijenih na osnovu merenja u realnom sistemu, kao i parametara dobijenih na osnovu simuliranih sistema. Dalje je čestični filter realizovan identično kao u poglavlju 4.4.1.1.

Tabela 33 prikazuje deskriptivne statističke pokazatelje izračunatih grešaka za metod PF_RFID_WSN za uzorke podataka izmerenih ili simuliranih u mernim tačkama. Prikazani su pokazatelji greške lokalizacije koji su dobijeni uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih u realnom sistemu, kao i u simuliranim sistemima. Na osnovu dobijenih rezultata, vidi se da su razlike u parametrima greške minimalne, uz neznatno veću grešku lokalizacije pri korišćenju parametara verovatnoće dobijenih u simuliranim sistemima. Iz ovoga se može

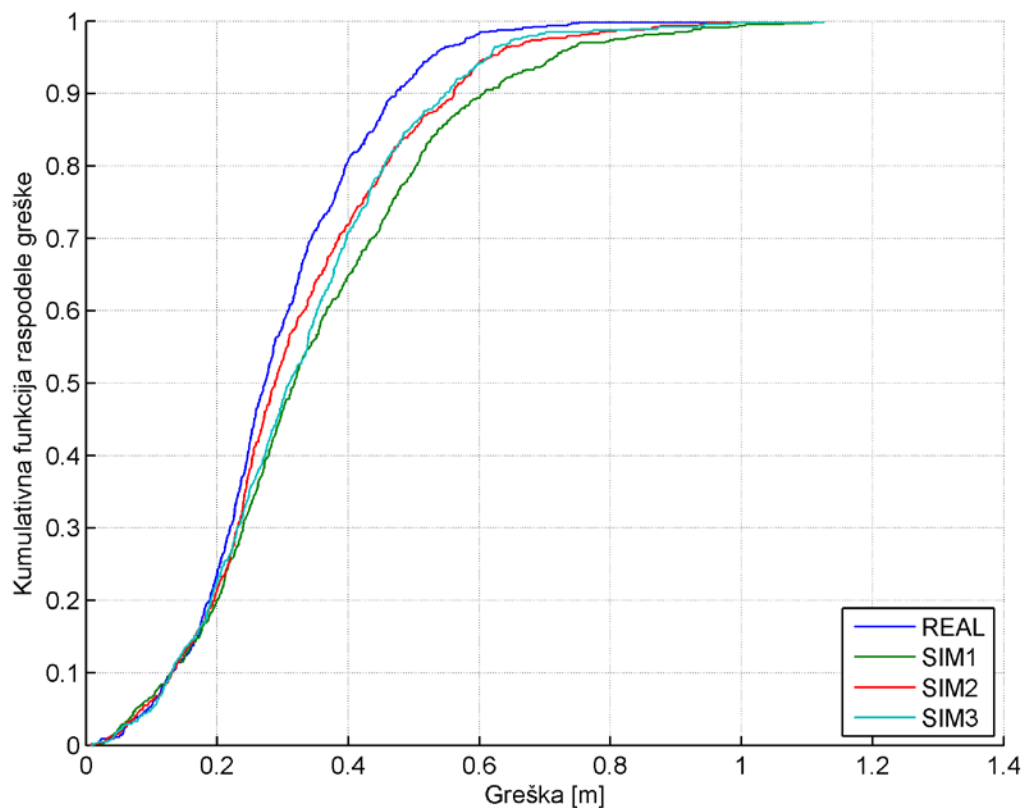
zaključiti da je moguće koristiti i parametre verovatnoće dobijene u simuliranim sistemima, kada nije moguće obezbediti probna merenja za kalibraciju sistema u realnom okruženju. Dalje će biti analizirani podaci dobijeni uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih u realnom sistemu.

Na osnovu tabele 33, vidi se da se uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih u realnom sistemu za RSSI vrednosti izmerene u realnom sistemu dobija srednja vrednost greške lokalizacije od 0,29 m, dok se za simulirane RSSI vrednosti dobija srednja vrednost greške unutar 0,35 m.

Na slici 56 prikazane su kumulativne funkcije raspodele greške za RSSI vrednosti izmerene ili simulirane u mernim tačkama. U simuliranim sistemima, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,32 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,61 m sa verovatnoćom od 90%. Za realno izmerene vrednosti, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,27 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno unutar 0,47 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 33. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_RFID_WSN, za RSSI vrednosti u mernim tačkama, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih u realnom sistemu						
Simulirane RSSI vrednosti	1	0,35	0,32	0,19	0,01	1,11
	2	0,32	0,29	0,17	0,01	1,05
	3	0,33	0,31	0,16	0,01	1,13
Izmerene RSSI vrednosti		0,29	0,27	0,13	0,01	0,98
Uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih u simuliranim sistemima						
Simulirane RSSI vrednosti	1	0,36	0,33	0,19	0,02	1,24
	2	0,34	0,3	0,19	0,01	1,29
	3	0,34	0,32	0,17	0,01	1,29
Izmerene RSSI vrednosti		0,29	0,27	0,14	0	1,21



Slika 56. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_RFID_WSN, za RSSI vrednosti u mernim tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema

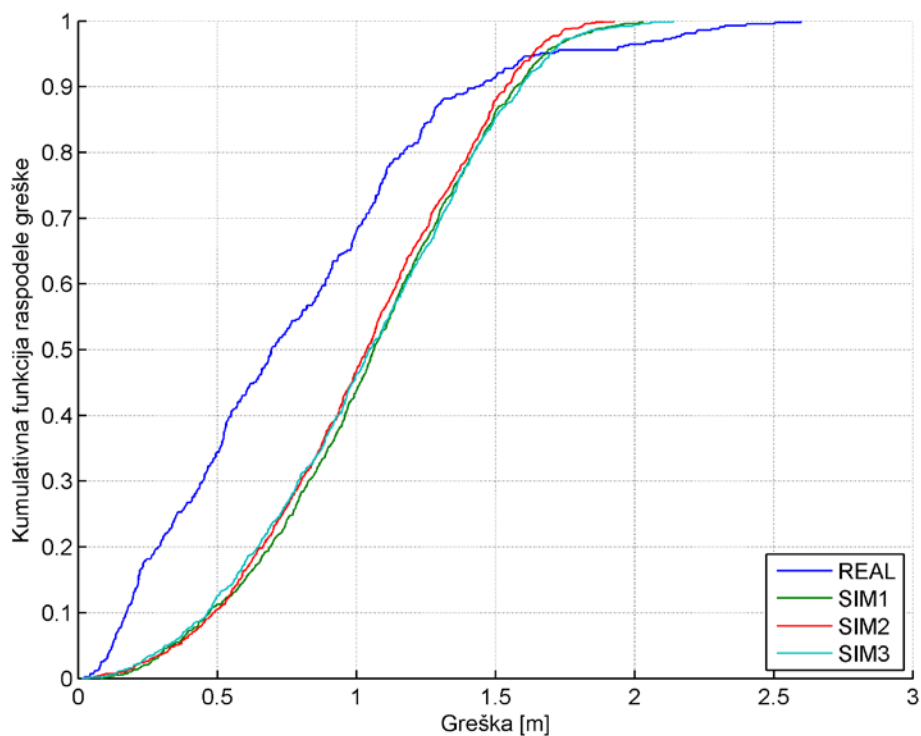
U tabeli 34 dati su deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za uzorke podataka izmerenih ili simuliranih u test tačkama, uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih u realnom sistemu i u simuliranim sistemima. Prikazani su parametri greške lokalizacije u sva tri simulirana sistema, kao i za tri slučaja u realnom sistemu, za test tačke slučajno raspoređene u prostoru (R) i za test tačke duž dve putanje kretanja proizvoda (P1 i P2). Kao i za merne tačke, i ovde se vidi da se dobijene vrednosti greške lokalizacije neznatno razlikuju za slučaj kada su korišćeni parametri verovatnoće dobijeni u realnom sistemu i u simuliranim sistemima, te će u nastavku biti analizirani samo podaci dobijeni uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih u realnom sistemu.

Na osnovu tabele 34, vidi se da se za RSSI vrednosti izmerene u realnom sistemu u slučajno raspoređenim tačkama dobija srednja vrednost greške lokalizacije od 0,78 m, dok se u test tačkama duž putanje 1 dobija srednja vrednost greške od 0,45 m, odnosno 0,82 m duž putanje 2. Za simulirane RSSI vrednosti dobija se srednja vrednost greške unutar 1,05 m.

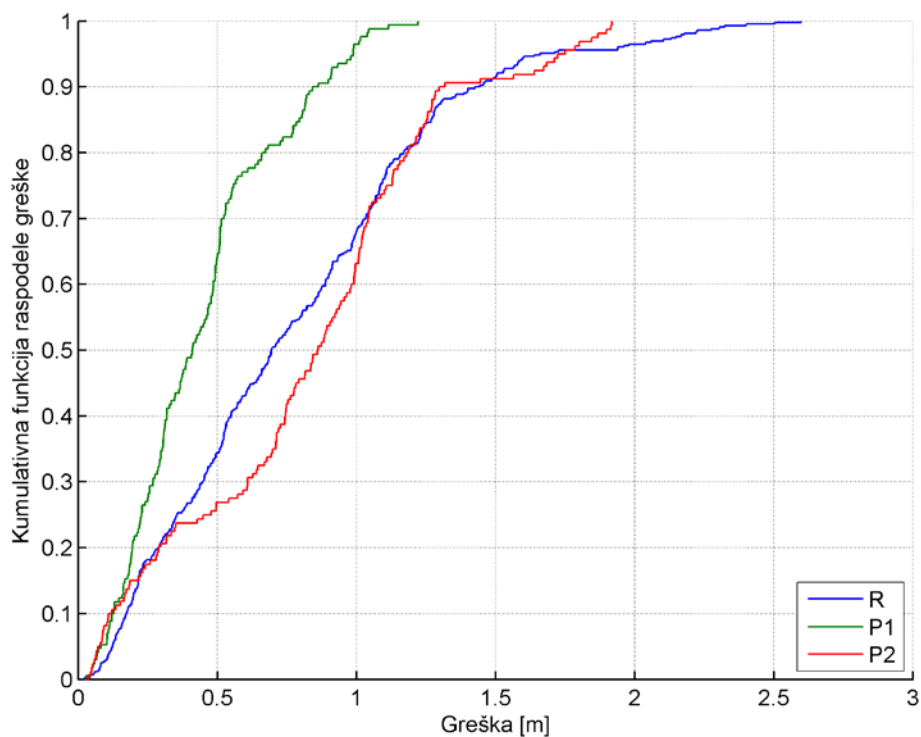
Na slici 57 su prikazane kumulativne funkcije raspodele greške za simulirane sisteme i za slučajno raspoređene test tačke u realnom sistemu, a na slici 58 kumulativne funkcije raspodele greške za sva tri testirana slučaja u realnom sistemu, odnosno u slučaju kada su test tačke slučajno raspoređene u prostoru (R) i kada su postavljene duž dve različite putanje (P1 i P2). Za simulirane sisteme, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 1,06 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,59 m sa verovatnoćom od 90%. U realnom sistemu, za vrednosti u slučajno raspoređenim tačkama moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,69 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,43 m sa verovatnoćom od 90%, za putanju 1 unutar 0,41 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,84 m sa verovatnoćom od 90%, a za putanju 2 unutar 0,86 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno unutar 1,3 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 34. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_RFID_WSN, za RSSI vrednosti u test tačkama, dati u [m]

		Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih u realnom sistemu						
Simulirane RSSI vrednosti	1	1,05	1,06	0,41	0,08	2,03
	2	1,02	1,04	0,39	0,03	1,93
	3	1,04	1,05	0,42	0,02	2,14
Izmerene RSSI vrednosti	R	0,78	0,69	0,51	0,02	2,6
	P1	0,45	0,41	0,27	0,03	1,22
	P2	0,82	0,86	0,48	0,04	1,92
Uz korišćenje parametara verovatnoće dobijenih u simuliranim sistemima						
Simulirane RSSI vrednosti	1	1,06	1,07	0,41	0,04	2,04
	2	1,04	1,06	0,4	0,04	2
	3	1,05	1,05	0,42	0,03	2,12
Izmerene RSSI vrednosti	R	0,85	0,77	0,55	0,01	2,71
	P1	0,59	0,43	0,46	0	1,78
	P2	0,89	0,91	0,44	0,05	1,92



Slika 57. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_RFID_WSN, za RSSI vrednosti u test tačkama; REAL – realno izmerene RSSI vrednosti, SIM1, SIM2, SIM3 – simulirane RSSI vrednosti iz odgovarajućeg simuliranog sistema



Slika 58. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_RFID_WSN, za RSSI vrednosti u različitim uzorcima test tačaka u realnom sistemu; R – RSSI vrednosti izmerene u slučajno raspoređenim test tačkama, P1, P2 – RSSI vrednosti izmerene u test tačkama duž putanje kretanja proizvoda

4.5 Treća faza istraživanja

Treća faza istraživanja odnosi se na verifikaciju eksperimentalnih rezultata u industrijskoj okolini, kako bi se stvorila jasnija slika o mogućnostima praktične primene predloženog modela za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari u realnim sistemima.

4.5.1 Postavka eksperimenta

Podaci za eksperiment u trećoj fazi istraživanja prikupljeni su na osnovu snimanja RSSI vrednosti u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži u eksperimentalnom okruženju u laboratoriji MI-G3-Lab na Mašinskom institutu Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu¹. U ovoj laboratoriji nalazi se montažna linija za montažu cirkulacione pumpe, koja predstavlja industrijski sistem, i omogućava uvid u realne mogućnosti lokalizacionih metoda u industrijskom okruženju. Montažna linija (slika 59) sadrži transportnu traku, 6 radnih stanica, industrijski SCARA robot, manipulatore, itd. U prostoru za skladištenje, slična linija bi se mogla naći na prijemu proizvoda, slaganju, pakovanju, sortiranju proizvoda, automatskom transportu proizvoda pokretnom trakom, pripremi za isporuku, itd.

Merno polje u industrijskoj laboratoriji određeno je postavljanjem referentnih tačaka, odnosno četiri RFID antene i četiri bežična senzorska modula, na krajeve dužih strana montažne linije. RFID antene su postavljene tako da obuhvate što veći deo mernog prostora, tako sto su usmerene ka dužim stranama montažne linije. Rastojanje između susednih RFID antena je 7,2 m na dužim stranama, odnosno 1,5 m na kraćim stranama montažne linije, dok je rastojanje između referentnih bežičnih senzorskih modula 6 m na dužim stranama, odnosno 1,4 m na kraćim stranama. Kao i u test laboratoriji, RSSI mape za RFID sistem i bežičnu senzorsku mrežu su formirane merenjem RSSI vrednosti u mernim tačkama, koje su raspoređene duž pokretne trake na montažnoj liniji, na svakih 0,5 m (slika 60). Kao proizvod za lokalizaciju u prostoru korišćena je ista kartonska kutija, obeležena identičnim RFID tagovima i mobilnim bežičnim senzorskim modulom kao u prvoj i drugoj fazi istraživanja. RSSI mape (slike 61 i 62) su formirane postavljanjem kutije u svaku od mernih tačaka, i

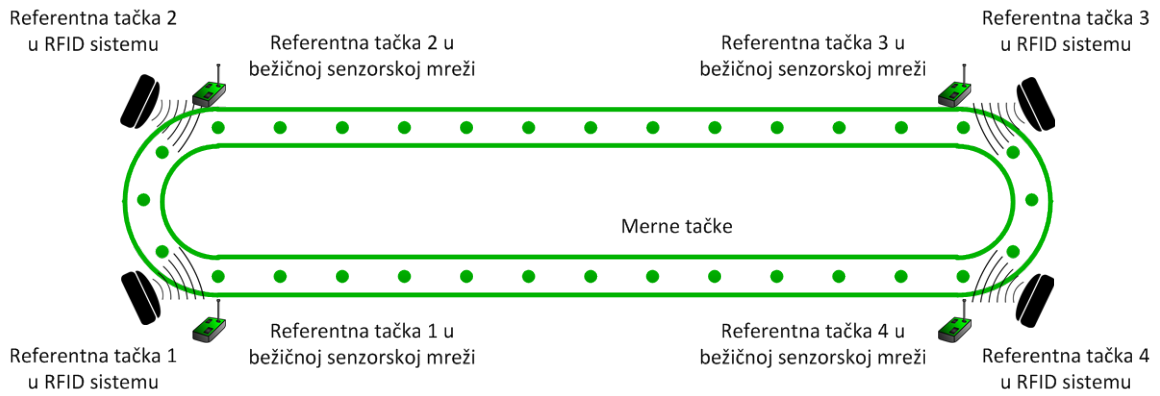
¹ Kako bi se laboratorija MI-G3-Lab lakše razlikovala od test laboratorije u kojoj su metodi lokalizacije ispitivani u prvoj i drugoj fazi istraživanja, u nastavku teksta će biti navedena kao „industrijska laboratorija“.



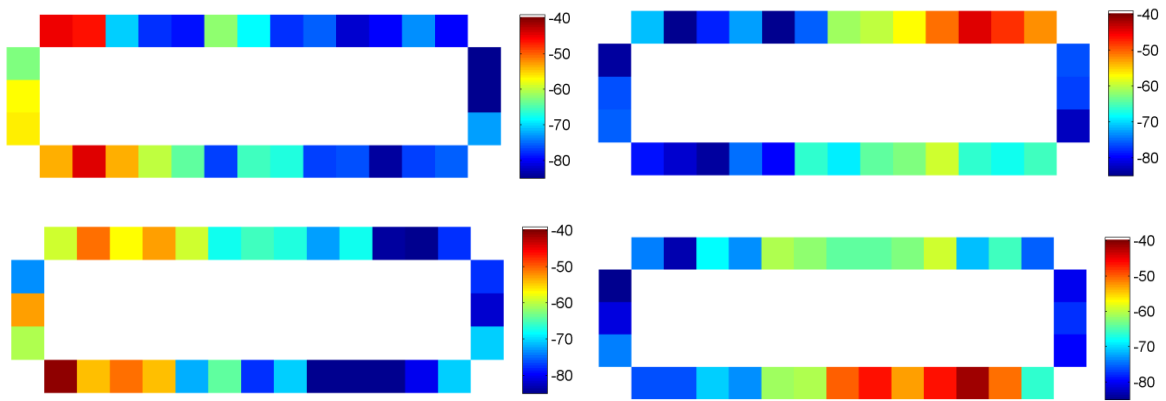
Slika 59. Montažna linija u laboratoriji MI-G3-Lab

merenjem RSSI vrednosti, pri čemu je u RFID sistemu izmereno po 10 prosečnih RSSI vrednosti za vremenski interval od po 1 sekund, a za bežičnu senzorsku mrežu po 100 RSSI vrednosti, a zatim uzimanjem srednje izmerene vrednosti za svaku mernu tačku. Kao i u test laboratoriji, i ovde se vidi da je signal jači u blizini referentnih tačaka, dok jačina signala postepeno opada sa rastojanjem između proizvoda i referentne tačke. Budući da merni prostor predstavlja realni industrijski sistem, očekivano je da postoje smetnje u propagaciji signala zbog prisustva metala i industrijskih uređaja, i da opadanje RSSI vrednosti sa rastojanjem nije pravilno, što se i vidi na slikama 61 i 62.

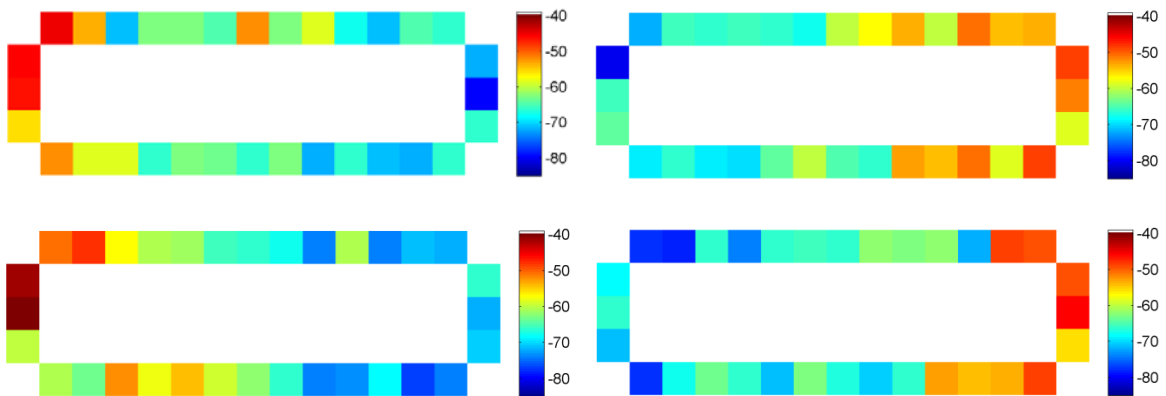
Za testiranja lokalizacionih metoda, izmerene su i RSSI vrednosti u test tačkama, čije pozicije su prikazane na slici 63.



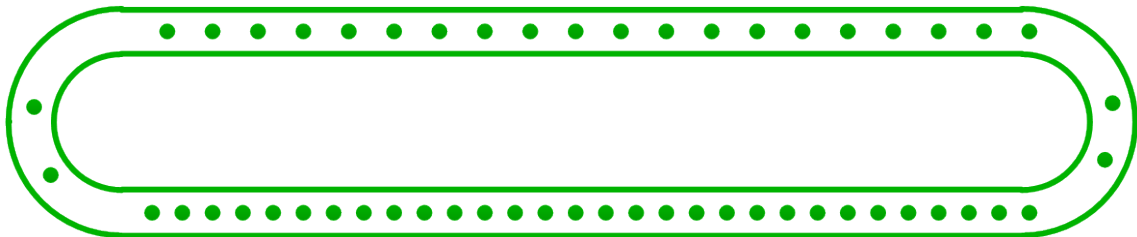
Slika 60. Merno polje sa referentnim i mernim tačkama u industrijskoj laboratoriji



Slika 61. RSSI mape za četiri referentne tačke u RFID sistemu u industrijskoj laboratoriji



Slika 62. RSSI mape za četiri referentne tačke u bežičnoj senzorskoj mreži u industrijskoj laboratoriji



Slika 63. Pozicije test tačaka u industrijskoj laboratoriji

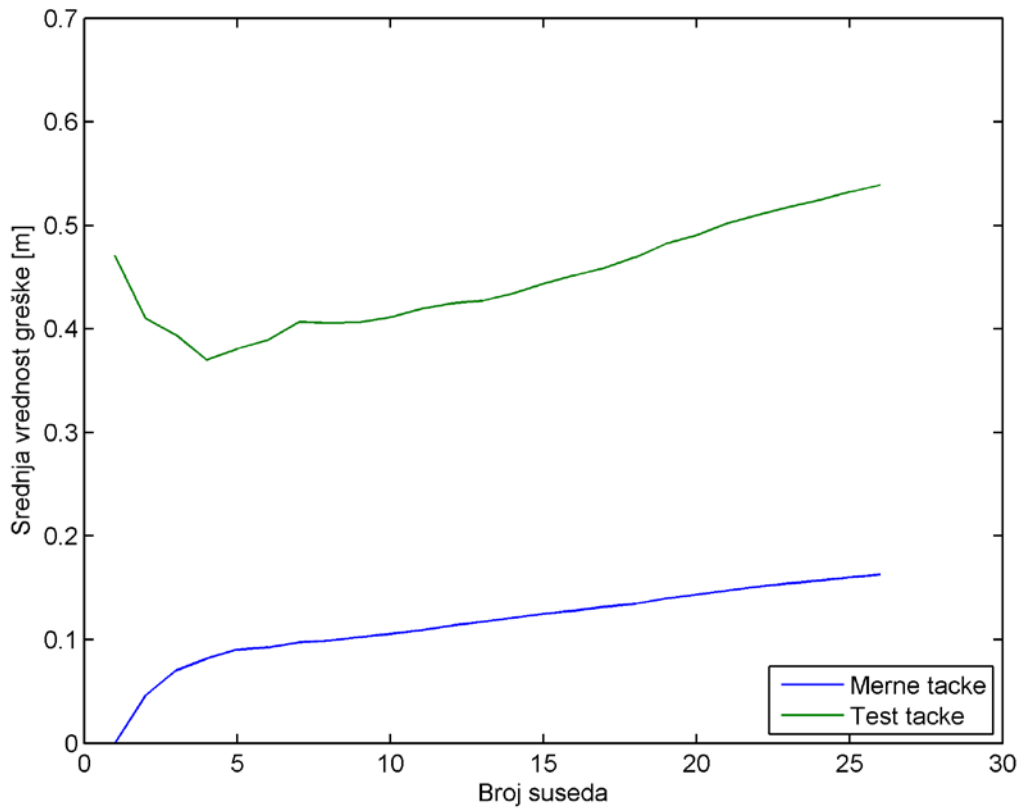
U okviru eksperimentalnog testiranja lokalizacionih metoda, testirani su metodi koji su značajni za poređenje rezultata: metod najbližih suseda, metod optimizacije rojem čestica, kao i metodi predloženi u okviru modela MLPIS za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari, metod PF_WKNN_PSO za fuziju podataka dobijenih metodom najbližih suseda i optimizacije rojem čestica, i metod PF_RFID_WSN za fuziju podataka dobijenih u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži. Svi metodi su testirani na uzorku RSSI vrednosti izmerenih u mernim tačkama i na uzorku RSSI vrednosti izmerenih u test tačkama, pri čemu je u oba uzorka za svaku tačku izmereno po 10 skupova RSSI vrednosti. U nastavku su dati rezultati eksperimentalnog testiranja.

4.5.2 Metod najbližih suseda

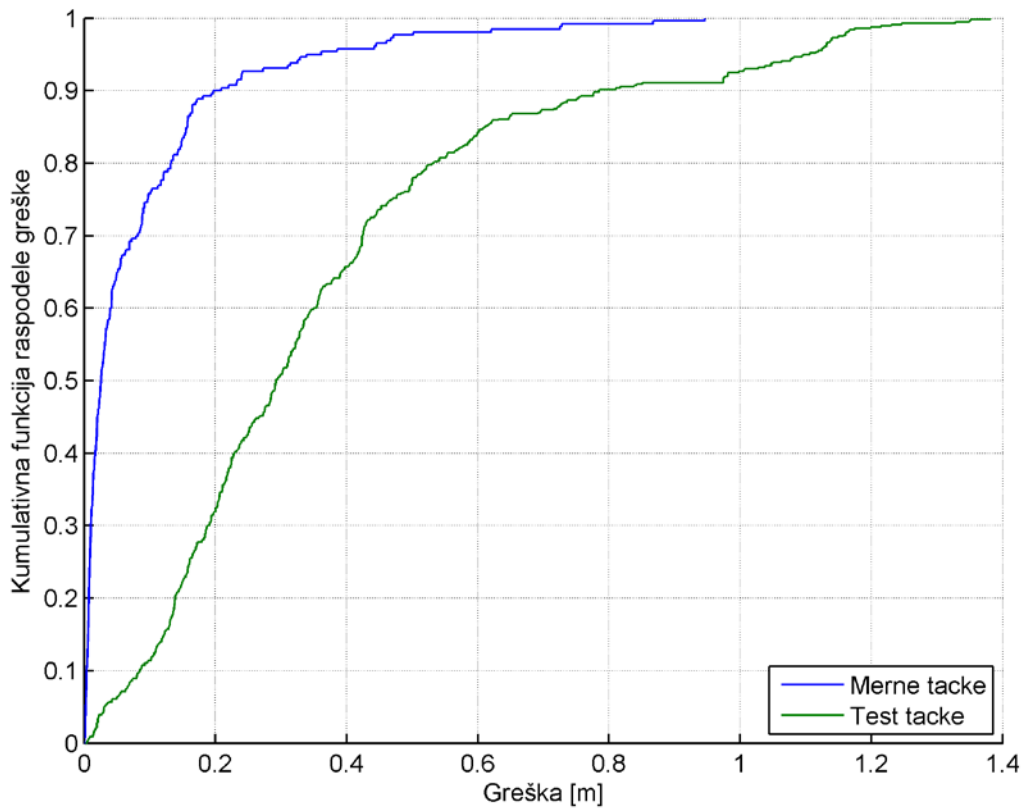
4.5.2.1 Primena metoda najbližih suseda u RFID sistemu

Za kalibraciju metoda najbližih suseda, potrebno je odrediti optimalan broj najbližih suseda za dato okruženje. Analizirane su srednje vrednosti greške lokalizacije pri korišćenju od 1 do 26 suseda, što je maksimalni broj tačaka u mernoj mapi. Slika 64 prikazuje zavisnost izračunate srednje vrednosti greške lokalizacije od korišćenog broja suseda, za RSSI vrednosti izmerene u mernim i u test tačkama. Za merne tačke vidi se da je greška lokalizacije najmanja za $k=1$, a postepeno raste sa povećanjem korišćenog broja suseda. Ovo je očekivano, jer se za vrednosti u mernim tačkama najbolji rezultati dobijaju kada se tražena pozicija samo odabira iz skupa pozicija mernih tačaka, što je slučaj za $k=1$. Za test tačke, sa porastom broja suseda greška lokalizacije se smanjuje do vrednosti $k=4$, a zatim počinje da raste. Na osnovu dobijenih rezultata, odabran je broj suseda $k=4$.

U tabeli 35 prikazani su deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka, a na slici 65 su prikazane kumulativne funkcije raspodele greške, za uzorke RSSI vrednosti u mernim i u test tačkama. Srednja vrednost greške lokalizacije za uzorak u mernim tačkama je 0,08 m, a u test tačkama 0,37 m. Za uzorak u mernim tačkama moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,03 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,2 m sa verovatnoćom od 90%, a za uzorak u test tačkama moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,29 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,79 m sa verovatnoćom od 90%.



Slika 64. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda u RFID sistemu



Slika 65. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod najbližih suseda u RFID sistemu

Tabela 35. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod najbližih suseda u RFID sistemu, za broj suseda $k=4$, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Merne tačke	0,08	0,03	0,14	0	0,95
Test tačke	0,37	0,29	0,3	0	1,38

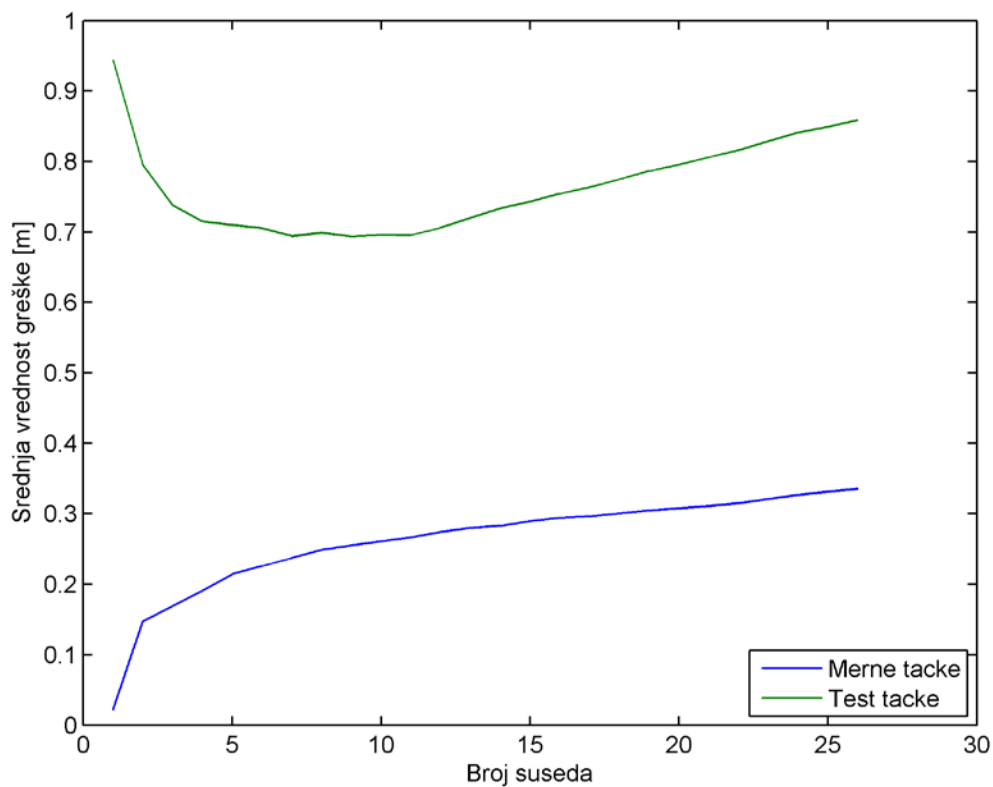
4.5.2.2 Primena metoda najbližih suseda u bežičnoj senzorskoj mreži

Za određivanje optimalnog broja najbližih suseda, i u bežičnoj senzorskoj mreži su analizirane srednje vrednosti greške lokalizacije u zavisnosti od korišćenog broja suseda za RSSI vrednosti izmerene u mernim i u test tačkama, što je i prikazano na slici 66. Za merne tačke se ponovo pokazuje da je greška lokalizacije najmanja za $k=1$, a postepeno raste sa povećanjem korišćenog broja suseda. Za uzorak u test tačkama, greška lokalizacije opada do određenog nivoa, a zatim počinje da raste sa porastom korišćenog broja suseda. Kako bi i u mernim tačkama greška lokalizacije bila što manja, potrebno je uzeti minimalan broj suseda koji daje zadovoljavajući nivo greške i u test tačkama, te je na osnovu dobijenih rezultata odabran broj suseda $k=4$, za koji razlika između srednje vrednosti greške lokalizacije i srednje vrednosti sa brojem suseda $k=5$ manja od $|\varepsilon| < 0,01$ m.

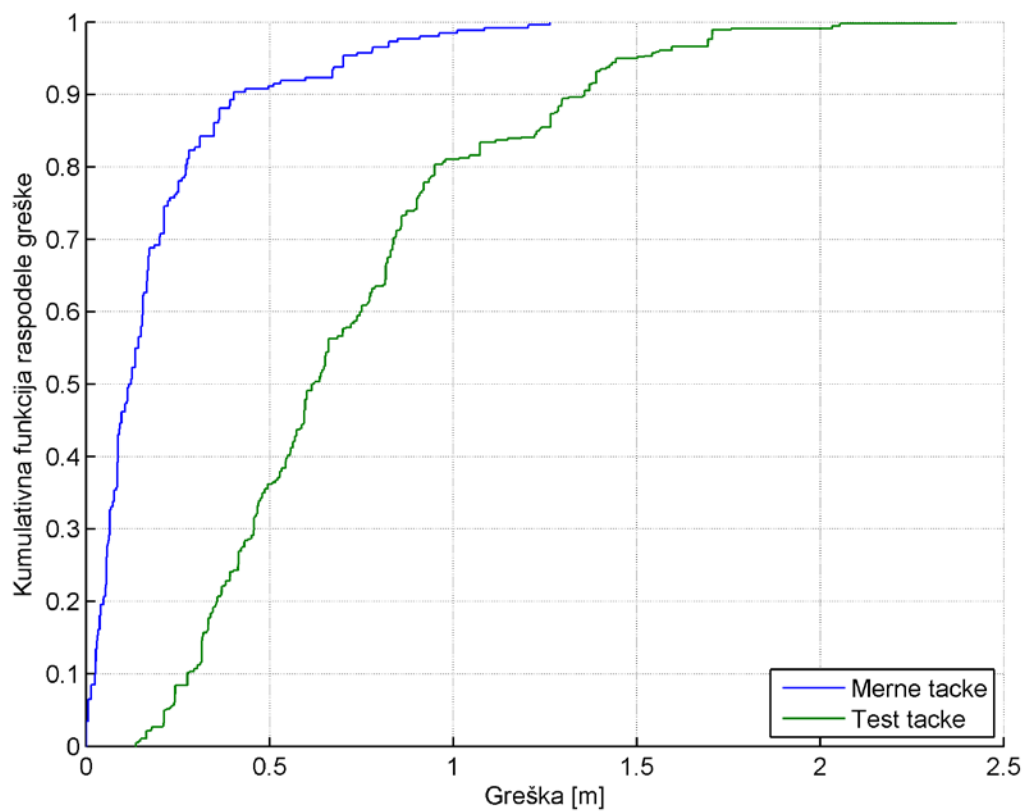
Tabela 36 daje deskriptivne statističke pokazatelje izračunatih grešaka lokalizacije, dok su kumulativne funkcije raspodele greške date na slici 67, za uzorke RSSI vrednosti u mernim i u test tačkama. Srednja vrednost greške lokalizacije za uzorak u mernim tačkama je 0,19 m, a u test tačkama 0,71 m. Za uzorak u mernim tačkama moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,12 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,4 m sa verovatnoćom od 90%, a za uzorak u test tačkama moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,62 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,36 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 36. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod najbližih suseda u bežičnoj senzorskoj mreži, za broj suseda $k=4$, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Merne tačke	0,19	0,12	0,22	0	1,26
Test tačke	0,71	0,62	0,4	0,14	2,37



Slika 66. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja suseda u bežičnoj senzorskoj mreži

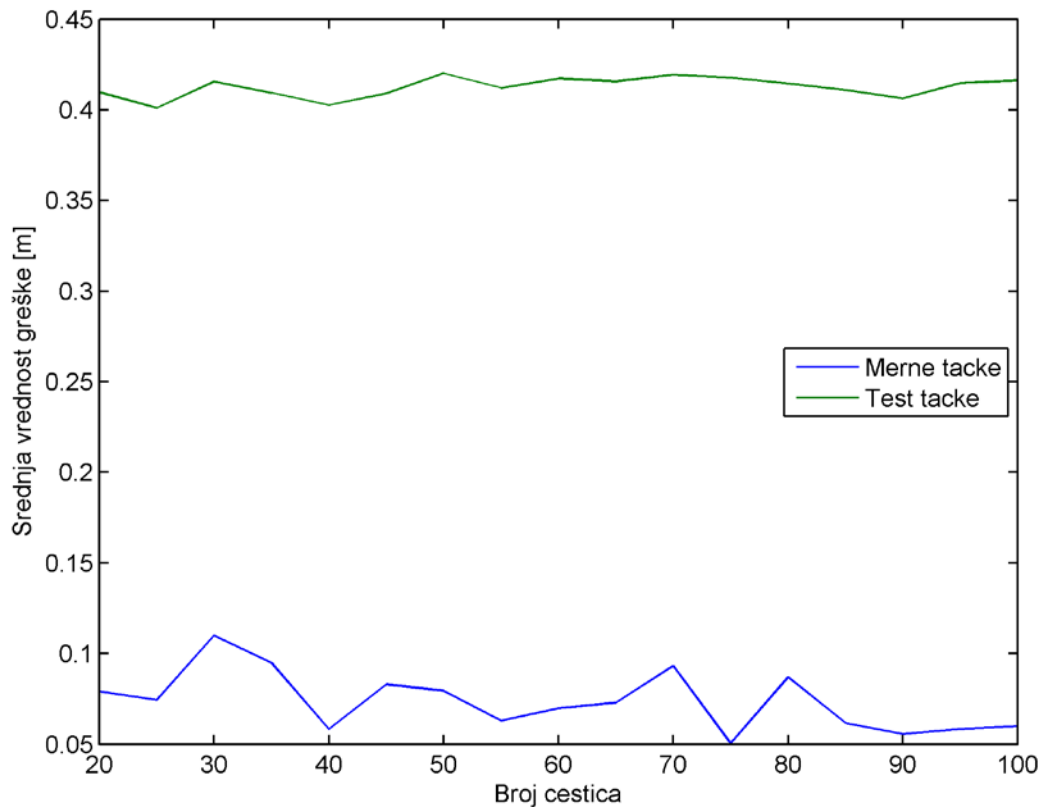


Slika 67. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod najbližih suseda u bežičnoj senzorskoj mreži

4.5.3 Metod optimizacije rojem čestica

4.5.3.1 Primena metoda optimizacije rojem čestica u RFID sistemu

Za kalibraciju metoda optimizacije rojem čestica, potrebno je odrediti optimalan broj čestica. Analizirane su srednje vrednosti greške lokalizacije sa brojem čestica od 20 do 100, a dobijena zavisnost je prikazana na slici 68. Kao i u slučaju test laboratorije, vidi se da nema velikih razlika u zavisnosti od broja čestica, pa je zbog što kraćeg vremena izvršavanja algoritma odabrano $M=20$ čestica.

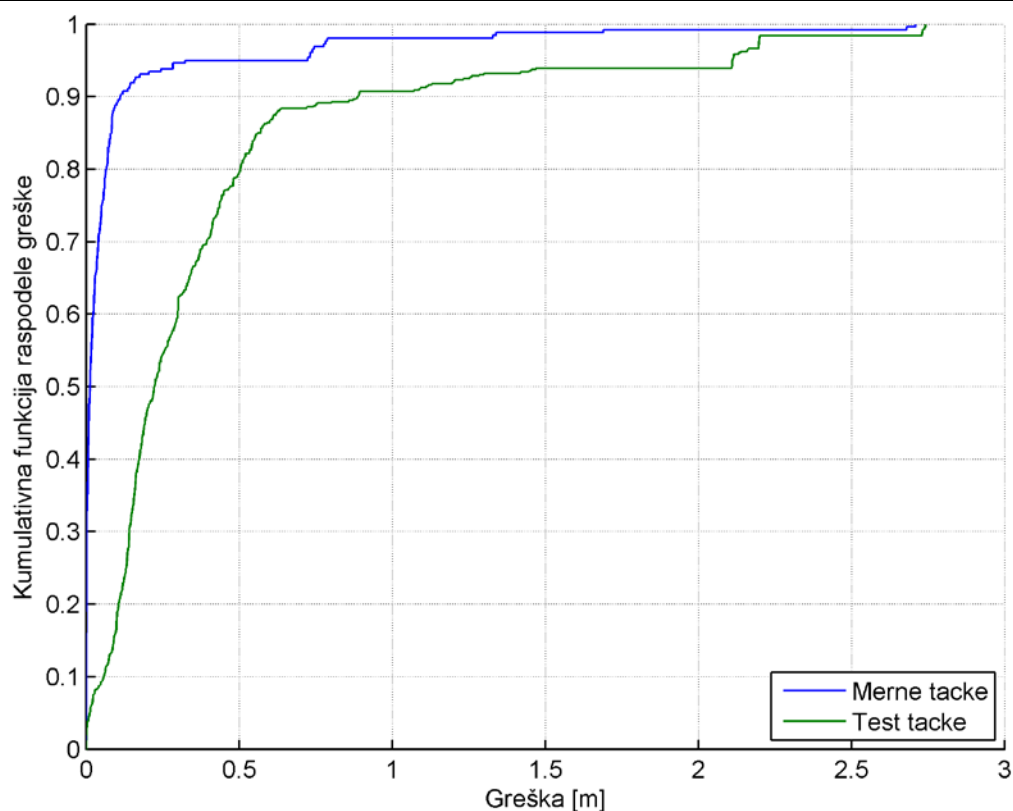


Slika 68. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja čestica u RFID sistemu

U tabeli 37 su dati deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije, a na slici 69 su prikazane kumulativne funkcije raspodele greške, za uzorke RSSI vrednosti u mernim i u test tačkama. Srednja vrednost greške lokalizacije za uzorak u mernim tačkama je 0,09 m, a u test tačkama 0,41 m. Za uzorak u mernim tačkama moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,01 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,11 m sa verovatnoćom od 90%, a za uzorak u test tačkama moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,22 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,89 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 37. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod optimizacije rojem čestica u RFID sistemu, za broj čestica $M=20$, dati u [m]

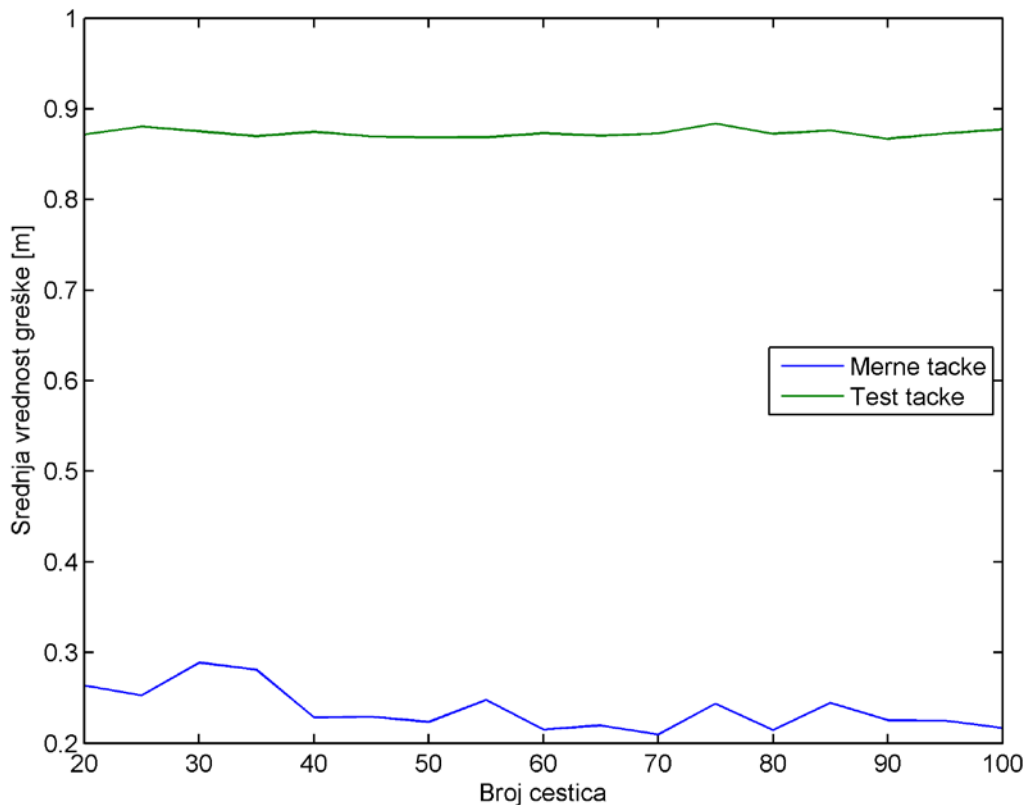
	Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Merne tačke	0,09	0,01	0,31	0	2,71
Test tačke	0,41	0,22	0,55	0	2,74



Slika 69. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod optimizacije rojem čestica u RFID sistemu

4.5.3.2 Primena metoda optimizacije rojem čestica u bežičnoj senzorskoj mreži

Kako bi se odredio optimalan broj čestica, analizirane su srednje vrednosti greške lokalizacije u zavisnosti od broja čestica za RSSI vrednosti koje su izmerene u mernim, odnosno test tačkama. Slika 70 prikazuje dobijenu zavisnost, na osnovu koje se vidi da srednja vrednost greške osciluje, ali se ne menja mnogo u zavisnosti od korišćenog broja čestica, iz čega se može zaključiti da je dovoljan broj $M=20$ čestica.

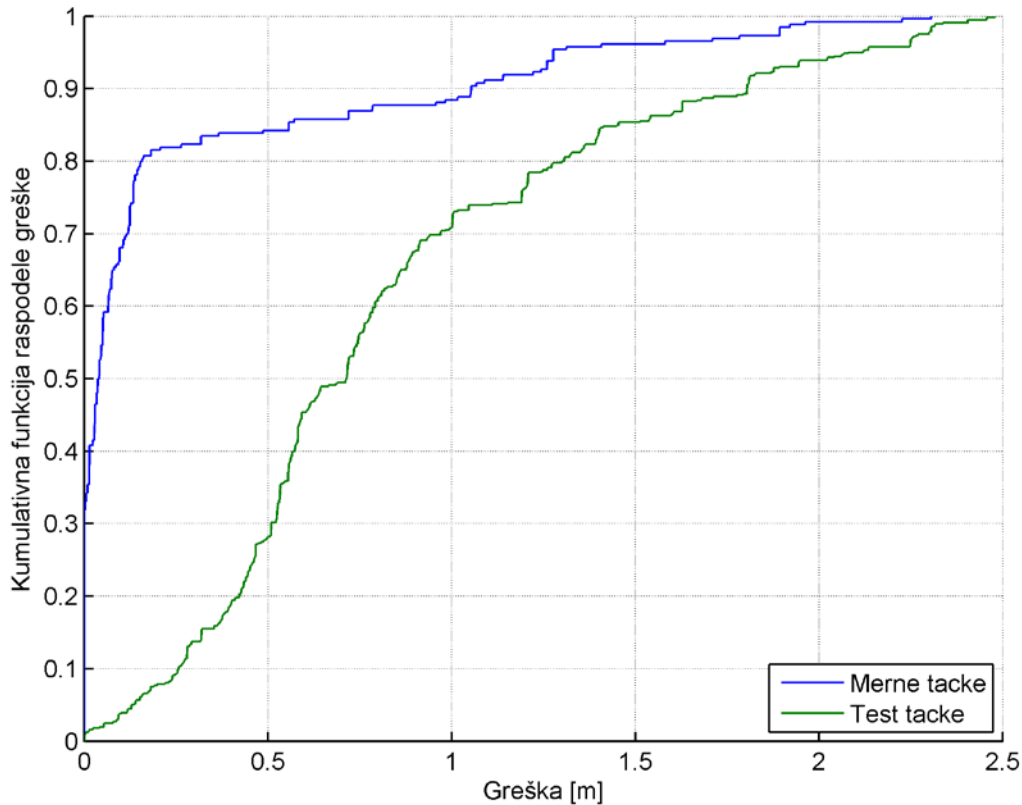


Slika 70. Zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije i broja čestica u bežičnoj senzorskoj mreži

Tabela 38 prikazuje deskriptivne statističke pokazatelje izračunatih grešaka lokalizacije, a na slici 71 su prikazane kumulativne funkcije raspodele greške, za uzorke RSSI vrednosti u mernim i u test tačkama. Srednja vrednost greške lokalizacije za uzorak u mernim tačkama je 0,24 m, a u test tačkama 0,84 m. Za uzorak u mernim tačkama moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,04 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,05 m sa verovatnoćom od 90%, dok je za uzorak u test tačkama moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 0,71 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,8 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 38. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod optimizacije rojem čestica u bežičnoj senzorskoj mreži, za broj čestica $M=20$, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Merne tačke	0,24	0,04	0,48	0	2,31
Test tačke	0,84	0,71	0,57	0	2,48



Slika 71. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod optimizacije rojem čestica u bežičnoj senzorskoj mreži

4.5.4 Metod PF_WKNN_PSO

Za kalibraciju metoda PF_WKNN_PSO za fuziju podataka dobijenih metodom najbližih suseda i metodom optimizacije rojem čestica potrebno je odrediti verovatnoću da se stvarna pozicija proizvoda nalazi na određenom rastojanju od koordinata procenjenih na osnovu svakog od ova dva metoda, pri čemu su rastojanja podeljena u intervale do 0,5 m, od 0,5 do 1 m, od 1 do 1,5 m, od 1,5 do 2 m, od 2 do 2,5 m, od 2,5 do 3 m i od 3 do 3,5 m. U tabeli 39 prikazane su verovatnoće određene pri lokalizaciji na osnovu oba metoda, i za RFID sistem i za bežičnu senzorsku mrežu, kako za merne tačke, tako i za test tačke.

U eksperimentima su vršena testiranja sa parametrom $P_{MT} = 0,5$, odnosno za slučaj kad je jednako verovatno da se proizvod nalazi u mernim tačkama ili van njih.

Tabela 39. Verovatnoća da se stvarna pozicija proizvoda nalazi na rastojanju d od koordinata dobijenih primenom metoda najbližih suseda i optimizacije rojem čestica

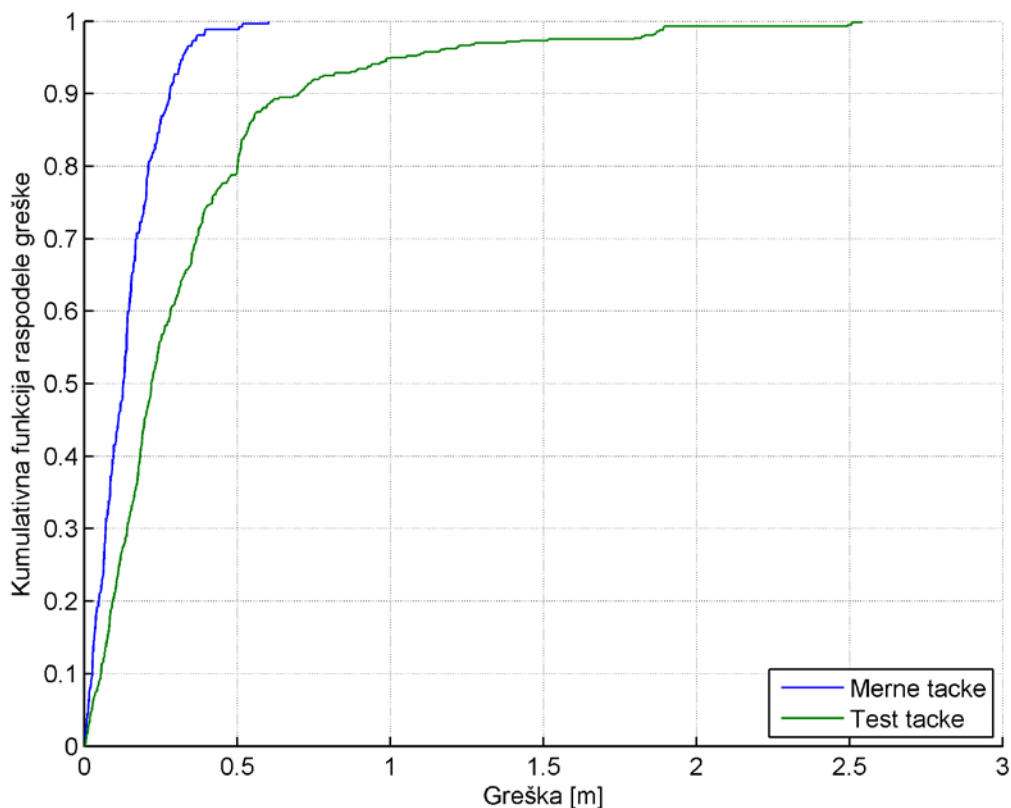
	RFID sistem				Bežična senzorska mreža			
	Metod najbližih suseda		Optimizacija rojem čestica		Metod najbližih suseda		Optimizacija rojem čestica	
	Merne tačke	Test tačke	Merne tačke	Test tačke	Merne tačke	Test tačke	Merne tačke	Test tačke
$d < 0,5$ m	0,98	0,77	0,95	0,8	0,91	0,36	0,84	0,28
$0,5$ m $< d < 1$ m	0,02	0,16	0,03	0,11	0,07	0,45	0,04	0,43
1 m $< d < 1,5$ m	0	0,07	0,01	0,03	0,02	0,14	0,08	0,14
$1,5$ m $< d < 2$ m	0	0	0	0	0	0,04	0,03	0,09
2 m $< d < 2,5$ m	0	0	0	0,04	0	0,01	0,01	0,06
$2,5$ m $< d < 3$ m	0	0	0,01	0,02	0	0	0	0
3 m $< d < 3,5$ m	0	0	0	0	0	0	0	0

4.5.4.1 Primena metoda PF_WKNN_PSO u RFID sistemu

U tabeli 40 dat je prikaz deskriptivnih statističkih pokazatelja greške lokalizacije za uzorke RSSI vrednosti u mernim i u test tačkama, a na slici 72 su date odgovarajuće kumulativne funkcije raspodele greške. Srednja vrednost greške lokalizacije za uzorak u mernim tačkama je 0,14 m, a u test tačkama 0,34 m. Za uzorak u mernim tačkama moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,13 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,28 m sa verovatnoćom od 90%, a za uzorak u test tačkama moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,22 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,7 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 40. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u RFID sistemu, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Merne tačke	0,14	0,13	0,1	0	0,6
Test tačke	0,34	0,22	0,38	0	2,54



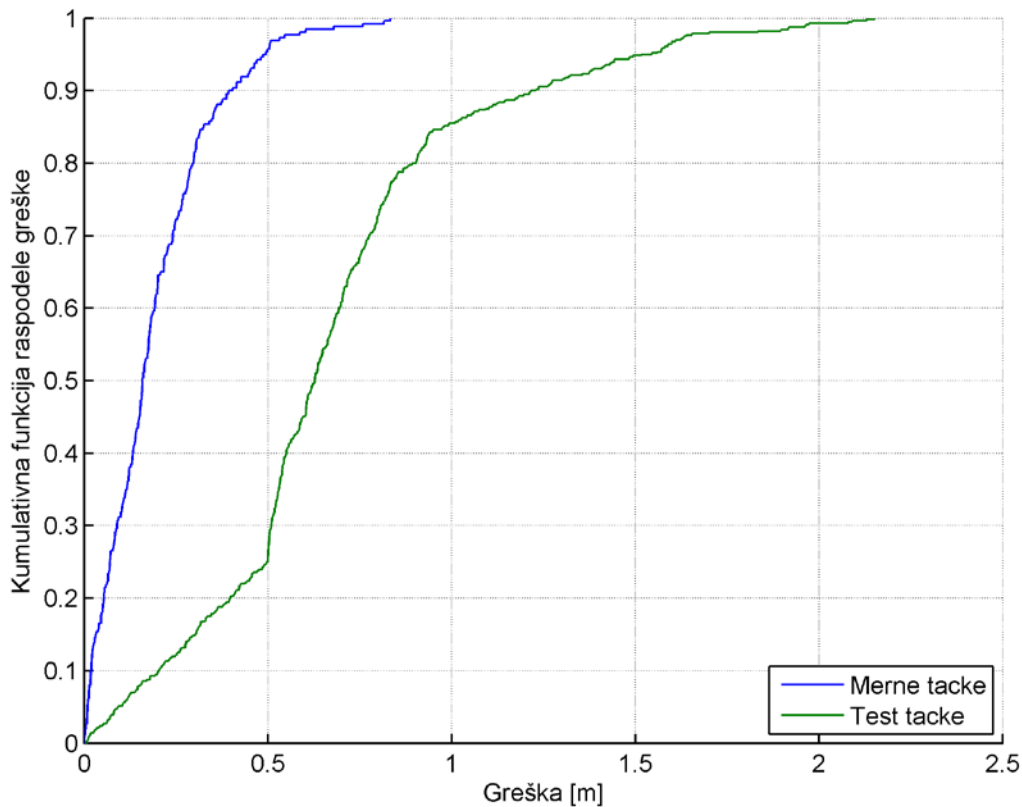
Slika 72. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO u RFID sistemu

4.5.4.2 Primena metoda PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži

U tabeli 41 prikazani su deskriptivni statistički pokazatelji greške lokalizacije za uzorke RSSI vrednosti u mernim i u test tačkama, a na slici 73 su date odgovarajuće kumulativne funkcije raspodele greške. Srednja vrednost greške lokalizacije za uzorak u mernim tačkama je 0,19 m, a u test tačkama 0,68 m. Za uzorak u mernim tačkama moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,16 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,39 m sa verovatnoćom od 90%, a za uzorak u test tačkama moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,63 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 1,22 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 41. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Merne tačke	0,19	0,16	0,15	0	0,83
Test tačke	0,68	0,63	0,39	0	2,15



Slika 73. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži

4.5.5 Metod PF_RFID_WSN

Za kalibraciju metoda PF_RFID_WSN za fuziju podataka dobijenih u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži određene su verovatnoće da se stvarna pozicija proizvoda nalazi na određenom rastojanju od koordinata procenjenih metodom PF_WKNN_PSO na osnovu svake tehnologije zasebno, i to za rastojanja do 0,5 m, od 0,5 do 1 m, od 1 do 1,5 m, od 1,5 do 2 m, od 2 do 2,5 m, od 2,5 do 3 m i od 3 do 3,5 m. U tabeli 42 prikazane su verovatnoće određene pri lokalizaciji na osnovu metoda PF_WKNN_PSO, i za RFID sistem i za bežičnu senzorsku mrežu, kako za merne tačke, tako i za test tačke.

U eksperimentima su vršena testiranja sa parametrom $P_{MT} = 0,5$, odnosno za slučaj kad je jednako verovatno da se proizvod nalazi u mernim tačkama ili van njih.

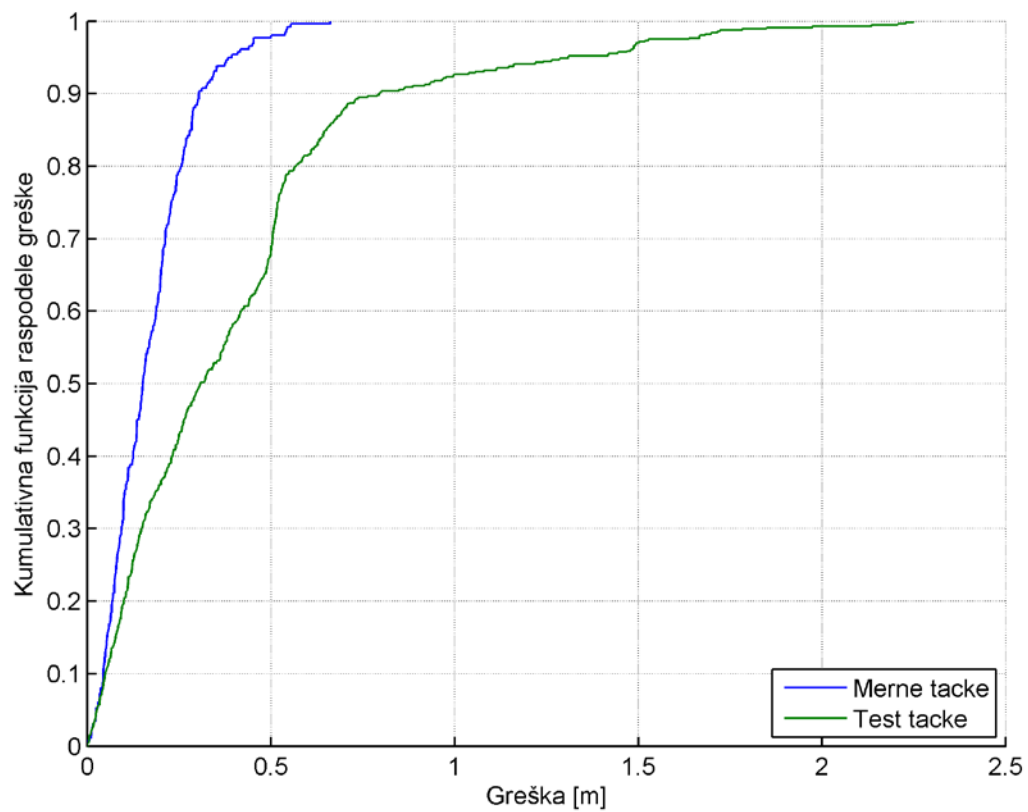
Tabela 42. Verovatnoća da se stvarna pozicija proizvoda nalazi na rastojanju d od koordinata dobijenih u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži

	RFID sistem		Bežična senzorska mreža	
	Merne tačke	Test tačke	Merne tačke	Test tačke
$d < 0,5$ m	0,99	0,79	0,96	0,25
$0,5$ m $< d < 1$ m	0,01	0,16	0,04	0,61
1 m $< d < 1,5$ m	0	0,02	0	0,09
$1,5$ m $< d < 2$ m	0	0,02	0	0,04
2 m $< d < 2,5$ m	0	0,01	0	0,01
$2,5$ m $< d < 3$ m	0	0	0	0
3 m $< d < 3,5$ m	0	0	0	0

Tabela 43 prikazuje deskriptivne statističke pokazatelje izračunatih grešaka lokalizacije za uzorke podataka izmerenih u mernim i test tačkama, dok su odgovarajuće kumulativne funkcije raspodele greške date na slici 74. Srednja vrednost greške za uzorak u mernim tačkama iznosi 0,17 m, dok je za uzorak u test tačkama ta vrednost 0,41 m. Za uzorak u mernim tačkama, moguće je odrediti poziciju proizvoda unutar 0,15 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,3 m sa verovatnoćom od 90%, dok je za uzorak u test tačkama moguće odrediti poziciju proizvoda unutar 0,31 m sa verovatnoćom od 50%, odnosno 0,8 m sa verovatnoćom od 90%.

Tabela 43. Deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka za metod PF_RFID_WSN, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Merne tačke	0,17	0,15	0,12	0	0,66
Test tačke	0,41	0,31	0,39	0	2,25



Slika 74. Kumulativna funkcija raspodele greške za metod PF_RFID_WSN

5 DISKUSIJA

Mogućnosti primene modela MLPIS za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari, predstavljenog u 3. poglavlju, ispitivane su eksperimentalno u poglavlju 4, sa ciljem da se utvrdi opravdanost postavke najniža tri nivoa modela, koji su od suštinske važnosti za praktičnu primenu predloženog modela. Neophodno je bilo ispitati mogućnosti korišćenja odabranih tehnologija, na način opisan u postavci modela MLPIS, u okruženju u kom postoje realne smetnje koje se mogu očekivati u industrijskim uslovima, pa samim tim i u prostorima za skladištenje proizvoda, kao što su prisustvo velike količine metala i industrijskih uređaja, koji u zatvorenom prostoru izazivaju dodatno slabljenje signala, refleksiju signala, interferenciju različitih signala, prostiranje signala po više putanja, itd. Ispitivane su mogućnosti adekvatne postavke RFID sistema i bežične senzorske mreže u test laboratoriji i u industrijskoj laboratoriji, kako bi se što bolje ispitali uslovi koji se mogu naći u realnom sistemu u okviru prostora za skladištenje proizvoda. Proverene su mogućnosti obeležavanja samih proizvoda putem postavljanja RFID uređaja i bežičnih senzorskih modula, kao i mogućnosti adekvatnog postavljanja referentnih tačaka za oba sistema u laboratorijskom okruženju. Zatim, testirane su mogućnosti komunikacije i prenosa podataka unutar RFID sistema i bežične senzorske mreže i u test laboratoriji i u industrijskoj laboratoriji. Ovo je značajno kako bi se opravdalo korišćenje svake od ove dve tehnologije u različitim uslovima sredine u kojoj postoje realne smetnje za propagaciju radio talasa, kao i korišćenje ove dve tehnologije u kombinaciji. Eksperimentalno ispitivanje je pokazalo da je moguće na adekvatan način obeležiti proizvod RFID tagovima, i postaviti mobilni bežični

senzorski modul, kao i referentne tačke i za RFID sistem i za bežičnu senzorsku mrežu, tako da se omogući nesmetana komunikacija između referentnih tačaka i tražene tačke, odnosno samog proizvoda. Može se zaključiti da predloženi UHF RFID sistem i bežična senzorska mreža, čiji moduli komuniciraju na 2,4 GHz, mogu nezavisno da funkcionišu u istoj okolini, ne ometajući uzajamno komunikaciju, pošto je utvrđeno se prenos podataka i u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži odvija nesmetano, i upravljačka jedinica dobija potpune i ispravne podatke iz oba sistema. Zatim, ispitivane su mogućnosti direktne obrade podataka na mestu prikupljanja podataka, odnosno u upravljačkoj jedinici za dati deo sistema, kao i mogućnosti korišćenja hibridnog metoda PF_WKNN_PSO i kombinovane primene RFID tehnologije i bežične senzorske mreže metodom PF_RFID_WSN, predstavljenih u okviru predloženog modela MLPIS. Utvrđeno je da je moguće izvršiti adekvatnu obradu podataka u odgovarajućem vremenu između prikupljanja uzastopnih uzoraka RSSI vrednosti, kao i da je moguće koristiti predložene metode za lokalizaciju proizvoda, s tim da analiza tačnosti i preciznosti lokalizacije njihovom upotrebom sledi u nastavku teksta.

Na osnovu svega navedenog, može se zaključiti da je potvrđena hipoteza H1, odnosno da je moguće postaviti model za lokalizaciju proizvoda kombinovanom primenom RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža.

Kako bi se proverile hipoteze H2 i H3, nakon sprovedenih eksperimentalnih istraživanja u simuliranim sistemima, test laboratoriji i industrijskoj laboratoriji, potrebno je izvršiti uporednu analizu rezultata dobijenih različitim metodima za lokalizaciju proizvoda. Parametri koji mogu da se koriste za procenu lokalizacionog metoda, opisani u poglavlju 2.3.3, su: tačnost, preciznost, kompleksnost lokalizacionog sistema, skalabilnost sistema, robustnost sistema i cena praktične implementacije lokalizacionog metoda. U uporednoj analizi testiranih metoda za lokalizaciju proizvoda, porediće se tačnost i preciznost metoda, kao najvažniji parametri u sistemima za lokalizaciju. Tačnost je određena kao srednja vrednost greške lokalizacije (kao što je predloženo u [18] i [23]), a preciznost metoda je posmatrana kroz grešku na 90. percentilu (kao što je predloženo u [24], [84] i [103]) i maksimalnu vrednost greške lokalizacije.

Analiza je sprovedena posebno za metode ispitivane u prvoj fazi istraživanja, kako bi se utvrdio najbolji pojedinačni metod za lokalizaciju proizvoda, a zatim je izvršena analiza za metode PF_WKNN_PSO i PF_RFID_WSN predložene u okviru modela MLPIS i ispitivane u

drugoj i trećoj fazi istraživanja, pri čemu su rezultati dobijeni primenom metoda PF_WKNN_PSO i PF_RFID_WSN poređeni sa rezultatima dobijenim primenom metoda koji se koriste u hibridnim metodima PF_WKNN_PSO i PF_RFID_WSN.

Uporedna analiza deskriptivnih statističkih pokazatelja za metode ispitivane u prvoj fazi istraživanja data je u tabelama 44 i 45 za simulirane sisteme, pri čemu je za sve parametre uzeta maksimalna dobijena vrednost u sva tri simulirana sistema, dok je u tabelama 46 i 47 data uporedna analiza deskriptivnih statističkih pokazatelja za vrednosti u test laboratoriji, za uzorke RSSI vrednosti u mernim i u test tačkama, respektivno.

Za merne tačke u simuliranim sistemima (tabela 44), najveću tačnost i preciznost u RFID sistemu postiže čestični filter, dok u bežičnoj senzorskoj mreži najveću tačnost postiže metod optimizacije rojem čestica, a najveću preciznost metod najbližih suseda. Za test tačke (tabela 45) u simuliranim sistemima, najveću tačnost i preciznost i u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži postiže metod najbližih suseda. Iako su čestičnim filtrom u RFID sistemu za merne tačke dobijeni najbolji rezultati, ovaj metod se pokazuje kao najlošiji metod za test tačke, i po pitanju tačnosti i preciznosti.

Za merne tačke u test laboratoriji (tabela 46) u RFID sistemu, najveću tačnost daje metod optimizacije rojem čestica, kao i preciznost posmatrajući vrednost na 90. percentilu, dok je najveća preciznost, posmatrajući maksimalnu grešku lokalizacije dobijena za čestični filter. U bežičnoj senzorskoj mreži u ovom slučaju, kao najtačniji i najprecizniji na 90. percentilu se pokazuje čestični filter, a kao najprecizniji posmatrajući maksimalne greške lokalizacije metod najbližih suseda. Kao i kod simuliranih sistema, i za test tačke u test laboratoriji (tabela 47) kao najtačniji i najprecizniji pokazao se metod najbližih suseda.

Sveukupno gledano, kao najbolji od analizirana četiri metoda u većini slučajeva pokazuje se metod najbližih suseda, dok se najlošiji parametri dobijaju za metod multilateracije. Međutim, nijedan od ponuđenih metoda ne daje najbolje rezultate u svim ispitivanim slučajevima, kako za RFID sistem, tako ni za bežičnu senzorsku mrežu. Ovaj zaključak ukazuje na potrebu za kombinovanjem rezultata dobijenih lokalizacijom putem različitih metoda, što potvrđuje i dosadašnja istraživanja u ovoj oblasti. Stoga, opravdan je predlog za fuziju podataka o poziciji proizvoda dobijenih različitim metodama, koji je dat u okviru modela MLPIS za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari.

Tabela 44. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za simulirane vrednosti u mernim tačkama za metode testirane u prvoj fazi istraživanja, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
RFID sistem					
Multilateracija	1,43	1,42	2,24	0,18	3,17
WKNN ¹	0,34	0,24	0,77	0,01	1,85
PSO ²	0,64	0,03	2,5	0	4,23
Čestični filter	0,09	0,07	0,2	0	0,49
Bežična senzorska mreža					
Multilateracija	1,44	1,36	2,63	0,21	3,8
WKNN	0,51	0,43	1,02	0,01	2,44
PSO	0,39	0,04	1,82	0	4,6
Čestični filter	0,44	0,08	2,06	0	3,61

Tabela 45. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za simulirane vrednosti u test tačkama za metode testirane u prvoj fazi istraživanja, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
RFID sistem					
Multilateracija	1,43	1,42	2,24	0,18	3,17
WKNN	1,22	1,21	1,95	0,04	3,01
PSO	1,63	1,56	2,8	0,01	4,51
Čestični filter	1,66	1,63	2,75	0,08	3,83
Bežična senzorska mreža					
Multilateracija	1,44	1,36	2,63	0,21	3,8
WKNN	1,06	1,01	1,73	0,07	2,92
PSO	1,41	1,32	2,49	0,04	4,57
Čestični filter	1,76	1,63	3,13	0,05	4,31

¹ Metod najbližih suseda

² Metod optimizacije rojem čestica

Tabela 46. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u mernim tačkama u test laboratoriji za metode testirane u prvoj fazi istraživanja, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
RFID sistem					
Multilateracija	1,33	1,15	2,65	0,05	3,17
WKNN	0,12	0,07	0,31	0	0,78
PSO	0,06	0,02	0,12	0	1,54
Čestični filter	0,09	0,07	0,2	0	0,72
Bežična senzorska mreža					
Multilateracija	1,48	1,39	2,4	0,22	3,56
WKNN	0,55	0,48	1,11	0	2,51
PSO	0,42	0,06	1,51	0	3,61
Čestični filter	0,25	0,08	0,29	0	4,27

Tabela 47. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u test tačkama u test laboratoriji za metode testirane u prvoj fazi istraživanja, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
RFID sistem					
Multilateracija	1,33	1,15	2,65	0,05	3,17
WKNN	0,62	0,59	1,23	0,01	1,78
PSO	1,01	0,83	1,96	0,16	3,06
Čestični filter (R)	1,24	1,14	2,36	0,07	2,93
Bežična senzorska mreža					
Multilateracija	1,48	1,39	2,4	0,22	3,56
WKNN	1,42	1,4	2,26	0,11	2,76
PSO	1,77	1,8	2,56	0,29	3,69
Čestični filter (R)	1,65	1,61	2,87	0,06	3,8

Zatim, izvršena je analiza deskriptivnih statističkih pokazatelja za metode ispitivane u drugoj i trećoj fazi istraživanja, odnosno vrednosti greške lokalizacije za metod PF_WKNN_PSO, za fuziju podataka dobijenih primenom metoda najbližih suseda i optimizacije rojem čestica, i metod PF_RFID_WSN za fuziju podataka dobijenih u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži.

Za analizu parametara greške lokalizacije dobijenih primenom metoda PF_WKNN_PSO, dobijeni parametri su poređeni sa parametrima dobijenim posebno metodom najbližih suseda i metodom optimizacije rojem čestica, čiji izlazni podaci se koriste kao ulazni podaci metoda PF_WKNN_PSO. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji za simulirane sisteme dati su u tabelama 48 i 49, za RSSI vrednosti koje su simulirane u mernim i u test tačkama. Tabele 50 i 51 prikazuju uporedne deskriptivne statističke pokazatelje za test laboratoriju, za RSSI vrednosti izmerene u mernim i u test tačkama, dok su u tabelama 52 i 53 dati uporedni deskriptivni statistički pokazatelji za industrijsku laboratoriju, za RSSI vrednosti izmerene u mernim i u test tačkama.

U simuliranim sistemima, za RSSI vrednosti simulirane u mernim tačkama (tabela 48), pokazuje se da metod PF_WKNN_PSO daje tačniju i precizniju estimaciju pozicije proizvoda nego metod najbližeg suseda ili metod optimizacije rojem čestica. Za RSSI vrednosti simulirane u test tačkama (tabela 49), za RFID sistem se pokazuje da je metod PF_WKNN_PSO tačniji i precizniji, dok se za bežičnu senzorsku mrežu pokazuje da je precizniji, međutim ne i tačniji. Ono što treba primetiti je da je i u ovom slučaju dobijena srednja vrednost greške od 1,18 m bliža vrednosti dobijenoj primenom metoda najbližih suseda od 1,06 m, nego vrednosti dobijenoj primenom metoda optimizacije rojem čestica od 1,41 m, odnosno tačnost dobijena metodom PF_WKNN_PSO je približnija boljoj dobijenoj tačnosti korišćenjem samo jednog od ulaznih metoda.

Za test laboratoriju, poređenjem dobijenih deskriptivnih statističkih pokazatelja izračunatih grešaka lokalizacije za merne tačke (tabela 50) moguće je ustanoviti da se u RFID sistemu dobija neznatno lošija tačnost. Vrednost na 90. percentilu se u ovom slučaju nalazi između dve vrednosti dobijene metodom najbližih suseda i metodom optimizacije rojem čestica, dok je maksimalna vrednost greške značajno smanjena. U ovim tačkama su i vrednosti greške lokalizacije male u svim testiranim slučajevima, tako da je i razlika između tačnosti ispitivanih metoda mala. Za test tačke u RFID sistemu (tabela 51), dobija se srednja vrednost greške koja je bliža vrednosti dobijenoj metodom najbližih suseda nego vrednosti

dobijenoj metodom optimizacije rojem čestica. Isto važi i za vrednost na 90. percentilu, a maksimalna dobijena vrednost greške se nalazi bliže vrednosti dobijenoj metodom optimizacije rojem čestica, nego metodom najbližih suseda. Za bežičnu senzorsku mrežu, i u mernim i u test tačkama (tabele 50 i 51), metodom PF_WKNN_PSO se dobija i bolja tačnost i preciznost sistema nego metodima najbližih suseda i optimizacije rojem čestica.

Tabela 48. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za simulirane vrednosti u mernim tačkama, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
RFID sistem					
WKN	0,34	0,24	0,77	0,01	1,85
PSO	0,64	0,03	2,5	0	4,23
PF_WKNN_PSO	0,33	0,24	0,73	0,01	1,65
Bežična senzorska mreža					
WKNN	0,51	0,43	1,02	0,01	2,44
PSO	0,39	0,04	1,82	0	4,6
PF_WKNN_PSO	0,3	0,22	0,58	0,02	2,17

Tabela 49. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za simulirane vrednosti u test tačkama, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
RFID sistem					
WKNN	1,22	1,21	1,95	0,04	3,01
PSO	1,63	1,56	2,8	0,01	4,51
PF_WKNN_PSO	1,16	1,2	1,78	0,09	2,68
Bežična senzorska mreža					
WKNN	1,06	1,01	1,73	0,07	2,92
PSO	1,41	1,32	2,49	0,04	4,57
PF_WKNN_PSO	1,18	1,21	1,74	0,04	2,17

Tabela 50. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u mernim tačkama u test laboratoriji, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
RFID sistem					
WKNN	0,12	0,07	0,31	0	0,78
PSO	0,06	0,02	0,12	0	1,54
PF_WKNN_PSO	0,17	0,17	0,3	0	0,5
Bežična senzorska mreža					
WKNN	0,55	0,48	1,11	0	2,51
PSO	0,42	0,06	1,51	0	3,61
PF_WKNN_PSO	0,32	0,25	0,62	0,01	1,43

Tabela 51. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u test tačkama u test laboratoriji, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
RFID sistem					
WKNN	0,62	0,59	1,23	0,01	1,78
PSO	1,01	0,83	1,96	0,16	3,06
PF_WKNN_PSO (R)	0,74	0,65	1,28	0,09	2,52
Bežična senzorska mreža					
WKNN	1,42	1,4	2,26	0,11	2,76
PSO	1,77	1,8	2,56	0,29	3,69
PF_WKNN_PSO (R)	1,33	1,32	2,16	0,02	2,74

U industrijskoj laboratoriji se, slično kao i u test laboratoriji, za RFID sistem za merne tačke (tabela 52) dobija nešto lošija tačnost, isto kao i preciznost određena na osnovu vrednosti na 90. percentilu, dok je maksimalna vrednost greške značajno smanjena. Kao i u test laboratoriji, i u industrijskoj laboratoriji su vrednosti greške lokalizacije u ovim tačkama male u svim slučajevima, tako da je i razlika između tačnosti testiranih metoda mala. Za RSSI vrednosti izmerene u test tačkama u RFID sistemu (tabela 53), dobijaju se tačnije estimacije

pozicije, kao i preciznije estimacije određene na osnovu vrednosti na 90. percentilu, dok se maksimalna vrednost greške nalazi bliže vrednosti dobijenoj metodom optimizacije rojem čestica, nego metodom najbližih suseda. Za RSSI vrednosti izmerene u bežičnoj senzorskoj mreži, kako za merne tačke, tako i za test tačke (tabele 52 i 53), primenom metoda PF_WKNN_PSO dobija se i poboljšana tačnost i preciznost sistema lokalizacije.

Tabela 52. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u mernim tačkama u industrijskoj laboratoriji, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
RFID sistem					
WKNN	0,08	0,03	0,2	0	0,95
PSO	0,09	0,01	0,11	0	2,71
PF_WKNN_PSO	0,14	0,13	0,28	0	0,6
Bežična senzorska mreža					
WKNN	0,19	0,12	0,4	0	1,26
PSO	0,24	0,04	1,05	0	2,31
PF_WKNN_PSO	0,19	0,16	0,39	0	0,83

Tabela 53. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u test tačkama u industrijskoj laboratoriji, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
RFID sistem					
WKNN	0,37	0,29	0,79	0	1,38
PSO	0,41	0,22	0,89	0	2,74
PF_WKNN_PSO	0,34	0,22	0,7	0	2,54
Bežična senzorska mreža					
WKNN	0,71	0,62	1,36	0,14	2,37
PSO	0,84	0,71	1,8	0	2,48
PF_WKNN_PSO	0,68	0,63	1,22	0	2,15

Na osnovu svega navedenog, vidi se da je u većini slučajeva primenom metoda PF_WKNN_PSO dobijena i veća tačnost i veća preciznost lokalizacije proizvoda, dok je u slučajevima kada ovo nije ispunjeno, dobijena vrednost greške lokalizacije približnija boljoj vrednosti dobijenoj primenom samo jednog lokalizacionog metoda. U realnom sistemu, kao što je utvrđeno na osnovu analize različitih metoda testiranih u prvoj fazi istraživanja, nije moguće unapred znati u kom slučaju će koji metod dati tačnije i preciznije estimacije pozicije proizvoda, tako da se metodom PF_WKNN_PSO svakako favorizuju bolje vrednosti u svim ispitivanim slučajevima. Nakon sprovedene analize parametara greške lokalizacije, moguće je zaključiti da fuzija podataka dobijenih metodom najbližih suseda i metodom optimizacije rojem čestica, realizovana metodom PF_WKNN_PSO, pozitivno doprinosi tačnosti i preciznosti lokalizacionog sistema i u RFID sistemu, a posebno u bežičnoj senzorskoj mreži. Na ovaj način, potvrđena je hipoteza H2.

Na kraju je izvršena analiza deskriptivnih statističkih pokazatelja dobijenih metodom PF_RFID_WSN, za fuziju podataka dobijenih u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži, pri čemu su rezultati poređeni sa rezultatima dobijenim u svakom od ova dva sistema metodom PF_WKNN_PSO. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije su dati u nastavku, za merne i test tačke respektivno, i to u tabelama 54 i 55 za simulirane sisteme, u tabelama 56 i 57 za test laboratoriju, a u tabelama 58 i 59 za industrijsku laboratoriju.

U simuliranim sistemima, za uzorke u mernim tačkama (tabela 54), dobijena je približno identična, međutim neznatno lošija tačnost lokalizacije u odnosu na tačnost u pojedinačnim sistemima. Preciznost lokalizacije ocenjivana na 90. percentilu je između dobijene preciznosti u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži, pri čemu je vrednost bliža boljem rezultatu, dok je preciznost lokalizacije ocenjivana kroz maksimalne vrednosti greške lokalizacije bolja od preciznosti postignute u oba sistema. Za uzorke u test tačkama u simuliranim sistemima (tabela 55), dobijena je i veća tačnost, i veća preciznost ocenjivana po oba kriterijuma, od tačnosti i preciznosti postignute pojedinačno u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži.

Tabela 54. Upporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za simulirane vrednosti u mernim tačkama, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
PF_WKNN_PSO u RFID sistemu	0,33	0,24	0,73	0,01	1,65
PF_WKNN_PSO u BSM	0,3	0,22	0,58	0,02	2,17
PF_RFID_WSN	0,35	0,32	0,61	0,01	1,13

Tabela 55. Upporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za simulirane vrednosti u test tačkama, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
PF_WKNN_PSO u RFID sistemu	1,16	1,2	1,78	0,09	2,68
PF_WKNN_PSO u BSM	1,18	1,21	1,74	0,04	2,17
PF_RFID_WSN	1,05	1,06	1,59	0,08	2,14

U test laboratoriji, za uzorke RSSI vrednosti izmerene u mernim tačkama (tabela 56), dobijene vrednosti parametara za ocenu tačnosti i preciznosti metoda nalaze se između vrednosti parametara dobijenih u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži pojedinačno. Isti slučaj je i kod uzoraka RSSI vrednosti izmerenih u test tačkama (tabela 57), a treba napomenuti da su vrednosti parametara i za ocenu tačnosti i preciznosti bliže boljim vrednostima parametara lokalizacije dobijenim za pojedinačne sisteme.

Tabela 56. Upporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u mernim tačkama u test laboratoriji, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
PF_WKNN_PSO u RFID sistemu	0,17	0,17	0,3	0	0,5
PF_WKNN_PSO u BSM	0,32	0,25	0,62	0,01	1,43
PF_RFID_WSN	0,29	0,27	0,47	0,01	0,98

Tabela 57. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u test tačkama u test laboratoriji, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
PF_WKNN_PSO u RFID sistemu (R)	0,74	0,65	1,28	0,09	2,52
PF_WKNN_PSO u BSM (R)	1,33	1,32	2,16	0,02	2,74
PF_RFID_WSN (R)	0,78	0,69	1,43	0,02	2,6

Kao i u test laboratoriji, i u industrijskoj laboratoriji su i za uzorke RSSI vrednosti izmerene u mernim (tabela 58) i u test tačkama (tabela 59) dobijeni parametri za tačnost i preciznost lokalizacije čije vrednosti se nalaze između vrednosti parametara dobijenih u pojedinačnim sistemima, pri čemu su vrednosti bliže boljim postignutim vrednostima u pojedinačnim sistemima.

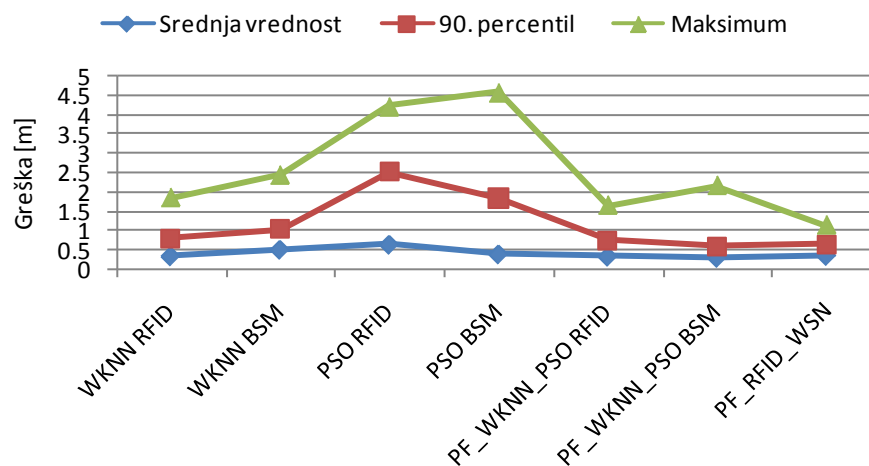
Tabela 58. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u mernim tačkama u industrijskoj laboratoriji, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
PF_WKNN_PSO u RFID sistemu	0,14	0,13	0,28	0	0,6
PF_WKNN_PSO u BSM	0,19	0,16	0,39	0	0,83
PF_RFID_WSN	0,17	0,15	0,3	0	0,66

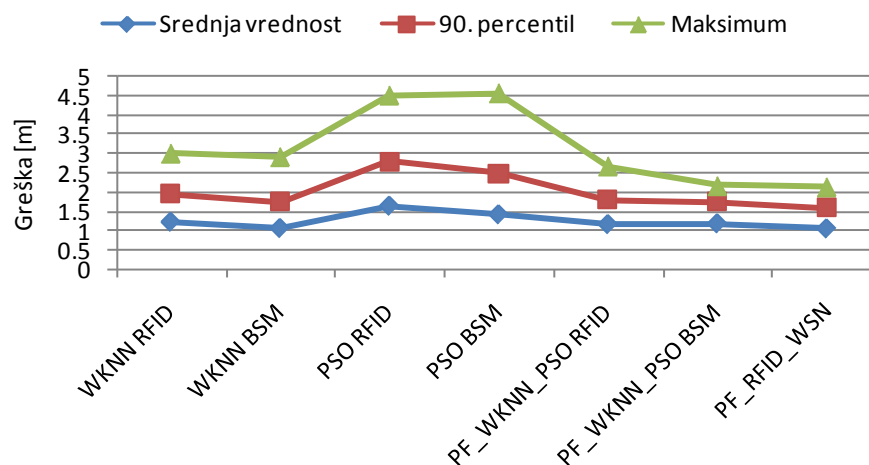
Tabela 59. Uporedni deskriptivni statistički pokazatelji izračunatih grešaka lokalizacije za realno izmerene vrednosti u test tačkama u industrijskoj laboratoriji, dati u [m]

	Srednja vrednost	Medijan	90. percentil	Minimum	Maksimum
PF_WKNN_PSO u RFID sistemu	0,34	0,22	0,7	0	2,54
PF_WKNN_PSO u BSM	0,68	0,63	1,22	0	2,15
PF_RFID_WSN	0,41	0,31	0,8	0	2,25

Kako bi se dodatno prikazao rezultat postignut metodom PF_RFID_WSN, na slikama 75 - 80 su grafički prikazane vrednosti parametara koji određuju tačnost i preciznost lokalizacionog metoda, odnosno srednje vrednosti greške, vrednosti greške na 90. percentilu i maksimalne vrednosti greške, za sve metode koji su korišćeni u hibridnom metodu PF_RFID_WSN, za merne i za test tačke, za simulirane sisteme, test laboratoriju i industrijsku laboratoriju. Parametri su prikazani u zavisnosti od korišćenog metoda za lokalizaciju proizvoda, pri čemu su poredene vrednosti koje su dobijene metodom najbližih suseda, metodom optimizacije rojem čestica i metodom PF_WKNN_PSO i u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži, sa vrednostima dobijenim metodom PF_RFID_WSN. U simuliranim sistemima, vidi se da se metodom PF_RFID_WSN i za merne (slika 75) i za test tačke (slika 76) postižu bolja tačnost i preciznost nego metodima najbližih suseda i optimizacije rojem čestica i u RFID sistemu i u bežičnoj senzorskoj mreži.

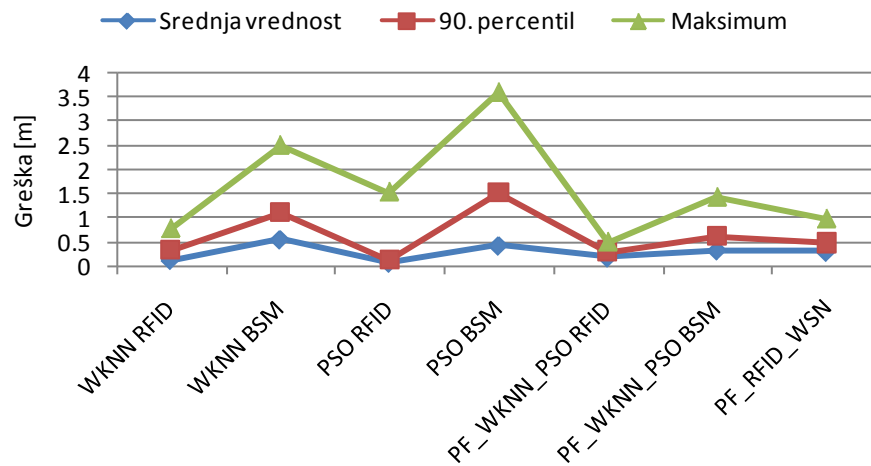


Slika 75. Uporedna analiza parametara tačnosti i preciznosti za merne tačke u simuliranim sistemima

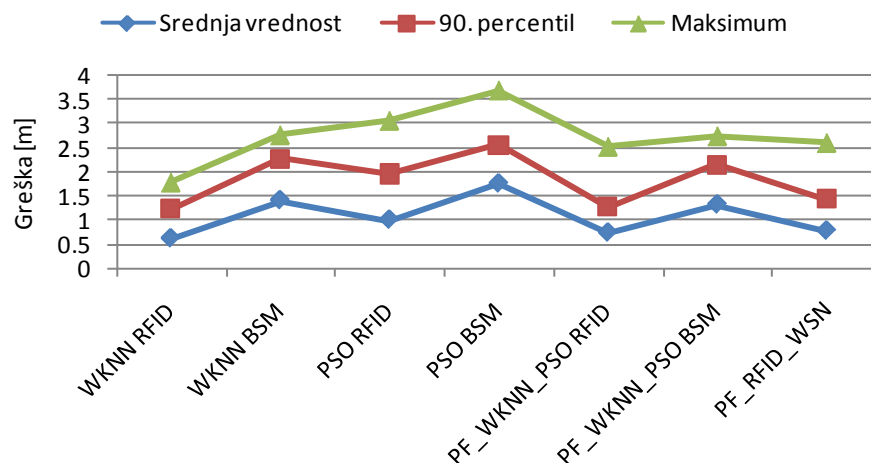


Slika 76. Uporedna analiza parametara tačnosti i preciznosti za test tačke u simuliranim sistemima

U test laboratoriji, i za merne tačke (slika 77) i za test tačke (slika 78) vidi se da su parametri dobijeni metodom PF_RFID_WSN neznatno lošiji od najboljih parametara dobijenih pojedinačnim metodima, međutim, treba uočiti i da su ovim metodom filtrirane vrednosti koje su dobijene u ostalim slučajevima, u kojima se dobijaju znatno lošiji rezultati.

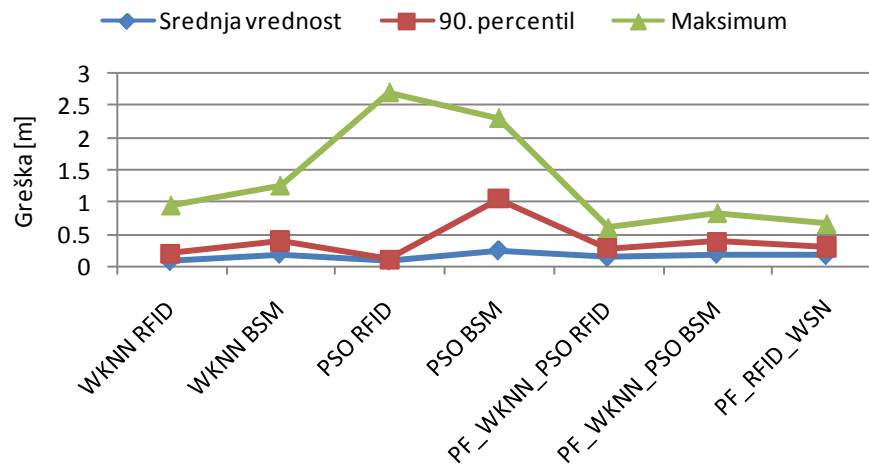


Slika 77. Uporedna analiza parametara tačnosti i preciznosti za merne tačke u test laboratoriji

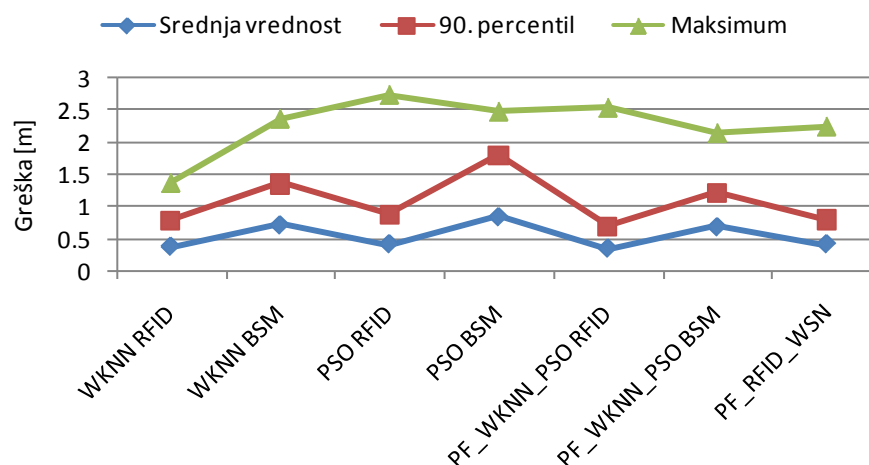


Slika 78. Uporedna analiza parametara tačnosti i preciznosti za test tačke u test laboratoriji

Slična situacija je uočena i u rezultatima dobijenim u industrijskoj laboratoriji, gde se na osnovu slike 79 za merne tačke i slike 80 za test tačke vidi da su parametri dobijeni za metod PF_RFID_WSN bolji ili neznatno lošiji od najboljih parametara dobijenih pojedinačnim metodama. Međutim, kao i u test laboratoriji, i ovde treba primetiti da su metodom PF_RFID_WSN filtrirane znatno lošije vrednosti koje su dobijene u ostalim slučajevima.



Slika 79. Uporedna analiza parametara tačnosti i preciznosti za merne tačke u industrijskoj laboratoriji



Slika 80. Uporedna analiza parametara tačnosti i preciznosti za test tačke u industrijskoj laboratoriji

Na osnovu analize deskriptivnih statističkih pokazatelja lokalizacije, i analize slika 75 - 80, dolazi se do zaključka da su parametri koji određuju tačnost i preciznost lokalizacionog metoda dobijeni metodom PF_RFID_WSN u svim analiziranim slučajevima ili bolji od parametara svih metoda koji su korišćeni ili, ukoliko to nije slučaj, barem na nivou parametara najboljeg od metoda korišćenih u hibridnom metodu PF_RFID_WSN. Ovo je značajno, pošto u realnom sistemu u toku rada nije moguće znati koji metod u određenom momentu daje najtačniju estimaciju pozicije proizvoda i odabrati vrednost dobijenu datim metodom, te je na ovaj način omogućena dovoljno bliska ili čak i bolja procena pozicije u odnosu na metod sa najtačnijom i najpreciznijom procenom pozicije u konkretnom sistemu. Budući da ovaj zaključak važi i za simulirane sisteme i za realne sisteme u test laboratoriji i industrijskoj laboratoriji, odnosno važi pod različitim uslovima i potencijalnim smetnjama iz okoline, može se smatrati kao dovoljno opšti, i preporučiti korišćenje predstavljenog metoda

PF_RFID_WSN za lokalizaciju proizvoda umesto metoda najbližih suseda i optimizacije rojem čestica. Ovim zaključkom potvrđena je hipoteza H3, odnosno tvrdnja da se kombinovanom primenom RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža pozitivno utiče na tačnost i preciznost lokalizacionog metoda.

Iako su potvrđene sve tri hipoteze istraživanja, potrebno je osvrnuti se na dobijene vrednosti greške lokalizacije, odnosno utvrditi zbog čega nastaju relativno velika odstupanja u estimaciji pozicije proizvoda. Kako bi se utvrdilo kolike su uobičajene greške lokalizacije u drugim realizovanim sistemima za lokalizaciju proizvoda, u tabeli 60 je dat uporedni pregled vrednosti greške lokalizacije za različite sisteme pronađene u literaturi. Na osnovu ove tabele, moguće je primetiti da su srednje vrednosti greške dobijene metodom PF_RFID_WSN uglavnom bolje ili u nivou najboljih postignutih vrednosti za srednju grešku lokalizacije primenom drugih metoda, za uzorke RSSI vrednosti u test tačkama, dok su za uzorke RSSI vrednosti u mernim tačkama metodom PF_RFID_WSN dobijene manje srednje vrednosti greške lokalizacije u odnosu na sve druge metode. U tabeli 60 izdvaja se nekoliko sistema sa značajno boljim postignutim vrednostima u odnosu na metod PF_RFID_WSN u test tačkama, i u nastavku će biti obrazloženi mogući razlozi za takvo odstupanje. U radu [18] prikazan je sistem u kom je metodom multilateracije postignuta srednja vrednost greške od 0,19 m, a Bajesovim zaključivanjem vrednost od 0,37 m, međutim u ovom radu je sistem postavljen na otvorenom prostoru, bez ikakvih prepreka i smetnji, te je očekivano da u ovakvom sistemu propagacija signala bude neometana i da greške lokalizacije budu manje nego u zatvorenom prostoru. U radu [82] predstavljeno je poboljšanje metoda najbližih suseda koje dovodi do srednje vrednosti greške lokalizacije od 0,33 m, ali i ovaj poboljšani metod ima nedostatke. Poboljšanje metoda se sastoji postavljanju izlazne snage RFID antene na minimalnu vrednost, a zatim njenom postepenom povećanju, sve dok se ne postigne odgovarajuća izlazna snaga pri kojoj se detektuje traženi RFID tag. Tada se uzimaju vrednosti tek detektovanih referentnih tagova, i njihove pozicije se koriste kao najbliži susedi. Nedostatak ovog metoda je što promena izlazne snage antene ne može biti dovoljno brza kako bi se ovaj sistem mogao primeniti u praksi u opštem slučaju. Treba napomenuti i da je u ovom sistemu za lokalizaciju ukupan merni prostor dimenzija 1,2 x 3,1 m. Osim ovih sistema, i u radu [98] je predstavljen sistem za lokalizaciju koji daje značajno bolje parametre od metoda PF_RFID_WSN, međutim za ovaj sistem su dati samo simulirani rezultati, koji nisu zasnovani na merenjima u realnom okruženju, te bi postignutu tačnost nederivacijskog

Kalmanovog filtra trebalo proveriti i na realnim podacima. Što se tiče postignute preciznosti, ukoliko se uporede vrednosti greške lokalizacije na 90. percentilu i maksimalne greške lokalizacije, vidi se da metod PF_RFID_WSN daje rezultate na istom nivou ili bolje od svih metoda predstavljenih u tabeli 60 za test tačke, odnosno bolje rezultate od svih analiziranih metoda za merne tačke.

Tabela 60. Uporedni pregled vrednosti greške lokalizacije za različite metode iz literature

Rad	Sistem	Metod	Srednja vrednost [m]	Standardna devijacija [m]	90. percentil [m]	Maksimum [m]
[80]	BSM	Multilateracija	~ 3 ¹	-	-	-
		ROC	~ 4,1	-	-	-
		MinMax	~ 2,2	-	~ 5,9	~ 9
		ML	~2,4	-	~ 6,6	~ 12
[18]	UHF RFID (na otvorenom prostoru)	Multilateracija	0,19	0,24	-	-
		Bajesovo zaključivanje	0,37	0,11	-	-
[23]	BSM	ROC	1,69	0,83	~ 2,25	~ 4
		MinMax	1,2	1,15	~ 1,5	~ 2
		kNN	1,45	0,69	-	-
		ML	2,52	0,92	~ 3,5	~ 3,8
[30]	Aktivni RFID	WkNN	1,09		~ 1,6	1,81
[82]	UHF RFID	WkNN	~ 0,6	-	~ 0,9	~ 2,1
		WkNN + ²	0,33	-	~ 0,7	~ 1
[110]	UHF RFID	WkNN	0,45	-	~ 0,78	-
		WkNN+	0,37	-	0,67	-
[84]	BSM	kNN	0,5	-	1,1	-

¹ Kod radova u kojima vrednosti greške lokalizacije nisu tačno navedene, ali su parametri greške prikazani na graficima, data je približna vrednost, očitana sa grafika.

² Oznakom „+“ obeleženi su metodi u kojima su uvedena dodatna poboljšanja od strane autora.

Tabela 60 (nastavak). Uporedni pregled vrednosti greške lokalizacije za različite metode iz literature

Rad	Sistem	Metod	Srednja vrednost [m]	Standardna devijacija [m]	90. percentil [m]	Maksimum [m]
[83]	BSM	WkNN	~ 2,3	-	~ 3,6	~ 4,5
		WkNN +	~ 1,6	-	~ 2,5	~ 4
[98]	UHF RFID (simulacija)	EKF	0,66	-	-	-
		UKF	0,23	-	-	-
[34]	UHF RFID (kombinacija sa laserskim senzorom udaljenosti)	Čestični filter	0,95	0,15	~ 2,1	~ 3,5
		Čestični filter +	0,85	0,17	~ 2,5	~ 3,5
[22]	Aktivni RFID	Hibridni metod sa više modela propagacije	< 1	-	-	< 2,5
[36]	Aktivni RFID i BSM	Hibridni metod, koristi WkNN i dinamiku RSSI između modula	0,45	-	~ 0,7	~ 0,8
[78]	BSM, HF RFID i UHF RFID	Hibridni metod, koristi EKF	1,81	-	~ 2,25	-
[35]	BSM i RFID (simulacija)	Hibridni metod, koristi EKF	0,92	-	-	-
		Hibridni metod, koristi čestični filter	1,1	-	-	-
[29]	UHF RFID	Hibridni metod, koristi čestični filter	~ 0,4	-	-	-

Odstupanja u estimaciji pozicije proizvoda koja su nastala u sistemu za lokalizaciju predstavljenom u okviru modela MLPIS, kao i kod analiziranih lokalizacionih sistema u tabeli 60, mogu se pripisati neidealnoj okolini u zatvorenom prostoru, smetnjama koje nastaju usled fizičkih prepreka u vidu slabljenja signala, apsorpcije signala, refleksije signala, interferencije više različitih signala i prostiranja signala po više putanja. Kako bi se ovi nedostaci prevazišli, potrebno je uvesti dodatne sisteme koji bi omogućili još tačniju i

precizniju lokalizaciju proizvoda. U tu svrhu, trebalo bi ispitati mogućnosti integracije podataka o kretanju proizvoda u prostoru, koji bi se mogli izmeriti inercijalnim sensorima u okviru mobilnog bežičnog senzorskog modula, ili utvrditi na osnovu upravljanja sistemima za kretanje i transport proizvoda kroz sistem. Ovi sistemi sami po sebi nisu dovoljno tačni, jer u njima dolazi do nagomilavanja greške tokom vremena, međutim ukoliko bi se integrisali u predloženi model MLPIS, može se očekivati da bi se fuzijom podataka postigao tačniji i precizniji sistem. Osim podataka o kretanju proizvoda, u model za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari MLPIS mogao bi se povezati i UHF RFID sistem malog dometa, koji bi se postavio na ključnim mestima na kojima je potrebno veoma tačno znati poziciju proizvoda, a koji bi omogućio očitavanje podataka sa RFID taga iz dovoljne blizine da se sa sigurnošću može utvrditi da se određeni RFID tag nalazi na tačno traženoj poziciji. Takođe, u ovu svrhu bi se mogao integrisati i sistem zasnovan na obradi slike sa kamere, ili obradi podataka sa različitih senzora, koji bi mogli da se postave u ključnim pozicijama u kojima je potrebno tačno odrediti kada se proizvod na njima nalazi, čime bi se u tim pozicijama moglo sa sigurnošću potvrditi prisustvo određenog proizvoda.

Kako su za merne tačke za koje postoje snimljene RSSI vrednosti u RSSI mapi u svim slučajevima dobijeni značajno bolji rezultati nego za test tačke za koje ne postoje snimljene RSSI vrednosti, moguće je i za sve ključne pozicije u prostoru snimiti RSSI vrednosti u pripreмноj fazi metoda za lokalizaciju, čime one postaju merne tačke. Za ovaj slučaj potrebno je dodatno ispitati koliko gustina mernih tačaka utiče na dobijene parametre tačnosti i preciznosti metoda za lokalizaciju, odnosno utvrditi koliko je minimalno međusobno rastojanje mernih tačaka u prostoru za koje i dalje važe dobijeni rezultati.

Na osnovu eksperimentalnih rezultata, model za lokalizaciju proizvoda MLPIS u predstavljenjоj formi moguće je primeniti u različitim sistemima ili delovima sistema u kojima tačnost lokalizacije dobijena metodom PF_RFID_WSN odgovara zahtevima sistema. Pre svega, model se može primeniti za određivanje pozicije proizvoda ili gupa proizvoda čije dimenzije prevazilaze dobijenu tačnost lokalizacije, te bi se primenom metoda PF_RFID_WSN njihova pozicija u prostoru mogla nedvosmisleno odrediti, a proizvod identifikovati i omogućiti njegovo izuzimanje. Takođe, model se može primeniti u sistemima u kojima je potrebno znati u kojim delovima sistema se određeni proizvodi nalaze, pri čemu nije neophodno postići apsolutnu tačnost lokalizacije, zatim u sistemima u kojima je potrebno znati stanje inventara proizvoda ili imati informaciju o slobodnim delovima

sistema. Ukoliko se u model uključe senzorska merenja parametara okoline, moguće je pratiti uslove u kojima se proizvod nalazio tokom različitih faza u sistemu, budući da se parametri okoline kao što su temperatura, vlažnost vazduha, osvetljenost, i sl. ne menjaju u velikoj meri u opsegu koji pokriva dobijena tačnost sistema za lokalizaciju. Uz dobijenu grešku lokalizacije, moguće je primeniti model i prilikom transporta proizvoda, pri čemu bi se pri većim rastojanjima na kojima se proizvod transportuje, na kojima je postavljena samo bežična senzorska mreža, mogao primeniti samo metod PF_WKNN_PSO u bežičnoj senzorskoj mreži, a u delovima sistema u kojima je postavljen i RFID sistem izvršiti fuzija podataka metodom PF_RFID_WSN i time povećati tačnost i preciznost lokalizacije.

6 ZAKLJUČCI I PRAVCI DALJEG ISTRAŽIVANJA

U okviru ove disertacije razmatran je problem lokalizacije proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari, sa ciljem da se postavi odgovarajući model za lokalizaciju proizvoda koji bi doprineo tačnosti i preciznosti lokalizacije proizvoda u industrijskim uslovima, prvenstveno u prostorima za skladištenje, ali i tokom proizvodnje.

U prvom delu disertacije predstavljen je problem i ciljevi istraživanja, a zatim je dat teorijski pregled potrebnih znanja i tehnologija: RFID tehnologije, bežičnih senzorskih mreža i aktuelnih lokalizacionih metoda, kao i prikaz aktuelnog stanja u oblasti istraživanja. Na osnovu analize aktuelnog stanja u oblasti, kao i problema istraživanja, u poglavlju 3 predložen je i detaljno opisan model MLPIS za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari. Model MLPIS se zasniva na opštem referentnom modelu Interneta stvari, a sa specifičnostima koje se odnose na problem lokalizacije proizvoda u zatvorenim prostorima u industrijskim uslovima. Model se sastoji od sedam nivoa, pri čemu se suština nivoa od najnižeg ka najvišem kreće od konkretnog ka opštem, odnosno od tehnologija i uređaja za lokalizaciju proizvoda, preko međusobne komunikacije, obrade podataka i konkretnog metoda za lokalizaciju proizvoda, preko skladištenja podataka, apstrakcije podataka, do aplikacija i integracija u sistem i procese.

Kako bi se ispitale mogućnosti primene predloženog modela MLPIS, eksperimentalno je proveravana opravdanost postavke najniža tri nivoa modela, koji uključuju konkretne tehnologije, uređaje, način prikupljanja i obrade podataka. Na ovaj način ispitivano je da li

model može da se primeni u zatvorenom prostoru i posebno u industrijskim uslovima. U okviru eksperimentalnog istraživanja primenjeni su sistemi zasnovani na RFID tehnologiji i bežičnim senzorskim mrežama, budući da se u okviru modela MLPIS predlaže kombinovana primena ova dva sistema, uz pretpostavku da se na ovaj način postiže veća tačnost i preciznost metoda za lokalizaciju proizvoda. Eksperimentalno su ispitivani različiti metodi za lokalizaciju proizvoda primenom RFID tehnologije ili bežičnih senzorskih mreža, a zatim predloženi metod PF_RFID_WSN u okviru modela MLPIS, za lokalizaciju proizvoda kombinovanom primenom RFID tehnologije i bežične senzorske mreže, kao i predloženi metod PF_WKNN_PSO kao sastavni deo metoda PF_RFID_WSN. Eksperimentima je pokazano da je model moguće primeniti za lokalizaciju proizvoda u zatvorenom prostoru, i u realnim industrijskim uslovima, čime je potvrđena prva hipoteza postavljena u disertaciji. Takođe, eksperimentalnim ispitivanjima potvrđene su i druge dve hipoteze, odnosno pokazano je da se primenom hibridnog metoda za lokalizaciju proizvoda PF_WKNN_PSO, kao i kombinovanom primenom RFID tehnologije i bežičnih senzorskih mreža metodom PF_RFID_WSN, omogućava dobijanje tačnijeg i preciznijeg sistema za lokalizaciju nego primenom pojedinačnih metoda za lokalizaciju proizvoda ispitivanih u okviru istraživanja.

Na osnovu eksperimentalnih rezultata i njihove detaljne analize, najvažniji doprinosi ove disertacije koji mogu da se izvedu su:

- Napravljena je analiza primenljivosti tehnologija Interneta stvari u sistemima za lokalizaciju proizvoda i razvijen je model MLPIS za lokalizaciju proizvoda primenom tehnologija Interneta stvari, a zatim je eksperimentalno utvrđeno da je predloženi model MLPIS moguće primeniti u industrijskoj okolini;
- Eksperimentalnim ispitivanjem u prvoj fazi istraživanja analizirani su lokalizacioni metodi koji primenjuju RFID tehnologiju ili bežične senzorske mreže zasnovani na merenjima u laboratorijskoj okolini i simuliranim sistemima, čime je pokazano da nijedan od ispitivanih metoda ne daje najbolje rezultate u svim ispitivanim slučajevima;
- U okviru prve faze eksperimentalnog istraživanja, osim metoda multilateracije i metoda najbližih suseda koji su korišćeni u svom standardnom obliku, korišćeni su i metod optimizacije rojem čestica i čestični filter, pri čemu su za njihovu primenu

predloženi novi načini, namenjeni za lokalizaciju proizvoda primenom RFID tehnologije ili bežične senzorske mreže;

- Eksperimentalnim ispitivanjem u drugoj fazi istraživanja pokazano je da metod za lokalizaciju proizvoda PF_RFID_WSN, predložen u okviru modela MLPIS, i u laboratorijskoj okolini i u simuliranim sistemima daje bolje rezultate nego metodi ispitivani u prvoj fazi istraživanja, odnosno da daje bolje rezultate nego metodi koji koriste samo RFID tehnologiju ili bežičnu senzorsku mrežu;
- U drugoj fazi istraživanja takođe je eksperimentalno pokazano da je opravdano koristiti hibridni metod PF_WKNN_PSO, koji je predložen kao osnova za metod PF_RFID_WSN u okviru modela MLPIS, odnosno da metod PF_WKNN_PSO daje bolje rezultate nego pojedinačni metodi na kojima je zasnovan, metod najbližih suseda i metod optimizacije rojem čestica;
- Eksperimentalnim ispitivanjem u trećoj fazi istraživanja pokazano je da i u laboratorijskoj okolini sa industrijskim elementima, koja na odgovarajući način modeluje stvarne uslove okoline u industrijskim sistemima, važe zaključci iz druge faze istraživanja, odnosno da je opravdano koristiti hibridni metod PF_WKNN_PSO koji je predložen kao osnova za metod PF_RFID_WSN za lokalizaciju proizvoda na osnovu samo jedne od tehnologija Interneta stvari, odnosno hibridni metod PF_RFID_WSN u slučaju kada se kombinovano primenjuje RFID sistem i bežična senzorska mreža za lokalizaciju proizvoda.

Iako eksperimentalni rezultati pokazuju da je opravdana primena hibridnih metoda PF_WKNN_PSO i PF_RFID_WSN u odnosu na pojedinačne lokalizacione metode, treba napomenuti da i primenom ovih hibridnih metoda nastaju relativno velike vrednosti greške lokalizacije za primenu u sistemima koji zahtevaju veoma tačnu i preciznu lokalizaciju proizvoda. U okviru diskusije analizirani su i parametri tačnosti i preciznosti različitih lokalizacionih metoda čija primena se može naći u naučnoj i stručnoj literaturi, te je utvrđeno da se metodom PF_RFID_WSN dobijaju rezultati koji su bolji od većine analiziranih metoda, odnosno na istom nivou greške kao i primenom najboljih od analiziranih metoda za lokalizaciju. Na osnovu ove analize zaključeno je da odstupanja koja nastaju u estimaciji pozicije proizvoda ne proizilaze iz postavke samih metoda PF_WKNN_PSO i PF_RFID_WSN, već su zajednička za sve metode koji vrše lokalizaciju

objekata na osnovu RFID tehnologije ili bežičnih senzorskih mreža u zatvorenim prostorima, odnosno da proizilaze iz smetnji koje postoje u neidealnoj okolini u zatvorenim prostorima.

Na osnovu dobijenih rezultata i ograničenja koja su utvrđena u okviru ove disertacije, otvorena su nova istraživačka pitanja. Pre svega, dalji rad treba da se usmeri na ispitivanje mogućnosti za smanjenje greške lokalizacije koja nastaje zbog realnih smetnji u zatvorenim prostorima, gde se može predložiti proširenje metoda za lokalizaciju proizvoda uključivanjem informacija o kretanju proizvoda kroz sistem dobijenih od upravljačkog sistema ili izmerenih odgovarajućim senzorskim sistemom, ili proširenje metoda uključivanjem dodatnog sistema za identifikaciju proizvoda u ključnim tačkama u sistemu. Zatim, budući da je značajno manja greška lokalizacije dobijena za merne tačke, za koje postoje snimljene RSSI vrednosti u RSSI mapi prostora, u odnosu na test tačke, za koje ne postoje snimljene RSSI vrednosti, dalji rad treba da bude usmeren na ispitivanje mogućnosti postavljanja više mernih tačaka na manjem međusobnom rastojanju, odnosno na određivanje minimalnog međurastojanja mernih tačaka za koje i dalje važe dobijeni rezultati.

Budući da je eksperimentalno istraživanje u okviru ove disertacije bilo ograničeno na lokalizaciju jednog proizvoda, drugi pravac daljeg istraživanja treba da uključi ispitivanje istovremene lokalizacije više proizvoda u okviru sistema. Takođe, potrebno je nastaviti razvoj modela, tako da konkretno uključi i senzorska merenja važnih fizičkih veličina u okolini proizvoda, kako bi se omogućio što bolji nadzor proizvoda u prostorima za skladištenje i industrijskim sistemima. Osim toga, moguće je nastaviti razvoj kao proširenje modela, koji bi se uključio u opšti model za sledljivost proizvoda u toku životnog ciklusa, ukoliko bi model bio primenjen u svim fazama životnog ciklusa proizvoda.

Zatim, dalji rad treba da bude usmeren na testiranje predloženog lokalizacionog modela MLPIS u što više realnih sistema, prostora za skladištenje proizvoda i industrijskih sistema, u kojima tačnost lokalizacije postignuta metodom PF_RFID_WSN odgovara zahtevima sistema. Uzevši u obzir dobijenu grešku lokalizacije, moguće je predložiti primenu modela u sistemima u kojima su proizvodi ili grupe proizvoda većih dimenzija od greške lokalizacije, zatim u sistemima u kojima je važno odrediti poziciju proizvoda na nivou dela sistema u kom se proizvod nalazi, kao i u sistemima u kojima je potrebno imati informacije o stanju inventara proizvoda ili zauzetosti određenih delova sistema. Glavni cilj daljih istraživanja je da predloženi model za lokalizaciju proizvoda postane sastavni deo realnih sistema koji primenjuju tehnologije Interneta stvari u zatvorenom prostoru, a u kojima lokalizacija

proizvoda donosi brojne prednosti time što omogućava praćenje proizvoda i resursa u realnom vremenu i obezbeđuje aktuelne informacije o svim delovima sistema, što dovodi do efikasnijeg upravljanja proizvodnjom, prostorima za skladištenje proizvoda, transportom i distribucijom proizvoda, odnosno čitavim lancem snabdevanja, čime posledično dovodi do veće produktivnosti čitavog sistema.

LITERATURA

- [1] G. Kortuem, F. Kawsar, D. Fitton, and V. Sundramoorthy, "Smart objects as building blocks for the internet of things," *Internet Comput. IEEE*, vol. 14, no. 1, pp. 44–51, 2010.
- [2] L. M. Camarinha-Matos, J. Goes, L. Gomes, and J. Martins, "Contributing to the Internet of Things," in *Technological Innovation for the Internet of Things*, Springer, 2013, pp. 3–12.
- [3] D. Giusto, A. Lera, G. Morabito, and L. Atzori, *The Internet of Things*. Springer, 2010.
- [4] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The internet of things: A survey," *Comput. networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.
- [5] R. Xu, "Federated Sensor Network architectural design for the Internet of Things (IoT)," Loughborough University, 2013.
- [6] L. Yan, Y. Zhang, L. T. Yang, and H. Ning, *The Internet of things: from RFID to the next-generation pervasive networked systems*. CRC Press, 2008.
- [7] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013.
- [8] I. Šenk, G. Ostojić, L. Tarjan, S. Stankovski, and M. Lazarević, "Food Product Traceability by Using Automated Identification Technologies," in *Technological Innovation for the Internet of Things*, Springer, 2013, pp. 155–163.
- [9] L. Tarjan, I. Šenk, S. Tegeltija, S. Stankovski, and G. Ostojic, "A readability analysis for QR code application in a traceability system," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 109, pp. 1–11, 2014.
- [10] S. Stankovski, G. Ostojic, I. Senk, M. Rakic-Skokovic, S. Trivunovic, and D. Kucevic, "Dairy cow monitoring by RFID," *Sci. Agric.*, vol. 69, no. 1, pp. 75–80, 2012.
- [11] Z. Chen, F. Xia, T. Huang, F. Bu, and H. Wang, "A localization method for the Internet of Things," *J. Supercomput.*, vol. 63, no. 3, pp. 657–674, 2013.

- [12] T.-Y. Wu, G.-H. Liaw, S.-W. Huang, W.-T. Lee, and C.-C. Wu, "A GA-based mobile RFID localization scheme for internet of things," *Pers. Ubiquitous Comput.*, vol. 16, no. 3, pp. 245–258, 2012.
- [13] L. Roselli, C. Mariotti, P. Mezzanotte, F. Alimenti, G. Orecchini, M. Virili, and N. B. Carvalho, "Review of the present technologies concurrently contributing to the implementation of the Internet of Things (IoT) paradigm: RFID, Green Electronics, WPT and Energy Harvesting," in *Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet), 2015 IEEE Topical Conference on*, 2015, pp. 1–3.
- [14] I. Šenk, L. Tarjan, N. Ljubinković, N. Djukić, and M. Lazarević, "Primena bežičnih tehnologija za lokalizaciju proizvoda u prostorima za skladištenje," in *INFOTEH-JAHORINA Vol. 13*, 2014, pp. 481–485.
- [15] M. Hassan, M. Ali, and E. Aktas, "Radio frequency identification (RFID) technologies for locating warehouse resources: A conceptual framework," in *Smart Objects, Systems and Technologies (SmartSysTech), Proceedings of 2012 European Conference on*, 2012, pp. 1–20.
- [16] I. Šenk, L. Tarjan, S. Horvat, M. Lazarević, and G. Ostojić, "Sledljivost medicinskih proizvoda primenom RFID tehnologije," in *INFOTEH-JAHORINA Vol. 14*, 2015, pp. 397–400.
- [17] I. Šenk, G. Ostojić, S. Stankovski, L. Tarjan, and M. Lazarević, "Sledljivost prehrambenih proizvoda korišćenjem RFID tehnologije," in *INFOTEH-JAHORINA Vol. 10*, 2011, pp. 548–588.
- [18] J. Zhou and J. Shi, "RFID localization algorithms and applications—a review," *J. Intell. Manuf.*, vol. 20, no. 6, pp. 695–707, 2009.
- [19] M.-K. Lee and E. A. Elsayed, "Optimization of warehouse storage capacity under a dedicated storage policy," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 43, no. 9, pp. 1785–1805, 2005.
- [20] G. La Scalia, G. Aiello, M. Enea, and R. Micale, "Preliminary analysis of warehouse localization systems based on RFID technology," *Int. J. RF Technol. Res. Appl.*, vol. 2, no. 1, pp. 23–36, 2010.
- [21] T. Kelepouris, K. Pramataris, and G. Doukidis, "RFID-enabled traceability in the food supply chain," *Ind. Manag. Data Syst.*, vol. 107, no. 2, pp. 183–200, 2007.
- [22] J. L. Brchan, L. Zhao, J. Wu, R. E. Williams, and L. C. Pérez, "A real-time RFID localization experiment using propagation models," in *RFID (RFID), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 141–148.

- [23] X. Luo, W. J. O'Brien, and C. L. Julien, "Comparative evaluation of Received Signal-Strength Index (RSSI) based indoor localization techniques for construction jobsites," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 25, no. 2, pp. 355–363, 2011.
- [24] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," *Syst. Man, Cybern. Part C Appl. Rev. IEEE Trans.*, vol. 37, no. 6, pp. 1067–1080, 2007.
- [25] P. V Nikitin, R. Martinez, S. Ramamurthy, H. Leland, G. Spiess, and K. V. S. Rao, "Phase based spatial identification of UHF RFID tags," in *RFID, 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 102–109.
- [26] J. Brusey, C. Floerkemeier, M. Harrison, and M. Fletcher, "Reasoning about uncertainty in location identification with RFID," in *Workshop on Reasoning with Uncertainty in Robotics at IJCAI*, 2003, pp. 23–30.
- [27] I. Senk, G. Ostojic, V. Jovanovic, L. Tarjan, and S. Stankovski, "Experiences in developing labs for a supervisory control and data acquisition course for undergraduate Mechatronics education," *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 23, no. 1, pp. 54–62, 2015.
- [28] T. Deyle, H. Nguyen, M. Reynolds, and C. C. Kemp, "Rf vision: Rfid receive signal strength indicator (rssi) images for sensor fusion and mobile manipulation," in *Intelligent Robots and Systems, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on*, 2009, pp. 5553–5560.
- [29] D. Joho, C. Plagemann, and W. Burgard, "Modeling RFID signal strength and tag detection for localization and mapping," in *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 3160–3165.
- [30] L. M. Ni, Y. Liu, Y. C. Lau, and A. P. Patil, "LANDMARC: indoor location sensing using active RFID," *Wirel. networks*, vol. 10, no. 6, pp. 701–710, 2004.
- [31] K. Muthukrishnan, M. Lijding, and P. Havinga, *Towards smart surroundings: Enabling techniques and technologies for localization*. Springer, 2005.
- [32] G. Deak, K. Curran, and J. Condell, "A survey of active and passive indoor localisation systems," *Comput. Commun.*, 2012.
- [33] H. Koyuncu and S. H. Yang, "A survey of indoor positioning and object locating systems," *IJCSNS Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur.*, vol. 10, no. 5, pp. 121–128, 2010.

- [34] K. Rohweder, P. Vorst, and A. Zell, "Improved mapping of RFID tags by fusion with spatial structure," in *Proceedings of 4th European Conference on Mobile Robots (ECMR 2009)*, Mlini/Dubrovnik, Croatia, September, 2009, pp. 247–252.
- [35] Z. Xiong, F. Sottile, M. A. Spirito, and R. Garello, "Hybrid indoor positioning approaches based on WSN and RFID," in *New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2011 4th IFIP International Conference on*, 2011, pp. 1–5.
- [36] D. Zhang, Y. Yang, D. Cheng, S. Liu, and L. M. Ni, "Cocktail: an rf-based hybrid approach for indoor localization," in *Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 1–5.
- [37] Z. Xiong, F. Sottile, M. A. Caceres, M. A. Spirito, and R. Garello, "Hybrid WSN-RFID cooperative positioning based on extended kalman filter," in *Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), 2011 IEEE-APS Topical Conference on*, 2011, pp. 990–993.
- [38] Y. Xue and H. Liu, "RFID-Based Intelligent Storage and Retrieval Systems in Automated Warehouse," *J. Softw.*, vol. 6, no. 9, pp. 1844–1850, 2011.
- [39] Y. Xue and H. Liu, "Intelligent storage and retrieval systems based on RFID and vision in automated warehouse," *J. Networks*, vol. 7, no. 2, pp. 365–369, 2012.
- [40] J. S. Choi, H. Lee, D. W. Engels, and R. Elmasri, "Passive UHF RFID-based localization using detection of tag interference on smart shelf," *Syst. Man, Cybern. Part C Appl. Rev. IEEE Trans.*, vol. 42, no. 2, pp. 268–275, 2012.
- [41] J. S. Choi, "Accurate and cost efficient object localization using passive UHF RFID," 2011.
- [42] S. Spieker and C. Rohrig, "Localization of pallets in warehouses using wireless sensor networks," in *Control and Automation, 2008 16th Mediterranean Conference on*, 2008, pp. 1833–1838.
- [43] C. Rohrig and S. Spieker, "Tracking of transport vehicles for warehouse management using a wireless sensor network," in *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, 2008, pp. 3260–3265.
- [44] K. Finkenzerler, *RFID handbook: Fundamentals and applications in contactless smart cards and identification*. John Wiley & Sons, Inc., 2003.

- [45] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and near-Field Communication*. John Wiley and Sons, 2010.
- [46] S. Lahiri, *RFID sourcebook*. IBM press, 2005.
- [47] B. Glover and H. Bhatt, *RFID essentials*. “ O’Reilly Media, Inc.,” 2006.
- [48] V. D. Hunt, A. Puglia, and M. Puglia, *RFID: a guide to radio frequency identification*. John Wiley & Sons, 2007.
- [49] F. Thornton and C. Lanthem, *RFID security*. Syngress, 2006.
- [50] P. J. Sweeney, *RFID for Dummies*. John Wiley & Sons, 2010.
- [51] J.-P. Curty, M. Declercq, C. Dehollain, and N. Joehl, *Design and optimization of passive UHF RFID systems*. Springer, 2007.
- [52] D. M. Dobkin, *The RF in RFID: UHF RFID in Practice*. Newnes, 2012.
- [53] S. A. Ahson and M. Ilyas, *RFID handbook: applications, technology, security, and privacy*. CRC press, 2010.
- [54] X. Su, C.-C. Chu, B. S. Prabhu, and R. Gadh, “On the Creation of Automatic Identification and Data Capture Infrastructure via RFID.” Citeseer, 2007.
- [55] R. Jayaraman, “Object localization using passive RFID tags,” Rutgers University-Graduate School-New Brunswick, 2009.
- [56] “ISO/IEC 18000: Information technology — Radio frequency identification for item management.” ISO/IEC Standard, 2015.
- [57] “ISO/IEC 14443: Identification cards -- Contactless integrated circuit cards -- Proximity cards.” ISO/IEC Standard, 2011.
- [58] “ISO/IEC 15693: Identification cards — Contactless integrated circuit cards — Vicinity cards.” ISO/IEC Standard, 2010.
- [59] “EPCGlobal.” [Online] <http://www.gs1.org/epcglobal> [Pristup: Januar 2016].
- [60] F. Hu and X. Cao, *Wireless sensor networks: principles and practice*. Auerbach Publications, 2010.

- [61] I. Stojmenovic, *Handbook of sensor networks: algorithms and architectures*, vol. 49. Wiley. com, 2005.
- [62] K. Sohraby, D. Minoli, and T. Znati, *Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications*. John Wiley & Sons, 2007.
- [63] J. A. Stankovic, "Wireless Sensor Networks." Department of Computer Science, University of Virginia, Charlottesville, VA, 2006.
- [64] C.-Y. Chong and S. P. Kumar, "Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges," *Proc. IEEE*, vol. 91, no. 8, pp. 1247–1256, 2003.
- [65] Silicon Laboratories Inc., "The Evolution of Wireless Sensor Networks," 2013.
- [66] Q. Wang and I. Balasingham, *Wireless sensor networks-an introduction*. INTECH Open Access Publisher, 2010.
- [67] I. F. Akyildiz and M. C. Vuran, *Wireless sensor networks*, vol. 4. John Wiley & Sons, 2010.
- [68] J. L. Hill, "System architecture for wireless sensor networks," University of California, Berkeley, 2003.
- [69] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Comput. networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [70] H. L. H. Liu, M. Bolic, a Nayak, and I. Stojmenovic, "Taxonomy and Challenges of the Integration of RFID and Wireless Sensor Networks," *Ieee Netw.*, vol. 22, no. 6, pp. 26–32, 2008.
- [71] "TinyOS." [Online] www.tinyos.net. [Pristup: Januar 2016].
- [72] P. Levis, S. Madden, J. Polastre, R. Szewczyk, K. Whitehouse, A. Woo, D. Gay, J. Hill, M. Welsh, and E. Brewer, "TinyOS: An operating system for sensor networks," in *Ambient intelligence*, Springer, 2005, pp. 115–148.
- [73] "ISO/IEC 19762-5:2008 Information technology - Automatic identification and data capture (AIDC) techniques - Harmonized vocabulary - Part 5: Locating systems." 2008.
- [74] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, *Global positioning system: theory and practice*. Springer Science & Business Media, 2012.

- [75] G. Mao, B. Fidan, and B. D. O. Anderson, "Wireless sensor network localization techniques," *Comput. networks*, vol. 51, no. 10, pp. 2529–2553, 2007.
- [76] M. A. Monfared, "Localization in Wireless Sensor Networks Based on Fuzzy Logic," Eastern Mediterranean University (EMU), 2012.
- [77] H. T. Friis, "A note on a simple transmission formula," *proc. IRE*, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, 1946.
- [78] Z. Xiong, Z. Song, A. Scalera, E. Ferrera, F. Sottile, P. Brizzi, R. Tomasi, and M. A. Spirito, "Hybrid WSN and RFID indoor positioning and tracking system," *EURASIP J. Embed. Syst.*, vol. 2013, no. 1, pp. 1–15, 2013.
- [79] A. Abdulqader Hussein, T. A. Rahman, and C. Y. Leow, "Performance Evaluation of Localization Accuracy for a Log-Normal Shadow Fading Wireless Sensor Network under Physical Barrier Attacks," *Sensors*, vol. 15, no. 12, pp. 30545–30570, 2015.
- [80] G. Zanca, F. Zorzi, A. Zanella, and M. Zorzi, "Experimental comparison of RSSI-based localization algorithms for indoor wireless sensor networks," in *Proceedings of the workshop on Real-world wireless sensor networks*, 2008, pp. 1–5.
- [81] C.-H. Ko, "RFID 3D location sensing algorithms," *Autom. Constr.*, vol. 19, no. 5, pp. 588–595, 2010.
- [82] X. Chen, L. Xie, C. Wang, and S. Lu, "Adaptive accurate indoor-localization using passive RFID," in *Parallel and Distributed Systems (ICPADS), 2013 International Conference on*, 2013, pp. 249–256.
- [83] D. Kukolj, M. Vuckovic, and S. Pletl, "Indoor Location Fingerprinting Based on Data Reduction," in *Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 327–332.
- [84] M. Saxena, P. Gupta, and B. N. Jain, "Experimental analysis of RSSI-based location estimation in wireless sensor networks," in *Communication Systems Software and Middleware and Workshops, 2008. COMSWARE 2008. 3rd International Conference on*, 2008, pp. 503–510.
- [85] S. Subedi, Y. D. Zhang, and M. G. Amin, "Precise RFID localization in impaired environment through sparse signal recovery," in *SPIE Defense, Security, and Sensing*, 2013, p. 87530H–87530H.
- [86] X.-S. Yang, *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Luniver press, 2010.

- [87] R. V Kulkarni and G. K. Venayagamoorthy, "Bio-inspired algorithms for autonomous deployment and localization of sensor nodes," *Syst. Man, Cybern. Part C Appl. Rev. IEEE Trans.*, vol. 40, no. 6, pp. 663–675, 2010.
- [88] R. V Kulkarni, G. K. Venayagamoorthy, and M. X. Cheng, "Bio-inspired node localization in wireless sensor networks," in *Systems, Man and Cybernetics, 2009. SMC 2009. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 205–210.
- [89] R. C. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," in *Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*, 1995, vol. 1, pp. 39–43.
- [90] D. Bratton and J. Kennedy, "Defining a standard for particle swarm optimization," in *Swarm Intelligence Symposium, 2007. SIS 2007. IEEE*, 2007, pp. 120–127.
- [91] D. P. Rini, S. M. Shamsuddin, and S. S. Yuhaziz, "Particle swarm optimization: technique, system and challenges," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 14, no. 1, pp. 19–26, 2011.
- [92] R. V Kulkarni and G. K. Venayagamoorthy, "Particle swarm optimization in wireless-sensor networks: A brief survey," *Syst. Man, Cybern. Part C Appl. Rev. IEEE Trans.*, vol. 41, no. 2, pp. 262–267, 2011.
- [93] A. R. Vahdat, N. NourAshrafoddin, and S. S. Ghidary, "Mobile robot global localization using differential evolution and particle swarm optimization," in *Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on*, 2007, pp. 1527–1534.
- [94] Y. Shi and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," in *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*, 1998, pp. 69–73.
- [95] Y. Shi and R. C. Eberhart, "Parameter selection in particle swarm optimization," in *Evolutionary programming VII*, 1998, pp. 591–600.
- [96] R. C. Eberhart and Y. Shi, "Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization," in *Evolutionary Computation, 2000. Proceedings of the 2000 Congress on*, 2000, vol. 1, pp. 84–88.
- [97] J. Tian and G. Zheng, "Real-time localization estimator of mobile node in wireless sensor networks based on extended Kalman filter," *J. Shanghai Univ. (English Ed.)*, vol. 15, pp. 128–131, 2011.

- [98] T. Nick, J. Goetze, W. John, and G. Stoenner, "Comparison of extended and unscented Kalman filter for localization of passive UHF RFID labels," in *General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI*, 2011, pp. 1–4.
- [99] T. Nick, J. Götze, W. John, and G. Stönner, "Localization of passive UHF RFID labels using an unscented Kalman filter with relative position information," in *RFID SysTech 2011; 7th European Workshop on Smart Objects: Systems, Technologies and Applications; Proceedings of*, 2011, pp. 1–7.
- [100] J. R. Raol, *Multi-Sensor Data Fusion with MATLAB®*. CRC Press, 2009.
- [101] S. Thrun, W. Burgard, and D. Fox, *Probabilistic robotics*. MIT press, 2005.
- [102] N. Fairfield, "Localization, mapping, and planning in 3D environments," Citeseer, 2009.
- [103] P. Barsocchi, S. Lenzi, S. Chessa, and F. Furfari, "Automatic virtual calibration of range-based indoor localization systems," *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 12, no. 17, pp. 1546–1557, 2012.
- [104] Cisco, "The Internet of Things Reference Model." Internet of Things World Forum, 2014.
- [105] "ThingMagic." [Online] <http://www.thingmagic.com/>. [Pristup: Januar 2016].
- [106] "Unicom Informatics Kft." [Online] <http://www.ucmote.com/>. [Pristup: Januar 2016].
- [107] L. Gogolak, S. Pletl, and D. Kukolj, "Neural Network-based Indoor Localization in WSN Environments," *Acta Polytech. Hungarica*, vol. 10, no. 6, pp. 221–235, 2013.
- [108] L. Gogolak, "Uticaj bežične senzorske tehnologije na upravljanje montažnim sistemima," 2014.
- [109] Atmel, "ATmega128RFA1 Datasheet." 2014.
- [110] S. Parlak and I. Marsic, "Non-intrusive localization of passive RFID tagged objects in an indoor workplace," in *RFID-technologies and applications (RFID-TA), 2011 IEEE international conference on*, 2011, pp. 181–187.