



UNIVERZITET U NOVOM SADU

FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA



Laslo Gogolak

Uticaj bežične senzorske tehnologije na upravljanje montažnim sistemima

Doktorska disertacija

Novi Sad, 2014.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ ● ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР :		
Идентификациони број, ИБР :		
Тип документације, ТД :	Монографска публикација	
Тип записа, ТЗ :	Текстуални штампани материјал	
Врста рада, ВР :	Докторска дисертација	
Аутор, АУ :	Ласло Гоголак	
Ментор, МН :	Проф. Др Стеван Станковски	
Наслов рада, НР :	Утицај бежичне сензорске технологије на управљање монтажним системима	
Језик публикације, ЈП :	Српски	
Језик извода, ЈИ :	Српски	
Земља публикавања, ЗП :	Република Србија	
Уже географско подручје, УГП :	Војводина	
Година, ГО :	2014	
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)	7/119/109/5/56/0/0	
Научна област, НО :	Мехатроника	
Научна дисциплина, НД :	Аутоматизација монтажних система	
Предметна одредница/Кључне речи, ПО :	Монтажни системи, бежичне сензорске мреже, локализација	
УДК		
Чува се, ЧУ :	Библиотека Факултета техничких наука у Новом Саду	
Важна напомена, ВН :		
Извод, ИЗ :	У докторској дисертацији обрађен је проблем управљања монтажним системима помоћу бежичне сензорске технологије у циљу побољшања ефикасности производње и побољшања квалитета производа. У оквиру ове дисертације је развијен модел бежичног управљачког система за управљање и надзор индустријских процеса. Главни циљ истраживања је развој интегрисаног система за праћење позиције радног предмета и праћење околности у којима се радни предмет налази у монтажним системима. Резултати истраживања су потврђени експерименталним истраживањем у лабораторијској и у реалној индустријској средини.	
Датум прихватања теме, ДП :	29.05.2013.	
Датум одбране, ДО :		
Чланови комисије, КО :		
Председник:	Др Илија Ћосић, редовни професор	Потпис ментора
Члан:	Др Љубомир Миладиновић, редовни професор	
Члан:	Др Драган Кукољ, редовни професор	
Члан:	Др Гордана Остојић, ванредни професор	
Члан ментор:	Др Стеван Станковски, редовни професор	



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 :	Laslo Gogolak
Mentor, MN :	Prof. Stevan Stankovski, PhD
Title, TI :	Impact of wireless sensor technology on control of assembly systems
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Vojvodina
Publication year, PY :	2014
Publisher, PB :	Author's reprint
Publication place, PP :	Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Physical description, PD : <small>(chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)</small>	7/119/109/5/56/0/0
Scientific field, SF :	Mechatronics
Scientific discipline, SD :	Assembly Line Automation
Subject/Key words, S/KW :	Assembly Line, Wireless Sensor Network, Localization
UC	
Holding data, HD :	The Library of Faculty of technical sciences, Novi Sad, Serbia
Note, N :	
Abstract, AB :	The dissertation deals with the problem of monitoring and controlling industrial assembly lines by wireless sensor technology with the aim of improving the efficiency of production and the quality of the product. A model of a wireless controlling system has been developed for monitoring and controlling industrial processes. The main focus of the study is the development of an integrated system for monitoring the position of the product and the influences on the product in the assembly lines. The results are confirmed by experiments in a laboratory and real industrial environment.
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	29.05.2013.
Defended on, DE :	
Defended Board. DB :	
President:	Prof. Ilija Ćosić, PhD
Member:	Prof. Ljubomir Miladinović, PhD
Member:	Prof. Dragan Kukolj, PhD
Member:	Prof. Gordana Ostojić, PhD
Member Mentor:	Prof. Stevan Stankovski, PhD
	Menthor's sign

Sadržaj

Lista skraćenica	6
1 Uvod	8
1.1 Motivacija i predmet istraživanja	9
1.2 Cilj istraživanja.....	10
1.3 Trenutno stanje u oblasti	11
1.4 Organizacija disertacije	13
2 Bežične senzorske mreže	15
2.1 Primena bežičnih senzorskih mreža	15
2.2 Tehničke karakteristike bežičnih senzora	17
2.3 Crossbow Iris bežični senzorski čvor	20
2.4 Senzorske pločice	21
2.5 Standard IEEE 802.15.4 i Zigbee protokol	22
3 Lokalizacione tehnologije.....	25
3.1 Lokalizacione tehnologije bazirane na satelitskoj tehnici.....	25
3.1.1 GPS lokalizacioni sistem	25
3.1.2 GPS Lokalizacioni sistem sa korekcijom	26
3.2 Lokalizacione tehnologije bazirane na mrežnoj strukturi	27
3.2.1 Lokalizacija na osnovu vremena prijema (Time of arrival)	27
3.2.2 Lokalizacija na osnovu vremenske razlike prijema (Time Difference of Arrival)....	28
3.2.3 Metoda detekcije merenjem dolaznog pravca (Angle of Arrival).....	28
3.2.4 Lokalizacione metode zasnovane na snazi prijemnog radio signala	29
3.3 Fingerprint lokalizacija	31
3.3.1 Merenje RSSI vrednosti - offline režim lokalizacije	31
3.3.2 Lokalizacija pomoću RSSI vrednosti – online režim.....	33
3.4 Lokalizacioni algoritmi.....	34
3.4.1 Veštačke neuronske mreže u lokalizaciji.....	34
3.4.2 „Weighted k-nearest neighbor“ metoda	39
4 Praćenje proizvoda u toku montažnog procesa	42
4.1 Struktura montažne tehnologije	42

4.1.1	Radne stanice.....	43
4.1.2	Transportni sistemi	43
4.2	Analiza strukture proizvoda za implementaciju bežičnih senzora.....	44
4.3	Analiza mogućnosti praćenja pozicije baznog sklopa u toku procesa montaže	46
4.4	Analiza fizičkih veličina koje utiču na kvalitet proizvoda	47
4.5	Analiza tehnoloških sistema za implementaciju bežičnih senzora	49
4.6	Analiza ocenjivanja uravnoteženja montažnih sistema	50
4.6.1	Vreme montaže.....	50
4.6.2	Metode za merenje uravnoteženja	51
5	Prototip za upravljanje montažnim sistemima pomoću bežične senzorske tehnologije	54
5.1	Predlog modela za upravljanje montažnim sistemima pomoću bežične senzorske tehnologije	55
5.1.1	Proizvodni sloj	57
5.1.2	Pripremni sloj	60
5.1.3	Upravljački sloj.....	61
5.1.4	Menadžment sloj.....	66
6	Eksperimentalni rezultati u laboratorijskoj okolini	67
6.1	Struktura eksperimentalne laboratorije	67
6.1.1	Test laboratorija.....	67
6.1.2	Industrijska laboratorija.....	68
6.2	Eksperimentalno lociranje baznog sklopa u toku montaže	71
6.2.1	Određivanje RSSI vrednosti	71
6.2.2	Distribucija RSSI vrednosti anhor čvorova	75
6.2.3	Eksperimentalna primena veštačke neuronske mreže za lokalizaciju	86
6.2.4	Eksperimentalna primena WkNN metode za lokalizaciju.....	96
6.2.5	Analiza rezultata i upoređivanje tačnosti	99
7	Zaključak i pravci daljeg istraživanja.....	110
	Literatura.....	113

Lista skraćenica

- AGPS - eng. Assisted GPS – Poglavlje 3.1.1
- AoA –eng. Angle of Arrival– Poglavlje 3.2.3
- APL - eng. Application Framework- Poglavlje 2.5
- APO - eng. Application Object – Poglavlje 2.5
- APS - eng. Application Sub layer- Poglavlje 2.5
- BPSK - eng. Binary Phase Shift Keying – Poglavlje 2.5
- BSM- Bežična Senzorska mreža – Poglavlje 1
- *CDF* –eng. *cumulative distribution functions* Poglavlje 6.2.5.1
- CSMA CA - eng. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance – Poglavlje 2.5
- DGPS-eng. Differential Global Positioning System Poglavlje 3.1.2
- DSSS - eng. Direct Sequence Spread Spectrum Poglavlje 2.5
- ED-eng. End Device Poglavlje 2.5
- ERP–eng. Enterprise resource planning Poglavlje 5
- FFD - eng. Full Function Device Poglavlje 2.5
- GPS –eng. Global Position System Poglavlje 3.1.1
- LE – eng. Line Efficiency Poglavlje 4.6.2
- LR-WPAN – eng. Low Rate Wireless Personal Area Network Poglavlje 2.5
- MAC - eng. Medium Access Control- Poglavlje 2.5
- MSE - eng. Mean Square Error Poglavlje 4.6.2
- NC-eng. Network Coordinator Poglavlje 2.5
- OQPSK - eng. Offset Quadrature Phase Shift Keying Poglavlje 2.5
- OSI –eng. Open Systems Interconnection Poglavlje 2.5
- PHY - eng. Physical Layer Poglavlje 2.5
- PPS –eng. Precise Position Service Poglavlje 3.1.1
- RFD - eng. Reduced Functional Device Poglavlje 2.5
- RISC –eng. Reduced Instruction Set Computer Poglavlje 2.2

- RSSI – eng. Received Signal Strength Indicator Poglavlje 3.2.4
- SDK –eng Software development kit Poglavlje 2.2
- SI – eng .Smoothness index Poglavlje 4.6.2
- SPS - eng. Standard Position Service Poglavlje 3.1.1
- TDoA – eng Time Difference of Arrival Poglavlje 3.2.2
- ToA – eng Time of Arrival Poglavlje 3.2.1
- UART - eng Universal Asynchronous Receiver/Transmitter Poglavlje 2.2
- VNM –veštačka neuronske mreže Poglavlje 3.4.1
- WAAS -eng. Wide Area Augmentation System Poglavlje 3.1.2
- WSN- eng. Wireless Sensor Network Poglavlje 1
- ZDO - eng. Zigbee Device Object Poglavlje 2.5

1 Uvod

U današnje vreme, učesnici proizvodnje treba da zadovolje sve šire zahteve prema tehnologiji proizvodnje u cilju održavanja konkurentnosti na tržištu. Održavanje konkurentnosti je izuzetno važno u svim oblastima proizvodnje, budući da praktično nema proizvoda i proizvodnje koje nema konkurenciju. Proizvodnja mora da prati zahteve globalizma povećanjem kapaciteta, kvaliteta proizvodnje (proizvoda), a naročito održavanjem kvaliteta na visokom nivou. U cilju zadovoljavanja navedenih zahteva, u oblasti proizvodnih sistema su potrebna neprekidna istraživanja, kao i primena rezultata istraživanja u praksi, čime se obezbeđuje da savremeni proizvodni sistemi budu opremljeni rešenjima koja su razvijena po najnovijim kriterijumima [53][54][56][51].

U istraživačkim centrima širom sveta vode se istraživanja u cilju modernizacije proizvodnje. U toku istraživanja, vrlo su česti prilazi koji koriste fuziju više naučnih oblasti. Brojni istraživački centri koji se bave unapredjenjem proizvodnje sebi zacrtavaju smernicu modernizacije proizvodnih i montažnih sistema. Jedna od smernica modernizacije proizvodnje je lokalizacija učesnika proizvodnje u svim fazama tehnologije. Do današnjeg vremena razvijena su lokalizaciona rešenja za nekoliko specijalnih slučajeva, ali sveobuhvatno rešenje još nije nađeno [45][48][49][50].

Nalaženje opštijeg rešenja zahteva fuziju rezultata istraživanja iz više oblasti. Rezultati razvoja elektronike, senzorske tehnike, komunikacionih tehnologija i tehnologija ugnjeđenih sistema, u velikoj meri učestvuju u razvoju novih lokalizacionih rešenja koja vrše uspešnu lokalizaciju i u industrijskim uslovima.

Značajni rezultati razvoja na polju elektronike su minijaturizacija komponenti, smanjena potrošnja, veća pouzdanost i jeftiniji proizvodi. Na polju senzorske tehnike značajni su rezultati minijaturizacije, poboljšanje preciznosti, smanjenje osetljivosti na šum, smanjenje potrošnje i proširenje skupa mogućih neelektričnih veličina za merenje. Na polju

komunikacionih tehnologija razvijeni su novi protokoli koji omogućavaju pouzdanu komunikaciju i u okolinama opterećenim šumom, smanjene su potrošnje primopredajnika kod bežičnih veza. Na polju mikrokontrolera povećani su resursi (broj i kvalitet A/D i D/A pretvarača, dužina reči aritmetičke jedinice, itd.), brzina računanja, energetska efikasnost i veličina operativne memorije. Ovi rezultati omogućavaju lokalnu implementaciju kompleksnijih algoritama proračuna i proširenje oblasti primene mikrokontrolera u raznim ugnježenim sistemima[41] [12].

Gore navedeni rezultati su značajno doprineli razvoju i širenju oblasti primene senzorskih mreža i inteligentnih senzora. Jedna od mogućih pravaca integracije u okviru mehatronike je primena bežične senzorske tehnologije u tehničkim rešenjima za unapredjenje rada montažnih sistema.

1.1 Motivacija i predmet istraživanja

Predmet istraživanja je bio usmeren ka primeni bežičnih senzorskih mreža u upravljanju montažnim sistemima. U okviru rada će biti detaljno analiziran uticaj primene bežičnih senzorskih tehnologija na montažne sisteme. Pored toga, biće analizirano i kako industrijska sredina utiče na ponašanje sistema sa bežičnim tehnologijama. Uvođenjem bežičnih senzorskih mreža u proces montaže omogućava praćenje pozicije, brzine, temperature, ubrzanja svakog radnog predmeta.

Korišćenjem podataka o stanju radnog predmeta analiziraće se kvalitet montažnog sistema, kao i kvalitet samog proizvoda. Zatim, predmet istraživanja će biti i analiza rešenja kompleksnog sistema zasnovanog na bežičnoj senzorskoj mreži koja bi imala ulogu nadgledanja i upravljanju montažnim sistemima.

Istraživanje će obuhvatiti sledeća ispitivanja:

- Analiza postojećih algoritama za lokalizaciju predmeta montaže pomoću bežičnih senzorskih mreža;
- Analiza uticaja kontinualnog praćenja okruženja predmeta montaže kao što je temperatura, brzina transporta, relativna vlažnost vazduha, ubrzanja (udari), itd. na kvalitet montaže;

- Analiza uticaja kontinualnog praćenja stanja tehnoloških sistema u montaži.

Na osnovu svih predmeta istraživanja moguće je postaviti osnovnu hipotezu disertacije, da je primenom bežične senzorske tehnologije moguće uticati na kvalitet montažnih sistema.

Osnovna hipoteza pretpostavlja postavljanje sledećih sporednih hipoteza:

- Moguće je napraviti model za upravljanje montažnim sistemima primenom bežične senzorske tehnologije;
- Moguća je lokalizacija pomoću bežične senzorske tehnologije u industrijskim uslovima, kao što su montažni sistemi;
- Na osnovu snimljenih-arhiviranih podataka o lokaciji baznog sklopa moguće je oceniti efikasnost montažnih sistema;
- Kontinualnim praćenjem uticaja okoline na bazni sklop moguće je oceniti kvalitet montaže i moguće je direktno eliminisati proizvode koji nisu sastavljeni po određenim kriterijumima.

Analiza je primenjena u istraživanjima u oblasti upravljanja montažnim sistemima pomoću bežične tehnologije. Nakon završenih eksperimentalnih istraživanja izvršena je analiza dobijenih rezultata i metodom sinteze je donet zaključak i ocena o postignutim rezultatima. Naučni eksperiment obuhvata eksperimente u laboratoriji i izvan nje u realnim uslovima.

1.2 Cilj istraživanja

Glavni cilj istraživanja je poboljšanje kvaliteta montažnih sistema i kvaliteta samih proizvoda uvođenjem bežičnih senzorskih mreža. Kao rezultat istraživanja očekuje se razvoj sistema za praćenje i upravljanje montažnim sistemima pomoću bežičnih senzorskih mreža. Rezultat istraživanja bi uticao kako na kvalitet montažnog sistema, tako i na kvalitet proizvoda.

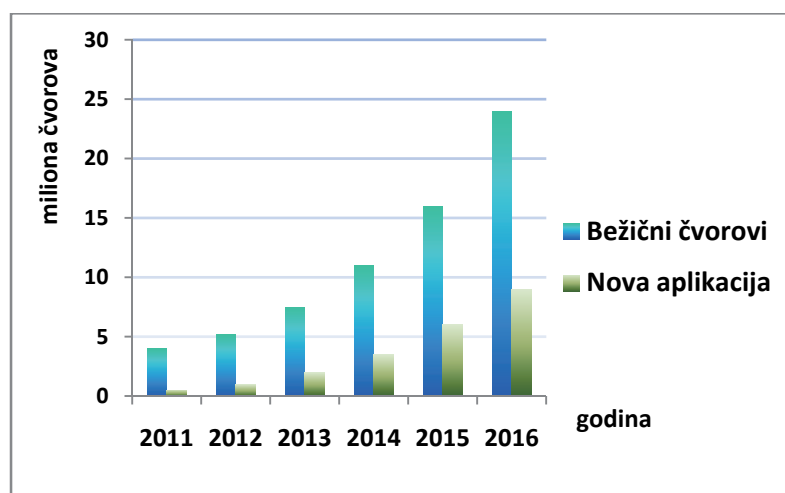
U prvom delu istraživanja će biti razvijen lokalizacioni sistem za kontinualno praćenje putanje proizvoda u toku montaže. Pomoću ovog sistema u svakom trenutku se vidi trenutna pozicija radnog predmeta koji se sastavlja unutar montažnog sistema. Sistem za praćenje pozicije proizvoda u svakom trenutku određuje poziciju proizvoda u realnom vremenu i snimanje u datoteku. Na osnovu snimljenih podataka, može da se napravi statistička analiza efikasnosti montažnog sistema.

U drugom delu istraživanja će biti analizirano kojim okolnostima je izložen radni predmet u toku montažnog procesa. Sistem će pored pozicije radnog predmeta pomoću bežičnih senzora pratiti i uticaje kojima je radni predmet bio izložen. Ovaj deo sistema daje mogućnost praćenja temperature, maksimalnog ubrzanja, najveće osvetljenosti, koji su delovali na radni predmet u svakoj fazi montaže. Ovi podaci bi bili snimljeni pored podataka o poziciji. Iz snimljenih podataka je moguće zaključiti da li je došlo do neke kritične okolnosti u toku montaže (ekstremno veliki udar, ekstremno velika temperatura, itd).

Krajnji cilj istraživanja jeste kreiranje integrisanog sistema za praćenje pozicije radnog predmeta i praćenje okolnosti u kojima se radni predmet nalazi u montažnim sistemima. Očekivani rezultat istraživanja je poboljšanje kvaliteta montiranog proizvoda, koji bi bio sastavljen unutar optimizovanog montažnog sistema.

1.3 Trenutno stanje u oblasti

Popularnost bežične tehnologije u industrijskim okolinama pokazuje i istraživanje Mareca Hatlera [71]. Slika 1.1 pokazuje tendenciju rasta bežičnih aplikacija u industrijskoj okolini. Sa grafika se može zaključiti da će se u naredne tri godine broj instaliranih bežičnih uređaja u industrijskoj okolini povećati za približno 500 %, kada će skoro 24 miliona bežičnih senzora i aktuatora biti korišćeno širom sveta. Do 2016. godine, 39 % uvedenih čvorova će se koristiti za nove aplikacije pomoću bežične tehnologije.



Slika 1.1: Broj aplikacija sa bežičnim čvorovima u industrijskoj okolini

Zahvaljujući svojoj ceni i lakoj implementaciji, bežična tehnologija ima potencijal da se uvede kako kod upravljanja tako i kod monitoringa velikih montažnih i proizvodnih sistema. Iz tog razloga postoje mnogobrojna istraživanja u smeru uvođenja bežične tehnologije [70]. U jedan od mogućih smerova istraživanja spadaju višeagentni sistemi [72][73][74]. Primena i implementacija takvih sistema nije još doživela pravi uspeh u aplikacijama za automatizaciju industrijskih sistema.

Među najaktuelnije aplikacije u industrijskim sistemima spadaju sistemi za nadzor i prikupljanje podataka (SCADA – eng. *supervisory control and data acquisition*) [66][67][68]. Zatim, veoma su aktuelne i aplikacije vezane za dijagnostiku, testiranje, serijsku obradu, upravljanje industrijskim robotima, itd. Komunikacija kod najvećeg broja aktuelnih sistema je žičana i uglavnom se bazira na Ethernet TCP/IP, RS-232, RS-485 i RS-422 komunikacionim protokolima. Bežična komunikacija trenutno ne spada među deset najpopularnijih industrijskih komunikacionih protokola. Ciljno područje za uvođenje bežične tehnologije je najniži nivo automatizacije industrijskih sistema [70]. Na ovom nivou su brojni senzori i aktuatori povezani sa kontrolnom jedinicom, najčešće PLC-om (eng. *Programmable logic controller*). Korišćenje mnogobrojnih žičanih senzora sa sobom nosi velike instalacione troškove i nefleksibilnost za rekonfigurisanje sistema.

Standardna metoda za projektovanje montažnih i proizvodnih sistema sa bežičnom tehnologijom već postoji. Istraživanja vezana za izradu standarda za projektovanje bežičnih mreža u industrijskoj okolini su prezentovana u radu [75].

Proizvodni sistemi u kojima je implementirana bežična tehnologija su poznati kao „Wireless Manufacturing -WM“ (bežična proizvodnja) sistemi [87][90][91][92][93]. U slučaju WM sistema, na proizvodnoj liniji se deo informacija prenosi pomoću bežične tehnologije. Uspešnost primene bežične tehnologije kod montažnih sistema se oseti u slučaju primene RFID (eng. *Radio-frequency identification*) tehnologije. Zbog ekoloških razloga veoma je važno pratiti životni ciklus jednog proizvoda. Autori Stankovski, Ostojić, Lazarević su u svojim radovima [84][88][89] uspešno primenili RFID tehnologiju za praćenje životnog ciklusa proizvoda. RFID tehnologija se najčešće koristi za praćenje toka materijala i elemenata u proizvodnji i za praćenje logistike skladištenja [86][93][94].

Primena bežičnih senzorskih mreža je veoma aktuelna oblast [95][96]. Mogućnosti i izazovi Industrijskih bežičnih senzorskih mreža (eng. *Industrial Wireess Sensor Networ- IWSN*) su prikazani u radu [97]. Istraživači su u manjoj meri analizirali primenu bežičnih senzorskih mreža za praćenje toka materijala i predmeta u toku montaže. Uravnoteženje i ocenjivanje efikasnosti montažnih sistema je uvek aktuelna problematika[51][52][53][55].

Osnovna ideja disertacije je da se primeni bežična tehnologija za upravljanje montažnim sistemima. Tako bi jedna nova oblast primene bežičnih senzorskih mreža bila detaljnije istraživana i opisana u ovoj disertaciji.

1.4 Organizacija disertacije

Doktorska disertacija je organizovana u sedam poglavlja. U prvom poglavlju je dat deo prikaza trenutnog stanja u oblasti i opis problema. Pregledom literature je dat uvid u temu istraživanja ove doktorske disertacije. U prvom poglavlju su opisane i hipoteze disertacije kao i očekivani rezultati.

U drugom poglavlju je dat prikaz bežične senzorske tehnologije, bežičnih komunikacija i protokola, kao i standarda koji se aktuelno koriste. Posebna pažnja je data standardu IEEE 802.15.4, koji će imati najveću ulogu u toku istraživanja. Nakon toga, biće opisana hardverska i softverska struktura bežičnih senzorskih modula. U nastavku, u trećem poglavlju će biti opisane lokalizacione tehnologije i algoritmi koje se koriste za lokalizaciju.

U četvrtom poglavlju su prikazani montažni sistemi i analiziran potencijal upotrebe bežičnih tehnologija u procesu montaže.

U petom poglavlju je prezentovan prototip bežičnog upravljačkog sistema, kao predlog kako bi jedan bežični upravljački sistem funkcionisao, u skladu sa standardnim nivoima upravljanja industrijskim procesima.

U šestom poglavlju su opisani eksperimenti i eksperimentalni rezultati. Na početku je opisan eksperiment lokalizacije pomoću bežičnih senzorskih mreža u laboratorijskim uslovima. U nastavku je dat pregled rezultata koji su dobijeni sa analizom lokalizacionih algoritama. U drugom delu šestog poglavlja je opisan eksperiment koji je izvršen u industrijskoj laboratoriji

(na montažnoj liniji). Na kraju će biti upoređivane uspešnosti lokalizacije u laboratorijskoj okolini i u industrijskoj okolini.

U sedmom poglavlju su izvedeni zaključci doktorske disertacije sa posebnim naglaskom na doprinose disertacije, uz naznačene pravce daljeg istraživanja.

2 Bežične senzorske mreže

Bežična (*wireless*) tehnologija je neopaženo ušla u naš svakodnevni život i našla je primenu na polju informacionih tehnologija. Razvojem bežične tehnologije nastale su bežične senzorske mreže. Senzorske mreže se sastoje od više bežičnih senzorskih uređaja, koji međusobno komuniciraju bežičnom tehnologijom. Ova komunikacija se najčešće obavlja po standardu IEEE 802.15.4, koji se spominje kao Zigbee tehnologija[16]. Zigbee komunikacioni protokol funkcioniše na frekvenciji od 2.4 GHz i komunikacija se obavlja od jedne do druge senzorske tačke. Prava prednost bežičnih senzorskih mreža je to što imaju sposobnost da prenesu podatke iz jedne tačke do krajnje senzorske tačke (koja nije u dometu prve tačke), preko ostalih senzorskih tačaka, koje u ovom slučaju imaju i ulogu primopredajnika (transiver).

2.1 Primena bežičnih senzorskih mreža

Primena bežičnih senzorskih mreža se najčešće zasniva na aplikacijama koje imaju ulogu prikupljanja podataka iz okoline. U zavisnosti od aplikacije uz pomoć bežičnih senzora mogu da budu izvršena razna merenja i akvizicije podataka[1]. Bežične senzorske mreže se koriste za praćenje životne sredine, vojne aplikacije, praćenje zdravstvenih stanja, itd [2][3][5][6][7][8].

Pratiti životnu okolinu nije uvek jednostavan posao, kako se u prirodi stvari dešavaju u neočekivanim trenucima i na neočekivanim mestima. Bežični senzori omogućavaju praćenje događaja koji se dešavaju u prirodi. Istraživači su primenjivali BSM tehnologiju kod praćenja ptica selica [2], gde je veoma bitno da praćenje okoline i životne sredine životinja bude izvršeno bez prisustva čoveka. Istraživači sa Havaja su napravili bežičnu senzorsku mrežu za praćenje životne okoline ugroženih vrsta biljaka [3]. Prikupljanjem podataka sa BSM, naučnici su mogli da primete faktore koji ugrožavaju biljke. Ono što je možda najkorisnija aplikacija tokom praćenja životne sredine, je praćenje šumskih požara. Raspodelom senzorskih tačaka

u šumi dobijaju sepouzdana informacije o eventualnim požarima. Zahvaljujući sistemu sa BSM tehnologijom, informacija o požaru veoma brzo stiže do nadležnog organa[4]. U poljoprivredi se veoma često koristi BSM za praćenje vremenskih uslova [5][6][98], koje donosi povećanje kvaliteta i povećanje količine proizvodnje.

Specifična, a veoma bitna primena bežičnih senzora je kod vojnih aplikacija [7]. BSM je prisutna kod aplikacije za kontrolu vojnih jedinica, aplikacije za komunikaciju, aplikacije za ciljanje i kod detekcije hemijski agresivnih okolina. Najkorisnija aplikacija BSM za vojne svrhe jeste praćenje i monitoring prijateljskih i neprijateljskih jedinica. Pomoću bežičnih senzorskih čvorova, koji su pričvršćeni na vojnika, informacija o poziciji ili o zdravstvenom stanju vojnika se šalje direktno vojnoj bazi, a na taj način je implementirano i praćenje stanja oružja, količine municije i stanja zdravstvenog paketa. Ako su bežični senzorski čvorovi raspoređeni u posmatranoj okolini, pomoću njih se lako detektuje pokret neprijateljskih jedinica. BSM ima veoma bitnu ulogu kod zaštite vojnika u slučaju napada biološkim ili hemijskim oružjem.

Aplikacije za praćenje zdravstvenih stanja ljudi su veoma važan smer razvoja bežične senzorske tehnologije. Sa bežičnim čvorovima moguće je kontinualno praćenje zdravstvenog stanja pacijenta, kao što je puls, pritisak, temperatura, itd. Pacijenti ne moraju biti vezani za bolničke instrumente, mogu da šetaju zajedno sa bežičnim sensorima, koji kontinualno šalju informacije ka centralnom računaru. Specijalni slučaj za praćenje zdravstvenog stanja je praćenje šećera u krvi[8]. Dijabetičari koji nemaju mogućnost da stalno prate svoj nivo šećera imaju mogućnost da pomoću bežičnih senzora budu stalno posmatrani. Ako je izmereni nivo sa senzora iznad dozvoljene visine, pomoću infuzije dobijaju odgovarajući lek. Osim kontinualnog praćenja zdravstvenog stanja pacijenta, moguće je i lociranje pozicije pacijenta. Određivanje lokacije čoveka može biti korisno i kod praćenja starijih osoba koje žive same ili u gerontološkom centru.

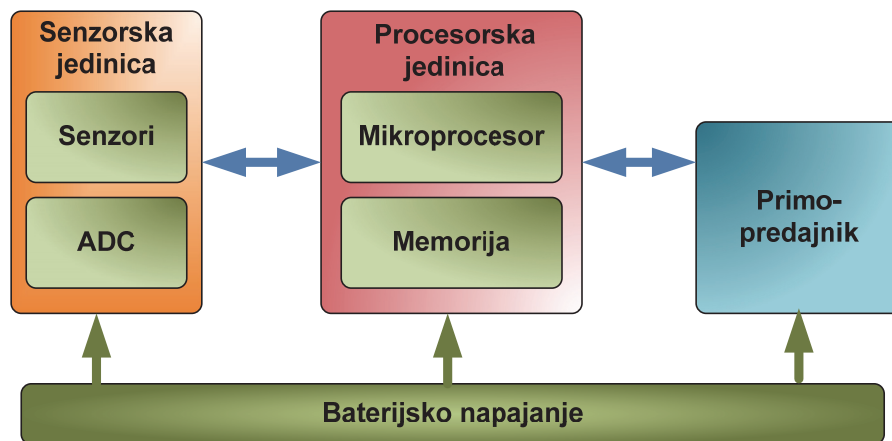
Bežični senzori su sve popularniji kod komercijalnih aplikacija. Jedna potencijalna primena BSM-a je u inteligentnim kućama. U domovima sa inteligentnim upravljanjem grejanja, svetlosne tehnike, sigurnosnog sistema, itd., prisutni su razni senzori i aktuatori [80]. Primenom bežičnih senzora olakšavaju se i u velikoj meri smanjuju troškovi procesa instalacije [79]. Pomoću bežičnih senzora temperature, kod velikih prostornih objekata se

meri temperatura po prostorijama i u skladu sa zahtevima, na osnovu izmerenih vrednosti realizuje se i posebna regulacija [9]. Sa ovakvom primenom bežičnih senzora dolazi do velike uštede energije. Implementacija bežičnih senzora kod automobila donosi razne aplikacije. Pomoću senzorskih mreža može da se kontinualno prati lokacija automobila. Bežična senzorska mreža se organizuje tako da je svaki automobil predstavljen kao čvor sa bežičnim senzorom, i ukoliko se nađu na autoputu, razmenjuju informacije, kao što su vremenski uslovi na putu, saobraćajne nesreće, zastoj u saobraćaju, itd.

Osim navedenih aplikacija, postoje mnogobrojna istraživanja vezana za implementacije bežičnih senzora [1]. Doktorska disertacija će biti fokusirana na primenu bežičnih senzora kod industrijskih aplikacija.

2.2 Tehničke karakteristike bežičnih senzora

Bežični senzori su projektovani tako da budu malih dimenzija i da budu energetski mali potrošači [10]. Hardverska struktura bežičnih senzora u većoj meri zavisi od mesta primene i od fenomena koji se posmatra, ali osnovna struktura im je ista. Bežični senzorski čvorovi se sastoje od četiri osnovna dela: senzorske jedinice, procesorske jedinice, primopredajne jedinice i jedinice za napajanje. Osnovna hardverska struktura bežičnog senzorskog čvora je prikazana na slici 2.1. Senzorska jedinica se sastoji od niza senzora i od A/D konvertora. Vrsta senzora zavisi od fenomena koji se posmatra. Senzori posmatranu fizičku veličinu konvertuju u analogni signal (napon). A/D konvertor konvertuje analogni signal u digitalni oblik signala. Kod novijih bežičnih senzora A/D konvertor se fizički nalazi unutar procesorske jedinice, i praktično A/D konvertor je deo procesorske jedinice. Aktuelni procesori koriste redukovani skup instrukcija (RISC), sa malom programskom i radnom memorijom. Ovi procesori često podržavaju još i asinhronu serijsku primopredajnu jedinicu (UART) i opremljeni su digitalnim ulazima i izlazima (I/O). Jedinica za napajanje je važna komponenta senzorskog čvora. U zavisnosti od aplikacije, napajanje može biti i na bazi sunčane ćelije što proširuje aplikativnost senzorskih čvorova na mestima gde ne postoji mogućnost kontinualnog napajanja. Najvažnija komponenta senzorskog čvora je primopredajna jedinica, pomoću nje se obavlja bežična komunikacija i čvor postaje deo bežične senzorske mreže.



Slika 2.1 Hardverska struktura bežičnog senzora

Razvoj bežičnih senzorskih čvorova se odvija u dva pravca. Prvi pravac razvoja je ka integraciji procesorske jedinice i primopredajne jedinice u jedan sklop. Senzori kao posebni moduli za proširenje, povezuju se na baznu pločicu preko specifičnih priključaka. U tom pravcu su išli inženjeri firme Crossbow [11] (kasnije Memsic [41]) pri razvoju svojih senzorskih čvorova. Velika prednost takvih senzora je promena implementacije bežičnog čvora tako da se senzori mogu lako menjati, dok bazna pločica ostaje ista. Rešenje firme Crossbow je tipično rešenje za modularnu realizaciju senzorskog čvora. Posebno postoji procesorska jedinica sa primopredajnikom, a posebno se proširuje senzorskim modulima. Crossbow bazna pločica podržava module koji poseduju senzor osvetljenosti, senzor temperature, senzor ubrzanja (2-osni), magnetni senzor, senzor zvuka (mikrofon), mali piezo zvučnik i GPS prijemnik. Postoji i modul za sopstveni razvoj senzora (*developer board*), na kojem su izvedeni priključci mikroprocesora. Tabela 2.1 prikazuje uporedne karakteristike različitih bežičnih senzorskih čvorova.

Drugi pravac razvoja je razvoj kompaktnih bežičnih senzora, pri čemu se procesorska jedinica integriše sa sensorima u okviru iste štampane pločice. I ovde postoji mogućnost proširivanja, ali ne u tom obimu kao kod gore pomenutih senzorskih čvorova. Takve senzore razvijaju istraživači firme Moteiv [12]. Velika prednost ovih senzora je veoma niska cena proizvodnje i velika robusnost.

Osim ovih pravaca razvoja, razvoja kompaktnih senzora i modularnih senzora, istraživači su razvili Sun SPOT uređaje (Sun-laboratorija iz kompanije Oracle; *SPOT-Small Programmable Object Technology*), veoma popularnu i pogodnu seriju bežičnih senzora [15]. Sun SPOT

podržava senzor osvetljenosti, temperaturni senzor i 3-osni senzor ubrzanja. U ovom slučaju se procesorska jedinica i primopredajna jedinica nalaze na istoj pločici sa pomenutim senzorima. Pored senzora, implementirani su mikro prekidači, LED-ovi i priključci za ulaze/izlaze. Sa takvom strukturom, dobijen je pouzdan i kvalitetan bežični senzorski čvor, koji se lako programira u Java programskom jeziku.

Tabela 2.1 Uporedne karakteristike različitih bežičnih senzorskih čvorova[10],[11] i [15]

	mica2	mica2dot	micaz	iris	SunSpot
Proizvođač	Crossbow	Crossbow	Crossbow	Crossbow	Sun
Mikro kontroler	Atmel Atmega 128L	Atmel Atmega 128L	Atmel Atmega 128L	Atmel Atmega 1281	ARM920T (32 bit)
Takt (MHz)	7.37	4	7.37	7.37	180
RAM (KB)	4	4	4	8	512
ROM (KB)	128	128	128	128	
Podaci (KB)	512	512	512	512	4 MB
Radio	Chipcon CC1000, 315/433/868/916 MHz	Chipcon CC1000, 315/433/868/916 MHz	Chipcon CC2420 2.4 GHz IEE 802.15.4	Chipcon CC2420 2.4 GHz IEE 802.15.4	Chipcon CC2420 2.4 GHz IEE 802.15.4
Maks. udaljenost	150-300m	150-300m	75-100m	50-300m	
Napajanje	2 kom. AA baterija	dugme baterija	2 kom. AA baterija	2 kom. AA baterija	3.7 V,750mAh Lithium ion baterija
PC konekcija	Preko programerske pločice	Preko programerske pločice	Preko programerske pločice	Preko programerske pločice	USB interrfejs
Operativni sis.	TinyOS	TinyOS	TinyOS	TinyOS	Squawk virtualna mašina

Postojeći bežični čvorovi su bazirani na radio komunikaciji po standardu IEEE 802.15.4 i komunikacija se obavlja na frekvenciji od 2.4 GHz. Brzina prenosa može biti i do 250 kbps, a domet može biti i do 150 m u zavisnosti od sredine. Radio komunikacija i standard IEEE 802.15.4 će biti detaljnije opisani u poglavlju 2.5.

Senzorski čvorovi uglavnom koriste baterije tipa AA, AAA ili akumulator za napajanje. Samu dimenziju bežičnog senzorskog čvora ograničava baterijsko napajanje a sama elektronika može biti zanemarljivih dimenzija. Kod nekih aplikacija preferiraju se alternativni izvori energije, kao što su na primer solarne ćelije.

Kada je reč o operativnom sistemu bežičnih čvorova, kod BSM je veoma bitna brzina reagovanja na događaje. U skladu sa ovim zahtevom razvijen je TinyOS operativni sistem [13][14], koji je baziran na događajima (*event-based*). TinyOS se koristi kod senzorskih čvorova proizvođača Crossbow i Moteiv. Operativni sistem kao i programi koji se izvršavaju na njemu pisani su u programskom jeziku NesC. Ovaj programski jezik je baziran na zadacima (*task based*) i prekidima (*interrupt*). U programu se izvršavaju zadaci, sve dok ne dođe do prekida koji se generišu događajima iz spoljašnje sredine. Prekidi su višeg prioriteta, i izvršavaju se nezavisno od zadataka. Veoma važna karakteristika NesC jezika je da se čitanje sa senzora ili radio komunikacija izvršava u razdvojenoj fazi (*split-phase*). To znači da se u slučaju očitavanja stanja senzora, poziva zadatak za očitavanje vrednosti, a nakon toga se izvršavanje programa nastavlja sledećim zadatkom koji je na redu. Kada je senzor uspešno očitao, generiše se prekid i poziva se drugi zadatak za obradu podataka.

Sun SPOT bežični senzorski čvorovi nemaju operativni sistem, već samo *Squawk* virtualnu mašinu [15], na kojoj se izvršavaju Java aplikacije. Kao što je već navedeno, Sun SPOT senzori se programiraju u Java programskom jeziku pomoću programskog okruženja Sun SPOT SDK.

2.3 Crossbow Iris bežični senzorski čvor

Na bazi poređenja karakteristika trenutno aktuelnih i dostupnih modela na tržištu (Tabela 2.1) izveden je zaključak da je za potrebe istraživanja u okviru disertacije najpogodniji model Crossbow Iris(XM2110CA) bežični čvor. Iris omogućava bežičnu komunikaciju na frekvenciji od 2.4 GHz (po standardu IEEE 802.15.4), i koristi Zigbee komunikacioni protokol stek [41],[57]. Kao kod većine savremenih bežičnih čvorova, kao i kod Irisa je veoma bitan faktor niska potrošnja energije. Iris bežični senzorski čvor poseduje tri glavne komponente:

- Procesor sa periferijama
- „Logger Flash“ za čuvanje podataka

➤ Primopredajni radio čip

Procesor Iris čvora je osmобitni mikrokontroler ATmega1281, koji podržava radnu frekvenciju od 8 MHz. Mikrokontroler sadrži programsku fleš memoriju od 128 KB , operativnu memoriju od 8 KB i EEPROM memoriju za čuvanje parametara za podešavanje i konfiguracije od 4 KB. Kao svaki savremeni kontroler, ATmega1281 poseduje razne periferije, kao što su digitalni ulazi/izlazi, A/D konvertori (ADC) i serijski komunikacioni interfejsi (UART, I2C i SPI).

„Logger Flash” je fleš memorija veličine 512 KB, koja služi za čuvanje izmerenih podataka u toku akvizicije.

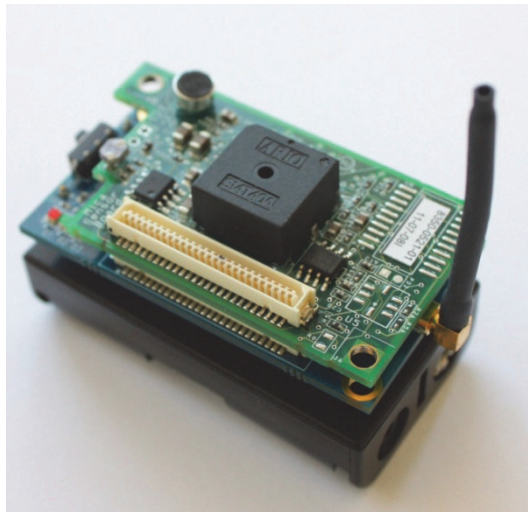
Treća komponenta Iris čvora je RF-CMOS radio primopredajno integrisano kolo. Kao što je već navedeno, ovaj primopredajnik je predviđen za aplikacije bazirane na standardu IEEE 802.15.4. Veoma velika prednost ovog integrisanog kola je podrška za hardversko određivanje RSSI vrednosti. Računanje i određivanje RSSI vrednosti će biti detaljnije opisano u poglavlju 6.2.1.

2.4 Senzorske pločice

Iris bežični senzorski čvor je moguće iskoristiti za različite aplikacije zahvaljujući standardnom 51-pinskom konektoru, pomoću kojeg su moguća proširivanja osnovne pločice. U zavisnosti od konkretne aplikacije postoji mnogo vrsta senzorskih pločica koje je moguće primeniti sa Iris bežičnim čvorom, kao što su:

- MTS 300 i MTS 310 – za višenamenske aplikacije
- MTS 420 i MTS 400 – za aplikacije za praćenje okoline
- MDA 100 – razvojna pločica.

MTS300 senzorska pločica je jedna od najpopularnijih pločica, zahvaljujući tome što poseduje senzor za temperaturu (termistor), senzor za jačinu osvetljenosti (fotoresistor), senzor zvuka (mikrofon), kao imali zvučnik. Na slici 2.2 je prikazan Iris čvor proširen Crossbow MTS300 senzorskom pločicom. MTS 310 se razlikuje od prethodno navedene pločice po tome što poseduje dvoosni senzor ubrzanja (akcelerometar) i dvoosni magnetni senzor.



Slika 2.2 Crossbow Iris bežični senzorski čvor sa MTS310 senzorskom pločicom

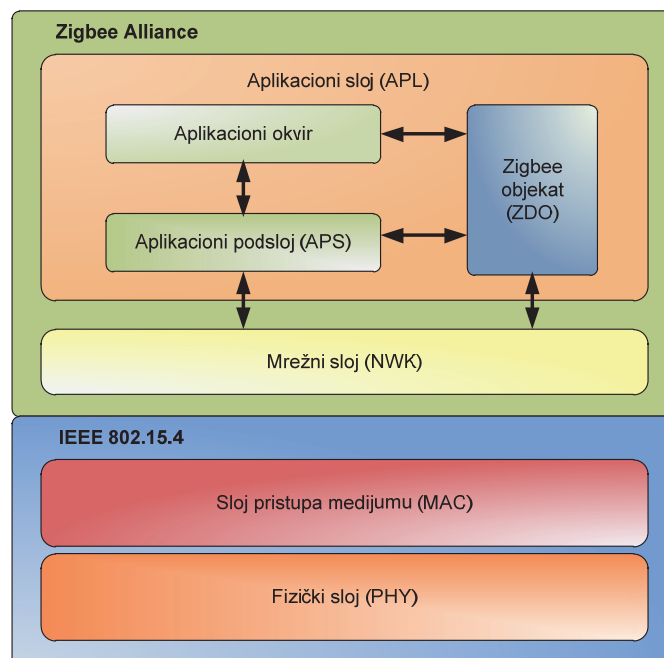
MTS 420 i MTS 400 se najčešće koriste za aplikacije za praćenje fizičkih veličina okoline. Ono što je karakteristično za ove pločice je što poseduju senzore za relativnu vlažnost vazduha i senzore za merenje atmosferskog pritiska. MDA 100 razvojna pločica se preporučuje za aplikacije za samostalni razvoj.

2.5 Standard IEEE 802.15.4 i Zigbee protokol

Standard IEEE 802.15.4 je prvenstveno definisan za LR-WPAN (eng. *Low Rate Wireless Personal Area Network* - nisko brzinske bežične mreže) komunikacione servise [16]. Pogodan je za bežične aplikacije za kontrolu i monitoring, gde se zahteva niska energetska potrošnja. 802.15.4 standard je postao popularan zahvaljujući Zigbee Alliance-u, savezu za razvoj Zigbee protokola, i veoma uspešno se koristi u mnogobrojnim aplikacijama [10].

Velika prednost standarda sa Zigbee protokolom je niska energetska potrošnja. Komunikacija se obavlja na frekvenciji od 868 MHz (u Evropi), na frekvenciji od 915MHz (u Americi i Australiji) i na frekvenciji od 2.4 GHz (široj sveta). Maksimalna prenosna brzina (250 Kbps) se dostiže na prenosnoj frekvenciji od 2.4 GHz. Kodiranje signala se izvršava pomoću DSSS (eng. *Direct Sequence Spread Spectrum*) modulacije. U zavisnosti od frekvencije, modulacija za prenos može biti OQPSK (eng. *Offset Quadrature Phase Shift Keying*) metoda za aplikacije sa frekvencijom od 2.4 GHz ili BPSK (eng. *Binary Phase Shift Keying*) metoda za aplikacije sa frekvencijom od 868 MHz ili 915 MHz.

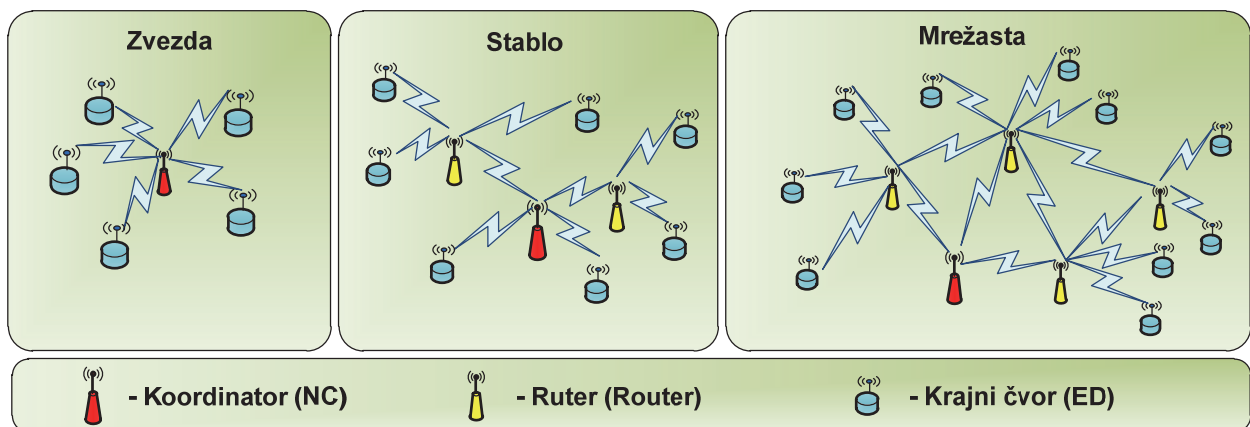
IEEE 802.15.4 standard definiše niže slojeve OSI (eng. *Open Systems Interconnection*) modela, kao što je MAC sloj (eng. *Medium Access Control* - sloj pristupa medijumu) i PHY sloj (eng. *Physical* - fizički) kao što je prikazano na slici (Slika 2.3). U fizičkom sloju su definisane hardverske strukture i prenosna frekvencija bežične komunikacije. U MAC sloju definisan je tip bežičnog čvora i princip komunikacije. Bežični čvorovi mogu biti tipa FFD (eng. *Full Function Device* - uređaj s potpunom funkcionalnošću) ili tipa RFD (eng. *Reduced Functional Device* – uređaj sa ograničenom funkcionalnošću). Princip komunikacije se odnosi na komunikaciju sa bikonima ili sa CSMA-CA (eng. *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) prenosom.



Slika 2.3 Zigbee protokol stek

Zigbee Alliance definiše gornje slojeve, kao što je NWK (eng. *Network* – mrežni) sloj i APL (eng. *Application* – aplikacioni). U mrežnom sloju je definisana vrsta Zigbee uređaja i topologija bežične mreže. Zigbee uređaj može biti ruter, koordinator (NC-eng. *network coordinator*) ili krajni čvor (ED-eng. *End Device*). Ruter uspostavlja komunikacionu vezu, dodeljuje adrese i koordinira komunikaciju u okviru mreže. Ruter je neobavezan član mreže, zavisno od topologije (Slika 2.4). Glavna uloga rutera je povećanje dometa pomoću njegove primopredajne uloge. Krajni uređaji su elementi mreže koji su povezani sa senzorima ili aktuatorima. Ruteri koordinator su FFD tipski uređaji, su dok krajni uređaji najčešće RFD uređaji.

U mrežnom sloju je opisana topologija mreže. Topologija mreže može biti topologija zvezde, stabla ili mrežasta topologija (Slika 2.4). Najjednostavnija struktura mreže je topologija zvezde. U ovom slučaju, u centru se nalazi koordinator preko kojeg se obavlja komunikacija. Kod bežičnih aplikacija veoma čest slučaj strukture mreže je sa topologijom stabla ili mrežastom topologijom, koja omogućava multihop komunikaciju (komunikacija preko više tačaka). U mrežastoj strukturi najveću ulogu imaju ruteri, preko kojih se obavlja najveći deo komunikacije.



Slika 2.4 Prikaz bežične mrežne topologije

Kod Zigbee protokola, na najvišem nivou se nalazi aplikacioni (APL) sloj. U APL sloju se nalazi aplikacioni okvir (eng. *Application Framework*) gde su raspoređeni aplikacioni objekti (APO –eng.*Application Object*). APO objekti su mali programi koji su zaduženi za kontrolu hardvera. Za aplikacije su niži segmenti dostupni preko ZDO objekta (eng. *Zigbee Device Object*) i preko APS objekta (eng. *Application Sub layer*).

3 Lokalizacione tehnologije

Lokalizacione tehnologije na otvorenom prostoru su razvijene u većoj meri zahvaljujući GPS (eng. *Global Positioning System*) tehnologiji. Kao veliki izazov istraživačima postavlja se lokalizacija u zatvorenom prostoru[21][29][36]. U ovom poglavlju će biti opisaneaktuelne lokalizacione tehnologije,sa posebnim naglaskom na lokalizacione tehnologije u zatvorenom prostoru.

Lokalizacione tehnologije koje će se razmatrati spadaju u dve kategorije:

- Lokalizacione tehnologije bazirane na satelitu
- Lokalizacione tehnologije bazirane na mrežnoj strukturi.

3.1 Lokalizacione tehnologije bazirane na satelitskoj tehnici

3.1.1 GPS lokalizacioni sistem

Lokalizacione tehnologije bazirane na satelitskoj tehnici se najčešće primenjuju u slučaju lokalizacije na otvorenom prostoru. Najrasprostranjeniji ovakav sistem je GPS lokalizacioni sistem.

Zahvaljujući razvijenosti GPS tehnologije, mnogobrojni uređaji su opremljeni GPS prijemnikom. Tačnost GPS lokalizacije može biti i do jednog metra. Za ovakvu tačnost neophodni su pomoćni elementi za lokalizaciju i neophodan je otvoren prostor. GPS sistem se sastoji od tri osnovna elementa, satelita, kontrolne stanice i prijemnika [17]. Glavni elementi GPS sistema su 24 satelita, koji emituju radio signale za GPS prijemnike. Na osnovu primljenih signala, prijemnici određuju poziciju na celoj Zemlji. Od 24 satelita u jednom trenutku je aktivan 21 satelit, a ostali služe kao rezervni sateliti. GPS kontrolne stanice prate stanje satelita i,ukoliko je neophodno, koriguju putanju i podešavaju sat satelita. Na svetu postoji pet kontrolnih stanica. Za uspešnu lokalizaciju prijemnik mora primiti signal sa najmanje tri satelita. Aproksimativnu lokaciju je moguće uspešno dobiti već na osnovu

informacije o udaljenosti od satelita. Veća tačnost lokalizacije se može dostići korekcijom podataka iz korekcionih stanica. Udaljenost između satelita i prijemnika se određuje kao proizvod brzine prostiranja radio talasa i vremena koje je potrebno da radio talasi pređu put od satelita do prijemnika. Brzina prostiranja radio talasa je dobro poznata veličina. Vreme se izračunava iz emitovanog pseudo-slučajnog šuma (PSN –eng. *Pseudo-Random Noise*). Koristeći trijangulacionu tehniku, pomoću četiri ili više satelita moguće je odrediti lokaciju. Unutar GPS sistema dostupno je dva servisa. Standardni servis (SPS - eng. *Standard Position Service*) je dostupan za civilne aplikacije. Mnogo tačniji servis za specijalne aplikacije (PPS - eng. *Precise Position Service*) koristi se od strane vojske. Tačnost standardnog sistema je ± 100 m [100] [101].

3.1.2 GPS Lokalizacioni sistem sa korekcijom

GPS sistem sa poboljšanom tačnošću je diferencijalni GPS (eng. *Differential Global Positioning System* - DGPS). Najčešće se koristi za civilne aplikacije. Korekcija se vrši pomoću predajnih korekcionih stanica koji se nalaze na Zemlji i emituju korekzione signale. Korekcija je potrebna zbog uticaja atmosfere na prostiranja radio talasa. DGPS prijemnici ovu korekcionu informaciju kombinuju sa informacijom sa satelita, čime se dobija preciznija lokalizacija. Tačnost DGPS sistema je između 1 i 10 metara [19].

Specijalan lokalizacioni sistem koji funkcioniše po principima diferencijalnog GPS-a je napravljen za vazduhoplovstvo u Sjedinjenim Američkim Državama. Ovaj sistem je poznat pod nazivom WAAS (eng. *Wide Area Augmentation System*). Korekzione stanice su raspoređene širom Severne Amerike. WAAS sistem postiže grešku manju od 3 metra [102].

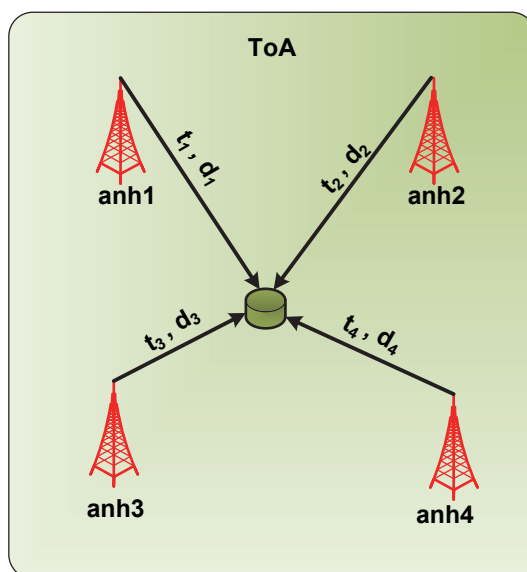
AGPS (eng. *Assisted GPS*) je tehnika je koja koristi neku od već postojećih civilnih bežičnih mreža za poboljšavanje tačnosti pozicioniranja. Najčešće korišćene mreže za asistenciju su mobilne telefonske mreže i WiFi mreže. U ovakvim sistemima je pored GPS prijemnika potrebna i odgovarajuća hardverska struktura, koja omogućava prijem dodatnih signala. AGPS je uglavnom primenjen kod telekomunikacionih uređaja koji već podržavaju neku od navedenih komunikacionih tehnologija. Tačnost AGPS sistema je oko 5 metara [103].

3.2 Lokalizacione tehnologije bazirane na mrežnoj strukturi

Kod lokalizacionih tehnologija koje su bazirane na mrežnoj strukturi prvenstveno je potrebno odrediti rastojanje između čvorova mreže. Lokalizacione metode koje su bazirane na mrežnoj strukturi najčešće poseduju čvorove sa fiksnom pozicijom. Ti čvorovi se nazivaju anhor (eng. anchor) čvorovi ili AP (eng. Acces point) čvorovi. Cilj lokalizacije u ovakvim sistemima je određivanje pozicije mobilnih čvorova sa nepoznatim koordinatama. Za određivanje rastojanja između čvorova mreže, postoje razne metode koje će biti opisane u tekst koji sledi [20][34].

3.2.1 Lokalizacija na osnovu vremena prijema (Time of arrival)

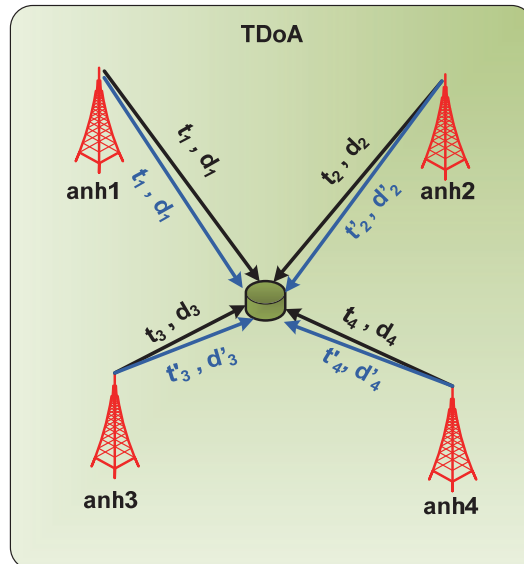
Metode za određivanje rastojanja zasnovane na ToA (eng. Time of Arrival) su bazirane na pretpostavci da je rastojanje između čvorova srazmerno vremenu prostiranja talasa. Ukoliko mobilni čvor poseduje informacije o vremenu potrebnom za prostiranje talasa od anhora (AP-čvora) do mobilnog čvora, moguće je izračunati rastojanje između njih. Ako se zna rastojanje mobilnog čvora od tri anhora, moguće je izračunati poziciju pomoću trijangulacije. Određivanja pozicije pomoću ToA metode moguće je samo ako se zna početak emitovanja signala, a to je moguće samo ako su tajmeri svih čvorova sinhronizovani. Slika 3.1 prikazuje „Time of Arrival“ lokalizacionu strukturu. Sinhronizovanje tajmera svih čvorova je moguće realizovati pomoću LS (eng. Least-Square) i RWGH (eng. Residual Weighting) algoritama [22].



Slika 3.1 Time of Arrival lokalizaciona struktura

3.2.2 Lokalizacija na osnovu vremenske razlike prijema (Time Difference of Arrival)

Metode zasnovane na TDoA su veoma slične ToA lokalizaciji. Za lokalizaciju, obe tehnologije koriste informaciju o vremenu prostiranja talasa. Osnovna ideja TDoA metoda je određivanje rastojanja mobilnog čvora od anhora merenjem razlike vremena između dva primjena signala od anhora (Slika 3.2). TDoA metode za određivanje pozicije zahtevaju značajne hardverske resurse. Svaki čvor mora imati najmanje dva izvora signala [21]. Po teoriji TDoA metoda, tip izvora signala nije definisan. Ove metode koriste dva tipa signala, tako da njihove brzine prostiranja talasa budu različite. Ako anhor emituje dva signala istovremeno, mobilni čvor može odrediti razliku vremena prijema dva različita talasa. Najčešće je jedan od predajnika signala primopredajnik radio talasa koji služi i za komunikaciju. Drugi izvor signala može biti i zvučnik za emitovanje ultrazvučnih signala. Pored zvučnika, čvorovi moraju imati i integrisan mikrofonski sistem za detekciju ultrazvučnih talasa. Nakon određivanja rastojanja čvora od najmanje tri anhora, može da se izračuna pozicija mobilnog čvora.

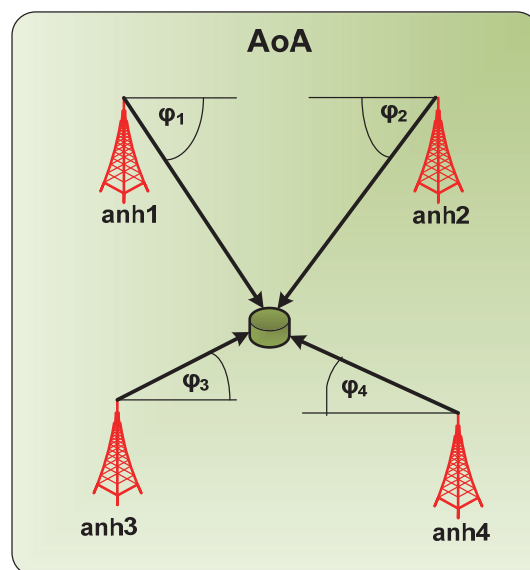


Slika 3.2 Time Difference of Arrival lokalizaciona struktura

3.2.3 Metoda detekcije merenjem dolaznog pravca (Angle of Arrival)

Metode lokalizacije zasnovane na AoA koriste ugao prijemnog signala za određivanje pozicije mobilnog čvora. Ugao prijema se najčešće određuje pomoću radio prijemnika, pomoću niza mikrofona ili pomoću optičkih uređaja [21]. Uloga svakog tipa prijemnika jeste

da odredi ugao prijema signala. U slučaju kada su korišćeni mikrofoni, potrebno ih je postaviti uokolo u nizu. Za određivanje ugla prijema potrebno je najmanje tri ili četiri mikrofona, kako bi bio moguć prijemsiguala iz različitih smerova. Analizirajući fazu i razliku vremena primljenih signala svakog mikrofona može da se dobije ugao prijema do tačnosti od nekoliko stepeni [23]. Ukoliko se zna ugao prijemnog signala za dva ili više anhora, moguće je odrediti poziciju mobilnog senzora (Slika 3.3). Hardverska struktura kod AoA metoda zahteva dodatne elemente kao što su mikrofoni u nizu, tako da su AoA metode skuplje metode lokalizacije, čak su skuplje i od TDoA metoda.



Slika 3.3 Angle of Arrival lokalizaciona struktura

3.2.4 Lokalizacione metode zasnovane na snazi prijemnog radio signala

Drugi aspekt lokalizacije je određivanje pozicije zasnovano na snazi prijemnog radio signala (RSSI - eng. Received Signal Strength Indicator). Kod lokalizacionih tehnologija kao što su ToA, TDoA i ToA nije specificiran medijum koji se koristi za lokalizaciju [20]. U slučaju lokalizacije sa RSSI vrednostima koristi se bežična (eng. *Wireless*) tehnologija. RSSI lokalizacija je bazirana na određivanju rastojanja na osnovu jačine signala komunikacije [24]. Na osnovu bežične komunikacije između dva čvora određuje se jačina primljenog bežičnog signala [26][27]. Lokalizacija pomoću RSSI vrednosti nije ograničena na određenim standardom bežične komunikacije. Moguća je lokalizacija kod mnogobrojnih bežičnih uređaja koji su zasnovani na bežičnim tehnologijama, kao što su WiFi (WLAN), Bluetooth i ZigBee [25]. Velika prednost lokalizacije pomoću RSSI vrednosti je u tome što nije neophodan dodatni hardver

za lokalizaciju. Bežični čvorovi za bežičnu komunikaciju koriste radio module, koji istovremeno mogu da se koriste i za određivanje RSSI vrednosti za susedne čvorove. Zahvaljujući jednostavnoj strukturi, lokalizacioni sistemi koji su bazirani na RSSI lokalizaciji imaju malu energetska potrošnju, male gabaritne dimenzije i nisku cenu.

Na otvorenom prostoru, RSSI vrednost između predajnika i prijemnika obrnuto je srazmerna kvadratu rastojanja d . Snaga bežičnog signala na prijemnoj strani P_r data je u zavisnosti od rastojanja predajnika i prijemnika preko Frisove jednačine [28] :

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}, \quad (3.1)$$

gde P_t označava prenosnu snagu predajnika, G_t pojačanje predajne antene, G_r je pojačanje prijemne antene, dok λ označava talasnu dužinu radio signala (u metrima). Jednačina 3.1 se odnosi samo na računanje RSSI vrednosti na otvorenom prostoru i bez ikakvih prepreka, tako da se može koristiti samo u idealnim slučajevima. U zatvorenom ili otvorenom prostoru gde u realnim slučajevima postoji nekakva prepreka, moraju se uzeti u obzir svojstva radio talasa kao što su refleksija, difrakcija ili rasipanje signala. Najčešće se koristi „RandomLognormal“ distribucija signala zbog najuspešnijeg modelovanja svojstava signala.

$$P_r(d)[dBm] = P_0(d_0)[dBm] - 10n_p \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, \quad (3.2)$$

gde je $P_0(d_0)$ je referentna snaga na referentnom rastojanju d_0 , n_p je „Path Loss Index“ koji se odnosi na okruženje, X_σ je slučajna promenljiva sa normalnom funkcijom raspodele koja ima srednju vrednost nula (eng. *zero mean Gaussian distributed random variable*) i standardnu devijaciju σ i odnosi se na slučajan uticaj prepreke. Lognormalna forma uzima u obzir uticaje fizičkih prepreka na talase uvođenjem parametara n_p i X_σ koji su podešljivi u zavisnosti od okruženja i u zavisnosti od broja prepreka. Koristi se za modeliranje jačine signala i u unutrašnjem i u spoljašnjem prostoru. Koristeći Lognormalnu formu dobija se snaga prijemnog signala u jedinici dBm, koja je standardna jedinica za meru bežičnih signala.

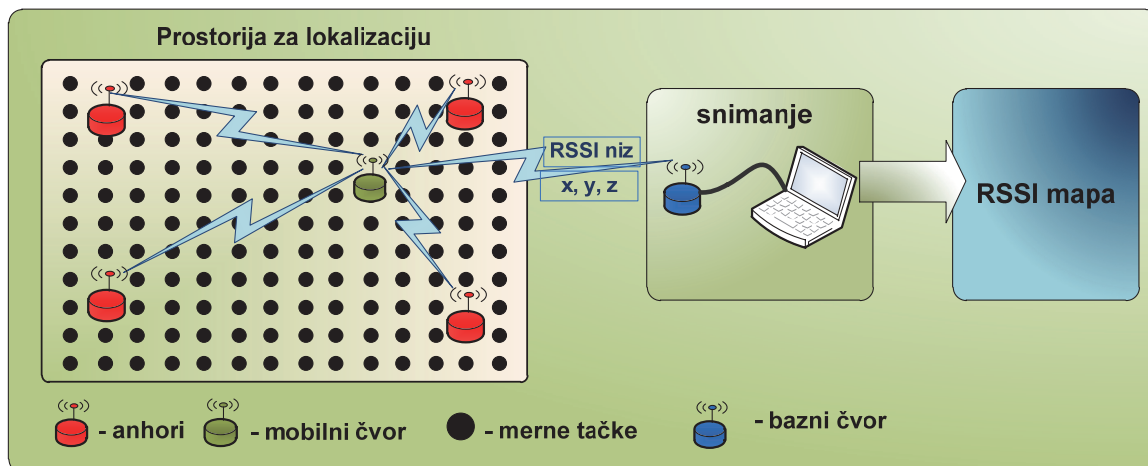
Merenje RSSI vrednosti u toku bežične komunikacije je moguće iskoristiti za određivanje pozicije prijemnika u odnosu na predajnike. U toku rada će biti detaljnije opisane metode koje koriste RSSI vrednosti za lokalizaciju.

3.3 Fingerprint lokalizacija

Fingerprint (otisak radio signala) lokalizacioni metod se odnosi na lokalizaciju koja se obavlja koristeći RSSI vrednosti bežične (RF) komunikacije između čvorova [108],[109]. Ovaj lokalizacioni metod postaje jedan od popularnih lokalizacionih algoritama zahvaljujući tome što lokalizacija sa RSSI vrednostima ne zahteva dodatni hardver za merenje rastojanja između čvorova [30][31][32][33]. Najčešće se koristi kod lokalizacije u zatvorenom prostoru, i najčešće se obavlja pomoću bežične senzorske mreže. Kod ovog metoda su neophodni čvorovi sa fiksnom pozicijom koji se nazivaju anhor (ankeri). Pozicija se određuje merenjem RSSI vrednosti između mobilnih čvorova sa nepoznatim koordinatama i anhor čvorova. Fingerprint lokalizacija se sastoji iz dve faze: merenje RSSI vrednosti i same lokalizacije [29].

3.3.1 Merenje RSSI vrednosti - offline režim lokalizacije

U ovoj fazi se formira takozvana RSSI mapa za izabranu prostoriju i sredinu. RSSI mapa se dobija tako što se na određenim mestima snima RSSI vrednost između mobilnog čvora i anhor čvora. Anhori su postavljeni na unapred određene, fiksne pozicije. Broj anhora i konfiguracija raspodele anhora zavisi od karakteristika prostorije u kojoj se vrši lokalizacija, kao i od željene tačnosti. Merenje RSSI vrednosti se vrši pomoću dodatnog mobilnog bežičnog čvora koja se postavlja nezavisno u svaku mernu poziciju. Merne pozicije su najčešće raspoređene u matričnom-mrežnom obliku. Rezolucija mreže (međusobno rastojanje) mernih tačaka zavisi od željene tačnosti lokalizacije. Što je veća rezolucija kojom je napravljena RSSI mapa, tačnost lokalizacije će sa velikom verovatnoćom biti veća [34]. Primer za strukturu merenja RSSI vrednosti je prikazan na slici (Slika 3.4).



Slika 3.4 Struktura Offline režima lokalizacije

Izmerene RSSI vrednosti se čuvaju zajedno sa koordinatama merne pozicije. Na kraju merenja se dobija matrica sa RSSI vrednostima sačuvanim zajedno sa koordinatama (x, y, z) mernih tačaka. RSSI vrednosti su sačuvane po kolonama, a pored koordinata sačuvani su i redni brojevi anhora čije su RSSI vrednosti snimljene. U tabeli 3.1 prikazana je struktura podataka RSSI mape.

Tabela 3.1 Format podataka za RSSI mape

Br.	x	y	z	anh.1.	anh.2.	...	anh. n .
1.	0	0	0	14	10	...	9
2.	1	0	0	13	8	...	5
3.	2	0	0	12	6	...	6
...
N .	10	10	10	10	5	...	3

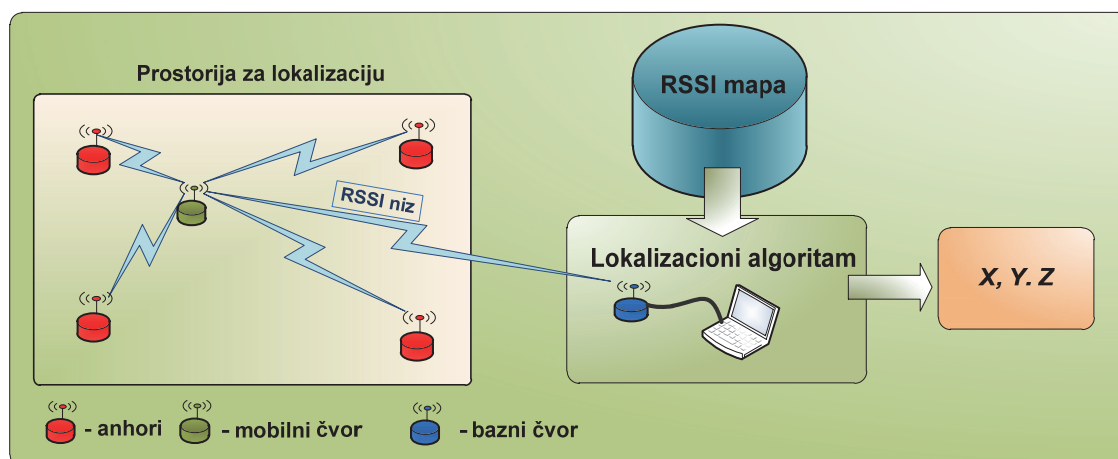
U matrici su sačuvane RSSI vrednosti ukupno N mernih pozicija, koje su izmerene između mobilnog senzora i između n anhora. Z koordinata se koristi samo ako se vrši 3D lokalizacija. Najčešće su RSSI vrednosti izmerene u zavisnosti od koordinata x i y .

Mobilni čvor pojedinačno šalje poruku svakom anhoru. Na osnovu odgovora, mobilni čvor određuje RSSI vrednost za signal sa svakog anhora. Ovim je snimljen „fingerprint” (otisak prsta) za ovu mernu tačku. Nakon određivanja RSSI vrednosti svih anhora, mobilni čvor šalje izmerene podatke baznom čvoru koji je u direktnoj vezi sa računaru. Bazni čvor i računar u ovom slučaju imaju ulogu samo u prikupljanju podataka. RSSI vrednosti se snimaju na računaru, zajedno sa odgovarajućim koordinatama. Sakupljanjem merenja za sve merne pozicije, na kraju se dobija RSSI mapa za čitavu prostoriju. RSSI mapa za svaku prostoriju je

jedinstvena i može se koristiti za lokalizaciju samo unutar te prostorije. Ukoliko se u prostoriji menja raspored nameštaja, opreme ili raspodela anhor čvorova, proces snimanja RSSI vrednosti se mora ponoviti. Detaljniji opis merenja RSSI vrednosti će biti dat kod prikaza eksperimentalnih rezultata u poglavlju 6 (Eksperimentalni rezultati u laboratorijskoj okolini).

3.3.2 Lokalizacija pomoću RSSI vrednosti – online režim

U online režimu fingerprint lokalizacije vrši se lokalizacija mobilnog senzorskog čvora. Mobilni čvor se nalazi u prostoriji gde su već snimljeni RSSI podaci (postoji RSSI mapa). Koordinate mobilnog čvora su nepoznate. Po sličnom principu kao u offline režimu, mobilni čvor šalje poruku (zahtev za odgovor) anhorima. Iz odgovora, mobilni čvor određuje RSSI vrednost, koju šalje baznom čvoru, a bazni čvor prosleđuje računaru. Mobilni čvor šalje samo niz RSSI vrednosti, odnosno „fingerprint“ za tačku sa nepoznatim koordinatama. Na računaru se nalazi baza podataka RSSI vrednosti (RSSI mapa) za odgovarajuću prostoriju. Na osnovu RSSI mape, pomoću lokalizacionih algoritama, računar određuje moguću koordinatu mobilnog čvora. U zavisnosti od aplikacije, izračunate koordinate se prosleđuju nazad mobilnom čvoru ili se dalje obrađuju za neku drugu aplikaciju. Struktura online režima lokalizacije je prikazana na slici 3.5.



Slika 3.5 Struktura online režima lokalizacije

Lokalizacioni algoritam koji se koristi za određivanje koordinata ima najveću ulogu kod uspešnosti lokalizacije. Algoritmi koji će biti korišćeni za određivanje pozicije mobilnog senzora biće opisani u sledećem poglavlju. Tačnost sa kojom će biti određena pozicija mobilnog čvora u velikoj meri zavisi od strukture prostorije, od strukture anhor čvorova i od lokalizacionog algoritma. Promene u strukturi prostorije zbog eventualnog prisustva čoveka

ili pomeranja pokretnih objekata mogu da izazovu netačnu lokalizaciju. Veoma je bitno izabrati najbolju strukturu anhor čvorova i primeniti najuspešniji algoritam za određivanje pozicije mobilnog čvora. Uspešnost lokalizacionih algoritama kod fingerprint lokalizacije će biti detaljnije opisana u u poglavlju 6 (Eksperimentalni rezultati u laboratorijskoj okolini).

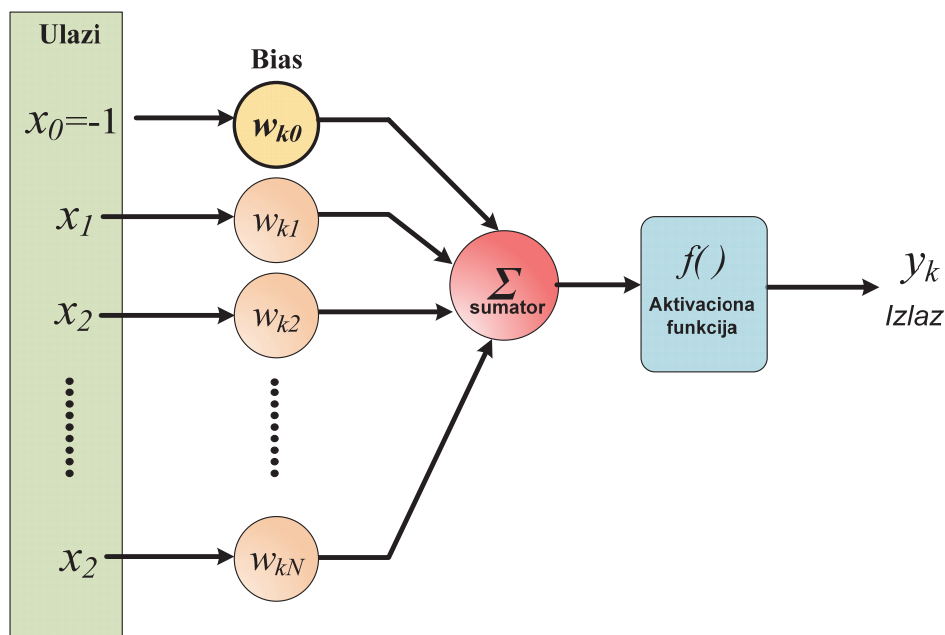
3.4 Lokalizacioni algoritmi

Na uspešnost „fingerprint“ lokalizacije najveći uticaj ima algoritam koji se koristi za određivanje pozicije mobilnog čvora na osnovu snimljene RSSI mape [99]. Postoje algoritmi koji su zasnovani na jednostavnom principu traženja sličnosti uzoraka iz baze podataka sa traženom RSSI vrednosti. Najčešće su uspešno primenjivan algoritmi koji se koristi za klasifikacione zadatke [35] [36]. U daljem tekstu će biti dat opis najčešće korišćenih algoritama za lokalizaciju [37].

3.4.1 Veštačke neuronske mreže u lokalizaciji

3.4.1.1 Opšti opis veštačke neuronske mreže

Veštačke neuronske mreže (VNM, eng. *artificial neural networks*) su razvijene za obavljanje računskih zadataka, modelovanja i rešavanja mnogobrojnih klasa problema [38][39]. Veštačke neuronske mreže su modelovane na osnovu biološkog modela neuro-fiziološkog i neuro-psihološkog nervnog sistema. Modelovanje nervnog sistema pomoću veštačke neuronske mreže je veoma složen zadatak, budući da nervni sistem ljudskog mozga sadrži 10^{11} neurona i preko 10^{14} međusobnih konekcija, sinapsi [40]. Međutim, veštačke neuronske mreže se razvijaju preko pedeset godina i rezultati primena su sve više zadovoljavajuće. Kako kod bioloških sistema, tako se i veštačke neuronske mreže sastoje od međusobno spojenih neurona. Osnovni elementi, neuroni neuronske mreže, imaju više ulaza i jedan izlaz. Ulazima, sinapsama neurona su pridruženi odgovarajući težinski faktori. Svaki ulaz se množi sa svojim težinskim faktorom pre ulaska u sumator. Pomoću sumatora (linearni kombinator) dobija se linearna kombinacija ulaza pomnoženih odgovarajućim težinskim faktorima. Na osnovu sumiranih ulaza i pomoću aktivacione funkcije generiše se izlaz neurona. Svaki neuron može da sadrži jedan specijalni ulaz koji ograničava nivo aktivacije, i koji se naziva prag ili bias. Model neurona je prikazan na slici slici 3.6.



Slika 3.6 Struktura jednog neurona veštačke neuronske mreže

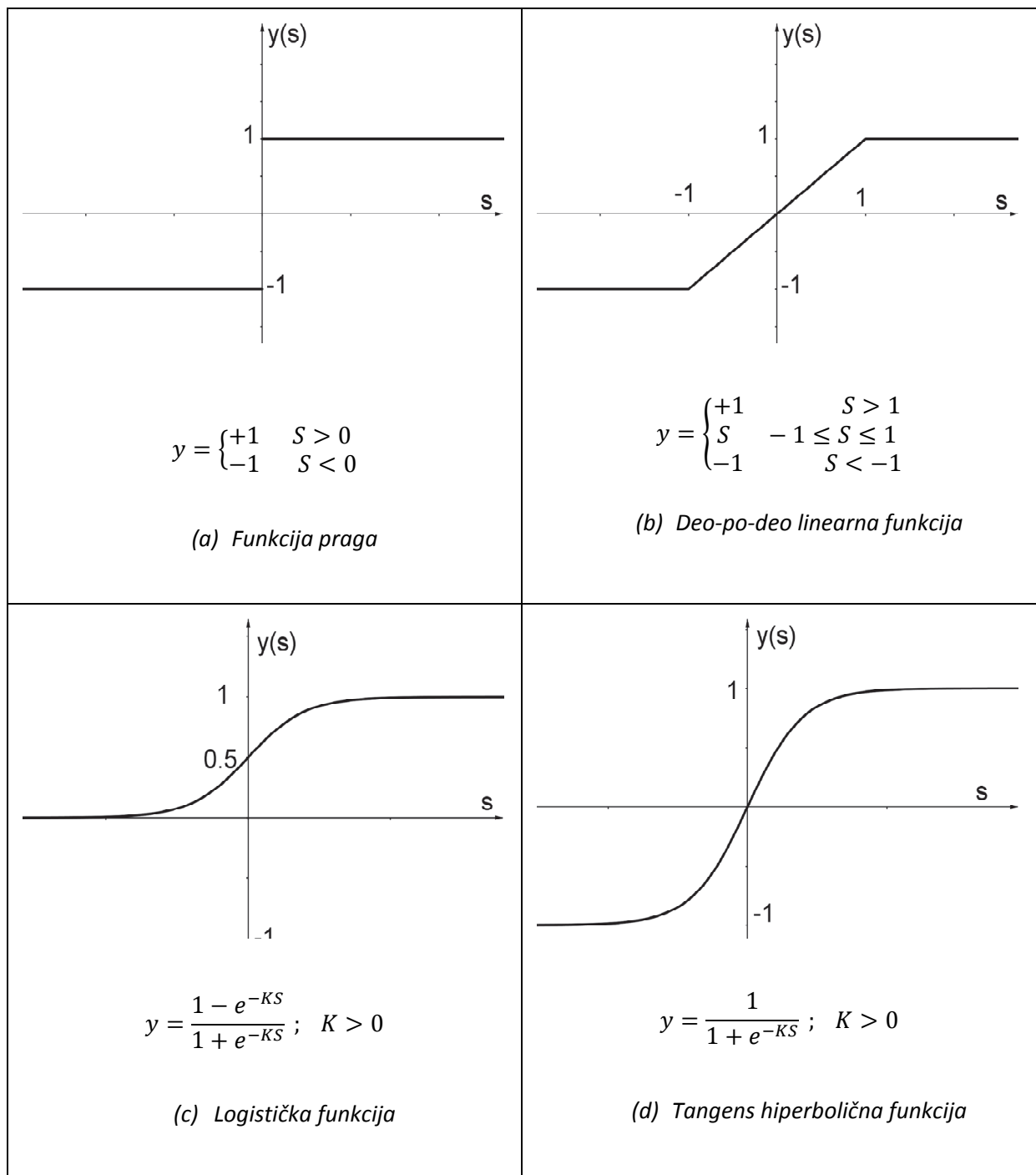
Sa x_i su označeni ulazi, a sa w_{ki} se označava odgovarajući težinski faktori. S je sumirana vrednost k -tog neurona, izražena preko sledećeg izraza:

$$S_k = \sum_{i=0}^N w_{ki} x_i \quad (3.3)$$

Izlaz neurona se formuliše kao:

$$y_k = f(S_k) \quad (3.4)$$

Izlaz k -tog neurona zavisi od aktivacione funkcije, koju jemoćue izabrati u zavisnosti od aplikacije za koju se koristi neuronska mreža. Na slici 3.7 je prikazano četiri najčešće korišćene aktivacione funkcije: a) funkcija praga, b) deo-po-deo linearna funkcija, c) logistička funkcija, d) tangens hiperbolična funkcija.

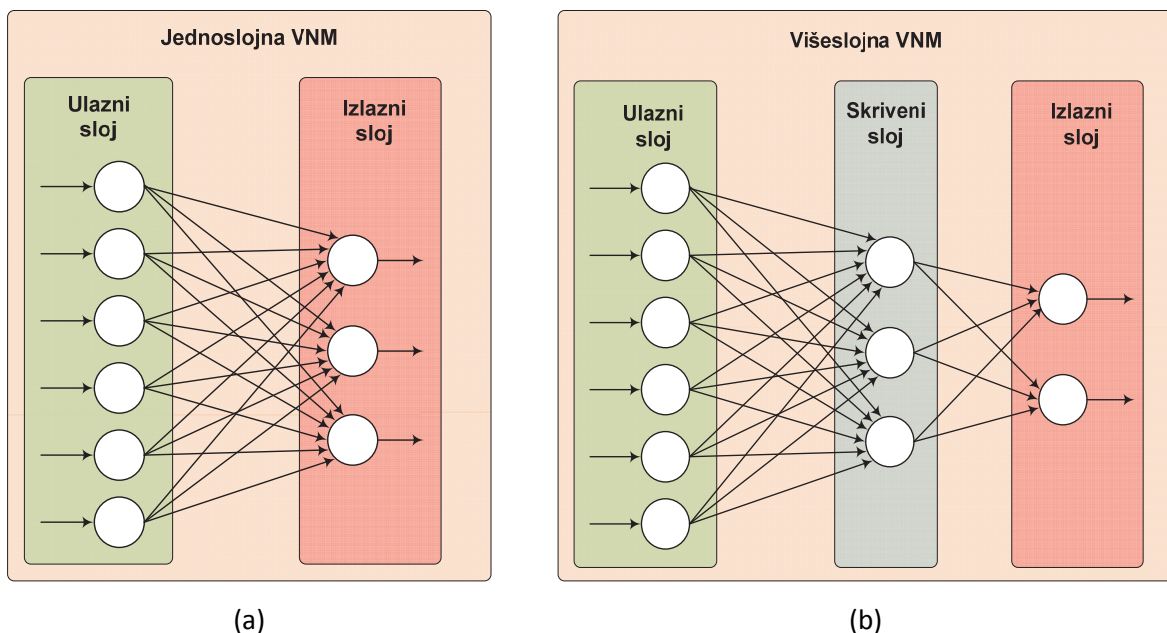


Slika 3.7 Najčešće korišćene aktivacione funkcije

Neuronske mreže se formiraju povezivanjem više neurona. Struktura se prikazuje pomoću graf dijagrama, gde se neuroni predstavljaju kao čvorovi graf dijagrama. Težinski faktori su reprezentovani u formi konekcije između čvorova.

Arhitektura neuronske mreže opisuje strukturu, poziciju ulaza i poziciju izlaza neuronske mreže. Skup neurona koji se nalazi na istom nivou naziva se sloj neuronske mreže. U

zavisnosti od arhitekture, postoji jednoslojne i višeslojne neuronske mreže. U slučaju jednoslojnih mreža postoje samo ulazni i izlazni sloj neurona. Ulazni sloj služi samo za prihvatanje i prenošenje ulaznih podataka. Neuroni u ulaznom sloju su bez zadatka sumiranja i bez aktivacione funkcije. Procesni sloj je predstavljen u formi izlaznog sloja, zajedno sa sumatorom i aktivacionom funkcijom. Izlazi izlaznog sloja su istovremeno i izlazi iz neuronske mreže. U slučaju višeslojne mreže, pored ulaznog i izlaznog sloja, prisutni su i međuslojevi neurona. Jedan ili više slojeva sa procesnim zadatkom nazivaju se skriveni sloj (eng. *Hidden layer*). Ulazni sloj je direktno povezan sa ulazima prvog skrivenog sloja, zatim su izlazi skrivenog sloja povezani sa ulazima sledećeg skrivenog sloja ili izlaznog sloja. Tok signala se uvek kreće od ulaznog sloja prema izlaznom sloju preko skrivenih slojeva. Struktura jednoslojne i višeslojne veštačke neuronske mreže je prikazana na slici 3.8.



Slika 3.8 Strukture veštačke neuronske mreže

(a) Jednoslojna VNM, (b) Višeslojna VNM

Veštačke neuronske mreže se uspešno mogu primenjivati kod aproksimacije statičkih i dinamičkih nelinearnih sistema. Korišćenje VNM počinje obukom (eng. *training*) veze ulaza i izlaza. Za obuku veštačke neuronske mreže sa nadzorom (eng. *Supervised training*) je neophodno imati skup uzoraka ulaza i izlaza za željenu aproksimaciju. U toku obuke VNM mreže podešavaju se težinski faktori, sinapse mreže, na osnovu poznatog skupa ulaza i izlaza. Podešavanjem težinskog faktora mreže moguće je dostići željeni skup izlaza za

odgovarajući skup ulaza. Obuka se izvršava iterativnim podešavanjem težinskih faktora. Cilj obuke je da se minimizuje rastojanje između željenog i stvarnog izlaza, odnosno da se za određeni skup ulaza mreže dobije odgovarajući odziv na izlazu. Za obuku VNM postoji više različitih algoritama [40].

3.4.1.2 Implementacija VNM za problem lokalizacije

U slučaju lokalizacije, na ulaze VNM se dovode izmerene RSSI vrednosti između svakog anhora. VNM ima onoliko ulaza koliko anhora se koristi u toku lokalizacije. Na izlazu VNM se očekuju (x,y) koordinate mobilnog čvora. Obuka neuronske mreže se vrši pomoću uzoraka RSSI vrednosti koji su snimljeni u RSSI mapu u offline režimu. Izmerene RSSI vrednosti moraju biti organizovane u matričnoj formi:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{1i} & \cdots & S_{1n} \\ S_{j1} & S_{ji} & \cdots & S_{jn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & S_{Ni} & \cdots & S_{Nn} \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

gde s_{ji} označava RSSI vrednost i -tog anhora, $i \in (1, n)$ na j -toj mernoj tački, $j \in (1, N)$. Matrica S sadrži RSSI podatke za N uzoraka (mernih tačaka) za n anhora. Svaka vrsta matrice označava izmerene RSSI podatke za jednu mernu tačku. Za svaku mernu tačku u RSSI mapi su sačuvane i odgovarajuće koordinate. Za obuku VNM neophodno je imati ulazne uzorke sa odgovarajućim izlaznim uzorcima. Željeni izlazi, odzivi VNM će biti koordinate organizovane u odgovarajućoj matričnoj strukturi.

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_j & y_j \\ \vdots & \vdots \\ x_N & y_N \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Matrica r sadrži željene izlaze za odgovarajuće ulaze iz matrice S . Svakom ulaznom uzorku iz matrice S odgovara izlazni uzorak iz matrice r .

U toku istraživanja su primenjivane neuronske mreže sa višeslojnom strukturom. Pored ulaznog i izlaznog sloja primenjivan je jedan dodatni skriveni sloj neurona. U ulaznom sloju

broj neurona odgovara broju ulaza. Broj ulaza zavisi od broja anhora primenjenih u lokalizaciji. Ukoliko se koristi četiri anhora za lokalizaciju, u ulaznom sloju je četiri neurona. Kao što je već navedeno, ulazni sloj ne obavlja procesni zadatak, već služi samo za prihvatanje i prenošenje ulaznih podataka (RSSI vrednosti). Broj neurona u izlaznom sloju je određen brojem koordinata lokalizacije. U slučaju da je reč o dvodimenzionalnoj lokalizaciji, VNM ima jedan izlaz za koordinatu x i jedan izlaz za koordinatu y , kako je dato i u matricnoj strukturi izlaza. U skrivenom sloju, broj neurona nije unapred definisan. U toku istraživanja je analizirano koja struktura (broj neurona u skrivenom sloju) najviše odgovara zadacima lokalizacije. U slučaju da je broj neurona u skrivenom sloju mali, tačnost lokalizacije neće biti zadovoljavajuća, a ukoliko je broj neurona u skrivenom sloju predimenzionisan, odziv VNM će biti spor i zahtevaće velike procesorske resurse. Potrebno je naći odgovarajući broj neurona koji zadovoljava tačnost lokalizacije i ne zahteva velike računске resurse. Na uspešnost lokalizacije u većoj meri utiču još i aktivacione funkcije koje se koriste u skrivenom i u izlaznom sloju. U izlaznom sloju je korišćena deo-po-deo linearnaaktivaciona funkcija, dok će u skrivenom sloju biti korišćena tangens hiperbolična aktivaciona funkcija.

Na uspešnost aproksimacije sa VNM utiče i algoritam koji se koristi za obučavanje mreže. U toku istraživanja je korišćena „Levenberg-Marquardt“ metoda za obučavanje VNM [58]. Rezultati eksperimentalni mogućnosti varijacije strukture VNM će biti opisani u poglavlju 6.2.3.

3.4.2 „Weighted k -nearest neighbor“ metoda

Metoda k -najbližih suseda sa težinskim faktorima (eng. *weighted k -nearest neighbor*–WkNN) je metoda koja se koristi za klasifikaciju podataka, pa se tako često koristi i za lokalizacione probleme [60][61][62]. U toku lokalizacije će biti korišćene prethodno snimljene RSSI vrednosti (RSSI mapa), koje su izražene u matricnoj formi kao u jednačini (3.5). Trenutno izmerenu RSSI vrednost za čvor sa nepoznatom pozicijom predstavlja se u obliku:

$$S_t = [S_{t1} \ S_{ti} \ \dots \ S_{tn}], \quad (3.7)$$

gde je S_{ti} predstavlja trenutno izmerenu RSSI vrednost i -tog anhora. Broj n označava broj anhora, koji je u eksperimentalnom delu disertacije biomaksimalno 5.

WkNN algoritam se izvršava po sledećem redosledu:

```

1.  $N \leftarrow$  broj RSSI vrednosti od ( $S_t$ ) //određivanje veličine RSSI matrice
2. for  $i \leftarrow$  od 1 do  $N$  //iteracija se ponavlja N puta
{
određivanje vektora sličnosti  $\mathbf{p}_j$  // računanje euklidskog rastojanja
}
3. sortiranje vektora sličnosti  $\mathbf{p}_j$ //sortiranje po rastućem redosledu
4.  $susedi \leftarrow \mathbf{p}_j(1:k)$  //ukupno k-susednih tačaka
5. određivanje težinskih faktora  $\mathbf{w}_j$  //po izrazu (3.10)
6.  $\mathbf{xy} \leftarrow \mathbf{w}_j \cdot susedi$  //konačne koordinate čvora po izrazu
(3.9)

```

WkNN algoritam se nakon određivanja veličine RSSI mape nastavlja određivanjem sličnosti j -teRSSI vrednosti (iz jednačine(3.5)) i RSSI vrednosti čvora sa nepoznatom koordinatom S_t . Sličnost se računa kao euklidsko rastojanje p_j po sledećoj formuli:

$$p_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_{ti} - s_{ji})^2} \quad (3.8)$$

„Najsličnija“ j -ta tačka će biti referentna tačka sa najmanjim euklidskim rastojanjem p_j od čvora sa nepoznatom koordinatom, odnosno „najsličnija“ tačka posmatranoj tački će biti tačka sa najsličnijim RSSI vrednostima. WkNN metoda ne uzima u obzir samo jednu tačku koja je potencijalna za određivanje koordinate posmatrane tačke, već uzima više tačaka koje se nalaze najbliže posmatranoj tački - „susedne tačke“. Broj susednih tačaka je označen brojem k . Broj k je najvažniji parametar WkNN metode i mora biti dat na početku lokalizacije. Algoritam lokalizacije će biti fokusiran na traženje k najbližih (susednih) tačaka koje najviše odgovaraju (po RSSI vrednosti) posmatranoj tački.

Konačne koordinate posmatranog čvora se određuju po formuli:

$$\mathbf{xy} = \sum_{i=1}^k w_i xy_i \quad (3.9)$$

gde w_i označava težinski faktor, koji služi za ocenjivanje potencijalnih tačaka (suseda), a xy_i su koordinate potencijalnih tačaka. Kao što vidimo konačne koordinate posmatranog senzora se određuju na osnovu koordinata k susednih tačaka pomnoženih odgovarajućim težinskim faktorima. Težinski faktori se određeni za svaki od kandidata, u zavisnosti od greške euklidskog rastojanja p_j po sledećem izrazu:

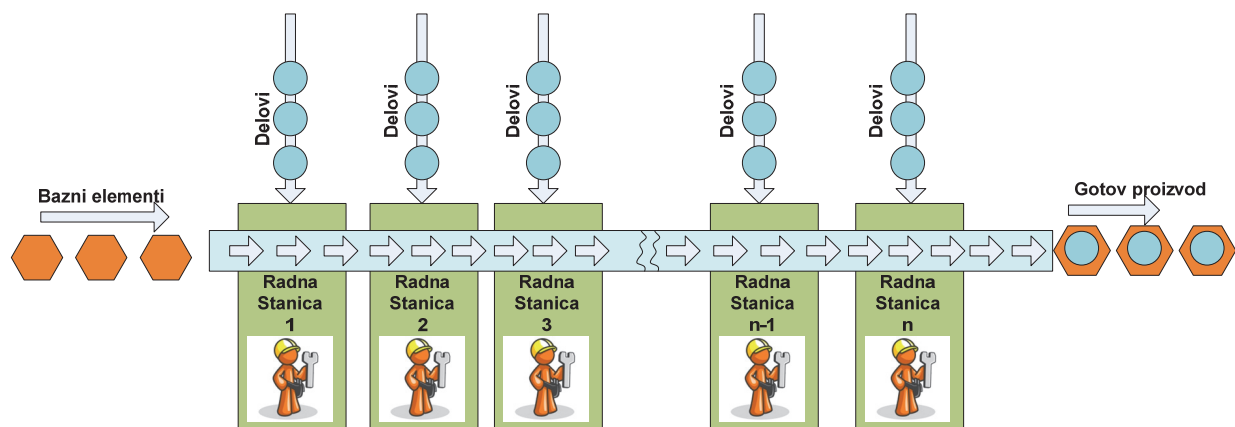
$$w_j = \frac{1/p_j^2}{\sum_{i=1}^k 1/p_i^2} \quad (3.10)$$

Zahvaljujući tome što su konačne koordinate dobijene množenjem k potencijalnih tačaka sa težinskim faktorima, ovaj algoritam je dobio naziv *metode k-najbližih suseda sa težinskim faktorima*. Postoji više varijanti WkNN metode, u zavisnosti od toga kako se računa „sličnost“ susednih tačaka i kako se određuje težinski faktor. U toku eksperimentalnih istraživanja u okviru ove disertacije suprimljeni gore navedeni izrazi. Eksperimentalni rezultati WkNN metode za lokalizaciju sa BSM u laboratorijskim i industrijskim uslovima biće opisani u poglavlju 6.2.4.

4 Praćenje proizvoda u toku montažnog procesa

4.1 Struktura montažne tehnologije

Montažna linija se sastoji od niza radnih stanica na kojima se obavljaju montažne operacije [54] [53]. Primer jedne strukture montažnog sistema sa ručnom montažom je dat na slici 4.1. Proizvodi se sastavljaju u toku kretanja po liniji. Na svakoj stanici se vrši deo ukupnog rada na pojedinačnim sastavnim delovima. Praksa je da se bazni delovi postavljaju na početku linije u redovnim intervalima. Bazni delovi putuju kroz niz uzastopnih stanica na kojima se dodaju komponente čijim spajanjem se dobija gotov proizvod [64]. Kod nekih vrsta montažnih linija, bazni element se pomera ručno od jedne do druge radne stanice [82] [83] [85] [107]. Proizvodna stopa jedne proizvodne linije je determinisana na osnovu najsporije stanice, pošto su i stanice koje su u mogućnosti da funkcionišu brže, ograničene od strane najsporijih stanica.



Slika 4.1 Primer montažnog sistema sa ručnom montažom

Tehnologija ručno-montažne linije je donela veliki doprinos razvoju industrije u dvadesetom veku, i danas se koristi u proizvodnji automobila, potrošačkih aparata, i ostalih montažnih proizvoda koji se izrađuju u velikim količinama [81].

4.1.1 Radne stanice

Radna stanica na ručno-montažnoj liniji je određena lokacija na radnoj stazi gde se vrši jedan ili više zahvata na predmetu montaže, od strane jednog ili više radnika. Zahvati predstavljaju delove celokupnog rada kojim je proizvod montiran. Tipične montažne operacije koje se vrše na stanicama ručno-montažne linije mogu se podeliti u četiri tipa [54] [53]:

- Rukovanje – skladištenje, pomeranje, razdvajanje, obrtanje, orijentacija, stezanje, otpuštanje, itd.,
- Spajanje – vijčana veza, lepljenje, lemljenje, tačkasto zavarivanje, elektro-lučno zavarivanje, zakivanje, presovanje, itd.,
- Kontrola – prisutnosti, ispravnosti položaja, ispravnosti spoja,
- Posebni zahvati – podešavanje, mašinska obrada, pakovanje, demontaža.

Jedna radna stanica takođe obuhvata alate (ručni ili električni alati) koji su potrebni za izvođenje rada na stanici. Na nekim stanicama radnici stoje, dok je na drugim radnicima omogućeno da sede. Ako su radnici u stojećem položaju, oni su sposobni da se kreću oko radne stanice u toku rada. Ovaj način je uobičajen u montaži velikih proizvoda kao što su automobili, kamioni i veliki kućanski aparati. Tipični slučaj je kad se predmet montaže kreće na transportnoj traci konstantnom brzinom kroz radne stanice. Radnik počinje montažni zadatak na prednjoj strani radne stanice i prati bazni deo na transportnoj liniji dok se ne završi zadatak, zatim se vraća na početnu poziciju po sledeći sastavni deo proizvoda i ponavlja radni ciklus. U slučaju manjih montažnih proizvoda (kao što su mali kućanski aparati i električni uređaji, montažni delovi velikih proizvoda) radne stanice omogućavaju radnicima sedeći položaj za vreme izrade zadatka. Ovo je udobniji i manje zamarajući položaj radnicima, a i pogodniji je u smislu preciznosti i tačnosti rada[54].

4.1.2 Transportni sistemi

Transport baznog elementa kod ručno-montažnih sistema od jedne do druge radne stanice može da se izvrši na dva načina [53]:

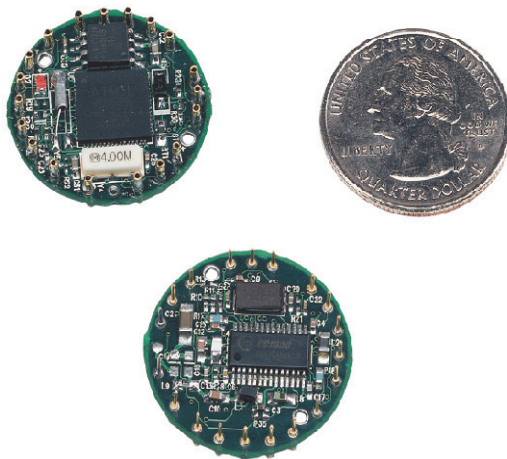
- Ručni, odnosno manuelni transport,
- Mehanizovani transport.

Kod manuelnog transporta, bazni element se transportuje ručno odjedne radne stanice do druge. Ručni transport baznog dela je jednostavna metoda, ali poseduje i neke nedostatke, kao što je rešavanje zastoja u montaži. U slučaju zastoja bazni predmet mora biti smešten u među-skladište ili mora biti predviđeno odgovarajuće mesto kod radne stanice za privremeno skladištenje.

U slučaju mehanizovanog transporta, bazni element se transportuje od jedne radne stanice do druge pomoću mehanizovanog sistema. Kod ručno-montažnih sistema najčešći je slučaj pokretne trake. Pokretna traka može biti raznih struktura, dimenzije i materijala, ali svrha svih transportnih traka je ista, da se bazni element prenese od jedne montažne stanice do druge. Najveća prednost transportnih traka je to što nisu potrebni ljudski resursi za premeštanje sklopa u toku montaže i nije potrebno među-skladištenje između montažnih operacija. Sklop u toku celog ciklusa montaže putuje na liniji od početne do krajnje radne stanice.

4.2 Analiza strukture proizvoda za implementaciju bežičnih senzora

Za praćenje predmeta montaže pomoću bežičnih senzora neophodno je montirati senzor na bazni element sklopa. Usled toga, primenljivost bežične senzorske tehnologije kod montažnih sistema u najvećoj meri zavisi od samog proizvoda koji se proizvodi u montažnoj liniji, pri čemu je ključna mera gabaritna dimenzija proizvoda. Tehnologija bežičnih senzora je za sad prisutna na tržištu kao tehnologija sa aktivnim napajanjem. Bežični senzori, kao svi instrumenti koji sadrže jedinice za napajanje (baterije), imaju veće gabaritne dimenzije u odnosu na (na primer) pasivne RFID tagove. Jedan od kriterijuma za primenu bežičnih senzora je da gabaritna dimenzija senzora ne sme biti veća od predmeta montaže. U komercijalnoj prodaji, najmanji bežični senzorski modul je „Mica2 dot“, prečnika 25 mm [41], prikazan na slici 4.2.



Slika 4.2 „Mica2 dot“ bežični čvor (izvor: www.memsic.com)

U opštem slučaju, za bezbednu montažu bežične senzorske tačke neophodna je minimalno dvostruko veća gabaritna dimenzija predmeta montaže od gabaritne dimenzije senzora. Veoma je važno da senzor bude montiran na bazni element tako da ne ometa radnike prilikom montaže. Bazni element će u toku montaže postati bazni sklop koji sadrži bežični senzor.

Za uspešnu primenu bežičnih senzora neophodno je analizirati i pregledati sastavnicu i ostalu dokumentaciju (lista zahvata, mrežni dijagram, karta toka montaže, itd.), kako bi se izabralo pogodno mesto za bežični čvor. Cilj je da bežični modul prilikom ulaska u montažnu liniju već bude montiran na bazni element montaže. Najpogodnije mesto za montiranje senzora bilo bi kod prvog zahvata, gde se na bazni deo dodaju prvi delovi, jer je jedino ovako moguće praćenje baznog sklopa u toku čitavog ciklusa montaže.

Bežični senzorski modul će biti deo baznog sklopa, sve dok se montaža ne završi i ne dobije se gotov proizvod. To znači da će bežični modul na kraju montaže biti uklonjen sa gotovog proizvoda. Najpogodnije mesto za skidanje mobilnog senzora sa gotovog proizvoda je kod poslednje operacije montaže. Postupak postavljanja i skidanja bežičnog senzora mora biti unapred definisan i pojednostavljen, kako bi što manje uticao na efikasnost montaže proizvoda.

Unapređenjem mikroračunarske tehnologije očekuje se i smanjenje gabaritnih dimenzija bežičnih senzorskih modula, čime će se i postupak montiranja bežičnih senzora pojednostaviti.

4.3 Analiza mogućnosti praćenja pozicije baznog sklopa u toku procesa montaže

Ukoliko je na baznom sklopu postavljen bežični senzor, pomoću sistema za lokalizaciju (poglavlje 3.3) moguće je pratiti njegov položaj u toku procesa montaže. Moguće je pratiti položaj baznog sklopa od trenutka kada je montiran bežični modul, pa sve do poslednje operacije, u kojoj se skidaju bežični senzorski moduli sa već gotovih proizvoda. Praćenje pozicije baznog sklopa je moguće u toku transporta od jedne pozicije do druge, kao i praćenje proizvoda kod svake radne stanice. Praćenjem položaja baznog sklopa u vremenu moguće je meriti koliko vremena je potrebno za montažne operacije i koliko vremena je potrebno za transport između dve operacije.

U okviru disertacije će biti primenjena lokalizacija baznog sklopa pomoću bežične senzorske tehnologije, što znači da će bežična tehnologija biti primenjena u industrijskoj okolini. Ponašanje bežičnih signala u industrijskoj okolini je veoma kritična stvar i zahteva dodatnu pažnju prilikom projektovanja lokalizacionog sistema. Fenomeni kao što su interferencija, difrakcija, rasipanje talasa itd., izraženiji su u industrijskim uslovima. Za lokalizaciju mobilnog senzora, koji je montiran na bazni deo sklopa, neophodne su referentne-fiksne tačke (anohori). Odgovarajućem rasporedom i povećanjem broja anohora moguće je smanjiti ili eliminisati neželjene efekte industrijske okoline. Cilj je da kvalitet RSSI mape bude zadovoljavajućeg kvaliteta za željenu aplikaciju.

Lokalizacija se realizuje po unapred definisanoj rezoluciji. Ova rezolucija se koristi i kod snimanja RSSI mape montažne linije. Preciznost lokalizacije i kompleksnost lokalizacionog sistema će biti veća u slučaju veće rezolucije. Rezoluciju je neophodno prilagoditi sistemu na kojem će biti primenjena lokalizacija. Prilikom projektovanja lokalizacionog sistema za montažne sisteme neophodno je analizirati koja rezolucija je optimalna za taj montažni sistem.

Prilikom izbora rezolucije lokalizacionog sistema neophodno je uzeti u analizu sledeće karakteristike sistema:

- Specijalni zahtevi tačnosti lokalizacije,
- Veličina (dužina i širina) montažnog sistema,
- Broj radnih stanica montažne linije,
- Broj primenjenih anhora,
- Gabaritne dimenzije predmeta montaže,
- Hardverski i softverski resursi lokalizacionog sistema,
- Specifičnost montažne linije,
- Tehnička specifikacija primenjenog bežičnog modula.

Nakon analiziranja karakteristika, neophodno je izabrati rezoluciju koja će biti ispitivana kod eksperimentalnih testiranja.

4.4 Analiza fizičkih veličina koje utiču na kvalitet proizvoda

Za svaku montažnu liniju definisana je odgovarajuća radna sredina i opisani su uslovi montaže. Za svaku operaciju, u tehnološkoj karti montaže opisanje postupak spajanja, kao i korišćenje tehnoloških sistema za montažu. Uslov za dobijanje kvalitetnih proizvoda je kvalitetna montaža delova. Kvalitet proizvoda najčešće se testira na kraju proizvodnje, ali se retko proverava kvalitet montaže u toku procesa montaže. Na kvalitet proizvoda u toku montaže utiču razne fizičke veličine. Moguće je pratiti koje fizičke veličine i u kojoj meri utiču na radni predmet u toku montaže [46][47][48][49][50].

Ukoliko je na baznom delu proizvoda montiran bežični senzorski modul za praćenje pozicije baznog sklopa u toku montaže, moguće ga je iskoristiti i za merenje i arhiviranje raznih fizičkih veličina koje utiču na kvalitet montaže i na kvalitet proizvoda. Pomoću bežičnih senzorskih modula moguće je pratiti uticaje sledećih fizičkih veličina:

- Temperatura baznog sklopa,
- Relativna vlažnost vazduha u sredini gde se nalazi bazni sklop,
- Osvetljenje baznog sklopa,
- Ubrzanje baznog sklopa (udari),

- Zvuk u sredini gde se nalazi bazni sklop.

Uticaji navedenih fizičkih veličina na radni predmet u najvećoj meri zavise od karaktera proizvoda koji se sastavlja na montažnoj liniji. Temperatura, relativna vlažnost vazduha i osvetljenje u najvećoj meri utiču na materijale delova koje se koriste u montaži. Svaki deo koji se montira na montažnoj liniji ima svoje zahteve za okolinu u kojoj se nalazi. Na primer, nebojeni metalni delovi su veoma osetljivi na veliku relativnu vlažnost vazduha. Delovi izrađeni od plastike ili od gumenih materijala veoma su osetljivi na ekstremno visoke temperature [77][78].

Na sam kvalitet montaže i na kvalitet gotovog proizvoda mogu da utiču predimenzionisani veliki udari na radni predmet. Prilikom spajanja dva dela radnici koriste razne alate kako bi lakše izvršili operaciju. Moguće su situacije u kojima radnik upotrebljava prevelike udare na delove, usled kojih su moguća i neprimetna oštećenja na baznom delu proizvoda. Pomoću bežičnih senzora dobija se mogućnost praćenja udara i između radnih stanica, dok bazni sklop putuje od jedne do druge stanice. Može da se desi da je na pokretnoj traci došlo do sudara, zaglavlivanja ili eventualno pada predmeta sa pokretne trake. Praćenjem ubrzanja baznog sklopa moguće je i praćenje ekstremno velikih udara koji utiču na kvalitet montaže [83][81].

Praćenjem zvuka sredine moguće je pratiti ekstremno velike buke kojoj su radnici na montažnoj liniji izloženi. Ova fizička veličina neposredno utiče na kvalitet montaže. Praćenjem ekstremno velike buke koja je štetna po zdravlje radnika, moguće je detektovati i izolovati neprijatne šumove na određenim delovima montažne linije [82][79].

Navedene fizičke veličine sa ekstremnim vrednostima, odnosno vrednostima iznad dozvoljene vrednosti, mogu da utiču na kvalitet montaže. Merenje u okviru ove disertacije je izvršeno u unapred definisanom periodu uzorkovanja. Uzorkovanje, merenje fizičkih veličina je izvršeno kako kod radnih stanica na montažnom sistemu, tako i na putanji između njih. Prava vrednost praćenja fizičkih veličina u toku montaže se izražava arhiviranjem i evidentiranjem svih parametara zajedno sa vremenskim markerima i pozicijama gde su parametri bili izmereni. Model sistema za praćenje i arhiviranje navedenih fizičkih veličina će biti detaljnije opisan u narednim poglavljima.

4.5 Analiza tehnoloških sistema za implementaciju bežičnih senzora

Tehnološki sistemi montažnih sistema su razni pribori ili alati, koji se koriste na ručnim radnim mestima u cilju olakšanja montažnih operacija i povećanja produktivnosti [54]. Tehnološki sistemi imaju veliki uticaj na kvalitet i na efikasnost montaže, prema tome, veoma je važno da ispravno funkcionišu [48] [49]. U slučaju da korišćeni alati i pribori nisu ispravno održavani, može da dođe do oštećenja tehnološkog sistema. Pomoću bežičnih senzorskih mreža moguće je kontinualno praćenje stanja pribora. Zahvaljujući tome, izbegavaju su kvarovi, čime je obezbeđen neprekidni rad tehnološkog sistema [65] [69]. Kontinualno praćenje stanja je moguće kod sledećih tehnoloških sistema:

- Tehnološki sistemi za uvrtnje,
- tehnološki sistemi za nanošenje adheziva,
- tehnološki sistemi za presovanje
- tehnološki sistemi za zakivanje,
- vibrobunker,
- ostali specifični tehnološki sistemi.

Na tehnološkim sistemima, pomoću BSM moguće je pratiti sledeće veličine:

- Temperatura tehnološkog sistema,
- vibracije tehnološkog sistema,
- relativna vlažnost vazduha na mestu primene alata,
- praćenje broja uključenja/isključenja alata u toku montaže,
- praćenje radnih sati tehnološkog sistema.

Navedene veličine u velikoj meri utiču na vek trajanja tehnoloških sistema, a tako i na efikasnost montaže. Prikupljanjem i neprekidnom analizom podataka, moguće su preventivne intervencije. Integracija praćenja stanja tehnoloških sistema u bežični upravljački sistem donosi poboljšanje kvaliteta montažnih sistema, koje dovodi do poboljšanja kvaliteta samog proizvoda.

4.6 Analiza ocenjivanja uravnoteženja montažnih sistema

4.6.1 Vreme montaže

Vreme montaže, je vreme koje je potrebno za izvršavanje montažne operacije [54]. Vreme montaže se sastoji od sledećih vremena:

- Osnovno vreme montaže - t_{io}
- Pomoćno vreme montaže - t_{ip}
- Dopunsko vreme montaže - t_{id}

Osnovno vreme montaže je vreme koji je potrebno za izvršavanje montažne operacije. Ukoliko se u okviru operacije koristi tehnološki sistem onda će to vreme biti vreme koje je potrebno za operaciju sa tehnološkim sistemom (mašinsko vreme). Ako se operacija vrši ručno, ručnim alatima, onda je to vreme koje je potrebno za ručne operacije (ručno vreme).

Pomoćno vreme montaže je vreme koje je potrebno za pomoćne operacije pre ili posle same montažne operacije. Tu spadaju operacije kao što su uzimanje ili vraćanja alata, uzimanje ili pozicioniranje objekta, stezanje itd.

U **dopunsko vreme montaže** spadaju vremenski gubici koji se dešavaju u okviru osnovnog vremena ili u okviru pomoćnog vremena montaže. Gubici su rezultati organizacionih i drugih nedostataka.

Na osnovu svih navedenih vremena, potrebno vreme za izvođenje jedne montažne operacije će biti:

$$t_{ii} = t_{io} + t_{ip} + t_{id} \quad (4.1)$$

Tako će vreme potrebno za izvođenje svih montažnih operacija biti:

$$T_i = \sum_{i=1}^m t_{ii} \quad (4.2)$$

gde m označava broj montažnih operacija.

Moguće je izraziti potrebno vreme za montiranje cele serije proizvoda, kao:

$$t_n = t_{pz} + n \cdot \sum_{i=1}^m t_{ii} \quad (4.3)$$

gde t_{pz} označava pripremno završno vreme, a n označava broj proizvoda u seriji.

Pripremno završno vreme je vreme koje je potrebno za pripremanje radnog mesta za rad, prijem i pregled dokumentacije, raspoređivanje radnog mesta itd.

Navedene vremenske pokazatelje montažne linije, kao što su t_{io} , t_{ip} i t_{id} , moguće je odrediti u toku projektovanja. Za određivanje trajanja montažne operacije postoje mnogobrojne metode [54] kao što su:

- iskustvene metode;
- merenje hronometrom;
- poređenje sa sličnim proizvodima;
- eksperimentalno analitičke metode;
- metode unapred određenih standardnih vremena.

U okviru disertacije će biti korišćeni već utvrđeni vremenski pokazatelji za dati montažni sistem. Pretpostavlja se da je vreme trajanja montažne operacije u toku projektovanja utvrđeno tako da montažni sistem bude uravnotežen u najvećoj mogućoj meri.

4.6.2 Metode za merenje uravnoteženja

Proizvodni montažni sistemi su projektovani tako da proces montaže u svakom trenutku bude uravnotežen. Bazni element ili bazni sklop mora da putuje kroz montažnu liniju tako da na svakoj radnoj stanici provodi onoliko vremena koliko je neophodno za montažnu

operaciju [54][55][52]. Uravnoteženje montažnih linija se postiže tako što se montažne operacije organizuju u ćelijama, a ukupno vreme potrebno za svaku ćeliju mora da bude približno isto. Ukoliko se postigne da su sva vremena koja se troše u ćelijama potpuno ista, tada je linija potpuno uravnotežena, a proizvodnja je glatka [56]. Najčešće je veoma teško postići potpuno uravnoteženu montažnu liniju. U slučaju da su ćelije i operacije montaže optimalno raspoređene, efikasnost montažne linije je veća. Za proveravanje efikasnosti montažnih linija postoji nekoliko metoda [53] [51] [55] [56]. U okviru disertacije će biti korišćene metode:

- *Line Efficiency* (LE) – Efikasnost linije
- *Smoothness index* (SI) – Indeks glatkosti
- Srednja kvadratna greška (eng. *Mean Square Error* - MSE) odstupanja od projektovanog vremena montaže.

Ove metode mogu biti korišćene i za određivanje efikasnosti montažnih linija koje su već u funkciji.

Metoda *line efficiency* - efikasnost linije pokazuje procentualnu iskorišćenost montažne linije, izraženu kao količnik zbira vremena svih operacija i vremena ciklusa pomnoženog sa brojem radnih stanica.

$$LE = \frac{\sum_{i=1}^K t_i}{c \cdot K} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

gde t_i označava vreme potrebno za izvođenje montažnih operacija kod pojedinačnih montažnih ćelija, K označava broj montažnih ćelija, a c označava vreme ciklusa (takt ili ritam [min/kom]).

Smoothness index – indeks glatkosti pokazuje glatkost uravnoteženja montažnog procesa. Savršeno uravnotežen montažni sistem ima indeks glatkosti $SI \approx 0$. Indeks glatkosti je definisan sledećom jednačinom:

$$SI = \sqrt{\sum_{i=1}^K (t_{max} - t_i)^2} \quad (4.5)$$

gde je t_{max} najduže vreme koje je potrebno za izvođenje montažne operacije. Ovo vreme je najčešće jednako sa vremenom ciklusa (c).

Srednja kvadratna greška (eng. *Root Mean Square Error-RMSE*) je jednostavna i dobro poznata metoda za prikazivanje odstupanja željenih i stvarnih veličina. U okviru rada, ova metoda će biti korišćena za određivanje odstupanja stvarne (izmerene vrednosti) vremena montaže od projektovanog vremena montaže. Srednja kvadratna greška će biti korišćena po formuli:

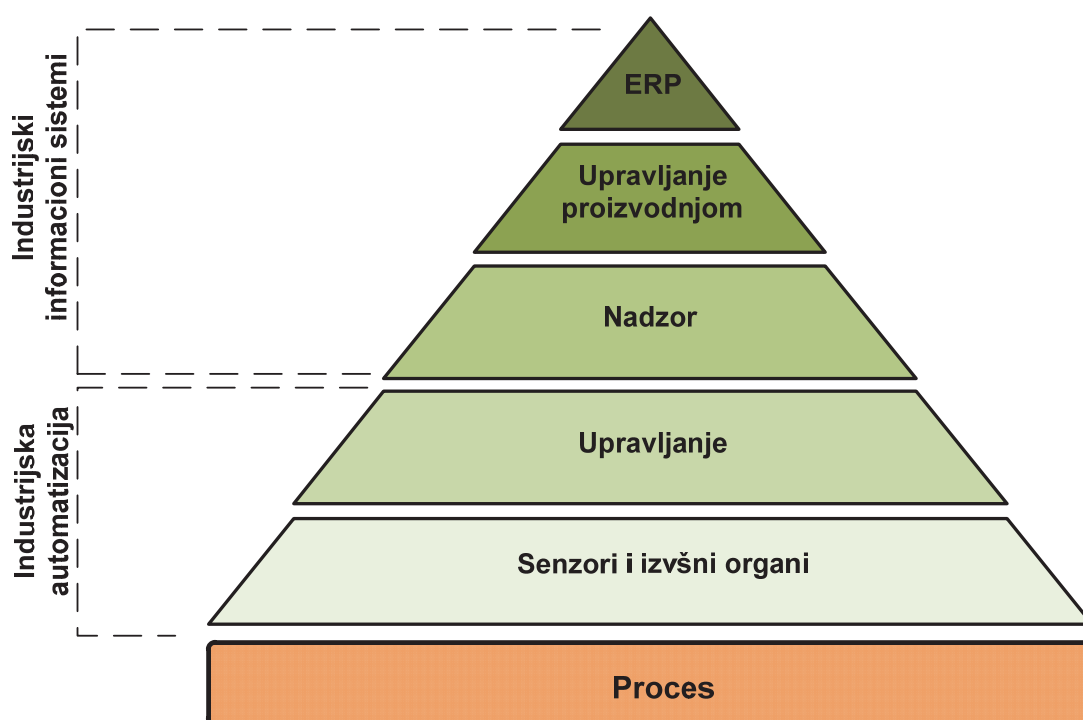
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^{K-1} (t_{im} - t_{ip})^2} \quad (4.6)$$

gde je t_{ip} projektovano (željeno) vreme montaže kod jedne montažne ćelije, t_{im} je stvarno (izmereno) vreme montaže kod jedne montažne ćelije, a K označava broj montažnih ćelija. Pod pretpostavkom da je montažna linija projektovana tako da bude uravnotežena, linija je efikasnija kada je $RMSE$ što manja. To znači da je odstupanje stvarnog vremena montaže od projektovanog malo.

U okviru disertacije su korišćene gore navedene metode za analizu efikasnosti montažnih sistema (poglavlje 5.1.3.1). Merenjem vremena koja su potrebna za izvođenje montažnih operacija kod pojedinačnih montažnih ćelija moguće je napraviti prikaz navedenih veličina. Osim navedenih metoda, moguće je primeniti i druge pokazatelje kvaliteta uravnoteženja montažnog sistema koristeći informacije sa bežičnog sistema za praćenje linije.

5 Prototip za upravljanje montažnim sistemima pomoću bežične senzorske tehnologije

Kao u svakom proizvodnom sistemu, i kod montažnih sistema je moguće razdvojiti upravljački sistem u pet nivoa, kao što je prikazano na slici [105][106].



Slika 5.1 Nivoi upravljačkog sistema automatizovanih procesa

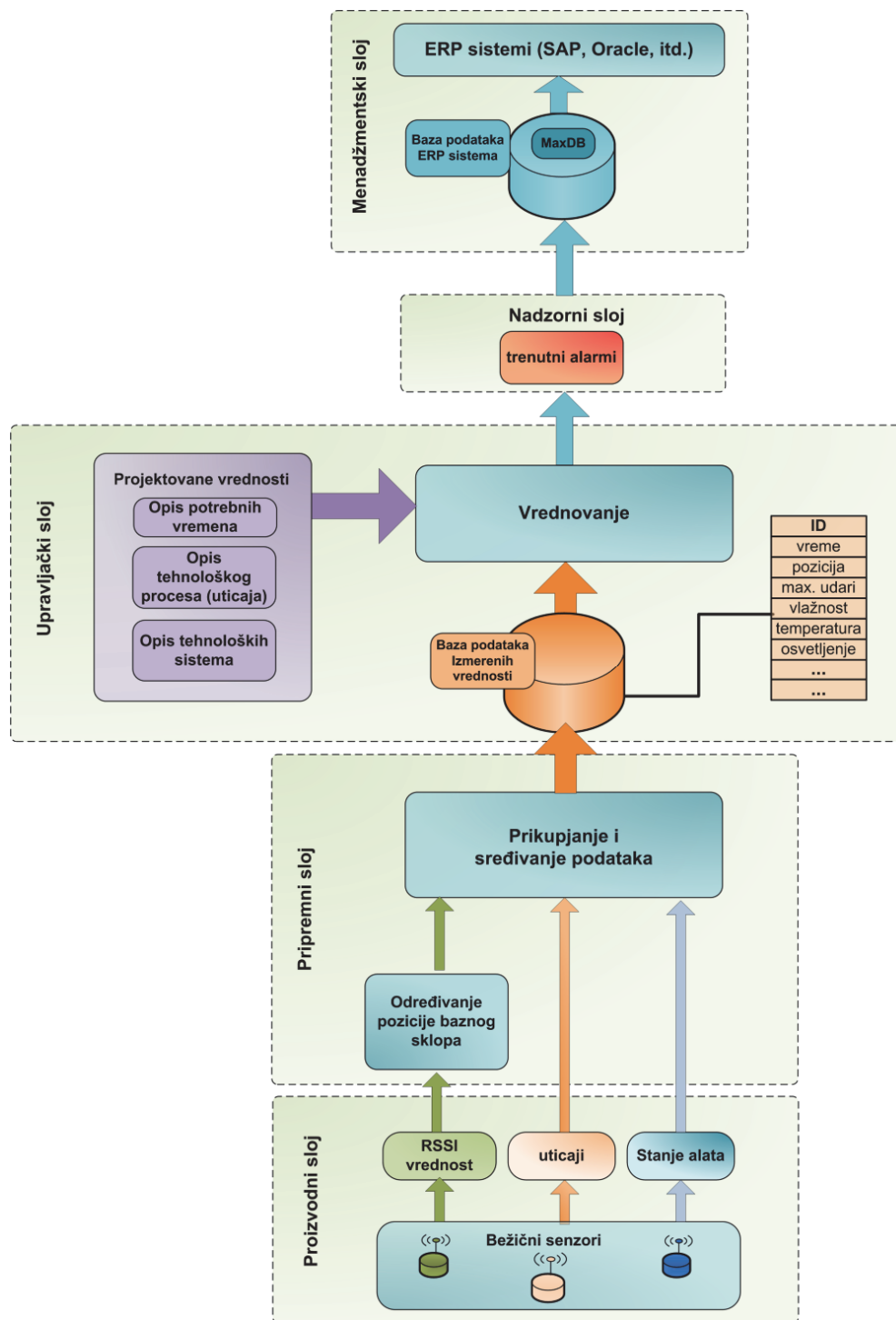
Iznad procesa nalaze se nivo „senzori i izvršni organi“, koji predstavlja najniži nivo automatizacije procesa. U nivou „upravljanje“ nalaze se upravljački elementi koji su u hijerarhiji iznad senzora i aktuatora. Ovi nivoi su nivoi industrijske automatizacije. Iznad tih nivoa nalaze se nivoi „industrijskih informacionih sistema“, gde spadaju: nivo „nadzora“, nivo „upravljanje proizvodnjom“ i nivo „ERP“ (eng. *Enterprise Resource Planning*) [76].

U sledećem poglavlju će biti dat prikaz prototipa za upravljanje montažnim sistemima pomoću bežične senzorske tehnologije, koji će biti u skladu sa standardnim nivoima upravljačkih sistema.

5.1 Predlog modela za upravljanje montažnim sistemima pomoću bežične senzorske tehnologije

Model bežičnog upravljačkog sistema daje hijerarhijski prikaz svih elemenata koji imaju ulogu kod upravljanja ili kod nadzora montažnog sistema. U najnižem nivou se nalaze bežični senzori (nivo „senzora i izvršnih organa“), a na vrhu modela se nalazi sistem za vrednovanje i arhiviranje rezultata, i, u zavisnosti od proizvodne linije, moguće je podatke proslediti ERP sistemima. Struktura modela bežičnog upravljačkog sistema je prikazana je na slici 5.2.

Model bežičnog upravljačkog sistema se može razdvojiti u četiri sloja. Na najnižem nivou se nalazi proizvodni sloj, koji obuhvata bežične senzore koji se koriste za lokalizaciju i nadzor montažnog sistema. Iznad proizvodnog sloja nalazi se pripremni sloj, gde su primenjeni lokalizacioni algoritmi i na osnovu ulaznih podatak formira se jedinstvena datoteka. Ovi slojevi odgovaraju sloju „senzora i izvršnih organa“ iz modela upravljačkog sistema automatizovanih procesa kao što je prikazano na slici 5.1. Iznad pripremnog sloja nalazi se upravljački sloj, gde se formira odluka o kvalitetu montažnog sistema, koji odgovara sloju „Upravljanje“ iz modela upravljačkih sistema automatizovanih procesa (Slika 5.1).



Slika 5.2 Struktura modela bežičnog upravljačkog sistema

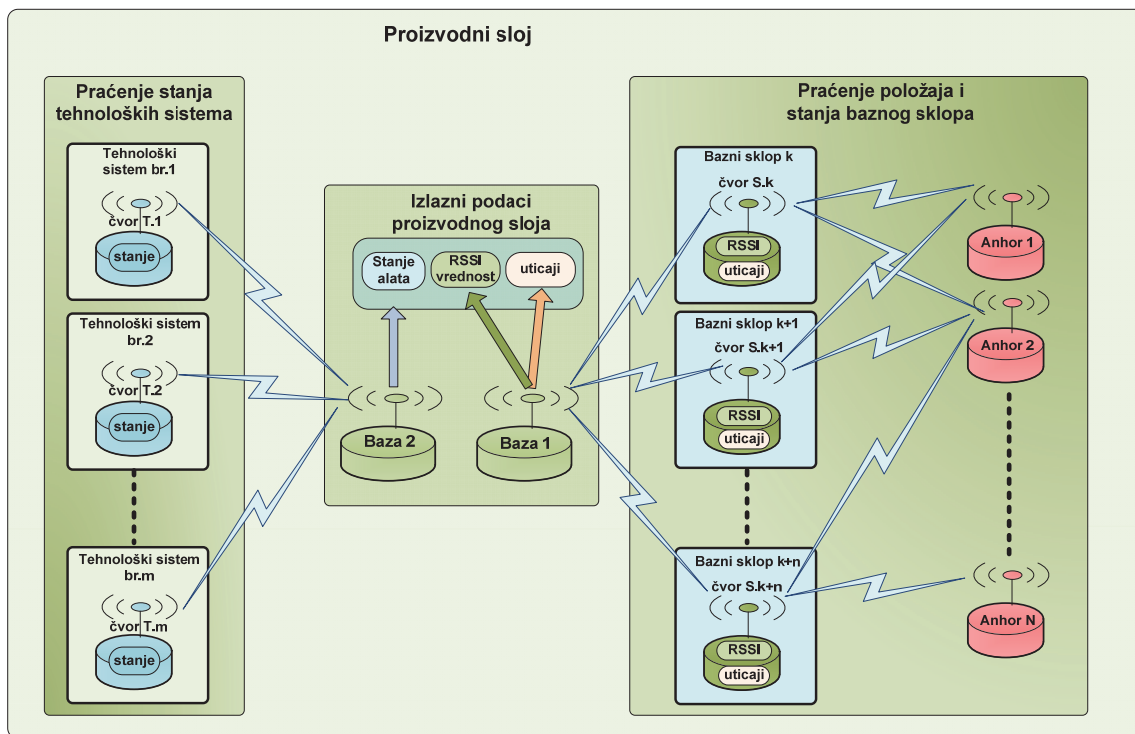
Iznad svih nivoa nalazi se menadžment nivo, koji sadrži arhiviranje podataka i komunikaciju sa ERP sistemom. U ovom sloju su ujedinjeni slojevi upravljačkih sistema automatizovanih procesa, sloj „Upravljanje proizvodnjom“ i sloj „ERP“. Slojevi modela bežičnog upravljačkog sistema će biti detaljnije opisani u sledećim poglavljima.

5.1.1 Proizvodni sloj

U proizvodnom sloju nalaze se bežični senzori implementirani u montažnom sistemu. U okviru proizvodnog sloja modela za upravljanje montažnim sistemima, u zavisnosti od uloge možemo razdvojiti četiri vrste bežičnih čvorova:

- Bežični senzori montirani na bazni sklop,
- Pomoćni bežični moduli za određivanje pozicije baznog sklopa (anhori),
- Bežični senzori montirani na tehnološkom sistemu,
- Bežični bazni moduli za prikupljanje podataka.

Najveći broj bežičnih senzora putuje kroz montažni sistem sa baznim sklopom. Kod prve radne stanice, ovi senzori su već montirani na bazni element i tako prolaze sve faze montaže, sve do poslednje radne stanice gde se razdvajaju od baznog sklopa. Broj primenjenih senzora zavisi od broja baznih sklopova koji se istovremeno nalaze u montažnoj liniji. Pored instaliranih senzora na baznom sklopu, prisutni su još i pomoćni bežični moduli (anhori) sa fiksnom i unapred definisanom (poznatom) pozicijom koji služe za određivanje pozicije baznih sklopova unutar montažnog sistema. Uloga anhor bežičnih čvorova je već opisana kod lokalizacionih metoda. Praćenje stanja tehnoloških sistema je omogućeno preko bežičnih senzora. Na svaki tehnološki sistem ili na tehnološki sistem kritične važnosti postavljaju se bežični čvorovi sa odgovarajućim sensorima. Bežični bazni moduli za prikupljanje podataka služe za skupljanje svih podataka sa bežičnih senzora. Postoji poseban bežični modul za prikupljanje podataka sa baznih sklopova u montaži i poseban modul za prikupljanje podataka sa bežičnih senzora u tehnološkim sistemima. Na slici 5.3 prikazana je struktura bežičnih senzora u proizvodnom sloju.



Slika 5.3 Struktura proizvodnog sloja

Proizvodni sloj se sastoji od tri podsistema:

- Podsystem za praćenje položaja i stanja baznog sklopa;
- Podsystem za praćenje stanja tehnoloških sistema;
- Podsystem za bežično sakupljanje podataka.

Podsistemi imaju različite zadatke i različite uloge u okviru proizvodnog sloja.

5.1.1.1 Podsystem za praćenje položaja i stanja baznog sklopa

Ako se na svaki bazni sklop montira bežični čvor, podsystem za praćenje položaja i stanja baznih sklopova će, osim fiksnih anhora, sadržati onoliko bežičnih čvorova koliko ima baznih sklopova u montažnoj fazi. U montaži se istovremeno nalazi n baznih sklopova, a samim tim i n bežičnih čvorova. Maksimalni broj baznih sklopova u montažnoj liniji, broj n , zavisi od tipa montažne linije i od predmeta montaže. Kod prve radne stanice, redni broj baznog sklopa, kao i bežičnog čvora je k . Broj k se povećava za jedan prilikom ulaska novog baznog sklopa u montažnu liniju, u trenutku montiranja bežičnog senzora. Za označavanje bežičnih čvorova u podsystemu za lokalizaciju će biti korišćena oznaka S . *redni_broj*, dok će za označavanje

bežičnih senzora u podsistemu za praćenje stanja tehnoloških sistema biti korišćena oznaka T_{redni_broj} . Broj anhor čvorova je definisan brojem N .

Uticaji fizičkih veličina na baznom sklopu su praćeni kontinualno, dok su RSSI vrednosti izmerene u trenucima kada bazni čvor to zahteva. Bazni čvor sakuplja sve podatke, RSSI vrednosti svih čvorova i izmerene fizičke veličine na baznom sklopu. U trenucima kada bazni čvor traži merenje RSSI vrednosti od bežičnog čvora (koji je montiran na sklop), sa RSSI vrednostima će biti poslate i izmerene fizičke veličine. Šalju se najveće vrednost svih veličina koje su delovale na bazni sklop od trenutka poslednje poruke. U toku praćenja baznog sklopa karakteristične fizičke veličine i RSSI vrednosti su snimljene u datoteci koja se nalazi u upravljačkom sloju.

5.1.1.2 Podsystem za praćenje stanja tehnoloških sistema

Kod podsystema za praćenje stanja tehnoloških sistema, koriste se odgovarajući bežični senzori u zavisnosti od karaktera i vrste tehnološkog sistema. Ovi senzori su trajno pričvršćeni na tehnološki sistem, tako da oni imaju konstantne redne brojeve u skladu sa prethodno definisanom notacijom. Broj senzora koji su montirani na tehnološke sisteme je označen brojem m . Broj tehnoloških sistema u montažnom sistemu nije definisan brojem m .

5.1.1.3 Podsystem za bežično sakupljanje podataka

Kako podsystem za praćenje položaja i stanja baznog sklopa, tako i podsystem za praćenje stanja tehnoloških sistema bežično šalje svoje izmerene vrednosti podsystemu za bežično sakupljanje podataka. Izmerene RSSI vrednosti i uticaji fizičkih veličina (stanja baznog sklopa) se šalju sa svakog baznog sklopa u odgovarajućim vremenskim trenucima. Bežični čvor *Baza 1* prima podatke preko bežične komunikacije samo sa bežičnih modula koji su montirani na baznim predmetima. Bežični čvorovi sa tehnoloških sistema imaju svoj bazni čvor *Baza 2*, kojem šalju podatke. Bazni bežični čvorovi *Baza 1* i *Baza 2* imaju primopredajnu ulogu. Primaju podatke bežičnom komunikacijom i prosleđuju žičanom vezom (USB ili LAN konekcijom). Bazni bežični čvorovi su interfejsi između bežične i žične komunikacije.

Izlazni podatak proizvodnog sloja su:

- RSSI vrednost izmerena između svakog bežičnog čvora (sa baznih sklopova) i svakog anhora – izvor je čvor *Baza 1*;
- Izmereni najveći uticaji od trenutka prethodnog uzorka (udari, temperatura, vlažnost, itd.) – izvor je čvor *Baza 1*;
- Informacije o stanju tehnoloških sistema – izvor je čvor *Baza 2*;

Podaci se šalju kontinualno, u unapred definisanim vremenskim intervalima. Prilikom izbora perioda uzorkovanja, mora se uzeti u obzir tip montažne linije, kao i računarski, hardverski resursi pripremnog i upravljačkog sloja. U slučaju komunikacionih preopterećenja baznih čvorova, potrebno je uvesti dodatne bazne čvorove i rekonfigurirati bežičnu komunikaciju.

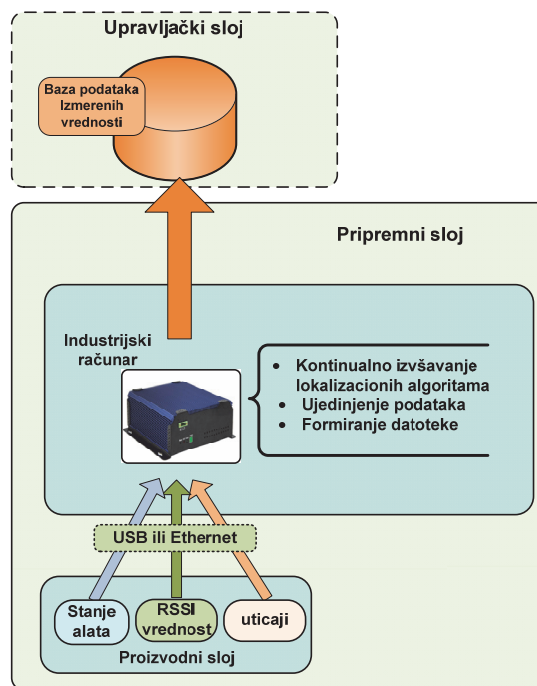
5.1.2 Pripremni sloj

U pripremnom sloju, prenos podataka se izvršava pomoću žičane komunikacije. Komunikacija sa uređajima koji se nalaze u proizvodnom sloju obavlja se preko standardnih komunikacionih protokola. U pripremnom sloju se nalazi jedan ili više industrijskih računara, u zavisnosti od veličine i kompleksnosti montažnog sistema. Ovi računari komunikaciju sa baznim čvorovima (koji se nalaze u proizvodnom sloju) vrše preko USB ili Ethernet komunikacionih interfejsa. Na slici 5.4 prikazani su struktura i elementi pripremnog sloja.

Industrijski računar ima dva zadatka:

- Kontinualno izvršavanje lokalizacionih algoritama;
- Ujedinjenje podataka i formiranje datoteke.

Na industrijskom računaru izvršava se lokalizacioni algoritam, koji određuje stvarnu poziciju baznih sklopova na osnovu RSSI vrednosti.



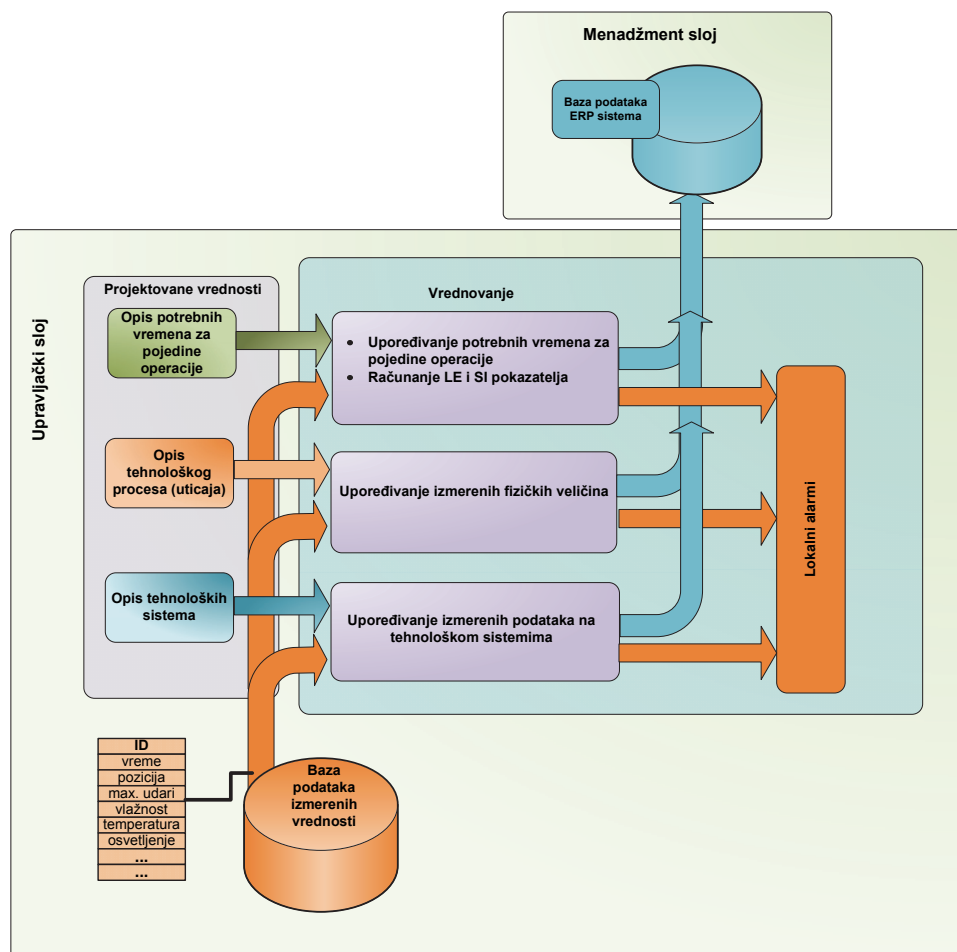
Slika 5.4 Struktura pripremnog sloja

Lokalizacioni algoritam je opisan u poglavlju 3.4. (Lokalizacioni algoritmi). Ukoliko je pozicija uspešno locirana, koordinate baznog sklopa se snimaju u datoteku (koja se nalazi u upravljačkom sloju), zajedno sa izmerenim uticajima na baznom sklopu. Računar, kao klijent, puni bazu podataka lociranim koordinatama i izmerenim vrednostima. Industrijski računar, koji se nalazi u pripremnom sloju, najčešće se fizički nalazi u blizini proizvodnje, zbog ograničenja komunikacionih dometa sa baznim čvorovima. Komunikacija između industrijskog računara i gornjih slojeva se obavlja preko Ethernet (LAN) ili WLAN komunikacionih kanala.

5.1.3 Upravljački sloj

U okviru upravljačkog sloja izvršava se evaluacija izmerenih vrednosti. U datoteci za izmerene vrednosti već su prethodno smešteni podaci koji su sakupljeni u proizvodnom sloju. Baza podataka sadrži informaciju o trenutnom položaju baznih sklopova, o uticajima fizičkih veličina i o stanju tehnoloških sistema. U toku projektovanja montažnog sistema, definisani su uslovi montaže. Savremeni montažni sistemi projektovani su tako da se zna koliko vremena je potrebno za svaku operaciju, koji uslovi okoline moraju da budu ispunjeni, koji su uslovi ispravnog funkcionisanja tehnoloških sistema itd. Glavna uloga upravljačkog

sloja je da uporedi veličine definisane u toku projektovanja sa izmerenim vrednostima, i da formira izveštaj o odluci. Na slici 5.5 prikazana je struktura upravljačkog sloja.



Slika 5.5 Struktura upravljačkog sloja

Vrednovanje montažnog sistema se obezbeđuje na tri nivoa:

- Evaluacija uravnoteženja montažnog sistema;
- Evaluacija kvaliteta montaže na osnovu izmerenih uticaja;
- Evaluacija stanja tehnoloških sistema.

Na kraju svake evaluacije, svaki nivo pravi izlazni izveštaj. U zavisnosti od nivoa, svaka evaluacija u izveštaju opisuje svoju odluku. Svaka odluka se arhivira u bazi podataka menadžment sloja. Ukoliko izveštaj sadrži odluke koji su od kritičnog značaja za kvalitet montažnog sistema, generiše se obaveštenje i šalje se odgovarajućoj osobi.

5.1.3.1 Evaluacija uravnoteženja

Za određivanje stepena uravnoteženja montažnog sistema, u okviru ovog rad korišćene su: metode efikasnosti linije (eng. *Line Efficiency-LE*), indeks glatkosti (eng. *Smoothness index-SI*) i srednja kvadratna greška (eng. *Root Mean Square Error - RMSE*) odstupanja od projektovanog vremena montaže, kao što je opisano u poglavlju 4.6. Pored ovih metoda, za proveru efikasnosti će biti upoređivano odstupanje vremena izvršavanja operacija od projektovanog vremenskog intervala. U okviru evaluacije uravnoteženja montažne linije biće računato:

- Vreme svih montažnih operacija,
- Vreme potrebno za montiranje cele serije,
- Line Efficiency,
- Smoothness index,
- Srednja kvadratna greška odstupanja od projektovanog vremena montaže.

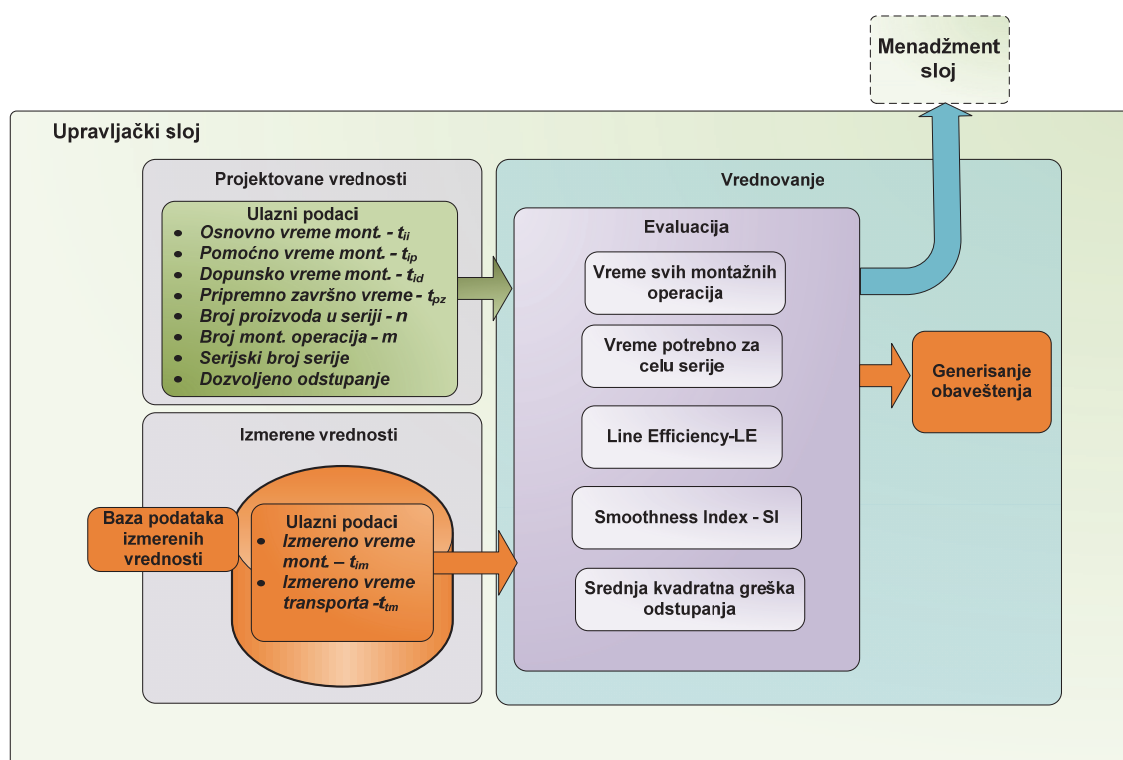
Računanjem gore navedenih veličina moguće je dobiti razne informacije o uravnoteženju montažnog sistema. Na slici 5.6 prikazana je struktura evaluacije uravnoteženja montažne linije.

Ulazne veličine za evaluaciju dolaze iz baze podataka za projektovane vrednosti i iz baze podataka izmerenih vrednosti. Veličine koje su neophodne za evaluaciju iz baze podataka za projektovane vrednosti su sledeće:

- Osnovno vreme montaže - t_{iv} ,
- Pomoćno vreme montaže- t_{ip} ,
- Dopunsko vreme montaže - t_{id} ,
- Pripremno završno vreme montaže- t_{pz} ,
- Broj proizvoda u seriji – n ,
- Broj montažnih operacija – m ,
- Serijski broj serije,
- Dozvoljeno odstupanje.

Većina navedenih veličina, kao što je osnovno vreme montaže i pomoćno vreme montaže, su već bile pomenuti i opisani u poglavlju 4.6 (Analiza ocenjivanja uravnoteženja montažnih

sistema). Osim ovih veličina, potrebni su još i serijski broj serije i dozvoljeno odstupanje. Serijski broj se u ovom kontekstu odnosi na identifikaciju proizvoda koji je sastavljen u okviru montažnog sistema. U toku praćenja baznog sklopa pomoću serijskog broja se identifikuje i definiše gotov proizvod na koji se odnose izmerene vrednosti u montažnoj fazi. Dozvoljeno odstupanje je definisano od strane projektanta montažne linije za evaluaciju uravnoteženja. Definiše dozvoljenu toleranciju za odstupanje vremena montaže od projektovanog vremena, kao i toleranciju za LE i SI vrednosti.



Slika 5.6 Struktura evaluacije uravnoteženja

U toku evaluacije se računaju gore navedeni pokazatelji na osnovu izmerenih vremena montaže i na osnovu izmerenih vremena transporta. Lokalizacijom na osnovu bežičnih senzorskih modula, moguće je samo određivanje vremena kada je proizvod stigao na radnu stanicu, a nije moguće posebno meriti vremena kao što su *pomoćno vreme montaže* ili *dopunsko vreme montaže*.

Vreme svih montažnih operacija i *vreme potrebno za celu seriju* će biti računato na osnovu izmerenih vremena montaže po formuli (4.2) i po formuli (4.3).

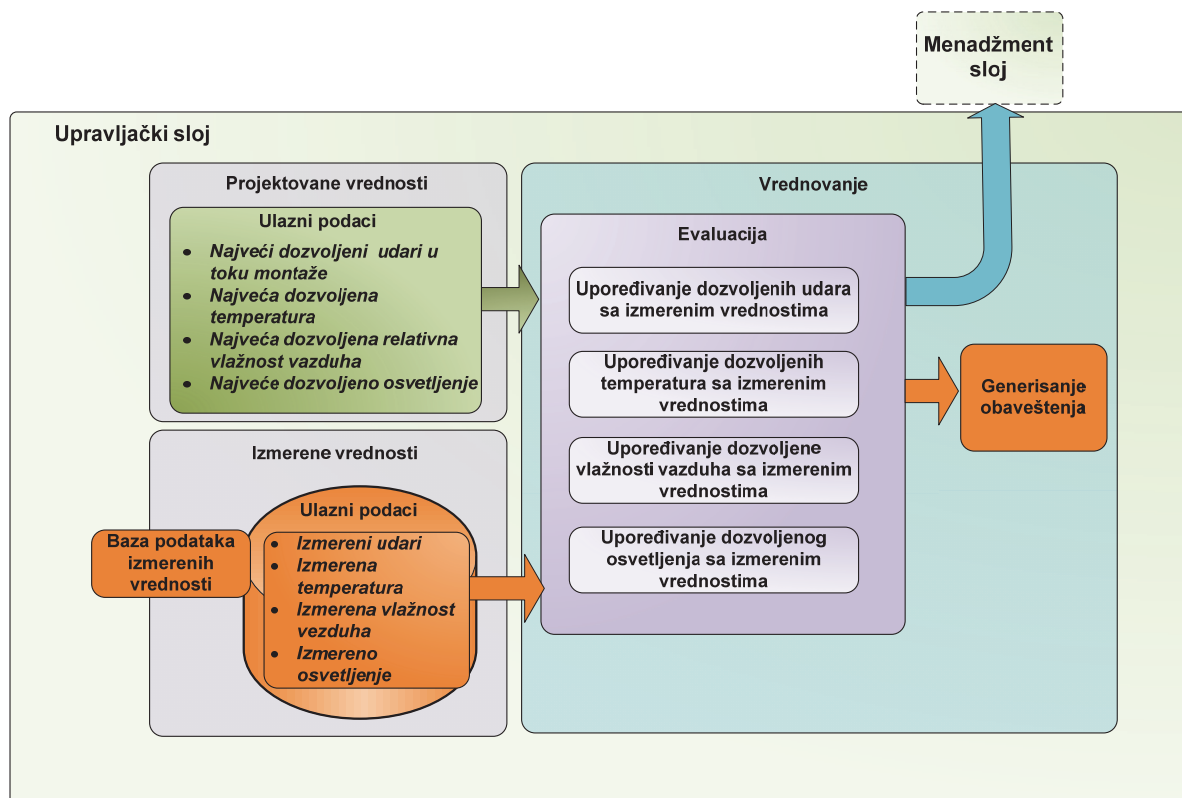
Line Efficiency i Smoothness index će biti takođe računata na osnovu izmerenih vremena montaže po formulama (4.4) i (4.5).

Srednja kvadratna greška odstupanja projektovanog vremena montaže od izmerenog vremena će biti računata po formuli (4.6).

Nakon izračunavanja svih navedenih vrednosti, potrebno je proveriti da li su neke od izračunatih vrednosti izvan tolerancije koja je definisana kao *dozvoljeno odstupanje*. U slučaju da postoji odstupanje izvan tolerancije, sistem generiše lokalno obaveštenje za odgovarajuću osobu koja je zadužena za proveravanje ispravnog funkcionisanja montažne linije. Svaka izračunata vrednost se zajedno sa važnijim izmerenim vrednostima snima u datoteci menadžment sloja. Iz baze podataka menadžment sloja su u bilo kom trenutku dostupni podaci uravnoteženja montažnog sistema, čime su omogućene razne analize proizvodnje.

5.1.3.2 Evaluacija kvaliteta montaže

Evaluacija kvaliteta montaže će biti realizovana upoređivanjem dozvoljenih vrednosti fizičkih veličina sa izmerenim (stvarnim) vrednostima na baznom sklopu. Evaluacija će biti izvedena uz pretpostavku da su dozvoljene vrednosti unapred definisane u toku projektovanja montažne linije. Definisane su maksimalne vrednosti fizičkih veličina koje utiču na kvalitet montaže i na kvalitet proizvoda. U poglavlju 4.4 je prikazana analiza fizičkih veličina koje mogu da utiču na kvalitet proizvoda. Na slici je prikazana struktura evaluacije kvaliteta montaže.



Slika 5.7 Struktura evaluacije izmerenih uticaja

5.1.3.3 Evaluacija stanja tehnoloških sistema

Evaluacija stanja tehnoloških sistema će biti realizovana upoređivanjem dozvoljenih vrednosti fizičkih veličina sa izmerenim (stvarnim) vrednostima. Tipične fizičke veličine koje utiču na funkcionisanje tehnoloških sistema su opisane u poglavlju 4.5. Dozvoljene vrednosti fizičkih veličina su date od strane proizvođača tehnološkog sistema.

5.1.4 Menadžment sloj

Menadžment sloj bežičnog upravljačkog sistema se integriše u slojeve „Upravljanje proizvodnjom“ i „ERP“ upravljačkih sistema automatizovanih procesa. Ovaj sloj se nalazi na najvišem nivou bežičnog upravljačkog sistema. Do ovog sloja vodi protok svih informacija od nižih slojeva. U menadžment sloju su izvršene globalne analize efikasnosti i kvaliteta proizvodnje na osnovu informacija koje su prikupljene iz bežične senzorske mreže.

Predstavljeni prototip bežičnog upravljačkog sistema je predlog kako bi funkcionisao jedan bežični upravljački sistem u skladu sa standardnim nivoima upravljanja industrijskim procesima.

6 Eksperimentalni rezultati u laboratorijskoj okolini

6.1 Struktura eksperimentalne laboratorije

U toku eksperimentalnih istraživanja, lokalizacione tehnologije su testirane u realnoj sredini. Prva faza eksperimenta je bila napravljena u test laboratoriji, gde su razvijeni i testirani lokalizacioni algoritmi. Druga faza eksperimenta je bila izvršena u laboratoriji u kojoj su prisutni i realni industrijski elementi, koji čine i okolinu industrijskom.

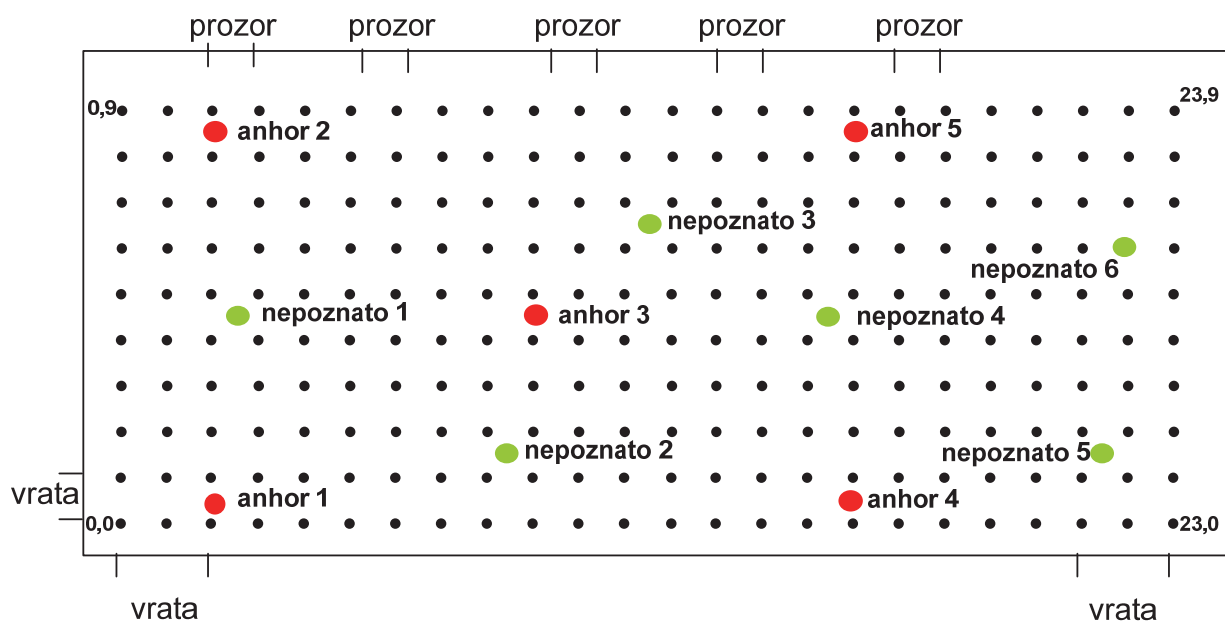
6.1.1 Test laboratorija

Eksperimentalno testiranje bežičnog sistema za praćenje baznih sklopova u toku montaže mora da počne testiranjem lokalizacionih algoritama. Okolina za testiranje lokalizacionih algoritama prvenstveno mora biti idealna za prenos bežičnih signala. To znači da u prostoriji ne sme biti predmeta koji utiču na prenos bežičnih signala. Prostorija koja je izabrana za testiranje lokalizacionih algoritama je prazna laboratorija u kojoj se nalazi samo osnovni nameštaj. Na slici 6.1 prikazana test laboratorija u kojoj su vršena merenja.



Slika 6.1 Test laboratorija

Eksperimentalna laboratorija je dužine 6 m i širine 15 m, poseduje pet prozora i troja vrata, kao što je prikazano na slici 6.2. Eksperiment počinje pripremanjem RSSI mape, kao što je opisano u poglavlju 3.3.1. Merenje RSSI vrednosti se vrši u svim mernim tačkama-pozicijama. Merne tačke su definisane u rezoluciji od 0,6 m, i tako u laboratoriji ima 24 x 10 (ukupno 240) mernih tačaka (Slika 6.2 - crne tačke). U laboratoriji su postavljeni anhuri, čvorovi sa unapred određenom fiksnom pozicijom (Slika 6.2 - crvene tačke). U strukturi za eksperimentalno merenje je postavljeno pet anhora.



Slika 6.2 Struktura mernih pozicija u test laboratoriji

Za testiranje tačnosti lokalizacije kasnije će biti korišćene RSSI vrednosti koje nisu izmerene u mernim tačkama, već između njih (Slika 6.2- zelene tačke). Bežični čvorovi (anhori i mobilni čvor za merenje) su u toku merenja postavljeni na visini od 0,8 m. Merenje RSSI vrednosti je izvršeno pomoću mobilnog bežičnog čvora, koji se postavlja u unapred određene merne pozicije.

6.1.2 Industrijska laboratorija

Industrijska laboratorija predstavlja laboratoriju sa uslovima sličnim industrijskoj okolini. U industrijskoj laboratoriji se nalazi montažna linija, koja je pripremljena za montažu cirkulacione pumpe. Montažna linija u potpunosti stvara realnu okolinu za testiranje

ponašanja bežičnih signala i tačnosti lokalizacione metode. Montažna linija poseduje realne profesionalne elemente kao što su:

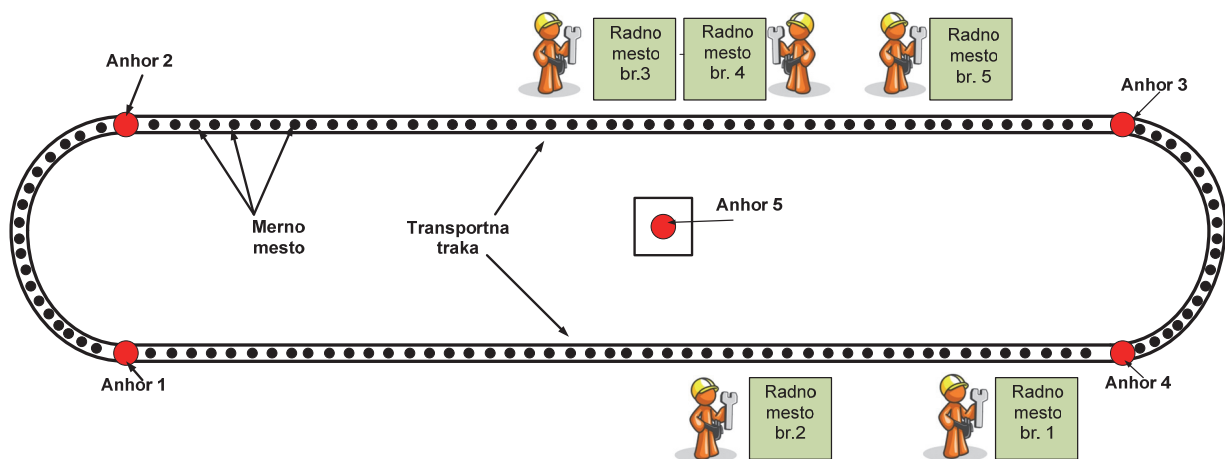
- radne stanice (ćelije) za montažu;
- transportna traka sa paletama za bazni sklop;
- tehnološki sistemi;
- industrijski BOSCH scara robot

Na slici 6.3 je prikazana industrijska laboratoriju sa montažnim sistemom u kojoj su uradjena ispitivanja.



Slika 6.3 Industrijska laboratorija

U okviru prikazane laboratorije biće postavljena bežična senzorska mreža, za ispitivanje uticaja u industrijskim uslovima. U cilju realizacije lokalizacionog sistema, neophodno je napraviti jedinstvenu RSSI mapu za montažni sistem. Kao i kod test laboratorije, i u ovom slučaju će biti raspoređeni fiksni bežični senzori, anhor, na određene pozicije, kao što se može videti na slici 6.4.



Slika 6.4 Struktura mernih tačaka u industrijskoj laboratoriji

Za formiranje RSSI mape neophodno je snimati RSSI vrednosti između svakog anhora i mobilnog senzorskog čvora koji se postavlja na karakteristične pozicije montažnog sistema.

U slučaju industrijske laboratorije, koordinate mernih tačaka (u kojima su snimljene RSSI vrednosti) date su u formi [segment, pozicija]. Segment označava segment montažne linije na kojem se nalazi merna tačka. Prvi segment je deo linije između prvog i drugog anhora, drugi između drugog i trećeg anhora, treći između trećeg i četvrtog anhora, dok je četvrti segment deo linije između četvrtog i prvog anhora. Pozicija se računa uvek od početka segmenta, tako što se na svakih 10 cm nalazi nova pozicija.

Kvalitet RSSI mape će biti bolji ako se merenje izvrši u što većoj rezoluciji, to jest u više mernih tačaka. RSSI vrednost se snima zajedno sa pozicijom gde su izmereni podaci. U datoteci se kod koordinate snima broj segmenta i broj pozicije. Merenja će biti izvršena u rezoluciji od 10 cm, koja je dovoljna za dobijanje odgovarajuće RSSI mape.

6.2 Eksperimentalno lociranje baznog sklopa u toku montaže

6.2.1 Određivanje RSSI vrednosti

U poglavlju 3.3 opisana je metodologija fingerprint lokalizacije. U toku offline režima lokalizacije potrebno je izvršiti pripremu RSSI mape. Za svaku prostoriju u kojoj se primenjuje lokalizacija neophodno je napraviti posebnu RSSI mapu.

6.2.1.1 Format za prikazivanje jačine radio signala

Radio primopredajnik je najvažnija komponenta bežičnih senzorskih čvorova. U toku eksperimenta korišćeni su RF-CMOS 2.4 [GHz] radio primopredajni čipovi visokih performansi, koji su bazirani na IEEE 802.15.4 standardu. Ovi radio primopredajni čipovi podržavaju merenje RSSI vrednosti. RSSI vrednost se računa na svake $2\mu\text{s}$ i prikazana je kao petobitni broj. RSSI vrednost ima 28 nivoa jačine signala. Nivoi su podeljeni po rezoluciji od 3 [dBm]. Najniži nivo 0 označava jačinu signala -91 [dBm] $\sim 0,8$ [pW]. Za ostale RSSI vrednosti (od 1 do 28) snaga može da se izračuna po sledećoj formuli:

$$P_{RF} = RSSI_{bazni} + 3 \cdot (RSSI - 1) \quad (6.1)$$

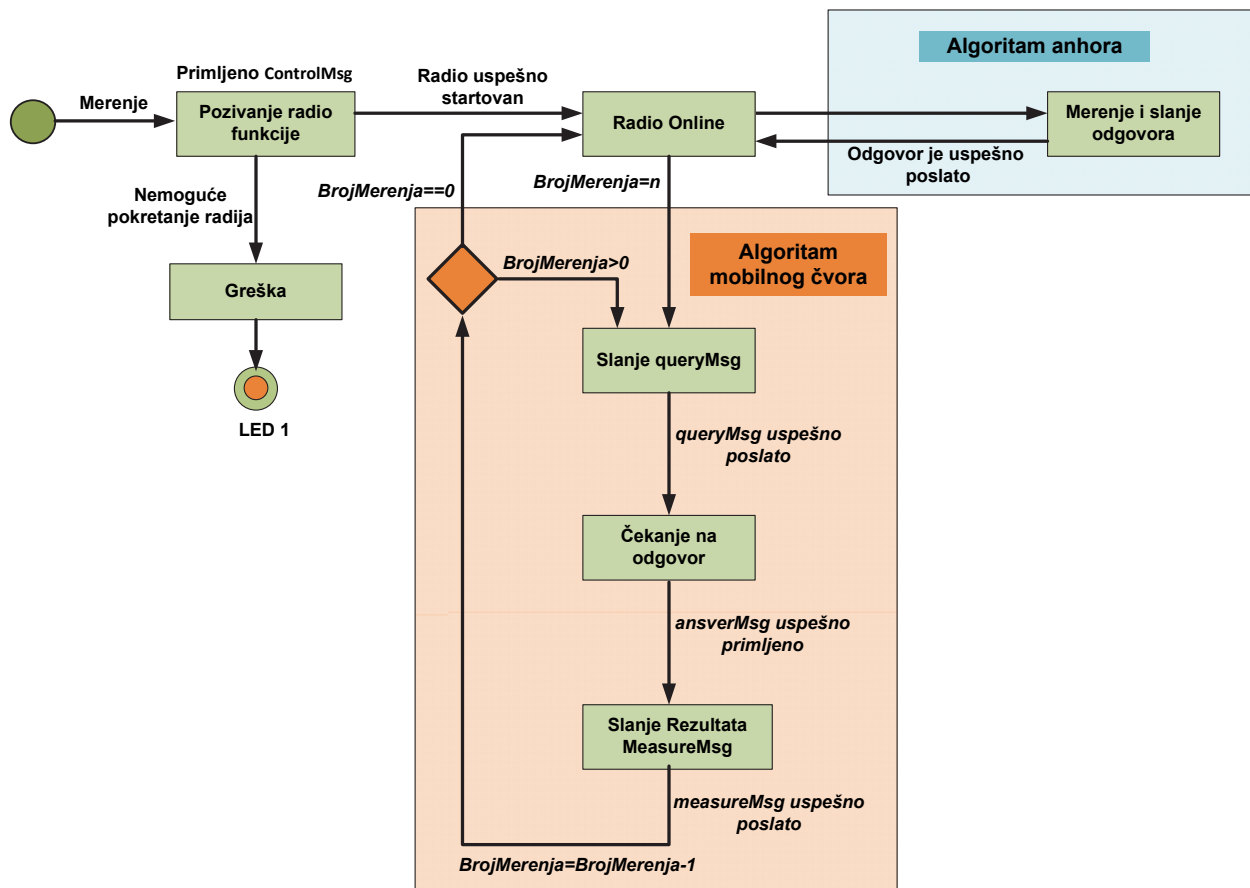
gde je P_{RF} je snaga radio signala izražena u dBm, a $RSSI_{bazni}$ je bazna vrednost, koja odgovara -91 [dBm]. Sa 28 nivoa jačine signala moguće je sa zadovoljavajućom tačnošću opisati promenu jačine bežičnih signala.

6.2.1.2 Struktura programa bežičnih čvorova

Za merenje RSSI vrednosti korišćeni su već prethodno opisani Crossbow Iris bežični čvorovi. Za merenje RSSI vrednosti biće korišćeni čvorovi sa sledećim ulogama:

- Mobilni čvor,
- Anhor čvorovi,
- Bazni čvor.

Pomoću mobilnog čvora će biti izvršeno merenje RSSI vrednosti za svaki anhor čvor, u svakoj mernoj poziciji. Bazni čvor služi za prikupljanje podataka. Program za svaki čvor je napisan u programskom jeziku nesC. Izvorni kodoviza mobilne senzorske čvorove i anhor čvorove su u potpunosti isti. Algoritam za merenje RSSI vrednosti je prikazan na slici 6.5.



Slika 6.5 Algoritam merenja RSSI vrednosti

Kontrolnu poruku šalje akvizicioni računar preko baznog čvora, mobilnom čvoru. Merenje počinje primanjem kontrolne poruke (controlMsg), u kojoj se nalaze identifikacioni brojevi (ID) mobilnog senzora i anhora, za koji će biti izmerena RSSI vrednost. Pored identifikacionog broja, u kontrolnoj poruci se nalazi i broj n , koji označava broj merenja. Po prijemu ID-a anhor čvora, mobilni čvor šalje anhoru poruku sa zahtevom za merenje RSSI vrednosti (queryMsg). Kad anhor primi poruku od mobilnog čvora, određuje jačinu signala dolazne poruke. Posle određivanja RSSI vrednosti dolaznog signala, anhor šalje odgovor mobilnom senzoru (answerMsg), u kom se nalazi RSSI vrednost. Po prijemu odgovora, mobilni čvor takođe određuje RSSI vrednost dolaznog signala. U trenutku kada je mobilni čvor odredio

RSSI vrednost dolaznog signala, generiše poruku sa izmerenim vrednostima (measureMsg) i prosleđuje obe RSSI vrednosti baznom čvoru. Merenje se ponavlja n puta. Format i vrste poruka će biti detaljnije opisani u poglavlju 6.2.1.3 (Format poruke).

Bazni čvor služi kao interfejs između bežične i žične komunikacije. Žična strana interfejsa je USB interfejs, koja omogućava komunikaciju sa računarem. Sa druge strane, bazni čvor poseduje primopredajnik istog tipa kao što poseduju mobilni ili anhor čvorovi. Program koji se izvršava na baznom čvoru je veoma jednostavan, i samo obezbeđuje prenos podataka između dva medijuma. Kod prikupljanja podataka, veću ulogu ima aplikacija na računaru, koja generiše kontrolnu poruku.

6.2.1.3 Format poruke

Merenje RSSI vrednosti se izvršava po algoritmu koji je opisan u poglavlju 6.2.1.2 (Struktura programa bežičnih čvorova) Za međusobnu komunikaciju između bežičnih čvorova u toku merenja, korišćene su četiri vrste poruka:

- Kontrolna poruka - controlMsg
- Poruka sa zahtevom - queryMsg
- Poruka sa odgovorom - answerMsg
- Poruka sa izmerenim vrednostima – measureMsg

Navedene poruke su definisane od strane korisnika i formirane su po zahtevu formata za radio poruke koji je definisan u operativnom sistemu TinyOS. Operativni sistem dopunjava okvir svojim neophodnim elementima. Sadržaj poruke je dat u tabeli 6.1.

Tabela 6.1 Format poruke za merenje RSSI vrednosti

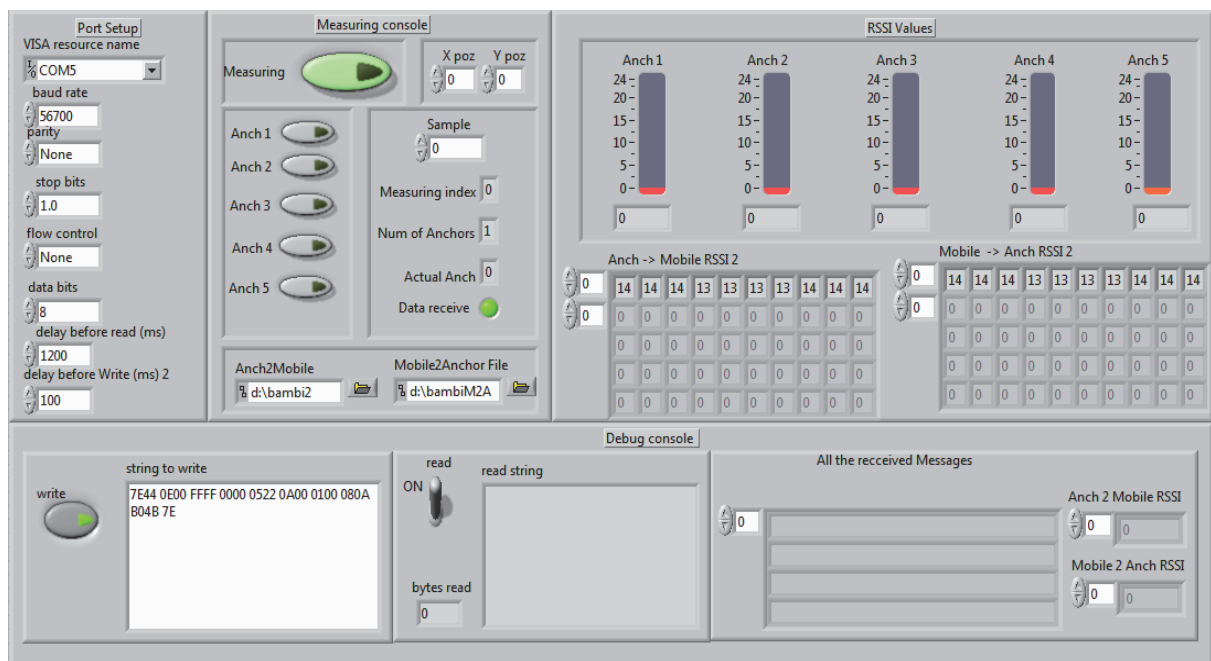
dužina(byte)	1	2	3	4	5	6
controlMsg	SourceID		targetID		n	
queryMsg	ID	-				
answerMsg	ID	signal1	-			
measureMsg	Time				signal1	signal2

Kontrolna poruka služi za pokretanje procesa merenja. Poruka sadrži adresu mobilnog čvora (SourceID), adresu anhora za koji se vrši merenje (TargetID) i broj merenja n . Poruka sa

zahtevom (queryMsg) se šalje od strane mobilnog senzora i sadrži adresu anhora za koji je poruka poslata. Kao poruku sa odgovorom (answerMsg) anhor šalje RSSI vrednost (signal1) koja je izmerena u toku primanja poruke sa zahtevom. Mobilni čvor, u toku primanja poruke sa odgovorom od anhora, određuje RSSI vrednost (signal2). Nakon toga, mobilni čvor generiše poruku koja sadrži lokalno vreme bežičnog čvora i obe izmerene RSSI vrednosti (signal1 i signal2).

6.2.1.4 Desktop aplikacija za merenje RSSI vrednosti

Za merenje RSSI vrednosti, jedan od neophodnih delova sistema je i aplikacija za prikupljanje podataka. Bazni čvor, kao što je već rečeno, povezan je preko USB interfejsa sa računarom. Aplikacija za prikupljanje RSSI vrednosti je realizovana u softverskom okruženju LabView, i implementirana je kao namenska aplikacija za akviziciju podataka. Aplikacija je realizovana tako da bude univerzalnog karaktera, tako da ju je moguće iskoristiti kod različitih prostorija za merenje RSSI vrednosti i pripremanje RSSI mape. Merenje RSSI vrednosti može da se izvrši nakon postavljanja anhor čvorova i određivanja mernih tačaka, na koje će biti postavljen mobilni čvor u toku merenja. Pokretanje merenja se vrši preko grafičkog interfejsa aplikacije, koji je prikazan na slici 6.6.



Slika 6.6 Prikaz grafičkog interfejsa aplikacije

Grafički interfejs je formiran tako da obuhvati sve neophodne funkcije koje se koriste u toku merenja, i da omogući podešavanje važnijih parametara merenja, kao što su:

- Parametri serijskog porta (USB port je predstavljen kao virtualni serijski port),
- Podešavanje broja anhora,
- Podešavanje mesta datoteke,
- Komande za pokretanje merenja,
- Prozori za prikazivanje trenutno izmerenih vrednosti.

Nakon podešavanja neophodnih parametara, merenje počinje generisanjem kontrolne poruke koje se šalje mobilnom čvoru po algoritmu koji je opisan u poglavlju 6.2.1.2. Posle svakog pozicioniranja mobilnog čvora potrebno je podesiti odgovarajuću koordinatu u aplikaciji. Ovako će svako merenje RSSI vrednosti biti sačuvano u datoteci zajedno sa koordinatama merne pozicije. U cilju dobijanja RSSI mape za celu prostoriju ili industrijsku liniju, potrebno je izvršiti merenje u svakoj unapred određenoj mernoj tački. Nakon završetka merenja, RSSI mapa će biti sačuvana i pripremljena za korišćenje u online fazi lokalizacije.

6.2.2 Distribucija RSSI vrednosti anhor čvorova

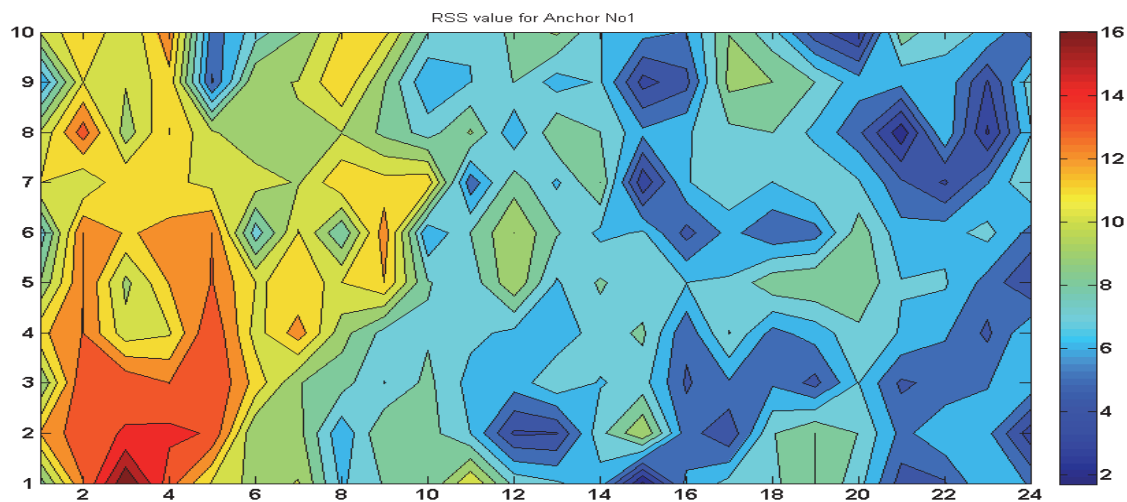
Nakon snimanja RSSI vrednosti, moguće su analize promene RSSI u zavisnosti od strukture položaja anhora. Za prikazivanje distribucije RSSI vrednosti svakog anhora korišćen je softverski paket Matlab. Distribucija je izvedena pomoću konture u boji, u svakoj izmerenoj poziciji. U toku istraživanja će biti vršena analiza u test laboratoriji i u industrijskoj laboratoriji.

6.2.2.1 Distribucija RSSI vrednosti u test laboratoriji

Na slikama 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 i 6.11 prikazane su raspodele RSSI vrednosti u slučaju test laboratorije. Najveća RSSI vrednost koja je izmerena u toku istraživanja je 18, a najmanja 0. U toku merenja RSSI vrednosti, u svakom mernom mestu je izmereno 100 uzoraka. Za prikazivanje RSSI vrednosti korišćeni su podaci koji su dobijeni medijan operacijom.

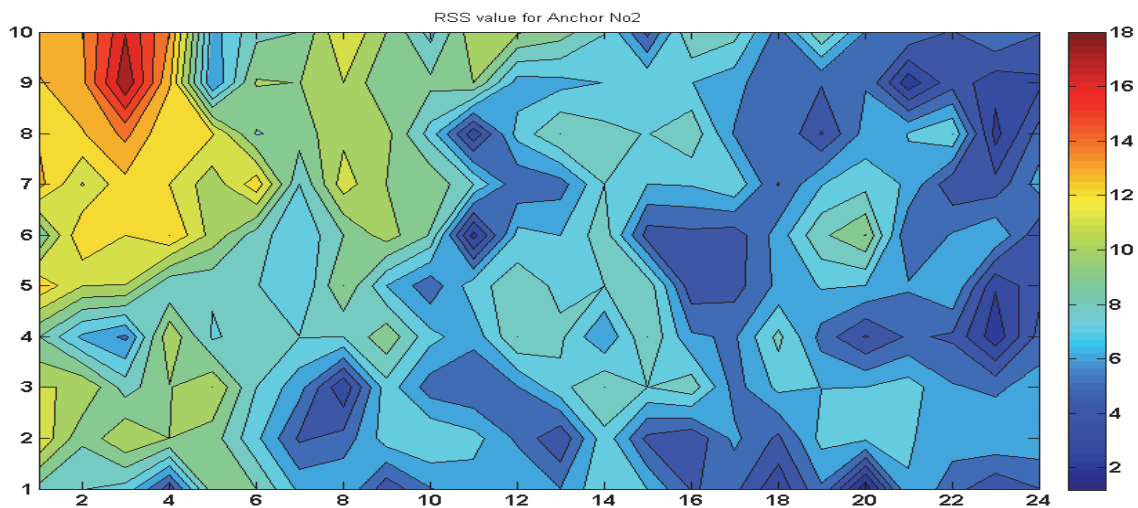
Na Sliku 6.2 prikazana je fizička struktura test laboratorije, gde se vidi pozicija svakog anhora. Ako se uporedi fizička struktura i distribucija RSSI vrednosti za svaki anhor, može se zaključiti da jačina radio signala nije homogeno raspoređena.

Na slici 6.7 vidi se raspodela RSSI vrednosti za prvi anhor koji se nalazi odmah pored ulaznih vrata u laboratoriju. Maksimalna RSSI vrednost u ovom slučaju iznosi 16, a minimalna 2.



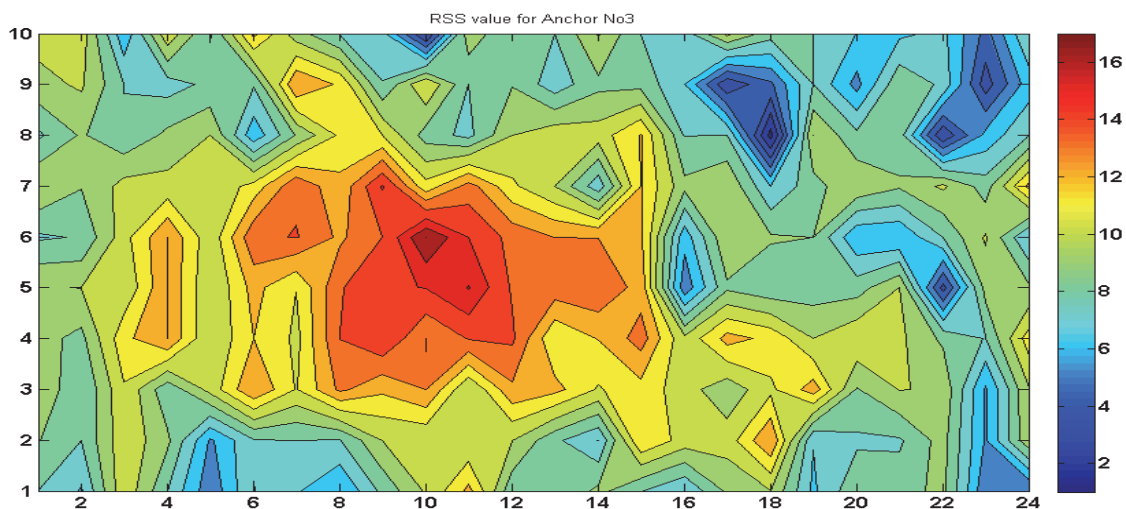
Slika 6.7 Prikaz distribucije RSSI vrednosti za anhor 1 - Test Laboratorija

Na slici 6.8 prikazana je raspodela RSSI vrednosti za anhor 2, koji se nalazi na strani laboratorije gde su i prozori. Vidi se da je distribucija RSSI vrednosti većeg intenziteta centralizovana u okolini anhora. Mogući uzrok takve raspodele je to što se anhor nalazi pored zida na kojem su prozori, a jedan od faktora koji utiče na distribuciju RSSI vrednosti je staklena površina. Uticaj staklenih površina na prostiranje bežičnih signala nije detaljno analiziran u okviru ovog istraživanja.



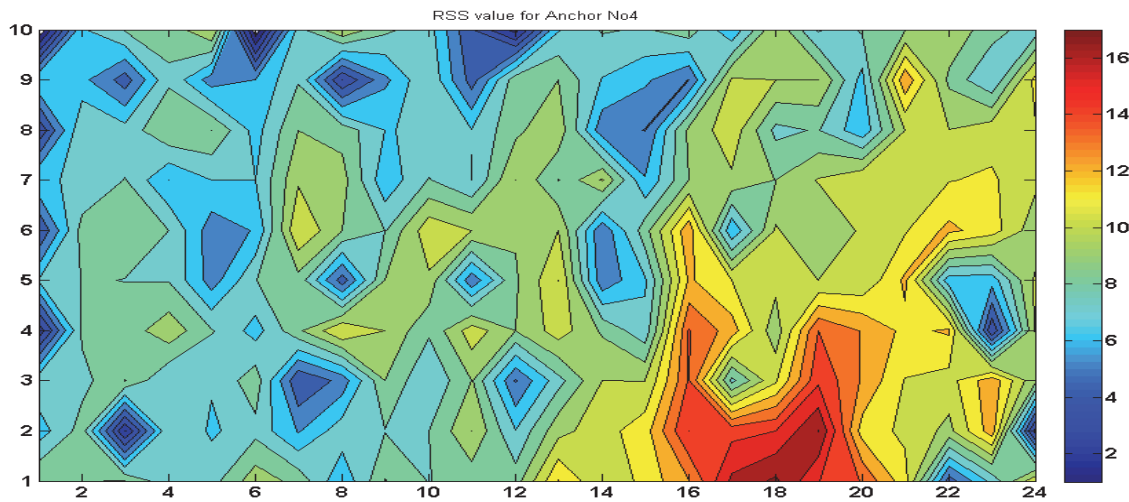
Slika 6.8 Prikaz distribucije RSSI vrednosti za anhor 2 - Test Laboratorija

Najatraktivnija raspodela RSSI vrednosti se može videti u slučaju trećeg anhora, koji se nalazi na sredini laboratorije (Slika 6.9). Na osnovu najvećih vrednosti može se tačno zaključiti gde se nalazi treći anhor. Ovaj fiksni čvor se nalazi na sredini laboratorije, čime su smanjeni uticaji faktora kao što su, na primer, zidovi i stakleni prozori.



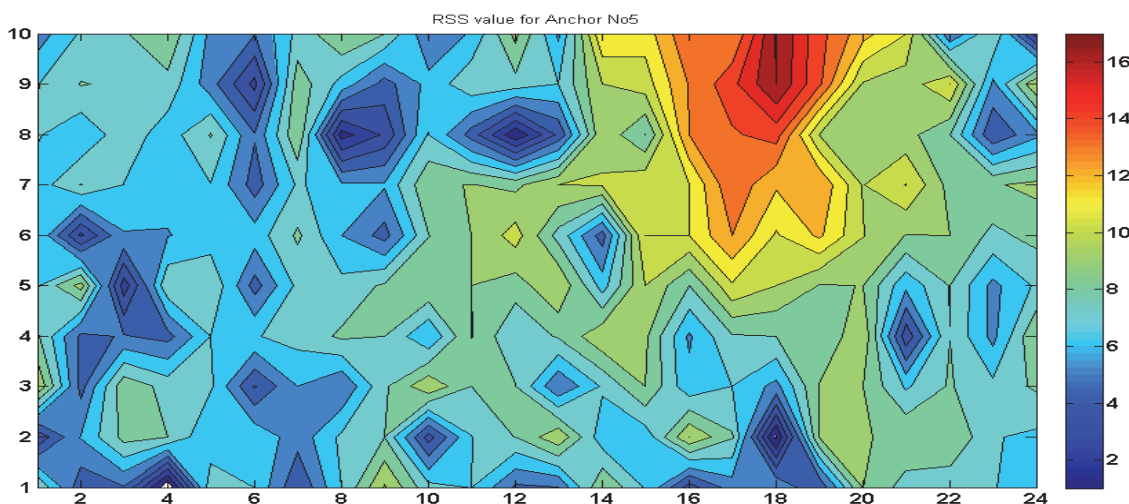
Slika 6.9 Prikaz distribucije RSSI vrednosti za anhor 3 - Test Laboratorija

U slučaju raspodele RSSI vrednosti četvrtog anhora, slična je situacija kao kod prvog anhora. Na slici 6.10 vidi se distribucija RSSI vrednosti četvrtog anhora koji je smešten pored zida.



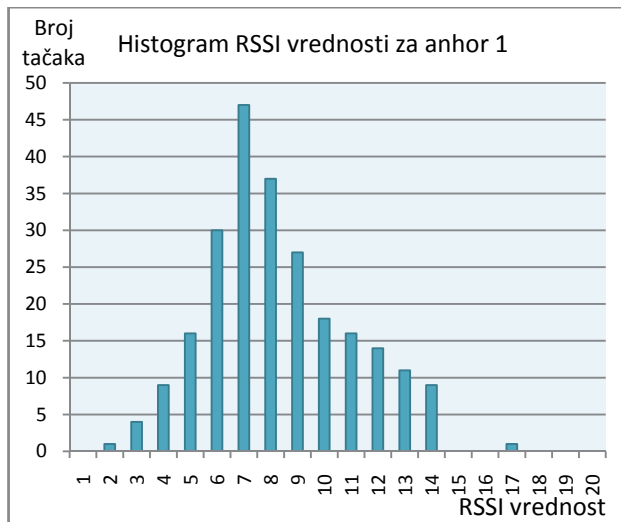
Slika 6.10 Prikaz distribucije RSSI vrednosti za anhor 4 -Test Laboratorija

Poslednji anhor je postavljen pored prozora, kao u slučaju drugog anhora, ali u ovom slučaju dejstvo staklenih površina nije izraženo. Na slici 6.11 prikazana je raspodela RSSI vrednosti za peti anhor.

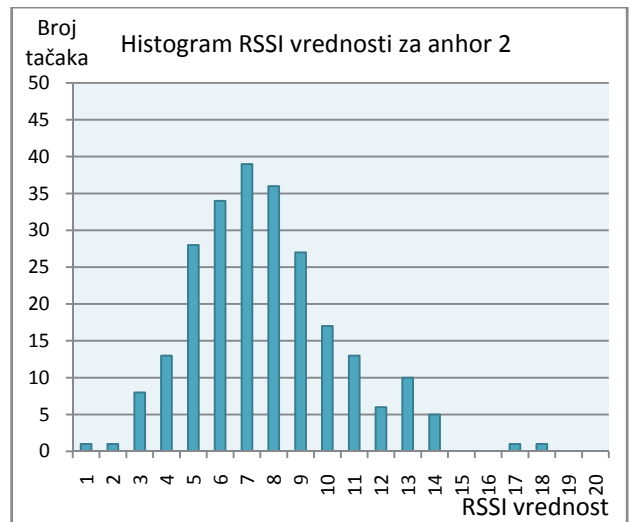


Slika 6.11 Prikaz distribucije RSSI vrednosti za anhor 5 – Test Laboratorija

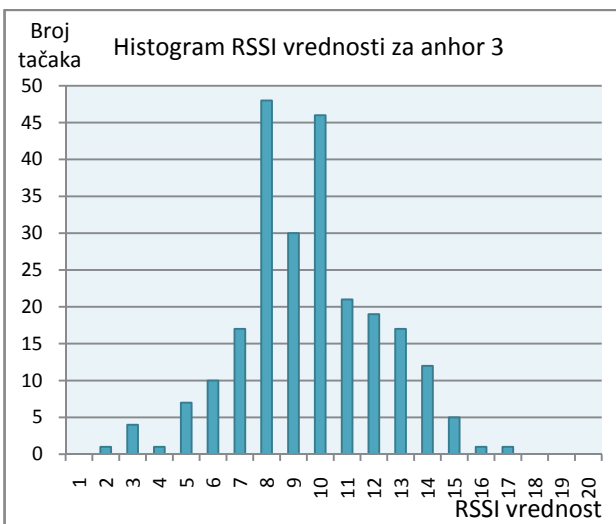
Za prikazivanje distribucije RSSI vrednosti korišćen je i histogram, koji sadrži korisne informacije za svaki anhor. Histogrami RSSI vrednosti za svaki anhor su prikazani na slici 6.12.



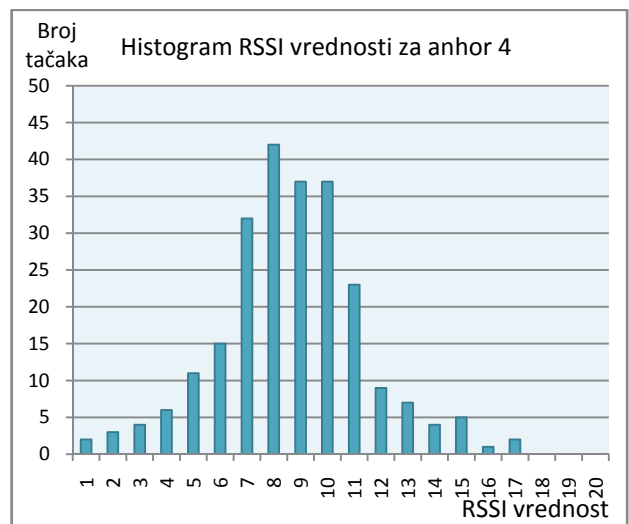
(a)



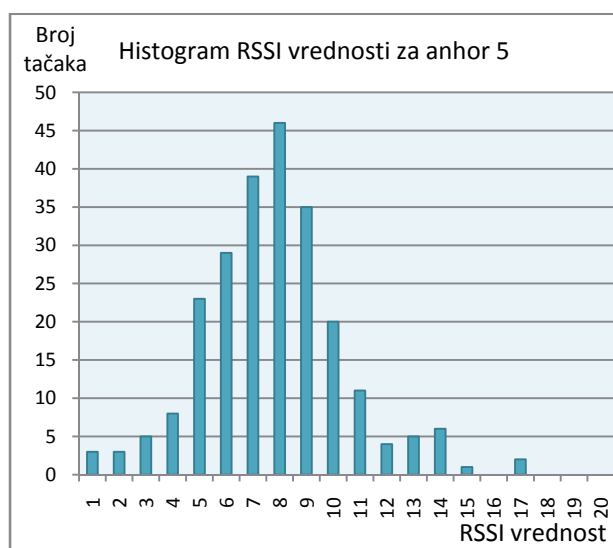
(b)



(c)



(d)



(e)

Slika 6.12 Histogrami distribucije RSSI vrednosti: (a) anhor 1, (b) anhor 2, (c) anhor 3, (d) anhor 4, (e) anhor 5

U test laboratoriji postoji ukupno 240 mernih tačaka. Na histogramu RSSI vrednosti (Slika 6.12) se vidi raspodela jačine RSSI vrednosti po broju mernih tačaka, odnosno vidi se na koliko mernih mesta je izmerena određena RSSI vrednost. Iz histograma se može zaključiti da li su anhuri dobro raspoređeni i da li je broj anhora dobro izabran.

Kod prvog anhora (Slika 6.12 – a), u najvećem broju mernih tačaka izmerena je RSSI vrednost 7 i 8, a kod drugog anhora (Slika 6.12 – b) RSSI vrednost 7, 8 i 9. Kod trećeg anhora (Slika 6.12 – c) dominiraju RSSI vrednosti 8 i 10. U histogramu četvrtog anhora (Slika 6.12 – d) vidi se da ima najviše mernih tačaka sa RSSI vrednostima 7, 8, 9, 10 i 11, a u slučaju petog anhora (Slika 6.12 – e) raspodela RSSI vrednosti je veoma slična raspodeli kod drugog anhora. Takva raspodela histograma znaci da je dobro izabran broj i raspored anhora, zato što se dobija gausova raspodela RSSI vrednosti koja je centrirana oko srednje vrednosti mernog opsega.

Na osnovu RSSI mape i na osnovu histograma izračunato je nekoliko karakterističnih vrednosti za svaki anhor. U tabeli 6.2 prikazane su srednja vrednost i medijan RSSI vrednosti, kao i minimalna i maksimalna RSSI vrednost svakog anhora.

Tabela 6.2 Karakteristične RSSI vrednosti za test laboratoriju

br. anhora	srednja vrednost	medijan	min RSSI	max RSSI
anhor 1	8.2854	8	2	17
anhor 2	7.7021	7	1	18
anhor 3	9.5938	10	2	17
anhor 4	8.6875	9	0	17
anhor 5	7.7813	8	0	17

Najveća srednja vrednost je izračunata u slučaju anhora 3, koji se nalazi u sredini test laboratorije. Najsličnije srednje vrednosti imaju anhuri koji se nalaze na istoj strani laboratorije (pored prozora ili pored zida). Pored prozora su smešteni anhuri 2 i 5 a pored zida su postavljeni anhuri 1 i 4.

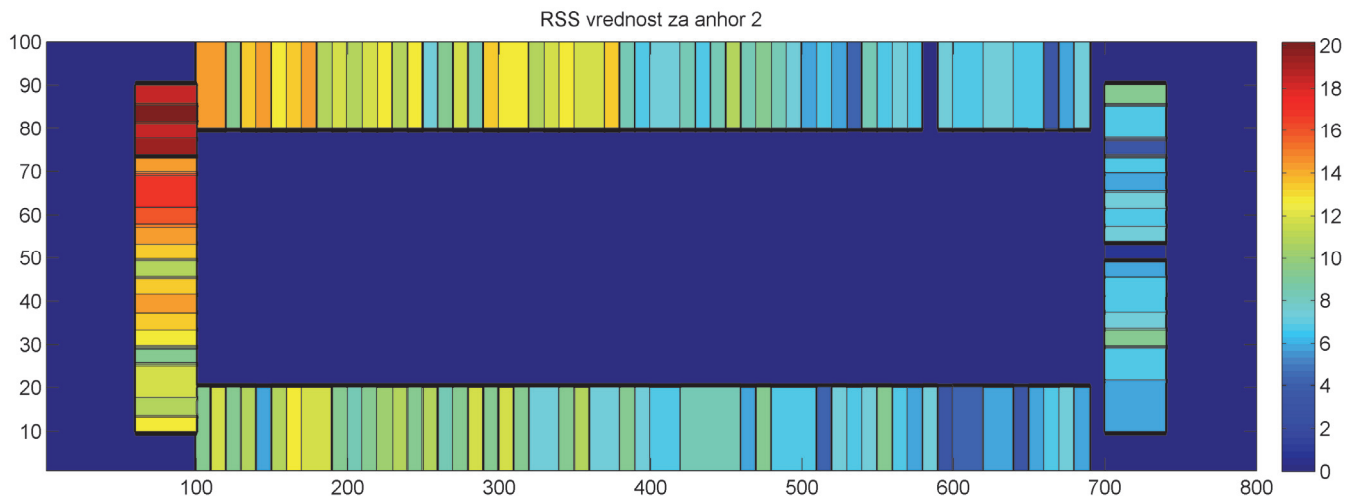
6.2.2.2 Distribucija RSSI vrednosti u industrijskoj laboratoriji

Prikazivanje distribucije RSSI vrednosti u slučaju industrijske laboratorije se malo razlikuje od test laboratorije. Osnovna razlika je u tome što merenje RSSI vrednosti nije bilo fokusirano na čitavu površinu laboratorije, već je bilo koncentrisano samo na montažnu liniju i radna mesta pored linije. Montažna linija je dužine 6 m i širine 1.5 m. Na liniji je merenje izvršeno u mernim tačkama na svakih 10 cm, čime se dobija ukupno 160 mernih tačaka. Na dve duže strane linije izmereno je po 60 RSSI vrednosti, a na dve kraće strane po 20 RSSI vrednosti. Slika 6.4 prikazuje strukturu montažne linije, gde se vidi da su kraće strane linije u formi polukruga. U toku prikazivanja raspodele RSSI vrednosti, forma polukruga je aproksimirana pravom linijom, kao što se vidi na slikama 6.13, 6.14, 6.15, 6.16 i 6.17.. Na slici 6.13 prikazana je distribucija RSSI vrednosti prvog anhora.



Slika 6.13 Prikaz distribucije RSSI vrednosti za anhor 1 – Industrijska laboratorija

Industrijska laboratorija, kao i sama montažna linija, opremljena je metalnim elementima kao što su alati, držači, nosači, kablovi, itd, tako da se ne može očekivati homogena raspodela RSSI vrednosti. Na slici 6.14 prikazana je distribucija RSSI vrednosti drugog, a na slici 6.15 trećeg anhora.



Slika 6.14 Prikaz distribucije RSSI vrednosti za anhor 2 – Industrijska laboratorija



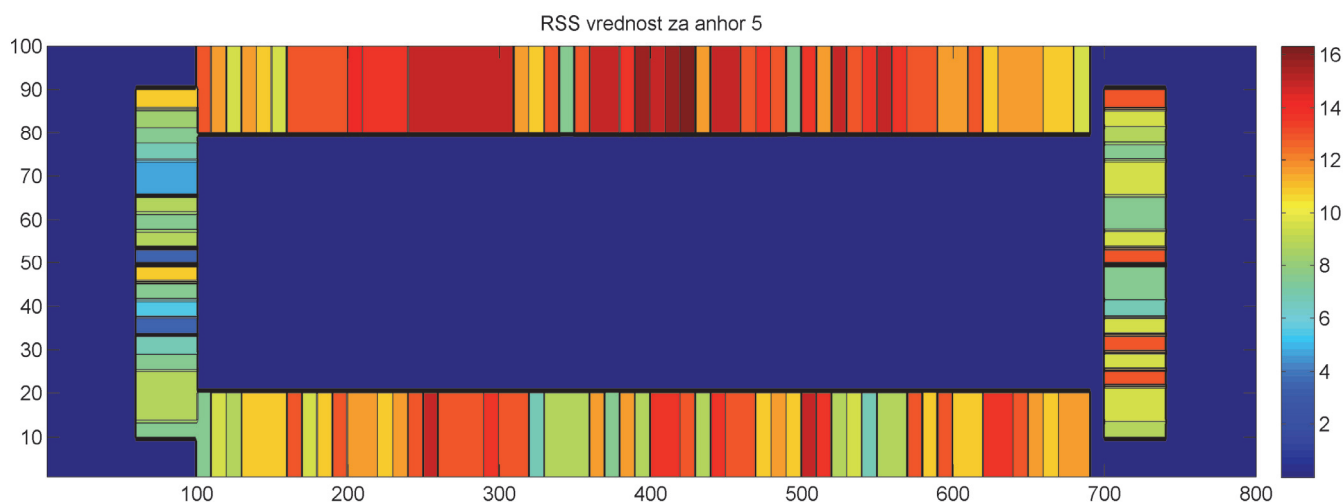
Slika 6.15 Prikaz distribucije RSSI vrednosti za anhor 3 – Industrijska laboratorija

U blizini četvrtog anhora nalazi se industrijski SCARA robot, koji predstavlja veliku metalnu površinu i očekivano je da u velikoj meri utiče na raspodelu RSSI vrednosti. Na slici 6.16 prikazana je distribucija RSSI vrednosti četvrtog anhora.



Slika 6.16 Prikaz distribucije RSSI vrednosti za anhor 4 – Industrijska laboratorija

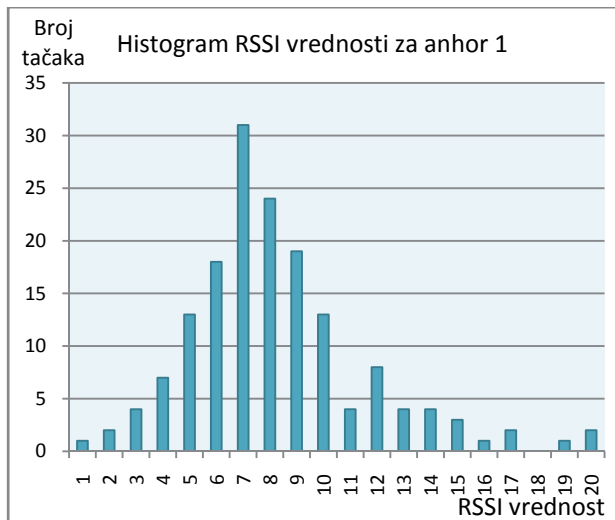
Na sredini montažne linije nalazi se peti anhor. Usled toga što je montažna linija relativno uska, distribucija RSSI vrednosti je veoma raznolika. Na slici 6.17 prikazana je raspodela RSSI vrednosti za peti anhor.



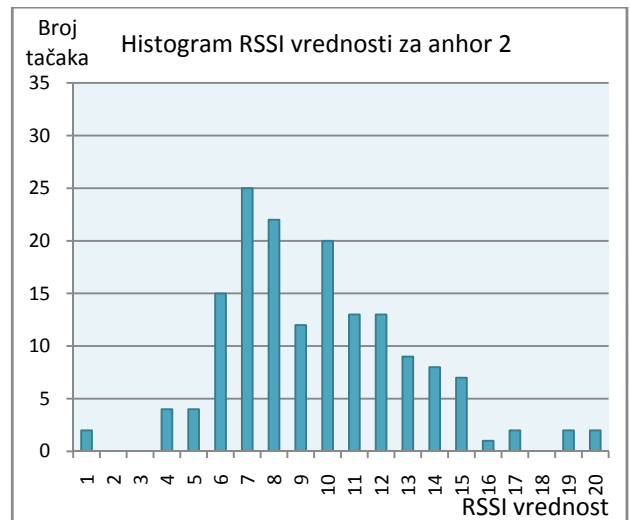
Slika 6.17 Prikaz distribucije RSSI vrednosti za anhor 5 – Industrijska laboratorija

U slučaju industrijske laboratorije slika (Slika 6.13-Slika 6.17) koje prikazuju raspodelu RSSI vrednosti najviše služe za proveru pokrivenosti delova linije postavljenim anhorima. Na osnovu slika koje prikazuju distribuciju RSSI vrednosti, može se zaključiti da su anhoori pravilno raspoređeni, i da je broj anhora zadovoljavajući za željenu pokrivenost.

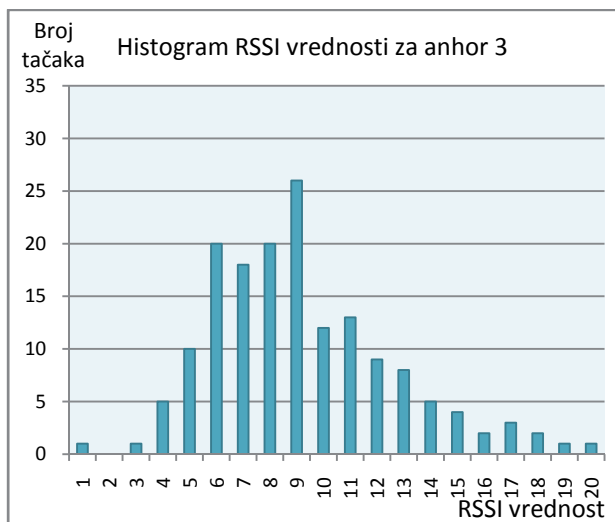
Pored slika koje prikazuju distribuciju RSSI vrednosti u industrijskoj laboratoriji napravljen je i histogramski prikaz svakog anhora (Slika 6.18). Slično histogramima prikazanim u slučaju test laboratorije, i ovde se može videti na koliko mernih mesta je izmerena određena RSSI vrednost.



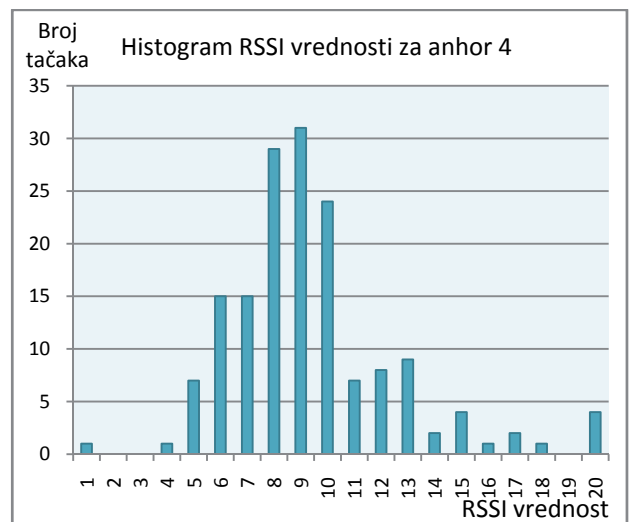
(a)



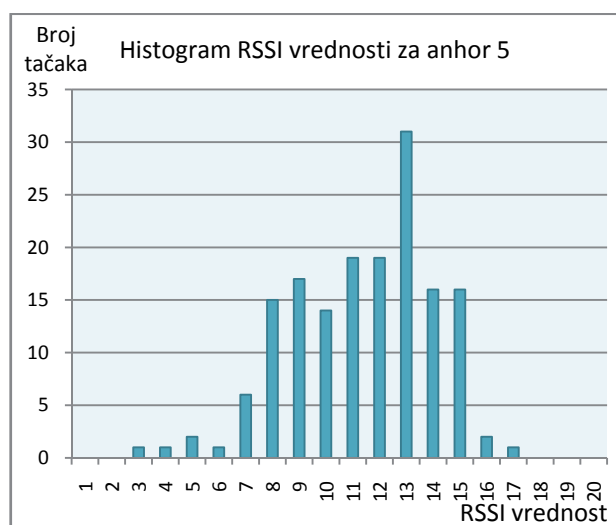
(b)



(c)



(d)



(e)

Slika 6.18 Histogram distribucije RSSI vrednosti u industrijskoj laboratoriji: (a) anhor 1, (b) anhor 2, (c) anhor 3, (d) anhor 4, (e) anhor 5

U slučaju industrijske laboratorije, ukupno je snimljeno 160 mernih pozicija, tako da maksimalna vrednost u histogramima odstupa od test laboratorije, gde je broj mernih tačaka bio 240. Maksimalna vrednost se u ovom slučaju kreće oko trideset mernih tačaka.

U histogramima je zbog lakše preglednosti uzeta maksimalna RSSI vrednost 20. RSSI vrednosti veće od 20 su u ovom slučaju zanemarene.

Ono što je na prvi pogled moguće zaključiti je da su RSSI vrednosti ravnomernije raspoređene u odnosu na test laboratoriju, što je naročito izraženo kod petog anhora (Slika 6.18 – e). Peti anhor se nalazi na sredini montažne linije, i usled male gabaritne dimenzije linije, distribucija RSSI vrednosti je veoma ravnomerna. Tako je u slučaju petog anhora najveći broj merenja izmeren sa RSSI vrednošću 13, a ostale vrednosti merenja (od RSSI 8 do RSSI 15) su raspoređene na oko 15 mernih pozicija. U slučaju četvrtog anhora (pretpostavka je da je zbog prisustva industrijskog SCARA robota) u najvećem broju mernih tačaka su izmerene RSSI vrednosti 8, 9 i 10. U slučaju prvog anhora dominira RSSI vrednost 7, dok je kod drugog i trećeg anhora slična raspodela, gde su u najvećem broju mernih tačaka izmerene RSSI vrednosti 7, 8, 9 i 10.

Karakteristične vrednosti za svaki anhor su date su u tabeli 6.3.

Tabela 6.3 Karakteristične RSSI vrednosti za industrijsku laboratoriju

br. anhora	srednja vrednost	medijan	min RSSI	max RSSI
anhor 1	8.2764	8	0	20
anhor 2	9.6335	9	0	21
anhor 3	9.1894	9	0.5	20
anhor 4	9.4317	9	1	22
anhor 5	11.3882	12	3.4	17

Najveća srednja vrednost je, kao i kod test laboratorije, za anhor koji se nalazi u sredini laboratorije. U slučaju industrijske laboratorije, na sredini je postavljen anhor sa rednim brojem 5. Ostale srednje vrednosti su međusobno slične, sa manjim odstupanjima. Najmanja srednja vrednost i medijan vrednost je dobijena za prvi anhor. Najveća izmerena RSSI vrednost, 22, izmerena je za četvrti anhor.

6.2.3 Eksperimentalna primena veštačke neuronske mreže za lokalizaciju

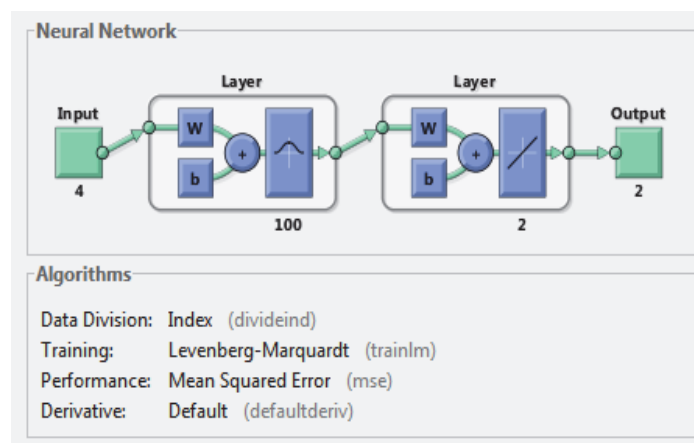
Osnovni princip funkcionisanja veštačkih neuronskih mreža je opisan u poglavlju 3.4.1. Kako za simulaciju, tako i za pripremu podataka, korišćen je softverski paket Matlab. Kako bi se lokalizacija vršila pomoću veštačke neuronske mreže, neophodno je pripremiti podatke za obuku, za validaciju i za testiranje.

U toku snimanja RSSI vrednosti napravljena su dva skupa podataka:

- direkno očitane RSSI vrednosti (eng. raw - podaci),
- statističke vrednosti očitanih podataka.

Za testiranje metoda lokalizacije sa neuronskim mrežama biće korišćena baza podataka sa sirovim podacima i statističkim vrednostima, u kojoj se nalaze pretprocesirane RSSI vrednosti. Skup podataka sa statističkim vrednostima se dobija tako što se iz datoteke sa sirovim podacima za svaku desetu RSSI vrednost izračuna statistički pokazivač. Tako se dobija srednja vrednost, medijan i standardna devijacija RSSI vrednosti. Ovo prefiltriranje je važno zbog eliminisanja nerelevantnih podataka.

U softverskom okruženju Matlab generisana je neuronska mreža sa prostiranjem signala unapred i sa obučavanjem propagacijom greške unazad (eng. feed-forward backpropagation [38]). Obučavanje je izvršeno pod nadzorom (eng. supervised [40]), što znači da je obuka izvršena sa poznavanjem željenog odziva za svaki poznati ulaz. Struktura primenjene neuronske mreže je opisana u poglavlju 3.4.1.2. Slika 6.19 je generisan u toku simulacije i prikazuje korišćenu strukturu neuronske mreže.



Slika 6.19 Struktura neuronske mreže u toku eksperimenta (u slučaju lokalizacije pomoću 4 anhora)

U toku definisanja neuronske mreže postoji mogućnost definisanja raznih parametara kao što su:

- broj ulaza,
- broj izlaza,
- broj skrivenih slojeva,
- broj neurona u skrivenom sloju,
- tip aktivacione funkcije,
- metod učenja.

Za aktivacione funkcije korišćene su kombinacije “purelin”, “radbas” i “tansig” funkcije. Za metod učenja izabrane su funkcije “trainlm” (eng. *Levenberg-Marquardt backpropagation*) i “trainrp” (eng. *Resilient backpropagation*). Najbrža i najefikasnija metoda za učenje je Levenberg-Marquardt metoda [58], ali ona zahteva punu radnu memoriju. Problem sa memorijom dolazi do izražaja u slučaju obuke mreže sa velikim brojem neurona u skrivenom sloju. Resilient backpropagation je sporija metoda [59], ali nije problematična u velikim mrežama. Efikasnost i tačnost obučavanja može da se prati u toku procesa učenja pomoću linearne regresije očekivanog i stvarnog odziva.

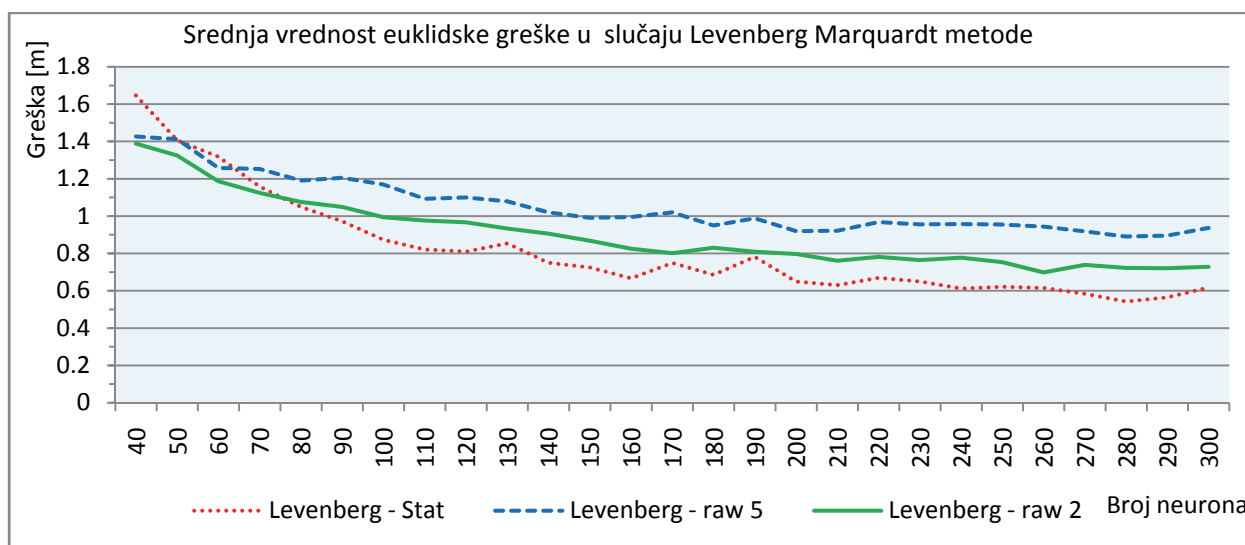
6.2.3.1 Rezultati za test laboratoriju

U toku eksperimenta, ispitivana je tačnost lokalizacije u zavisnosti od broja neurona u skrivenom sloju i u zavisnosti od metode koja se koristi za obučavanje. Za upoređivanje performansi lokalizacije biće korišćeno obično euklidsko rastojanje, izračunato po formuli:

$$d_{euc} = \sqrt{(x_{stv} - x_{dob})^2 + (y_{stv} - y_{dob})^2} \quad (6.2)$$

Gde x_{stv} i y_{stv} označavaju stvarne koordinate mobilnog čvora (mernog mesta), a x_{dob} i y_{dob} pretpostavljene, odnosno izračunate koordinate. Za testiranje neuronske mreže korišćena je posebna datoteka u kojoj su snimljene RSSI vrednosti samo za testiranje. Vrednosti za testiranje nisu korišćene u toku obučavanja neuronske mreže.

Prvenstveni cilj test laboratorije je pronalaženje najbolje strukture neuronske mreže, koja će biti primenjena i dalje testirana u industrijskoj laboratoriji. Za prikazivanje tačnosti neuronske mreže izračunata je srednja vrednost greške euklidskog rastojanja iz svakog test uzorka koji se nalazi u test datoteci i sadrži 400 mernih tačaka. Slika 6.20 prikazuje zavisnost srednje vrednosti euklidskog rastojanja u zavisnosti od broja neurona u skrivenom sloju, uz korišćenje Levenberg Marquardt algoritma za obučavanje.

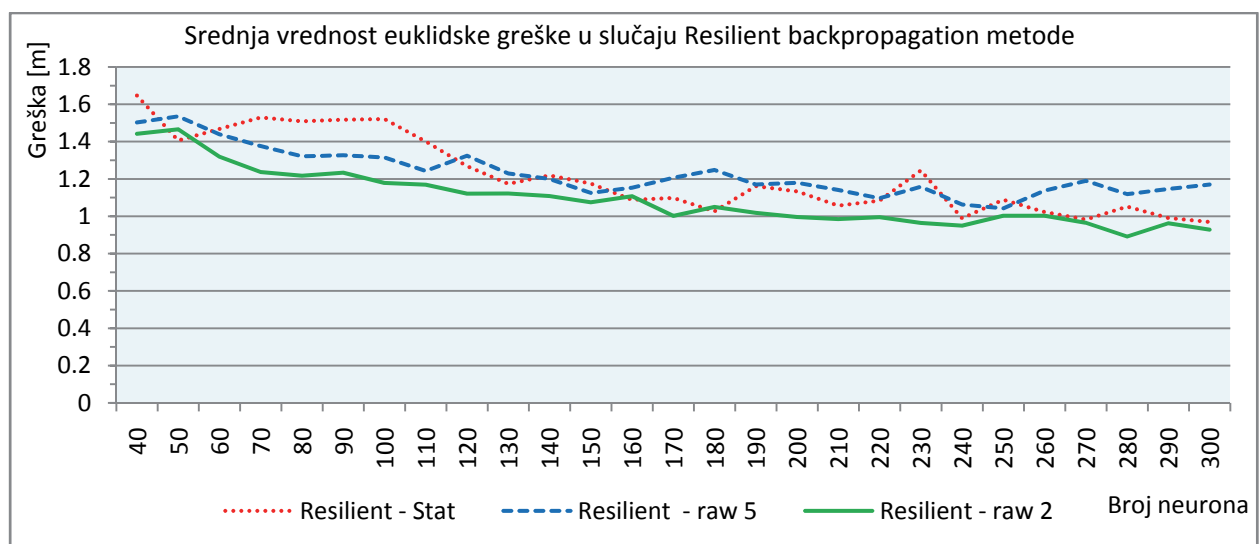


Slika 6.20 Srednja vrednost greške euklidskog rastojanja u slučaju Levenberg Marquardt metode

Na slici 6.20 prikazana su tri grafika, među kojima je razlika u uzorcima koji su korišćeni za obučavanje neuronske mreže. Grafik „Levenberg – Stat“ prikazuje performanse neuronske mreže u slučaju kada je mreža trenirana iz baze RSSI vrednosti (gde su izračunate srednja vrednost, medijan i standardna devijacija). U ovom slučaju, neuronska mreža je obučavana sa RSSI vrednostima nad kojima je primenjivana medijan operacija. U slučaju krive „Levenberg –raw 5“ i „Levenberg –raw 2“, za obučavanje su primenjivane RSSI vrednosti koje su direkno očitane sa mobilnog senzora. Parametri „5“ i „2“ označavaju korak uzorkovanja u slučaju odabiranja iz velike RSSI datoteke. RSSI datoteka koja sadrži direkno očitane vrednosti je veoma velikog obima, sadrži 24 000 mernih informacija za svaki anhor. U slučaju krive „Levenberg –raw 5“, za obučavanje je iz velike datoteke uzeta svaka peta vrednost, dok je u slučaju „Levenberg –raw 2“ uzeta svaka druga vrednost. Na osnovu slike 6.20 može se zaključiti da performanse ne zavise drastično od broja neurona u skrivenom sloju, ali

najbolji rezultat se dobija u slučaju kada je broj neurona veći od 200. U slučaju „Levenberg – Stat” krive je najbolji odziv neuronske mreže, srednja vrednost euklidskog rastojanja je smanjena naskoro pola metra.

Na slici 6.12 prikazane su performanse neuronske mreže u slučaju treniranja algoritmom „Resilient backpropagation“. U ovom slučaju su ispitivani isti slučajevi kao na prethodnom grafiku. Na osnovu ovog grafika, može se zaključiti, da su u ovom slučaju performanse lošije. U ovom slučaju, nema izražene razlike među krivama. Najbolju tačnost dostiže kriva „Resilient –raw 2” sa tačnošću od 0,9 m u slučaju kada je broj neurona u skrivenom sloju 280.

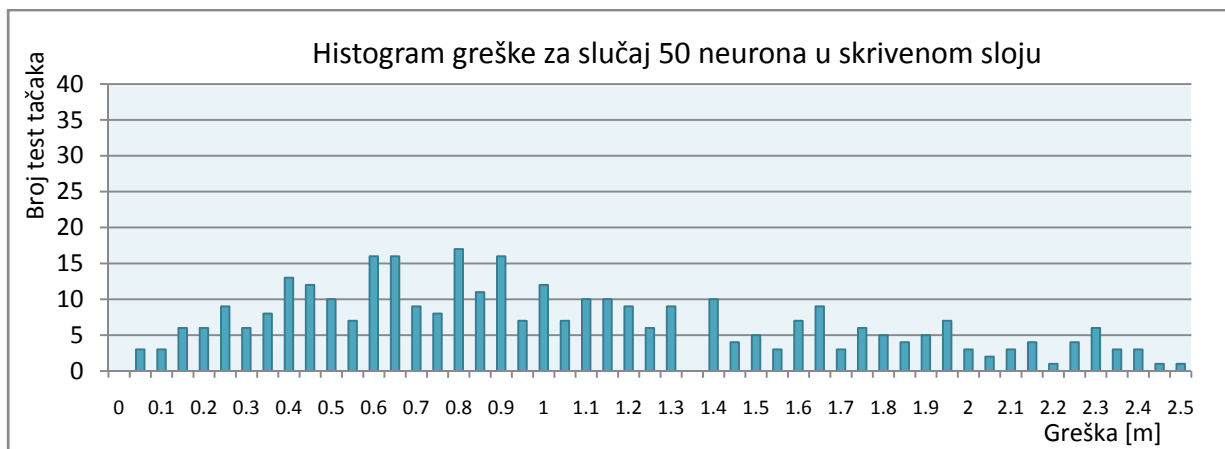


Slika 6.21 Srednja vrednost greške euklidskog rastojanja u slučaju Resilient backpropagation metode

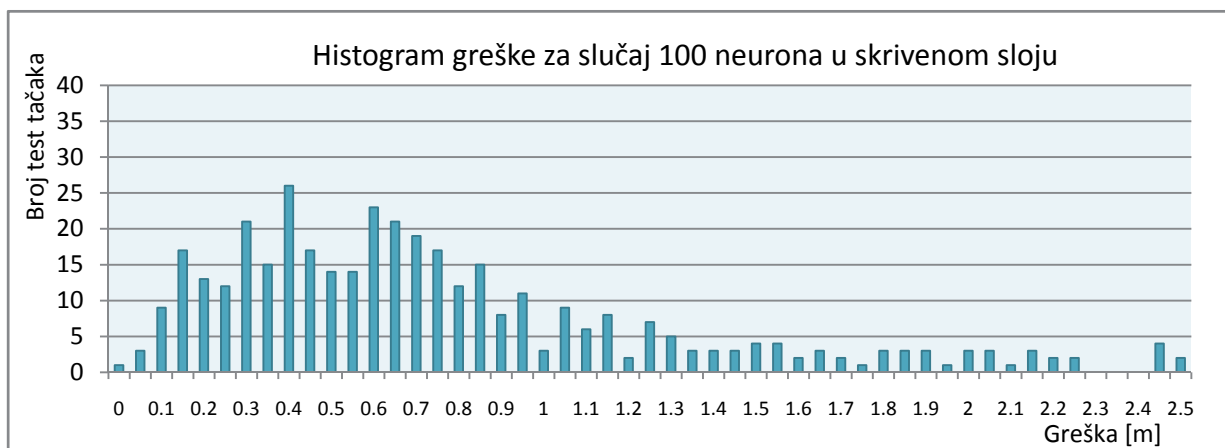
Ostale krive najbolji rezultat dostižu sa srednjom vrednošću greške euklidskog rastojanja u blizini jednog metra, i u ovom slučaju ni broj neurona u skrivenom sloju ne utiče u velikoj meri na tačnost.

Zavisnost tačnosti lokalizacije od broja neurona se pregledno vidi na histogramu greške euklidskog rastojanja, na kojem se vidi koliko test tačaka ima koju grešku euklidskog rastojanja pri lokalizaciji. U ovom slučaju je primenjen „Levenberg Marquardt” algoritam obuke zbog bolje postignute tačnosti. Slika 6.22 prikazuje raspodelu tačnosti lokalizacije za slučajeve kada se broj neurona u skrivenom sloju razlikuje. Histogram prikazuje koliko puta

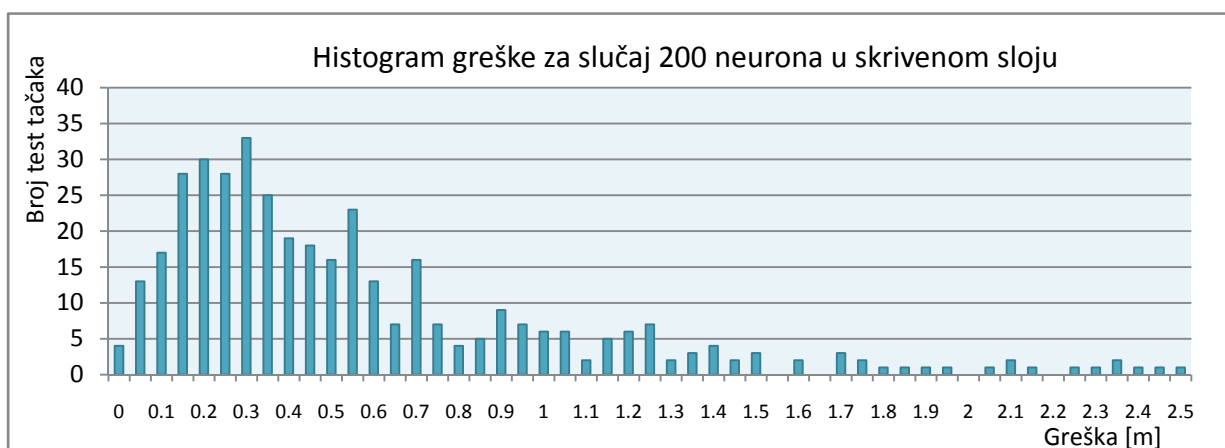
je algoritam uspešno izvršio lokalizaciju i sa kojom tačnošću. Lokalizacija je tačnija u slučaju kada su histogramski stubići veći na levoj strani, gde je vrednost greške manja.



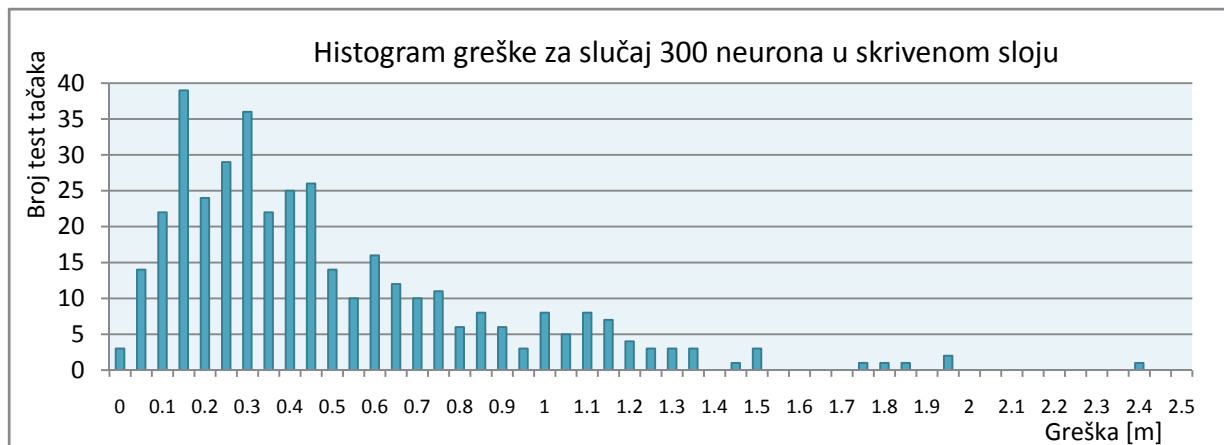
(a)



(b)



(c)



(d)

Slika 6.22 Histogram raspodele greške euklidskog rastojanja za test laboratoriju. Broj neurona u skrivenom sloju: (a) 50 neurona, (b) 100 neurona, (c) 200 neurona, (d) 300 neurona

U slučaju kada je broj neurona u skrivenom sloju 50 (Slika 6.22- a), vidi se da je raspodela greške relativno ravnomerna, a nije izražena oblast male greške. Sa povećanjem broja neurona u skrivenom sloju, dobija se drugačija raspodela histograma. U slučaju da broj neurona u skrivenom sloju iznosi 100 ili 200 (Slika 6.22 - b i c), raspodela greške euklidskog rastojanja se u značajnoj meri poboljšava. U slučaju 200 neurona ~75 % test tačaka (~300 vrednosti od ukupno 400 test vrednosti) se nalazi u polju tačnosti ispod 0,7 m. Najbolji rezultat se vidi na slici Slika 6.22 - d koja prikazuje histogram greške u slučaju 300 neurona u skrivenom sloju. U ovom slučaju više od 70 % test tačaka je dobijeno sa tačnošću do 0,5 m.

U okviru testiranja tačnosti lokalizacije primenom neuronske mreže najbolji rezultat se dobija sa strukturom u kojoj je broj neurona u skrivenom sloju iznad 200 i u slučaju kada se primenjuje „Levenberg-Marquardtova“ metoda za obučavanje neuronske mreže. U toku testiranja tačnosti lokalizacije u industrijskoj laboratoriji, ovaj rezultat će biti korišćen kao referentni.

Osim gore navedenih analiza, analizirana je i uspešnost lokalizacije za test uzorke za koje ne postoji RSSI vrednost u RSSI mapi, odnosno za tzv. „nepoznate“ tačke. U ovom slučaju, u toku analize se ispostavilo da promene strukture neuronske mreže ne utiču na tačnost lokalizacije, zato će kvalitet lokalizacije biti upoređivan u poglavlju 6.2.5.

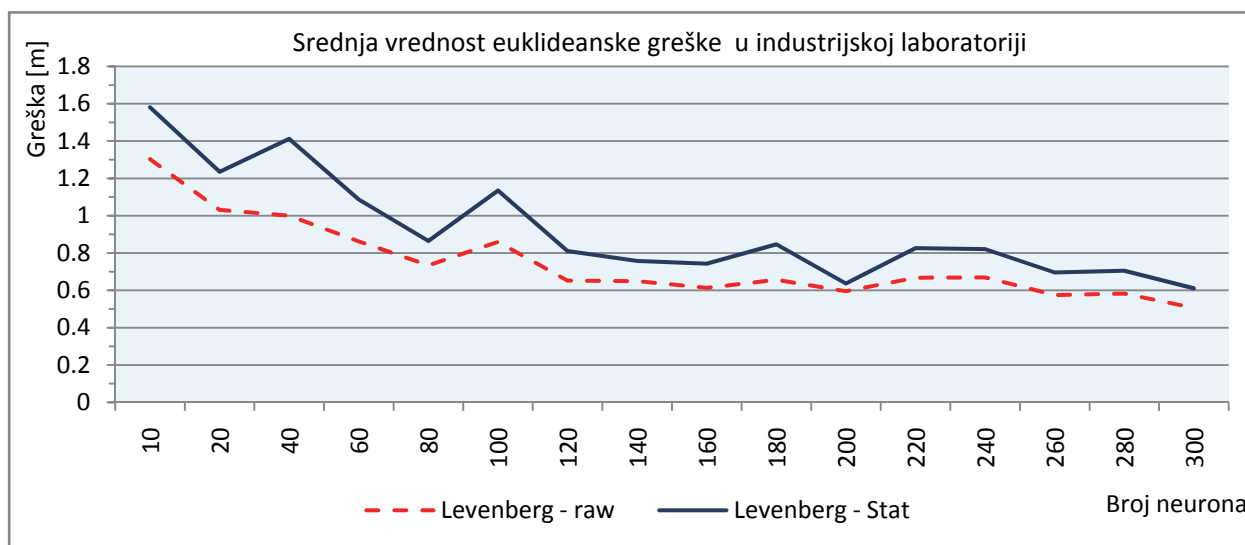
6.2.3.2 Rezultati za industrijsku laboratoriju

U toku eksperimenta u industrijskoj laboratoriji, uzeti su u obzir rezultati koji su dobijeni u test laboratoriji. Najbolji rezultat je dobijen sa neuronskom mrežom koja je obučavana po algoritmu „Levenberg Marquardt”, pa će u industrijskoj laboratoriji biti primenjena ova metoda. U slučaju test laboratorije, posebno je analizirano kako na efikasnost lokalizacije utiče koji set datoteke je primenjen za obučavanje mreže. U slučaju industrijske laboratorije, postoji ukupno 160 mernih pozicija, na kojima su izvršena merenja RSSI vrednosti. Na svakoj poziciji je 30 puta izmerena RSSI vrednost, i tako datoteka za obučavanje sadrži 4800 sirovih RSSI vrednosti. Osim datoteke sa sirovim vrednostima napravljena je i datoteka sa median vrednostima, čime je izvršeno filtriranje nerelevantnih RSSI vrednosti.

Kako je opisano u poglavlju 6.1.2, u slučaju industrijske laboratorije koordinate test tačaka su date u formi [segment, pozicija]. Greška lokalizacije je računata samo po koordinati „pozicija“ unutar segmenta, a tačnost određivanja segmenta će biti posebno analizirana. Greška pozicije će u ovom slučaju biti određena po sledećoj formuli:

$$d = \sqrt{(Poz_{stv} - Poz_{dob})^2} \quad (6.3)$$

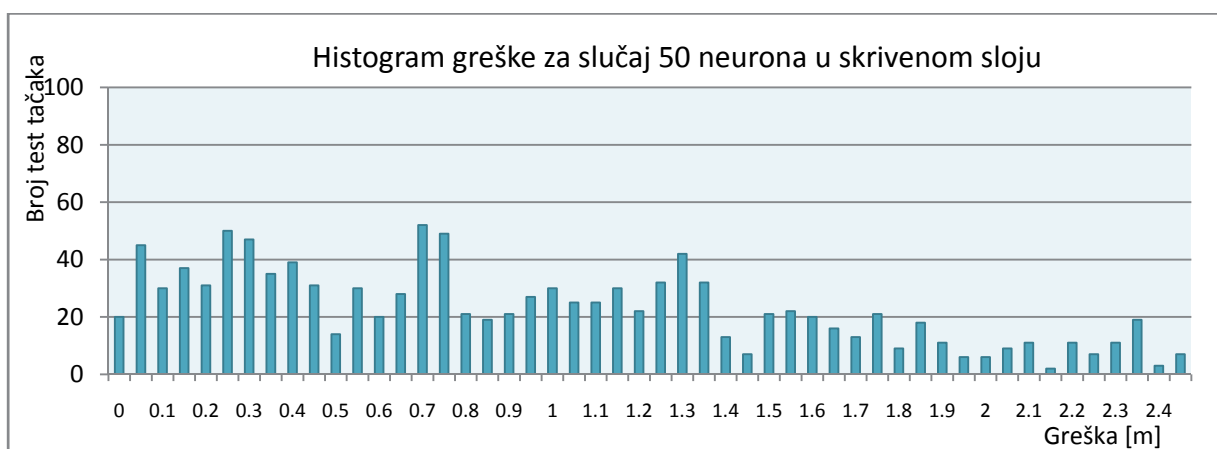
gde Poz_{stv} označava stvarnu poziciju, dok Poz_{dob} označava izračunatu poziciju. Na slici 6.23 prikazana je zavisnost srednje vrednosti greške lokalizacije od broja neurona u skrivenom sloju.



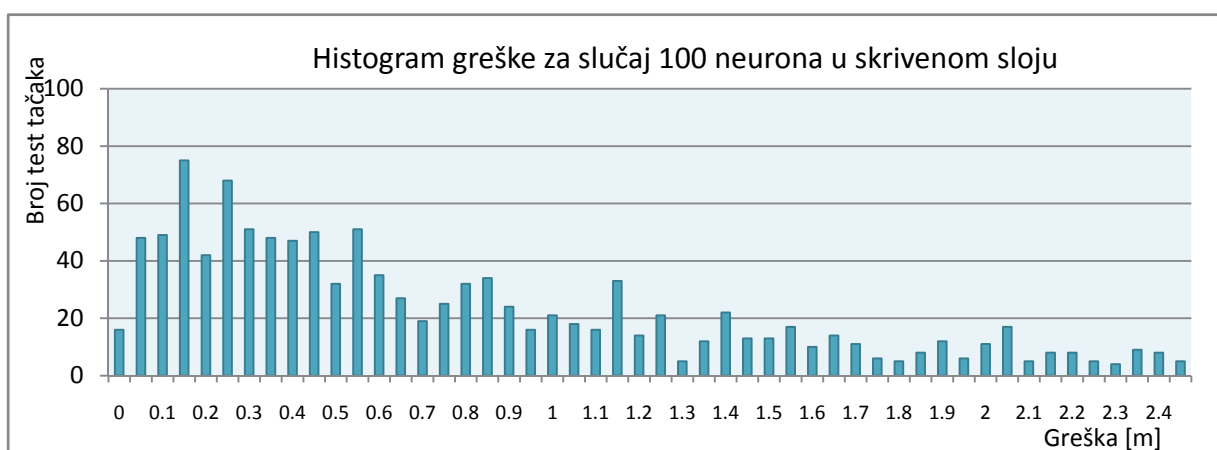
Slika 6.23 Srednja vrednost greške lokalizacije u industrijskoj laboratoriji

U ovom slučaju, izvršena je analiza samo za slučaj kada je mreža obučavana sa celim skupom podataka (kriva „Levenberg-raw“) i sa median vrednostima (kriva „Levenberg-stat“). Sa grafikona (Slika 6.23) može se zaključiti da se u ovom slučaju dobija bolji rezultat kada je neuronska mreža obučavana sa celim skupom podataka.

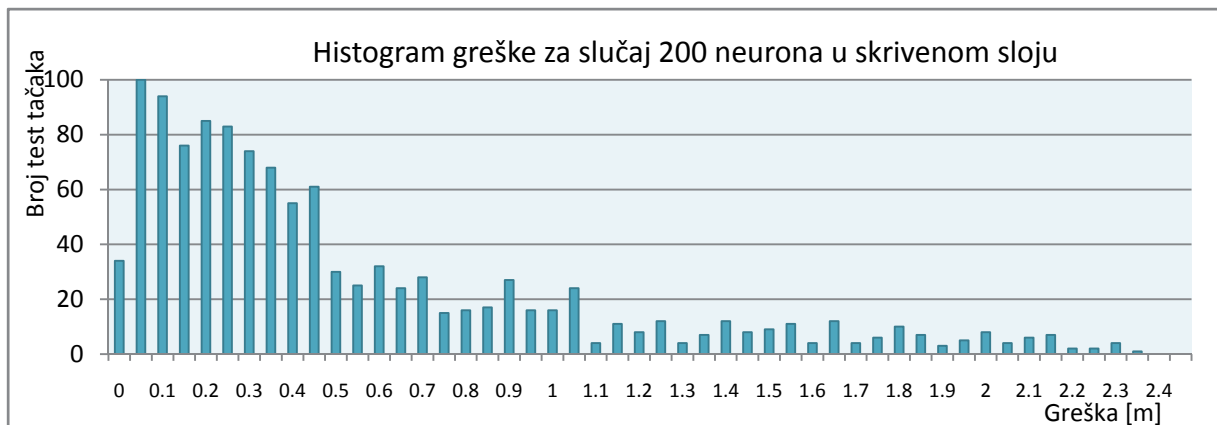
Tačnost lokalizacije se može videti i na histogramima greške (Slika 6.24). U ovom slučaju situacija je veoma slična kao kod test laboratorije. Ukoliko je broj neurona u skrivenom sloju 50 (Slika 6.24 - a), vidi se da je distribucija greške ravnomerna, a više tačaka je sa greškom iznad 0,5 m tačnosti (~65 % od ukupno 1200 test tačaka).



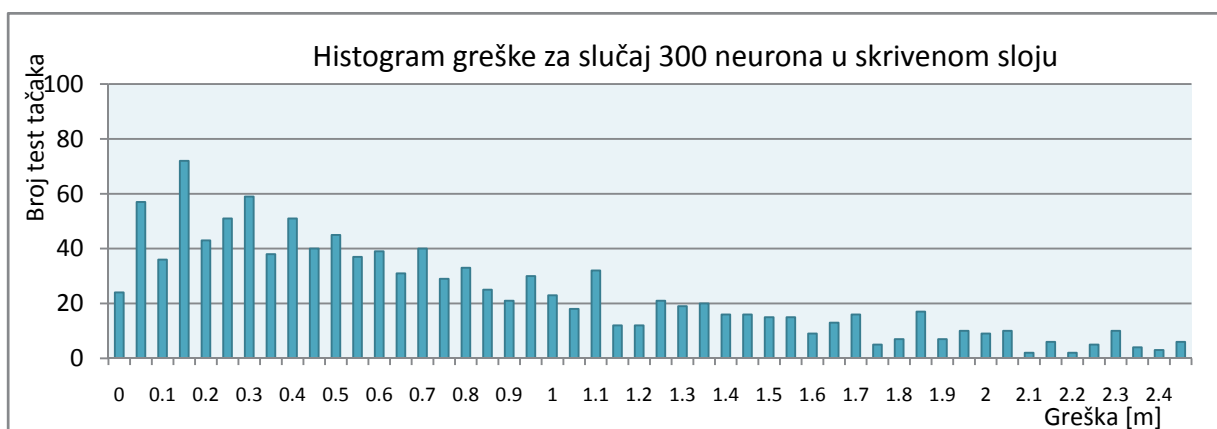
(a)



(b)



(c)

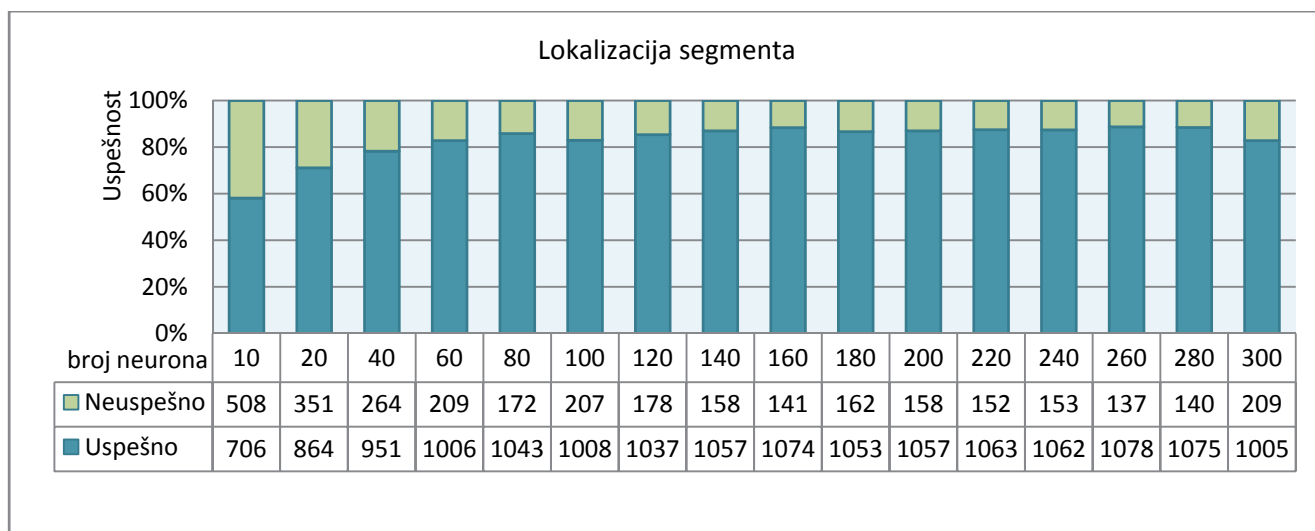


(d)

Slika 6.24 Histogram raspodele greškelokalizacije za industrijsku laboratoriju. Broj neurona u skrivenom sloju: (a) 50 neurona, (b) 100 neurona, (c) 200 neurona, (d) 300 neurona

Tačnost se poboljšava sa povećanjem neurona u skrivenom sloju, za 100 neurona (Slika 6.24-b) dobija se ~50 % tačaka sa tačnošću manjom od 0,5 m, a u slučaju 200 neurona (Slika 6.24-c) tačnost je u ~70 % manja od 0,5 m. Povećanje skrivenih neurona ne donosi uvek i povećanje tačnosti u lokalizaciji, što se može videti u slučaju kada je broj neurona 300 (Slika 6.24-d). U ovom slučaju, ~42% test tačaka je određeno sa tačnošću manjom od 0,5 m. Najbolja struktura neuronske mreže u ovom slučaju je kada skriveni sloj sadrži 200 neurona.

U slučaju industrijske laboratorije je osim određivanja greške pozicije unutar segmenta neophodno odrediti i koliko tačno neuronska mreža određuje same segmente. Na slici 6.25 prikazana je uspešnost lokalizacije segmenta u zavisnosti od broja neurona u skrivenom sloju.



Slika 6.25 Uspešnost lokalizacije segmenta sa neuronskim mrežama

Na slici 6.25 može se videti da kada je primenjeno 80 ili više neurona u skrivenom sloju uspešnost ostaje između 85 % i 90 %. Najbolji rezultat se dostiže u slučaju broja neurona 160 i 280, sa uspešnosti 1074 i 1075 tačaka od ukupno 1215 tačaka. Uspešnost lokalizacije segmenta je zadovoljavajuća, ali potrebno je uvesti dodatne filtracije kako bi se dostigla tačnost od najmanje ~95 %.

Lokalizacija u industrijskoj laboratoriji je razdvojena na određivanje pozicije unutar jednog segmenta i za određivanje samog segmenta. Određivanje pozicije unutar segmenta pomoću veštačke neuronske mreže je moguće sa najvećom tačnošću od ~0,5 m (Slika 6.23). Određivanje segmenta montažne linije, na kojem se nalazi merni čvor moguće je sa uspešnošću od ~ 85 %. Ispitivana je tačnost lokalizacije u zavisnosti od broja skrivenih neurona i dobijen je rezultat, da se najbolji odziv dobija kada se struktura mreže sastoji od minimalno 200 skrivenih neurona.

Osim gore navedenih analiza, analizirana je i uspešnost lokalizacije za test uzorke za koje ne postoji RSSI vrednost u RSSI mapi, odnosno za tzv. „nepoznate“ tačke. U ovom slučaju, u toku analize se ispostavilo da promene strukture neuronske mreže ne utiču na tačnost lokalizacije, a kvalitet lokalizacije će biti prikazan i upoređivan u poglavlju 6.2.5.

6.2.4 Eksperimentalna primena WkNN metode za lokalizaciju

Algoritam lokalizacije pomoću WkNN metode je opisan u poglavlju 3.4.2. U toku analize WkNN metode biće ispitivana tačnost lokalizacije u zavisnosti od korišćene baze podataka i od broja susednih tačaka.

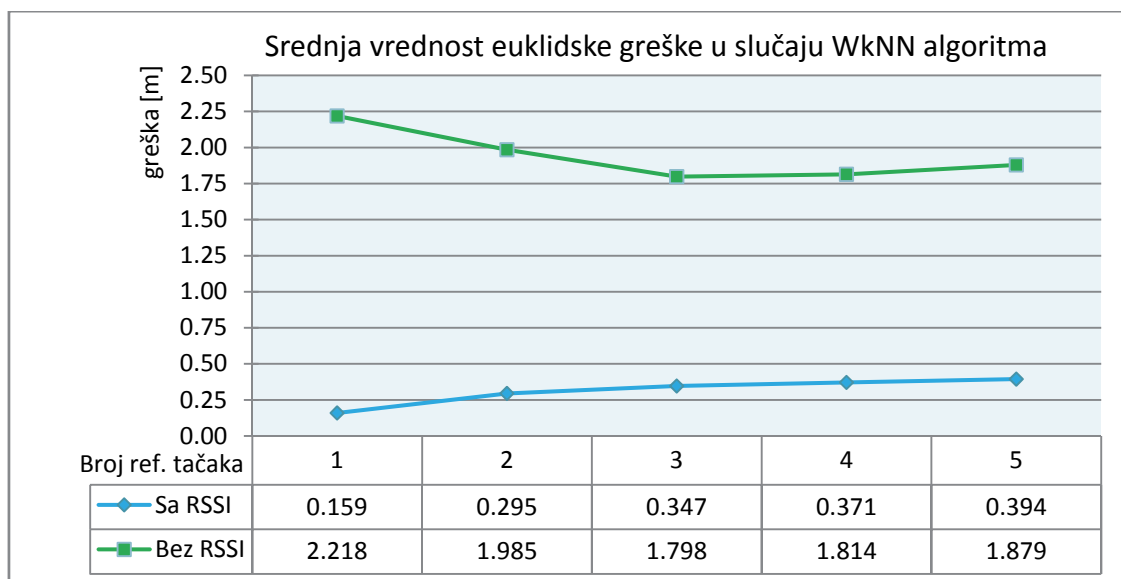
6.2.4.1 WkNN rezultati za test laboratoriju

U slučaju test laboratorije ispitivana su dva slučaja:

- Analiza za test tačke iz grida – poznate uzorke,
- Analiza za test tačke izvan grida – nepoznate uzorke.

Analiza tačnosti algoritma u slučaju tačaka iz grida se odnosi na tačke za koje postoji RSSI vrednost u bazi podataka (u RSSI mapi). Tačke koje su izvan grida su tačke koje služe za realnije testiranje WkNN algoritma. Pozicija test tačke za koju nije snimljena RSSI vrednost je opisana u poglavlju 6.1.1. Za određivanje kvaliteta lokalizacije će biti korišćeno euklidsko rastojanje, po izrazu (6.3).

Na slici 6.26 prikazana je srednja vrednost greške euklidskog rastojanja u zavisnosti od broja susednih tačaka (broj k), koji se uzima u obzir pri računanja pozicije. WkNN algoritam veoma kvalitetno određuje poziciju test uzoraka za koje postoji RSSI vrednost u bazi (Slika 6.26 kriva „sa RSSI“). Najbolji rezultat za poznate RSSI vrednosti se postiže u slučaju kada algoritam uzima u obzir prvu „sličnu“ tačku ($k=1$). U ovom slučaju WkNN algoritam samo određuje „najsličniju“ tačku (poglavlje 3.4.2), i ne vrši množenje težinskim faktorima. Srednja vrednost greške za $k=1$ iznosi 0,159 m, što je najbolji rezultat lokalizacije. U okviru testiranja algoritma ispitivano je 600 uzoraka RSSI vrednosti.



Slika 6.26 Srednja vrednost greške euklidskog rastojanja u slučaju WkNN metode za test laboratoriju

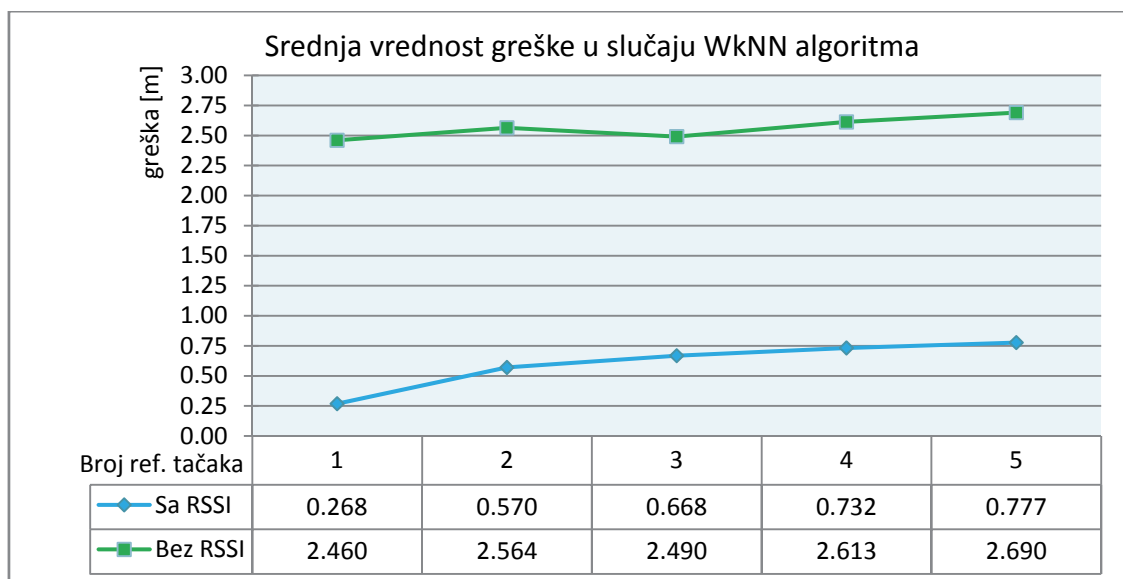
Zbog relevantnih testiranja algoritma, uvedene su test tačke za koje ne postoji RSSI podatak u RSSI mapi, a u ovom slučaju dolazi do izražaja svojstvo WkNN metode. Srednja vrednost euklidskog rastojanja u ovom slučaju (Slika 6.26 kriva „bez RSSI“) daje lošije rezultate. U ovom slučaju, najbolja tačnost se dostiže kada je broj susednih tačaka $k=3$, i tačnost u ovom slučaju iznosi $\sim 1,8$ m. Srednja vrednost je u ovom slučaju računata na osnovu rezultata dobijenih na osnovu ukupno 600 RSSI uzoraka, za ukupno 6 test tačaka.

6.2.4.2 WkNN rezultati za industrijsku laboratoriju

U slučaju industrijske laboratorije je takođe posebno analizirana tačnost lokalizacije u dva slučaja, kao i u slučaju test laboratorije. Posebno su analizirani test uzorci za koje postoji RSSI vrednost u datoteci i test uzorci bez RSSI podataka u RSSI mapi.

U prvom slučaju je ispitivana tačnost lokalizacije za svaku poziciju u kojoj su snimljene RSSI vrednosti. U proseku je za svaku poziciju uzeto po četiri RSSI uzorka, tako da je u ovom slučaju ispitivano ~ 640 uzoraka.

Kvalitet lokalizacije je ispitivan na isti način kao što je opisano u slučaju lokalizacije sa neuronskom mrežom, po izrazu (6.3). Ovaj izraz se koristi za određivanje tačnosti određivanja pozicije unutar jednog segmenta. Na slici 6.27 (kriva „sa RSSI“) prikazana je srednja vrednost greške za „poznate uzorke“, u zavisnosti od broja susednih tačaka (k).

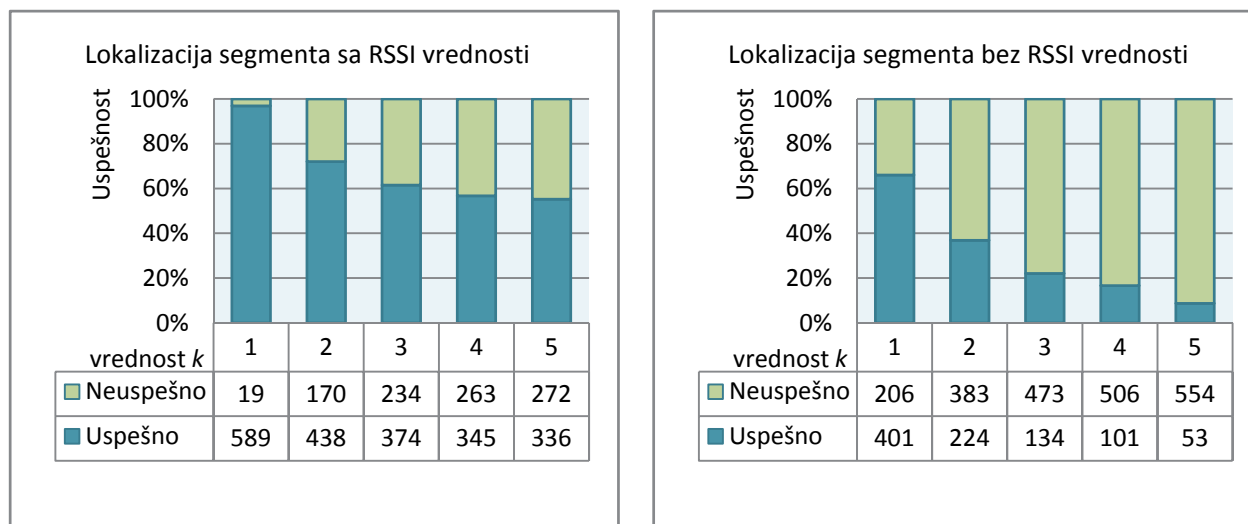


Slika 6.27 Srednja vrednost greške u slučaju WkNN metode za industrijsku laboratoriju

Najbolji rezultat se i u ovom slučaju dostiže kada je $k=1$, kao i u slučaju test laboratorije, pri čemu je srednja vrednost greške $\sim 0,27$ m. U slučaju $k=3, 4$ i 5 srednja vrednost greške se ne menja izraženo i varira oko vrednosti $\sim 0,7$ m.

U slučaju nepoznatih uzoraka, srednja vrednost greške u ovom slučaju (Slika 6.27 kriva „bez RSSI“) daje lošije rezultate. U ovom slučaju, najbolja tačnost se dostiže kada je broj susednih tačaka $k=1$ i 3 , a tačnost u ovom slučaju iznosi $2,46$ m i $2,49$ m. Srednja vrednost je u ovom slučaju računata na osnovu rezultata dobijenih na osnovu ukupno 600 RSSI uzoraka, za ukupno 20 test tačaka, čije RSSI vrednosti su izuzete iz RSSI mape.

Pored određivanja pozicije bežičnog čvora unutar segmenta, veoma je značajno i određivanje segmenta montažne linije. U toku analize tačnosti lokalizacije segmenta ispitivano je takođe dva slučaja, za „poznate“ uzorke i za „nepoznate“ uzorke. Slika 6.28 prikazuje uspešnost za oba slučaja.



(a)

(b)

Slika 6.28 Uspešnost određivanja segmenta pomoću WkNN metode: (a) „poznati“ uzorci, (b) „nepoznati“ uzorci

Kao što je prikazano na slici (Slika 6.28 – (a)), pri lokalizaciji u slučaju kada se test RSSI vrednosti nalaze u datoteci dobijaju se vrlo dobri rezultati, čak i do 96 % uspešnosti određivanja segmenta linije. Kao i u slučaju određivanja pozicije unutar segmenta, tako se i kod određivanja segmenta, najbolji rezultat dobija u slučaju $k=1$.

Četiri segmenta su obeležena i identifikovana brojevima 0, 1, 2 i 3. U toku određivanja pozicije za tačke iz „nepoznatih“ uzoraka primenjeno je zaokruživanje dobijenih rezultata na najbliži ceo broj. Kvalitet lokalizacije odstupa od kvaliteta lokalizacije u slučaju poznatih tačaka. U ovom slučaju, najbolji rezultat se dostiže sa vrednošću $k=1$, i sa tačnošću određivanja segmenta od gotovo 70 %.

6.2.5 Analiza rezultata i upoređivanje tačnosti

U prethodnim poglavljima posebno je analizirana uspešnost lokalizacije za test laboratoriju i za industrijsku laboratoriju koristeći veštačke neuronske mreže i WkNN metodu za određivanje pozicije bežičnog čvora. U okviru ovog poglavlja će biti upoređena uspešnost lokalizacije pomoću bežične senzorske mreže u industrijskim uslovima sa uspešnošću lokalizacije u laboratorijskim uslovima.

Prethodno je zaključeno da je lokalizacija pomoću bežične senzorske tehnologije moguća i u industrijskoj okolini, s tim što je potrebna veća RSSI rezolucija (više RSSI vrednosti u RSSI mapi) i potrebno je izabrati odgovarajući lokalizacioni algoritam.

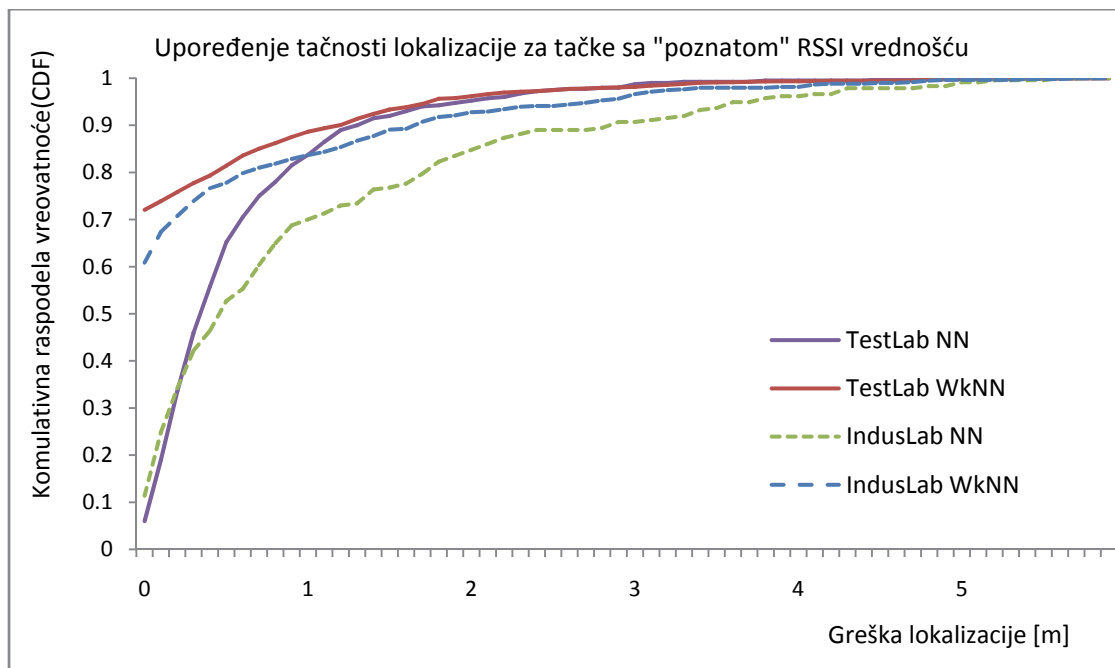
6.2.5.1 CDF za određivanje kvaliteta lokalizacije

Za upoređivanje uspešnosti lokalizacije u industrijskim uslovima sa uspešnošću lokalizacije u laboratorijskim uslovima biće korišćena kumulativna raspodela verovatnoće (*eng. cumulative distribution function-CDF*). CDF prikazuje verovatnoću sa kojom se dobija određena grešku lokalizacije [63].

Prvo se upoređuje efikasnost lokalizacije u slučaju kad su test uzorci uzeti iz baze podataka RSSI vrednosti (test tačke sa „poznatom“ RSSI vrednošću). U ovom slučaju upoređiće se sledeći lokalizacioni slučajevi:

- lokalizacija u **test laboratoriji** sa **neuronskim mrežama** u slučaju kada je broj neurona u skrivenom sloju $HN=200$, trenirani sa median datotekom (Slika 6.29 – kriva TestLab NN);
- lokalizacija u **test laboratoriji** sa algoritmom **WkNN** u slučaju kada je broj susednih tačaka $k=3$ (Slika 6.29 – kriva TestLab WkNN);
- lokalizacija u **industrijskoj laboratoriji** sa **neuronskim mrežama** u slučaju kada je broj neurona u skrivenom sloju $HN=200$, trenirani sa median datotekom (Slika 6.29 – kriva IndusLab NN);
- lokalizacija u **industrijskoj laboratoriji** sa algoritmom **WkNN** u slučaju kada je broj susednih tačaka $k=3$ (Slika 6.29 – kriva IndusLab WkNN).

Na slici 6.29 prikazane su uporedne lokalizacione performanse u slučaju industrijske i test laboratorije.



Slika 6.29 Poređenje tačnosti lokalizacije za tačke sa "poznatom" RSSI vrednošću

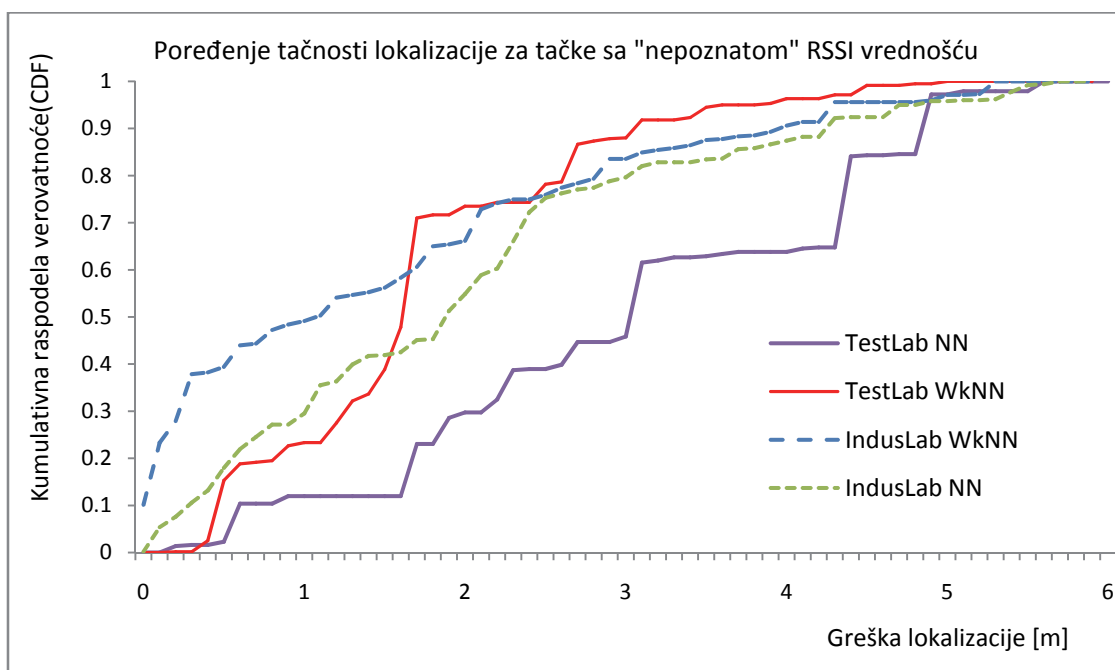
Uspešnost lokalizacije je bolja u slučaju kada CDF kriva ima veći nagib, tada će sa većom verovatnoćom biti lokalizovane tačke sa manjom greškom. U slučaju upoređivanja tačnosti lokalizacije sa „poznatim“ uzorcima, sve krive prikazuju odlične rezultate. Tačnost lokalizacije u ovom slučaju ne zavisi izrazito od sredine u kojoj se primenjuje bežična tehnologija. U obe sredine (test laboratorija i industrijska laboratorija) se za manje greške dobija veća verovatnoća sa lokalizacijom pomoću WkNN algoritma, pri čemu se gotovo 80 % test uzoraka dobija sa tačnošću manjom od 0,5 m. Primena neuronske mreže u industrijskoj laboratoriji daje slabiji rezultat tačnosti. Kriva za industrijsku laboratoriju (Slika 6.29 – IndusLab NN) i kriva za test laboratoriju (Slika 6.29 – TestLab NN) u slučaju korišćenja neuronske mreže se preklapaju sve do vrednosti verovatnoće $CDF=0,4$ kojoj odgovara tačnost 0,4 m. Posle tačke verovatnoće 0,4 kriva za industrijsku laboratoriju odstupa od krive za lokalizaciju u test laboratoriji, tako da se tačnost lokalizacije od 1 m u industrijskoj laboratoriji dostiže sa verovatnoćom 0,7, a u test laboratoriji sa 0,9.

Može se reći da u slučaju kada je primenjen WkNN algoritam za lokalizaciju u slučaju test tačaka sa poznatim RSSI vrednostima, industrijska sredina ne utiče u velikoj meri na tačnost lokalizacije. U slučaju primene veštačke neuronske mreže u istim uslovima, primetna je razlika iznad verovatnoće 0,4, i postoji odstupanje u tačnosti i do 2 m (u slučaju $CDF=0,9$).

Kvalitet lokalizacionog algoritma dolazi do izražaja u slučaju kada za test tačke ne postoji RSSI vrednost u RSSI mapi (test tačke sa „nepoznatom“ RSSI vrednošću). U ovom slučaju biće upoređivani sledeći lokalizacioni slučajevi:

- lokalizacija u **test laboratoriji** sa **neuronskim mrežama** u slučaju kada je broj neurona u skrivenom sloju $HN=200$, trenirani sa median datotekom (Slika 6.30– kriva TestLab NN);
- lokalizacija u **test laboratoriji** sa algoritmom **WkNN** u slučaju kada je broj susednih tačaka $k=3$ (Slika 6.30– kriva TestLab WkNN);
- lokalizacija u **industrijskoj laboratoriji** sa **neuronskim mrežama** u slučaju kada je broj neurona u skrivenom sloju $HN=200$, trenirani sa median datotekom (Slika 6.30– kriva IndusLab NN);
- lokalizacija u **industrijskoj laboratoriji** sa algoritmom **WkNN** u slučaju kada je broj susednih tačaka $k=3$ (Slika 6.30– kriva IndusLab WkNN).

Na slici 6.30 prikazane su uporedne lokalizacione performanse u slučaju industrijske i test laboratorije za test tačke sa „nepoznatom“ RSSI vrednošću.



Slika 6.30 Poređenje tačnosti lokalizacije za tačke sa "nepoznatom" RSSI vrednošću

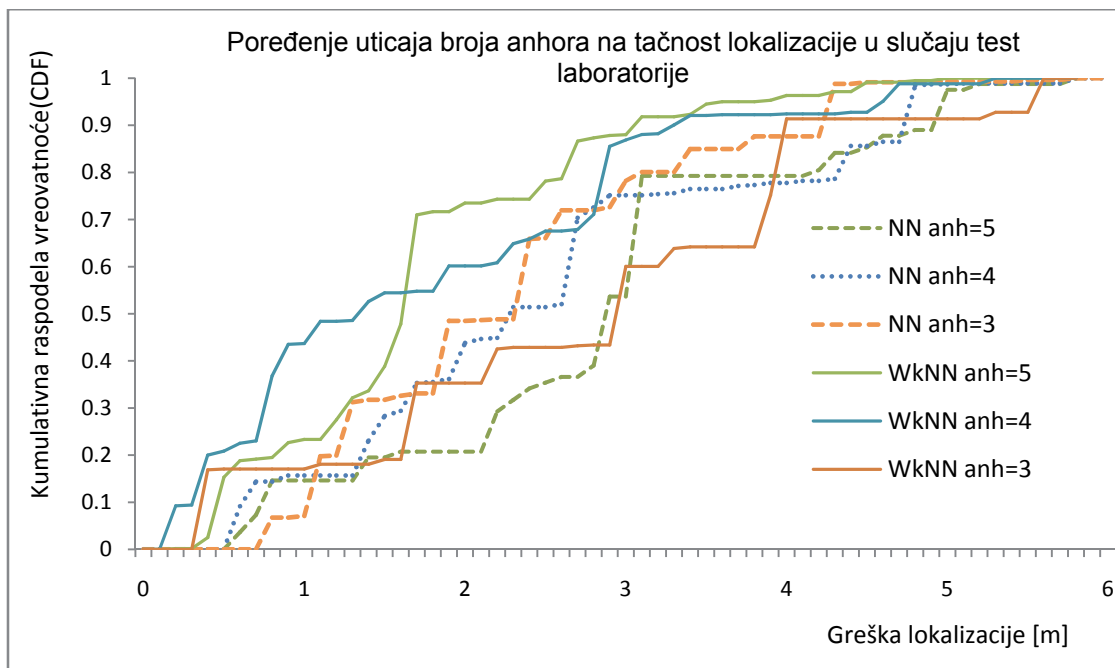
Kvalitet lokalizacije u ovom slučaju se u većoj meri razlikuje od kvaliteta lokalizacije sa „poznatim“ test tačkama. U ovom slučaju, najbolji rezultat se postiže lokalizacijom po WkNN algoritmu, i to sa verovatnoćom 0,5 za tačnost od 1 m. Gotovo svaka kriva dostiže tačnost od 2,5 m sa relativno prihvatljivom verovatnoćom od 0,8, osim krive „TestLab NN“ koja predstavlja lokalizacionu metodu sa neuronskim mrežama u test laboratoriji. Primena neuronskih mreža za lokalizaciju uspešnije reaguje u industrijskim uslovima, zahvaljujući velikoj rezoluciji (rastojanje između mernih mesta je 10 cm) snimanja RSSI vrednosti.

Kvalitet lokalizacije sa „nepoznatim“ tačkama u velikoj meri odstupa od kvaliteta lokalizacije sa „poznatim“ test tačkama. Uspešnu lokalizaciju u industrijskim uslovima moguće je dostići povećanjem rezolucije u toku snimanja RSSI mape, čime se povećava i verovatnoća pogotka. Od testiranih algoritama za lokalizaciju, najbolji rezultat je postignut WkNN algoritmom, naročito u slučaju lokalizacije sa „poznatim“ tačkama.

6.2.5.2 Uticaj strukture anhora na kvalitet lokalizacije

Na uspešnost lokalizacije primenom bežične senzorske mreže, pored faktora koji nastaju usled korišćenih lokalizacionih algoritama, utiču i faktori koji nastaju usled strukture postavljanja anhora. U toku istraživanja postavljeno je i korišćeno pet anhora za određivanje pozicije pokretnog senzora. U slučaju test laboratorije, anhor su postavljeni kao što je prikazano na slici 6.2 u poglavlju 6.1.1, a struktura anhora u industrijskoj laboratoriji je opisana u poglavlju 6.1.2 i prikazana na slici 6.4.

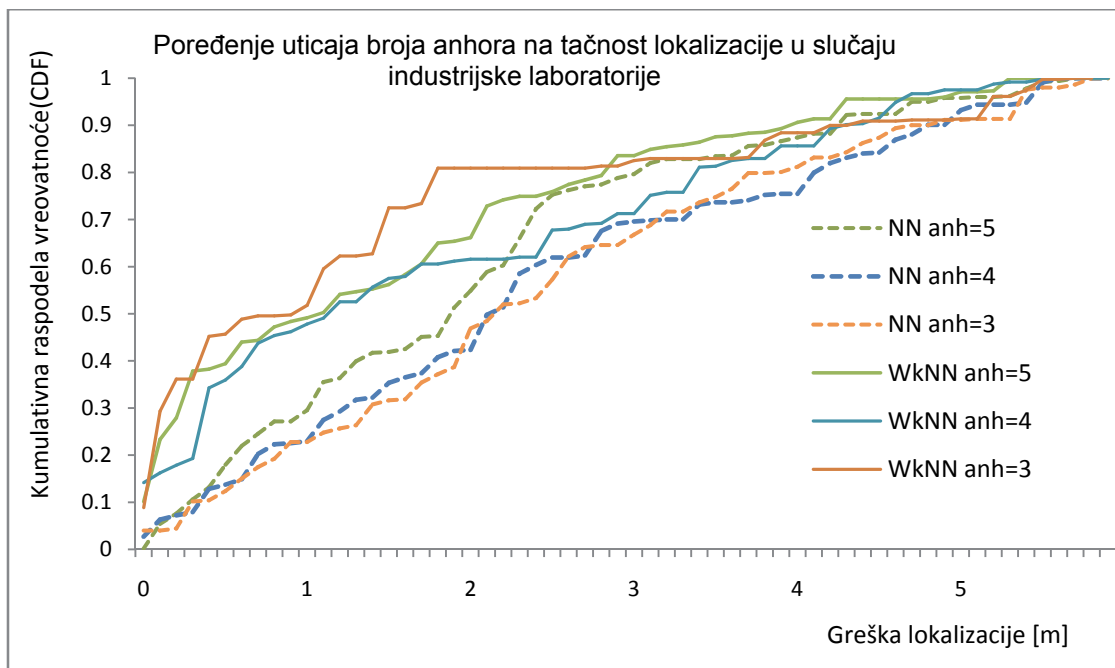
U slučaju test laboratorije, upoređene su uspešnosti lokalizacije realizovane pomoću pet, četiri i tri anhora. U slučaju lokalizacije pomoću četiri anhora, korišćene su RSSI vrednosti anhora koji su postavljeni u ćoškovima test laboratorije (anhor 1, 2,4 i 5), a u slučaju lokalizacije pomoću tri anhora, korišćeni su anhor koji se nalaze na jednoj dijagonali test laboratorije (anhor 1, 3 i 4). Poređenje uspešnosti lokalizacije u zavisnosti od broja anhora je prikazano na slici 6.31.



Slika 6.31 Poređenje uticaja broja anhora na tačnost lokalizacije u slučaju test laboratorije

U slučaju lokalizacije pomoću neuronske mreže, primenjena je struktura sa 200 skrivenih neurona, a u slučaju algoritma WkNN, broj susednih tačaka je $k=3$. U oba slučaja su primenjivani test uzorci koji nisu u RSSI mapi („nepoznate“ tačke). Na grafiku (Slika 6.31) se vidi da u slučaju test laboratorije smanjenje broja anhora dovodi do poboljšanja performansi lokalizacije oba algoritma. U slučaju WkNN metode, najbolji rezultat se dobija u slučaju primene četiri anhora, gde je lokalizacija uspešna sa tačnošću od 1 m sa verovatnoćom od 0,5. U slučaju neuronske mreže se takođe dobija poboljšanje tačnosti lokalizacije, a dobija se veoma slična uspešnost u slučaju lokalizacije sa tri anhora i lokalizacije sa četiri anhora. Kao najuspešniji lokalizacioni algoritam za test laboratoriju se pokazala WkNN metoda u slučaju kada se koristi četiri anhora.

U slučaju industrijske laboratorije, takođe je ispitivano smanjenje broja anhora za prethodno navedene slučajeve lokalizacije. U slučaju lokalizacije pomoću četiri anhora, korišćene su RSSI vrednosti anhora koji se nalaze u ćoškovima montažne linije (anhor 1, 2,3 i 4), a u slučaju lokalizacije pomoću tri anhora, korišćeni su anhori koji se nalaze na jednoj dijagonali industrijske laboratorije (anhor 1, 3 i 5). Na slici 6.32 prikazano je poređenje uticaja broja anhora na tačnost lokalizacije u slučaju industrijske laboratorije.



Slika 6.32 Poređenje uticaja broja anhora za tačnost lokalizacije u slučaju industrijske laboratorije

U ovom slučaju, izraženo poboljšanje se dobija u slučaju WkNN algoritma, u slučaju kada se koriste tri anhora za lokalizaciju. Dobija se tačnost od 1,5 m sa verovatnoćom od 0,8 u odnosu na 0,6 koliko je bilo u slučaju lokalizacije sa pet anhora. U slučaju kada se koristi neuronska mreža, smanjenje broja anhora ne donosi nikakva poboljšanja uspešnosti lokalizacije. Sa grafika (Slika 6.32) može se videti da se kriva „NN anh=5“ nalazi iznad ostalih kriva za neuronsku mrežu sa manjim brojem anhora, što znači da poseduje bolje performanse sa većom verovatnoćom.

U slučaju industrijske laboratorije, postignuto je poboljšanje kvaliteta lokalizacije smanjenjem broja anhora. U prethodnim analizama se ispostavilo da se najbolje performanse lokalizacije dobijaju pomoću WkNN algoritma. Iz ove analize se vidi da je efikasnost lokalizacije moguće povećati izborom najbolje strukture fiksnih čvorova. U ovom slučaju, to je bilo u slučaju korišćenja WkNN lokalizacionog algoritma koji koristi RSSI vrednosti za tri anhora koja su smeštena dijagonalno preko industrijske montažne linije.

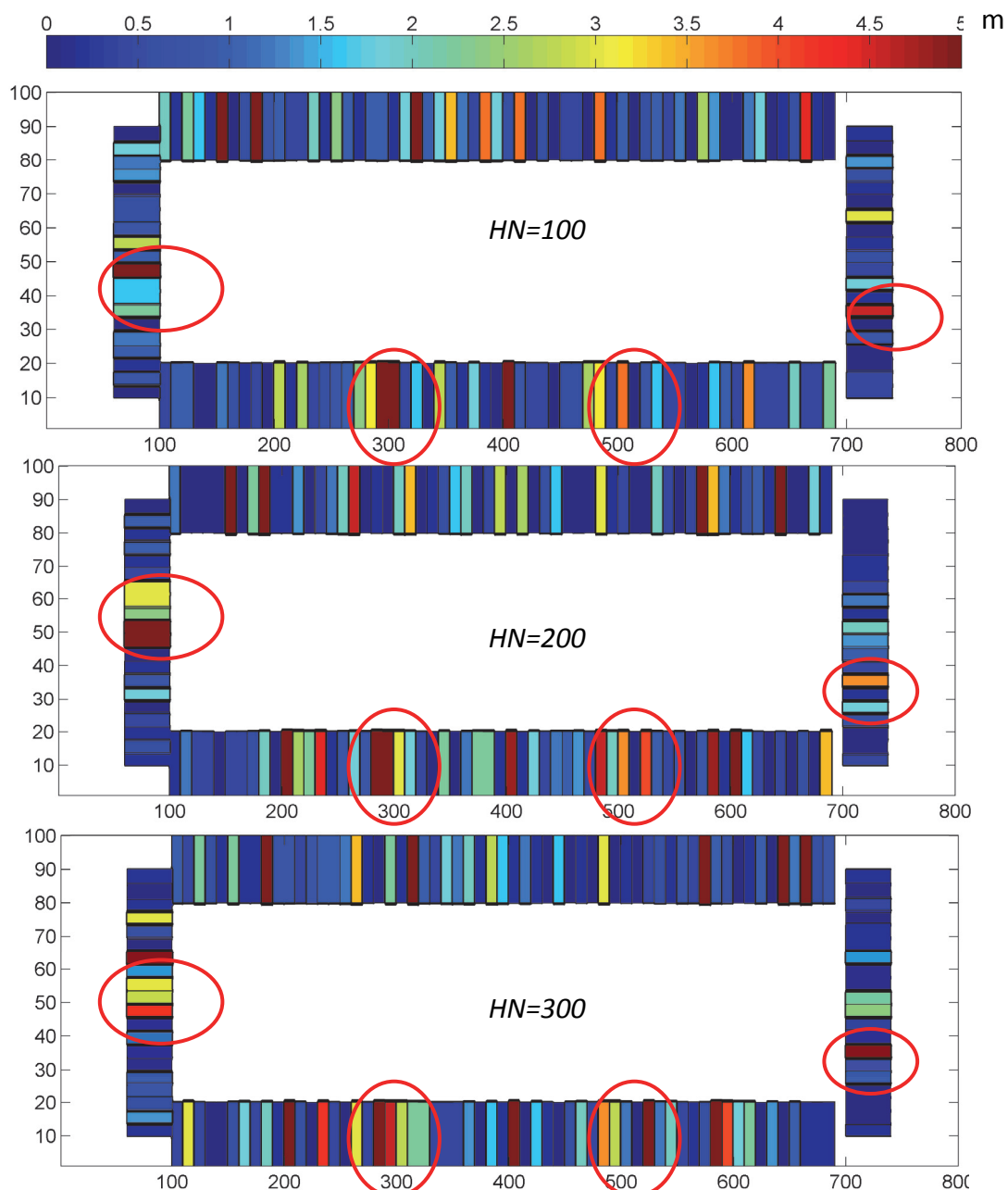
6.2.5.3 Uticaj strukture laboratorije na kvalitet lokalizacije

Kako u test laboratoriji, tako i u industrijskoj laboratoriji, postoje razni faktori koji utiču na uspešnost lokalizacije. U toku istraživanja nije ispitivan uticaj pojedinačnih faktora ili predmeta na uspešnost lokalizacije, već je samo analizirana tačnost lokalizacije na

određenim segmentima, pozicijama. Na osnovu rezultata ove analize moguće je zaključiti na kojim segmentima je kritična efikasnost lokalizacije i gde je neophodno dodatno poboljšanje algoritma ili filtriranje RSSI podataka.

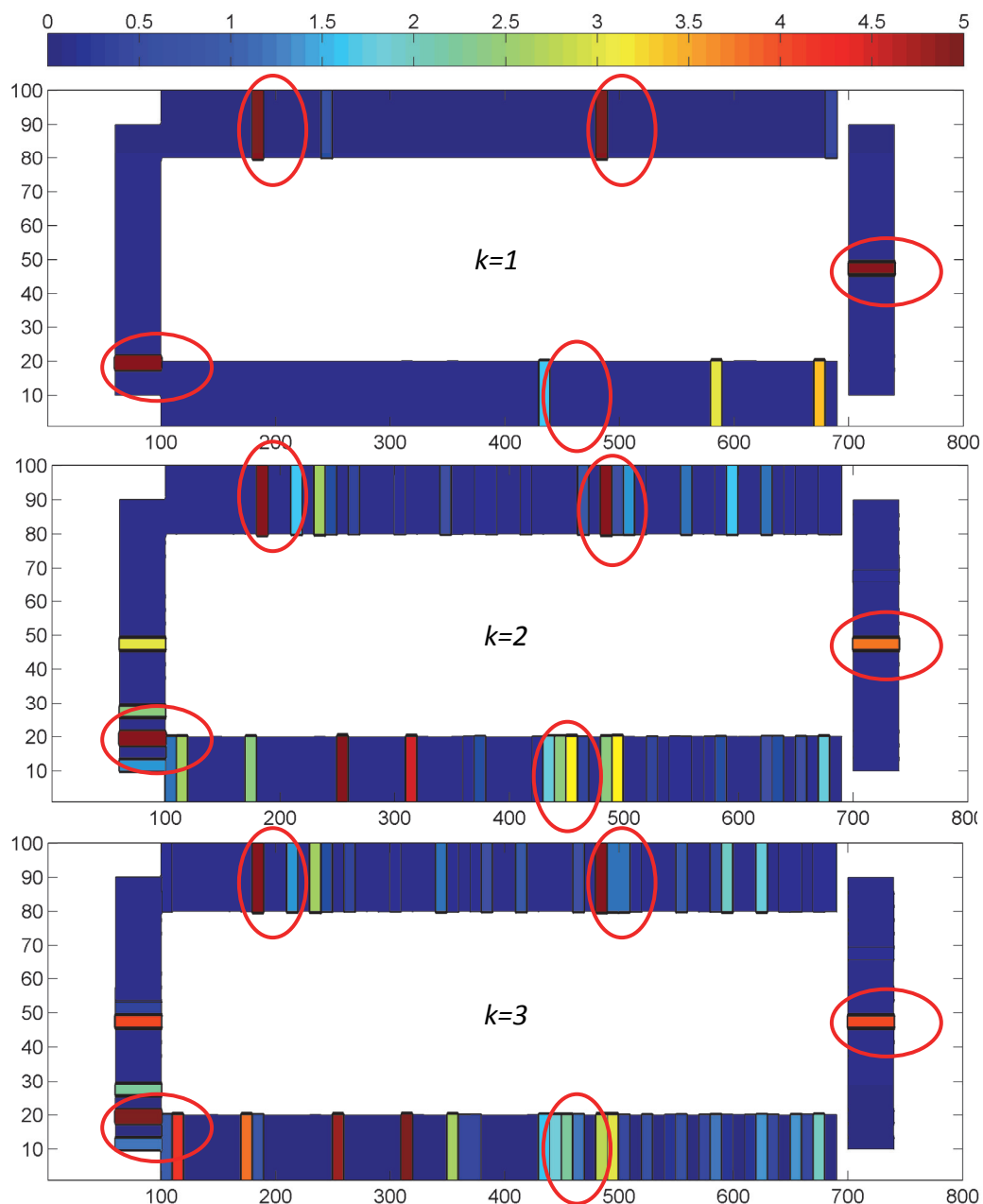
U slučaju test laboratorije, mogući izvori smetnje su velike staklene površine (prozori) i računari koji su prisutni u toku lokalizacije. U slučaju industrijske laboratorije, najveći uticaj na prostiranje bežičnih signala imaju metalne površine.

U okviru ovog poglavlja biće analizirane karakteristične pozicije gde su greške lokalizacije većeg intenziteta. U toku istraživanja prikazana je zavisnost tačnosti lokalizacije od pozicije u montažnom sistemu. Za analizu su korišćeni test uzorci sa poznatim RSSI vrednostima. Na slici 6.33 prikazana je raspodela greške lokalizacije u svakoj poziciji montažne linije u slučaju primene neuronske mreže.



Slika 6.33 Tačnost lokalizacije na pozicijama montažne linije u slučaju primene neuronske mreže (tri slučaja broja neurona u skrivenom sloju)

Sa slike 6.33 može da se zaključi da tačnost lokalizacije u određenim pozicijama uvek odstupa od željene tačnosti. Na slici su zaokruženi karakteristični segmenti na kojima tačnost u svim slučajevima (nezavisno od broja skrivenih neurona) odstupa od željenih performansi. Od područja zaokružениh na gornjoj slici, većina se pojavljuje i u slučaju lokalizacije pomoću WkNN algoritma (Slika 6.34).



Slika 6.34 Tačnost lokalizacije na pozicijama montažne linije u slučaju primene WkNN algoritma (tri slučaja broja susednih tačaka koje su uzete u obzir)

U slučaju WkNN algoritma se, kao što je i prethodno pokazano, dobijaju bolje performanse lokalizacije, ali su i u ovom slučaju prisutne karakteristične pozicije na kojima performanse lokalizacije odstupaju od ostalih tačaka. Na slici 6.34 prikazana je uspešnost lokalizacije WkNN algoritma u slučajevima kada je broj susednih tačaka $k=1, 2$ i 3 i kada su primenjeni test uzorci za koje postoji RSSI podatak u datoteci („poznate tačke“), čime se dobija pokrivenost duž cele montažne linije. Osim zaokruženih područja, pomoću daljih ispitivanja

su moguće i pojave drugih područja na kojima tačnost lokalizacije periodično odstupa od tačnosti postignute kod ostalih tačaka.

U toku ove analize prikazano je da uspešnost lokalizacije zavisi i od pozicije koja se određuje u montažnoj liniji. Iz analize se ne može direktno zaključiti koji faktori utiču na tačnost u tim tačkama, ali je moguće dobiti informacije o određenim područjima na kojima su potrebne korekcije u lokalizaciji. Poboljšanje tačnosti u tim područjima je moguće sa novim, drugačijim rasporedom anhora, uzimajući u obzir problematična područja.

7 Zaključak i pravci daljeg istraživanja

U okviru ove teze razmatran je problem upravljanja montažnim sistemima pomoću bežične senzorske mreže u cilju poboljšanja efikasnosti proizvodnje i u cilju poboljšanja kvaliteta proizvoda. Montažni sistemi su u 20. veku doživeli veliku modernizaciju zahvaljujući intenzivnom razvoju elektronike i računarske tehnike. U okviru ovog istraživanja primenjena je tehnologija bežične senzorske mreže.

U okviru prvog dela disertacije dat je prikaz aktuelnog stanja u oblasti, opis korišćene bežične tehnologije i opis aktuelnih lokalizacionih tehnologija. Posle opisa lokalizacionih tehnologija, dat je prikaz analize primenljivosti bežične senzorske tehnologije u montažnim sistemima. Na osnovu analize napravljen je model prototipa za upravljanje i nadzor montažnih sistema pomoću bežične tehnologije. Na kraju teze je eksperimentalnim rezultatima dokazano da je moguće primenjivati bežičnu senzorsku tehnologiju u industrijskim uslovima, na polju montažnih sistema.

Iz opisa trenutnog stanja oblasti, i na osnovu opisa bežične tehnologije moguće je zaključiti da su istraživanja na polju primenljivosti bežičnih senzorskih mreža u montažnim sistemima u manjoj meri sprovedena. Kod opisa lokalizacionih algoritama, opisani su odgovarajuće lokalizacione tehnike i problemi koji su vezani za ovu tehniku. Posebno je izdvojena „fingerprint“ lokalizaciona tehnologija, koja je korišćena tokom eksperimentalnih istraživanja. Pored lokalizacionih tehnologija, opisani su i algoritmi koji su bili korišćeni u toku eksperimenta, kao što su veštačke neuronske mreže i „WkNN“ algoritam.

U okviru analize primenljivosti bežičnih senzora kod montažnih sistema ispitivane su: strukture proizvoda za implementaciju bežičnih senzora, mogućnosti praćenja pozicije baznog sklopa u toku procesa montaže, fizičke veličine koje utiču na kvalitet proizvoda, tehnološki sistemi za implementaciju bežičnih senzora i metode za ocenjivanje uravnoteženja montažnih sistema. Iz analize navedenih činjenica moguće je zaključiti da

postoji potencijal u primeni bežičnih senzorskih mreža u raznovrsnim aplikacijama kod montažnih sistema.

Razmatrajući rezultate iz analize primenljivosti bežičnih senzora, razvijen je model prototipa za upravljanje i nadzor montažnih sistema, u skladu sa standardnim modelom upravljačkih sistema. Razvijeni teoretski model pokazuje kako bi funkcionisao jedan bežični upravljački sistem u skladu sa standardnim nivoima upravljanja industrijskim procesima. Ovakav prototip modela je neophodan za primenu i funkcionisanje upravljačkih sistema. Jedan od doprinosa teze je analiza primenljivosti i razvoj modela prototipa bežičnog upravljačkog sistema.

U toku eksperimentalnih istraživanja analizirani su lokalizacioni algoritmi bazirani na bežičnim senzorskim tehnologijama u laboratorijskoj i u industrijskoj okolini. U toku istraživanja ispitivane su mogućnosti lokalizacije baznog elementa proizvoda u toku montaže. Uspešnost lokalizacije u industrijskoj okolini je upoređivana sa uspešnošću lokalizacije u laboratorijskoj okolini. U laboratorijskoj okolini su testirani algoritmi sa „fingerprint“ lokalizacionom tehnologijom koja je bazirana na RSSI vrednostima u međusobnoj bežičnoj komunikaciji senzorskih čvorova. Najuspešniji algoritmi u laboratorijskoj sredini su primenjivani i u realnoj industrijskoj sredini, u okviru industrijske laboratorije. Bežična senzorska mreža je instalirana na montažnu liniju koja je predviđena za montažu cirkulacionih pumpi. Rezultati uspešnosti lokalizacije baznog predmeta na montažnoj liniji su upoređivani pomoću kumulativne raspodele verovatnoće (*CDF*). Prikazano je kako zavisi uspešnost lokalizacije baznog elementa od strukture senzorske mreže i od strukture prostorije. Rezultati eksperimentalnih istraživanja dokazuju da je moguća lokalizacija i u industrijskim uslovima, u montažnim sistemima. Na grafikonima se vidi da uspešnost lokalizacije odstupa od uspešnosti lokalizacije u laboratorijskim uslovima, ali je u zavisnosti od aplikacije moguće pouzdano koristiti kod montažnih sistema.

Osnovna hipoteza disertacije, da je primenom bežične senzorske tehnologije moguće uticati na kvalitet montažnih sistema je potvrđena. Razvijen je model za upravljanje montažnim sistemima primenom bežične senzorske tehnologije. Eksperimentalnim rezultatima je dokazano da je moguća lokalizacija pomoću bežične senzorske tehnologije u industrijskim

uslovima, u montažnim sistemima. Razvijen model je sposoban da na osnovu snimljenih-arhiviranih podataka o lokaciji baznog sklopa ocenjuje efikasnost montažnih sistema i kontinualnim praćenjem uticaja okoline na bazni sklop ocenjuje kvalitet montaže.

Najvažniji doprinosi ove disertacije koji mogu da se izvode su:

- napravljena je analiza primenljivosti bežične senzorske tehnologije kod montažnih sistema;
- razvijen je model prototipa za upravljanje montažnim sistemima primenom bežične senzorske tehnologije, koji je u skladu sa standardnim nivoima industrijskih upravljačkih sistema;
- eksperimentalnim istraživanjem analizirani su lokalizacioni algoritmi bazirani na bežičnim senzorskim tehnologijama u laboratorijskoj i u industrijskoj okolini;
- eksperimentalnim rezultatima je dokazano da je moguće pratiti proizvoda u toku procesa montaže.

Dalji rad, na osnovu postignutim u ovoj disertaciji, treba da bude usmeren na testiranje različitih lokalizacionih tehnologija i algoritama. Takođe, potrebno je da se nastavi sa eksperimentalnim istraživanjima i utvrđivanjem fizičkih veličina koji utiču na kvalitet montiranih proizvoda. Glavni cilj daljih istraživanja je da razvijen sistem zasnovan na primeni bežične tehnologije bude sastavni deo montažnih linija .

Literatura

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, March 2002.
- [2] A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, pages 88–97, ACM Press, 2002.
- [3] E. Biagioni. PODS: Interpreting spatial and temporal environmental information. In *Usability Evaluation and Interface Design: Cognitive Engineering, Intelligent Agents and Virtual Reality, Volume I of the Proceedings of HCI International 2001, the 9th International Conference on Human-Computer Interaction*, pages 317–321, New Orleans, Louisiana, August 2001.
- [4] D. Niculescu and B. Nath. Ad hoc positioning system (APS), In *Proceedings of GLOBECOM' 01 (IEEE)*, pages 2926–2931, San Antonio, Texas, November 2001.
- [5] Burrell, J.; Brooke, T.; Beckwith, R.; , "Vineyard computing: sensor networks in agricultural production," *Pervasive Computing, IEEE* , vol.3, no.1, pp. 38- 45, Jan.-March 2004 doi: 10.1109/MPRV.2004.1269130
- [6] A. Matese, S.F. Di Gennaro, A. Zaldei, L. Genesio, F.P. Vaccari, A wireless sensor network for precision viticulture: The NAV system, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 69, Issue 1, November 2009, Pages 51-58, ISSN 0168-1699, 10.1016/j.compag.2009.06.016.
- [7] Hussain, M.A.; Khan, P.; Kwak kyung Sup; , "WSN research activities for military application," *Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. 11th International Conference on* , vol.01, no., pp.271-274, 15-18 Feb. 2009
- [8] L. Schwiebert, S. Gupta, and J. Weinmann. Research challenges in wireless networks of biomedical sensors. In *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 151–165, ACM Press, 2001.
- [9] J.M. Rabaey, M.J. Ammer, J.L. da Silva Jr., D. Patel, S. Roundy, PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking, *IEEE Computer Magazine* (2000) 42–48.
- [10] Baronti, P., Pillai, P., Chook, V. W., Chessa, S., Gotta, A., & Hu, Y. F. (2007). Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and ZigBee standards. *Computer communications*, 30(7), 1655-1695.
- [11] Crossbow Technology Inc. <http://www.xbow.com>.
- [12] Moteiv Corporation, <http://www.moteiv.com>.
- [13] TinyOs Community Forum, <http://www.tinyos.net>.
- [14] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D.E. Culler, K.S.J. Pister, System architecture directions for networked sensors, in: *Proceedings of the 9th International Conference on Architectural*

- Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS-IX), Cambridge, MA, USA, November 2000, pp. 93–104.
- [15] Sun SPOT World Community, <http://www.sunspotworld.com>
- [16] Zigbee Alliance, <http://www.zigbee.org/>
- [17] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins. *Global Positioning System: Theory and Practice*. Springer-Verlag, 4th edition, 1997.
- [18] Jacek Czajewski. The accuracy of the global positioning systems. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2004.
- [19] Robin Strahan. Location sensing technologies. In Report No. e-mc2.2.1.1.2002, Department of Computer Science, University, 2002.
- [20] Mao, Guoqiang, Barış Fidan, and Brian Anderson. "Wireless sensor network localization techniques." *Computer Networks* 51.10 (2007): 2529-2553.
- [21] Bachrach, Jonathan, and Christopher Taylor. "Localization in sensor networks." *Handbook of sensor networks: Algorithms and Architectures* 1 (2005).
- [22] Kanaan, M., and K. Pahlavan. "Algorithm for TOA-based indoor geolocation." *IEE Electronics Letters* 40.22 (2004).
- [23] N. Priyantha, A. Miu, H. Balakrishnan, and S. Teller. The cricket compass for contextaware mobile applications. In *Proceedings of the 7th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, pages 1–14, Rome, Italy, July 2001.
- [24] Whitehouse, Kamin, Chris Karlof, and David Culler. "A practical evaluation of radio signal strength for ranging-based localization." *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* 11.1 (2007): 41-52.
- [25] Grossmann, Ralf, et al. "Localization in Zigbee-based Sensor Networks." *1st European ZigBee Developers Conference (EuZDC), München-Dornach, Deutschland*. 2007.
- [26] Lin, Lanxin, H. C. So, and Y. T. Chan. "Accurate and simple source localization using differential received signal strength." *Digital Signal Processing* (2013).
- [27] Zuniga, Marco, and Bhaskar Krishnamachari. "Link layer models for wireless sensor networks." *The Autonomous Networks Research Group@ USC, Tech. Rep 1* (2005).
- [28] T.S. Rappaport "Wireless Communications: Principles and Practice", second ed., Prentice Hall PTR, 2001.
- [29] Salmistraro, Matteo. "Indoor localization in wireless sensor network using fingerprinting method." (2010).
- [30] Bshara, Mussa, et al. "Fingerprinting localization in wireless networks based on received-signal-strength measurements: a case study on wimax networks." *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 59.1 (2010): 283-294.
- [31] Yang, Zheng, Chenshu Wu, and Yunhao Liu. "Locating in fingerprint space: wireless indoor localization with little human intervention." *Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking*. ACM, 2012.
- [32] Moghtadaiee, Vahideh, Andrew G. Dempster, and Binghao Li. "Accuracy indicator for fingerprinting localization systems." *Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2012 IEEE/ION*. IEEE, 2012.

- [33] Sapumohotti, Chamal, Mohamad Yusoff Alias, and Su Wei Tan. "Wilocsim: Simulation Testbed for WLAN Location Fingerprinting Systems." *Progress In Electromagnetics Research B* 46 (2013): 1-22.
- [34] Yiming Ji, Location Estimation in Wireless Networks, Dissertation, Graduate Faculty of Auburn University, May 2006
- [35] Pivato, Paolo, Luigi Palopoli, and Dario Petri. "Accuracy of RSS-based centroid localization algorithms in an indoor environment." *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 60.10 (2011): 3451-3460.
- [36] Nicoli, Monica, et al. "Localization in mobile wireless and sensor networks." *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2011.1 (2011): 1-3.
- [37] Gustafsson Fredrik, Gunnarsson Fredrik, and David Lindgren. "Sensor models and localization algorithms for sensor networks based on received signal strength." *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2012.1 (2012): 16.
- [38] Altrichter, Horváth, Pataki, Strausz, Takács, Valyon, "Neurális hálózatok", Panem Kft., 2006
- [39] Rahman Mohammad Shaifur, Youngil Park, and Ki-Doo Kim. "Localization of wireless sensor network using artificial neural network." *Communications and Information Technology, 2009. ISCIT 2009. 9th International Symposium on*. IEEE, 2009.
- [40] Dragan Kukulj , "Sistemi zasnovani na računarskoj inteligenciji – Monografija", FTN izdavaštvo, Novi Sad, 2007
- [41] MEMSIC delivers Powerful Sensing Solutions, www.memsic.com
- [42] Paavola, Marko. *Wireless Technologies in Process Automation—Review and an Application Example*. Tech. rep., University of Oulu, Control Engineering Laboratory (Dec. 2007), 2007.
- [43] Ivanov, Svilen, Edgar Nett, and Stefan Schemmer. "Automatic WLAN localization for industrial automation." *Factory Communication Systems, 2008. WFCS 2008. IEEE International Workshop on*. IEEE, 2008.
- [44] Zwirello, Lukasz, et al. "Localization in industrial halls via ultra-wideband signals." *Positioning Navigation and Communication (WPNC), 2010 7th Workshop on*. IEEE, 2010.
- [45] Duvallet, Felix, and Ashley D. Tews. "WiFi position estimation in industrial environments using Gaussian processes." *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2008.
- [46] Desforges, Xavier, and Bernard Archimède. "Multi-agent framework based on smart sensors/actuators for machine tools control and monitoring." *Engineering applications of artificial intelligence* 19.6 (2006): 641-655.
- [47] Agrawal, Rohit, and Saumitra Mohan. "Complete industrial solution for automation in temperature and humidity monitoring using labview." *Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), 2012 Ninth International Conference on*. IEEE, 2012.
- [48] Zhao, Gang. "Wireless sensor networks for industrial process monitoring and control: A survey." *Network Protocols and Algorithms* 3.1 (2011): 46-63.
- [49] Obodoeze, Fidelis C., et al. "Wireless Sensor Networks (Wsns) In Industrial Automation: Case Study Of Nigeria Oil And Gas Industry." *International Journal of Engineering* 2.3 (2013).

- [50] Mon, Yi-Jen, Chih-Min Lin, and Imre J. Rudas. "Wireless Sensor Network (WSN) Control for Indoor Temperature Monitoring." *Acta Polytechnica Hungarica* 9.6 (2012).
- [51] Waldemar Grzechca, "Final Results of Assembly Line Balancing Problem", Assembly Line – Theory and Practice, InTech, 2011, ISBN 978-953-307-995-0
- [52] Haq, A. Noorul, K. Rengarajan, and J. Jayaprakash. "A hybrid genetic algorithm approach to mixed-model assembly line balancing." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 28.3-4 (2006): 337-341.
- [53] Waldemar Grzechca, "DIFFERENT STRUCTURES OF MANUFACTURING SYSTEMS IN LOW PRODUCTION DEMAND." *Journal of Machine Engineering* 12.3 (2012).
- [54] Ilija Ćosić, Zoran Anišić, Milovan Lazarević, "Tehnološki Sistemi u Montaži", FTN izdavaštvo, Novi Sad 2012.
- [55] Mohammad Kamal Uddin, Jose Luis Martinez Lastra "Assembly Line Balancing and Sequencing", Assembly Line – Theory and Practice, InTech, 2011, ISBN 978-953-307-995-0
- [56] Ilić Oliver, Jovanović Biljana, "Uravnoteženje proizvodnih i montažnih linija uz pomoć računara", *Industrija*, vol. 34, br. 4, str. 1-12, 2006
- [57] Crossbow Technology, Iris Datasheet, www.bullseye.xbow.com
- [58] Kermani, Bahram G., Susan S. Schiffman, and H. Troy Nagle. "Performance of the Levenberg–Marquardt neural network training method in electronic nose applications." *Sensors and Actuators B: Chemical* 110.1 (2005): 13-22.
- [59] Demuth, Howard, Mark Beale, and Martin Hagan. "Neural Network Toolbox™ 6." *User Guide*, COPYRIGHT 2008 (1992).
- [60] L.M. Ni, Y. Liu, Y.C. Lau, and A.P. Patil, "LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID," Proc. IEEE PerCom'03, pp. 407-415, Mar. 2003.
- [61] Kukolj, Dragan, Marina Vuckovic, and Szilveszter Pletl. "Indoor Location Fingerprinting Based on Data Reduction." *Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA), 2011 International Conference on*. IEEE, 2011.
- [62] Saxena, Mohit, Puneet Gupta, and Bijendra N. Jain. "Experimental analysis of RSSI-based location estimation in wireless sensor networks." *Communication Systems Software and Middleware and Workshops, 2008. COMSWARE 2008. 3rd International Conference on*. IEEE, 2008.
- [63] Barsocchi, Paolo, et al. "A novel approach to indoor RSSI localization by automatic calibration of the wireless propagation model." *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th*. IEEE, 2009.
- [64] Mikell, P. Groover. "Automation Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing." *Chapter 15* (2001): 420-459.
- [65] Kumar, Mohit, et al. "Zigbee based parameter monitoring and controlling system for induction machine." (2013).
- [66] Yu Hongcheng, et al. "Design of the Remote Monitoring System for Workshop Based on ZigBee Wireless Sensor Networks." *Internet of Things*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. 33-40.

- [67] Yang, Qingqing, and Chunguang Han. "A Routing Algorithm in Wireless Sensor Network for Monitoring System of Machine Tools." *Advances in Electronic Commerce, Web Application and Communication*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. 417-421.
- [68] Zulkifli, Che Zalina, et al. "Wireless Mesh Network in Integrated Web Base Monitoring Systems for Production Line Automation." *Signal Processing and Information Technology*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. 7-15.
- [69] Borowik, B., W. Kaliński, and J. Wojnarowski. "The application of the ZigBee technique in measurements of vibrations and loads in the head of cutting-off machine with an endless band saw." *International Journal of Applied Mechanics and Engineering* 17 (2012): 707-721.
- [70] Low, K.S., W.N.N Win, and J.E. Meng (2005). Wireless Sensor Networks for Industrial Environments. In: International Conference on Computational Modelling, Control and Automation, 2005 and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies, and Internet Commerce, 2, 271-276.
- [71] Mareca Hatler "ON World's 2012 survey shows continued growth and new opportunities for wireless sensors" InTech, WebExclusive, Industrial Wireless Sensor Networks Trends and developments, September, 2012
- [72] Richard Tynan, G.M.P. O'Hare, David Marsh, and Donal O'Kane, "Multi Agent System Architecture for Wireless Sensor Networks", Workshop on "Intelligent Agents in Computing Systems" - The Agent Days in Atlanta, 2005.
- [73] Richard Tynan, G.M.P. O'Hare, David Marsh, and Donal O'Kane, "Intelligent agents for wireless sensor networks", Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, pp. 1179–1180, 2005.
- [74] Meritxell Vinyals; Juan A. Rodríguez-Aguilar; Jesús Cerquides, "A Survey on sensor Networks from a Multiagent Perspective", Artificial Intelligence Research Institute, Spanish National Research Council, The Computer Journal (In Press).
- [75] Reza Abrishambaf, Member, IACSIT, Mert Bal, and Majid Hashemipour "Distributed Control Architecture for Wireless Sensor Networks Using IEC 61499 Function Blocks for Industrial Automation" *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 3, No. 5, October 2011
- [76] Gajic, G., Stankovski, S., Ostojic, G., Tesic, Z., & Miladinovic, L. (2012). Method of evaluating the impact of ERP implementation critical success factors—a case study in oil and gas industries. *Enterprise Information Systems*, (ahead-of-print), 1-23.
- [77] Popkonstantinović, B., Miladinović, L., Obadović, M., Ostojić, G., & Stankovski, S. (2013). Mathematical Principles and Optimal Design Solutions to Compensation for the Pendulum Temperature Dilatation. *Acta Polytechnica Hungarica*, 10(8).
- [78] Popkonstantinovic, B., Miladinovic, L., Stoimenov, M., Petrovic, D., Petrovic, N., Ostojic, G., & Stankovski, S. (2011). Practical method for thermal compensation of long-period compound pendulum. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, 49(10), 657-664.
- [79] Ostojic, G., Stankovski, S., Ratkovic, Z., Miladinovic, L., & Maksimovic, R. (2013). Development of hydro potential in Republic Srpska. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 196-203.
- [80] Škrinjar, D., Baranovski, I., Dragičević, D., Stankovski, S., Ostojić, G., & Miladinović, L. (2012). DEVELOPMENT OF A DIDACTIC SET OF PNEUMATICS AND SERVO PNEUMATICS IN ENGINEERING EDUCATION. *Transactions of FAMENA*, 36(3), 69-78.

- [81] Fürstner, I., Anišić, Z., & Ćosić, I. (2008). Overview of Current Research Results of Mass Customization. *Advances in Production Engineering & Management*, 4(1), 47-58.
- [82] Zelenović, D., Ćosić, I., Maksimović, R., & Maksimović, A. (2003). Priručnik za projektovanje proizvodnih sistema: pojedinačni prilaz. Fakultet tehničkih nauka.
- [83] Tešić, Z., Mitrović, V., Ćosić, I., & Lalić, D. (2010). Integration of Information for Manufacturing Shop Control. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 56(3), 217-223.
- [84] Lazarević, M., Ostojić, G., Ćosić, I., Stankovski, S., Vukelić, Đ., & Zečević, I. (2011). Product lifecycle management (PLM) methodology for product tracking based on radio-frequency identification (RFID) technology. *Scientific Research and Essays*, 6(22), 4776-4787.
- [85] Suzić, N., Stevanov, B., Ćosić, I., Anišić, Z., & Sremčev, N. (2012). Customizing Products through Application of Group Technology: A Case Study of Furniture Manufacturing. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 58(12), 724-731.
- [86] Stankovski, S., Georgijević, M., & Šešlija, D. RFID Technology as an Identification System in Automation and Logistics. *Zbornik radova*, 248-253.
- [87] Huang, George Q., Y. F. Zhang, X. Chen, and Stephen T. Newman. "RFID-enabled real-time wireless manufacturing for adaptive assembly planning and control." *Journal of Intelligent Manufacturing* 19, no. 6 (2008): 701-713.
- [88] Stankovski, S., Ostojić, G., & Lazarević, M. (2010). RFID technology in product lifecycle management. *Engineering the Future, InTech*, 281-296.
- [89] Vukelic, D., Ostojic, G., Stankovski, S., Lazarevic, M., Tadic, B., Hodolic, J., & Simeunovic, N. (2011). Machining fixture assembly/disassembly in RFID environment. *Assembly Automation*, 31(1), 62-68.
- [90] Cheng, Meng, et al. "Cloud service-oriented dashboard for work cell management in RFID-enabled ubiquitous manufacturing." *Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2013 10th IEEE International Conference on*. IEEE, 2013.
- [91] Qu, Ting, Liang Zhang, Zihuan Huang, Qingyun Dai, Xindu Chen, G. Q. Huang, and Hao Luo. "RFID-enabled smart assembly workshop management system." In *Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2013 10th IEEE International Conference on*, pp. 895-900. IEEE, 2013.
- [92] Huang, G. Q., P. K. Wright, and Stephen T. Newman. "Wireless manufacturing: a literature review, recent developments, and case studies." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 22, no. 7 (2009): 579-594.
- [93] Huang, George Q., Y. F. Zhang, and P. Y. Jiang. "RFID-based wireless manufacturing for real-time management of job shop WIP inventories." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 36, no. 7-8 (2008): 752-764.
- [94] Tsai, Yung-Shun, Ruey-Shun Chen, Yeh-Cheng Chen, and Chun-Ping Yeh. "An RFID-based manufacture process control and supply chain management in the semiconductor industry." *International Journal of Information Technology and Management* 12, no. 1 (2013): 85-105.
- [95] Gungor, V. Cagri, and Gerhard P. Hancke, eds. *Industrial Wireless Sensor Networks: Applications, Protocols, and Standards*. CRC Press, 2013.
- [96] Gidlund, Mikael, Tomas Lennvall, and Jonas Neander. "Energy Efficient Method For Communication In A Wireless Sensor Network Of An Industrial Control System." U.S. Patent 20,130,064,229, issued March 14, 2013.

- [97] Erdelj Milan, Nathalie Mitton, and Enrico Natalizio. "Applications of Industrial Wireless Sensor Networks." *Industrial Wireless Sensor Networks: Applications, Protocols, and Standards* (2013).
- [98] Simon János, Goran Martinović, "Navigation of Mobile Robots Using WSN's RSSI Parameter and Potential Field Method", *Acta Polytechnica Hungarica, Journal of Applied Sciences* Vol.10, No.4, 2013
- [99] Gogolak Laslo, Pletl Szilveszter, Kukolj Dragan „Neural Network-based Indoor Localization in WSN Environments” *ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA* 2013 10 (6):221-235
- [100] Drawil, Nabil M., Haitham M. Amar, and Otman A. Basir. "GPS localization accuracy classification: a context-based approach." *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 14.1 (2013): 262-273.
- [101] Sanli, D. Ugur, and Fatih Kurumahmut. "Accuracy of GPS positioning in the presence of large height differences." *Survey Review* 43.320 (2011): 162-176.
- [102] Chen, Yu-Hsuan, et al. "Design and implementation of real-time software radio for anti-interference GPS/WAAS sensors." *Sensors* 12.10 (2012): 13417-13440.
- [103] Abo-Zahhad, M., Sabah M. Ahmed, and M. Mourad. "Hybrid Uplink-Time Difference of Arrival and Assisted-GPS Positioning Technique." *International Journal of Communications, Network & System Sciences* 5.6 (2012).
- [104] Kaplan, Robert S. *Measuring manufacturing performance: a new challenge for managerial accounting research*. Springer US, 1992.
- [105] Stouffer, Keith, Joe Falco, and Karen Scarfone. "Guide to industrial control systems (ICS) security." *NIST Special Publication* (2011): 800-82.
- [106] McFarlane, Duncan, et al. "Product intelligence in industrial control: Theory and practice." *Annual Reviews in Control* 37.1 (2013): 69-88.
- [107] Boothroyd, Geoffrey, Peter Dewhurst, and Winston A. Knight. *Product design for manufacture and assembly*. CRC Press, 2010.
- [108] Gogolak L., Pletl S, Kukolj D.(2011). Indoor fingerprint localization in WSN environment based on neural network, Proceedings of the 9th International Symposium of Intelligent Systems and Informatics, Subotica, Serbia, 293-296.
- [109] Pletl S., Gál P., Kukolj D., Gogolak L. (2010). An Optimizing coverage in mobile wireless sensor networks, Proceedings of the 8th International Symposium of Intelligent Systems and Informatics, Subotica, Serbia, 371-376