

UDŽBENIK ELEKTROTEHNIČKOG FAKULTETA U BEOGRADU

Mirjana Simić-Peović

**Principi pozicioniranja u ćelijskim radio
sistemima**

Beograd, 2016.

dr Mirjana Simić-Pejović, docent
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet
e-mail: mira@etf.rs

PRINCIPI POZICIONIRANJA U ĆELIJSKIM RADIO SISTEMIMA

elektronski udžbenik

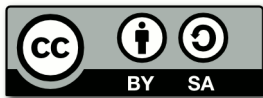
Recenzenti:

dr Miljko Erić, docent
dr Milan Bjelica, vanredni profesor

Nastavno-naučno veće Elektrotehničkog fakulteta odobrilo je objavljivanje ovog udžbenika odlukom broj 1312/3 od 06.09.2016. godine.

Izdavač: Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu
Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija

ISBN: 978-86-7225-061-9



This work is licensed under a
Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

Sadržaj

Spisak skraćenica	5
1. Uvod	9
1.1. Izazovi u pozicioniranju	9
1.2. Servisi lociranja korisnika u ćelijskim radio sistemima	11
1.2.1. LBS namenjeni krajnjem korisniku	11
1.2.2. LBS namenjeni operatoru	15
1.2.3. LBS budućih generacija radio sistema	17
2. Evolucija servisa pozicioniranja	19
2.1. Faze razvoja servisa pozicioniranja	19
2.1.1. E-911	19
2.1.2. E-112	21
2.2. Parametri procene lokacije korisnika u radio mrežama	21
2.2.1. Tačnost	22
2.2.2. Dostupnost i konzistencija	22
2.2.3. Priraštaj opterećenja	23
2.2.4. Energetska efikasnost	23
2.2.5. Kašnjenje	23
2.2.6. Cena implementacije	24
3. Parametri pozicioniranja	25
3.1. Snaga signala na prijemu, Rxlev	26
3.2. Vreme prispeća signala, TOA (<i>Time Of Arrival</i>)	28
3.3. Vremenska razlika prispeća signala - TDOA (<i>Time Difference Of Arrival</i>)	31
3.4. Ugao prispeća signala AOA (<i>Angle Of Arrival</i>)	33
4. Klasifikacija metoda pozicioniranja	35
4.1. Klasifikacija metoda pozicioniranja prema tipu korišćene infrastrukture	35
4.1.1. Integrisane i samostalne infastrukture pozicioniranja	35
4.1.2. <i>Network-based</i> i <i>mobile-based</i> pozicioniranje	36
4.1.3. Satelitsko, ćelijsko i <i>indoor</i> pozicioniranje	36
4.2. Klasifikacija metoda pozicioniranja prema algoritmu određivanja lokacije	37
4.2.1. Identifikaciju najbližeg predajnika poznatih koordinata (Proximity Sensing)	37
4.2.2. Lateracija	38
4.2.3. Angulacija	40
4.2.4. <i>Fingerprinting</i>	41
4.2.5. Hibridna rešenja	45
4.3. Klasifikacija metoda pozicioniranja prema matematičkom pristupu određivanju lokacije	45
4.3.1. Determinističke metode	46
4.3.2. Probabilističke metode	46
5. Determinističke metode pozicioniranja	47

5.1. Angulacija	47
5.2. Lateracije.....	50
5.2.1. Cirkularna lateracija.....	50
5.2.2. Hiperbolička lateracija	53
6. Probabilistički pristup pozicioniranju.....	62
6.1. Deterministički vs. probabilistički pristup određivanju lokacije mobilne stanice	62
6.2. Probabilistički pristup u određivanju lokacije mobilne stanice	64
6.2.1. Funkcije gustine verovatnoće	64
6.2.2. Granice u okviru kojih se procenjuje lokacija mobilne stanice	66
6.2.3. Diskretizacija prostora	68
6.2.4. Implementacija metoda u slučaju funkcije gustine verovatnoće ekskluzivnog tipa	70
6.2.5. Primena probabilističkog pristupa	72
6.3. Probabilističke metode pozicioniranja.....	74
6.3.1. Metoda kvadrata.....	75
6.3.2. Metoda prstenova.....	78
6.3.3. Problemi usled prostiranja u NLOS uslovima	82
6.3.4. Metoda krugova	84
6.3.5. Poređenje probabilističkih metoda pozicioniranja.....	86
7. LCS standardizacija.....	91
7.1. GERAN LCS	91
7.1.1. GERAN LCS standardizacija metoda pozicioniranja.....	91
7.1.2. GERAN LCS arhitektura	92
7.2. UTRAN LCS	93
7.2.1. UTRAN LCS standardizacija metoda pozicioniranja.....	93
7.2.2. UTRAN LCS arhitektura	93
7.3. LCS GSM i UMTS arhitektura <i>core</i> mreže	94
7.4. E-UTRAN LCS.....	96
7.4.1. E-UTRAN LCS standardizacija metoda pozicioniranja	96
7.4.2. E-UTRAN LCS arhitektura	96
8. Standardizovane metode pozicioniranja u GSM, UMTS i LTE	98
8.1. Cell-ID	98
8.1.1. Modifikacije Cell-ID metode pozicioniranja u GSM	99
8.1.2. Modifikacije Cell-ID metode pozicioniranja u UMTS.....	101
8.1.3. Modifikacije Cell-ID metode pozicioniranja u LTE.....	103
8.2. E-OTD.....	105
8.2.1. Hiperbolička E-OTD.....	105
8.2.2. Cirkularna E-OTD	107
8.3. OTDOA.....	109
8.3.1. OTDOA u UMTS	109
8.3.2. OTDOA u LTE	117
8.4. U-TDOA	119
8.4.1. U-TDOA u GSM.....	119
8.4.2. U-TDOA u UMTS	121
8.4.3. U-TDOA u LTE.....	123
8.5. A-GNSS (A-GPS).....	123
Literatura.....	126

Spisak skraćenica

2D	2 Dimensional
3D	3 Dimensional
2G	2nd Generation of mobile networks
3G	3rd Generation of mobile networks
4G	4th Generation of mobile networks
3GPP	The Third Generation Partnership Project
A-GNSS	Assisted Global Navigation Satellite System
A-GPS	Assisted Global Positioning System
ALI	Automatic Location Identification
AOA	Angle of Arrival
AP	Access Point
ATD	Absolute Time Difference
BCCH	Broadcast Control Channel
BS	Base Station
BSC	Base Station Controller
BTS	Base Transceiver Station
C-plane	Control-plane
CBC	Cell Broadcast Center
CDMA	Code Division Multiple Access
CGALIES	Coordination Group on Access to Location Information by Emergency Services
CGI	Cell Global Identity
CEC	Commission of European Communities
Cell-ID	Cell Identification
CI	Cell Identifier
CN	Core Network
COO	Cell Of Origin
CPICH	Common Pilot Channel
CVB	Cumulative Virtual Banking
DCH	Dedicated Channel
DGPS	Differential GPS
DL	Downlink
DPCCH	Dedicated Physical Control Channel
DPCH	Dedicated Physical Channel
DPDCH	Dedicated Physical Data Channel

E-SMLC	Evolved-SMLC
EC	European Commission
ECR	Enhanced Call Routing
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
E-OTD	Enhanced Observed Time Difference
EIRP	Effective Isotropically Radiated Power
E-UTRAN	Evolved - UMTS Terrestrial Radio Access Network
FCC	Federal Communication Commission
FDD	Frequency Division Duplex
FSHO	Forced Soft Handover
GERAN	GSM/EDGE Radio Access Network
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GMLC	Gateway Mobile Location Center
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GTD	Geometric Time Difference
HLR	Home Location Register
IC	Interference Cancellation
IP	Internet Protocol
IPDL	Idle Period Downlink
ISM	Industrial, Scientific and Medical
KNN	K Nearest Neighbours
KWNN	K Weighted Nearest Neighbours
LB	Location Based
LBS	Location Based Services
LCS	Location Services
LMU	Location Measurement Unit
LOCUS	Location of Cellular Users for Emergency Services project
LOS	Line of Sight
LPP	LTE Positioning Protocol
LTE	Long Term Evolution
MME	Mobility Management Entity
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Switching Center
MT	Mobile Terminal
NLOS	Non Line of Sight
NN	Nearest Neighbour
NNSS	Nearest Neighbour in Signal Space

OTD	Observed Time Difference
OTDOA	Observed Time Difference of Arrival
OTDOA-IPDL	Observed Time Difference Of Arrival-Idle Period Downlink
P-GW	Packet GateWay
PE-IPDL	Positioning Elements Idle Period Downlink
PCPCH	Physical Common Packet Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
PRS	Positioning Reference Signals
PS	Packet Scheduling
PSAP	Public Safety Answering Point
QoS	Quality Of Service
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
RB	Resource Block
RFID	Radio Frequency IDentification
RNC	Radio Network Controller
RNP	Radio Network Planning
ROI	Return Of Investments
RP	Reference Point
RRM	Radio Resource Management
RSs	Reference Signals
RSCP	Received Signal Code Power
RSS	Received Signal Strength
RSTD	Reference Signal Time Difference
RTD	Real Time Difference
RTT	Round Trip Time
Rxlev	Received signal level
S-GW	Serving GateWay
SACCH	Slow Associated Control Channel
SAS	Standalone Serving Mobile Location Center
SC	Scrambling Code
SDCCH	Stand-alone Dedicated Control Channel
SGSN	Serving GPRS Support Node
SfHO	Softer Handover
SFN	System Frame Number
SHO	Soft Handover
SLP	SUPL Location Platform
SMLC	Serving Mobile Location Center
SRNC	Serving Radio Network Controller
SRS	Sounding Reference Signal
SSD	Signal Space Distance
SUPL	Secure User Plane Location
TA	Timing Advance

TA-IPDL	Time Aligned Idle Period Downlink
TCH	Traffic Channel
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TDOA	Time Difference of Arrival
TOA	Time of Arrival
TTF	Time To First Fix
U-plane	User Plane
UE	User Equipment
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
U-TDOA	Uplink Time Difference of Arrival
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
UWB	Ultra-Wideband
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WLAN	Wireless Local Area Network

1. Uvod

Radio mreže omogućavaju korisnicima jednu vrlo osobenu beneficiju koju ostale mreže ne mogu, a to je da budu mobilni. Sa funkcijom mobilnosti, ključni atribut postaje lokacija, pa određivanje lokacije korisnika u radio mrežama postaje glavno oruđe koje mobilnim korisnicima omogućava pravi servis, u pravo vreme i na pravom mestu.

Ideja o lociranju korisnika u radio mrežama počinje u okviru ćelijskih radio mreža. Nastala je u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD) za potrebe 911 servisa, tj. servisa za hitne pozive. Razvojem ćelijskih radio sistema, porastao je i broj korisnika ovih sistema, pa samim tim i broj hitnih poziva koji su upućeni sa mobilnih stanica. Problem je bio pravovremeno reagovanje na ovakve pozive, obzirom na to da korisnik često nije znao svoju lokaciju. Zbog toga je američka federalna komisija za komunikacije, FCC (*Federal Communication Commission*), još 1996. godine napravila program u nekoliko faza kojim se operatori mobilne telefonije obavezuju da u predviđenom vremenskom intervalu u okviru svojih ćelijskih radio mreža obezbede automatsku identifikaciju lokacije korisnika koji sa mobilnih stanica koriste usluge servisa za hitne pozive [1]. Novi servis bezbednosti u okviru ćelijskih radio mreža nazvan je *Enhanced 911* (E-911). Osim bezbednosti, poznavanje lokacije korisnika u ćelijskim radio mrežama otvorilo je operatorima mobilne telefonije i velike komercijalne mogućnosti.

Danas, tj. dvadeset godina nakon prve ideje o lociranju korisnika u radio mrežama, situacija je takva da je najveći broj hitnih poziva upućen upravo sa mobilnih stanica, što je dokaz da se u to vreme krenulo u pravom smeru.

1.1. Izazovi u pozicioniranju

Bez obzira na aktuelnost, razvoj metoda za određivanje lokacije korisnika u radio sistemima bio je sporiji nego što se to očekivalo. U čemu je problem? Naime, pozicioniranje u radio sistemima je samo po sebi izazov jer imamo kako dinamičku prirodu korisnika (korisnik je mobilan) tako i dinamičku prirodu okruženja pa i samih radio signala. Sa druge strane, zahtevi za pozicioniranjem mobilnog korisnika stalno rastu kako usled samih korisnika tj. porasta broja aplikacija (servisa) koje se baziraju na informaciji o lokaciji, tako i regulatornih tela, pa i samih operatora.

Bez obzira od koga potiču, zahtevi se mogu sumirati u sledeće:

- tačnije i pouzdanije pozicioniranje za komercijalne i nekomercijalne servise
- smanjeno kašnjenje, odnosno, vreme od slanja zahteva za pozicioniranjem (*positioning request*) pa do dostavljanja informacije o lokaciji u odgovarajućem formatu (u formi teksta, npr. geografska širina i geografska dužina u željenom sistemu, mapa sa ucrtanim koordinatama, ...)

- pozicioniranje koje je nezavisno od vrste okruženja (podjednako dobro u ruralnom, suburbanom, urbanom, zatvorenom (*indoor*) okruženju...)
- pozicioniranje koje je prilagođeno kako različitim aplikacijama (*application-adaptive positioning*) tako i korisnicima (*user-adaptive positioning*)
- preciznije pozicioniranje za potrebe bezbednosti ljudi (servisi za hitne pozive).

Iz perspektive korisnika, prirodno je očekivati da će izabrani servis biti dostupan bez obzira gde se nalaze, kao i da li stoje ili se kreću. Takođe, korisnici očekuju isti nivo performansi servisa bilo da su u zatvorenom (*indoor*) okruženju (npr. u svojoj kući) ili otvorenom (*outdoor*) okruženju (ruralno, urbano, gusto urbano, suburbano, ...). Sa komercijalne perspektive, različite aplikacije zahtevaju različite nivoe tačnosti. Kako broj i raznovrsnost aplikacija raste a takođe i broj samih bežičnih uređaja, bilo bi dobro posebno optimizovati postupak pozicioniranja za svaki od zahteva. U tom smislu, smatra se da bi kombinacija različitih metoda pozicioniranja obezbedila najbolje rešenje.

Veliki problem u razvoju preciznog pozicioniranja u radio sistemima do sada predstavljaju dva oprečna zahteva: ostvarivanje zadovoljavajuće tačnosti određivanja lokacije sa što manje modifikacija postojeće mrežne infrastrukture i terminala. Rešenja koja obezbeđuju zadovoljavajuću tačnost u značajnoj meri povećavaju kompleksnost kako na nivou mreže tako i na nivou samih terminala. Istovremeno, popularne tehnike pozicioniranja koje se zasnivaju na identifikaciji najbliže ćelije u ćelijskim radio mrežama, jednostavne su za implementaciju ali nemaju zadovoljavajuću tačnost. Neke tehnike pozicioniranja lokaciju mobilne stanice određuju merenjem parametara signala kao što su vreme i/ili ugao, tj. baziraju se na primeni principa lateracije i/ili angulacije. Najčešće, metode koje se zasnivaju na merenju vremena prispeća signala sa više izvora poznatih koordinata i primenjuju princip lateracije pate od problema sinhronizacije, ukoliko mreža u kojoj se primenjuju nije sinhronizovana, što je često slučaj. Stoga, primena ovih metoda uslovljena je dodatnim hardverskim elementima na nivou mreže, i/ili modifikacijama postojećih mobilnih stanica. Metode koje se zasnivaju na merenju ugla prispeća signala sa više izvora poznatih koordinata i primenjuju princip angulacije, zahtevaju instalaciju antenskih nizova na nivou mreže, pa su takođe uslovljene dodatnim hardverskim elementima, odnosno, izmenama postojeće mrežne infrastrukture. Ove metode postaju popularne tek od sistema četvrte generacije (4G), gde su bazne stanice inicijalno opremljene ovakvim antenskim sistemima. Kako bi stekle funkcionalnost pozicioniranja, i mobilne stanice često zahtevaju barem softverske izmene, a nekada i hardverske i softverske što je npr. slučaj kod metoda pozicioniranja koje koriste satelitsku infrastrukturu, npr. GPS (*Global Positioning System*). Ipak, poslednjih godina ovaj problem je sve manji obzirom da sve veći broj mobilnih stanica ima implementiran GPS prijemnik.

U pokušaju postizanja zadovoljavajućih performansi servisa lociranja korisnika u radio sistemima, najveći problem predstavlja radio propagacija po višestrukim putanjama (*multipath*), propagacija u NLOS (*Non Line of Sight*) uslovima, tj. uslovima kada ne postoji direktna optička vidljivost, nedovoljan broj izvora poznatih koordinata u slučaju postupaka lateracije i/ili angulacije, nedovoljna rezolucija merenja na strani mreže i na strani terminala, kao i dugo trajanje merenja neophodnih parametara i ograničenost primene na određeni tip okruženja. Kad je reč o tipu okruženja, treba naglasiti aktuelnost razvoja metoda pozicioniranja u *indoor* uslovima, obzirom da se ispostavilo da je zadovoljavajuće tačnosti pozicioniranja najteže realizovati baš u unutrašnosti objekata. Problem je dodatno veći obzirom da

statistika pokazuje da je više od polovine ukupnih poziva za lociranjem upućeno upravo iz unutrašnosti objekata. Sama regulaciona tela, kao što je FCC, prepoznala su ovaj problem, pa su se u jednom trenutku razdvojili zahtevi za postizanje zadate tačnosti pozicioniranja u *indoor* i *outdoor* uslovima.

Najzad, tačnost najvećeg broja tehnika pozicioniranja u velikoj meri zavisi od aktuelne mrežne topologije. U skladu sa tim, aspekti planiranja i optimizacije radio mreža kao što su definisanje rasporeda ćelija, preklapanja, sektorizacije ili tiltovanja antenskih sistema imaju veliki uticaj na performanse pozicioniranja u ćelijskim radio mrežama.

Jedno od netehničkih ali bitnih pitanja u pozicioniranju osnosi se na pitanje privatnosti. Ovo je vrlo osetljivo pitanje naročito ako se ima u vidu podatak da je u periodu od samo jedne godine (preciznije, od septembra 2008. do oktobra 2009. godine), samo jedan operator u SAD imao oko 8 miliona anonimnih zahteva za pozicioniranjem druge osobe. Pitanje privatnosti u pozicioniranju korisnika u radio sistemima postalo je predmet ozbiljnih diskusija kako u SAD tako još i više u zemljama Evropske Unije. Radi zaštite privatnosti, uvedene su pretplatničke opcije privatnosti koje su sadržane u samom profilu pretplatnika. Ove opcije dozvoljavaju specifikaciju da li traženi korisnik/pretplatnik želi eksplicitno obaveštenje o svakom pokušaju pozicioniranja. Opcije su specifikirane na sledeći način [2]:

- pozicioniranje dozvoljeno bez obaveštenja ciljnog pretplatnika
- pozicioniranje dozvoljeno isključivo sa obaveštenjem ciljnog pretplatnika
- pozicioniranje dozvoljeno uz obaveštenje i verifikaciju od strane ciljnog pretplatnika, ili ako nema odgovora od strane ciljanog pretplatnika
- pozicioniranje dozvoljeno isključivo uz obaveštenje i verifikaciju od strane ciljnog pretplatnika
- pozicioniranje uopšte nije dozvoljeno.

1.2. Servisi lociranja korisnika u ćelijskim radio sistemima

Prema definiciji međunarodne organizacije za standardizaciju, 3GPP (*The Third Generation Partnership Project*), servisi koji se baziraju na poznavanju lokacije korisnika, LBS (*Location Based Services*), su servisi u okviru ćelijskih radio mreža koji koriste dostupne informacije o lokaciji korisnika (mobilne stanice, terminala). U skladu sa 3GPP [3], podservis koji je neophodan za realizaciju LBS i koji obezbeđuje podatke o lokaciji korisnika u ćelijskim radio mrežama naziva se servis lociranja, LCS (*Location Service*). LCS specificira sve neophodne elemente u mreži, njihove funkcije, interfejse i protokole kako bi u okviru ćelijskih radio mreža bilo moguće locirati mobilne korisnike.

Servisi lociranja korisnika u radio sistemima (LBS servisi) se mogu podeliti na:

- LBS namenjeni krajnjem korisniku
- LBS namenjeni operatoru
- LBS budućih generacija radio sistema.

1.2.1. LBS namenjeni krajnjem korisniku

U LBS namenjene krajnjem korisniku najčešće se svrstavaju [4]:

- Servisi bezbednosti
- Servisi praćenja (*Tracking services*)
- Saobraćajni servisi (*Traffic services*)
- Personalna navigacija
- LBS menadžment
- LBS tarifiranje (*Location sensitive billing*)
- Komercijalni servisi
- Informacioni servisi
- Servisi zabave i grupni servisi
- LBS dodatni servisi (*Supplementary services*).

1.2.1.1. Servisi bezbednosti

Kao što je već pomenuto, servisi bezbednosti bili su pokretačka snaga (*driving force*) za razvoj servisa pozicioniranja u radio sistemima. Generalno, tipične situacije za primenu ovih servisa su: korisnik nije u stanju da kaže gde se nalazi (npr. saobraćajna nezgoda), korisnik nije u prilici da otkrije svoju lokaciju (npr. teroristički napad) ili korisnik nije u mogućnosti da dovoljno precizno objasni gde se nalazi (npr. kvar na automobilu negde na putu). Zajedničko za sve ove situacije je da se korisniku ne može pružiti neohodna i odgovarajuća pomoć i da signal njegovog mobilnog terminala može biti od ključne važnosti za lociranje u kritičnim situacijama.

U servise bezbednosti spadaju, osim hitnih poziva (911 i 112), i:

- servisi pomoći na putu (*automotive assistance*): ovaj servis omogućava automatsko slanje pomoći direktno na lokaciju na kojoj postoji problem, zatim *on-the-road* servis koji šalje informacije o najbližoj benzinskoj pumpi ili servisnom centru i kako stići do njih, kao i ECR (*Enhanced Call Routing*) tj. automatsko usmeravanje poziva za pomoć na putu u najbliži servisni centar;
- hitni alarmi: servisi koji omogućavaju dostavljanje informacijama o iznenadnim događajima: nepredviđene vremenske neprilike, uslovi na putu, ...
- lični medicinski alarmi: servis namenjen starijim građanima i ljudima sa posebnim medicinskim potrebama. Omogućava alarmiranje centra za hitnu pomoć, čak i onda da pozivalac nije u stanju da govori - jednostavnim pritiskom na određeni taster, poziv se upućuje i pomoć u najbržem roku dolazi na lokaciju sa koje je poziv upućen;
- servisi bezbednosti u porodici (*family monitoring*): servis omogućava kako lociranje nekog člana porodice (najčešće deteta), tako i alarmiranje u slučaju da osoba napusti neku prethodno utvrđenu zonu (npr. izlazak iz zone pokrivanja bazne stanice koja je servisna za kućnu (*home*) zonu).

1.2.1.2. Servisi praćenja (*Tracking services*)

Servisi praćenja omogućavaju nadgledanje i praćenje lokacije i statusa određenih mobilnih entiteta (ljudi, vozila, pošiljki, državnih delegacija, ...). Obezbeđuju:

- trenutni uvid u lokaciju
- napredovanje u okviru definisane rute

- izmene rute u toku transporta
- predikcija budućih lokacija.

Često su u sprezi sa servisima bezbednosti gde se npr. praćenje vozila može primeniti za to da se na hitni poziv upute ambulanta kola koja su najbliža lokaciji sa koje je poziv upućen.

1.2.1.3. Saobraćajni servisi (*Traffic services*)

Saobraćajni servisi su servisi za nadgledanje i praćenje saobraćaja, uključujući i dinamičko upravljanje vozilima. Cilj je da vozačima obezbede raznovrstan skup informacija:

- navigacija
- dijagnostika kvarova
- automatsko konfigurisanje uređaja u vozilima
- emitovanje LBS informacija i poruka upozorenja (zagušenje saobraćaja, radovi na putu, ...).

Kada je u pitanju dinamičko upravljanje vozilima, posredstvom ćelijske mreže, vozačima se dostavljaju informacije o trenutnom stanju na putevima (zagušenja u saobraćaju, radovi na putu, saobraćajne nezgode, ...). U zavisnosti od stanja na putevima, ovaj servis predlaže alternativne rute do traženog odredišta.

Jedna od aktuelnih tema u oblasti saobraćajnih servisa je i tzv. *wireless intervehicle communications* – bežična komunikacija između vozila. Odnosi se na primenu kratkodometnih (*short-range*) radio tehnologija, npr. *bluetooth*, za uspostavljanje ad-hoc komunikacije između dva vozila bez potrebe za centralizovanom kontrolom. Omogućava razmenu korisnih informacija kao što su karakteristike lokalnog saobraćaja u tom trenutku, položaji benzinskih stanica u toj oblasti... Sadržaj poruka koje se razmenjuju dolaze sa različitih senzora u samom vozilu – to su tzv. *floating car data* (lokacija vozila, pravac i brzina kretanja, ...). Za dobijanje informacija višeg nivoa (npr. karakteristike saobraćaja), podaci sa senzora se obrađuju i kombinuju sa podacima iz drugih vozila a zatim prosleđuju. Bežična komunikacija između vozila je vrlo kompleksna oblast jer postavlja vrlo stroge zahteve po pitanju pouzdanosti sistema, bezbednosnih (*security*) mehanizama, protokola rutiranja i tehnologije pozicioniranja.

1.2.1.4. Servisi personalne navigacije

Servisi personalne navigacije se odnose na lociranje i navigaciju osoba kako u *outdoor* (pomoć oko snalaženja u prostoru, npr. u gradu) tako i u *indoor* okruženju (pomoć oko snalaženja u unutrašnjosti objekata, npr. u trgovinskim (*shopping*) molovima, velikim poslovnim centrima, fabričkim postrojenjima, ...). Iako je i navigacija vozila na neki način i lična navigacija, one se razlikuju po vrsti algoritama koje se primenjuju za pozicioniranje kao i vizuelizaciji podataka:

- za razliku od navigacije vozila, personalna navigacija se prvenstveno odnosi na statičnog ili sporopokretnog korisnika

- baze podataka koje se koriste za navigaciju vozila obezbeđuje drumska uprava (*road authority*), dok baze za personalnu navigaciju obezbeđuje mobilni operator.

1.2.1.5. LBS menadžment

U kategoriju servisa LBS menadžmenta spadaju servisi gde se primena LBS informacija koristi za razne vrste upravljanja i optimizacije procesa proizvodnje u cilju povećanja efikasnosti, smanjenja rizika, itd. Tipičan primer je upravljanje kompleksnim projektima (složen industrijski postupak ili fabrička proizvodnja) gde informacija o lokaciji radne snage omogućava lakše upravljanje i organizaciju čitavog procesa. Uobičajan način rasporeda po aktivnostima u ovakvoj vrsti projekata je subjektivna procena trajanja određenih aktivnosti. Podatak o lokaciji kao dodatnoj dimenziji omogućava bolju i efikasniju organizaciju jer se čitav proces može vremenski sažeti bez povećanja rizika od lošeg balansa rasporeda radne snage i procenjenog trajanja određenih aktivnosti.

1.2.1.6. LBS tarifiranje (*Location sensitive billing*)

LBS tarifiranje predstavlja naplatu raznih vrsta usluga u zavisnosti od lokacije na kojoj se korisnik (pretplatnik) nalazi. Primenjuje se u 2 opcije:

- za individualne pretplatnike
- za grupne pretplatnike.

Za individualni pretplatnike uvode se npr. manje tarife u zonama sa kojih se najčešće obavljaju razgovori (npr. kućna tarifa – razgovori se manje naplaćuju ako se obavljaju u tzv. *home zoni*). Često je to i šira zona, koja obuhvata trasu od kuće do posla. Za grupne pretplatnike LBS tarifiranje se najčešće odnosi na selekciju nižih tarifa po biznis zonama u smislu prostornih zona: korporacije, radne zone, ... Zajedničko i za individualne i za grupne pretplatnike je da tarifa zavisi od toga gde se korisnik nalazi kao i da postoji obaveštenje od strane mreže pri prelasku iz jedne tarifne zone u drugu. U okviru ovih servisa može se pomenuti i varijanta da pretplatnik reguliše vrstu poziva u zavisnosti od lokacije:

- određeni pozivi se prosleđuju samo ako je korisnik u *home zoni*, ali ne i na poslu
- ako je van definisanih zona (kućne ili poslovne), prosleđuju mu se samo hitni pozivi (primer kada je korisnik na odmoru).

1.2.1.7. Komercijalni servisi

U grupu komercijalnih servisa spadaju *broadcast* servisi komercijalnog tipa. Realizuju se kao automatsko dostavljanje najčešće reklamnih informacija ka mobilnim terminalima od strane mreže u određenoj oblasti. Kako ne bi došlo do toga da budu preplavljeni mnoštvom reklama, korisnici formiraju svoj profil u kojem se nalaze informacije o njihovim interesovanjima, na osnovu čega se selektuju informacije koje će im biti prosleđene. Primer ovakvih servisa su informacije o sportskim dešavanjima, kao npr. informacija da još uvek ima karata za neki sportski događaj u trenutku prolaska pored mesta gde se one prodaju ili *shopping* informacija o

snižanim cenama nekih proizvoda u blizini prodajnih mesta. Dostavljanje komercijalnih informacija može biti u tekstualnoj formi (naziv i adresa firme/radnje, šta je na popustu i koliko, ...) ili u grafičkom obliku (mapa sa oznakom na lokaciju objekta koji se reklamira kao i na lokaciju na kojoj se korisnik kome se dostavljaju informacije trenutno nalazi). Opcija kod servisa ovog tipa je mogućnost povremenog ili trajnog zatvaranja pretplate na ovu vrstu servisa.

1.2.1.8. Informacioni servisi

Informacioni servisi pripadaju najširoj grupi LBS servisa. Kao i komercijalni, i ovi su *broadcast* tipa i obuhvataju dostavljanje raznih vrsta informacija korisniku u okviru neke zone, bilo da u istoj boravi, ili da se prvi put u njoj nađe. Tipične informacije: najbliži restorani, bioskopi, *shopping* centri, hoteli, muzeji, apoteke, bolnice, ... U ovu grupu servisa spadaju i informacije o vremenskoj prognozi kao i informacije tipa "Žute strane" (*Yellow Pages*). U grupu LBS informacionih servisa spadaju i servisi namenjeni turistima gde se mobilni terminali mogu koristiti kao virtuelni turistički vodiči kako u turama kroz grad (*outdoor* uslovi) tako i u unutrašnjosti objekata (*indoor* uslovi). Poznati servisi ovog tipa su i servisi traženja prijatelja (*find friend*) kao i servisi koji aktiviraju alarme u situacijama kada se u nekoj prethodno definisanoj zoni nađe određena osoba. Treba naglasiti da je za ove servise posebno osetljivo pitanje privatnosti, koje se najčešće rešava tako da su ove informacije dostupne samo članovima koji pripadaju istoj društvenoj (*friend*) grupi.

1.2.1.9. LBS dodatni servisi (*Supplementary services*)

LBS dodatni servisi (*value-added services*) obuhvataju servise koji nisu u nekoj od navedenih grupa a namena im je najčešće unapređenje nekih baznih servisa. U praksi, najpoznatiji dodatni servisi su selektivno rutiranje (koji omogućava da se dolazeći poziv upućen nekom mobilnom terminalu rerutira na najbliži fiksni telefon), kao i servisi obaveštenja vezani za opcije u mreži (aktiviranje alarma u slučaju kada korisnik izlazi iz zone pokrivenosti signalom te mreže, aktiviranje alarma u slučaju kada korisnik izlazi iz zone velikog bitskog protoka, ...).

1.2.2. LBS namenjeni operatoru

Informacija o lokaciji mobilnog korisnika može biti od koristi kako njemu samom tako i samom operatoru u postupku planiranja i optimizacije ćelijske mreže. Dodatna informacija, informacija o lokaciji, omogućava [4]:

- optimizaciju raznih funkcija u postojećim ćelijskim mrežama
- utiče na aspekt planiranja mreže koja bi podržavala i LBS servise
- pomaže operatorima da unapred donose odluke i time spreče potencijalno loše performanse mreže.

1.2.2.1. Planiranje radio mreže

Planiranje radio mreže, RNP (*Radio Network Planning*) je proces koji ima za cilj:

- pokrivanje što šire teritorije radio signalom (servisom)

- zadovoljavanje zahteva po pitanju kvaliteta servisa, QoS (*Quality Of Service*): što manji broj neuspešnih veza, dobro *indoor* pokrivanje radio signalom, ...

RNP se sastoji od faze dimenzionisanja, detaljnog planiranja i optimizacije. U prvoj fazi dimenzionisanja definiše se inicijalni oblik mreže (broj, raspored i konfiguracija baznih stanica) nakon čega sledi faza detaljnog planiranja koja obuhvata naprednije planiranje pokrivenosti, kapaciteta kao i frekvencijsko planiranje. Poslednja faza je faza optimizacije koja traje koliko i sama mreža i u kojoj bi informacije o lokacije imale najveći značaj. Optimizacija uz pomoć dodatnih informacija, informacija o lokaciji, zove se lokaciono zasnovana, LB (*Location Based*), optimizacija mreže. LB optimizacija omogućava dinamičko podešavanje parametara inicijalno postavljenih u prve dve faze planiranja radio mreže i obuhvata:

- identifikaciju mogućih problema u mreži (npr. oblasti loše pokrivenosti)
- podešavanje i testiranje propagacionih modela sa podacima u realnom vremenu
- kreiranje alternativnih planova u slučaju da dođe do zagušenja u mreži ili kada se očekuje da će doći do zagušenja.

Takođe, informacija o lokaciji može biti dodatna pomoć operatoru u demografskoj analizi i analizi tržišta za potrebe daljeg širenja mreže u smislu 'koja vrsta servisa i gde'.

1.2.2.2. Upravljanje radio resursima

Cilj postupka upravljanja radio resursima, RRM (*Radio Resource Management*), jeste efikasno korišćenje dostupnih radio resursa. Krajnji cilj je obezbediti što veći protok krajnim korisnicima, zadovoljavajućeg kvaliteta servisa, uz uslov umerenih zahteva po pitanju odnosa signal/(šum i interferencija), $C/(N+I)$, na prijemu.

Informacija o lokaciji korisnika može optimizovati nekoliko tehnika u okviru RRM. Jedna od njih je formiranje dijagrama usmerenosti (*beamforming*), kao tehnika obrade signala u cilju kontrole usmerenosti dijagrama zračenja antenskih nizova. Informacija o lokaciji bi se mogla koristiti u slučaju adaptivnog *beamforminga*, kada bi rezultati merenja identifikovali zone sa iznenadnim zahtevom za većim kapacitetom i omogućili tzv. adaptivno pokrivanje.

Kontrola snage kao mehanizama koji se primenjuje u cilju postizanja zadovoljavajućeg kvaliteta signala i servisa, a da pritom svi elementi mreže emituju sa najmanjom mogućom snagom, takođe bi bilo moguće unaprediti poznavanjem informacije o lokaciji korisnika. Naime, algoritmi kontrole snage obično se oslanjaju na rezultate merenja nivoa signala (*measurement report*) bilo na ulazu u baznu stanicu ili mobilnu stanicu. Ukoliko bi se identifikovalo da se mobilni korisnik nalazi u zoni sa lošim (*bad*) odnosom $C/(N+I)$, bazna stanica bi i dalje mogla održavati visok nivo snage mobilne stanice, iako bi *measurement report* ukazivao drugačije. Na taj način bi se izbegli pikovi (*spikes*) u nivou snage.

Packet Scheduling (PS) je RRM funkcija čiji je cilj korišćenje raspoloživih fizičkih resursa (vreme, frekvencija, *code*, ...) na način koji bi omogućio maksimizaciju ukupnog kapaciteta u mreži, uz zadovoljavajući QoS. Algoritmi PS za dodelu dostupnih resursa kao kriterijum koriste trenutne uslove u kanalu, pa korisnik sa najboljim uslovima u kanalu dobija najviše resursa. Jedna od posledica je da će

korisnici bliži baznoj stanici češće dobijati resurse nego oni na ivici ćelije. Takođe, potencijalni problem su i mobilni korisnici čiji se uslovi u kanalu brzo menjaju. Informacija o lokaciji mobilnog korisnika mogla bi unaprediti prethodni mehanizam ako bi se osim uslova u kanalu mreži dostavljale i informacije o lokaciji korisnika kao i informacije o više uzastopnih lokacija na osnovu čega bi se mogla izvršiti i predikcija njegovog kretanja. Uz informaciju o topologiji terena, ti podaci bi se mogli iskoristiti za predikciju budućih uslova u kanalu, što bi rezultiralo naprednijom varijantom PS mehanizma.

Handover kao mehanizam koji omogućava mobilnost u okviru ćelijskih radio mreža takođe bi mogao biti unapređen ukoliko je informacija o lokaciji mobilne stanice poznata. Ako bi se standardni kriterijumi za odluku o *handover*-u (*measurement report*, lista suseda, trenutni saobraćaj u mreži, kapacitet mreže, ...) kombinovali sa lokacijom mobilnog korisnika, mogli bi se izbeći problemi u kvalitetu signala kao pa čak i eventualna pucanje veze u situacijama kada se mobilni korisnik nalazi u ivičnoj zoni više ćelija (*borderline*) što može izazvati prečesto trigerovanje postupka *handover*-a.

Postupak selekcije ćelije (*cell selection*), kao i kontrola prijema (*admission control*) i kontrola opterećenja (*load control*) su postupci koji slede *handover*-u a koji se takođe mogu unaprediti informacijom o lokaciji mobilnog korisnika. Selekcija ćelije je postupak kojim se mobilna stanica odlučuje za izbor jedne ćelije koja će joj biti servisna od svih kandidata sa liste suseda (*neighbour list*). Za razliku od standardne procedure gde se odluka o selekciji ćelije donosi na osnovu merenja nivoa signala, poznata informacija o lokaciji mobilnog korisnika doprinela bi da se izbegnu situacije u kojima bi korisnik eventualno imao loš kvalitet servisa. Ako se korisnik kreće ka zoni koju pokrivaju dve bazne stanice i imaju vrlo slične indikatore o uslovima u kanalu, procena pravca i brzine kretanja mobilne stanice može ukazati na ćeliju sa lošijim kvalitetom signala kao boljim izborom za servisnu ćeliju tokom određenog vremenskog perioda. Kontrola prijema i kontrola opterećenja su mehanizmi koji se koriste kako ne bi došlo do preopterećenja mreže, što bi dalje izazvalo pad kvaliteta servisa, "pucanje" veze, ... Ako bi se u algoritme kontrole prijema i kontrole opterećenja kao dodatni parametar koristila i informacija o lokaciji mobilnog korisnika, mogle bi se izvršiti predikcije eventualnih zagušenja u mreži. Tipičan primer ovakvog scenarija je korisnik koji se kreće ka prepunom sportskom stadionu gde se procenom pravca i brzine njegovog kretanja alarmiraju mehanizmi kontrole prijema i opterećenja što bi rezultiralo usmeravanjem na baznu stanicu koja je manje opterećenja. Na taj način, informacija o lokaciji mobilnog korisnika postala bi deo mehanizma balansiranja opterećenja (*load-balancing*) u radio mrežama.

1.2.3. LBS budućih generacija radio sistema

Kada su u pitanju LCS, dosadašnje generacije ćelijskih radio sistema kao što su GSM (*Global System for Mobile Communications*), UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) i LTE (*Long Term Evolution*) prvenstveno se razlikuju po rezoluciji merenja određenih radio parametara neophodnih za pozicioniranje (npr. vremena) što je posledica primenjene radio tehnologije. Sa druge strane, same metode pozicioniranja, dakle metode obrade merenih parametara i algoritmi proračuna lokacije, su uglavnom isti u svim pomenutim sistemima. Neke od ovih metoda se međusobno razlikuju u smislu prilagođavanja zarad rešavanja konkretnih problema neke tehnologije. Takođe, dok je u sistemima druge (GSM) i treće (UMTS) generacije pozicioniranje uvođeno kao naknadna mogućnost koju mreža pruža, u sistemima

četvrte generacije (LTE) elementi pozicioniranja postali su sastavni deo ćelijskih mreža od njihove inicijalne implementacije. Takođe, u GSM i UMTS, za merenja neophodnih parametara u pozicioniranju korišćeni su postojeći signali čija je namena vezana za samo funkcionisanje ćelijskih mreža, dok se u LTE po prvi put javljaju signali namenjeni isključivo za pozicioniranje.

Sa druge strane, evolucija različitih tehnologija radio pristupa, RAT (*Radio Access Technology*), tokom godina imala je za posledicu i različite LCS arhitekture i pripadajuće standarde. Veći broj različitih LCS standarda generalno predstavlja problem što je dovelo do ideje o tzv. multi-RAT rešenjima pozicioniranja [5]. U današnjim ćelijskim sistemima, servisna RAT tehnologija diktira koje metode pozicioniranja su na raspolaganju korisniku. To znači da bi mogao koristiti metode pozicioniranja druge RAT, korisnik bi najpre morao da se "prebaci" na tu drugu tehnologiju. Imajući u vidu trend harmonizacije standarda od strane 3GPP, kao što je tzv. *multi-standard* radio, neizbežna je i integracija funkcionalnosti pozicioniranja, tj. multi-RAT pozicioniranje. U takvom multi-RAT sistemu za pozicioniranje, element pozicioniranja (tzv. *positioning node*) mora imati sposobnost operativnosti sa različitim RAT tehnologijama kao i mogućnost izbora optimalne metode pozicioniranja. Takođe, element pozicioniranja mora imati mogućnost merenja kako unutar jedne tako i između različitih tehnologija, a u cilju postizanja optimalnog kvaliteta servisa. U takvom sistemu, integracija i harmonizacija standarda će smanjiti i broj elemenata LCS mreže a istovremeno omogućiti maksimalnu kompatibilnost. Ovo će posledično omogućiti ekonomičnija i efikasnija rešenja pozicioniranja, fleksibilniji razvoj standarda i lakši razvoj i migraciju mreže.

U nekoj daljoj budućnosti, bilo koji elementi kognitivnosti radio mreža zahtevaće poznavanje informacije o lokaciji mobilnih korisnika kao neophodnog elementa funkcionisanja tih mreža. Postupak određivanja lokacije mobilnih korisnika u kognitivnim radio sistemima, poznat pod terminom *location sensing*, predstavljaće sastavni deo kognitivnih terminala koji će na ovaj način omogućiti tzv. "svesnost" o lokaciji (*location awareness*), neophodnu opciju u funkcionisanju budućih sistema efikasnijeg korišćenja spektra [6].

2. Evolucija servisa pozicioniranja

2.1. Faze razvoja servisa pozicioniranja

Kao što je već rečeno, ideja o pozicioniranju korisnika u ćelijskim radio mrežama nastala je u Sjedinjenim Američkim Državama za potrebe servisa za hitne pozive - 911. 1996. godine od strane FCC napravljen je program u nekoliko faza kojim se operatori mobilne telefonije obavezuju da u predviđenom vremenskom intervalu omoguće lociranje mobilnih korisnika u okviru svojih ćelijskih radio mreža. Ova naprednija verzija servisa za hitne pozive u kojoj je obezbeđena automatska identifikacija lokacije korisnika nazvana je *Enhanced 911* (E-911).

Servis za hitne pozive u Evropi nastao je tek 1998. godine. Evropska komisija, EC (*European Commission*), ustanovila je jedinstveni broj 112 kao podršku hitnim servisima, kako za fiksnu tako i za mobilnu telefoniju. Ovaj broj je ekvivalent američkom 911. Jula 2000. godine, Komisija evropske zajednice, CEC (*Commission of European Communities*), izdala je zahtev po kojem se operatori mobilne telefonije u zemljama unutar Evropske Unije obavezuju da u okviru svojih ćelijskih radio mreža omoguće automatsku identifikaciju lokacije mobilnih korisnika. Ovaj servis je nazvan *Enhanced 112* (E-112).

2.1.1. E-911

FCC pravila za E-911 ustanovljena su u cilju povećanja bezbednosti ljudi, preciznije, da bi korisnicima servisa za hitne pozive upućene preko mobilnih stanica pomoć mogla biti pružena u što kraćem vremenskom periodu. Takođe, nametnuti su i vremenski intervali u okviru kojih operatori mobilne telefonije moraju ispuniti ove zahteve.

Prva faza razvoja E-911 servisa počela je 1996. godine zahtevom da, u slučaju kada se 911 poziv generiše u okviru mobilne mreže, operatori mobilne telefonije moraju obezbediti informaciju o broju mobilne stanice sa koje je upućen hitni poziv, identifikovati baznu stanicu koja u tom trenutku opslužuje mobilnu stanicu sa koje je poziv upućen i ove informacije dostaviti agenciji za reagovanje na 911 pozive, PSAP (*Public Safety Answering Point*). Ovakva informacija omogućila bi grubo određivanje lokacije sa koje je poziv upućen, kao i mogućnost ponovnog uspostavljanja veze sa korisnikom kome je pomoć potrebna, a ukoliko je u međuvremenu došlo do prekida veze. Rok za ispunjenje prve faze bio je april 1998. godine.

Druga faza razvoja E-911 servisa počela je dodatnim zahtevom, a to je obezbeđivanje automatske identifikacije lokacije, ALI (*Automatic Location Identification*). Ovaj zahtev pokrenuo je razvoj tzv. *network-based* metoda određivanja lokacije korisnika u radio mrežama. Narednih godina, FCC je u cilju realizacije druge faze dozvolila i razvoj *handset-based* metoda određivanja lokacije.

Istovremeno, ustanovljeni su i zahtevi po pitanju tačnosti određivanja lokacije korisnika u radio mrežama i to u zavisnosti od toga da li je reč o *network-based* ili *handset-based* tehnologiji. FCC zahtevi za drugu fazu razvoja E-911 servisa prikazani su u tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Zahtevane tačnosti određivanja lokacije mobilnih korisnika, E-911 [1].

Rešenje	67% slučajeva	95% slučajeva
<i>Handset-based</i>	50m	150m
<i>Network-based</i>	100m	300m

Rok za implementaciju druge faze inicijalno je bio decembar 2005. godine ali je nekoliko puta produžavan, obzirom da mnogi operatori nisu mogli da ispune FCC zahteve u zadatom vremenskom roku. Jedan od glavnih problema bio je ispuniti zahteve po pitanju tačnosti pozicioniranja u *indoor* uslovima (zahtev za pozicioniranjem upućen iz *indoor* uslova, tj. iz unutrašnjosti objekta), obzirom da FCC zahtevi nisu razlikovali *outdoor* i *indoor* slučajeve. Kasnije je FCC pojasnio da se zadate tačnosti po pitanju pozicioniranja (date u tabeli 2.1) odnose samo za *outdoor* slučajeve [7].

Usled sve većeg broja mobilnih terminala koji imaju implementiran GPS prijemnik, FCC je jula 2011. godine predložila i pooštavanje zahteva za mobilne operatore, odnosno, najavila dodatno povećanje tačnosti pozicioniranja (u *outdoor* uslovima). Takođe, ista tačnost zahtevaće se i od *network-based* i *handset-based* metode pozicioniranja, za razliku od dotadašnjeg razdvajanja ova dva slučaja. Rok za drugu fazu najzad je zaključen do januara 2019. godine.

Pozicioniranje u *indoor* uslovima postaje predmet posebne pažnje FCC kada je zapaženo da veliki broj (preko 50%) hitnih poziva biva upućen iz *indoor* uslova. Kao rezultat, FCC je u februaru 2015. god usvojila tzv. *Fourth Report and Order* [8], dokument koji za mobilne operatore propisuje zahtevane tačnosti pozicioniranja koje moraju biti ispunjene posebno u *indoor* uslovima. Novi zahtevi bi u bližoj budućnosti trebalo da obezbede tačnost pozicioniranja koja bi omogućila lociranje zgrade iz koje je upućen poziv, zatim lociranje sprata sa kojeg je poziv upućen (u slučaju objekta sa više spratova), a kasnije i lociranje same sobe ili kancelarije iz koje je poziv upućen. Konkretno zahtevane tačnosti pozicioniranja su:

- horizontalna tačnost od 50m koja mora biti zadovoljena u 40%, 50%, 70% i 80% hitnih E911 poziva, u narednih 2, 3, 5 i 6 godina, respektivno
- vertikalna tačnost: u naredne 3 godine operatori moraju omogućiti prenos barometarskih podataka do PSAP sa svih terminala koji imaju ovakve senzore. Takođe, u naredne 3 godine operatori bi trebali sami da predlože metriku za tačnost po z-osi (vertikalnu tačnost), i proslede je FCC na odobrenje (u nekim ranijim FCC dokumentima, kao konkretan broj pojavljivala se vertikalna tačnost od 3m, što je odprilike nivo jednog sprata).

Iako su za sada zahtevi po pitanju tačnosti pozicioniranja kao i rokovi implementacije različiti za *outdoor* i za *indoor* slučajeve, smatra se da će u budućnosti (odprilike po isteku ovih rokova, oko 2020. god), operatori biti u mogućnosti da iste tačnosti pozicioniranja ostvare u oba okruženja. To znači da budući FCC zahtevi neće razlikovati i posebno razmatrati *outdoor* i *indoor* slučajeve.

2.1.2. E-112

Iako se činilo da će evropski E-112 servis biti vrlo sličan američkom E-911, ispostavilo se da će razvoj E-112 servisa ipak zahtevati rešavanje dodatnih problema pa samim tim i duže vreme implementacije. Razlog su razlike u servisima za hitne pozive u zemljama članicama Evropske Unije. Jula 2000. godine, od strane CEC napravljen je program u nekoliko faza kojim je najpre zahtevana jedinstvena organizacija servisa za hitne pozive u zemljama članicama EU, a zatim i mogućnost lociranja mobilnih korisnika koji su u okviru mobilnih mreža koristili servis za hitne pozive. U tom cilju, iste godine CEC je pokrenula projekat pod nazivom LOCUS (*Location of Cellular Users for Emergency Services project*). Takođe, formirana je i radna grupa pod nazivom CGALIES (*Coordination Group on Access to Location Information by Emergency Services*). Osnovni zadatak ove grupe bio je implementacija E-112 servisa u propisanom vremenskom periodu, koji bi bio finansijski prihvatljiv i usvojen od strane svih zemalja unutar EU. Konačan izveštaj o svim zahtevima koje treba ispuniti u tom cilju, radna grupa CGALIES završila je februara 2002. godine.

U tabeli 2.2 prikazani su zahtevi vezani za tačnost lociranja korisnika, uz pretpostavku da informacije o lokaciji korisnika moraju biti dostupne najkasnije 30s od trenutka poziva. Dodatno, zahtev je i da gruba lokacija korisnika, tačnosti od oko 300m za sve tipove okruženja, bude dostupna već 7s od trenutka poziva. Takođe, razdvojeni su slučajevi za razne tipove okruženja kao i slučajevi kada korisnik može dati bar neku informaciju o lokaciji na kojoj se nalazi, kao i kada to ne može. Statistika je pokazala da ovi drugi predstavljaju svega 6% od ukupnog broja hitnih poziva.

Tabela 2.2. Zahtevane tačnosti pozicioniranja, E-112 [9].

	<i>Indoor</i> (m)	Urbano (m)	Suburbano (m)	Ruralno (m)	Auto-put (m)
Sa grubom procenom lokacije	10 - 50	25 - 150	50 - 500	100 - 500	100 - 500
Bez ikakve procene lokacije	10 - 50	10 - 150	10 - 500	10 -500	10 - 500

Osim horizontalne tačnosti prikazane u tabeli 2.2, E-112 podrazumeva zahteve i po pitanju vertikalne tačnosti. Zahtevana vertikalna tačnost pozicioniranja iznosi 10m-15m (što znači da je u višespratnoj zgradi moguće razlikovati lokaciju na nivoima od oko tri sprata).

2.2. Parametri procene lokacije korisnika u radio mrežama

Osim tačnosti pozicioniranja i vremena odziva na zahtev za pozicioniranjem koji su dati u E-911 i E-112 specifikacijama, uvedeni su i dodatni parametri na osnovu kojih se može proceniti kvalitet određivanja lokacije primenom neke od metoda pozicioniranja. Konačno, parametri procene lokacije korisnika u radio mrežama su [2]:

1. tačnost
2. dostupnost i konzistentija
3. priraštaj opterećenja

4. energetska efikasnost
5. kašnjenje i
6. cena implementacije.

2.2.1. Tačnost

Pozicioniranje korisnika u radio mrežama se može definisati kao mehanizam koji se sastoji u proceni geografskih koordinata korisnika, preciznije, mobilne stanice, u okiru radio mreža. Ipak, gotovo je nemoguće da u 100% slučajeva i bez obzira na tip okruženja, procenjene koordinate budu i tačne koordinate, odnosno baš one na kojima se korisnik nalazi. Jedan od parametara pomoću kojeg je moguće odrediti koliko su proračunate koordinate geografski bliske stvarnim koordinatama je tačnost. Da bi se odredio stepen odstupanja od tačnih koordinata, neophodno je razmotriti i veličine kao što su greška, neodređenost i pouzdanost pozicioniranja [10].

Greška pozicioniranja predstavlja razliku između tačne i procenjene (proračunate) lokacije korisnika dobijene primenom neke od metoda pozicioniranja.

Imajući u vidu da procenjena lokacija nije potpuno tačna i da uvek postoji određena greška pozicioniranja, rezultat procene lokacije nije tačka u kojoj se korisnik nalazi već oblast u kojoj se korisnik može nalaziti. U zavisnosti od primenjene metode pozicioniranja, ova oblast može biti različitog oblika (krug, kružni prsten, isečak kružnog prstena, ...). Neodređenost pozicioniranja predstavlja rastojanje od centra oblasti u kojoj se procenjuje lokacija korisnika i ivice najudaljenije granice ove oblasti. Drugim rečima, neodređenost se može shvatiti i kao maksimalna greška pozicioniranja.

Ipak, i nakon što se definiše neodređenost, ne može se garantovati da će u 100% slučajeva greška određivanja lokacije biti manja od vrednosti neodređenosti, odnosno da će se u 100% slučajeva korisnik naći unutar oblasti neodređenosti. Zbog toga se neodređenost najčešće razmatra zajedno sa stepenom pouzdanosti u procenju lokaciju, pa se i performanse i zahtevi vezani za određivanje lokacije predstavljaju njihovom kombinacijom. Na primer, ako se zahteva da tačnost neke metode pozicioniranja iznosi 150m/95%, to znači da u 95% slučajeva greška određivanja lokacije mora biti manja od 150m. Ako je procenjena oblast u kojoj se korisnik nalazi krug, par 150m/95% se može interpretirati i na sledeći način: u 95% slučajeva, korisnik će se nalaziti unutar kruga poluprečnika 150m čiji se centar poklapa sa procenjenim koordinatama korisnika. Primer ilustruje i činjenicu da su ove dve veličine međusobno blisko povezane: povećanjem/smanjenjem stepena pouzdanosti povećava/smanjuje se i neodređenost. U odredbama FCC za potrebe pozicioniranja u slučaju 911 servisa za hitne pozive [1], najčešće korišćene vrednosti u pogledu stepena pouzdanosti su 67% i 95%.

2.2.2. Dostupnost i konzistencija

Mnoge aplikacije koje se baziraju na poznavanju lokacije korisnika, zahtevaju da primenjena metoda pozicioniranja bude dostupna u svim okruženjima (*indoor*, urbano, ruralno, rezidencijalno, ...). Ipak, mnoge metode pozicioniranja nisu primenjive u svakom okruženju, a često im i tačnost zavisi od tipa okruženja u kojem se korisnik nalazi. Parametri kojima se opisuju ove performanse metoda pozicioniranja su dostupnost i konzistencija. Dostupnost pokazuje koliko je neka

metoda pozicioniranja primenjiva u različitim okruženjima, dok je konzistencija mera stabilnosti tačnosti metode pozicioniranja u različitim okruženjima.

2.2.3. Priraštaj opterećenja

Jedan od važnih parametara za procenu neke metode pozicioniranja predstavlja priraštaj opterećenja koji nastaje primenom te metode pozicioniranja. Od interesa su dva tipa opterećenja u radio mrežama: signalizaciono i računarsko opterećenje. Priraštaj signalizacionog opterećenja nastaje usled povećanja broja poruka koje se razmenjuju između mobilne stanice i mreže, kao i između elemenata u mreži, a u cilju kontrole procesa određivanja lokacije. Priraštaj računarskog opterećenja odnosi se na procenat procesorskog vremena koje se troši kako za potrebe proračuna lokacije mobilne stanice, tako i na rad sa bazama podataka i zahtevima po pitanju memorijskih resursa. Priraštaji se posmatraju kako na nivou mreže, tako i na nivou mobilne stanice. Priraštaj opterećenja koji unosi proces određivanja lokacije, direktno je proporcionalan sa stepenom tačnosti koji ta metoda pozicioniranja garantuje [2]. Dakle, tačnije metode unose veće signalizaciono i računarsko opterećenje. Ovo je vrlo važna veza koju je neophodno imati u vidu prilikom izbora metode pozicioniranja.

2.2.4. Energetska efikasnost

Bitan parametar pri izboru metode pozicioniranja predstavlja i energetska efikasnost, gde se prvenstveno misli na povećanu potrošnju baterije mobilne stanice izazvanu potrebama servisa pozicioniranja. Na neki način, ovaj parametar se može shvatiti i kao priraštaj energetskog opterećenja mobilne stanice nastalog usled realizacije LCS servisa. U najvećem broju slučajeva, energetska efikasnost je u korelaciji sa priraštajem signalizacionog i računarskog opterećenja. Primer loše energetske efikasnosti je jedan od glavnih ograničavajućih faktora u ideji primene GPS za potrebe pozicioniranja u ćelijskim sistemima, odnosno, instalaciji GPS prijemnika u okviru mobilne stanice.

2.2.5. Kašnjenje

Sledeći vrlo važana parametar je kašnjenje. Naime, informacija o lokaciji mobilne stanice ima smisla samo ako je dobijena u nekom vremenskom intervalu koji je prihvatljiv za realizaciju konkretnog LBS servisa. Kašnjenje predstavlja vremenski interval od pojave zahteva za određivanjem lokacije mobilne stanice do dostavljanja procenjenih koordinata te mobilne stanice. U tom vremenskom intervalu mora se:

- odabrati odgovarajuća metoda pozicioniranja u skladu sa zahtevanim tipom servisa
- izvršiti selekcija svih baznih stanica (referentnih tačaka) koje učestvuju u postupku pozicioniranja
- uskladiti kompletna signalizacija između svih komponenata koje učestvuju u postupku pozicioniranja
- obezbediti zahtevani resursi
- izvršiti sva neophodna merenja i
- proračunati nepoznata lokacija mobilne stanice.

Kod većine metoda pozicioniranja kašnjenje iznosi nekoliko sekundi. Treba ipak naglasiti da ovaj parametar dosta zavisi od konkretne aplikacije koja se bazira na poznavanju informacije o lokaciji korisnika.

2.2.6. Cena implementacije

Cena implementacije neke metode pozicioniranja odnosi se na:

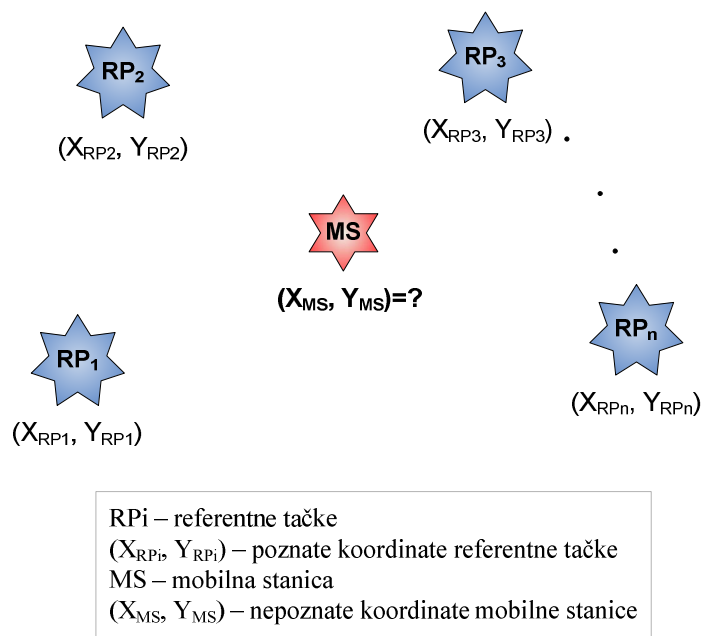
- troškove koje treba izdvojiti za implementaciju određene metode pozicioniranja (instalacija novih komponenata neophodnih u postupku pozicioniranja, kreiranje potrebnih baza podataka, instalaciju novih procesora, itd.)
- planirane troškove buduće ekspanzije prilikom porasta broja korisnika ili popularizacije samog servisa
- troškove održavanja
- troškove na strani korisnika (*handset cost*), u koje spada i cena novog mobilnog terminala koji će podržati dati lokacijski servis
- troškovi rizika gubljenja korisnika ukoliko implementirana metoda pozicioniranja zahteva novi mobilni terminal.

Ovaj parametar je direktno proporcionalan sa stepenom složenosti infrastrukture modifikovane za potrebe pozicioniranja. Tako na primer, *indoor* metode pozicioniranja obično nemaju velike troškove implementacije, dok veliku nedostatak satelitskih metoda pozicioniranja predstavlja upravo cena implementacije.

Pomenuta analiza cene implementacije može biti pogrešna, ako se ne bi uzeo u obzir još jedan parametar, tzv. ROI (*Return-Of-Investments*), tj. vreme povratka investicije. Dakle, veliki početni troškovi mogu biti prihvatljivi ukoliko kasniji profit to opravdava. Nasuprot tome, jeftiniji pristup ulaganja operatera može biti potpuno beskoristan ako prihodi nisu prisutni u planiranom vremenskom roku usled slabog odziva korisnika ili loših performansi metode.

3. Parametri pozicioniranja

U svakom scenariju pozicioniranja, zadatak je odrediti nepoznatu lokaciju mobilne stanice uz podrazumevano poznavanje lokacija tzv. referentnih tačaka koje učestvuju u postupku pozicioniranja i parametara radio signala između referentnih tačaka i ciljane mobilne stanice. U ćelijskim radio sistemima referentne tačke su bazne stanice, BS (*Base Station*), u WLAN (*Wireless Local Area Network*) mreži referentne tačke su *access point*-i (AP), ... Jedan scenario pozicioniranja u ravni (2D slučaj) prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1. Scenario pozicioniranja.

Bez obzira o kakvoj vrsti pozicioniranja je reč, lokacija bilo kog objekta u prostoru može se odrediti merenjem ugla i/ili merenjem rastojanja. Dok se ugao određuje direktnim merenjem, rastojanje se dobija indirektno: merenjem nivoa signala na prijemu i primenom odgovarajućeg modela propagacije, ili merenjem vremena propagacije signala (ili vremenskih razlika), imajući u vidu da se signal prostire poznatom brzinom (brzinom svetlosti).

Konačno, u pozicioniranju postoje četiri parametra signala koji se mogu koristiti za određivanje lokacije korisnika u okviru radio mreža:

1. nivo/snaga signala na prijemu, R_{xlev} , RSS (*Received Signal Strength*)
2. vreme propagacije signala (češće se zove vreme prispeća signala), TOA (*Time Of Arrival*)
3. vremenska razlika propagacije signala (vremenska razlika prispeća signala), TDOA (*Time Difference of Arrival*)

4. ugao nailaska (prispeća) signala, AOA (*Angle Of Arrival*).

3.1. Snaga signala na prijemu, R_{xlev}

Snaga signala na prijemu, R_{xlev} , je parametar signala na osnovu kojeg se može proceniti rastojanje između referentne tačke i mobilne stanice čija se lokacija određuje. Na osnovu izmerenog nivoa signala na prijemu, i poznatih koordinata referentnih tačaka a koristeći neki od modela propagacije signala, dobija se informacija o rastojanju između predajnika i prijemnika (mobilne i bazne stanice).

$$r = f(R_{xlev}). \quad (3.1)$$

Jedan od najjednostavnijih ali često korišćenih modela propagacije je [11]:

$$R_{xlev} = P_R(r) = P_R(r_0) \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \quad (3.2)$$

gde je $P_R(r)$ srednja snaga na rastojanju r od predajnika (na prijemu), n je eksponent slabljenja na trasi (*path-loss* eksponent) i pokazuje brzinu kojom snaga signala opada sa rastojanjem, r_0 je referentno rastojanje i odnosi se na tačku koja se nalazi u dalekom polju antene predajnika, dok je $P_R(r_0)$ snaga na referentnom rastojanju, tzv. referentna snaga. Tipično, vrednost referentnog rastojanja r_0 iznosi 1m u slučaju *indoor* propagacije, odnosno, 100m ili 1km u slučaju *outdoor* propagacije [12, 13]. Vrednost eksponenta slabljenja na trasi n zavisi od učestanosti i okruženja u kome se propagacija odvija [14]. Na primer, u slučaju propagacije u slobodnom prostoru n ima vrednost $n = 2$, dok u slučajevima kada su prisutne prepreke n ima veće vrednosti. Referentna snaga $P_R(r_0)$ dobija se merenjem na rastojanju r_0 od antene predajnika, ili se računa pomoću Friis-ove formule za prostiranje u slobodnom prostoru [12]

$$P_R(r_0) = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi r_0} \right)^2 \quad (3.3)$$

gde je λ talasna dužina, P_T snaga predajnika, G_T dobitak predajne antene, G_R dobitak prijemne antene. Obzirom da je u nama zanimljivim sistemima prijemnik mobilna stanica, MS (*Mobile Station*), može se pretpostaviti da je $G_R = 1$.

Prema formuli (3.3), snaga signala na prijemu (na ulazu u mobilnu stanicu) zavisi od dobitka antene predajnika (bazne stanice), koji dalje zavisi od relativnog ugla pod kojim se mobilna stanica nalazi u odnosu na pravac glavnog snopa dijagrama zračenja antene predajnika. Takođe, (3.3) podrazumeva da se propagacija obavlja u uslovima direktne optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika. U slučaju direktne propagacije i poznate vrednosti dobitka antene, formula (3.2) se može koristiti za određivanje rastojanja između predajnika i prijemnika

$$r = r_0 \left(\frac{P_R(r_0)}{P_R(r)} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.4)$$

što predstavlja deterministički model snage signala na prijemu kao parametra pozicioniranja.

Ipak, ukoliko se radi o usmerenoj anteni i/ili NLOS uslovima propagacije, informacija o rastojanju dobijena preko (3.4) može biti potpuno nepouzdana. U ovom slučaju, može se iskoristiti pretpostavka da snaga signala na prijemu ne može biti veća od one za slučaj LOS (*Line Of Sight*) uslova prostiranja (prostiranja u uslovima direktne optičke vidljivosti) i maksimalnog dobitka predajne antene. Na ovaj način, izbegnuti su problemi koji proističu iz razloga usmerenosti antene predajnika kao i propagacije po višestrukim putanjama, jer je pretpostavljeno da je proizvod $P_T G_T$ konstantan i jednak efektivno izračenoj snazi predajnika, EIRP (*Effective Isotropically Radiated Power*), pod pretpostavkom da je predajna antena izotropni radijator.

Pod ovom pretpostavkom, snaga signala na prijemu locira mobilnu stanicu unutar kruga u čijem se centru nalazi bazna stanica, a čiji je poluprečnik određen preko (3.4). Ovo rezultira funkcijom gustine verovatnoće

$$p_P(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi r^2}, & \text{za } (x - x_{BS})^2 + (y - y_{BS})^2 \leq r^2 \\ 0, & \text{drugde} \end{cases} \quad (3.5)$$

gde su x_{BS} i y_{BS} koordinate bazne stanice, a r je dato preko (3.4). Ovo predstavlja probablistički model snage signala na prijemu kao parametra pozicioniranja.

Formula (3.2) je jednostavna, ali i nedovoljno tačna jer uticaj okruženja uzima samo preko *path-loss* eksponenta, n . Zato se za procenu rastojanja na osnovu nivoa signala na prijemu mogu koristiti i druge, tačnije, ali i složenije metode i modeli. Ipak, i pored primene složenijih modela, vrednost snage signala na prijemu dobijena na ovaj način je samo srednja vrednost na rastojanju r od predajnika, a signal je dodatno izložen i uticaju fedinga usled čega varira i do 30-40dB na rastojanjima reda $\lambda/2$ (što je u slučaju GSM svega oko 15cm). Ovako velike varijacije snage signala na prijemu imaju za posledicu velike greške u proceni rastojanja a time i velike greške u pozicioniranju.

Osim velike osetljivosti na višestruku propagaciju (*multipath propagation*), dodatna otežavajuća okolnost u primeni Rxlev u pozicioniranju je i primena adaptivne kontrole snage u nekim sistemima, tj. dinamičko podešavanje snage predajnika u zavisnosti od raznih faktora: rastojanja predajnika i prijemnika (svi ćelijski sistemi), verovatnoće greške, broja korisnika u ćeliji (sistemi bazirani na CDMA (*Code Division Multiple Access*)). Imajući sve ovo u vidu, za procenu rastojanja na osnovu parametra nivoa signala na prijemu, referentni signal se mora kontrolisati i pratiti kako bi se mereni podaci stalno ažurirali i slali do čvorova u mreži u kojima se rastojanje procenjuje, što je prilično kompleksan problem.

Zaključak je da je snaga signala na prijemu nije optimalan izbor za procenu rastojanja u gotovo svim radio sistemima. Izuzetak čini pozicioniranje u unutrašnjosti objekata (u *indoor* uslovima), kada procena rastojanja na osnovu nivoa signala na prijemu može postati metoda izbora, ali isključivo iz razloga nedostatka alternative.

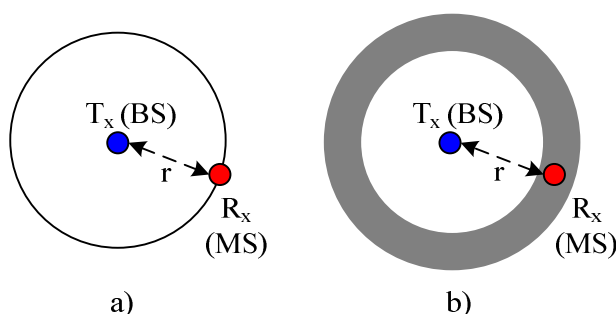
3.2. Vreme prispeća signala, TOA

Sledeći parametar signala koji se može koristiti za pozicioniranje je vreme prispeća signala, TOA. Na osnovu vremena propagacije signala između predajnika i prijemnika, brzine propagacije signala (brzina svetlosti) i poznatih koordinata referentnih tačaka, može se dobiti informacija o rastojanju između predajnika i prijemnika

$$r = f(TOA). \quad (3.6)$$

Po definiciji, TOA je vremenski trenutak prispeća signala od predajnika do prijemnika. Važna napomena je da je to vremenski trenutak koji na svom 'časovniku' (*internal clock*) registruje prijemnik.

U prostoru, geometrijsko mesto tačaka istog TOA je kružnica oko predajnika poznatih koordinata. Zbog neodređenosti merenja vremena, realno je u pitanju kružni prsten (slika 3.2).

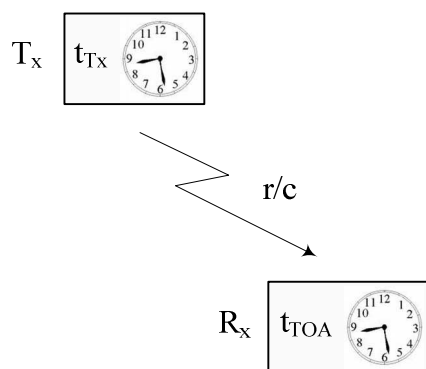


Slika 3.2. Geometrijsko mesto tačaka TOA: a) idealan slučaj, b) realan slučaj.

U opštem slučaju, parametar TOA se dobija kao [4]:

$$t_{TOA} = t_{Tx} + \frac{r}{c} + \varepsilon_{sync} \quad (3.7)$$

gde je t_{TOA} vreme prispeća signala sa predajnika Tx, po časovniku Rx, t_{Tx} vreme slanja signala sa predajnika Tx, po časovniku Tx, r je rastojanje između predajnika Tx i prijemnika Rx, dok je ε_{sync} deterministička mera koja vrši kompenzaciju u slučaju kada Tx i Rx nisu sinhronizovani. Ilustracija određivanja vremena prispeća signala data je na slici 3.3.



Slika 3.3. Određivanje vremena prispeća signala.

Sinhronizacija mreže znači da sve komponente u toj mreži rade po istom referentnom taktu (po istom 'časovniku'). U našem slučaju (3.7), važi:

- ako je $\varepsilon_{sync} = 0$ predajnik Tx i prijemnik Rx su sinhronizovani (mreža je sinhronizovana);
- ako je $\varepsilon_{sync} \neq 0$ predajnik Tx i prijemnik Rx nisu sinhronizovani (mreža nije sinhronizovana);

Dakle, metode bazirane na proceni rastojanja na osnovu parametra TOA zahtevaju da mreža bude sinhronizovana ili barem da znamo vrednost parametra ε_{sync} . Poznavanje parametra ε_{sync} je najteži zadatak u metodama baziranim na TOA (većina ćelijskih mreža kao GSM, UMTS FDD, LTE nisu sinhronizovane i ε_{sync} je praktično nemoguće odrediti). Zahtev za sinhronizacijom mreže je ujedno i najveći nedostatak u proceni rastojanja na osnovu parametra TOA.

Dodatno, TOA parametar je osetljiv i na propagaciju u slučaju kada između predajnika i prijemnika ne postoji direktna optička vidljivost, tj. TOA je osetljiv na NLOS uslove propagacije. Detaljnije o ovom problemu u poglavlju 6.3.3. Sa druge strane, parametar TOA nije osetljiv na slabljenja signala usled propagacije, kao ni na položaj mobilne stanice u odnosu na antenski sistem bazne stanice.

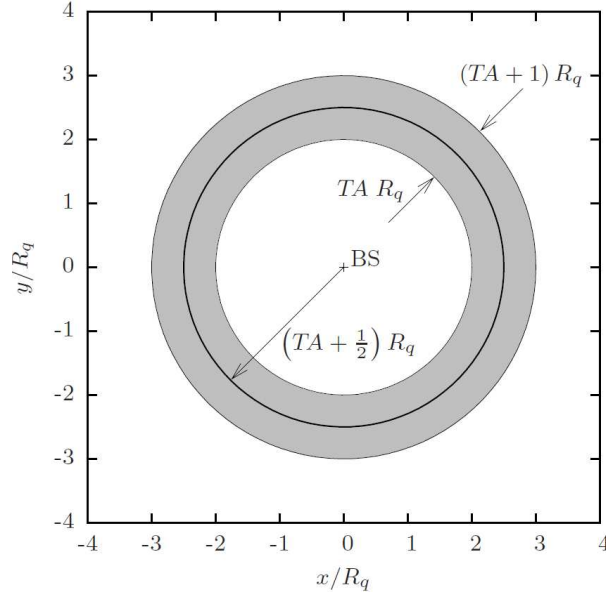
TOA parametar se može ekstrahovati iz nekih sistemskih parametara ćelijskih mreža, kao što su TA (*Timing Advance*) parametar u GSM i LTE [15], ili RTT (*Round Trip Time*) parametar u UMTS [16]. Za ilustraciju determinističkog i probabilističkog modelovanja parametra TOA u pozicioniranju, primeniće se TA parametar u GSM [17]. Uz pretpostavku o LOS uslovima prostiranja, informacija o koordinatama bazne stanice (x_{BS}, y_{BS}) i odgovarajuće vrednosti TA parametra, lociraju mobilnu stanicu (x_{MS}, y_{MS}) unutar prstena centriranog na lokaciji bazne stanice i specificiranog preko

$$TA R_q \leq r \leq (TA + 1) R_q \quad (3.8)$$

gde je r rastojanje između mobilne i bazne stanice

$$r = \sqrt{(x_{MS} - x_{BS})^2 + (y_{MS} - y_{BS})^2} \quad (3.9)$$

dok $R_q = 553.46$ m predstavlja kvant rastojanja TA parametra čija se vrednost najčešće zaokružuje na 550 m. Prostorni prsten za $TA = 2$ prikazan je na slici 3.4.



Slika 3.4. Informacija o lokaciji na osnovu TA parametra, $TA = 2$.

U probabilističkom modelu, lokalizacija mobilne stanice unutar prstena se predstavlja preko funkcije gustine verovatnoće

$$p_{T1}(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi(2TA+1)R_q^2}, & \text{za } TA R_q \leq r \leq (TA+1) R_q \\ 0, & \text{drugde.} \end{cases} \quad (3.10)$$

Funkcija gustine verovatnoće (3.10) podrazumeva LOS uslove prostiranja što je i opravdana pretpostavka u ruralnom okruženju. Ipak, u slučaju nekog drugog okruženja, posebno urbanog tipa, dominantni su NLOS uslovi prostiranja pa time i određivanje vrednosti TA parametra na osnovu vremena prostiranja ne direktnog već reflektovanog signala. Stoga, kao što je detaljno razrađeno u poglavlju 6 i [18], u okruženju gde je česta NLOS propagacija, vrednost TA parametra može garantovati lokaciju mobilne stanice ne unutar kružnog prstena (3.8), već unutar kruga poluprečnika

$$r \leq (TA+1) R_q. \quad (3.11)$$

U odsustvu boljeg modela, može se pretpostaviti uniformna raspodela unutar pomenutog kruga, na osnovu čega je funkcija gustine verovatnoće

$$p_{T2}(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi((TA+1)R_q)^2}, & \text{za } r \leq (TA+1) R_q \\ 0, & \text{drugde.} \end{cases} \quad (3.12)$$

Za obe funkcije gustine verovatnoće, oblast u kojoj su funkcije gustine verovatnoće različite od nule je ograničena kvadratom

$$x_{BS} - (TA+1)R_q \leq x \leq x_{BS} + (TA+1)R_q \quad (3.13)$$

$$y_{BS} - (TA+1)R_q \leq y \leq y_{BS} + (TA+1)R_q \quad (3.14)$$

koji će se koristiti za združivanje podataka iz različitih izvora informacija (poglavlje 6).

Izbor funkcije gustine verovatnoće koja predstavlja informaciju o koordinatama bazne stanice i vrednosti TA parametra zavisi od okruženja. Funkcija gustine verovatnoće (3.10) će se koristiti u okruženjima gde dominiraju LOS uslovi prostiranja (npr. neka ruralna okruženja), dok će se u ostalim kruženjima koristiti funkcija gustine verovatnoće (3.12).

Deterministički model informacije o lokaciji mobilne stanice na osnovu TA parametra je mnogo jednostavniji nego probabilistički. Pod pretpostavkom uniformne raspodele lokacije mobilne stanice unutar granica koje definiše TA prsten, kao i pod pretpostavkom LOS uslova, rastojanje između mobilne stanice i bazne stanice se procenjuje kao

$$r = \left(TA + \frac{1}{2} \right) R_q. \quad (3.15)$$

Moguće lokacije mobilne stanice za $TA = 2$ u determinističkom modelu prikazane su centralnom kružnicom na slici 3.4.

3.3. Vremenska razlika prispeća signala, TDOA

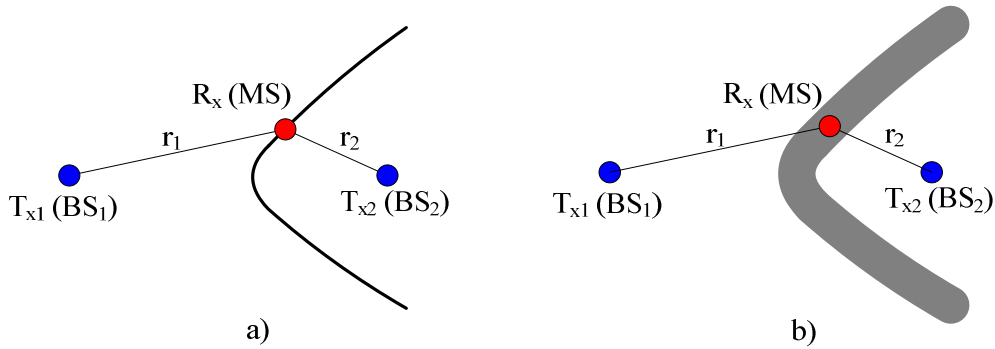
Kao što je rečeno, u slučaju primene TOA parametra za pozicioniranje, potreban uslov je da isto referentno vreme bude dostupno svim elementima u mreži koje učestvuju u pozicioniranju, tj. da mreža bude sinhronizovana. Ovaj zahtev je moguće izbeći ako se TOA parametar dobija na osnovu merenja povratnog vremena propagacije referentnog signala, tj. *round trip time*, jer se tada koristi samo jedan časovnik. Takođe, zahtev za sinhronizacijom je moguće izbeći i ako se umesto vremena propagacije signala posmatra vremenska razlika propagacije signala, TDOA.

Dakle, na osnovu razlike vremena propagacije signala između predajnika i prijemnika, brzine propagacije signala (brzina svetlosti) i poznatih koordinata referentnih tačaka, dobija se informacija o rastojanju između predajnika Tx i prijemnika Rx, tj.

$$d = f(TDOA). \quad (3.16)$$

U ćelijskim sistemima, npr. u DL (*downlink*) slučaju, to bi bila vremenska razlika propagacije signala od dve bazne stanice do mobilne stanice čija se lokacija određuje.

U prostoru, geometrijsko mesto tačaka istog TDOA je hiperbola u čijim se žižama nalaze predajnici poznatih koordinata, tj. bazne stanice u ćelijskim sistemima. Zbog neodređenosti merenja vremena, realno je u pitanju zona oblika hiperbole (slika 3.5).



Slika 3.5. Geometrijsko mesto tačaka TDOA: a) idealan slučaj, b) realan slučaj.

U opštem slučaju, parametar TDOA se dobija kao:

$$t_{TDOA} = t_{TOA1} - t_{TOA2} \quad (3.17)$$

Kako je, na osnovu (3.7)

$$t_{TOA1} = t_{Tx1} + \frac{r_1}{c} + \varepsilon_{sync} \quad (3.18)$$

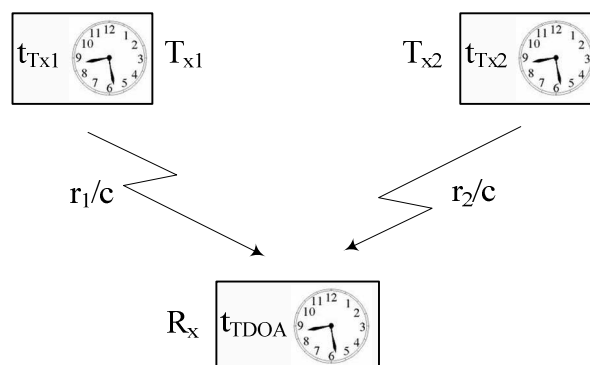
a

$$t_{TOA2} = t_{Tx2} + \frac{r_2}{c} + \varepsilon_{sync} \quad (3.19)$$

dobija se da je

$$t_{TDOA} = t_{TOA1} - t_{TOA2} = t_{Tx1} - t_{Tx2} + \frac{r_1 - r_2}{c} \quad (3.20)$$

gde su t_{TOA1} i t_{TOA2} vremena prispeća signala sa predajnika Tx1 i Tx2, po časovniku prijemnika Rx, t_{Tx1} i t_{Tx2} vremena slanja signala sa predajnika Tx1 i Tx2 (po časovniku predajnika Tx1 i Tx2), r_1 i r_2 su fizička rastojanja između predajnika Tx1 i prijemnika Rx, odnosno predajnika Tx2 i prijemnika Rx, dok je ε_{sync} deterministička mera koja vrši kompenzaciju u slučaju kada predajnik i prijemnik nisu sinhronizovani [4]. Ilustracija određivanja vremenske razlike prispeća signala data je na slici 3.6.



Slika 3.6. Određivanje vremenske razlike prispeća signala.

Kao što se vidi iz (3.20), ključna prednost TDOA pristupa tj. merenja vremenskih razlika propagacije signala je ta da se parametar ε_{sync} potire što znači da nema zahteva za sinhronizacijom predajnika i prijemnika (baznih i mobilnih stanica). Takođe, iz (3.20) ostaje zahtev da predajnici Tx1 i Tx2 rade po istom taktu, ali to nije problematičan zahtev (npr. bazne stanice opremljene GPS vremenom).

Metode pozicioniranja bazirane na TDOA mogu biti realizovane i na DL (*downlink*) i na UL (*uplink*). U slučaju DL mere se vremenske razlike prispeća signala sa baznih stanica ka mobilnoj stanici, dok se u slučaju UL mere vremenske razlike prispeća signala od mobilne stanice do baznih stanica. Zbog sinhronizacije i težnji da se svi proračuni vrše u jednoj tački, jednostavnija je varijanta TDOA na DL.

Parametar TDOA nije osetljiv na slabljenja signala usled propagacije, kao ni na položaj mobilne stanice u odnosu na antenski sistem bazne stanice, ali jeste osetljiv na NLOS.

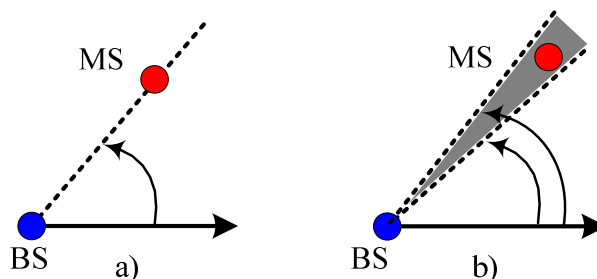
3.4. Ugao prispeća signala, AOA

Istorijski gledano, ugao prispeća signala, AOA, je prvi parametar koji se koristio za pozicioniranje u radio sistemima, u tzv. goniometrijskim metodama.

Dakle, na osnovu poznatog ugla pod kojim signal dolazi u prijemnik Rx (u odnosu na neki referentni pravac, najčešće azimut), poznatih koordinata referentnih tačaka, dobija se informacija o položaju prijemnika u prostoru

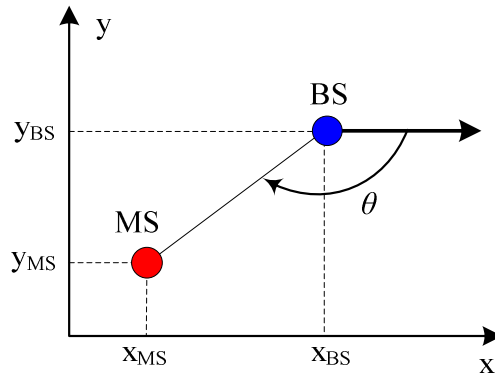
$$MS = f(AOA). \quad (3.21)$$

U prostoru, geometrijsko mesto tačaka istog AOA je ugao u odnosu na referentni pravac. Zbog neodređenosti merenja ugla, realno je u pitanju zona, kao što je prikazano na slici 3.7.



Slika 3.7. Geometrijsko mesto tačaka AOA: a) idealan slučaj, b) realan slučaj.

Iako se može implementirati i na DL i na UL, zbog jednostavnije instalacije antenskih nizova na baznoj stanici nego na mobilnoj stanici, AOA parametar se obično određuje na UL. Na slici 3.8 prikazan je način određivanja AOA.



Slika 3.8. Određivanje ugla prispeća signala θ .

Na osnovu slike 3.8, važi da je

$$\theta = \arctg\left(\frac{y_{MS} - y_{BS}}{x_{MS} - x_{BS}}\right) \quad (3.22)$$

gde je θ ugao prispeća signala sa mobilne stanice do bazne stanice, (x_{MS}, y_{MS}) su nepoznate lokacije mobilne stanice, dok su (x_{BS}, y_{BS}) poznate koordinate bazne stanice. Na slici 3.8, AOA se određuje u odnosu na referentni smer koji je u datom slučaju pozitivan smer x -ose.

Kao i ostali parametri, i AOA je osetljiv na NLOS uslove propagacije. Razlog je taj što u NLOS uslovima propagacije procena pravca nailaska signala sa mobilne stanice može biti potpuno pogrešna pošto reflektovani signal može doći praktično pod bilo kojim uglom do bazne stanice.

U postojećim ćelijskim radio sistemima kao što su GSM i UMTS, AOA zahteva instalaciju specijalnih antenskih sistema – antenskih nizova. To povećava što cenu, što kompleksnost samog sistema (i predajnika i prijemnika), pa pozicioniranje bazirano na AOA parametru nije puno popularno u ovim sistemima. Nešto veća pažnja ovom parametru posvećena je za pozicioniranje tek u LTE.

4. Klasifikacija metoda pozicioniranja

Postoji veliki broj klasifikacija metoda pozicioniranja u radio mrežama. Najčešće i u literaturi najprisutnije su:

1. klasifikacija metoda pozicioniranja prema tipu korišćene infrastrukture
2. klasifikacija metoda pozicioniranja prema načinu određivanja lokacije i
3. klasifikacija metoda pozicioniranja prema matematičkom pristupu određivanju lokacije.

4.1. Klasifikacija metoda pozicioniranja prema tipu korišćene infrastrukture

Prema tipu infrastrukture, u literaturi se razlikuju podele na [2]:

1. integrisane i samostalne infrastrukture pozicioniranja
2. *network-based* i *terminal (mobile)-based* pozicioniranje i
3. satelitsko, ćelijsko i *indoor* pozicioniranje.

4.1.1. Integrisane i samostalne infrastrukture pozicioniranja

Integrisane infrastrukture pozicioniranja odnose se na radio mreže čija primarna funkcija nije pozicioniranje. Najčešće, ovakve mreže su prvenstveno dizajnirane za komunikaciju, i mogućnost lociranja korisnika predstavlja samo još jedan novi servis u okviru radio mreža. Tipičan primer ovih mreža su ćelijske mreže poput GSM, UMTS ili LTE. U njima, postojeće komponente i protokoli dobijaju dodatne funkcije i bivaju modifikovani u skladu sa zahtevima konkretnog LBS servisa.

Prednost integrisanih infrastrukture je u tome što predstavljaju nadogradnju na postojeću infrastrukturu, tako da nije potrebna zasebna mreža koja bi bila namenjena samo pozicioniranju, čime su znatno smanjeni troškovi implementacije. Sa druge strane, servis pozicioniranja dodatno opterećuje mrežu. Sva merenja neophodna u postupku pozicioniranja obavljaju se na postojećem radio interfejsu, koji je optimizovan za komunikaciju a ne pozicioniranje, što može negativno uticati na saobraćaj u mreži.

Samostalne infrastrukture su potpuno nezavisne od komunikacione mreže u kojoj je korisnik čija se lokacija određuje. Za razliku od integrisanih infrastrukture, radio interfejs je u ovom slučaju isključivo namenjen za potrebe pozicioniranja. Tipičan primer sistema koji koristi ovaj tip infrastrukture je sistem za globalno pozicioniranje, GPS. Osim GPS, važni predstavnici za ovakvu infrastrukturu su *indoor* sistemi koji su posebno projektovani za potrebe pozicioniranja u zatvorenom prostoru, najčešće kancelarijama i aerodromima. Osnovna mana samostalnih infrastrukture je što zahtevaju da korisnik poseduje posebne mobilne stanice kako bi

mu se mogla odrediti lokacija, što poskupljuje implementaciju. Nekada to predstavlja modifikaciju standardnih mobilnih stanica za komunikaciju, ali vrlo često i potpuno specifične uređaje koje korisnik mora posedovati. Takođe, poseban zahtev predstavlja i realizacija mehanizama za razmenu podataka između komunikacione i potpuno nezavisne mreže za pozicioniranje.

4.1.2. Network-based i mobile-based pozicioniranje

U slučaju *network-based* pozicioniranja, sva neophodna merenja kao i sam proračun lokacije mobilne stanice vrši mreža, dok *mobile-based* rešenje podrazumeva scenario u kojem mobilna stanica vrši sva neophodna merenja i na osnovu njih računa sopstvenu lokaciju. Postoji i hibridno rešenje, kada sva neophodna merenja vrši mobilna stanica, te podatke šalje mreži gde se vrši konačni proračun lokacije mobilne stanice. Ovo rešenje se naziva *mobile-assisted-network-based*, ili češće samo *mobile-assisted*. Postoji i obrnut scenario, tj. *network-assisted-mobile-based*, ali gotovo da se u praksi ne primenjuje. *Network-based* rešenje ne zahteva nikakve promene na postojećim mobilnim stanicama, što je vrlo značajna prednost u odnosu na *mobile-based* ili hibridne metode pozicioniranja. Zbog ove prednosti, bez obzira za koje se rešenje odluče, operatori najčešće ostavljaju bar jednu *network-based* metodu kao alternativno rešenje pozicioniranja u sopstvenoj mreži, kako ne bi izgubili korisnike koji nisu raspoloženi da zbog dodatnog servisa kupuju nove mobilne terminale.

4.1.3. Satelitsko, ćelijsko i indoor pozicioniranje

Satelitsko pozicioniranje predstavlja postupak određivanja lokacije korisnika na zemlji koristeći satelitsku infrastrukturu. Najpoznatiji sistemi ovog tipa su američki GPS koji u svakom trenutku raspolaže sa najmanje 24 satelita i ima globalno pokrivanje, ruski GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) i evropski Galileo. Satelitsko pozicioniranje se uvek realizuje kao samostalna infrastruktura i uvek kao *mobile-based* rešenje. Nesumnjiva prednost ovog tipa pozicioniranja je globalna dostupnost i visoka tačnost procene lokacije. Najveći nedostaci su posledica prirode propagacije satelitskih signala. Naime, ovi signali pokazuju veliku osetljivost na tzv. efekte zaklanjanja (*shadowing*) i lako bivaju apsorbovani ili reflektovani od strane zgrada, planina, ... Ovo dalje ima za posledicu da je uslov rada sistema baziranih na satelitskoj infrastrukturi direktna optička vidljivost između predajnika na satelitu i prijemnika na zemlji. To često nije slučaj, a tipičan primer su *indoor* okruženja, ali i *outdoor* okruženja sa izraženim efektima urbanizacije. Ozbiljan nedostatak je i relativno velika potrošnja baterije satelitskog prijemnika, što ima za posledicu pojačanu potrošnju mobilnog terminala opremljenog satelitskim prijemnikom. Najzad, svaka intervencija u sistemu koji koristi satelitsku infrastrukturu zahteva prilične investicije.

Ćelijsko pozicioniranje odnosi se na uvođenje dodatnih servisa u okviru postojećih ćelijskih sistema, koji se baziraju na poznavanju lokacije korisnika. Obzirom da ovi sistemi podržavaju mobilnost korisnika, na prvi pogled, procedura upravljanja mobilnošću bi se mogla iskoristiti i za potrebe određivanja lokacije korisnika. Ipak, zahtevi koji su nametnuti mobilnim operatorima [1], naročito po pitanju tačnosti, daleko nadmašuju skromne mogućnosti koje bi ovakva procedura omogućila. Zbog toga, mobilni operatori u cilju implementacije LBS servisa, u okviru

svojih mreža moraju uvesti nove protokole, a često i nove hardverske komponente koje bi podržale pozicioniranje zadovoljavajuće tačnosti.

Počev od 1996. god. kada se prvi put javila ideja o pozicioniranju korisnika ćelijskim radio mrežama, razvijen je veliki broj ćelijskih metoda pozicioniranja [19], [20], [21], [22]. Ipak, kako bi zadovoljili zahteve vezane za tačnost, dostupnost, kašnjenje, itd. operatori se uglavnom odlučuju za implementaciju nekoliko metoda pozicioniranja. Za razliku od satelitskog, ćelijsko pozicioniranje se uvek realizuje kao integrisana infrastruktura. Dostupnost je dobra, naročito ako se ima u vidu da servis treba realizovati na nivou jedne države jer je to najčešće zona rada jednog operatora, za razliku od satelitskog koje ima globalno pokrivanje. Takođe, za razliku od satelitskog, ćelijsko pozicioniranje nema ograničenja na *outdoor* uslove, štaviše, najvećim delom i funkcioniše u *indoor* okruženju. Ipak, jedan od velikih problema ćelijskog pozicioniranja predstavlja mogući negativni uticaj LBS servisa na kapacitet ovih sistema. Naime, LBS servis unosi dodatnu signalizaciju u mreži i, naročito kada se zahteva visoka tačnost, zahteva prilične resurse koji se zbog toga ne mogu koristiti za prenos govora ili podataka, što loše utiče na kapacitet mreže.

Indoor pozicioniranje [23] podrazumeva implementaciju servisa pozicioniranja unutar zatvorenog prostora, npr. unutar velikih poslovnih zgrada, aerodroma, ... Metode namenjene za *indoor* pozicioniranje bazirane su na primeni radio, infracrvene ili ultrazvučne tehnologije sa vrlo ograničenim dometom u pogledu komunikacije. Neka rešenja ovog tipa realizovana su kao samostalne infrastrukture, a neka kao integrisane, gde je najčešći slučaj integracija sa WLAN. *Indoor* pozicioniranje ima malu potrošnju energije mobilnih jedinica i komparativno visoku tačnost zbog kratkog dometa primenjene radio, infracrvene ili ultrazvučne tehnologije [2]. Ipak, ovi sistemi su uglavnom razvijeni kao privatni sistemi, sistemi posebne namene ili za potrebe istraživanja, i još uvek nisu standardizovani. Najpoznatije tehnologije koje se mogu iskoristiti za *indoor* pozicioniranje su pomenuti WLAN [24], *bluetooth* [25], RFID (*Radio Frequency IDentification*) [26] i UWB (*Ultra-Wideband*) [27].

4.2. Klasifikacija metoda pozicioniranja prema algoritmu određivanja lokacije

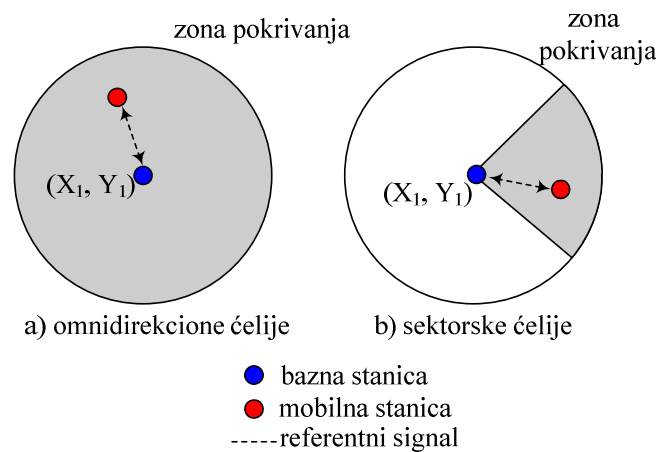
Metode pozicioniranja se prema primenjenom algoritmu procene nepoznate lokacije korisnika mogu podeliti na metode koje koriste [2]:

1. identifikaciju najbližeg predajnika poznatih koordinata (*Proximity Sensing*)
2. lateraciju
3. angulaciju
4. *fingerpinting* i
5. hibridna rešenja.

4.2.1. Identifikaciju najbližeg predajnika poznatih koordinata (*Proximity Sensing*)

Metode koje se baziraju na identifikaciji najbližeg predajnika poznatih koordinata predstavljaju najjednostavnije i najrasprostranjenije metode pozicioniranja. Ideja je zasnovana na činjenici da je zona pokrivanja radio predajnika ograničenog dometa. Mobilnoj stanici dodeljuju se poznate koordinate bazne stanice koja ili prima

pilot signale koje emituje mobilna stanica na UL, ili šalje pilot signale koje prima mobilna stanica na DL. U terminologiji ćelijskog pozicioniranja, mobilnoj stanici čija se lokacija određuje pridružuju se poznate koordinate bazne stanice koja trenutno opslužuje ciljanu mobilnu stanicu, odnosno, pridružuju joj se koordinate servisne bazne stanice. Ova metoda pozicioniranja zahteva identifikaciju najbliže bazne stanice, i pristup bazi podataka u kojoj se nalaze geografske koordinate svih baznih stanica u mreži. Može se realizovati i kao *network-based* i kao *mobile-based* rešenja i vrlo je popularna u ćelijskim radio sistemima, gde je poznata pod nazivom Cell-ID (*Cell-Identification*) [2], [21], [22]. Očigledne prednosti ove metode su gotovo nikakve modifikacije u postojećoj infrastrukturi, što rezultira malim troškovima implementacije. Osnovni nedostatak je nedovoljna tačnost, obzirom da direktno zavisi od poluprečnika servisne ćelije, i kreće se između 100m u urbanim zonama do nekoliko desetina kilometara u ruralnim oblastima. Princip rada metoda baziranih na *proximity sensing* principu prikazan je na slici 4.1 za slučajeve omnidirekcionih i sektorskih ćelija [2].



Slika 4.1. *Proximity sensing*.

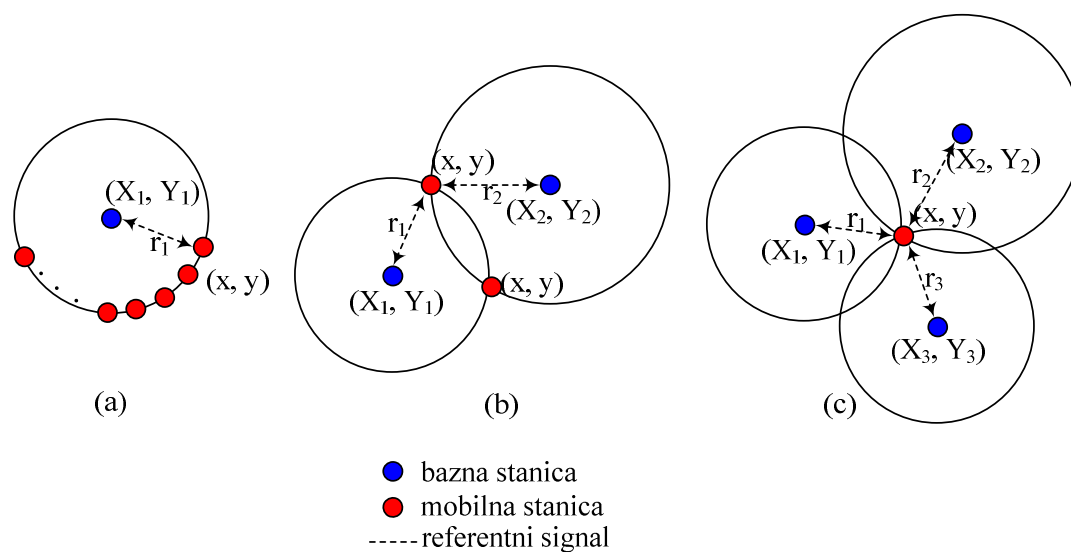
Osim kod ćelijskog, ova metoda prisutna je i kod *indoor* pozicioniranja. Tu pokazuje bolju tačnost obzirom na manji domet radio, infracrvenih i ultrazvučnih tehnologija koje se primenjuju u *indoor* uslovima.

4.2.2. Lateracija

Lateracija je postupak koji se primenjuje u slučaju kada su poznata rastojanja ili razlike rastojanja između mobilne stanice i barem tri bazne stanice. U oba slučaja dobija se sistem od n nelinearnih jednačina, gde je n broj baznih stanica. Rešavanjem ovog sistema dobija se nepoznata lokacija mobilne stanice. Lateracija u slučaju kada je $n = 3$, zove se trilateracija. Takođe, kada su poznata rastojanja između mobilne stanice i baznih stanica, postupak se zove cirkularna lateracija, dok kada su poznate razlike rastojanja između mobilne stanice i baznih stanica, postupak se zove hipebolička lateracija. Inače, rastojanja koja su osnova oba lateraciona metoda se dobijaju merenjem vremena ili vremenskih razlika propagacije signala između mobilne stanice i baznih stanica ili merenjem snage signala na prijemu, tj. na mestu mobilne stanice, a zatim procenom rastojanja primenom nekog od propagacionih modela.

4.2.2.1. Cirkularna lateracija

Kao što je rečeno, cirkularna lateracija je postupak određivanja nepoznate lokacije mobilne stanice na osnovu poznatih rastojanja između mobilne stanice i barem tri bazne stanice. Neka je r_i poznato rastojanje između mobilne stanice i i -te bazne stanice, gde je $i=1, \dots, n$. Poznata vrednost rastojanja r_i ograničava moguće lokacije mobilne stanice na kružnicu poluprečnika r_i oko i -te bazne stanice (slika 4.2a). Ako se iskoristi poznato rastojanje između mobilne stanice i druge bazne stanice, lokacija mobilne stanice dodatno se ograničava na dva moguća položaja koja se nalaze u preseku dve kružnice (slika 4.2b). Konačno, i poslednja neodređenost položaja mobilne stanice otklonjena je uvođenjem treće bazne stanice u proračun (slika 4.2c) [2].

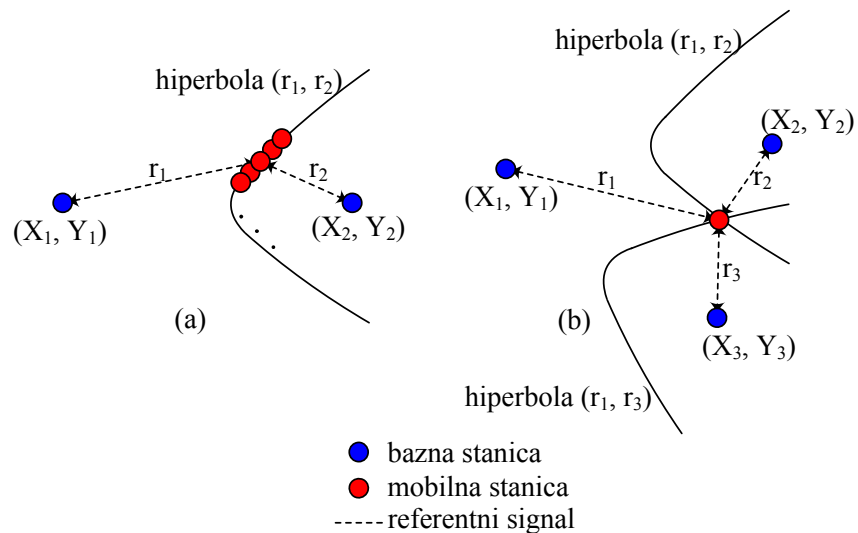


Slika 4.2. 2D cirkularna lateracija.

Detaljna analiza određivanja lokacije mobilne stanice primenom postupka cirkularne lateracije data je u poglavlju 5.2.1.

4.2.2.2. Hiperbolička lateracija

Hiperbolička lateracija je postupak određivanja nepoznate lokacije mobilne stanice na osnovu poznatih razlika rastojanja između mobilne stanice i barem tri bazne stanice. Neka su r_i i r_j poznata rastojanja između mobilne stanice i i -te bazne stanice i mobilne stanice i j -te bazne stanice, gde je $i, j = 1, \dots, n$ i $i \neq j$. Poznata vrednost razlike rastojanja $r_i - r_j$ ograničava moguće lokacije mobilne stanice na hiperbolu u čijoj se žiži nalaze bazne stanice i i j . Ova hiperbola je definisana skupom tačaka za koje je razlika rastojanja od dve fiksne tačke konstantna. Ako se u sistem uvede i treća bazna stanica, k , i ako je poznata razlika rastojanja $r_i - r_k$, gde je r_k rastojanje između mobilne stanice i k -te bazne stanice, lokacija mobilne stanice ograničena je na drugu hiperbolu u čijoj se žiži nalaze bazne stanice i i k . Najzad, konačna lokacija mobilne stanice nalazi se u preseku ove dve hiperbole, što je prikazano na slikama 4.3 [2].

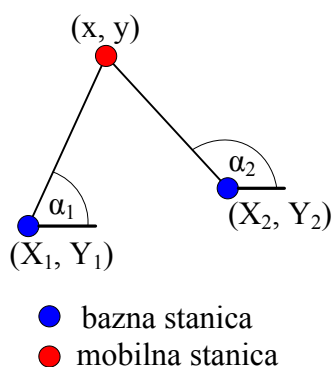


Slika 4.3. 2D hiperbolička lateracija.

Detaljna analiza određivanja lokacije mobilne stanice primenom postupka hiperboličke lateracije data je u poglavlju 5.2.2.

4.2.3. Angulacija

Angulacija je postupak određivanja nepoznate lokacije mobilne stanice na osnovu poznatih uglova između mobilne stanice i baznih stanica. Osnovni princip rada postupka angulacije prikazan je na slici 4.4 [2]. Bazna stanica meri ugao pod kojim nailazi signal sa mobilne stanice i time ograničava lokaciju mobilne stanice na liniju koja prolazi i kroz mobilnu i kroz baznu stanicu. Ako se uvede još jedna bazna stanica, definisana je još jedna linija mogućih lokacija mobilne stanice. Konačna lokacija mobilne stanice nalazi se u preseku ove dve linije. Važna napomena je da se uglovi pod kojim nailaze signali sa mobilne stanice uvek mere u odnosu na istu osu za sve bazne stanice.



Slika 4.4. Angulacija.

Detaljna analiza određivanja lokacije mobilne stanice primenom postupka angulacije data je u poglavlju 5.1.

4.2.4. *Fingerprinting*

Iako nisu standardizovane, metode pozicioniranja zasnovane na principu *fingerprinting*-a [22], [28] su vrlo popularne kako u ćelijskim sistemima tako i za potrebe pozicioniranja u *indoor* uslovima (najčešće u WLAN infrastrukturi). Osnovna ideja kod metoda baziranih na *fingerprinting*-u zasniva se na detekciji lokacije mobilne stanice na osnovu propagacionih karakteristika radio signala koje ta mobilna stanica meri na određenom mestu u mreži. Iako se pod pojmom pozicioniranja primenom *fingerprinting*-a podrazumevaju različiti algoritmi, u svom izvornom obliku *fingerprinting* pozicioniranje se izvodi u dve faze:

1. *Off-line (training)* i
2. *On-line (positioning)* faza.

Cilj *training* faze je generisanje baze podataka koja će biti korišćena tokom procesa pozicioniranja. U ovoj fazi zona od interesa se najpre izdela na manje celine, a zatim se u svakoj od njih izvrši merenje snage signala od više baznih stanica ili AP koje mobilna stanica/terminal 'vidi' sa tog mesta. Merenje se vrši u prethodno izabranim i na odovarajući način raspoređenim tačkama, koje se zovu referentne tačke, RPs (*Reference Points*). Vektor vrednosti snage signala (RSS parametar) baznih stanica/AP koji je mobilna stanica/terminal izmerio u poznatoj tački naziva se *fingerprint*. Ovi vektori i odgovarajuće koordinate na kojima su dobijeni pamte se u bazi podataka operatora. Primer vektora za k -tu referentnu tačku na primeru WLAN (*indoor*) pozicioniranja je oblika

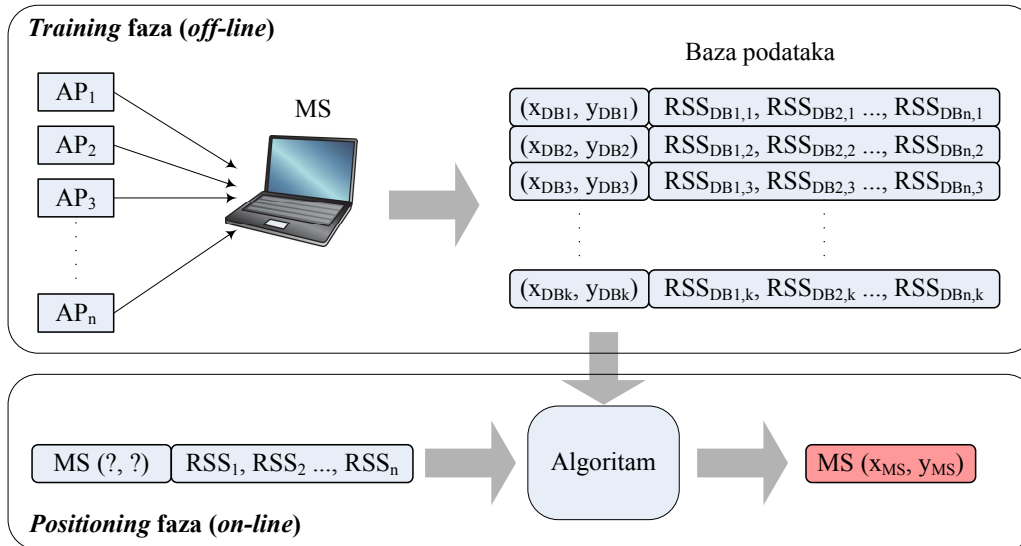
$$\overrightarrow{RSS_{DBk}} = [x_{DBk}, y_{DBk} | RSS_{DB1,k}, RSS_{DB2,k}, \dots, RSS_{DBn,k}] \quad (4.1)$$

gde su x_{DBk} i y_{DBk} Dekartove koordinate k -te referentne tačke, a n je broj AP u okviru posmatrane WLAN infrastrukture. Ponavljanjem ovog postupka za sve referentne tačke kompletira se *training* faza *fingerprinting* metode. Kreirana baza podataka se često naziva i radio mapa (*radio map*) [29].

Proces stvarnog pozicioniranja započinje u drugoj fazi. Mobilni terminal koji se nalazi na nekoj lokaciji unutar zone u kojoj se vrši pozicioniranje meri u toj tački snage signala od svih AP i formira otisak tj. *fingerprint* (vektor snage signala RSS sa svih AP u toj tački)

$$\overrightarrow{RSS} = [RSS_1, RSS_2, \dots, RSS_n]. \quad (4.2)$$

Ovaj *fingerprint* se poredi sa svakim *fingerprint*-om iz baze podataka formirane u *off-line* fazi i na osnovu nekog od algoritama pronalazi najsličniji *fingerprint* na osnovu čega se zatim procenjena lokacija mobilnog terminala samo očitava iz iste baze podataka. Najčešće korišćeni algoritam u ove svrhe je traženje rastojanja u prostoru signala, SSD (*Signal Space Distance*) između dobijenog *fingerprint*-a i onih iz baze podataka. Ilustracija *fingerprinting* metode pozicioniranja data je na slici 4.5.



Slika 4.5. *Fingerprinting*.

Veći broj algoritama se može koristiti za estimaciju pozicije mobilnog korisnika. Osnovni je algoritam najbližeg suseda, NNSS (*Nearest Neighbour in Signal Space*) ili samo NN (*Nearest Neighbour*). Rastojanje u prostoru signala između izmerenog vektora snage signala i m -tog *fingerprint*-a u bazi podataka se računa po formuli [30]

$$L_{q,m} = \left(\sum_{i=1}^n |RSS_{DBi,m} - RSS_i|^q \right)^{\frac{1}{q}}. \quad (4.3)$$

Vrednost parametra q je najčešće 1 ili 2. Za $q=1$ dobija se *Manhattan* rastojanje, a za $q=2$ Euklidsko rastojanje. Kod NN algoritma, procenjene koordinate mobilne stanice su koordinate one referentne tačke čiji *fingerprint* ima najmanje rastojanje u prostoru signala sa izmerenim vektorom snage signala u tački u kojoj se pozicioniranje vrši tj.

$$L_{q,m MS} = \min_{1 \leq m \leq M} L_{q,m} \quad (4.4)$$

gde je M ukupan broj referentnih tačaka, a procenjene koordinate su (x_{mMS}, y_{mMS}) .

Umesto da se uzme samo referentna tačka sa najmanjim rastojanjem u prostoru signala, mogu se dobijena rastojanja poređati u neopadajućem redosledu i uzeti prvih K tačaka sa najmanjim rastojanjima. Procenjena lokacija mobilnog korisnika (x_{MS}, y_{MS}) se u ovom slučaju nalazi usrednjavanjem koordinata tih K referentnih tačaka

$$x_{MS} = \frac{\sum_{i=1}^K x_i}{K} \quad (4.5)$$

$$y_{MS} = \frac{\sum_{i=1}^K y_i}{K}. \quad (4.6)$$

Ovo je način realizacije KNN (*K Nearest Neighbours*) algoritma.

Takođe, izračunata rastojanja u prostoru signala se mogu koristiti kao težinski faktori pri estimaciji lokacije i u tom slučaju reč je o KWNN (*K Weighted Nearest Neighbours*) algoritmu, po kom su procenjene koordinate mobilnog terminala

$$x_{MS} = \frac{\sum_{i=1}^K \frac{1}{L_{q,i}} x_i}{\sum_{i=1}^K \frac{1}{L_{q,i}}} \quad (4.7)$$

i

$$y_{MS} = \frac{\sum_{i=1}^K \frac{1}{L_{q,i}} y_i}{\sum_{i=1}^K \frac{1}{L_{q,i}}}. \quad (4.8)$$

Tri prikazana algoritma predstavljaju deterministički pristup određivanju nepoznate lokacije mobilnog korisnika. Iako deterministički metod daje dobru tačnost pozicioniranja, on odbacuje veliku količinu informacija prisutnih u podacima dobijenim u *training* fazi [30]. U svakom *fingerprint*-u se nalaze podaci o nivoima snage signala sa AP, ali su u determinističkom pristupu oni dobijeni samo kao srednja ili medijanska vrednost sekvence vrednosti snage signala snimljene na toj lokaciji. Snaga signala na svakoj lokaciji može biti okarakterisana većim brojem parametara, a ne samo srednjom vrednošću. Kako bi se povećala tačnost pozicioniranja, bilo bi bolje uzeti u obzir što veću količinu informacija, sadržanih u sekvenci vrednosti snage signala snimljenih na svakoj od lokacija, kada se vrši poređenje ulaza sa bazom podataka u *on-line* fazi. Ovo je ideja probabilističkog pristupa, gde se često koristi *Bayes*-ovo pravilo u obliku

$$p(l_t|o_t) = p(o_t|l_t)p(l_t)N \quad (4.9)$$

gde je l_t lokacija korisnika u vremenskom trenutku t , o_t je observacija načinjena u trenutku t , tj. vrednosti snage signala koje je mobilni terminal izmerio u trenutku t . N je faktor normalizacije koji obezbeđuje da je suma svih verovatnoća jednaka jedinici. Drugim rečima, verovatnoća da se mobilni terminal, koji observira o_t u trenutku t nalazi na lokaciji l_t jednaka je proizvodu verovatnoće da mobilni terminal observira o_t na lokaciji l_t i verovatnoće da se nalazi na lokaciji l_t , sve to u trenutku t . U toku procesa lokalizacije, uslovna verovatnoća $p(l_t|o_t)$ se računa za sve *fingerprint*-ove u bazi. Rezultat probabilističkog pristupa procesu pozicioniranja je lokacija za koju je ova uslovna verovatnoća najveća. Da bi se izračunala $p(l_t|o_t)$

potrebno je izračunati dve verovatnoće sa desne strane jednakosti. $p(o_i|l_i)$ se može izračunati korišćenjem radio mape dobijene u prvoj fazi *fingerprinting* algoritma. Za svaku *fingerprint*, frekvencija pojavljivanja svake od vrednosti snage signala se koristi kako bi se generisala funkcija gustine verovatnoće $p(o_i|l_i)$. Najčešće se dobijeni podaci predstavljaju u vidu histograma ili diskretizovane Gausove raspodele parametrizovane korišćenjem srednje vrednosti i standardne devijacije. Što se tiče verovatnoće $p(l_i)$, uzima se da je uniformna što je u skladu sa njenom prirodom, jer je pri svakom pokušaju pozicioniranja jednako verovatno da će se mobilni korisnik naći u bilo kojoj od tačaka unutar oblasti u kojoj se pozicioniranje vrši [30]. U cilju postizanja veće tačnosti, ovu verovatnoću je moguće računati na osnovu predznanja o najverovatnijem položaju korisnika, njegovim prethodnim pozicijama, navikama...

Probabilistički pristup proračunu lokacije mobilnog terminala daje veću tačnost od determinističkog pristupa. Poboljšanje koje unosi je reda 20% za medijansku vrednost greške, i 30% poboljšanja za vrednost 90% greške (to je vrednost greške koja je prevaziđena u samo 10% slučajeva pozicioniranja) [31]. Treba primetiti da pored prednosti probabilističkog pristupa on ima i svoje nedostatke. To je prvenstveno veće računarsko opterećenje u odnosu na deterministički pristup zbog potrebe za kompleksnijim proračunima, i veće memorijsko opterećenje zbog većeg broja informacija koje o svakom *fingerprint*-u treba čuvati.

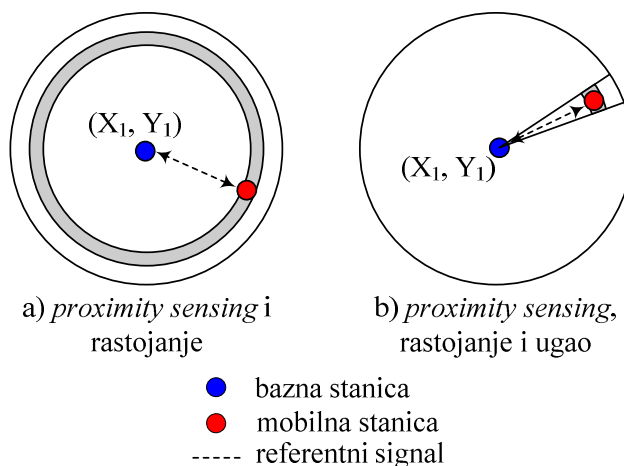
Na kraju treba naglasiti i moguću alternativu *fingerprinting*-u kao metodi izbora u *indoor* uslovima. To su metode blizinsko lociranja (*proximity sensing*) kao i lateracione metode. Metode blizinskog lociranja najčešće ne pokazuju dovoljnu tačnost obzirom da ista zavisi od broja instaliranih AP u unutrašnjosti objekta, tj. od granularnosti. U najboljem slučaju, maksimalna greška pozicioniranja iznosi oko polovine rastojanja između dva AP-a. Kada su u pitanju lateracione metode, nepoznata lokacija terminala se dobija rešavanjem lateracionih algoritama (cirkularnih i hiperboličkih), gde se nepoznata rastojanja ili razlike rastojanja dobijaju na osnovu merenog parametra RSS i primenom nekog modela propagacije u *indoor* uslovima. Ipak, brojni su izazovi koji prate izbor odgovarajućeg modela propagacije u *indoor* uslovima. Naime, *indoor* okruženja se odlikuju vrlo složenom radio propagacijom, praćenom velikim i često teško predvidivim varijacijama RSS parametra. Postoji nekoliko razloga koji utiču na varijacije RSS u *indoor* uslovima. Zbog strukture *indoor* okruženja i prisustva različitih prepreka, kao što su zidovi, vrata, nameštaj, prisutna je *multipath* propagaciju signala i fading, zbog čega RSS varira u vremenu na jednoj istoj lokaciji. Takođe, WLAN (koja je najčešća tehnologija kratkog dometa u unutrašnjosti objekata) koristi nelicenciran frekventijski opseg na 2.4GHz (ISM *frequency band*) pa interferencija u ovom opsegu može biti izražena od izvora kao što su bežični telefoni, *bluetooth* uređaji i mikrotalasne rerne. Prisustvo ljudskog tela takođe utiče na RSS parametar time što absorbuje deo energije WLAN signala, čija se frekvencija poklapa sa rezonantnom frekvencijom vode, koja čini najveći procenat (70%) ljudskog tela [32]. Stoga, orijentacija čoveka koji meri kao i instrumenta kojim se vrši merenje RSS parametra utiče na njegovu vrednost [32], [33], [34]. Svi gore navedeni razlozi doprinose činjenici da je veoma teško naći dobar propagacioni model koji će opisati vezu nivoa snage signala i rastojanja, odnosno, pozicije korisnika u *indoor* uslovima. Zbog toga se za pozicioniranje u unutrašnjosti objekata najčešće koristi *fingerprinting* algoritam kao 'brute force' metod pozicioniranja.

U ćelijskim sistemima, pozicioniranje bazirano na *fingerprinting*-u se uglavnom realizuje kao *mobile-assisted* varijanta [35], obzirom da neophodna merenja vrši mobilna stanica koja izmerene podatke šalje mreži gde se i vrši proračun

nepoznate lokacije. Ipak, *fingerprinting* je najčešće metoda izbora i u *indoor* uslovima, gde je najpopularnija primena u kombinaciji sa WLAN.

4.2.5. Hibridna rešenja

U cilju povećanja tačnosti postupka pozicioniranja, česte su kombinacije metoda koje na različite načine određuju nepoznatu lokaciju mobilne stanice. Iako su teorijski sve kombinacije moguće, u praksi je najčešći hibrid identifikacije najbližeg predajnika i podatka o rastojanju i/ili uglu. Ova kombinacija posebno je popularna u ćelijskim radio mrežama gde se kombinuje metod identifikacije najbližeg predajnika, tj servisne bazne stanice, i rastojanja između mobilne i servisne bazne stanice. Rastojanje između mobilne i servisne bazne stanice procenjuje se na osnovu parametra koji se u ćelijskim sistemima koristi za sinhronizaciju, i izvorno nema nikakve veze sa pozicioniranjem. Ovaj parametar bazna stanica određuje merenjem vremena za koje signal pređe put od servisne bazne stanice do mobilne i nazad (*round trip time*), i na osnovu njega procenjuje rastojanje između mobilne i servisne bazne stanice. Na taj način, pozicija mobilne stanice dodatno je ograničena na kružni prsten ili na deo kružnog prstena oko servisne bazne stanice. Debljina ovog prstena određena je rezolucijom *round trip time* parametra iz kojeg se i procenjuje nepoznato rastojanje. Ako je bazna stanica dodatno opremljena i antenskim nizom, moguće je dalje ograničiti lokaciju mobilne stanice, kao što je prikazano na slici 4.6 [2].



Slika 4.6. Hibridna rešenja: a) *proximity sensing* i rastojanje; b) *proximity sensing*, rastojanje i ugao.

4.3. Klasifikacija metoda pozicioniranja prema matematičkom pristupu određivanju lokacije

Prema matematičkom pristupu određivanju lokacije mobilne stanice, tačnije, prema karakteristikama matematičkog modela koji se koristi za potrebe pozicioniranja, metode pozicioniranja se dele na:

1. determinističke i
2. probablističke.

4.3.1. Determinističke metode

U determinističkim metodama, problem pozicioniranja se obično modeluje kao problem rešavanja preseka skupa kružnica ili hiperbola, gde su procene o rastojanjima dobijene merenjem vremena (TOA) ili vremenskih razlika propagacije signala (TDOA). Ovo su zapravo klasični primeri lateracionih algoritama [19], [36], [37], [38]. Stoga, najveći zadatak u primeni ovih metoda je da se nađe dobar algoritam za rešavanje sistema nelinearnih jednačina. Čest problem predstavlja osetljivost na tačnost ulaznih podataka, što može dovesti do pojave višestrukih rešenja ili čak izostanka bilo kakvog rešenja, tj. nemogućnosti procene lokacije mobilne stanice. Još jedan od problema u primeni determinističkih metoda predstavlja pojava viška ulaznih podataka što za posledicu može imati nekonzistentna rešenja procene lokacije mobilne stanice.

4.3.2. Probabilističke metode

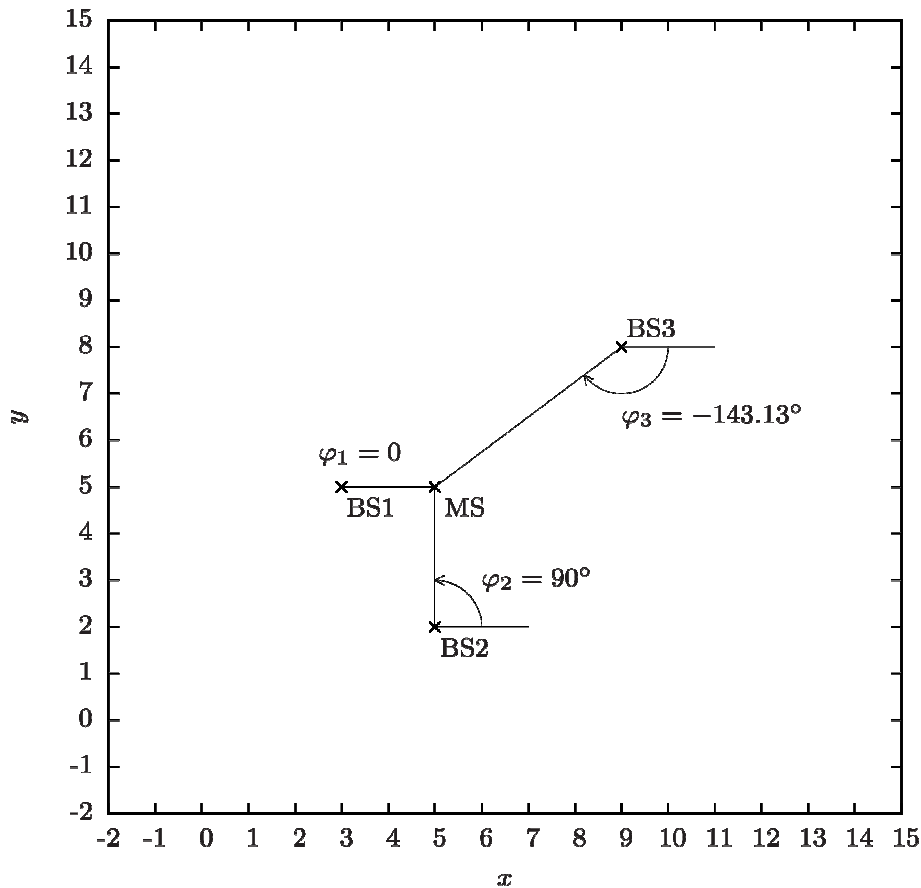
Za razliku od determinističkih, probabilističke metode pozicioniranja baziraju se na probabilističkim modelima kojima se opisuje zavisnost karakteristika signala koje prima mobilna stanica od lokacije mobilne stanice. Probabilistički algoritmi [39], [40], [41], [42] tretiraju ulazne podatke o lokaciji mobilne stanice kao prostorne funkcije gustine verovatnoće, i združuju ih u cilju poboljšanja procene lokacije mobilne stanice.

5. Determinističke metode pozicioniranja

Determinističke metode pozicioniranja primenjuju geometrijske relacije za određivanje nepoznate lokacije mobilne stanice (MS) na osnovu poznatih koordinata referentnih tačaka i poznatih rastojanja/uglova sračunatih na osnovu izmerenih parametara signala RSS, TOA, TDOA ili AOA. Scenario pozicioniranja podrazumeva da su na raspolaganju tačke poznatih koordinata, tzv. referentne tačke, a da se lokacija mobilne stanice određuje primenom determinističkih algoritama. U okviru ovog poglavlja razmatraće se sve determinističke metode pozicioniranja uz pretpostavku da se mobilna stanica i referentne tačke nalaze u istoj ravni, tj. da je problem dvodimenzionalan. Takođe, bez smanjenja opštosti, smatraće se da su referentne tačke bazne stanice (BS), tj. da se radi o ćelijskim radio sistemima.

5.1. Angulacija

Angulacija je deterministička metoda određivanja nepoznate lokacije mobilne stanice na osnovu poznatih uglova prispeća signala sa mobilne stanice do najmanje dve referentne tačke, tj. bazne stanice [38], [43]. Dakle, posmatra se scenario gde su poznate koordinate bar dve bazne stanice (x_{BSk}, y_{BSk}) , $k \in \{1, 2\}$, kao i ugao φ_k , $k \in \{1, 2\}$ pod kojim signal sa mobilne stanice stiže do bazne stanice BSk. U ravni, ovo je ugao između poluprave koja polazi od bazne stanice BSk i prolazi kroz lokaciju MS i pozitivnog smera x -ose, $y = 0, x > 0$. Ovi uglovi bi se realno određivali u odnosu na azimut (pravac severa), dok je ovde izabran kao referentni pozitivan smer x -ose (pravac istoka). Ovakav referentni smer izabran je radi usklađivanja sa notacijom u analitičkoj geometriji. Na slici 5.1 prikazan je primer primene angulacije za slučaj kada signal sa MS koja je na lokaciji $(x_{MS}, y_{MS}) = (5, 5)$ dolazi do tri bazne stanice pod poznatim vrednostima ugla (tj. parametra AOA): $(x_{BS1}, y_{BS1}) = (3, 5)$ pod uglom $\varphi_1 = 0$, $(x_{BS2}, y_{BS2}) = (5, 2)$ pod uglom $\varphi_2 = 90^\circ$, i $(x_{BS3}, y_{BS3}) = (9, 8)$ pod uglom $\varphi_3 = -143.13^\circ$.



Slika 5.1. Angulacija.

Poznate koordinate baznih stanica kao i uglovi prispeća signala od mobilne stanice do baznih stanica lociraju MS na liniji

$$\frac{y_{MS} - y_{BSk}}{x_{MS} - x_{BSk}} = \tan \varphi_k \quad (5.1)$$

što se može transformisati u

$$y_{MS} - x_{MS} \tan \varphi_k = y_{BSk} - x_{BSk} \tan \varphi_k \quad (5.2)$$

u slučaju kada $\varphi_k \neq \pi/2 + n\pi$, $n \in \mathbb{Z}$, tj. $x_{BSk} \neq x_{MS}$. U slučaju kada je $\varphi_k = \pi/2 + n\pi$, jednačina se degeneriše u

$$x_{MS} = x_{BSk}. \quad (5.3)$$

Ugao prispeća signala nosi mnogo više informacija nego što se to može videti iz jednačine (5.1), jer locira MS na pravcu datom izrazom (5.2) i $x_{MS} > x_{BSk}$, za $-\pi/2 < \varphi_k < \pi/2$, ili na pravcu $x_{MS} < x_{BSk}$, za $-\pi < \varphi_k < -\pi/2$ ili $\pi/2 < \varphi_k < \pi$. Ovo se može koristiti i kao grubi test konzistentnosti rešenja u slučaju loše uslovljenog sistema jednačina.

Za određivanje lokacije MS metodom angulacije potrebne su bar dve bazne stanice. U opštem slučaju, dve bazne stanice $k \in \{1, 2\}$ formiraju sistema jednačina

$$\begin{bmatrix} \tan \varphi_1 & -1 \\ \tan \varphi_2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{MS} \\ y_{MS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{BS1} \tan \varphi_1 - y_{BS1} \\ x_{BS2} \tan \varphi_2 - y_{BS2} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

pod pretpostavkom da $\tan \varphi_k$ ima konačnu vrednost. U suprotnom, odgovarajuću jednačinu treba zameniti jednačinom u formi (5.3).

U slučaju kada je $\tan \varphi_1 = \tan \varphi_2$ bazne stanice i MS čija se lokacija određuje se nalaze u istoj liniji, kada sistem (5.4) postaje singularan. U tom slučaju neophodan je još jedan izvor informacija, tačnije još jedna bazna stanica sa svojim uglom prispeća signala od MS. Potrebno je takođe da se ta dodatna bazna stanica ne nalazi u istoj liniji kao dve bazne stanice inicijalno korišćene za pozicioniranje. Štaviše, već i položaj kada se bazne stanice i mobilna stanica nalaze u skoro istoj liniji (*close-to-line*) rezultira problemima u pozicioniranju jer čini da je sistem jednačina (5.4) loše uslovljen. U tom slučaju uvode se dodatne bazne stanice, pri čemu treba izbegavati one koje su u *close-to-line* položaju. U primeru sa slike 5.1 dostupne su tri bazne stanice, i uzimanjem bilo koje dve dobiće se tačna lokacija MS, obzirom da će sistem jednačina (5.4) biti dobro uslovljen, kao i da su izmereni uglovi prispeća signala tačni, tj. ne postoji greška merenja. U slučaju kada je u pozicioniranje uključena bazna stanica BS2, treba koristiti jednačinu u formi (5.3).

U praksi, obično je na raspolaganju više od dva izvora informacije, tj. više od dve bazne stanice u kom slučaju nastaje predefinisam sistem jednačina

$$\begin{bmatrix} \tan \varphi_1 & -1 \\ \vdots & \vdots \\ \tan \varphi_n & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{MS} \\ y_{MS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{BS1} \tan \varphi_1 - y_{BS1} \\ \vdots \\ x_{BSn} \tan \varphi_n - y_{BSn} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

gde $n \in N$ i $n \geq 2$. Sistem jednačina (5.5) se može pisati u matričnoj formi

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} x_{MS} \\ y_{MS} \end{bmatrix} = \mathbf{b} \quad (5.6)$$

gde se matrica \mathbf{A} naziva sistemska matrica (matrica koeficijenata), dok je \mathbf{b} tzv. *right-hand-side* vektor (vektor slobodnih članova). Sistem (5.6) se može rešiti metodom najmanjih kvadrata [44] formirajući kvadratni sistem

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \begin{bmatrix} x_{MS} \\ y_{MS} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^T \mathbf{b}. \quad (5.7)$$

Za određivanje lokacije mobilne stanice u tri dimenzije, potrebno je da budu poznate koordinate najmanje dve bazne stanice u 3D prostoru, kao i dva ugla prispeća signala (azimut i elevacija) sa svake od baznih stanica do mobilne stanice. Sa minimalno dve bazne stanice i po dva merena ugla, dobija se predefinisam sistem jednačina po tri koordinate mobilne stanice. U praksi, dva pravca definisana azimutom i elevacijom retko će rezultirati jedinstvenim presekom usled prisustva

greškaka merenja ovih uglova. U ovom slučaju, primenjuje se metod najmanjih kvadrata (5.7), čak i kada u sistemu postoje samo dve bazne stanice. Treba naglasiti da je za pozicioniranje mobilne stanice u 3D prostoru primenom angulacije i dalje dovoljno samo dve bazne stanice, kao i u 2D prostoru.

U literaturi se često javlja tehnika pozicioniranja slična opisanoj, pod nazivom triangulacija. Naziv potiče od toga što se mobilna stanica čija se lokacija određuje nalazi u temenu trougla, dok se u preostala dva temena nalaze bazne stanice. Za pozicioniranje mobilne stanice koriste se dva ugla, koja se često mere u odnosu na poziciju druge bazne stanice, ali se mogu preračunati na način prikazan u okviru ovog poglavlja.

5.2. Lateracije

Za razliku od angulacije, u okviru lateracionih determinističkih metoda lokacija nepoznate MS određuje se na osnovu poznatih rastojanja ili razlika rastojanja između mobilne stanice i baznih stanica.

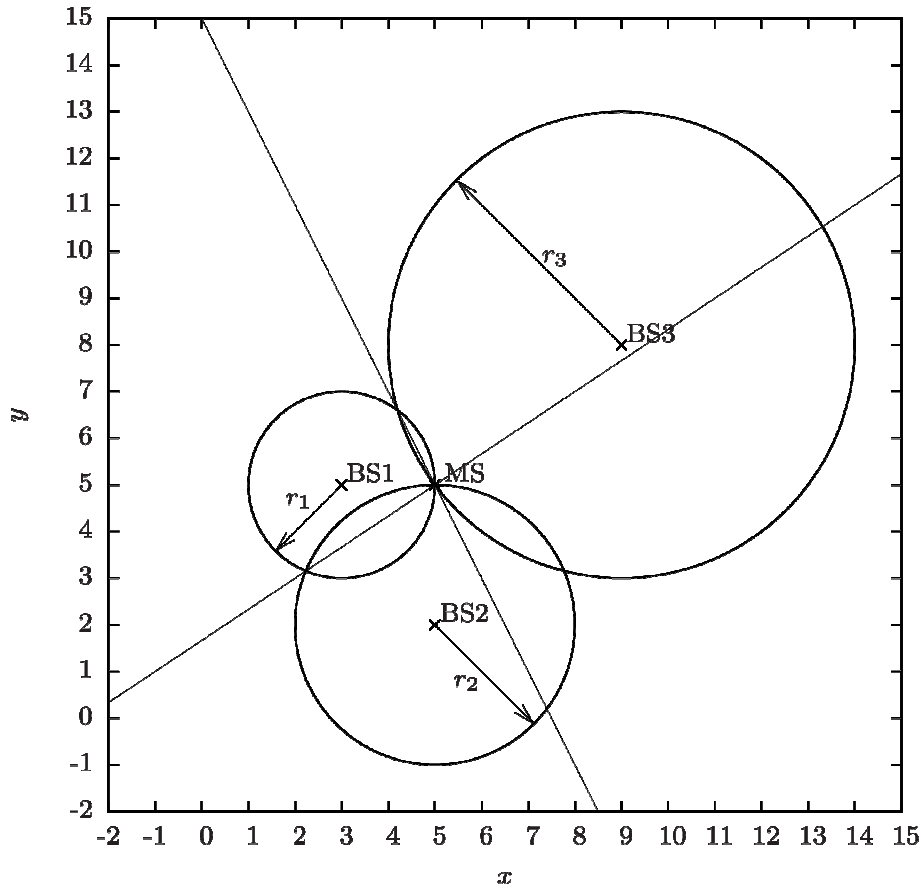
5.2.1. Cirkularna lateracija

Cirkularna lateracija je deterministička metoda koja se zasniva na informaciji o poznatom rastojanju r_k između mobilne stanice i najmanje tri bazne stanice, BS_k , $k \in \{1, \dots, n\}$, $n \geq 3$ [38], [43]. Kao i do sada, podrazumeva se da su koordinate baznih stanica (x_{BS_k}, y_{BS_k}) poznate. Na slici 5.2 dat je primer cirkularne lateracije u kojem učestvuju iste bazne stanice kao i u primeru angulacije (slika 5.1), sa razlikom da su umesto uglova φ_k poznata rastojanja r_k između MS čija se lokacija određuje i baznih stanica.

Minimalni sistem jednačina za cirkularnu lateraciju je

$$(x_{MS} - x_{BS_k})^2 + (y_{MS} - y_{BS_k})^2 = r_k^2 \quad (5.8)$$

za $k \in \{1, 2, 3\}$. Ovaj sistem jednačina je nelinearan. U skladu sa geometrijskom interpretacijom prikazanoj na slici 5.2, svaka od jednačina (5.8) predstavlja krug u čijem se centru nalazi bazna stanica, odakle i potiče naziv cirkularna lateracija. Ako je sistem jednačina konzistentan, svaki par kružnica daje dve presečne tačke, pa informaciju gde se tačno nalazi MS obezbeđuje treća bazna stanica koja konačno određuje koja od ove dve presečne tačke je lokacija MS. Problem postaje mnogo složeniji u slučaju kada postoji i greška merenja rastojanja, kada se može desiti da ne postoji jedinstveni presek sve tri kružnice. Izuzetak od ovog slučaja predstavlja scenario u kojem su bazne stanice i MS locirane na istoj liniji, što rezultira tangentnim kružnicama. U ovom slučaju za određivanje lokacije MS primenom cirkularne lateracije neće biti potrebna treća bazna stanica. Takođe, usled postojanja greške merenja rastojanja može se javiti i situacija kada se kružnice uopšte ne seku.



Slika 5.2. Cirkularna lateracija.

Nelinearni sistem jednačina (5.8) može se transformisati u linearni sistem jednačina [37] primenom algebarskih transformacija. Rešavanje linearizacijom izbegava primenu složenih metoda za rešavanje nelinearnih jednačina kao i probleme usled neodređenosti rešenja u slučaju kada se preseki kružnica ne poklapaju. Postupak linearizacije je jednostavan i počinje razvojem kvadrata binoma iz (5.8), tj.

$$x_{MS}^2 - 2x_{MS}x_{BSk} + x_{BSk}^2 + y_{MS}^2 - 2y_{MS}y_{BSk} + y_{BSk}^2 = r_k^2. \quad (5.9)$$

Sledeći korak je da se svi kvadratni članovi prebace na desnu stranu

$$-2x_{MS}x_{BSk} - 2y_{MS}y_{BSk} = r_k^2 - x_{BSk}^2 - y_{BSk}^2 - x_{MS}^2 - y_{MS}^2 \quad (5.10)$$

nakon čega se jednačina za $k = 1$ pomnoži sa -1

$$2x_{MS}x_{BS1} + 2y_{MS}y_{BS1} = -r_1^2 + x_{BS1}^2 + y_{BS1}^2 + x_{MS}^2 + y_{MS}^2 \quad (5.11)$$

i doda na preostale dve jednačine. Kvadratni članovi x_{MS}^2 i y_{MS}^2 se tim postupkom poništavaju (zbog čega se jednačina za $k = 1$ često naziva i 'izbijač'), nakon čega se dobija linearni sistem dve jednačine u formi

$$2(x_{BS1} - x_{BSk})x_{MS} + 2(y_{BS1} - y_{BSk})y_{MS} = r_k^2 - r_1^2 + x_{BS1}^2 - x_{BSk}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BSk}^2 \quad (5.12)$$

za $k = \{2, 3\}$. Svaka od jednačina u formi (5.12) predstavlja pravu u (x, y) ravni. Kao što se moglo videti iz opisanog postupka linearizacije, jednačine ovih pravih dobijene su iz jednačine kružnica i zadovoljavaju obe presečne tačke ovih kružnica, ukoliko preseki postoje. Dakle, prava dobijena iz jednačina kružnica zapravo prolazi kroz preseke tih kružnica i geometrijska interpretacija ovoga se može videti i na slici 5.2 gde su prikazane obe prave dobijene postupkom linearizacije.

Sistem jednačina (5.12) može se predstaviti i u matričnoj formi

$$\begin{bmatrix} x_{BS1} - x_{BS2} & y_{BS1} - y_{BS2} \\ x_{BS1} - x_{BS3} & y_{BS1} - y_{BS3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{MS} \\ y_{MS} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_2^2 - r_1^2 + x_{BS1}^2 - x_{BS2}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BS2}^2 \\ r_3^2 - r_1^2 + x_{BS1}^2 - x_{BS3}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BS3}^2 \end{bmatrix}. \quad (5.13)$$

U slučaju kada se sve tri bazne stanice nalaze u istoj liniji, njihove koordinate zadovoljavaju

$$\frac{y_{BS1} - y_{BS2}}{x_{BS1} - x_{BS2}} = \frac{y_{BS1} - y_{BS3}}{x_{BS1} - x_{BS3}} \quad (5.14)$$

što rezultira da je sistem (5.13) singularan, tj. determinanta sistemske matrice je jednaka nuli. U tom slučaju je potreban još jedan izvor informacija, tj. još jedna (četvrta) bazna stanica, slično kao i u slučaju angulacije. Dodatna bazna stanica ne sme biti u istoj liniji kao bazne stanice inicijalno korišćene za pozicioniranje. Treba naglasiti da veliki problem u pozicioniranju primenom cirkularne lateracije pravi i slučaj kada su bazne stanice skoro u istoj liniji (*close-to-line*). U tom slučaju sistem (5.13) je loše uslovljen i javlja se velika osetljivost procenjene lokacije na greške merenja rastojanja. Dakle, kao i u slučaju angulacije, i u slučaju cirkularne lateracije preporuka je izbegavati bazne stanice koje su u *close-to-line* međusobnom položaju.

Kada je na raspolaganju više baznih stanica i procenjenih rastojanja od minimalno potrebnog za cirkularnu lateraciju, tj. $n > 3$, sistem jednačina postaje predefinisani

$$\begin{bmatrix} x_{BS1} - x_{BS2} & y_{BS1} - y_{BS2} \\ \vdots & \vdots \\ x_{BS1} - x_{BSn} & y_{BS1} - y_{BSn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{MS} \\ y_{MS} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_2^2 - r_1^2 + x_{BS1}^2 - x_{BS2}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BS2}^2 \\ \vdots \\ r_n^2 - r_1^2 + x_{BS1}^2 - x_{BSn}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BSn}^2 \end{bmatrix}. \quad (5.15)$$

Ovaj sistem se može prikazati u istoj formi kao i u slučaju angulacije (5.6), pa se i rešava na isti način, tj. u formi (5.7).

Prethodna analiza podrazumevala je da su podaci konzistentni, što rezultira da se sve kružnice seku u istoj tački. Ipak, čak i u slučaju minimalnog broja baznih stanica malo je verovatno da će se u praksi desiti ovakav slučaj a mnogo verovatnije da će postojati više presečnih tačaka kružnica. Lokacija MS se određuje u preseku pravih koje prolaze kroz presečne tačke parova kružnica. U tom slučaju može se proveriti saglasnost rešenja i proceniti margina greške tako što se dobijeno rešenje zameni u jednačinu kružnica (5.8). Ovo se isto može primeniti i u slučaju kada se za rešavanje (5.15) primeni metoda najmanjih kvadrata (5.7).

Prikazani metod linearizacije jednačina cirkularne lateracije pravolinijski se može generalizovati i na 3D slučaj. U ovom slučaju, biće potrebna dodatna bazna stanica kako bi se obezbedilo dovoljno podataka za određivanje tri nepoznate koordinate mobilne stanice. Sistem jednačina ima sličnu formu kao (5.13) i (5.15).

5.2.2. Hiperbolička lateracija

Hiperbolička lateracija je deterministička metoda koja se zasniva na informaciji o poznatim razlikama rastojanja između mobilne stanice i para baznih stanica. Da bi se jednoznačno odredila lokacija MS primenom hiperboličke lateracije, potrebne su najmanje četiri bazne stanice, BS_k , $k \in \{1, \dots, n\}$, $n \geq 4$, kao i barem tri poznate razlike rastojanja između MS i ovih baznih stanica [38], [43]. Kao i do sada, podrazumeva se da su koordinate baznih stanica (x_{BS_k}, y_{BS_k}) poznate.

Za bolje razumevanje hiperboličke lateracije, posmatra se scenario u kojem je prva bazna stanica (BS1) locirana u tački $(x_{BS1}, y_{BS1}) = (c, 0)$, dok je druga bazna stanica (BS2) locirana u tački $(x_{BS2}, y_{BS2}) = (-c, 0)$. Pretpostavljeno je da je $c > 0$. Proizvoljan raspored baznih stanica može se transformisati u ovaj slučaj primenom translacije i rotacije koordinata, što će kasnije biti detaljno razmatrano. Rastojanje između baznih stanica iznosi $D = 2c$. Pretpostavlja se takođe da je mobilna stanica, locirana u (x_{MS}, y_{MS}) , za vrednost d udaljenija od BS2 nego od BS1, tj.

$$r_2 - r_1 = d \quad (5.16)$$

gde su

$$r_1 = \sqrt{(x_{MS} - c)^2 + y_{MS}^2} \quad (5.17)$$

i

$$r_2 = \sqrt{(x_{MS} + c)^2 + y_{MS}^2} \quad (5.18)$$

rastojanja između mobilne stanice i baznih stanica BS1 i BS2, respektivno. Treba naglasiti da d može biti i pozitivno i negativno, pozitivno u slučaju kada je BS1 bliža MS, i negativno u suprotnom slučaju. Prema nejednakosti trougla sledi

$$r_2 + 2c > r_1 \quad (5.19)$$

i

$$r_1 + 2c > r_2 \quad (5.20)$$

što posle algebarskih manipulacija limitira d na interval

$$-2c < d < 2c. \quad (5.21)$$

Radi pogodnije notacije, uvodi se

$$a = \frac{d}{2} \quad (5.22)$$

što je, prema (5.21), ograničeno na

$$-c < a < c. \quad (5.23)$$

Nakon uvođenja pomenute notacije, jednačina za razliku rastojanja (5.16) postaje

$$\sqrt{(x_{MS} + c)^2 + y_{MS}^2} - \sqrt{(x_{MS} - c)^2 + y_{MS}^2} = 2a \quad (5.24)$$

Da bi se uklonili koreni, jednačinu (5.24) potrebno je dva puta kvadrirati. Posle kvadriranja i algebarskih manipulacija, (5.24) se redukuje na

$$(c^2 - a^2)x_{MS}^2 - a^2 y_{MS}^2 - a^2(c^2 - a^2) = 0. \quad (5.25)$$

Na ovom mestu, pogodno je uvesti i parametar b kao

$$b^2 = c^2 - a^2 \quad (5.26)$$

što jednačinu (5.25) redukuje na

$$b^2 x_{MS}^2 - a^2 y_{MS}^2 - a^2 b^2 = 0. \quad (5.27)$$

Za $a \neq 0$ i $b \neq 0$, (5.27) se može prikazati u standardnoj formi

$$\frac{x_{MS}^2}{a^2} - \frac{y_{MS}^2}{b^2} = 1 \quad (5.28)$$

što je jednačina para hiperbola [44].

Od dve hiperbole definisane (5.28), jedna se nalazi u desnoj poluravni, $x > 0$, što odgovara pozitivnoj vrednosti rastojanja, $d > 0$, dok se druga nalazi u levoj poluravni što odgovara $d < 0$. U slučaju $d = 0$, što povlači i $a = 0$, u skladu sa (5.27) hiperbola se degeneriše u pravu

$$x_{MS} = 0 \quad (5.29)$$

što određuje skup tačaka podjednako udaljenih od BS1 i BS2.

Parametarski oblik hiperbole koja zadovoljava (5.27) dat je preko

$$x_{MS} = a \cosh t \quad (5.30)$$

i

$$y_{MS} = a \sinh t \quad (5.31)$$

gde je t pomoćna promenljiva. Za $d > 0$, tj. $a > 0$, parametarski predstavljena hiperbola je locirana u desnoj poluravni, dok je za $d < 0$ locirana u levoj poluravni, što ispunjava zahteve fizičkog modela. Osim toga, parametarski opis hiperbole pokriva i degenerativni slučaj $d = 0$, što je bitno u praksi. Na ovaj način, skup tačaka koji je za d udaljeniji od BS2 nego od BS1 određen je preko

$$x_{MS} = \frac{d}{2} \cosh t \quad (5.32)$$

i

$$y_{MS} = \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - d^2} \sinh t \quad (5.33)$$

gde je D rastojanje između baznih stanica

$$D = \sqrt{(x_{BS1} - x_{BS2})^2 + (y_{BS1} - y_{BS2})^2}. \quad (5.34)$$

Ova notacija je pogodna za crtanje hiperbola.

Daleko od centra hiperbole, koji je u razmatranom slučaju lociran u tački $(0, 0)$, za nedegenerativni slučaj $d \neq 0$, hiperbola se može aproksimirati asimptotskim pravama

$$y = \pm \frac{b}{a} x = \pm \sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1} \quad (5.35)$$

koji važi za $x > 0$ ako je $d > 0$, ili za $x < 0$ ako je $d < 0$. Aproksimacija hiperbole preko asimptota je pogodna u proceni broja preseka dve hiperbole. Osim toga, to kaže i da se u oblasti daleko od baznih stanica, $r_1, r_2 \gg D$, informacija o razlici rastojanja redukuje na ugao prispeća signala, uključujući neodređenost u pogledu asimptota koje odgovaraju dolazećem signalu, tj. koji znak se primenjuje u (5.35).

Za primenu u hiperboličkoj lateraciji, mora se uzeti u obzir da raspored baznih stanica može biti proizvoljan. To se može postići rotacijom i translacijom prethodno analiziranih hiperbola. Neka su koordinate baznih stanica (x_{BS1}, y_{BS1}) i (x_{BS2}, y_{BS2}) . Linija koja spaja BS1 i BS2 nagnuta je prema pravoj $x = 0$, $x > 0$ za ugao θ čiji su sinus i kosinus

$$\sin \theta = \frac{y_{BS1} - y_{BS2}}{D} \quad (5.36)$$

i

$$\cos \theta = \frac{x_{BS1} - x_{BS2}}{D}. \quad (5.37)$$

Rotacija linije koja povezuje bazne stanice za ugao θ u smeru suprotnom od smera kretanja kazaljke na satu dobija se množenjem vektora koordinata sa matricom rotacije

$$\begin{bmatrix} x_{new} \\ y_{new} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{old} \\ y_{old} \end{bmatrix}. \quad (5.38)$$

Centar hiperbole se nalazi na sredini između baznih stanica

$$\begin{bmatrix} x_C \\ y_C \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_{BS1} + x_{BS2} \\ y_{BS1} + y_{BS2} \end{bmatrix}. \quad (5.39)$$

Nakon rotacije i translacije, hiperbola je data preko

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \cosh t \\ b \sinh t \end{bmatrix} \quad (5.40)$$

što nakon odgovarajućih zamena biva predstavljen parametrima vezanim za pozicioniranje, tj.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_{BS1} + x_{BS2} \\ y_{BS1} + y_{BS2} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_{BS1} - x_{BS2} & -y_{BS1} + y_{BS2} \\ y_{BS1} - y_{BS2} & x_{BS1} - x_{BS2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d}{D} \cosh t \\ \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} \sinh t \end{bmatrix}. \quad (5.41)$$

U nekim situacijama može biti pogodnije prikazati hiperbolu preko jedne kvadratne forme po x i y , umesto preko dve parametarske jednačine. To se može postići zamenom

$$\cosh t = \frac{p^2 + 1}{2p} \quad (5.42)$$

i

$$\sinh t = \frac{p^2 - 1}{2p} \quad (5.43)$$

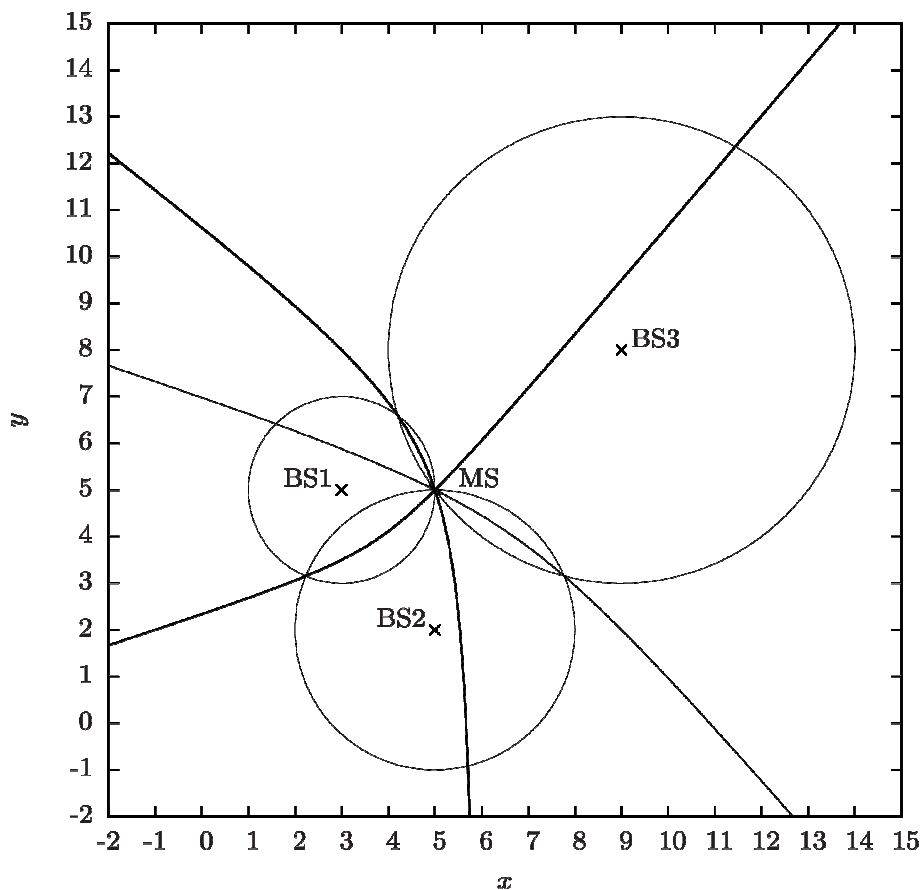
kao i eliminacijom pomoćne promenljive $p = e^t$ (očigledno, $p > 0$) i jedne od jednačina primenom algebarskih transformacija.

Za ilustraciju hiperboličke lateracije, posmatra se skup baznih stanica BS1: (3, 5), BS2: (5, 2), BS3: (9, 8) i mobilna stanica koja se nalazi u tački (5, 5), što je prikazano na slici 5.3. Isti scenario korišćen je i za prikaz angulacije i cirkularne lateracije (slike 5.1 i 5.2). Razlike rastojanja između baznih stanica i mobilne stanice su $d_2 = d_{2,1} = r_2 - r_1 = 1$ i $d_3 = d_{3,1} = r_3 - r_1 = 3$. Ove dve razlike rastojanja definišu dve

hiperbole čije su žiže (fokusi) lokacije baznih stanica BS1 i BS2, odnosno BS1 i BS3, respektivno, određene preko

$$-3x^2 + 12xy - 8y^2 - 18x + 8y + 25 = 0 \quad (5.44)$$

$$-27x^2 - 36xy + 558x + 216y - 2295 = 0. \quad (5.45)$$



Slika 5.3. Hiperbolička lateracija, jedinstveno rešenje.

Ove hiperbole prolaze kroz presečne tačke kružnica određenih koordinatama baznih stanica i procenjenim rastojanjima, slično kao što je to bio slučaj sa pravama dobijenim linearizacijom u postupku cirkularne lateracije (slika 5.2). Dodatna razlika rastojanja $d_{3,2}$ definisana kao

$$d_{3,2} = r_3 - r_2 = (r_3 - r_1) - (r_2 - r_1) = d_3 - d_2 \quad (5.46)$$

rezultira još jednom hiperbolom

$$-3x^2 - 12xy - 8y^2 + 102x + 164y - 755 = 0 \quad (5.47)$$

čije su žiže lokacije baznih stanica BS2 i BS3 (slika 5.3), ali je razlika rastojanja $d_{3,2}$ linearno zavisna od d_2 i d_3 pa stoga ne nosi nikakvu novu informaciju o lokaciji mobilne stanice.

Računanje lokacije MS metodom hiperboličke lateracije svodi se na traženje preseka prethodno definisanih hiperbola. Ovo se može rešiti direktno, tj. rešavanjem sistema nelinearnih jednačina koje proizilaze iz (5.16), slično kao sistem formiran od (5.44) i (5.45). Ovakav pristup zahteva iterativno rešenje iz čega proizilazi i pitanje konvergencije u vezi sa numeričkim metodama za sistem nelinearnih jednačina. Ipak, primenom odgovarajućih algebarskih transformacija ovaj problem je moguće redukovati na rešavanje jedne kvadratne jednačine ili čak sistema linearnih jednačina, slično kao u slučaju cirkularne lateracije.

Postupak počinje jednačinom (5.12) datom za slučaj cirkularne lateracije

$$2(x_{BS1} - x_{BSk})x_{MS} + 2(y_{BS1} - y_{BSk})y_{MS} = r_k^2 - r_1^2 + x_{BS1}^2 - x_{BSk}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BSk}^2. \quad (5.48)$$

Naravno, u slučaju hiperboličke lateracije procenjena rastojanja r_1 i r_k nisu poznata, ali jeste poznata razlika ovih rastojanja, tj.

$$d_k = d_{k,1} = r_k - r_1. \quad (5.49)$$

Najpre se eliminiše nepoznato r_k na način

$$r_k^2 - r_1^2 = (r_1 + d_k)^2 - r_1^2 = 2d_k r_1 + d_k^2. \quad (5.50)$$

Na ovaj način, nepoznato r_k je eliminisano dok je takođe nepoznato r_1 i dalje prisutno, samo u linearnoj formi. Nakon ove transformacije, skup jednačina (5.12) postaje

$$2(x_{BS1} - x_{BSk})x_{MS} + 2(y_{BS1} - y_{BSk})y_{MS} = 2d_k r_1 + d_k^2 + x_{BS1}^2 - x_{BSk}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BSk}^2 \quad (5.51)$$

što za $k \in \{2, 3\}$ rezultira sistemom jednačina koji se u matričnoj formi može pisati u obliku

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} x_{MS} \\ y_{MS} \end{bmatrix} = r_1 \mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_0 \quad (5.52)$$

gde je

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_{BS1} - x_{BS2} & y_{BS1} - y_{BS2} \\ x_{BS1} - x_{BS3} & y_{BS1} - y_{BS3} \end{bmatrix} \quad (5.53)$$

$$\mathbf{b}_1 = \begin{bmatrix} d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad (5.54)$$

i

$$\mathbf{b}_0 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} d_2^2 + x_{BS1}^2 - x_{BS2}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BS2}^2 \\ d_3^2 + x_{BS1}^2 - x_{BS3}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BS3}^2 \end{bmatrix}. \quad (5.55)$$

Rešenje linearnog sistema (5.52) je

$$\begin{bmatrix} x_{MS} \\ y_{MS} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b}_1 r_1 + \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b}_0 \quad (5.56)$$

gde je r_1 i dalje nepoznato, dok se nepoznate koordinate MS mogu izraziti u linearnoj funkciji od r_1

$$x_{MS} = k_x r_1 + n_x \quad (5.57)$$

i

$$y_{MS} = k_y r_1 + n_y. \quad (5.58)$$

Vrednost r_1 se računa iz

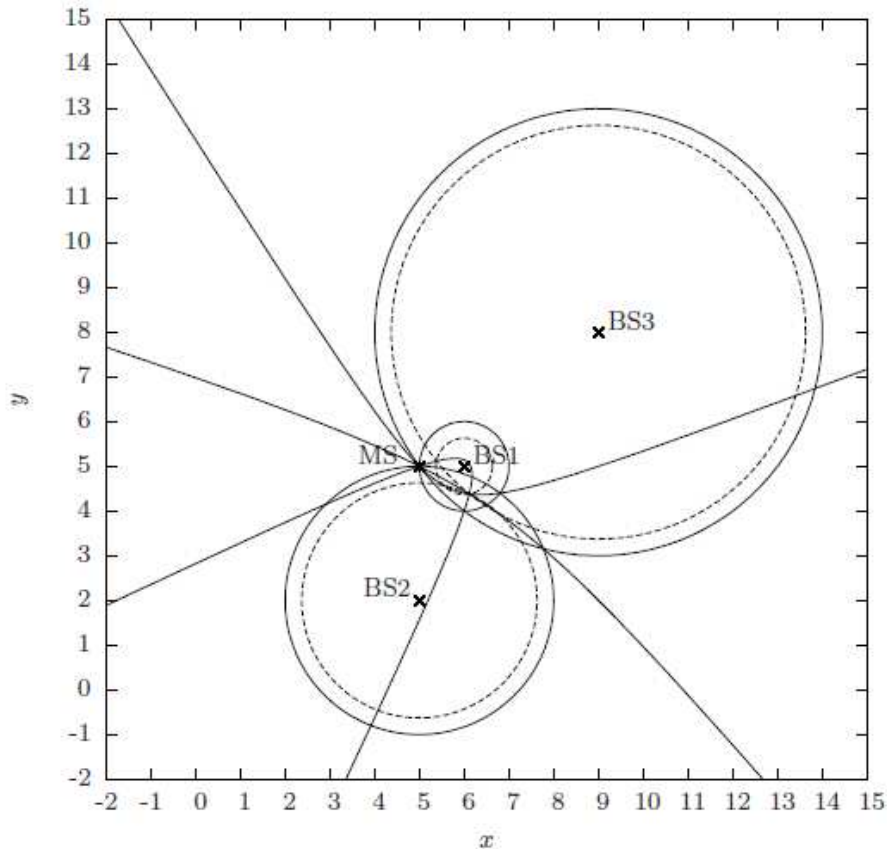
$$(x_{MS} - x_{BS1})^2 + (y_{MS} - y_{BS1})^2 = r_1^2 \quad (5.59)$$

gde se zamenom (5.57) i (5.58) dobija kvadratna jednačina po r_1

$$(k_x^2 + k_y^2 - 1)r_1^2 + 2(k_x(n_x - x_{BS1}) + k_y(n_y - y_{BS1}))r_1 + (n_x - x_{BS1})^2 + (n_y - y_{BS1})^2 = 0. \quad (5.60)$$

Kao što je poznato, kvadratna jednačina daje dva rešenja. Ako jednačine odgovaraju fizičkom modelu, bar jedno rešenje bi trebalo biti pozitivno. Pozitivno rešenje za r_1 se u tom slučaju uzima kao konačno, dok se negativno rešenje odbacuje jer nema fizičko značenje (negativno rastojanje). Ipak, problem navedenog postupka rešavanja hiperboličke lateracije nastaje u slučaju kada se dobiju dva pozitivna rešenja kvadratne jednačine. To rezultira da se, za iste ulazne parametre, dobiju dve moguće lokacije MS, što je u pozicioniranju neprihvatljivo. Ovakva situacija prikazana je na slici 5.4, gde je u poređenju sa slikom 5.3 bazna stanica BS1 pomerena sa lokacije (3, 5) na lokaciju (6, 5), rezultujući rastojanjem $r_1 = 1$ za MS na lokaciji (5, 5). U ovom slučaju, dobijaju se dve pozitivne vrednosti rastojanja r_1 i to $r_{1a} = 1$, što mobilnu stanicu locira u (5, 5), i $r_{1b} = 0.62887$, što mobilnu stanicu locira u (6.1134, 4.3814). Krugovi koji odgovaraju rastojanju r_{1b} na slici 5.4 označeni su isprekidanim linijama. Za prevazilaženje ovog problema (problem neodređenosti lokacije MS) u [37] se predlaže korišćenje dodatnog predznanja o lokaciji mobilne stanice, tzv. *a priori knowledge*. Ipak, u primeru sa slike 5.4 [38], pokazano je da dva rešenja lokacije mobilne stanice mogu biti i takva da su međusobno vrlo blizu, što bi

zahtevalo priličnu količinu predznanja kako bi se selektovala prava lokacija mobilne stanice. Situacije u kojima su dva rešenja blizu jedno drugog mogu se očekivati u slučajevima kada je jedna od hiperbola vrlo zakrivljenja (savijena), što se dešava kada je $|d/D|$ približno jednako 1. U tom slučaju, potreban je još jedan izvor informacija tj. dodatna bazna stanica koja obezbeđuje neophodnu informaciju o još jednoj razlici rastojanja.



Slika 5.4. Hiperbolička lateracija, par rešenja.

Ipak, ako se već uvodi dodatna bazna stanica, prethodno opisan način rešavanja hiperboličke lateracije preko kvadratne jednačine može se potpuno zaobići. Novi način rešavanja [45] i hiperboličku lateraciju svodi na sistem rešavanja skupa linearnih jednačina, slično kao u slučaju cirkularne lateracije.

Postupak je jednostavan i polazi od jednačine za hiperboličku lateraciju (5.51). Ideja je da se nepoznati parametar r_1 , koji je u (5.51) predstavljen u linearnoj formi na desnoj strani jednačine, prebaci na levu stranu, pa (5.51) sada postaje

$$2(x_{BS1} - x_{BSk})x_{MS} + 2(y_{BS1} - y_{BSk})y_{MS} - 2d_k r_1 = d_k^2 + x_{BS1}^2 - x_{BSk}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BSk}^2. \quad (5.61)$$

Dodavanjem još jednog izvora informacije tj. četvrte bazne stanice BS4, dobija se sistem linearnih jednačina po x_{MS} , y_{MS} i r_1

$$\begin{bmatrix} x_{BS1} - x_{BS2} & y_{BS1} - y_{BS2} & -d_2 \\ x_{BS1} - x_{BS3} & y_{BS1} - y_{BS3} & -d_3 \\ x_{BS1} - x_{BS4} & y_{BS1} - y_{BS4} & -d_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{MS} \\ y_{MS} \\ r_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} d_2^2 + x_{BS1}^2 - x_{BS2}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BS2}^2 \\ d_3^2 + x_{BS1}^2 - x_{BS3}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BS3}^2 \\ d_4^2 + x_{BS1}^2 - x_{BS4}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BS4}^2 \end{bmatrix}. \quad (5.62)$$

Rešenje sistema (5.62) daje jedinstvenu lokaciju na kojoj se nalazi MS, pa su time izbegnuti problemi neodređenosti lokacije u slučaju rešavanja hiperboličke lateracije preko kvadratne jednačine (5.60), a cena toga je dodatni izvor informacija, tj. dodatna bazna stanica.

U slučaju kada je na raspolaganju više od minimalnog broja baznih stanica i procenjenih razlika rastojanja ($n > 4$), sistem (5.62) postaje predefinisani

$$\begin{bmatrix} x_{BS1} - x_{BS2} & y_{BS1} - y_{BS2} & -d_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{BS1} - x_{BSn} & y_{BS1} - y_{BSn} & -d_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{MS} \\ y_{MS} \\ r_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} d_2^2 + x_{BS1}^2 - x_{BS2}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BS2}^2 \\ \vdots \\ d_n^2 + x_{BS1}^2 - x_{BSn}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BSn}^2 \end{bmatrix} \quad (5.63)$$

i rešava se metodom najmanjih kvadrata (5.7). Dakle, zaključak bi bio da rešavanje hiperboličke lateracije preko kvadratne jednačine (5.60) treba primeniti samo u slučaju kada su na raspolaganju samo tri bazne stanice, dok u svakom drugom slučaju treba primeniti rešavanje u formi (5.62) ili (5.63), kako bi se izbegli problemi neodređenosti tj. dobilo jedinstveno rešenje za lokaciju MS.

6. Probabilistički pristup pozicioniranju

Kao što je već rečeno, procena lokacije korisnika u ćelijskim radio sistemima u opštem slučaju zasniva se na merenju rastojanja i/ili ugla. Gotovo svi parametri propagacije signala koji se mogu koristiti za određivanje rastojanja pokazuju osetljivost na višestruku propagacije, kao i NLOS uslove prostiranja. Sem toga, sva merenja koja se vrše u cilju procene rastojanja poseduju određeni stepen neodređenosti, i neke od tih neodređenosti moguće je opisati jedino probabilističkim modelima [46].

6.1. Deterministički vs. probabilistički pristup određivanju lokacije mobilne stanice

Bez obzira na probabilističku prirodu ulaznih podataka, veliki broj metoda pozicioniranja bazira se na primeni determinističkih lateracionih i/ili angulacionih algoritama. Prednosti determinističkog pristupa određivanju lokacije mobilne stanice su:

- proračun lokacije MS uglavnom se svodi na rešavanje sistema linearnih jednačina (dobijenih linerizacijom u postupku cirkularne/hiperboličke lateracije, kao što je rečeno u poglavlju 5)
- lokacija MS se dobija u vidu dva broja, tj. geografskih koordinata (koordinata u npr. Dekartovom sistemu koje se onda lako prevode u geografske koordinate)
- metode determinističkog pristupa ne unose veliko kašnjenje (proračuni relativno jednostavni)
- metode determinističkog pristupa nemaju velike memorijske zahteve.

Nedostaci determinističkog pristupa u određivanju lokacije mobilne stanice su:

- zahtev za minimalnim brojem referentnih tačaka (baznih stanica) kao uslov za rešavanje sistema nelinearnih jednačina (a time i kao uslov za određivanje lokacije MS):
 - minimalni broj referentnih tačaka (baznih tačaka) u postupku angulacije, $N_{BS,\min} = 2$
 - minimalni broj referentnih tačaka (baznih tačaka) u postupku cirkularne lateracije, $N_{BS,\min} = 3$
 - minimalni broj referentnih tačaka (baznih tačaka) u postupku hiperboličke lateracije, zavisno od načina rešavanja, $N_{BS,\min} = 3$ ili $N_{BS,\min} = 4$
- zahtev za minimalnim brojem referentnih tačaka može negativno uticati na parametar dostupnosti metoda pozicioniranja koje se baziraju na

determinističkom pristupu: nemogućnost primene u ruralnim zonama gde se ne može uvek obezbediti minimalan broj baznih stanica neophodnih za određeni deterministički algoritam

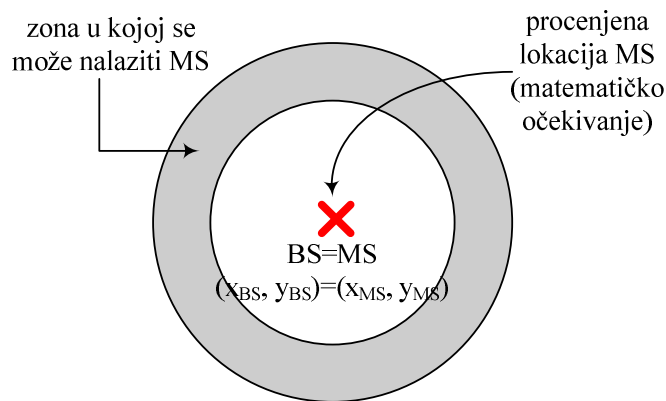
- velika osetljivost na tačnost ulaznih podataka, što može dovesti do pojave višestrukih rešenja ili čak izostanka bilo kakvog rešenja, tj. nemogućnosti procene lokacije mobilne stanice.

Sa druge strane, probabilistički pristup se bazira na probabilističkim modelima kojima se opisuje zavisnost karakteristika signala koje prima mobilna stanica od lokacije mobilne stanice. Probabilistički algoritmi tretiraju ulazne podatke o lokaciji mobilne stanice kao prostorne funkcije gustine verovatnoće (uzimaju se u obzir sve neodređenosti merenih parametara), i združuju ih u cilju poboljšanja procene lokacije mobilne stanice. Prednosti probabilističkog pristupa određivanju lokacije mobilne stanice su:

- uvek se dobija procenjena lokacija MS (nema opasnosti od izostanka rešenja kao što je slučaj kod rešavanja determinističkih sistema)
- manja osetljivost na uslove propagacije (rešenje se gotovo uvek može dobiti za razliku od determinističkih metoda; uslovi propagacije mogu uticati samo na smanjenje tačnosti određivanja lokacije)
- nema zahteva za minimalnim brojem referentnih tačaka (baznih stanica), pa time i bolja dostupnost od metoda pozicioniranja baziranih na determinističkom pristupu; ipak, veći broj BS povećava tačnost pa je svakako poželjan
- kao rezultat procene lokacije MS može se dostaviti i zona u kojoj se procenjuje lokacija MS (koja se može ubaciti u odgovarajuću geografsku mapu).

Nedostaci probabilističkog pristupa su određivanju lokacije mobilne stanice su:

- proračun lokacije MS primenom probabilističkog pristupa može biti računarski zahtevan – metode pozicioniranja loše po pitanju parametra računarskog opterećenja (što se u slučaju *mobile-based* metoda prenosi i na parametar energetske efikasnosti)
- mogu se javiti znatno veći zahtevi po pitanju memorijskog prostora u odnosu na determinističke metode pozicioniranja
- određivanje lokacije mobilne stanice kao matematičko očekivanje nekada može dati apsurdan rezultat, tj. može proceniti lokaciju mobilne stanice na mestu na kojem se mobilna stanica ni u kom slučaju ne može nalaziti (slika 6.1). Ipak, u opštem slučaju, matematičko očekivanje predstavlja najbolji pogodak lokacije mobilne stanice.



Slika 6.1. Absurdna procena lokacije MS primenom probabilističkog pristupa.

Tema ovog poglavlja je uvođenje probabilističkog pristupa u pozicioniranje MS kao i prikaz tri probabilističke metode pozicioniranja u ćelijskim radio mrežama.

6.2. Probabilistički pristup u određivanju lokacije mobilne stanice

Kao i do sada, posmatra se scenario u kojem su poznate koordinate referentnih tačaka (baznih stanica) kao i karakteristike signala (nivo signala, vreme prispeća signala, ...) sa n dostupnih izvora informacija. Nepoznata je lokacija mobilne stanice.

6.2.1. Funkcije gustine verovatnoće

Neka su na raspolaganju n međusobno nezavisnih izvora informacija o lokaciji mobilne stanice, i neka je svaki od njih opisan svojom funkcijom gustine verovatnoće $p_i(x, y)$ za $i=1, \dots, n$. U skladu sa pretpostavkom da se mobilna stanica nalazi na površini zemlje tj. da je lokacija mobilne stanice redukovana sa tri na dve dimenzije, gustine verovatnoće su funkcije dve promenljive, tj. dve koordinate Dekartovog koordinatnog sistema, x i y . U zavisnosti od primene, moguća je generalizacija i na polarni koordinatni sistem. Svaka od funkcija gustine verovatnoće sadrži informaciju o verovatnoći da se mobilna stanica nalazi u zoni prostora ograničenoj sa $x_1 < x < x_2$ i $y_1 < y < y_2$,

$$P(x_1 < x < x_2, y_1 < y < y_2) = \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} p_i(x, y) dx dy. \quad (6.1)$$

Svaka funkcija gustine verovatnoće mora zadovoljavati kriterijum normalizacije,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p_i(x, y) dx dy = 1. \quad (6.2)$$

U problemu određivanja lokacije mobilne stanice, funkcija gustine verovatnoće koja obezbeđuje kompletnu informaciju o lokaciji mobilne stanice je dvodimenzionalna prostorna *Dirac*-ova funkcija,

$$p_{DI}(x, y) = \delta(x - x_0, y - y_0) \quad (6.3)$$

obzirom da ona pokazuje da je mobilna stanica locirana tačno na koordinati (x_0, y_0) , kao i da je zadovoljen kriterijum normalizacije (6.2). Sa druge strane, najmanju informaciju o lokaciji mobilne stanice obezbeđuje uniformna raspodela. U slučaju kada se mobilna stanica nalazi u ograničenom delu prostora, tj. u oblasti površine A , funkcija gustine verovatnoće uniformne raspodele unutar te oblasti je

$$p_{UD}(x, y) = \frac{1}{A} \quad (6.4)$$

i poprima infinitezimalnu vrednost kako oblast postaje beskonačna.

Osnovna ideja u određivanju lokacije MS primenom probablističkog pristupa je kombinovanje funkcija gustine verovatnoće dobijenih iz različitih izvora informacija, u cilju dobijanja što je moguće tačnije informacije o lokaciji mobilne stanice [42]. Logično, krajnji cilj bi bio funkcija gustine verovatnoće koja bi bila dvodimenzionalna prostorna *Dirac*-ova funkcija. Kombinovanjem funkcija gustine verovatnoće iz različitih izvora informacija dobija se združena funkcija gustine verovatnoće. Neka su date dve funkcije gustine verovatnoće $p_i(x, y)$ i $p_j(x, y)$. Pod pretpostavkom da su izvori informacija međusobno nezavisni, množenjem pomenutih funkcija gustina verovatnoće dobija se četvorodimenzionalna funkcija gustine verovatnoće

$$q_{ij}(x_1, y_1, x_2, y_2) = p_i(x_1, y_1)p_j(x_2, y_2) \quad (6.5)$$

koja zadovoljava kriterijum normalizacije

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p_i(x_1, y_1)p_j(x_2, y_2) dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 = 1. \quad (6.6)$$

Obzirom da je u problemu određivanja lokacije mobilne stanice od interesa slučaj kada oba izvora informacije daju isti odgovor po pitanju koordinata mobilne stanice, tj. od interesa je funkcija gustine verovatnoće pod uslovom $x_1 = x_2 = x$ i $y_1 = y_2 = y$, združena funkcija gustine verovatnoće se može posmatrati kao uslovna funkcija gustine verovatnoće, odnosno,

$$p_{ij}(x, y) = \frac{p_i(x, y)p_j(x, y)}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p_i(x, y)p_j(x, y) dx dy} \quad (6.7)$$

čime je obezbeđeno da $p_{ij}(x, y)$ zadovoljava kriterijum normalizacije (6.2). Rezultat (6.7) se može generalizovati na skup od n dostupnih izvora informacija, gde se dobija

$$p(x, y) = \frac{\prod_{i=1}^n p_i(x, y)}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \prod_{i=1}^n p_i(x, y) dx dy} . \quad (6.8)$$

Isti rezultat dobija se i primenom *Bayes*-ove teoreme [47].

U problemu određivanja lokacije mobilne stanice, odgovor na zahtev o lokaciji mobilne stanice predstavljaju koordinate x_0 i y_0 koje su najbliže stvarnim koordinatama ciljane mobilne stanice. U teoriji verovatnoće, x_0 i y_0 predstavljaju matematičko očekivanje dvodimenzionalne slučajne promenljive (x, y) čija je funkcija gustine verovatnoće $p(x, y)$

$$x_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x p(x, y) dx dy = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} p(x, y) dy \right) x dx \quad (6.9)$$

i

$$y_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} y p(x, y) dx dy = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} p(x, y) dx \right) y dy . \quad (6.10)$$

Daljom primenom teorije verovatnoće, kao mera preciznosti u postupku određivanja lokacije mobilne stanice može se koristiti standardna devijacija

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} ((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2) p(x, y) dx dy} \quad (6.11)$$

čija manja vrednost ukazuje na precizniji postupak lokalizacije mobilne stanice.

6.2.2. Granice u okviru kojih se procenjuje lokacija mobilne stanice

Nakon određivanja funkcija gustine verovatnoće sa n dostupnih izvora informacija, prvi korak u implementaciji probabilističkog algoritma je redukcija prostora u okviru kojeg se procenjuje lokacija mobilne stanice. Neka je $p_i(x, y) = 0$ u svim tačkama osim u zoni pravougaonog oblika definisanoj sa

$$x_{i\min} \leq x \leq x_{i\max} \quad (6.12)$$

i

$$y_{i\min} \leq y \leq y_{i\max} . \quad (6.13)$$

Unutar ovako definisane zone, mogu postojati tačke, pa i podregioni, gde je $p_i(x, y) = 0$, ali izvan nje ni u jednoj tački ne sme biti ispunjen uslov $p_i(x, y) \neq 0$. U

skladu sa ovim zaključkom, jasno je da rešenje za $x_{i\min}$, $x_{i\max}$, $y_{i\min}$ i $y_{i\max}$ nije jedinstveno. Zbog toga se u cilju maksimalnog redukovanja pravougaone zone, uvode dodatna ograničenja: $x_{i\min}$ i $y_{i\min}$ treba da budu najveće, a $x_{i\max}$ i $y_{i\max}$ najmanje vrednosti koje obezbeđuju da u svim tačkama izvan zone definisane sa (6.12) i (6.13) važi $p_i(x, y) = 0$. Rezultat je najmanja pravougaona zona unutar koje su sve tačke u kojima je funkcija gustine verovatnoće različita od nule.

Neke funkcije gustine verovatnoće, kao što je na primer funkcija gustine verovatnoće normalne ili *Gauss*-ove raspodele, u svim tačkama u kojima su definisane imaju vrednost koja je različita od nule. U tim slučajevima pogodno je koristiti aproksimalciju kako bi se isključile tačke u kojima funkcija gustine verovatnoće ima zanemarljivo male vrednosti.

U skladu sa (6.8), združena funkcija gustine verovatnoće ima vrednost različitu od nule u svim tačkama u kojima pojedinačne funkcije gustine verovatnoće imaju vrednosti različite od nule. Dakle, zona u kojoj združena funkcija gustine verovatnoće ima vrednosti različite od nule dobija se u preseku pravougaonih zona definisanih pojedinačnim funkcijama gustina verovatnoće, tj.

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (6.14)$$

i

$$y_{\min} \leq y \leq y_{\max} \quad (6.15)$$

gde je

$$x_{\min} = \max_{1 \leq i \leq n} (x_{i\min}) \quad (6.16)$$

$$x_{\max} = \min_{1 \leq i \leq n} (x_{i\max}) \quad (6.17)$$

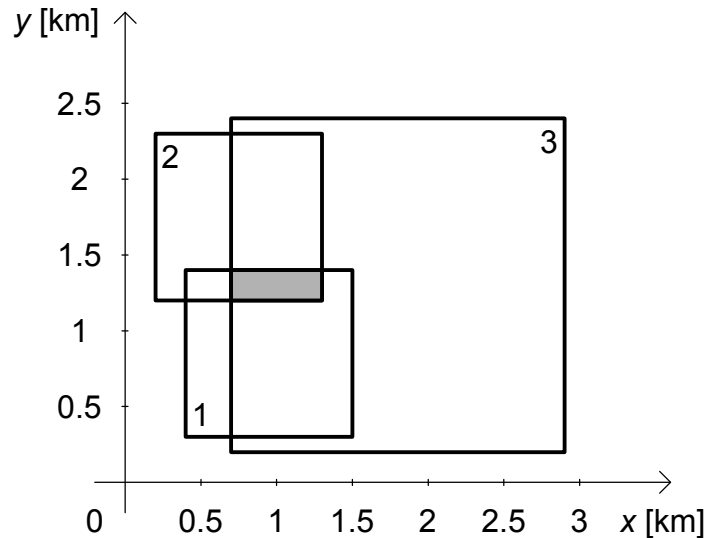
$$y_{\min} = \max_{1 \leq i \leq n} (y_{i\min}) \quad (6.18)$$

i

$$y_{\max} = \min_{1 \leq i \leq n} (y_{i\max}). \quad (6.19)$$

Na slici 6.2 prikazan je primer prethodno opisanog algoritma kojim se redukuje zona u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice na konačni pravougaonik najmanjih dimenzija. U primeru je pretpostavljeno da su dostupna tri izvora informacija, od kojih prvi ograničava zonu u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice na pravougaonik sa granicama $400 \text{ m} \leq x \leq 1500 \text{ m}$ i $300 \text{ m} \leq y \leq 1400 \text{ m}$, drugi $200 \text{ m} \leq x \leq 1300 \text{ m}$ i $1200 \text{ m} \leq y \leq 2300 \text{ m}$ i treći $700 \text{ m} \leq x \leq 2900 \text{ m}$ i $200 \text{ m} \leq y \leq 2400 \text{ m}$. Konačna pozicija mobilne stanice procenjuje se u preseku pojedinačnih pravougaonika, rezultujući redukovanim pravougaonikom u granicama $700 \text{ m} \leq x \leq 1300 \text{ m}$ i $1200 \text{ m} \leq y \leq 1400 \text{ m}$, što je na slici 6.2 prikazano sivom bojom. Na ovaj način, zona u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice je značajno

redukovana, kao i zahtevi za računanjem funkcija gustina verovatnoće. Primer sa slike 6.2 odgovara slučaju kada prvi izvor informacija predstavlja bazna stanica u tački $(x_1, y_1) = (950, 850)$ m sa vrednošću TA parametra $TA_1 = 0$, drugi izvor predstavlja bazna stanica u tački $(x_2, y_2) = (750, 1750)$ m sa vrednošću TA parametra $TA_2 = 0$, i treći bazna stanica u tački $(x_3, y_3) = (1800, 1300)$ m sa vrednošću TA parametra $TA_3 = 1$.



Slika 6.2. Redukcija zone u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice.

6.2.3. Diskretizacija prostora

Nakon redukcije zone u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice na pravougaonik ograničen sa $x_{\min} < x < x_{\max}$ i $y_{\min} < y < y_{\max}$, radi lakšeg računanja koordinata mobilne stanice, vrši se diskretizacija prostora. Diskretizacija duž x koordinate vrši se podelom koordinatne ose na n_x segmenata širine

$$n_x = \text{int}\left(\frac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta x}\right) + 1. \quad (6.20)$$

Na isti način, diskretizacija duž y ose vrši se podelom koordinatne ose na n_y segmenata širine

$$n_y = \text{int}\left(\frac{y_{\max} - y_{\min}}{\Delta y}\right) + 1. \quad (6.21)$$

Obzirom da nema razloga da se koordinatne ose različito tretiraju, logičan je izbor n_x i n_y koji obezbeđuje $\Delta x = \Delta y$. Na taj način, prostor u kojem se može nalaziti mobilna stanica diskretizovan je na koordinatnu mrežu sa $n_x \times n_y$ prostornih elemenata.

Nakon diskretizacije koordinatnih osa, x koordinata se može diskretizovati kao

$$x(k) = x_{\min} + \left(k - \frac{1}{2}\right) \Delta x \quad (6.22)$$

za $k = 1, \dots, n_x$. Diskretne vrednosti $x(k)$ odgovaraju koordinatama centralnih tačaka segmenata. Na isti način, y koordinata se može diskretizovati kao

$$y(l) = y_{\min} + \left(l - \frac{1}{2}\right) \Delta y \quad (6.23)$$

za $l = 1, \dots, n_y$.

U skladu sa uvedenom diskretizacijom prostora kao i (6.1), verovatnoća da se mobilna stanica nalazi unutar nekog prostornog elementa dobija se računanjem integrala funkcije gustine verovatnoće u granicama tog prostornog elementa, tj.

$$P_{Di}(k, l) = \int_{y_{\min} + (l-1)\Delta y}^{y_{\min} + l\Delta y} \int_{x_{\min} + (k-1)\Delta x}^{x_{\min} + k\Delta x} p_i(x, y) dx dy \quad (6.24)$$

što nakon aproksimacije postaje

$$P_{Di}(k, l) \approx \Delta x \Delta y p_i(x(k), y(l)). \quad (6.25)$$

Na ovaj način, funkcije gustine verovatnoće su diskretizovane na matrice verovatnoća $P_{Di}(k, l)$ za $k = 1, \dots, n_x$ i $l = 1, \dots, n_y$.

U skladu sa diskretizacijom prostora, elementi matrice združenih verovatnoća dobijaju se kao

$$P_D(k, l) = \frac{\prod_{i=1}^n P_{Di}(k, l)}{\sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^{n_y} \prod_{i=1}^n P_{Di}(k, l)}. \quad (6.26)$$

Koordinate mobilne stanice računaju se kao matematičko očekivanje što u diskretizovanoj formi ima oblik

$$x_0 = \sum_{k=1}^{n_x} \left(\sum_{l=1}^{n_y} P_D(k, l) \right) x(k) \quad (6.27)$$

i

$$y_0 = \sum_{l=1}^{n_y} \left(\sum_{k=1}^{n_x} P_D(k, l) \right) y(l). \quad (6.28)$$

Standardna devijacija dobija se kao

$$\sigma = \sqrt{\sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^{n_y} ((x(k) - x_0)^2 + (y(l) - y_0)^2) P_D(k, l)}. \quad (6.29)$$

Formulama (6.26)-(6.29), računanje integrala zamenjeno je računanjem suma. Redukcijom prostora opisanom (6.14)-(6.19), obezbeđeno je da su sume konačne i sa fiksnim granicama.

Dirac-ova funkcija gustine verovatnoće nakon diskretizacije prostora postaje matrica verovatnoća

$$\delta(k - k_0, l - l_0) = \begin{cases} 1, & \text{for } k = k_0 \text{ and } l = l_0 \\ 0, & \text{for } k \neq k_0 \text{ or } l \neq l_0 \end{cases} \quad (6.30)$$

koja pokazuje da se mobilna stanica nalazi tačno unutar prostornog elementa indeksa (k_0, l_0) . Ova matrica verovatnoća može poslužiti i kao kriterijum za proveru da li je diskretizacija prostora obavljena na odgovarajući način. Naime, ukoliko metod uglavnom daje rezultat u formi (6.30), dimenziju prostornog elementa bi trebalo smanjiti. Sa druge strane, ako veliki broj prostornih elemenata ima značajne vrednosti $P_D(k, l)$, to predstavlja indikaciju da izabrana veličina prostornog elementa obezbeđuje preveliku preciznost imajući u vidu dostupne izvore informacija, odnosno, dimenziju prostornog elementa bi u tom slučaju trebalo povećati.

6.2.4. Implementacija metoda u slučaju funkcije gustine verovatnoće ekskluzivnog tipa

Metod za procenu lokacije mobilne stanice u svom diskretizovanom obliku zahteva matricu verovatnoća koja sadrži $n_x \times n_y$ elemenata. U nekim slučajevima, manipulacija ovakvom matricom može biti računarski neefikasna i može zahtevati znatan memorijski prostor. Kako bi se pojednostavio proračun, pogodno je koristiti takve funkcije gustine verovatnoće koje sadrže samo informaciju o tome da li je moguće da se na nekoj lokaciji u prostoru korisnik nalazi ili ne. Ovakve funkcije gustine verovatnoće zovu se funkcije gustine verovatnoće ekskluzivnog tipa. Tipični primeri su funkcije gustine verovatnoće koje proizilaze od diskretizovanih parametara u ćelijskim radio mrežama, kao što je parametar TA u GSM i LTE sistemu, ili RTT u UMTS sistemu. Takođe, neke funkcije gustine verovatnoće koje potiču od drugih izvora informacija kao što je nivo signala na prijemu mogu se vrlo uspešno aproksimirati funkcijom gustne verovatnoće ekskluzivnog tipa. Nakon diskretizacije, ove funkcije gustine verovatnoće svode se na skup S_{NZ} koji se sastoji od n_{NZ} prostornih elemenata, $n_{NZ} < n_x \times n_y$, određenih svojim indeksima (k_j, l_j) za $j = 1, \dots, n_{NZ}$, pri čemu je verovatnoća da se mobilna stanica nađe u nekom prostornom elementu $1/n_{NZ}$, dok je na svakom drugom mestu ta verovatnoća jednaka nuli, tj.

$$P_{ET}(k, l) = \begin{cases} \frac{1}{n_{NZ}}, & \text{for } (k, l) \in S_{NZ} \\ 0, & \text{for } (k, l) \notin S_{NZ} \end{cases}. \quad (6.31)$$

Tačne vrednosti funkcije gustine verovatnoće na mestima na kojima je ona različita od nule nisu od značaja u slučaju funkcija gustina verovatnoće ekskluzivnog tipa, i po potrebi se mogu jednostavno izračunati primenom kriterijuma normalizacije, koji nakon diskretizacije prostora za slučaj združene verovatnoće dobija oblik

$$\sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^{n_y} P_D(k, l) = 1. \quad (6.32)$$

Dakle, za pamćenje vrednosti verovatnoća koje proizilaze iz funkcija gustine verovatnoće ekskluzivnog tipa, dovoljno je rezervisati jedan bit po prostornom elementu. U skladu sa tim, izvori informacija o lokaciji mobilne stanice predstavljeni su bitmapama $b_i(k, l)$ koje imaju vrednost 1 u bilo kom slučaju kada je verovatnoća različita od nule, odnosno 0, u slučaju kada je verovatnoća jednaka nuli. Ovakav pristup, osim smanjenih zahteva po pitanju memorijskog prostora, ima prednost i zbog toga što pojednostavljuje kombinovanje verovatnoća dobijenih iz različitih izvora informacija. Množenje dobijenih verovatnoća sada se svodi na logičku AND operaciju nad bitima koji pokazuju da li je moguće da se mobilna stanica nalazi unutar razmatranog prostornog elementa ili ne. Nakon formiranja bitmape združenih verovatnoća kao

$$b(k, l) = \bigwedge_{i=1}^n b_i(k, l), \quad (6.33)$$

normalizacija odgovarajuće matrice združenih verovatnoća dobija se primenom

$$P_D(k, l) = \frac{1}{n_1} b(k, l) \quad (6.34)$$

gde je n_1 broj elemenata u $b(k, l)$ koji imaju vrednost 1

$$n_1 = \sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^{n_y} b(k, l). \quad (6.35)$$

Normalizaciju ne bi trebalo vršiti na nivou matrice, jer je mnogo zgodnije to uraditi na nivou proračuna koordinata i standardne devijacije,

$$x_0 = \frac{1}{n_1} \sum_{k=1}^{n_x} \left(\sum_{l=1}^{n_y} b(k, l) \right) x(k) \quad (6.36)$$

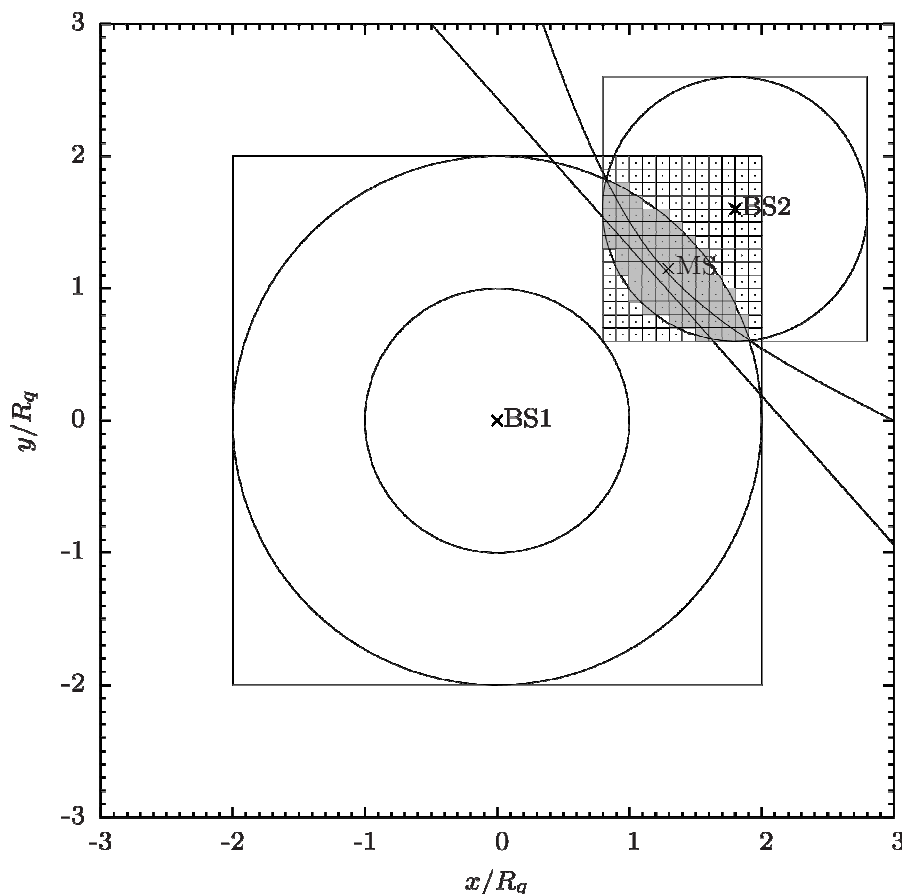
$$y_0 = \frac{1}{n_1} \sum_{l=1}^{n_y} \left(\sum_{k=1}^{n_x} b(k, l) \right) y(l) \quad (6.37)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n_x} \sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^{n_y} ((x(k) - x_0)^2 + (y(l) - y_0)^2) b(k, l)}. \quad (6.38)$$

Nekada može biti korisno aproksimirati funkcije gustine verovatnoće koje nisu ekskluzivnog tipa kao funkcije gustine verovatnoće ekskluzivnog tipa. U tom slučaju, u nekoj meri se gubi na preciznosti, ali se znatno dobija na pojednostavljenju proračuna kao i uštedi memorijskog prostora. Sem toga, bitmapa (6.33) obezbeđuje i vrlo koristan vizuelni prikaz koji po potrebi može biti dostavljen korisniku i koji pokazuje mapu mogućih lokacija na kojima se može naći ciljane mobilna stanica.

6.2.5. Primena probablističkog pristupa

Za ilustraciju primene probablističkih metoda, posmatra se primer sa dve GSM bazne stanice, locirane u $(x_{BS1}, y_{BS1}) = (0, 0)$ sa $TA = 1$ i $(x_{BS2}, y_{BS2}) = (1.8R_q, 1.6R_q)$ sa $TA = 0$ (slika 6.3). Sva rastojanja razmatrana u ovom primeru predstavljena su preko parametra R_q što predstavlja prostornu rezoluciju TA parametra, tj. TA kvant koji iznosi $R_q = 553.46 \text{ m} \approx 550 \text{ m}$. Podrazumevaju se LOS uslovi prostiranja, tako da se primenjuje probablistički model (3.10). Pod ovim pretpostavkama, a u skladu sa (3.13), (3.14) i (6.16)-(6.19), prostor u okviru kojeg se nalazi mobilna stanica je ograničen sa $0.8R_q \leq x_{MS} \leq 2R_q$ i $0.6R_q \leq y_{MS} \leq 2R_q$. Sledeći korak probablističkog pristupa je diskretizacija prostora, gde se za obe ose primenjuje isti korak diskretizacije tj. $\Delta x = \Delta y = 0.1R_q$. Na slici 6.3 prikazan je region u kojem se može nalaziti mobilna stanica, podeljen na $n_x \times n_y = 12 \times 14 = 168$ prostornih elemenata, gde je centar svakog prostornog elementa označen tačkom. Funkcija gustine verovatnoće (3.10) je ekskluzivnog tipa, i primenom algoritma za ovu klasu funkcija prostorni elementi se klasifikuju u zavisnosti od toga da li mogu biti potencijalna lokacija mobilne stanice ili ne. Da bi se ovo realizovalo, računa se rastojanje između dve tačke $2 \times 168 = 336$ puta. Prostorni elementi u kojima se može nalaziti mobilna stanica su na slici 6.3 označeni sivom bojom. Primenom (6.36) i (6.37), dobijaju se procenjene koordinate mobilne stanice, tj. $x_{MS} = 1.2935R_q$ i $y_{MS} = 1.1471R_q$, pri čemu se u skladu sa (6.38), dobija i standardna devijacija $\sigma = 0.40556R_q$. Poređenja radi, metod kvadrata (koji će biti objašnjem u poglavlju 6.6.1) procenjuje lokaciju mobilne stanice u tački $x_{MS} = 1.4R_q$ i $y_{MS} = 1.3R_q$ sa standardnom devijacijom $\sigma = 0.53229R_q$, bez pomenute potrebe računanja 336 puta.



Slika 6.3. Probabilistički metod, primer.

U cilju da se izvrši poređenje i sa determinističkim pristupom, posmatraju se iste bazne stanice a rastojanja između mobilne stanice i baznih stanica se procenjuju na osnovu (3.15) kao $r_1 = 1.5R_q$ i $r_2 = 0.5R_q$. U skladu sa prethodnim, razlika rastojanja iznosi $d_2 = r_2 - r_1 = R_q$. Raspoloživ skup podataka nije dovoljan za određivanje lokacije mobilne stanice. Ipak, neke dodatne informacije o lokaciji mobilne stanice se mogu i ekstrahovati iz postojećih.

Za cirkularnu lateraciju, rastojanje između baznih stanica $D = 2.40832R_q$ je veće od $r_1 + r_2 = 2R_q$, pa se može zaključiti da se kružnice mogućih lokacija mobilne stanice međusobno ne seku. Ipak, jednačina (5.12) locira mobilnu stanicu na liniji $18x + 16y = 39$, što je prikazano na slici 6.3. Sa druge strane, hiperbolička lateracija locira mobilnu stanicu na hiperboli dobijenoj primenom (5.41) kao

$$x = 0.9 + 0.3737 \cosh t - 0.7278 \sinh t \quad (6.39)$$

i

$$x = 0.8 + 0.3322 \cosh t + 0.8187 \sinh t. \quad (6.40)$$

Hiperbola prolazi kroz preseke spoljašnjih kružnica regiona definisanih preko (3.10), koji imaju poluprečnik za $\frac{1}{2}R_q$ veći od procenjenih rastojanja mobilne stanice od odgovarajućih baznih stanica. U razlici rastojanja, ovi ofseti se poništavaju, pa hiperbola zapravo prolazi kroz preseke kružnica koje predstavljaju procenjena rastojanja između mobilne i baznih stanica, ukoliko preseki postoje.

Kao što je prikazano na primeru, probabilistički pristup može proceniti lokaciju mobilne stanice čak i u slučajevima kada za primenu determinističkog pristupa nema dovoljno podataka. Ipak, probabilističke metode mogu biti računarski mnogo zahtevnije.

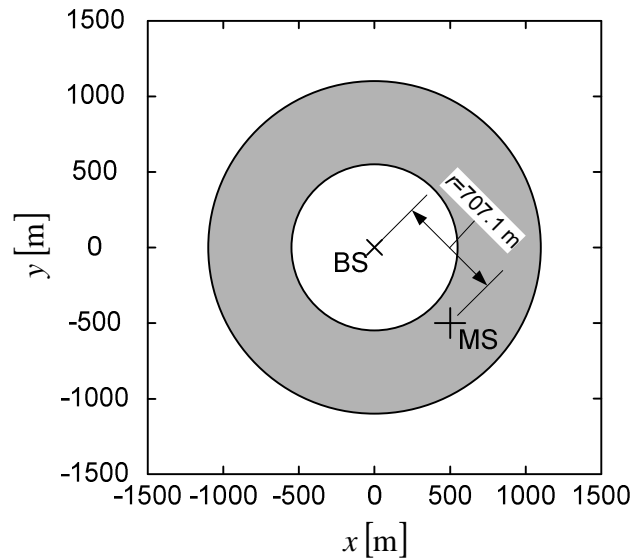
6.3. Probabilističke metode pozicioniranja

U okviru ovog poglavlja biće predstavljene tri probabilističke metode pozicioniranja. U osnovi, sve tri metode predlažu nove algoritme u cilju prevazilaženja nekih od nedostataka poznatih determinističkih lateracionih metoda (poglavljje 5.2). Svaka od predloženih metoda kao rezultat daje oblast u kojoj se predviđa lokacija mobilne stanice, dok se sama lokacija mobilne stanice unutar pomenute oblasti određuje se primenom probabilističkog pristupa, uz pretpostavku da mobilna stanica unutar oblasti ima uniformnu raspodelu. Takođe, standardna devijacija koordinata dobijenih na ovaj način koristi se kao mera neodređenosti lokacije mobilne stanice. Primena ovih probabilističkih metoda predstavljena je na primeru naprednije verzije Cell-ID+TA tehnike pozicioniranja u GSM (poglavljje 8.1.1), ali se generalizacija može izvršiti na bilo koju drugu tehniku pozicioniranja.

Sve tri metode zasnovane su na informaciji o geografskim koordinatama baznih stanica koje učestvuju u postupku određivanja lokacije mobilne stanice i odgovarajućim vrednostima TA parametara. Kao što se može videti sa slike 6.4, informacija o geografskim kordinatama bazne stanice i vrednosti TA parametra ograničava zonu u kojoj se može nalaziti mobilna stanica na prsten u čijem se centru nalazi bazna stanica a koji je definisan sa

$$TA R_q \leq r \leq (TA+1) R_q \quad (6.41)$$

gde je r rastojanje između bazne i mobilne stanice, a $R_q = 553.46\text{m}$ je prostorni kvant TA parametra. Lokalizacija podrazumeva LOS uslove prostiranja.



Slika 6.4. Informacija o lokaciji mobilne stanice, na osnovu poznatih koordinata bazne stanice $(x_{BS}, y_{BS}) = (0, 0)$ i $TA = 1$. Mobilna stanica nalazi se u $(x_{MS}, y_{MS}) = (500, -500)$ m .

Uz pretpostavku da lokacija mobilne stanice u okviru prstena definisanog TA parametrom ima uniformnu raspodelu, matematičko očekivanje lokacije mobilne stanice nalazi se u centru prstena, odnosno, procenjene koordinate mobilne stanice poklapaju se sa koordinatama bazne stanice. To znači da je, osim za $TA = 0$, očekivana pozicija mobilne stanice izvan oblasti u kojoj se mobilna stanica zaista može nalaziti, što za posledicu ima veliku grešku pozicioniranja. U cilju rešavanja ovog problema, u postupak pozicioniranja uvodi se više baznih stanica, kako bi se smanjila oblast u kojoj se mobilna stanica može nalaziti. Sledi prikaz tri metode koje na različite načine obrađuju podatke prikupljene sa više baznih stanica, a u cilju određivanja lokacije mobilne stanice.

6.3.1. Metoda kvadrata

Prva od metoda, metoda kvadrata, nastala je sa ciljem da se pojednostavi proračun lokacije mobilne stanice. Neka bazna stanica indeksa i , BS_i , locirana na (x_{BS_i}, y_{BS_i}) , komunicira sa mobilnom stanicom čija se lokacija procenjuje, pri čemu je vrednost odgovarajućeg TA parametra TA_i . Ova vrednost TA parametra locira mobilnu stanicu unutar prstena definisanog sa (6.41).

Prsten definisan vrednošću TA parametra TA_i , svakako se nalazi i u okviru kvadrata definisanog sa

$$x_{i \min} \leq x_{MS} \leq x_{i \max} \quad (6.42)$$

i

$$y_{i \min} \leq y_{MS} \leq y_{i \max} \quad (6.43)$$

gde je

$$x_{i\min} = x_{BSi} - (TA_i + 1)R_q \quad (6.44)$$

$$x_{i\max} = x_{BSi} + (TA_i + 1)R_q \quad (6.45)$$

$$y_{i\min} = y_{BSi} - (TA_i + 1)R_q \quad (6.46)$$

i

$$y_{i\max} = y_{BSi} + (TA_i + 1)R_q. \quad (6.47)$$

Samim tim, mobilna stanica se takođe nalazi u okviru istog kvadrata.

Ako u postupku pozicioniranja učestvuje n_{BS} različitih baznih stanica poznatih koordinata (x_{BSi}, y_{BSi}) i odgovarajućih vrednosti TA parametra TA_i , $i = 1, \dots, n_{BS}$, za svaku od n_{BS} baznih stanica moguće je definisati zonu, tj. kvadrat (6.42)-(6.47), u okviru kojeg se može nalaziti ciljana mobilna stanica. Najzad, konačna zona u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice nalazi se u preseku tih kvadrata, tj. dodatno je redukovana na manju zonu oblika pravougaonika u granicama

$$x_{\min} \leq x_{MS} \leq x_{\max} \quad (6.48)$$

i

$$y_{\min} \leq y_{MS} \leq y_{\max} \quad (6.49)$$

gde je

$$x_{\min} = \max_{1 \leq i \leq n_{BS}} (x_{i\min}) \quad (6.50)$$

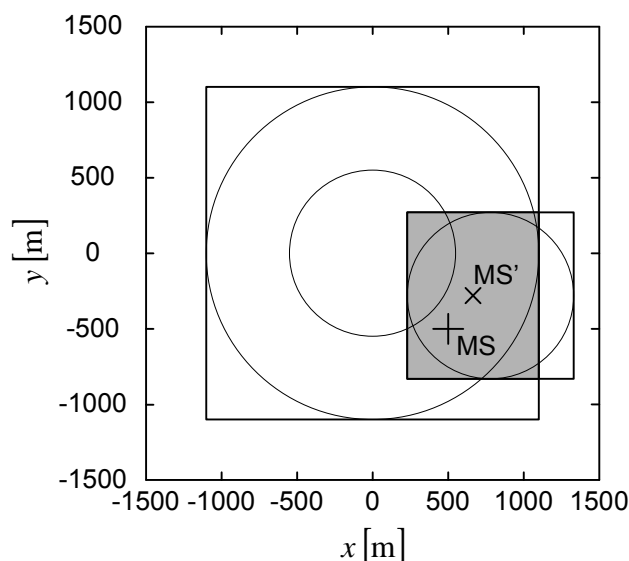
$$x_{\max} = \min_{1 \leq i \leq n_{BS}} (x_{i\max}) \quad (6.51)$$

$$y_{\min} = \max_{1 \leq i \leq n_{BS}} (y_{i\min}) \quad (6.52)$$

i

$$y_{\max} = \min_{1 \leq i \leq n_{BS}} (y_{i\max}). \quad (6.53)$$

Metoda kvadrata prikazana je na slici 6.5, za slučaj kada se mobilna stanica nalazi u $(x_{MS}, y_{MS}) = (500, -500)$ m. U primeru sa slike 6.5, broj baznih stanica je $n_{BS} = 2$, dok su njihove koordinate i vrednosti TA parametara $(x_{BS1}, y_{BS1}) = (0, 0)$, $TA_1 = 1$, $(x_{BS2}, y_{BS2}) = (780, -280)$ m, i $TA_2 = 0$.



Slika 6.5. Metoda kvadrata: $n_{BS} = 2$, $(x_{BS1}, y_{BS1}) = (0, 0)$, $TA_1 = 1$,
 $(x_{BS2}, y_{BS2}) = (780, -280)$ m, $TA_2 = 0$,
 procenjena lokacija mobilne stanice MS' $(x_{EMS}, y_{EMS}) = (665, -280)$ m,
 stvarna lokacija mobilne stanice MS $(x_{MS}, y_{MS}) = (500, -500)$ m,
 standardna devijacija $\sigma = 404.86$ m, greška pozicioniranja $d = 275$ m.

Nakon redukcije zone u kojoj se nalazi mobilna stanica na oblast oblika pravougaonika (6.48)-(6.53) nastalog u preseku kvadrata definisanih (6.42)-(6.47), koordinate mobilne stanice se mogu posmatrati kao dvodimenzionalna slučajna promenljiva. Uz pretpostavku uniformne raspodele unutar pravougaone zone, nepoznate koordinate mobilne stanice računaju se kao matematičko očekivanje

$$x_{EMS} = \frac{1}{2}(x_{\min} + x_{\max}) \quad (6.54)$$

i

$$y_{EMS} = \frac{1}{2}(y_{\min} + y_{\max}). \quad (6.55)$$

Analitički oblik standardne devijacije koordinata mobilne stanice je

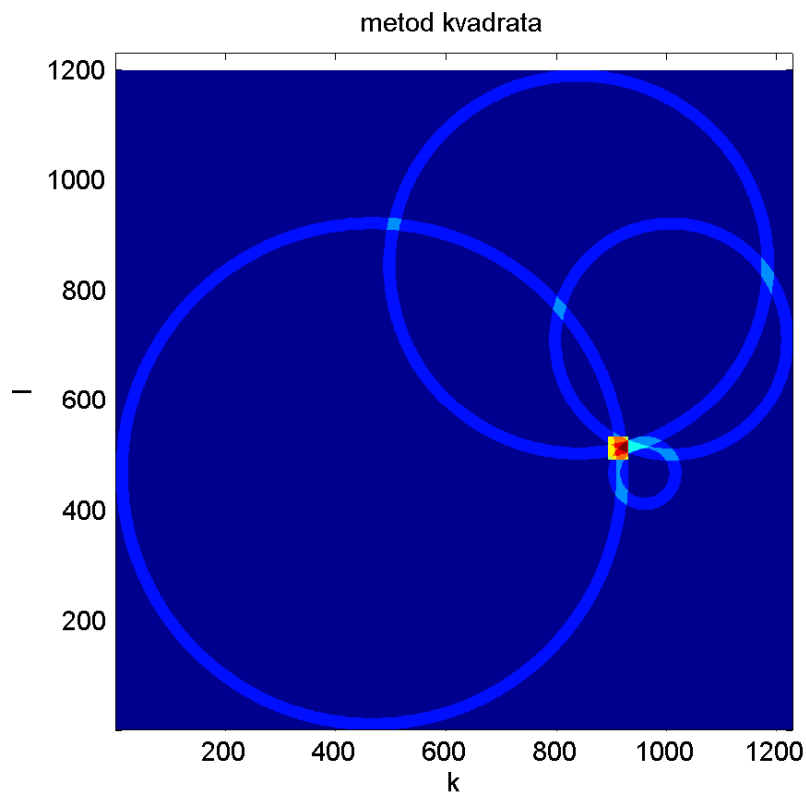
$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_{\max} - x_{\min})^2 + (y_{\max} - y_{\min})^2}{12}}. \quad (6.56)$$

Primenom izraza (6.54)-(6.56) na primer sa slike 6.5, dobija se procenjena lokacija mobilne stanice $x_{EMS} = 665$ m i $y_{EMS} = -280$ m, sa standardnom devijacijom $\sigma = 404.86$ m. Greška pozicioniranja računa se kao

$$d = \sqrt{(x_{EMS} - x_{MS})^2 + (y_{EMS} - y_{MS})^2} \quad (6.57)$$

i u konkretnom primeru iznosi $d = 275$ m. Površina zone u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice iznosi 957000 m^2 .

Dalja poboljšanja metode kvadrata se mogu postići ako se u postupak pozicioniranja uvede još baznih stanica sa svojim TA parametrima. Primer metode kvadrata dobijen na osnovu eksperimentalnih rezultata dat je na slici 6.6. U eksperimentalnom primeru sa slike 6.6, u postupku pozicioniranja učestvovala su četiri bazne stanice sa odgovarajućim vrednostima TA parametara. Zona u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice redukovana je na pravougaonik dobijen u preseku kvadrata definisanih koordinatama i TA parametrima baznih stanica koje su učestvovala u postupku pozicioniranja.



Slika 6.6. Metod kvadrata, eksperimentalni primer.

6.3.2. Metoda prstenova

Kako bi se povećala tačnost procene lokacije mobilne stanice, potrebno je, koliko god je to moguće, redukovati zonu u kojoj se nalazi mobilna stanica. U skladu sa tim, pravougaona zona dobijena primenom metode kvadrata u okviru koje se nalazi mobilna stanica, može se dodatno redukovati ako se primene stvarne granice unutar kojih može biti mobilna stanica, a koje su određene koordinatama baznih stanica i odgovarajućim vrednostima TA parametara, u skladu sa (6.41). Rezultat ovog postupka je metoda prstenova. U implementaciji metode prstenova, prvi korak je prethodno opisana metoda kvadrata. Kao rezultat primene metode kvadrata, dobijena je zona oblika pravougaonika sa granicama (6.50)–(6.53), u okviru koje se nalazi

mobilna stanica. U sledećem koraku, pravougaona zona određena sa (6.48) i (6.49) se segmentira na $n_x \times n_y$ prostornih elemenata, gde je

$$n_x = \text{int}\left(\frac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta x}\right) + 1 \quad (6.58)$$

i

$$n_y = \text{int}\left(\frac{y_{\max} - y_{\min}}{\Delta y}\right) + 1. \quad (6.59)$$

Obzirom da nema razloga da se koordinatne ose u procesu određivanja lokacije mobilne stanice tretiraju različito, u daljem tekstu smatraće se da su koraci prostorne diskretizacije po x i y osi isti, tj. da je $\Delta x = \Delta y$. Takođe, u daljoj analizi prilikom računanja rastojanja, prostorni elementi biće predstavljeni svojim centralnim tačkama,

$$x_k = x_{\min} + \left(k - \frac{1}{2}\right)\Delta x \quad (6.60)$$

za $k = 1, \dots, n_x$, i

$$y_l = y_{\min} + \left(l - \frac{1}{2}\right)\Delta y \quad (6.61)$$

za $l = 1, \dots, n_y$.

Nakon prostorne diskretizacije pravougaone zone u kojoj se nalazi mobilna stanica, sledeći korak je uvođenje matrice \mathbf{B} , koja sadrži indikatore o tome da li se mobilna stanica može nalaziti na posmatranom prostornom elementu ili ne. Za memorisanje matrice \mathbf{B} dovoljno je rezervisati 1 bit po prostornom elementu, što znači da postupak nije zahtevan po pitanju memorije. Obzirom da se mobilna stanica može nalaziti unutar bilo kojeg prostornog elementa, elementi matrice \mathbf{B} se na početku ove metode pozicioniranja inicijalizuju na vrednost 1, tj. $b_{k,l} = 1$ za $k = 1, \dots, n_x$ i $l = 1, \dots, n_y$.

Elementima matrice \mathbf{B} vrednost se proverava za svaku od baznih stanica koja učestvuje u postupku pozicioniranja. Neka je i indeks bazne stanice koja se trenutno procesira. Rastojanje između BS i prostornog elementa dato je sa

$$r_{k,l,i} = \sqrt{(x_k - x_{BSi})^2 + (y_l - y_{BSi})^2}. \quad (6.62)$$

Za slučaj

$$r_{k,l,i} < TA_i R_q \text{ ili } r_{k,l,i} > (TA_i + 1)R_q \quad (6.63)$$

odgovarajući element matrice \mathbf{B} dobija vrednost nula, tj. $b_{k,l} = 0$, obzirom da se mobilna stanica ne može nalaziti u okviru tog prostornog elementa. Postupak se

ponavlja za svaku baznu stanicu sa odgovarajućim TA parametrom, koja učestvuje u postupku pozicioniranja. Da bi se izbeglo računarsko opterećenje, odnosno, računanje i poređenje kvadratnih korena (6.62), i višestruko ponavljanje računanja iste vrednosti, vrednosti $(x_k - x_{BSi})^2$ i $(y_l - y_{BSi})^2$ potrebno je izračunati samo jedanput a zatim memorisati.

Nakon što se prostornim elementima u kojima se mobilna stanica ne može nalaziti vrednosti promene sa inicijalne jedinice na nulu, dobija se redukovana zona u kojoj se nalazi mobilna stanica. Kao i u slučaju metode kvadrata, za računanje koordinata mobilne stanice primenjuje se probablistički pristup, uz istu pretpostavku o uniformnoj raspodeli lokacije mobilne stanice unutar redukovane zone. Verovatnoća da se mobilna stanica nalazi unutar zone koju čine preostali prostorni elementi čije su vrednosti jedinice, iznosi $1/n_1$, gde je

$$n_1 = \sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^{n_y} b_{k,l}. \quad (6.64)$$

Procenjene koordinate mobilne stanice dobijaju se kao matematičko očekivanje dvodimenzionalne slučajne promenljive kao

$$x_{EMS} = \frac{1}{n_1} \sum_{k=1}^{n_x} x_k \sum_{l=1}^{n_y} b_{k,l} \quad (6.65)$$

i

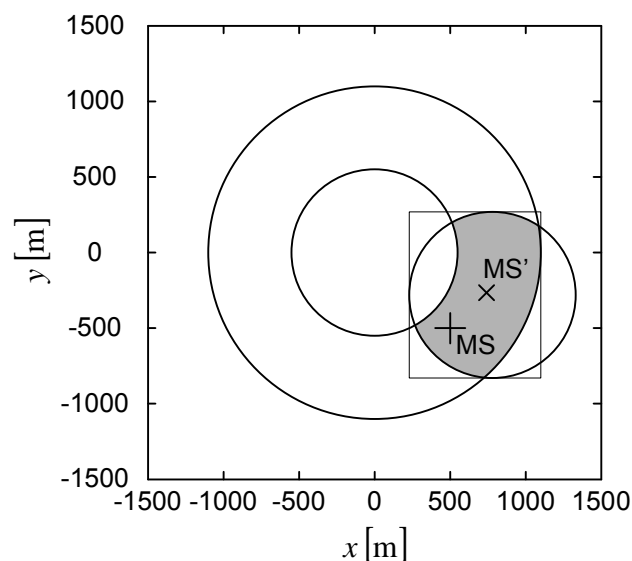
$$y_{EMS} = \frac{1}{n_1} \sum_{l=1}^{n_y} y_l \sum_{k=1}^{n_x} b_{k,l}. \quad (6.66)$$

Standardna devijacija je

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n_1} \sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^{n_y} b_{k,l} \left((x_k - x_{EMS})^2 + (y_l - y_{EMS})^2 \right)} \quad (6.67)$$

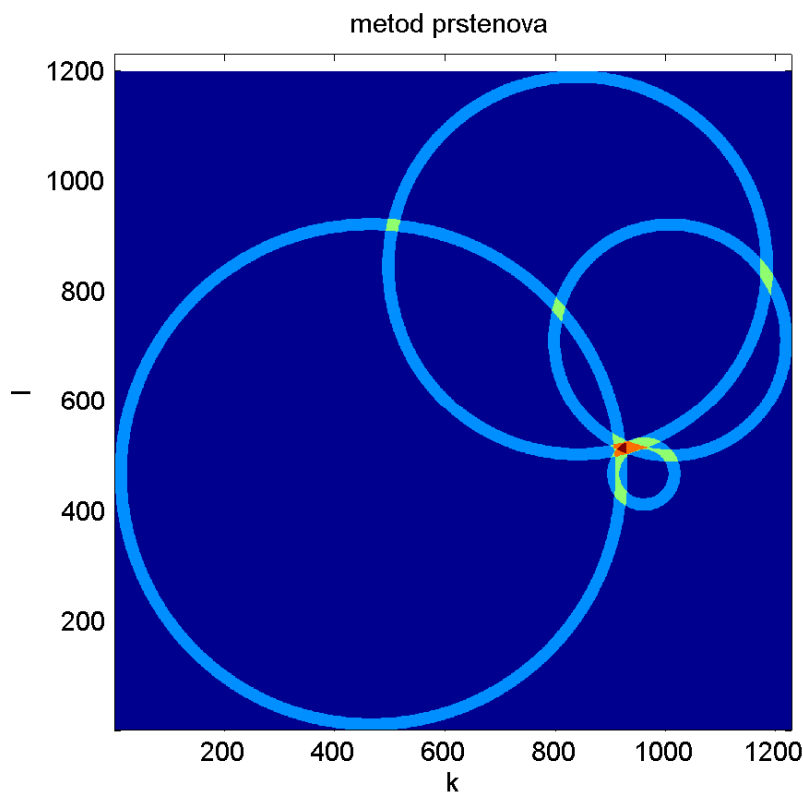
i može se koristiti kao mera preciznosti procene pozicije MS primenom dostupnih podataka.

Za ilustraciju pozicioniranja primenom metode prstenova (slika 6.7), posmatra se isti scenario kao u slučaju metode kvadrata. Procenjene koordinate mobilne stanice u ovom slučaju su $x_{EMS} = 740.79$ m i $y_{EMS} = -266.03$ m, sa standardnom devijacijom $\sigma = 343.86$ m. Greška pozicioniranja iznosi $d = 335.74$ m, što znači da primenom metode prstena greška pozicioniranja biva veća nego u slučaju metode kvadrata. Ipak, oblast u kojoj se nalazi mobilna stanica smanjena je sa 957000 m^2 na 595200 m^2 , što rezultira manjom standardnom devijacijom.



Slika 6.7. Metoda prstenova: $n_{BS} = 2$, $(x_{BS1}, y_{BS1}) = (0, 0)$, $TA_1 = 1$,
 $(x_{BS2}, y_{BS2}) = (780, -280)$ m, $TA_2 = 0$,
 procenjena lokacija mobilne stanice MS' $(x_{EMS}, y_{EMS}) = (740.79, -266.03)$ m,
 stvarna lokacija mobilne stanice MS $(x_{MS}, y_{MS}) = (500, -500)$ m,
 standardna devijacija $\sigma = 343.86$ m, greška pozicioniranja $d = 335.74$ m.

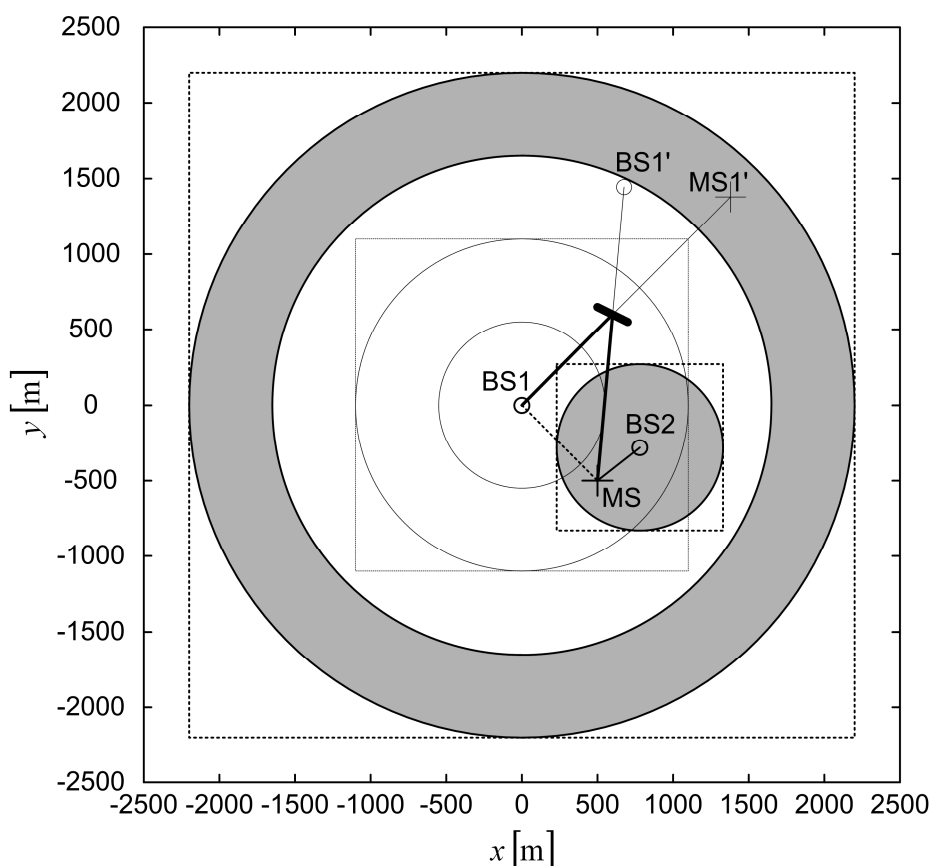
Primer metoda prstenova dobijen na osnovu eksperimentalnih rezultata dat je na slici 6.8. U eksperimentalnom primeru sa slike 6.8, u postupku pozicioniranja učestvovala su četiri bazne stanice sa odgovarajućim vrednostima TA parametara. Zona u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice redukovana je na zonu dobijenu u preseku prstenova definisanih koordinatama i TA parametrima baznih stanica koje su učestvovala u postupku pozicioniranja.



Slika 6.8. Metod prstenova, eksperimentalni primer.

6.3.3. Problemi usled prostiranja u NLOS uslovima

Metoda kvadrata i metoda prstenova analizirane su pod pretpostavkom LOS uslova prostiranja, odnosno, da između baznih stanica koje učestvuju u postupku pozicioniranja i mobilne stanice čija se lokacija procenjuje, postoji direktna optička vidljivost. Ovo i jeste čest slučaj u ruralnom okruženju. Ipak, kada se mobilna stanica nalazi u npr. urbanoj zoni, velika je verovatnoća da će se komunikacija mobilne stanice sa nekim baznim stanicama vršiti preko refleksije, a ne preko direktne komponente. Dakle, NLOS je čest scenario u urbanim i suburbanim zonama. Na slici 6.9 prikazan je primer koji oslikava problem koji unosi prostiranje u NLOS uslovima. Raspored baznih i mobilne stanice je isti kao u primerima sa slika 6.5 i 6.7, tj. $(x_{BS1}, y_{BS1}) = (0, 0)$, $(x_{BS2}, y_{BS2}) = (780, -280)$ m, $(x_{MS}, y_{MS}) = (500, -500)$ m. Za razliku od prethodnih, u slučaju sa slike 6.9 na putu signala između prve bazne stanice BS_1 i mobilne stanice postoji prepreka, što dovodi do toga da se komunikacija između bazne i mobilne stanice obavlja u NLOS uslovima. Isprekidanom linijom označena je putanja direktne komponente koja bi postojala kada u sistemu sa slike 6.9 ne bi bilo prepreke, odnosno, isprekidana linija predstavlja LOS pravac. Kako u sistemu na mestu $(600, 600)$ m postoji prepreka koja narušava liniju direktne optičke vidljivosti, mobilna stanica sa baznom stanicom BS_1 komunicira preko refleksije, tačnije, preko komponente reflektovane od prepreke (puna linija).



Slika 6.9. Problem usled NLOS prostiranja signala između BS_1 i mobilne stanice MS.

Usled NLOS uslova prostiranja tj. činjenice da se komunikacija između mobilne stanice i bazne stanice BS_1 obavlja preko refleksije, a u skladu sa definicijom TA parametra [17], za baznu stanicu BS_1 sa slike 6.9, mobilna stanica se nalazi na mestu $(x'_{MS}, y'_{MS}) = (1381, 1381)$ m. Sa druge strane, za mobilnu stanicu sa iste slike, bazna stanica BS_1 se nalazi na mestu $(x'_{BS1}, y'_{BS1}) = (676.8, 1445)$ m. Posledica je pogrešna vrednost TA parametra, tako da usled dužeg vremena prostiranja signala od bazne stanice BS_1 do ciljane mobilne stanice i nazad, bazna stanica BS_1 donosi pogrešan zaključak da je $TA_1 = 3$, umesto tačne vrednosti, $TA_1 = 1$. Ovo dalje rezultira pogrešnom procenom rastojanja između mobilne i bazne stanice. Druga bazna stanica sa slike 6.9, BS_2 komunicira sa mobilnom stanicom preko direktne komponente, rezultujući tačnom vrednošću TA parametra, $TA_2 = 0$. Najzad, posledica scenarija prikazanog na slici 6.9 je nemogućnost lociranja mobilne stanice, obzirom da se usled greške određivanja parametra TA_1 dobijaju dve prostorno razdvojene zone u kojima se procenjuje lokacija mobilne stanice (osencene površine). Na osnovu prethodnog, zaključak je da u se slučaju NLOS prostiranja, metoda prstenova ne može primeniti. Sa druge strane, metoda kvadrata bi se mogla primeniti, obzirom da greške određivanja TA parametra usled refleksije rezultiraju samo u povećanju kvadrata u okviru kojeg se procenjuje lokacija mobilne stanice, pa bi tako povećani kvadrat svakako obuhvatio i stvarnu lokaciju mobilne stanice, kao što je i prikazano na slici 6.9.

Generalno, NLOS uslovi prostiranja predstavljaju veliki problem u postupku pozicioniranja mobilne stanice u okruženjima gde postoji veliki broj prepreka, kao što je slučaj sa urbanim i donekle suburbanim zonama.

6.3.4. Metoda krugova

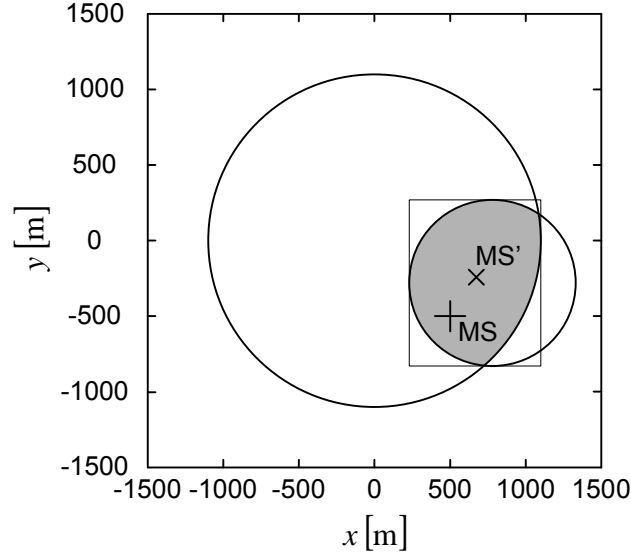
Kao što je rečeno u zaključku prethodnog poglavlja, procenu lokacije mobilne stanice ne treba određivati primenom metode prstenova u okruženjima gde se očekuje česta propagacija u NLOS uslovima, jer ova metoda ne može dati nikakav rezultat. Za razliku od metode prstenova, metoda kvadrata se u ovakvim okruženjima može primeniti i u konkretnom primeru sa slike 6.9 rezultira procenjenom lokacijom mobilne stanice na $(x_{EMS}, y_{EMS}) = (780, -280)$ m, koja se nalazi u zoni kvadratnog oblika površine 1210000 m^2 , i greškom pozicioniranja $d = 356 \text{ m}$. U razmatranom primeru, rezultat primenom metode kvadrata bio bi isti kao i kada u postupku lociranja mobilne stanice ne bi ni učestvovala bazna stanica kod koje se javlja problem sa refleksijom (konkretno, BS_1), obzirom da je kvadratna zona definisana drugom baznom stanicom BS_2 u potpunosti sadržana unutar kvadratne zone definisane prvom baznom stanicom, BS_1 . Zapravo, ovde i nije reč o specijalnom slučaju jer, generalno, metoda kvadrata i nije osetljiva na NLOS uslove prostiranja. Razlog je taj što se TA parametar odnosi se na povratno vreme propagacije signala emitovanog od bazne stanice ka mobilnoj stanici. U skladu sa tim, bez obzira na moguće NLOS uslove prostiranja, odnosno, eventualne greške u određivanju TA parametra, mobilna stanica je u svakom slučaju locirana unutar kruga poluprečnika

$$r \leq (TA + 1) R_q \quad (6.68)$$

sa centrom na mestu bazne stanice, i ne može se nalaziti izvan njega. Sa druge strane, unutrašnji krug, čije su granice određene sa (6.41), primenjuje se samo u slučaju kada postoji direktna optička vidljivost između bazne i mobilne stanice. Najzad, granice unutrašnjeg kruga su potpuno irelevantne za metod kvadrata, pa ovaj metod stoga nije osetljiv na probleme koji nastaju usled NLOS uslova prostiranja.

Da bi se iskoristila otpornost metode kvadrata na NLOS uslove prostiranja a istovremeno povećala tačnost određivanja lokacije mobilne stanice, razvijena je metoda krugova. Po definiciji, metoda krugova locira mobilnu stanicu unutar kruga poluprečnika definisanog sa (6.68), čiji se centar poklapa sa koordinatama odgovarajuće bazne stanice. U slučaju kada u postupku pozicioniranja učestvuju više baznih stanica poznatih vrednosti TA parametara za ciljanu mobilnu stanicu, zona u kojoj se procenjuje lokacija te mobilne stanice nalazi se u preseku krugova dobijenih na osnovu podataka o koordinatama baznih stanica i odgovarajućih vrednosti TA parametara.

Primena metode krugova prikazana je na slici 6.10. Položaj baznih stanica i vrednosti TA parametara su isti kao u primerima sa slika 6.5 i 6.7.



Slika 6.10. Metoda krugova: $n_{BS} = 2$, $(x_{BS1}, y_{BS1}) = (0,0)$, $TA_1 = 1$,
 $(x_{BS2}, y_{BS2}) = (780, -280)$ m, $TA_2 = 0$,
 procenjena lokacija mobilne stanice MS' $(x_{EMS}, y_{EMS}) = (673.99, -242.03)$ m,
 stvarna lokacija mobilne stanice MS $(x_{MS}, y_{MS}) = (500, -500)$ m,
 standardna devijacija $\sigma = 351.14$ m, greška pozicioniranja $d = 311.16$ m.

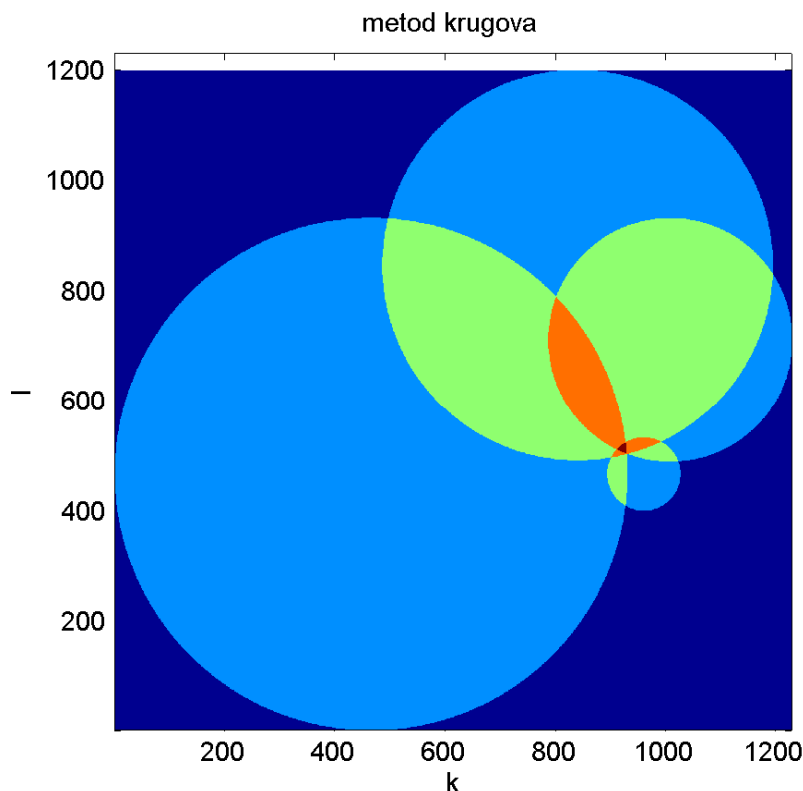
Kao i u slučaju metode prstenova, i ovaj algoritam startuje metodom kvadrata, kako bi se redukovao prostor u kojem se može nalaziti mobilna stanica. Diskretizacija prostora je primenjena iz istih razloga i na isti način kao i u slučaju metode prstenova, dok je matrica \mathbf{B} definisana i inicijalizovana takođe na isti način kao kod metode prstenova. Sledeći korak je računanje rastojanja između baznih stanica koje učestvuju u postupku pozicioniranja i prostornih elemenata dobijenih diskretizacijom. Elementi matrice \mathbf{B} , inicijalno postavljeni na vrednost jedan, poprimaju vrednost nula ako je ispunjen uslov

$$r_{k,l,i} > (TA_i + 1)R_q \quad (6.69)$$

koji je drugačiji u odnosu na uslov koji se primenjuje kod metode prstenova, (6.63). U suštini, to je i jedina razlika metode prstenova i metode krugova. Procenjene koordinate mobilne stanice dobijaju se primenom izraza (6.65) i (6.66), dok se standardna devijacija dobija primenom izraza (6.67).

U primeru sa slike 6.10, primena metode krugova rezultira procenjenim koordinatama mobilne stanice $x_{EMS} = 673.99$ m, $y_{EMS} = -242.03$ m, i standardnom devijacijom $\sigma = 351.14$ m. Greška pozicioniranja u ovom slučaju iznosi $d = 311.16$ m. Površina zone u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice iznosi 735200 m^2 (osenceni deo slike 6.10), što je veće nego u slučaju metode prstenova, ali manje u odnosu na metodu kvadrata. Ako se metoda krugova primeni na NLOS slučaj sa slike 6.9, procenjena lokacija mobilne stanice je ista kao u slučaju metode kvadrata, $x_{EMS} = 780$ m, $y_{EMS} = -280$ m, greška pozicioniranja takođe iznosi $d = 356$ m, ali je zona u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice redukovana sa 1210000 m^2 na 950332 m^2 .

Primer metoda krugova dobijen na osnovu eksperimentalnih rezultata dat je na slici 6.11. U eksperimentalnom primeru sa slike 6.11, u postupku pozicioniranja učestvovala su četiri bazne stanice sa odgovarajućim vrednostima TA parametara. Zona u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice redukovana je na zonu dobijenu u preseku krugova definisanih koordinatama baznih stanica i odgovarajućim vrednostima TA parametara.



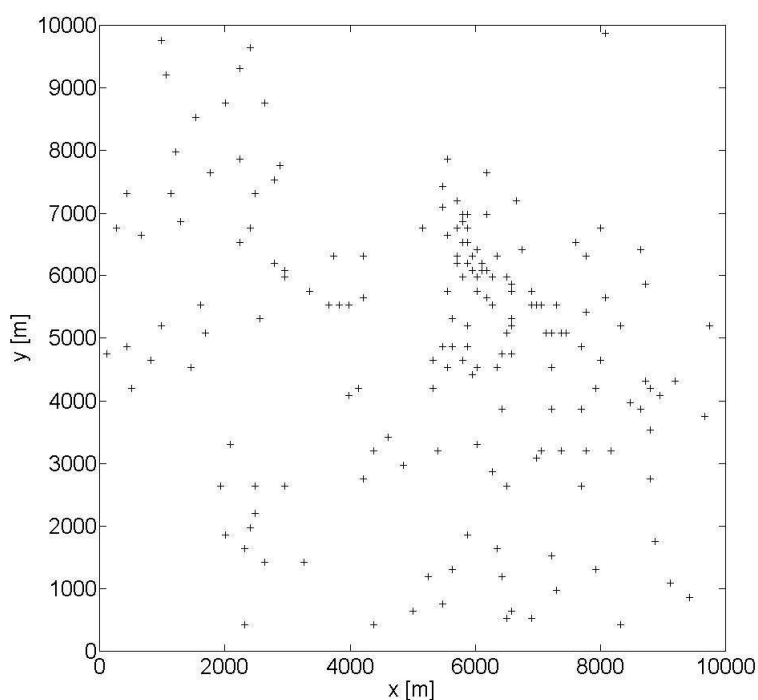
Slika 6.11. Metoda krugova, eksperimentalni primer.

Zaključak je da je metoda krugova imuna na NLOS uslove prostiranja, ali u poređenju sa metodom prstenova ima manju tačnost, obzirom da je zona u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice veća od one u slučaju metode prstenova. Obe metode startuju primenom metode kvadrata, a zatim redukuju zonu u kojoj se nalazi mobilna stanica primenom (6.63) i (6.69). Prilikom primene izraza (6.63) i (6.69), računarsko opterećenje je u najvećoj meri posledica računanja rastojanja, (6.62). Obzirom na niske zahteve po pitanju memorisanja podataka, pogodno je istovremeno, i primenom metode prstenova i metode krugova, raditi proračun lokacije mobilne stanice. U slučaju da metoda prstenova rezultira procenjenom lokacijom mobilne stanice, rezultat dobijen grubljom metodom, metodom krugova, se odbacuje kao manje precizan. U suprotnom, tj. u uslovima NLOS propagacije koja onemogućava primenu metode prstenova, kao rezultat se prihvata procenjena lokacija mobilne stanice dobijena primenom metode krugova.

6.3.5. Poređenje probabilističkih metoda pozicioniranja

U cilju poređenja tri metoda kvadrata, prstenova i krugova, razmatra se zona površine 100km^2 , pokrivena realnom GSM mrežom. Izabrana zona pokriva urbanu gradsku zonu, ali i obuhvata i neke manje naseljene oblasti. U okviru izabrane zone

nalazi se 174 bazne stanice, ali razmatrani set baznih stanica iznosi 274, obično da se neke bazne stanice ne nalaze u izabranoj zoni, ali su kandidati u listi najbližih baznih stanica. Izbor razmatranih baznih stanica bio je proizvoljan, uzimajući četiri puta veću zonu kako bi se obezbedilo da sve bazne stanice od interesa budu obuhvaćene, a da se pri tome vreme simulacije ne poveća mnogo. Na slici 6.12 prikazane su pozicije baznih stanica unutar izabrane zone. U modelu iz simulacije, geografske koordinate baznih stanica su realne, i preuzete iz baze podataka operatora. Ostale pretpostavke su da su sve bazne stanice identičnih karakteristika (omnidirekcionni antenski sistemi, iste visine predajnih antenskih sistema, iste efektivne snage zračenja svih predajnika) kao i da su uslovi prostiranja u celoj mreži identični. Diskretizacija prostora rađena je na način opisan u poglavlju 6.2, pri čemu je izabran korak od $\Delta x = \Delta y = 20$ m, što je rezultiralo sa 250 hiljada prostornih elemenata u zoni kvadratnog oblika $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$.



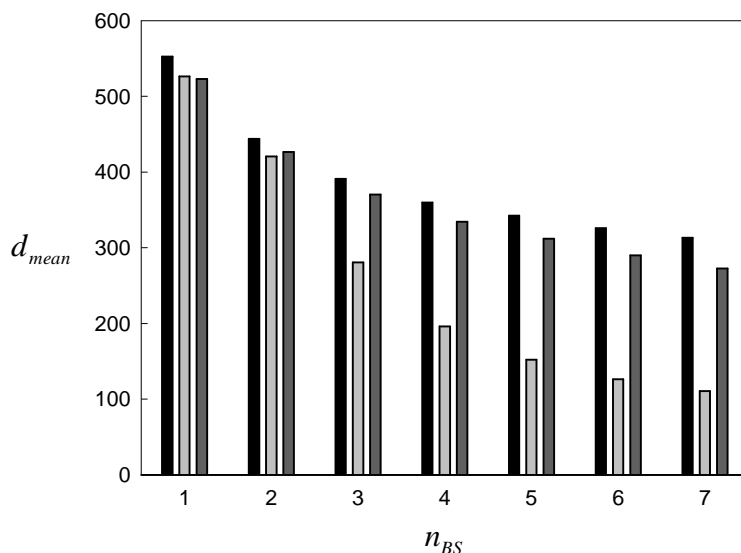
Slika 6.12. Pozicije baznih stanica.

U cilju poređenja metoda kvadrata, prstenova i krugova, pretpostavljeno je da je mobilna stanica locirana u centru svakog prostornog elementa dobijenog diskretizacijom prostora. Takođe, pretpostavljeno je da su na raspolaganju podaci o odgovarajućim vrednostima TA parametara za n_{BS} baznih stanica koje su najbliže trenutnom položaju mobilne stanice. Treba napomenuti da nijedan od algoritama ne zahteva ovaj uslov, već je pretpostavka usvojena samo da bi se izvršilo testiranje metoda.

Zavisnost srednje greške pozicioniranja u funkciji broja baznih stanica koje učestvuju u postupku pozicioniranja, prikazan je na slici 6.13. Na istoj slici, metoda kvadrata predstavljena je barovima sa leve strane, barovima u sredini predstavljena je metoda prstenova, dok barovi sa desne strane predstavljaju rezultate dobijene metodom krugova.

Kao što je i bilo za očekivati, greška pozicioniranja opada sa porastom broja baznih stanica koje učestvuju u postupku pozicioniranja. Najveće smanjenje greške

pozicioniranja sa porastom broja baznih stanica ima metoda prstenova. Ipak, za mali broj baznih stanica sve tri metode daju približno isti rezultat, pa bi stoga u situacijama kada u postupku pozicioniranja ne učestvuje veliki broj baznih stanica pogodno bilo koristiti najjednostavniju metodu, metodu kvadrata. Kao što se može videti sa slike 6.13, u svim slučajevima metoda krugova pokazuje nešto bolje rezultate nego metoda kvadrata, dok najbolje rezultate u svim slučajevima daje metoda prstenova.

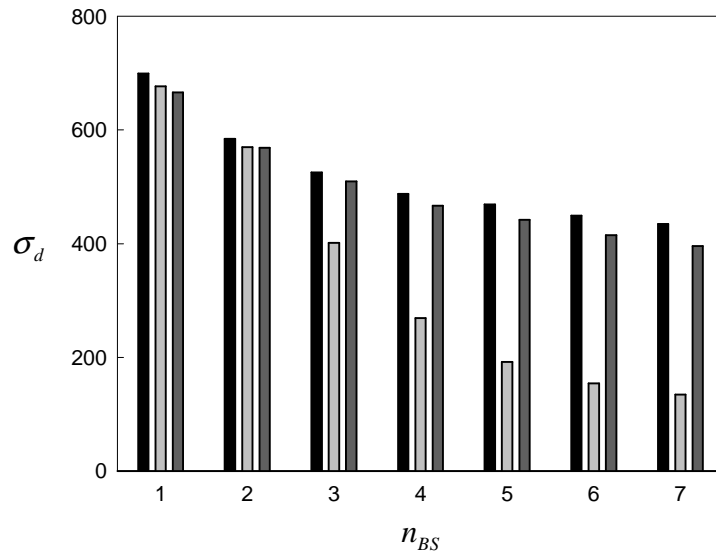


Slika 6.13. Srednja greška pozicioniranja d_{mean} u funkciji broja baznih stanica n_{BS} ; levi bar: metoda kvadrata; bar u sredini: metoda prstenova; desni bar: metoda krugova.

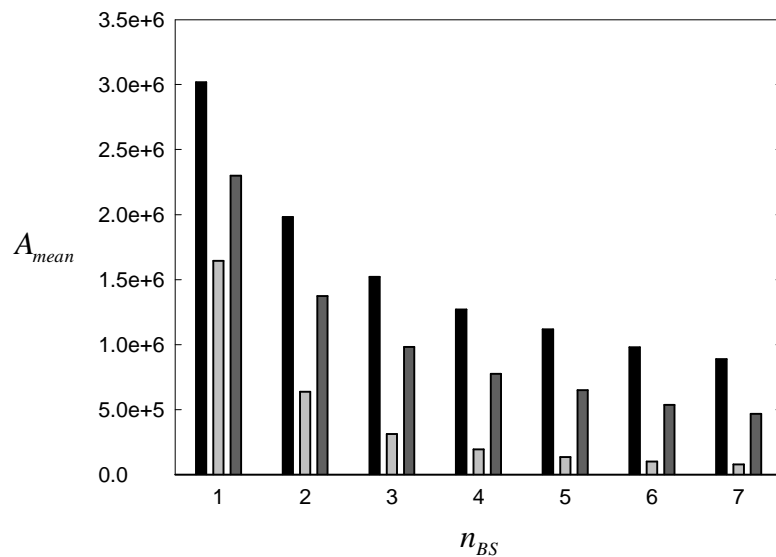
Na slici 6.14 prikazana je zavisnost standardne devijacije rezultata pozicioniranja, tj. procenjene lokacije mobilne stanice od broja baznih stanica koje učestvuju u postupku pozicioniranja. Notacija je ista kao i na slici 6.13. Takođe, zavisnost standardne devijacije rezultata pozicioniranja od broja baznih stanica slična je kao i u slučaju greške pozicioniranja sa slike 6.13, samo su vrednosti oko 1.3 puta veće. Najbolje rezultate i u ovom slučaju pokazuje metoda prstenova, dok su razlike između metode kvadrata i metode krugova male i to u korist metode krugova.

Zavisnost srednje površine zone u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice od broja baznih stanica koje učestvuju u postupku pozicioniranja prikazana je na slici 6.15. Prikazani su slučajevi za sve tri metode i sa istom notacijom kao i na slikama 6.13 i 6.14. Sa dijagrama se vidi ubedljiva prednost metode prstenova, dok je, za razliku od prethodna dva slučaja, vidno i poboljšanje metode krugova u odnosu na metodu kvadrata.

Nakon sprovedenih analiza, zaključak je da, kad god je to moguće, za procenu lokacije mobilne stanice treba primeniti metodu prstenova, obzirom da ona daje najbolje rezultate. Ipak, metoda prstenova je osetljiva na NLOS propagaciju, pa je u tim situacijama nije moguće primeniti. Takođe, metoda prstenova ima izraženiju prednost u odnosu na metode kvadrata i krugova sa povećanjem broja baznih stanica koje učestvuju u postupku pozicioniranja. Za mali broj baznih stanica, naročito za slučajeve $n_{BS} = 1$ i $n_{BS} = 2$, srednja greška pozicioniranja vrlo malo zavisi od izbora metode, za razliku od srednje površine procenjene zone u kojoj se nalazi mobilna stanica gde su te razlike znatne, čak i za male vrednosti n_{BS} .



Slika 6.14. Standardna devijacija rezultata pozicioniranja σ_d u funkciji broja baznih stanica n_{BS} ; levi bar: metoda kvadrata; bar u sredini: metoda prstenova; desni bar: metoda krugova.



Slika 6.15. Srednja površina zone u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice A_{mean} u funkciji broja baznih stanica n_{BS} ; levi bar: metoda kvadrata; bar u sredini: metoda prstenova; desni bar: metoda krugova.

Rezultati simulacije jasno su pokazali ključne razlike između tri predstavljene probabilističke metode za pozicioniranje mobilne stanice koje se baziraju na vremenu propagacije signala između mobilne i bazne stanice. Konačna procena prethodnih metoda bi se mogla sumirati u nekoliko sledećih zaključaka:

- kada u postupku pozicioniranja učestvuje mali broj baznih stanica, greška pozicioniranja je približno ista za sve tri metode
- za razliku od greške pozicioniranja, površina zone u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice u velikoj meri zavisi od izbora metode i najmanja je u slučaju metode prstenova

- uvođenjem više baznih stanica u postupak pozicioniranja smanjuje se greška pozicioniranja
- najbolje rezultate postiže metoda prstenova, u slučajevima kada se može primeniti, obzirom da je osetljiva na NLOS propagaciju
- za mali broj baznih stanica, razuman izbor može biti metoda kvadrata, naročito ako se radi o aplikacijama gde je važna računarska efikasnost.

7. LCS standardizacija

Od nastanka ideje o lociranju korisnika u radio mrežama do danas, razvijeno je više različitih metoda pozicioniranja. Neke od njih se oslanjaju na sisteme i infrastrukture koje su isključivo namenjene u svrhe pozicioniranja (GPS, Galileo). Druge se oslanjaju na sisteme i infrastrukture čiji primarni cilj nije navigacija, već komunikacija. Zbog toga je, u slučaju ovih drugih, bilo neophodno razviti posebne standarde kako bi se obezbedila implementacija servisa koji se baziraju na poznavanju lokacije korisnika u ćelijskim radio-mrežama. Ti standardi se zovu LCS standardi.

Proces standardizacije počeo je razvojem LCS standarda za GSM mreže a pokrenut je od strane FCC Standardizaciju vrši globalna organizacija za razvoj standarda, 3GPP.

U okviru pozicioniranja u ćelijskim mrežama postoje dva tipa LCS arhitekture: *C-plane* (*Control-plane*) i *U-plane* (*User-plane*) [48]. *C-plane* je tip LCS arhitekture u kojoj se LCS poruke transportuju preko logičkih signalizacionih kanala u okviru ćelijskih mreža. Ova arhitektura je dizajnirana u skladu sa E-911 zahtevima, tj. zadatak joj je da omogući visoku tačnost i široku dostupnost LBS u okviru ćelijskih mreža. *C-plane* rešenje iskorišćava mogućnosti ćelijskih radio mreža i obezbeđuje transport LCS informacija kontrolnim kanalima preko radio interfejsa, dakle, govor i LCS podaci se mogu simultano razmenjivati.

U-plane je tip LCS arhitekture u kojoj se LCS poruke pojavljuju kao korisnički podaci u okviru ćelijskih mreža. U okviru *U-plane* tipa arhitekture, LCS poruke između terminala i mreže se razmenjuju preko IP (*Internet Protocol*) konekcije. *U-plane* pristup je predložen kao alternativna/komplementarna varijanta *C-plane* soluciji kako bi se izbeglo eventualno veliko signalizaciono opterećenje (koje zahtevaju neke metode pozicioniranja).

7.1. GERAN LCS

U okviru pristupne mreže GSM/EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*) sistema, GERAN (*GSM/EDGE Radio Access Network*), razvijen je veći broj metoda pozicioniranja koje se razlikuju kako po tačnosti tako i po kompleksnosti kontrolnih mehanizama u pristupnim mrežama i terminalima koji su neophodni za potrebe pozicioniranja.

7.1.1. GERAN LCS standardizacija metoda pozicioniranja

Prema [49], za GERAN su standardizovane četiri metode pozicioniranja:

- Cell-ID+TA (*Cell Identification + Timing Advance*),
- E-OTD (*Enhanced Observed Time Difference*),
- U-TDOA (*Uplink Time Difference of Arrival*) i

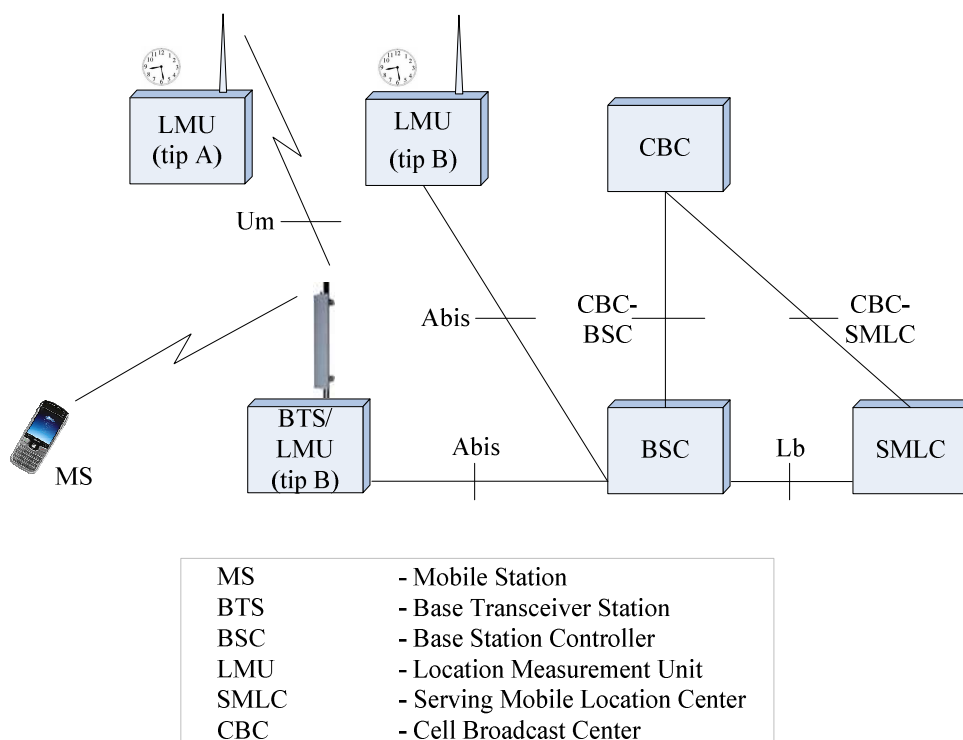
- A-GNSS (*Assisted Global Navigation Satellite System*).

Implementacija Cell-ID+TA i A-GNSS u postojeće GSM mreže je relativno jednostavna, dok implementacija E-OTD i U-TDOA zahteva suštinske modifikacije i uvođenje novih komponenata.

7.1.2. GERAN LCS arhitektura

U skladu sa [49], za potrebe implementacije LCS u GERAN, neophodne su dodatne dve komponente: SMLC (*Serving Mobile Location Center*) i LMU (*Location Measurement Unit*). Na slici 7.1 prikazana je integracija ovih komponenata u GERAN [2].

LMU je dodatni hardver koji zahtevaju neke od metoda pozicioniranja (E-OTD, U-TDOA). Koristi se za precizna merenja vremena transmisije signala i na DL i na UL. Na DL, LMU se koristi za merenje vremenskog ofseta između vremenskih slotova sa različitim baznih stanica, čime obezbeđuje *a posteriori* sinhronizaciju koju zahteva E-OTD metoda pozicioniranja. Na UL, LMU služi za vremenska merenja transmisije signala od mobilne stanice, što zahteva U-TDOA metoda pozicioniranja. Najzad, da bi se podatak o vremenu izmeren od strane LMU mogao iskoristiti za potrebe pozicioniranja, moraju biti poznate i geografske koordinate LMU jedinica.



Slika 7.1. GERAN LCS arhitektura.

SMLC je komponenta koja upravlja kompletnim procesom pozicioniranja, uključujući alokaciju resursa, izbor odgovarajuće metode pozicioniranja, organizaciju potrebnih merenja, kao i sam proračun nepoznate lokacije mobilne stanice. U zavisnosti od konkretne metode pozicioniranja, SMLC kontroliše i upravlja radom jedne ili više LMU jedinica. SMLC organizuje čitav postupak merenja koja realizuju LMU jedinice, i rezultate merenja koristi za pripremu pomoćnih podataka u postupku

pozicioniranja (E-OTD), ili za proračun same lokacije mobilne stanice (U-TDOA). Takođe, SMLC komponente moraju imati i mogućnost međusobne komunikacije u slučaju da pripadaju različitim pristupnim mrežama, a u cilju podrške pozicioniranju za korisnike koji se kreću između tih pristupnih mreža.

U zavisnosti od metoda pozicioniranja koje podržava, pristupna mreža obično sadrži jednu SMLC komponentu i nekoliko LMU jedinica. U zavisnosti od vrste veze sa pristupnom mrežom, postoje dva tipa LMU jedinica: tip A LMU i tip B LMU. U prvom slučaju, LMU je povezana sa pristupnom mrežom samo preko radio veze, odnosno, radio interfejsa. Na taj način, LMU jedinicu tipa A mreža vidi kao konvencionalnu mobilnu stanicu, sa razlikom što je LMU jedinica stacionarna i ima poznate koordinate. Sa druge strane, LMU jedinica tipa B je sa pristupnom mrežom povezana preko žičanog linka i može se koristiti ili kao samostalna komponenta ili integrisana u okviru bazne stanice. Takođe, sva neophodna merenja, LMU jedinica obavlja ili u odnosu na izabranu baznu stanicu ili u odnosu na GPS vreme, u kom slučaju LMU jedinice moraju biti opremljene GPS prijemnikom. Sa druge strane, SMLC takođe može biti samostalna komponenta u pristupnoj mreži ili može biti integrisana u okviru BSC (*Base Station Controller*).

Kao podrška postupku pozicioniranja može se zahtevati još jedna komponenta, CBC (*Cell Broadcast Center*). Ova komponenta je naročito važna u slučaju *mobile-based* metoda pozicioniranja. Preko CBC komponente šalju se pomoćni podaci (npr. geografske koordinate baznih stanica, korekcije vremena, vidljivost satelita, ...) ka mobilnoj stanici u E-OTD i A-GNSS metodama pozicioniranja. Kao što je rečeno, te pomoćne podatke priprema SMLC, dostavlja ih u CBC koji ih zatim prosleđuje odgovarajućem BSC za transmisiju.

U pristupnoj mreži GERAN, postupak pozicioniranja mora biti koordinisan signalizacijom između SMLC, BSC, LMU, CBC i mobilne stanice. Pregled odgovarajućih protokola sadržan je u [50-56].

7.2. UTRAN LCS

Kao i u slučaju GERAN, u okviru pristupne mreže UMTS sistema, UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*) razvijen je veći broj metoda pozicioniranja, od koji su neke i standardizovane.

7.2.1. UTRAN LCS standardizacija metoda pozicioniranja

Prema specifikaciji [57], za UTRAN su standardizovane četiri metode pozicioniranja:

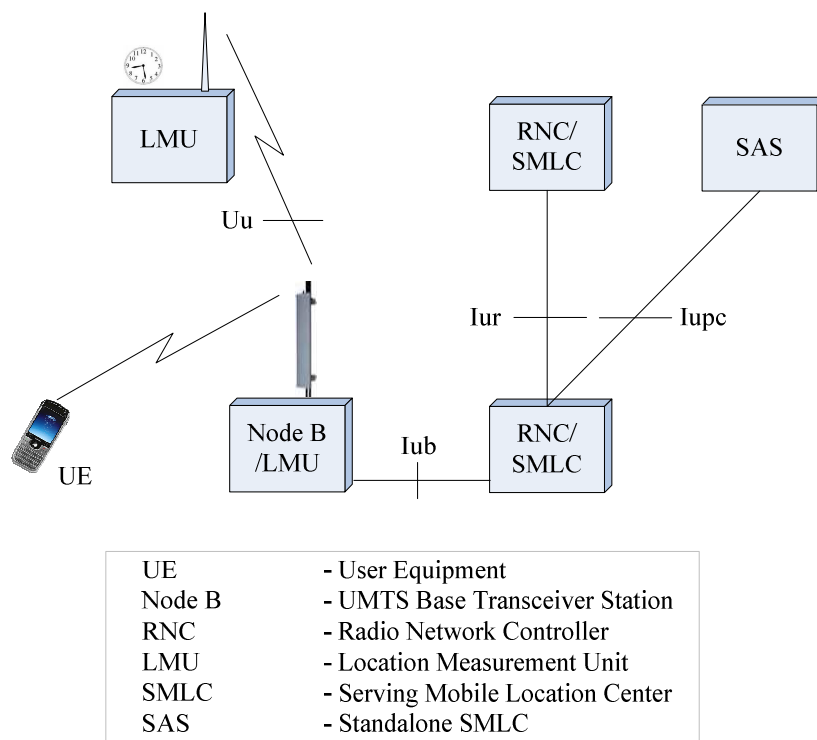
- Cell-ID (*Cell Identification*),
- OTDOA-IPDL (*Observed Time Difference Of Arrival-Idle Period Downlink*),
- A-GNSS (*Assisted Global Navigation Satellite System*) i
- U-TDOA (*Uplink Time Difference of Arrival*).

7.2.2. UTRAN LCS arhitektura

Kao i u slučaju GSM, implementacije LCS servisa u UMTS zahteva dodatne komponente. Ipak, za razliku od GSM, LCS komponente u UMTS su uglavnom

integrirane u okviru baznih stanica (Node B) ili RNC (*Radio Network Controller*). Na slici 7.2 dat je prikaz UTRAN LCS arhitekture [2].

U slučaju UTRAN-FDD (UTRAN - *Frequency Division Duplex*), LMU jedinice su obično integrirane u okviru baznih stanica, i služe za postizanje sinhronizacije između baznih stanica. Ipak, u uslovima kada između baznih stanica od interesa postoje loši ili NLOS uslovi prostiranja signala, što najčešće i jeste slučaj, LMU jedinice se mogu koristiti i kao samostalne komponente postavljene na mesta koja obezbeđuju bolje uslove prostiranja signala a time i tačnija merenja. U tim slučajevima, LMU jedinice su u vezi sa pristupnom mrežom preko radio interfejsa. U slučaju UTRAN-TDD (UTRAN - *Time Division Duplex*), bazne stanice su *a priori* sinhronizovane pa ne postoji potreba za instalacijom LMU jedinica u okviru takvih baznih stanica. Druga LCS komponenta, SMLC, najčešće je integrirana u okviru RNC, ali se, kao i u slučaju GERAN pristupne mreže, može instalirati samostalno, tj. kao SAS (*Stand-Alone SMLC*). Treba primetiti da UTRAN LCS arhitektura ne zahteva CBC komponentu kao što je slučaj sa GERAN LCS arhitekturom, obzirom da slanje pomoćnih podataka koje u ovom slučaju zahtevaju OTDOA-IPDL i A-GNSS koordiniše SMLC u okviru RNC.



Slika 7.2. UTRAN LCS arhitektura.

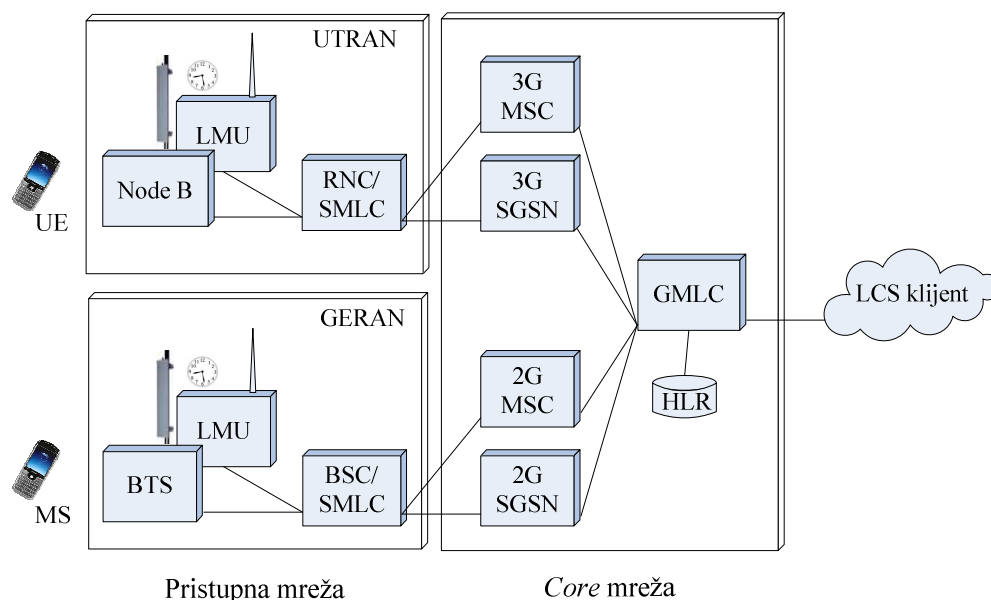
U pristupnoj mreži UTRAN, postupak pozicioniranja mora biti koordinisan signalizacijom između RNC, SAS, LMU (slučaj samostalne instalacije) i mobilne stanice. Pregled odgovarajućih protokola sadržan je u [58-61].

7.3. LCS GSM i UMTS arhitektura *core* mreže

Osim pomenutih komponenata koje se za potrebe pozicioniranja moraju instalirati u GERAN i UTRAN pristupnim mrežama, čitav postupak pozicioniranja zahteva dodatnu komponentu i na nivou *core* mreže. Sa druge strane, obzirom na

migraciju od 2G ka 3G mrežama, UTRAN i GERAN pristupne mreže funkcionišu u okviru integrisane arhitekture *core* mreže, što omogućava zajedničke komponente infrastrukture, protokole kao i mehanizme upravljanja. Isti koncept prihvaćen je i za LCS, što podrazumeva različite metode pozicioniranja razvijene u okviru oba tipa pristupnih mreža, sa jedne strane, i zajednički element smešten u okviru *core* mreže, sa druge strane, koji kontroliše proces pozicioniranja nezavisno od tipa pristupne mreže. Na slici 7.3 prikazana je 3GPP LCS arhitektura sa svojim najvažnijim elementima [2].

Nova komponenta na nivou *core* mreže koja upravlja postupkom pozicioniranja je GMLC (*Gateway Mobile Location Center*), i predstavlja interfejs između LCS klijenta od koga i potiče zahtev za pozicioniranjem, i SMLC komponentata u raznim pristupnim mrežama. U zavisnosti od veličine, mreža može imati jedan ili više GMLC. Takođe, za podršku servisu pozicioniranju za korisnike u *roaming*-u, GMLC komponente različitih operatora su međusobno povezane. GMLC prima zahtev za pozicioniranjem koji upućuje LCS klijent, koordiniše ceo proces pozicioniranja i najzad proračunate koordinate ciljane mobilne stanice dostavlja LCS klijentu. Treba naglasiti da LCS klijent može biti i sama mobilna stanica koja u tom slučaju upućuje zahtev LCS mreži u cilju dobijanja sopstvenih koordinata.



MS	- Mobile Station	2G MSC	- 2G Mobile Switching Center
UE	- User Equipment	3G MSC	- 3G Mobile Switching Center
BTS	- Base Transceiver Station	2G SGSN	- 2G Serving GPRS Support Node
Node B	- UMTS Base Transceiver Station	3G SGSN	- 3G Serving GPRS Support Node
BSC	- Base Station Controller	GMLC	- Gateway Mobile Location Center
RNC	- Radio Network Controller	HLR	- Home Location Register
LMU	- Location Measurement Unit		
SMLC	- Serving Mobile Location Center		

Slika 7.3. 3GPP LCS arhitektura, *core* mreža.

Kao i u slučaju pristupnih mreža, čitav proces pozicioniranja moguć je zahvaljujući protokolima koji kontrolišu razmenu poruka za podršku LCS. Pregled odgovarajućih protokola sadržan je u [50], [51], [62], [63], [64].

7.4. E-UTRAN LCS

Kao i u slučaju GERAN i UTRAN, u okviru pristupne mreže LTE sistema, E-UTRAN (*Evoloved - UMTS Terrestrial Radio Access Network*) do sada su standardizovane četiri metode pozicioniranja koje u različitim vremenskim periodima ulazile u standard [3].

7.4.1. E-UTRAN LCS standardizacija metoda pozicioniranja

Prema specifikaciji [3], [65], za E-UTRAN su standardizovane sledeće četiri metode pozicioniranja:

- *Enhanced Cell-ID (E-CID) - Release 8*
- *A-GNSS (Assisted Global Navigation Satellite System) - Release 8*
- *OTDOA (Observed Time Difference Of Arrival) - Release 9*
- *U-TDOA (Uplink Time Difference of Arrival) - Release 11.*

7.4.2. E-UTRAN LCS arhitektura

Kako je glavna odlika LCS mreže decentralizacija, pristupna mreža u LTE sastoji se samo od eNodeB. LMU komponente se po potrebi mogu instalirati, ali ne kao posebne komponente već su integrisane u eNodeB [66].

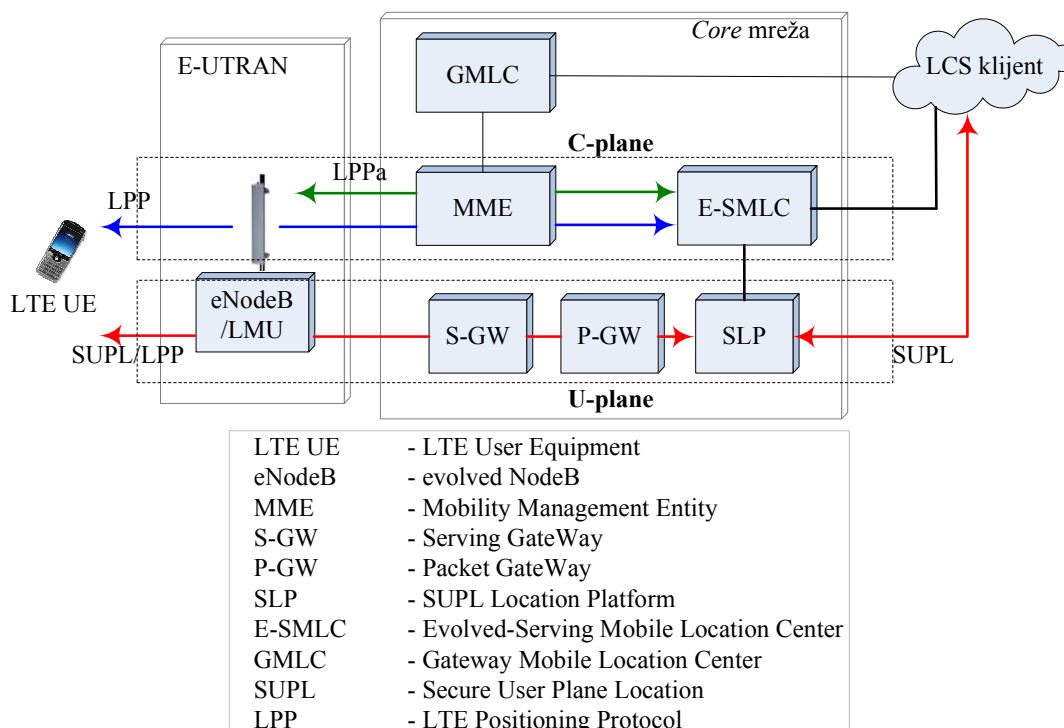
Razmena LCS informacija između UE i LTE mreže omogućena je preko dva protokola (slika 7.4) [67]:

- LPP protokola (*LTE Positioning Protocol*), novog LTE protokola za pozicioniranje. Namenjen je prvenstveno za *C-plane*, ali se po potrebi koristi i u *U-plane* LCS opciji.
- SUPL protokola (*Secure User Plane Location*). Namenjen je *U-plane* LCS opciji, postojao i u 2G/3G LCS mrežama u okviru *U-plane* opcije.

Osnovne funkcije LPP protokola su:

- da obezbedi informacije za E-SMLC o LCS mogućnostima UE (npr. koje metode podržava mobilni terminal)
- da prenese pomoćne podatke od E-SMLC do UE (za metode pozicioniranja koje to zahtevaju, npr. OTDOA)
- da obezbedi E-SMLC rezultatima merenja koje vrši UE (u slučaju npr. *mobile-assisted* ili *network-assisted* metoda)
- da obaveštava o greškama u toku postupka pozicioniranja.

Postoji i LPPa varijanta LPP protokola (slika 7.4) koja se koristi u slučaju kada E-SMLC zahteva podatke sa eNodeB (npr. za merenje *timing advance* parametra koji se, kao što će biti reči, koristi za pozicioniranje i u LTE, ...).



Slika 7.4. E-UTRAN LCS arhitektura.

U LTE mrežama C-plane LCS arhitektura se u najvećoj mjeri koristi za hitne servise (E-911, E-112), obzirom da je ovo pozicioniranje brzo, pouzdano i sigurno. Ovu vrstu LCS arhitekture omogućava novi LPP protokol, a LCS poruke se između terminala (UE) i mreže razmjenjuju preko signalizacionih veza. U LTE mrežama, C-plane pozicioniranje je omogućeno preko MME (*Mobility Management Entity*) elementa, koji rutira LPP poruke od E-SMLC ka UE (slika 7.4).

U U-plane vrsti LCS arhitekture, LCS poruke se između terminala i mreže razmjenjuju kao korisnički podaci. Ovu vrstu LCS arhitekture omogućava SUPL protokol. On podržava pozicioniranje preko LTE kao i 2G i 3G mreža, i obezbeđuje zajedničku platformu za sve radio interfejse. U-plane pozicioniranje osim SUPL protokola, može koristiti i LPP protokol (koji je C-plane protokol), što je npr. slučaj sa prenosom pomoćnih podataka za metode pozicioniranja koje to zahtevaju (npr. OTDOA). U LTE mrežama, U-plane pozicioniranje je omogućeno preko SLP elementa koji prenosi SUPL poruke, dok je istovremeno u vezi i sa E-SMLC od kojeg dobija pomoćne podatke. SUPL poruke se kao korisnički podaci rutiraju preko P-GW (*Packet GateWay*) i S-GW (*Serving GateWay*) elemenata core mreže LTE (slika 7.4). U-plane pozicioniranje omogućava složeni skup LCS karakteristika bitnih za mobilne aplikacije kao što su prostorno trigerovanje (*spatial triggering*, automatsko izveštavanje o ulasku/izlasku iz neke zone, ili izveštavanje da je terminal van ili unutar neke zone), periodično izveštavanje o lokaciji (*periodic reporting*), kao i grupno izveštavanje. Takođe, ovaj vid pozicioniranja omogućava i automatsko prebacivanje LCS funkcije sa ćelijskih mreža na WiFi (WLAN) mreže kada npr. korisnik iz *outdoor* uslova uđe u neki objekat (*indoor* uslove) – tzv. opcija *multi-location* tehnologije [67].

8. Standardizovane metode pozicioniranja u GSM, UMTS i LTE

8.1. Cell-ID

Cell-ID metoda pozicioniranja zasniva se na *proximity sensing* principu, odnosno, na identifikaciji najbližeg predajnika poznatih koordinata. Ovo je najjednostavnija i najrasprostranjenija metoda pozicioniranja. Alternativni nazivi ove metode su i COO (*Cell Of Origin*) i CGI (*Cell Global Identity*).

Po Cell-ID metodi, procenjene koordinate mobilne stanice su geografske koordinate bazne stanice koja trenutno opslužuje tu mobilnu stanicu, odnosno, geografske koordinate servisne bazne stanice iz baza podataka. Oblast u kojoj se korisnik nalazi je krug koji odgovara zoni pokrivanja servisne ćelije u slučaju omnidirekcionih ćelija, odnosno, kružni isečak koji odgovara zoni pokrivanja servisne ćelije u slučaju sektorskih ćelija. Cell-ID metoda pozicioniranja se može primeniti bilo da je mobilna stanica u *dedicated* ili u *idle* modu rada. Prvi slučaj predstavlja *network-based* rešenje, obzirom da je mreži poznato koja bazna stanica opslužuje mobilnu stanicu, pa se nepoznate koordinate mobilne stanice dobijaju čitanjem koordinata servisne bazne stanice. U drugom slučaju mobilna stanica je u *idle* modu u kojem samo prima *broadcast* podatke koje emituje obližnja bazna stanica. Na osnovu parametra CI (*Cell Identifier*) koji dobija na ovaj način, mobilna stanica identifikuje baznu stanicu od koje prima *broadcast* podatke, i pretragom baze podataka očitava koordinate bazne stanice sa tim parametrom CI, koje usvaja kao sopstvene koordinate. Pristup bazi podataka sa koordinatama baznih stanica moguće je dobiti od operatora, ali je mnogo jednostavnije da ovi podaci budu uključeni u *broadcast* poruke, što su mnogi operatori i implementirali. U svakom slučaju, Cell-ID pozicioniranje kada je mobilna stanica u *idle* modu predstavlja *mobile-based* rešenje.

Tačnost Cell-ID metode pozicioniranja zavisi od tačnosti geografskih koordinata baznih stanica u bazi podataka operatora, veličine servisne ćelije i tipa ćelije (omnidirekciona/sektorska). Najčešće, operator zna koordinate svake bazne stanice sa greškom od oko 10m. Zbog toga, minimalna greška koju treba očekivati kod ove metode ne može biti manja od greške nastale određivanjem lokacije bazne stanice. Realno, situacija sa ovom metodom je takva da je greška koju unosi lokacija bazne stanice isuviše mala da bi značajnije uticala na ukupnu grešku pozicioniranja. Naime, veličine ćelija u mobilnoj mreži se veoma razlikuju. Ćelije u ruralnim područjima imaju poluprečnike veličine par desetina kilometara (do 35km, što predstavlja i teorijski maksimum u slučaju GSM). U suburbanim tj. rezidencijalnim područjima, veličina ćelija je uglavnom par kilometara u poluprečniku, dok u gušće naseljenim, urbanim, područjima poluprečnik ćelije uglavnom nije veći od 1km. Takođe, u urbanim oblastima, mogu se sresti mikro kao i piko ćelije koje se namenski postavljaju kako bi pokrivala veoma usku oblast kao što su: trg, stadion, poslovni

centar, stanica metroa, itd. Poluprečnik mikro ćelije je od 100m do 500m dok je poluprečnik piko ćelije par desetina metara. Dakle, Cell-ID metoda daje lošu (u ruralnim oblastima) do umerenu tačnost (u urbanim oblastima). Dodatno, ionako skromna tačnost može biti dalje smanjena imajuću u vidu da, zbog prirode propagacije, servisna ćelija ne mora uvek biti ona ćelija koja je najbliža mobilnoj stanici čija se lokacija određuje [68].

Kao što je već rečeno, na tačnost Cell-ID metode pozicioniranja utiče i tip ćelije (omnidirekciona/sektorska ćelija). Iako je u oba slučaja neodređenost, tj. maksimalana greška pozicioniranja ista, i zavisi od poluprečnika ćelije, oblasti u kojima se korisnik nalazi se po obliku razlikuju. U slučaju sektorske ćelije, oblast u kojoj se korisnik nalazi je kružni isečak čija površina predstavlja oko trećinu (ili manje) površine kruga koji se dobija kao oblast u slučaju omnidirekcionne ćelije. Ovakva, smanjena, oblast u kojoj se korisnik nalazi logično ima za posledicu i veću tačnost pozicioniranja.

Cell-ID metoda pozicioniranja se može primeniti u svim mobilnim mrežama. U UMTS je nešto komplikovanija a razlog je SHO u UMTS, odnosno to što mobilna stanica, odnosno UE (*User Equipment*) u UMTS, može istovremeno biti povezana sa više ćelija ili baznih stanica koje čine aktivni set. U tom slučaju, od svih ćelija iz aktivnog seta potrebno je izabrati jednu koja najbolje odgovara trenutnoj lokaciji mobilne stanice. Izbor referentne bazne stanice može biti na osnovu parametara kvaliteta signala na ulazu u prijemnik bazne stanice. Takođe, referentna bazna stanica može biti poslednja servisna bazna stanica, bazna stanica koja je najčešće bila u aktivnom setu, bazna stanica koja je poslednja primljena u aktivni set ili bazna stanica koja je najbliža mobilnoj stanici od svih ostalih iz aktivnog seta. Tačan kriterijum na osnovu kojeg će se izabrati referentna bazna stanica u Cell-ID metodi pozicioniranja u UMTS nije predmet 3GPP specifikacija, pa je to ostavljeno pojedinačnim operatorima da odluče.

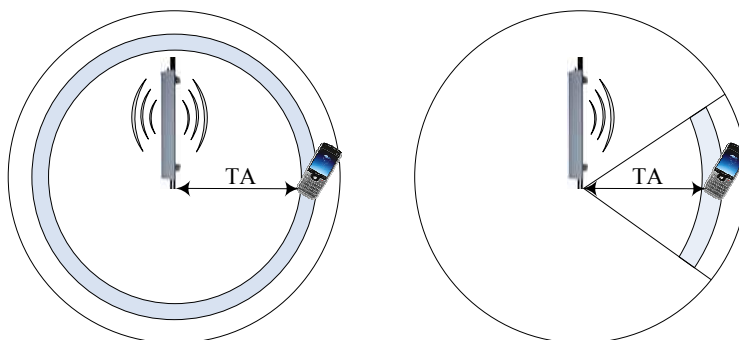
Nezavisno od tipa mobilne mreže, Cell-ID metoda pozicioniranja ima vrlo visoku dostupnost unutar mreže, obzirom da je za rad ove metode potreban radio kontakt samo sa jednom baznom stanicom. Pored dostupnosti, Cell-ID metoda pokazuje dobre karakteristike i po pitanju kašnjenja jer vreme potrebno da se dobije podatak o lokaciji mobilne stanice iznosi oko 1s. Cell-ID metoda se najčešće koristi kao alternativna metoda pozicioniranja kada neka od preciznijih metoda pozicioniranja pod nekim okolnostima ne bude primenjiva.

8.1.1. Modifikacije Cell-ID metode pozicioniranja u GSM

Da bi se sačuvale prednosti, a ublažile mane koje karakterišu Cell-ID metodu pozicioniranja, razvijeno je nekoliko modifikacija ove metode, koje se uglavnom baziraju na merenju dodatnih radio parametara koji bi trebalo da redukuju oblast u kojoj se predviđa lokacija mobilne stanice. Jedan od najčešće korišćenih parametara u slučaju Cell-ID metode pozicioniranja u GSM je parametar *timing advance* (TA) [20], [49], [69], [70]. Kao što je već rečeno u prethodnim poglavljima, TA parametar odnosi se na povratno vreme propagacije signala emitovanog od bazne stanice ka mobilnoj stanici, što je proporcionalno dvostrukom rastojanju između bazne i mobilne stanice, pa se na taj način zona u kojoj se nalazi mobilna stanica ograničava na prsten u čijem se centru nalazi bazna stanica. U GSM standardu [17], TA parametar se definiše kao celobrojni umnožak vremenskog trajanja jednog bita, što omogućava rezoluciju određivanja rastojanja u kvantima od 553.46m. U praksi se za kvant rastojanja TA parametra obično uzima vrednost od 550m [71]. Vrednost TA

parametra meri servisna bazna stanica a zatim ga preko SACCH (*Slow Associated Control Channel*) kanala šalje mobilnoj stanici koja ga primenjuje na svojoj UL transmisiji. Obzirom da je vrednost TA parametra proporcionalna rastojanju između mobilne i bazne stanice, TA parametar se u kombinaciji sa Cell-ID formira varijantu naprednije verzije Cell-ID metode pozicioniranja. Štaviše, Cell-ID metoda pozicioniranja nikada i nije standardizovana u GSM, dok je njena naprednija verzija, Cell-ID+TA ušla u GSM LCS standard od *Release 98*.

Poboljšanje Cell-ID+TA u odnosu na Cell-ID metodu pozicioniranja, ogleda se u povećanju tačnosti određivanja lokacije mobilne stanice. Primena TA parametra značajno smanjuje oblast u kojoj se nalazi mobilna stanica, obzirom da je sužava na kružni prsten (u slučaju omnidirekcionih antena) širine 550m, odnosno na isečak kružnog prstena (u slučaju sektorskih antena) širine 550m.



Slika 8.1. Cell-ID+TA sa omnidirekcionim i sektorskim antenama.

Raspoloživost i vreme potrebno da se dobije podatak o procenjenoj lokaciji mobilne stanice isti su kao i za osnovnu Cell-ID metodu. Ipak, ograničenja Cell-ID+TA su uglavnom nasledena, pa čak i proširena iz osnovne Cell-ID metode pozicioniranja. Naime, TA parametar je dostupan samo kada se mobilna stanica nalazi u *dedicated* modu rada. Ukoliko se mobilna stanica nalazi u *idle* modu, TA parametar nije poznat pa se najpre od strane mreže (BSC) inicira *paging request*, kako bi se odazivanje ciljane mobilne stanice na ovaj zahtev iskoristilo za određivanje TA parametra. Najozbiljniji problem ipak predstavlja višestruka propagacija signala, tačnije NLOS uslovi prostiranja između bazne i mobilne stanice, kada izmerena vrednost TA parametra može biti veća od one koja zaista odgovara stvarnoj udaljenosti između bazne i mobilne stanice. Ovaj problem može uzrokovati velike greške pozicioniranja, ili metodu svesti na običnu Cell-ID.

Naprednijoj verziji Cell-ID metode pozicioniranja u GSM, koja se dobija primenom TA parametra, Cell-ID+TA, može se nadalje povećati tačnost ukoliko se primeni i tehnika forsiranog *handover*-a [20], [69], [72]. Ova tehnika obezbeđuje podatke o TA parametrima za nekoliko baznih stanica, što u kombinaciji sa poznatim parametrom Cell-ID tih baznih stanica omogućava tačnije lociranje mobilne stanice. Lokacija mobilne stanice se u ovom slučaju dobija postupkom cirkularne lateracije (poglavlje 5.2.1), odnosno u preseku prstenova čiji su poluprečnici određeni vrednostima TA parametara dobijenih postupkom forsiranog *handover*-a, a centri su određeni koordinatama odgovarajućih baznih stanica. Nedostatak ove metode pozicioniranja je da postupak forsiranog *handover*-a na baznu stanicu koja nije optimalna degradira kvalitet signala i smanjuje kapacitet sistema [20]. Problem koji se može javiti primenom ovog metoda određivanja lokacije mobilne stanice a i bilo kojeg drugog koji se bazira na TA parametru su NLOS uslovi prostiranja koji mogu rezultirati pogrešnom procenom rastojanja između mobilne stanice čija se lokacija

određuje i bazne stanice koja šalje podatak o TA parametru. U slučaju da u postupku određivanja lokacije mobilne stanice učestvuju više baznih stanica od kojih sa nekima mobilna stanica nema direktnu optičku vidljivost, algoritam može postati neupotrebljiv, obzirom da se kao rezultat mogućih lokacija mobilne stanice mogu dobiti prostorno disjunktne zone, pa procena lokacije mobilne stanice ne bi bila moguća. U cilju prevazilaženja ovog problema, može se umesto determinističkog primeniti neka od metoda probabilističkog pristupa (poglavlje 6).

8.1.2. Modifikacije Cell-ID metode pozicioniranja u UMTS

Slično kao i kod GSM, jedan od najčešće korišćenih parametara u slučaju Cell-ID metode pozicioniranja u UMTS je parametar koji se odnosi na povratno vreme propagacije signala emitovanog od bazne stanice ka mobilnoj stanici. Kao i u slučaju GSM, ovo vreme je proporcionalno rastojanju između bazne i mobilne stanice, pa se na taj način zona u kojoj se nalazi mobilna stanica ograničava na prsten u čijem se centru nalazi bazna stanica. Odgovarajući parametar u slučaju UMTS zove se *round trip time* (RTT).

U skladu sa [73], RTT parametar se u slučaju FDD moda definiše kao

$$RTT = t_{Rx} - t_{Tx} \quad (8.1)$$

gde t_{Tx} predstavlja vremenski trenutak početka transmisije *downlink* DPCH (*Dedicated Physical Channel*) frejma ka mobilnoj stanici, dok t_{Rx} predstavlja vremenski trenutak početka prijema *uplink* DPCCCH (*Dedicated Physical Control Channel*) frejma od mobilne stanice (prva detektovana putanja u vremenu). RTT meri bazna stanica, tačnije, *Node B*.

U TDD modu se umesto RTT parametra za potrebe pozicioniranja u kombinaciji sa Cell-ID može koristiti tzv. *Rx timing deviation* parametar. U skladu sa [74], *Rx timing deviation* parametar se definiše kao

$$T_{Rxdev} = t_{TS} - t_{Rxpath} \quad (8.2)$$

gde t_{Rxpath} predstavlja vremenski trenutak prijema *uplink* slota, tj. prve detektovane *uplink* komponente signala u baznoj stanici, dok t_{TS} predstavlja početak odgovarajućeg slota u odnosu na interno vreme bazne stanice. Očigledno, i ovaj parametar meri bazna stanica, odnosno, *Node B*.

Za veću tačnost pozicioniranja, npr. u FDD modu, moguće je sa parametrom RTT kombinovati i tzv. *UE Rx-Tx time difference* parametar. Parametar *UE Rx-Tx time difference* meri mobilna stanica (UE) i definiše se kao vremenska razlika između početka transmisije *uplink* DPCCCH frejma i prve detektovane komponente *downlink* DPCH frejma sa merenog radio linka. Postoje dva tipa parametra *UE Rx-Tx time difference*, a razlika je u pogledu rezolucije merenja vremena i referentne Rx (*downlink*) komponente (ili prve detektovane komponente).

Tačnost Cell-ID+RTT metode pozicioniranja zavisi od topologije mreže kao i greške merenja vremena. Grešku merenja vremena uzrokuje višestruka propagacija i NLOS uslovi prostiranja, kao i tip *Rake* prijemnika koji je implementiran na strani baznih stanica, ako se radi o parametru RTT, odnosno, tip prijemnika implementiran na strani mobilne stanice, ako se radi o parametru *Rx-Tx time difference*. U skladu sa

zahtevima [75], minimalna tačnost RTT merenja iznosi 1/2 trajanja čipa, što iznosi oko 39m. Sa druge strane, rezolucija parametra *Rx-Tx time difference* tipa 1 (referentna Rx komponenta je prva detektovana komponenta od onih koje se koriste u postupku demodulacije) iznosi 1 čip (78m), a tipa 2 (referentna Rx komponenta je prva detektovana komponenta od svih koje detektuje UE) iznosi 1/16 trajanja čipa, odnosno, 5m [75].

Ipak, Cell-ID+RTT metoda pozicioniranja ne može se u potpunosti analizirati na način kao što je to bilo sa Cell-ID+TA u slučaju pozicioniranja u GSM. Pažnja u slučaju Cell-ID+RTT mora biti dodatno usmerena na činjenicu da se mobilna stanica u UMTS može nalaziti u SHO (*Soft Handover*)/SfHO (*Softer Handover*) modu rada, što ima direktne posledice na tačnost pozicioniranja. Naime, oblast u kojoj se procenjuje lokacija mobilne stanice koja se nalazi u SHO je dodatno smanjena obzirom da svaka bazna stanica u aktivnom setu meri RTT parametar, i tako doprinosi većoj tačnosti pozicioniranja. Preciznije rečeno, lokacija mobilne stanice u ovom slučaju određuje se primenom cirkularne lateracije, odnosno, u preseku RTT prstenova koji potiču od baznih stanica u aktivnom setu. Teorijska analiza Cell-ID+RTT metode pozicioniranja [76] koja obuhvata i SHO/SfHO slučajeve, pokazuje da njena tačnost strogo zavisi od topologije mreže, tačnije, od rastojanja između ćelija, kao i konfiguracije antenskih sistema (sektorizacije i širine snopa zračenja) i varira između 16m i 450m. Ista analiza pokazuje da se oblast u kojoj se koristi Cell-ID+RTT metoda pozicioniranja može podeliti na tri zone različite tačnosti. Kao što se vidi iz tabele 8.1 [76], najveću tačnost pokazuje zona u kojoj je mobilna stanica u SHO i iznosi 16m (najbolji slučaj geometrije, mobilna i tri bazne stanice u aktivnom setu 'leže' na pravcima međusobno usmerenim pod pravim uglom). Nešto manja tačnost je u zoni gde je mobilna stanica u SfHO a najmanju u zoni gde nema SHO/SfHO, odnosno, gde aktivni set čini samo jedna bazna stanica.

Tabela 8.1. Rezultati teorijske analize tačnosti Cell-ID+RTT za različite topologije.

Topologija	Cell-ID+RTT	<i>Softer handover SfHO</i>	<i>Soft handover SHO</i>	
			Najbolje	Najgore
3 sektora/65°	436m	39m	16m	99m
6 sektora/65°	163m	96m	16m	99m
6 sektora/33°	158m	17.4m	16m	99m

Takođe, ista studija [76] pokazuje da je dostupnost najtačnije varijante Cell-ID+RTT metode pozicioniranja, Cell-ID+RTT+SHO, najveća u slučaju 6-sektorske/65° konfiguracije mreže. Ovo je najvećim delom posledica činjenice da su za slučaj ove konfiguracije udeo SHO i SfHO zona prostorno najveći (za najbolji slučaj, kada je ćelijski razmak 1km, udeo zona sa SHO je 35%, a sa SfHO 40%).

Najzad, može se zaključiti da se tačnost pozicioniranja standardne Cell-ID+RTT metode povećava kada je mobilna stanica u SHO/SfHO zoni, a naročito SHO zoni. Zbog toga bi, kad god se javi zahtev za pozicioniranjem, bilo pogodno da mobilna stanica bude u SHO zoni, odnosno, da SHO zone na neki način budu proširene. Tako se javila naprednija verzija Cell-ID+RTT metode pozicioniranja, koja primenjuje tehniku tzv. forsiranog SHO, FSHO (*Forced Soft Handover*). Ovom tehnikom [77] proširuje se aktivni set sve dok se u njemu ne nađe dovoljan broj baznih stanica koje bi omogućile cirkularnu lateraciju i što tačnije pozicioniranje. Standardno, ćelija (ili bazna stanica) se dodaje u aktivni set kada pilot signal te bazne stanice na mestu mobilne stanice bude dovoljno dugo (*time-to-trigger*) jači od pilot signala najboljeg servera (ćelije, odnosno, bazne stanice) umanjenoj za vrednost

parametra tzv. *adding range*. Dakle, ako bi se ovaj parametar povećavao, veći broj pilot signala sa okolnih baznih stanica bi ispunjavao prethodni kriterijum i ulazio u aktivni set, odnosno, SHO sa mobilnom stanicom, to bi dalje povećavalo tačnost pozicioniranja. Ipak, forsirani SHO bi sa druge strane negativno uticao na DL kapacitet. Stoga, forsirani SHO se ne bi primenjivao u slučaju kada se mobilna stanica blizu servisne bazne stanice, jer je greška pozicioniranja u tom slučaju već prihvatljivog nivoa (mereni RTT odgovara rastojanju manjem od 150m [77] a i postojala bi velika dominacija pilot signala sa servisne bazne stanice). U ostalim slučajevima, FSHO bi se primenjivao, ali samo kada se javi zahtev za pozicioniranjem i trajao bi samo toliko koliko da se obave RTT merenja.

Simulacije [77] pokazuju da bi tehnika FSHO znatno povećala tačnost pozicioniranja, pa bi skoro svi korisnici u mreži imali na raspolaganju LCS servis tačnosti veće od 40m. Što se tiče parametra kašnjenja, pod pretpostavkom da vrednosti svih očekivanih kašnjenja odgovaraju maksimalnim vrednostima koje je dozvolio standard [75], [78], ukupno kašnjenje Cell-ID+RTT+FSHO ne bi trebalo da prelazi 2s. Procena se odnosi na merenja tri RTT parametra, a eventualno povećanje broja merenih RTT parametara sa drugih baznih stanica ne bi znatno produžilo algoritam obzirom da RTT merenje ne prelazi 100ms [75]. Predloženi algoritam pokazuje dobre karakteristike i po pitanju dodatne interferencije i signalizacionog opterećenja. Naime, obzirom na kratko trajanje samog algoritma, dodatna interferencija uzrokovana primenom FSHO ima zanemarljiv uticaj na kapacitet sistema. Maksimum interferencije očekivao bi se u slučaju kada je signal sa najboljeg servera na mestu mobilne stanice jasno dominantan, što je obično slučaj kada je mobilna stanica blizu bazne stanice koja je najbolji server. Ipak, i ovaj problem je na neki način izbegnut, jer, kao što je rečeno, FSHO tehnika se ne primenjuje kada su rastojanja između mobilne i servisne bazne stanice manja od 150m. Najzad, sama FSHO procedura koristi već standardizovane signalizacione poruke i procedure, i zahteva samo manje softverske izmene na strani mobilne stanice. To znači da se signalizaciono opterećenje FSHO tehnike na radio interfejsu ne razlikuje mnogo od postojećeg signalizacionog opterećenja koje potiče od tradicionalne SHO tehnike.

8.1.3. Modifikacije Cell-ID metode pozicioniranja u LTE

Kao i u slučaju GSM i UMTS, Cell-ID metoda pozicioniranja u LTE takođe koristi dodatne parametre u cilju upovećanja tačnosti pozicioniranja. Napredna verzija ove metode standardizovana u LTE zove se *Enhanced Cell-ID* (E-CID). Njena specifičnost je ta što osim parametra vreme, za povećanje tačnosti pozicioniranja po prvi put koristi i parametar ugao prispeća signala, AOA. Konkretno, dodatni parametri za povećanje Cell-ID metode pozicioniranja u LTE su:

- *timing advance* (TA)
- ugao prospeća signala, AOA.

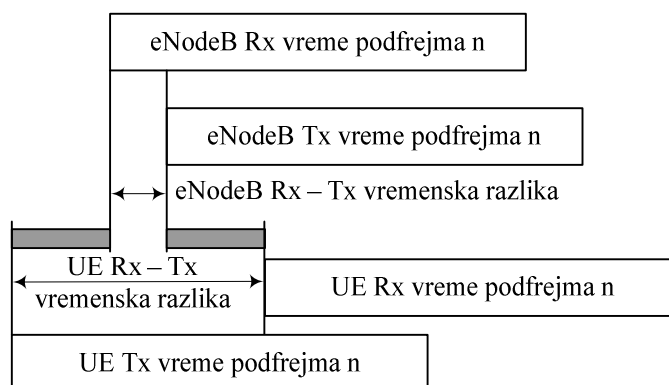
TA parametar se standardno odnosi na povratno vreme propagacije signala između terminala (UE) i bazne stanice (odnosno, eNodeB). Razlika je što u LTE mreži postoje dva tipa TA parametra, tačnije, dva tipa merenja TA parametra: TA tip 1 i TA tip 2. [66].

TA tip 1 se definiše kao zbir vremenske razlike prijema/slanja signala na eNodeB (može biti pozitivna ili negativna vrednost) i vremenske razlike prijema/slanja signala na UE (može biti samo pozitivna vrednost). Ovaj parametar

prikazan je osenčenim delom na slici 8.2, što odgovara povratnom vremenu propagacije signala. Izmerenu vrednost pomenute vremenske razlike UE šalje ka servisnoj eNodeB, dok eNodeB računa sopstvenu vrednost vremenske razlike prijema/slanaja signala na osnovu čega se konačno računa TA tip 1. Ovaj dodatni parametar u E-CID metodi pozicioniranja u LTE moguć je samo za mobilne terminale (UE) koji podržavaju opciju slanja ove informacije o vremenskoj razlici (ka baznoj stanici), što je slučaj od *Release 9*.

TA tip 2 se definiše standardno, kao vremenska razlika prijema/slanja signala na baznoj stanici, eNodeB. Merenja se vrše u radio frejmu koji koji sadrži PRACH (*Physical Random Access Channel*) transmisiju sa UE čija se lokacija određuje. Ovaj dodatni parametar u E-CID metodi pozicioniranja moguć već od *Release 8*.

Tačnost merenja parametra TA tip 1 u LTE u najvećoj meri zavisi od tačnosti merenja vremena na eNodeB i UE, što iznosi oko $0.3\mu\text{s}$ i odgovara rastojanju od 45m. Tačnost merenja parametra TA tip 2 u LTE zavisi od tačnosti detekcije PRACH što iznosi oko $1\mu\text{s}$ - $2\mu\text{s}$, a zavisi od *multipath* karakteristika samog radio kanala. Ova vrednost u najboljem slučaju odgovara rastojanju od oko 150m, pa se može zaključiti da bolju tačnost pozicioniranja obezbeđuje E-CID sa TA tipa 1.



Slika 8.2. Procena TA tip 1 u LTE.

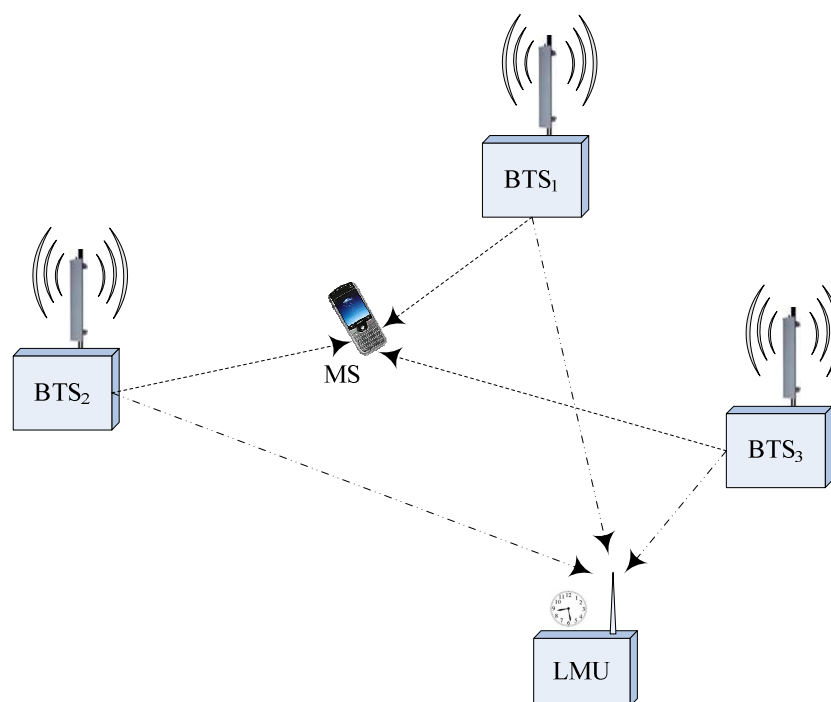
Kao što je rečeno, osim TA, za povećanje tačnosti Cell-ID u LTE se koristi i parametar AOA. LTE je prvi od ćelijskih sistema koji koristi ugao prispeća signala za povećanje tačnosti pozicioniranja a što je omogućeno primenom antenskih nizova na strani eNodeB u LTE mrežama. Time je omogućena dobra rezolucija merenja ugla prispeća signala od UE ka eNodeB, a time i tačnije pozicioniranje. Merenja AOA parametra se vrše isključivo na UL, obzirom da su antenski nizovi instalirani na strani eNodeBs.

Princip merenja AOA parametra zasniva se na tome da je signal koji dolazi sa UE fazno pomen za neku vrednost između sukcesivnih antenskih elemenata. Stepen tog faznog pomeraja zavisi od ugla prispeća signala AOA, razmaka između antenskih elemenata kao i radne učestanosti. Merenjem faznog pomeraja a znajući karakteristike antenskih sistema baznih stanica kao i radnu učestanost, moguće je izračunati parametar AOA. Za AOA parametar se može koristiti bilo koji UL signal, ali se obično meri na UL LTE signalu na kanalu koji eNodeB koristi za procenu propagacionih uslova na *uplink* smeru za svakog korisnika kako bi sprovela optimalni *uplink scheduling* (raspodela raspoloživih fizičkih resursa u cilju maksimizacije ukupnog kapaciteta u mreži). Ova vrsta signala u LTE poznata je kao *Sounding Reference Signals* (SRS).

Primenom parametara *timing advance* i AOA, tačnost Cell-ID metode u LTE se može povećati, tako da E-CID metoda može dostići tačnost od oko 150m u NLOS uslovima, odnosno, oko 50m u LOS uslovima [66].

8.2. E-OTD

E-OTD je metoda standardizovana za pozicioniranje u GSM [49]. E-OTD metoda pozicioniranja zasniva se na merenju vremena i primenjuje princip cirkularne ili hiperboličke lateracije (poglavlja 5.2.1 i 5.2.2). U slučaju cirkularne lateracije, mobilna stanica vrši merenje vremena prispeća signala (TOA) od obližnjih baznih stanica, dok u slučaju hiperboličke lateracije, mobilna stanica meri vremenske razlike prispeća signala (TDOA) od obližnjih baznih stanica. U skladu sa tim, cirkularna lateracija zahteva sinhronizaciju između mobilne stanice i baznih stanica koje učestvuju u postupku lateracije, dok hiperbolička lateracija zahteva sinhronizaciju između baznih stanica međusobno. Za ostvarivanje *a posteriori* sinhronizacije u GSM mora se koristiti dodatna komponenta u pristupnoj mreži GERAN, LMU. Takođe, obzirom da u GSM ne postoje pilot signali namenjeni za potrebe pozicioniranja, za merenja vremena koje zahteva E-OTD metoda koristi se struktura vremenskih slotova i TDMA (*Time Division Multiple Access*) ramova. Tačnije, mobilna stanica meri vreme prispeća prvog impulsa predefinisano vremenskog slota (*data burst*). Princip rada E-OTD metode prikazan je na slici 8.3.



Slika 8.3. Princip rada E-OTD.

8.2.1. Hiperbolička E-OTD

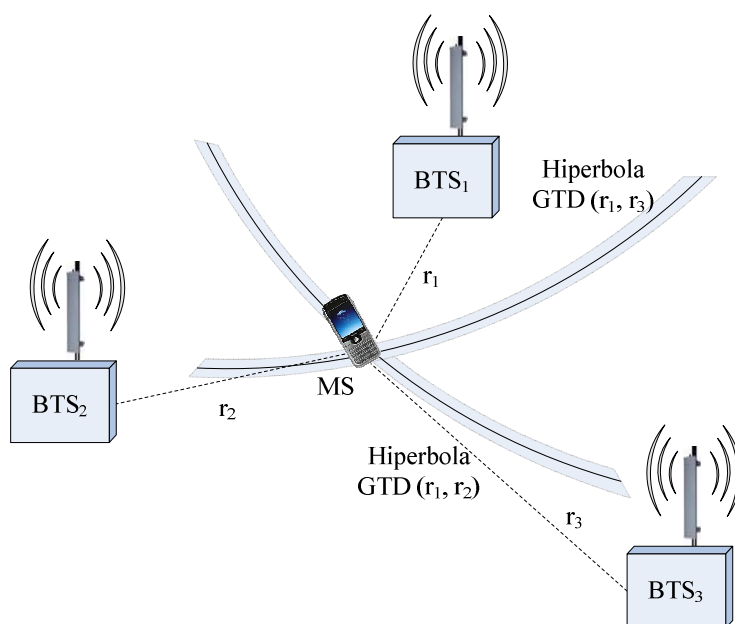
Hiperbolička E-OTD zasniva se na primeni hiperboličke lateracije. Kao što je rečeno u poglavlju 5.2.2, nepoznata lokacija mobilne stanice u ovom slučaju nalazi se u preseku dve hiperbole koje su definisane skupom tačaka za koje je razlika rastojanja

od dve fiksne tačke konstantna. Konkretno, za par baznih stanica (BS_1, BS_2), i rastojanja r_1 i r_2 , koja predstavljaju geometrijska rastojanja između mobilne stanice i baznih stanica BS_1 i BS_2 , respektivno, lokacija mobilne stanice ograničena je na sve koordinate za koje je razlika rastojanja $r_2 - r_1$ konstantna. Po definiciji, ove tačke leže na hiperboli. Ako se u postupak pozicioniranja uvede i treća bazna stanica BS_3 , par, npr. (BS_1, BS_3) definiše novu hiperbolu, pa se lokacija mobilne stanice određuje u preseku te dve hiperbole, slika 8.4.

Rastojanje $r_2 - r_1$ proporcionalno je vremenskom intervalu između prispeća signala sa baznih stanica BS_1 i BS_2 na DL, uz pretpostavku da bazne stanice BS_1 i BS_2 emituju signale u istom vremenskom trenutku. Ovaj vremenski interval zove se GTD (*Geometric Time Difference*) vreme i računa se kao

$$GTD = (r_2 - r_1)/c \quad (8.3)$$

gde je c brzina svetlosti. Ako su bazne stanice, u geometrijskom smislu, podjednako udaljene od mobilne stanice, $GTD=0$. Ipak, obzirom da GSM nije vremenski sinhronizovan sistem, za merenja neophodna u E-OTD nije dovoljno meriti samo vremenske intervale između prispeća signala sa baznih stanica, već i vremenske intervale između emisija ovih signala sa baznih stanica. Zbog toga su, osim GTD vremena, od interesa još dve vremenske veličine, OTD (*Observed Time Difference*) i RTD (*Real Time Difference*).



Slika 8.4. Hiperbolička E-OTD.

OTD je vremenska razlika prispeća signala od dve bazne stanice do mobilne stanice, i meri ga mobilna stanica. Ako je vreme prispeća signala sa bazne stanice BS_1 do mobilne stanice t_{Rx1} , a vreme prispeća signala sa bazne stanice BS_2 do mobilne stanice t_{Rx2} , vrednost OTD je

$$OTD = t_{Rx1} - t_{Rx2} \quad (8.4)$$

Ako signali sa dve bazne stanice stignu do mobilne stanice u istom trenutku, vrednost $OTD=0$.

RTD je vremenska razlika emitovanja signala sa dve različite bazne stanice, i meri ga LMU jedinica u odnosu na svoje interno vreme. Ovaj interval zapravo predstavlja relativnu sinhronizacionu razliku u mreži između baznih stanica. Ako bazna stanica BS_1 emituje signal u trenutku t_{Tx1} , a bazna stanica BS_2 u trenutku t_{Tx2} , vrednost RTD je:

$$RTD = t_{Tx1} - t_{Tx2} . \quad (8.5)$$

Ako bazne stanice emituju signale u istom vremenskom trenutku, $RTD=0$, tj. mreža je sinhronizovana (na nivou baznih stanica).

Odnos prethodno definisanih vremenskih veličina koje su od interesa u E-OTD metodi pozicioniranja je

$$GTD = OTD - RTD . \quad (8.6)$$

U skladu sa jednačinama 8.3 i 8.6, dobija se

$$GTD = \left(\sqrt{(x_{BSi} - x_{MS})^2 + (y_{BSi} - y_{MS})^2} - \sqrt{(x_{BSj} - x_{MS})^2 + (y_{BSj} - y_{MS})^2} \right) / c = OTD - RTD \quad (8.7)$$

gde su (x_{BSi}, y_{BSi}) i (x_{BSj}, y_{BSj}) poznate koordinate i -te i j -te bazne stanice u Dekartovom koordinatnom sistemu, a (x_{MS}, y_{MS}) nepoznate koordinate mobilne stanice.

Treba primetiti da parametar RTD koji meri LMU jedinica realno ne predstavlja vremensku razliku emitovanja signala sa dve različite bazne stanice. RTD zapravo predstavlja vremensku razliku prispeća signala od baznih stanica do LMU jedinice, i na taj način ne reflektuje u potpunosti vremenske razlike emisije signala sa tih baznih stanica jer su i ti signali predmet propagacije. Stvarna vrednost parametra RTD se dobija uvođenjem korekcije za propagaciono kašnjenje signala između baznih stanica i LMU jedinica, pod pretpostavkom da su poznate geografske koordinate i baznih stanica i LMU jedinica. Ipak, jedan od izvora grešaka E-OTD metode može biti upravo ova korekciona procedura. To se dešava ako pozicije LMU jedinica u odnosu na pozicije baznih stanica nisu optimalno izabrane, tačnije, kada između baznih stanica i LMU jedinica koje učestvuju u pozicioniranju ne postoji direktna optička vidljivost, pa signali čije vreme prispeća meri LMU jedinica nisu rezultat direktne već reflektovane putanje.

8.2.2. Cirkularna E-OTD

Cirkularna E-OTD zasniva se na primeni cirkularne lateracije. Kao što je rečeno u poglavlju 5.2.1, nepoznata lokacija mobilne stanice u ovom slučaju nalazi se u preseku tri kružnice koje su definisane skupom tačaka za koje su rastojanja od tri fiksne tačke, u konkretnom slučaju tri bazne stanice, konstantna. Za razliku od hiperboličke E-OTD, nepoznata rastojanja u slučaju cirkularne E-OTD dobijaju se

merenjem vremena propagacije signala od baznih stanica do mobilne stanice. Cirkularna E-OTD zahteva sinhronizaciju između mobilne stanice i baznih stanica koje učestvuju u postupku lateracije, što u GSM nije ispunjeno. Stoga je i u slučaju cirkularne E-OTD neophodno instalirati LMU jedinice.

Polazna jednačina za cirkularnu E-OTD metodu pozicioniranja je

$$r_i - r_{i,LMU} = c(t_{i,MS} - t_{i,LMU} + \varepsilon) \quad (8.8)$$

gde su r_i traženo geometrijsko rastojanje između mobilne stanice i bazne stanice i , $r_{i,LMU}$ poznato geometrijsko rastojanje između LMU jedinice i bazne stanice i , $t_{i,MS}$ vreme prispeća signala od bazne stanice i do mobilne stanice mereno u odnosu na interno vreme mobilne stanice, $t_{i,LMU}$ vreme prispeća signala od bazne stanice i do LMU jedinice mereno u odnosu na interno vreme LMU jedinice, ε vremenski ofset između internih taktova mobilne stanice i LMU jedinice, dok je c brzina svetlosti. Rešavanjem jednačine (8.8) po r_i , i primenom rezultata u formulu za cirkularnu lateraciju dobija se sistem od tri jednačine sa tri nepoznate. Nepoznate veličine su koordinate mobilne stanice (x_{MS}, y_{MS}) i ofset ε . Treba naglasiti da rezultat dobijen na ovaj način važi samo ako je ofset ε određen za isti par (mobilna stanica, LMU jedinica), što znači da neophodna vremena prispeća signala od baznih stanica mora meriti ili jedna LMU jedinica, ili različite LMU jedinice ali u odnosu na isto referentno vreme. To je moguće ukoliko ukoliko su LMU jedinice opremljene GPS prijemnikom.

Bilo da je u pitanju hiperbolička ili cirkularna E-OTD metoda pozicioniranja, merenja vremena na strani LMU jedinica uvek se vrše u odnosu na referentnu baznu stanicu. Referentna bazna stanica postaje ona bazna stanica koja je u najboljem položaju u smislu LOS uslova propagacije sa LMU jedinicom. Vreme prispeća signala sa okolnih baznih stanica se onda meri u odnosu na vreme prispeća signala sa referentne bazne stanice. Takođe, sva merenja vremena LMU jedinica vrši na BCCH (*Broadcast Control Channel*) kanalu, i obzirom da je u pitanju kontrolni kanal obezbeđena je kontinualna transmisija što je preduslov za bilo kakva merenja. LMU jedinica prati vremenske slotove TDMA frejmova na BCCH nosiocima referentne i susednih ćelija. Vremenski slot TDMA frejma referentne bazne stanice izabran za merenja zove se referentni vremenski slot, a frejm u okviru kojeg se nalazi referentni vremenski slot je referentni TDMA frejm. Analogno se definišu i *neighbor* vremenski slotovi i *neighbor* TDMA frejmovi, a vezano za okolne bazne stanice koje učestvuju u postupku pozicioniranja. RTD vreme se računa kao vremenski ofset između prvog detektovatnog impulsa u izabranom referentnom vremenskom slotu i prvog detektovatnog impulsa u *neighbor* vremenskom slotu. Red veličine RTD vremena je nekoliko vremenskih slotova. Vrednost izmerenog RTD vremena LMU jedinica prosleđuje u SMLC u opsegu od 0-923200 i rezolucijom od 0.005 μ s [2]. Za svaku RTD vrednost, LMU pamti odgovarajuće brojeve frejmova sa referentne i susednih baznih stanica. Taj broj frejma predstavlja poziciju TDMA frejma unutar hiperfrejma. Osim ovoga, LMU čuva i broj izmerenih vremenskih slotova unutar frejma. U slučaju kada je LMU jedinica opremljena GPS prijemnikom, merenja vremena su mnogo tačnija i vrše se u odnosu na apsolutno vreme, tj. GPS vreme. U tom slučaju, RTD vreme se zove ATD (*Absolute Time Difference*).

Slično merenju RTD vremena koje vrši LMU jedinica, mobilna stanica meri OTD vreme. OTD merenja se mogu vršiti bilo da je mobilna stanica u *dedicated* ili

idle modu rada. U oba slučaja, merenja se vrše na BCCH kanalu, gde mobilna stanica 'osluškuje' BCCH nosioce referentne i susednih ćelija i računa vremenski ofset između njih, kao i u slučaju merenja RTD vremena. Ipak, za razliku od merenja koje vrši LMU, mobilna stanica vremenske razlike meri u odnosu na vremenski ciklus koji dobija od referentne bazne stanice, pa je OTD vreme izraženo u bitima umesto u milisekundama kao u slučaju ATD. Ovo vreme se meri u opsegu od 0-39999, sa rezolucijom od 1/256 bita [2].

E-OTD metoda pozicioniranja se može realizovati i kao *mobile-based* i kao *mobile-assisted* rešenje. U prvom slučaju, mobilna stanica, na osnovu merenog vremena OTD i dobijene vrednosti vremena RTD koje meri LMU a ka mobilnoj stanici prosleđuje SMLC u okviru pomoćnih podataka, sama proračunava sopstvenu poziciju. U *mobile-assisted* varijanti mobilna stanica samo meri OTD vreme, koje zatim prosleđuje ka SMLC koje vrši konačan proračun lokacije te mobilne stanice.

Tačnost E-OTD metode pozicioniranja procenjuje od 50m do 500m, sa kašnjenjem do 10s [22]. E-OTD metoda pozicioniranja zahteva modifikacije i na strani mobilne stanice i na strani mreže. Na strani mreže to su standardne komponente neophodne za podršku servisu pozicioniranja, sa napomenom da se ne zahteva da svaka bazna stanica ima instaliranu LMU jedinicu, obzirom da jedna LMU jedinica obezbeđuje funkcionalnost za nekoliko obližnjih baznih stanica (obično do pet). Neophodne modifikacije na strani mobilne stanice uglavnom su softverske prirode, što ipak znači da E-OTD metodu ne podržavaju standardni terminali.

8.3. OTDOA

8.3.1. OTDOA u UMTS

OTDOA je metoda standardizovana za pozicioniranje u UMTS [57]. Ova metoda je ekvivalent E-OTD metode pozicioniranja koja je standardizovana u GSM. To znači da su princip rada u uslovi koje zahteva ova metoda isti kao i u E-OTD, a to su cirkularna ili hiperbolička lateracija, dostupnost i u *dedicated* i u *idle* modu rada, i najzad, mogućnost implementacije kao *mobile-based* ili *mobile-assisted* rešenje. Ključna razlika proističe iz merenja RTD i OTD vremena, što je posledica drugačije strukture radio interfejsa u UMTS.

Kao što je već rečeno u okviru E-OTD metode pozicioniranja, za merenje neophodnih vremena koja će se koristiti u svrhe pozicioniranja, zahteva se sinhronizacija između mobilne i baznih stanica, ili baznih stanica međusobno. Ako ovaj zahtev nije ispunjen, mora se ostvariti *a posteriori* sinhronizacija, primenom dodatne komponente u sistemu, LMU jedinice. Za potrebe pozicioniranja u UMTS, LMU jedinice je neophodno instalirati samo za bazne stanice koje rade u UTRAN-FDD modu, obzirom da su bazne stanice u UTRAN-TDD modu već međusobno sinhronizovane. Kao i u slučaju E-OTD metode, LMU jedinice vrše RTD/ATD merenja referentne i susednih baznih stanica, samo što se merenja u ovom slučaju vrše na pilot signalima, CPICH (*Common Pilot Channel*). Merenja vremena se kao i u slučaju GSM mogu vršiti u odnosu na interno LMU vreme, ili u odnosu na apsolutno, GPS vreme. Neophodno RTD vreme se dobija računanjem tzv. SFN (*System Frame Number*)-SFN *observed time difference* [73]. Ovo vreme se definiše kao

$$SFN - SFN \text{ observed time difference} = t_{CPICH, Rxj} - t_{CPICH, Rxi} \quad (8.9)$$

gde $t_{CPICH, Rxj}$ predstavlja početak prijema primarnog CPICH frejma sa referentne ćelije j , dok $t_{CPICH, Rxi}$ predstavlja početak prijema primarnog CPICH frejma sa ćelije i , koji je vremenski najbliži frejmu primarnog pilot signala referentne ćelije j . U oba slučaja prijemnik je LMU. SFN-SFN *observed time difference* vreme se meri u opsegu od 0-38400 [2], sa rezolucijom od jednog čipa, što zapravo predstavlja broj čipova u jednom frejmu.

Takođe, kao i u slučaju E-OTD, i kod OTDOA je moguće koristiti apsolutno, GPS vreme. Ovaj mod rada je posebno pogodan za potrebe pozicioniranja, jer bazne stanice mere i pamte apsolutno vreme slanja svojih frejmova, i na osnovu tih vremena u SMLC bi se vršio proračun RTD vremena. Ovaj mod rada je poznat pod nazivom *UTRAN GPS Timing of Cell Frames*.

Merenje OTD vremena koje vrši mobilna stanica se, kao i RTD, bazira na parametru SFN-SFN *observed time difference*. Postoje razlike u definiciji ovog parametra u zavisnosti od moda rada bazne stanice (UTRAN-FDD ili UTRAN-TDD), a takođe i u definiciji u okviru samog moda [21]. Bilo da je u pitanju UTRAN-FDD ili UTRAN-TDD, u okviru standarda [73], [74] definisana su dva tipa SFN-SFN *observed time difference*. Tip 1 se koristi za potrebe *soft handovera*, dok se Tip 2 koristi za pozicioniranje. U skladu sa tim, SFN-SFN *observed time difference* za UTRAN-FDD se definiše kao

$$SFN - SFN \text{ observed time difference} = t_{CPICH, Rxj} - t_{CPICH, Rxi} \quad (8.10)$$

gde $t_{CPICH, Rxj}$ predstavlja trenutak prijema slotu primarnog CPICH signala sa referentne ćelije j , dok $t_{CPICH, Rxi}$ predstavlja trenutak prijema slotu primarnog CPICH signala sa ćelije i , koji je vremenski najbliži slotu primarnog CPICH signala referentne ćelije j . U oba slučaja prijemnik je mobilna stanica.

SFN-SFN *observed time difference* za UTRAN-TDD se definiše kao

$$SFN - SFN \text{ observed time difference} = t_{Rx_Frame_cellk} - t_{Rx_Frame_celli} \quad (8.11)$$

gde $t_{Rx_Frame_celli}$ predstavlja početak prijema (prva detektovana putanja u vremenu) ivice frejma sa servisne TDD ćelije i , dok $t_{Rx_Frame_cellk}$ predstavlja početak prijema (prva detektovana putanja u vremenu) ivice frejma sa ciljane ćelije k , koja je vremenski najbliža ivici frejma servisne TDD ćelije i . U oba slučaja, signal prima mobilna stanica, obzirom da je reč o merenju OTD vremena.

Kao i u slučaju E-OTD u GSM, za potrebe pozicioniranja primenom OTDOA metode predviđa se slanje pomoćnih podataka, čiji sadržaj zavisi od toga da li je u pitanju *mobile-based* ili *mobile-assisted* rešenje. Ipak, u slučaju OTDOA taj postupak razmene podataka između SMLC i mobilne stanice se može dodatno unaprediti, pa mobilna stanica rezultate merenja ne mora slati isključivo na zahtev, već i pod nekim drugim unapred definisanim uslovima. Ti uslovi su npr. kada neki parametri pređu odgovarajuće granice, ili kada procenjena lokacija mobilne stanice (slučaj *mobile-based* rešenja) prekorači neke unapred definisane vrednosti. Ovo je vrlo značajno unapređenje u odnosu na GSM, obzirom da omogućava novu seriju

LCS servisa koji bi se aktivirali kako bi se korisnik našao u nekoj unapred definisanoj zoni, ili ako bi uopšte došlo do promene njegove lokacije (*spatial triggering*).

Ipak, i OTDOA metoda pozicioniranja ima svoje nedostatke. Neki od problema OTDOA metode pozicioniranja su nepostojanje *a priori* sinhronizacije baznih stanica u UTRAN-FDD modu, osetljivost na geometrijski raspored baznih stanica u prostoru, smanjenje kapaciteta kao i neophodne modifikacije mobilne stanice. Posledica nepostojanja sinhronizacije baznih stanica u UTRAN-FDD modu predstavlja velika nesigurnost merenja TDOA, što dalje dovodi i do nesigurnosti u proračunu same lokacije mobilne stanice. Takođe, na tačnost proračuna lokacije mobilne stanice kao i na raspoloživost OTDOA metode utiče i geometrijski raspored baznih stanica koje učestvuju u procesu pozicioniranja. Tipičan primer predstavljaju duge, ravne deonice autoputa u ruralnim zonama, kada se može desiti da OTDOA metoda uopšte ne može proračunati lokaciju ciljane mobilne stanice, jer bazne stanice koje učestvuju u procesu pozicioniranja praktično leže duž jedne linije, odnosno, instalirane su duž autoputa. Jedan od nedostataka predstavlja i smanjenje kapaciteta sistema, obzirom da se neki signalizacioni i saobraćajni kanali, kao i deo snage same mobilne stanice ili mrežnog entiteta, troše na LCS servise. Takođe, nedostatak predstavlja i činjenica da OTDOA metodu pozicioniranja ne podržavaju standardni terminali, obzirom da metoda zahteva modifikacije na strani mobilne stanice.

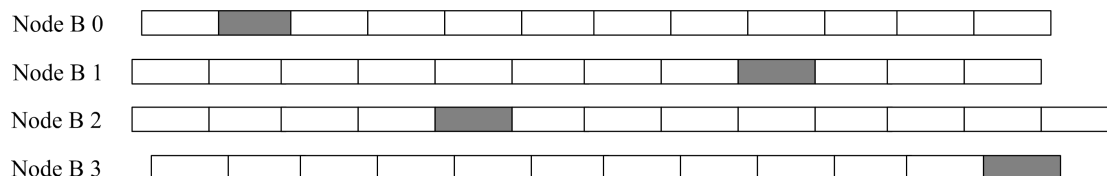
Ozbiljan problem OTDOA metode pozicioniranja predstavlja i nedovoljan broj pilot signala neophodnih u postupku proračuna lokacije mobilne stanice. Naime, da bi imala zadovoljavajuću tačnost, OTDOA metoda pozicioniranja zahteva merenja vremena prispeća signala sa što više predajnika, što često nije zadovoljeno [79]. Praktično, da bi ova metoda imala prihvatljivu tačnost, potrebno je da mobilna stanica čija se lokacija određuje 'vidi' bar šest baznih stanica [80].

Ipak, najveći nedostatak OTDOA metode pozicioniranja ipak predstavlja tzv. *hearability* problem. Ovaj problem je inače karakterističan za sisteme bazirane na CDMA, a dešava se kada se mobilna stanica nalazi blizu servisne bazne stanice koja u tom slučaju može blokirati prijem signala sa ostalih baznih stanica koje rade na istoj učestanosti. Konkretno, obzirom da OTDOA zahteva više baznih stanica u cilju procene lokacije mobilne stanice, može se desiti da, kao posledica *hearability* problema, ova metoda bude dostupna praktično samo na ivici servisne ćelije, što je nedopustivo. Kako bi se prevazišao ovaj problem, svaka bazna stanica mora u nekom kratkom vremenskom periodu stopirati svoju transmisiju kako bi mobilna stanica mogla detektovati pilot signale (CPICH) sa susednih baznih stanica i izvršiti neophodna merenja. Ovi vremenski periodi se zovu prazni periodi (*idle* periodi), dok se mehanizam koji upravlja povremenim prekidima emisije signala sa baznih stanica zove IPDL (*Idle Period Downlink*). Varijanta OTDOA metode pozicioniranja koja koristi IPDL se shodno tome naziva OTDOA-IPDL. OTDOA-IPDL na neki način predstavlja i pokušaj da se poveća broj pilot signala koje 'vidi' mobilna stanica, odnosno, da se poveća dostupnost ove metode [79], [80]. U zavisnosti od topologije mreže, saobraćaja, osetljivosti SFN-SFN merenja, kao i snage pilot signala, performanse OTDOA metode pozicioniranja mogu se višestruko poboljšati primenom IPDL tehnike. Ipak, rezultati pokazuju da OTDOA-IPDL metoda pozicioniranja u realnim uslovima ima znatno veću grešku pozicioniranja. Konkretno, greška pozicioniranja koju treba očekivati od OTDOA-IPDL metode iznosi 125m (u 67% merenja), odnosno, 400m (u 90% merenja), pod pretpostavkom da mobilna stanica 'vidi' šest pilot signala [80].

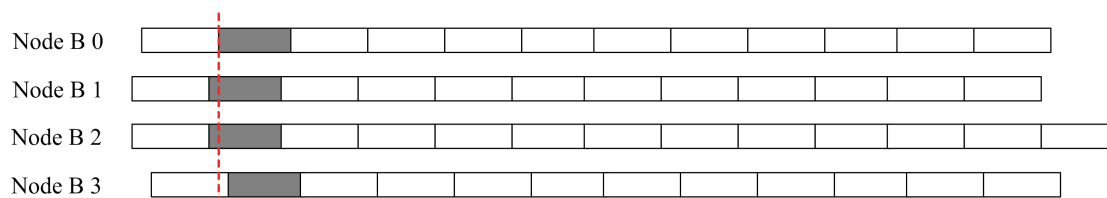
Osim standardne OTDOA-IPDL, postoje i drugi brojni pokušaji da se na račun cene i kompleksnosti terminala poveća *hearability* pilot signala. Najuspešnije

varijante ovoga tipa su: TA-IPDL (*Time Aligned IPDL*) [81], [82], PE-IPDL (*Positioning Elements IPDL*) [83], IC-IPDL (*Interference Cancelation IPDL*) [84] i CVB (*Cumulative Virtual Blanking*) [85].

Standardna OTDOA-IPDL podrazumeva da svaka bazna stanica (Node B) pseudoslučajno prestaje da emituje bilo kakve signale, i taj period neemitovanja signala, kao što je već rečeno, se zove *idle* period. U toku *idle* perioda servisne bazne stanice, mobilna stanica vrši neophodna merenja signala sa susednih baznih stanica, koji bi joj, usled *hearability* problema, bili nedostupni. TA-IPDL varijanta se razlikuje samo po tome što su *idle* periodi vremenski poravnjani, tj. kod svih baznih stanica se javljaju skoro istovremeno (slika 8.5).



Slika 8.4. Raspored *idle* perioda, OTDOA-IPDL.



Slika 8.5. Raspored *idle* perioda, OTDOA-TA-IPDL.

Praktično, u okviru TA-IPDL, postoji zajednički *idle* period, u okviru kojeg bazne stanice ili u potpunosti prekidaju transmisiju kao što je slučaj u standardnoj IPDL tehnici, ili emituju samo signale bitne za pozicioniranje, što je najčešće pilot signal. Tipično, bazne stanice u potpunosti prekidaju transmisiju u trajanju od 70% *idle* perioda, dok u preostalih 30% tog vremena emituju pilot signal [82]. Ovo je pogodno jer se sva merenja neophodna za pozicioniranje obave za vreme trajanja (*Time Aligned*) *idle* perioda (što kod standardne IPDL nije slučaj). Naime, TA-IPDL metoda vrši sva merenja vezana za pozicioniranje samo tokom zajedničkog *idle* perioda, dok IPDL može vršiti merenja sa servisne ćelije i van tog vremena. Ova karakteristika TA-IPDL metode ustvari vremenski odvajava servis pozicioniranja od drugih servisa. Zbog toga servis pozicioniranja ne umanjuje kapacitete linka izvan *idle* perioda i funkcioniše neprimetno za ostale servise. Sa druge strane, performanse pozicioniranja više ne zavise od opterećenja sistema.

Rezultati istraživanja pokazuju znatno povećanje tačnosti i dostupnosti pozicioniranja primenom TA-IPDL u odnosu na standardnu IPDL tehniku, što je dobrim delom i posledica boljeg odnosa $C/(I+N)$ kod TA-IPDL. Naime, pošto se u toku *idle* perioda emituju samo signali neophodni za pozicioniranje i to ne sve vreme trajanje *idle* perioda, smanjena je interferencija između signala u odnosu na IPDL. Zbog toga poboljšanje koje unosi TA-IPDL je bolji odnos $C/(I+N)$, na ulazu u terminal za signale emitovane sa susednih baznih stanica u toku *idle* perioda. Bolji odnos signala sa susednih baznih stanica znači da će mobilni terminal 'čuti' više baznih stanica, tj. poboljšava se *hearability*. Ovo znači više relevantnih rezultata merenja vremena koji mogu da se koriste pri pozicioniranju. Zbog toga, u pojedinim slučajevima, najčešće u ruralnoj sredini, kada kod metode IPDL nije postojao dovoljan broj mernih rezultata da se izvrši proračun (minimum tri bazne stanice), kod

TA-IPDL će biti više mernih rezultata i pozicioniranje će biti moguće. U drugim slučajevima, najčešće u urbanoj sredini, gde je pozicioniranje pomoću IPDL bilo moguće, ali je preciznost bila narušena usled čestih NLOS uslova ili *multipath* propagacije, kod TA-IPDL će preciznost biti poboljšana. Ovo znači da metoda TA-IPDL ima bolju dostupnost i tačnost u odnosu na IPDL. Tabele 8.2 i 8.3 pokazuju procenjene tačnosti pozicioniranja za IPDL i TA-IPDL za razne vrste okruženja [82].

Tabela 8.2. Simulacioni rezultati za tačnost pozicioniranja kod metode IPDL.

Sredina	67%	95%
Ruralna	13m	153m
Suburbana	11m	330m
Urbana	73m	289m
Gusta urbana	199m	553m

Tabela 8.3. Simulacioni rezultati za tačnost pozicioniranja kod metode TA-IPDL.

Sredina	67%	95%
Ruralna	7m	14m
Suburbana	5m	10m
Urbana	30m	84m
Gusta urbana	136m	320m

Razlika između odnosa $C/(I+N)$ kod TA-IPDL i IPDL je aproksimativno 15dB. Uzimajući u obzir da se pilot signal emituje samo 30% vremena i da se samo najbolji odnos $C/(I+N)$ koristi za TA-IPDL statistike, efektivna razlika odnosa $C/(I+N)$ je aproksimativno 7dB. Ovo znači da je potrebno da kod IPDL tehnike *idle* periodi traju pet puta duže ili da se pet puta češće ponavljaju da bi se postigle iste performanse kao kod TA-IPDL. Iz ovoga proizilazi da *idle* periodi u okviru TA-IPDL imaju manje negativan uticaj na druge servise i na performanse celokupne mreže jer mogu biti kraći i ređi u vremenu u odnosu na IPDL.

Manji su i zahtevi za procesiranjem na terminalu zbog smanjene dužine trajanja potrebne korelacije usled manje zahtevnog odnosa $C/(I+N)$ u TA-IPDL. Znači, manja je zahtevana kompleksnost mobilne stanice. Ipak, povećana je kompleksnost na nivou mreže usled potrebe za poravnanjem *idle* perioda. Ovo predstavlja vrlo značajan problem TA-IPDL metode. Naime, poravnanje *idle* perioda zahteva da su vremenska odstupanja između frejmova sa svake bazne stanice poznata sa određenom rezolucijom (reda veličine trajanja simbola). Informacije o odstupanju se stoga moraju generisati u mreži i proslediti ka baznim stanicama da bi se *idle* periodi mogli događati u tačno određeno vreme. Naravno, neophodno je i njihovo redovno ažuriranje što se tipično vrši na svakih trideset minuta. Javlja se dodatno opterećenje jer je potrebna dodatna signalizacija za dostavljanje ovih informacija baznim stanicama, što povećava signalizaciono opterećenje.

Još jedna relevantna činjenica u TA-IPDL metodi je da optimizacija snage pilot signala za potrebe komunikacije može biti razdvojena od optimizacije snage pilota tokom *idle* perioda. Dakle, u metodi TA-IPDL moguće je povećati snagu pilot signala tokom *idle* perioda tako da se omogući da mobilni terminal vrši merenja u većem opsegu. Ova mogućnost kod TA-IPDL može svakako biti od koristi u područjima gde su bazne stanice retko raspoređene (u ruralnim područjima). To utiče i na poboljšanje performansi pozicioniranja i u *indoor* okruženju. Na ovaj način metoda TA-IPDL dodatno povećava svoju dostupnost.

U Tabeli 8.4 je pokazano poboljšanje koje se dobija kada se pozicioniranje vrši sa pojačanim pilot signalima. Prvi red u tabeli 8.4 prikazuje tačnost pozicioniranja u slučaju urbane sredine sa ćelijskim radijusom od 1km koristeći metodu TA-IPDL gde je snaga pilot signala 10% od maksimalne emitujuće snage bazne stanice (standardan odnos jačine pilot signala u IPDL mrežama). Drugi red u tabeli 8.4 pokazuje da u istim uslovima postoji značajno poboljšanje tačnosti pozicioniranja kada se koristi TA-IPDL gde je snaga pilot signala 80% od maksimalne emitujuće snage bazne stanice [82]. Kod standardne IPDL konfiguracije, nije moguće povećati snagu pilot signala i remetiti sklad celokupne mreže samo radi povećanja pokrivenosti i tačnosti date metode pozicioniranja.

Tabela 8.4. Simulacioni rezultati za tačnost pozicioniranja kod TA-IPDL u slučaju povećanja jačine pilot signala.

Scenario	67%	95%
TA-IPDL, Urbano, ćelijski radijus 1km, pilot snaga 10%	300m	731m
TA-IPDL, Urbano, ćelijski radijus 1km, pilot snaga 80%	125m	378m

PE-IPDL tehnika predstavlja još jedan pokušaj da se utiče na poboljšanje performansi standardne IPDL tehnike. Za razliku od TA-IPDL, PE-IPDL zahteva instalaciju nove komponente kao podršku LCS u UTRAN, tzv. *positioning element* (PE). Zadatak PE komponentata je da sinhrono emituju sekvence simbola koje mobilna stanica koristi kako bi izvršila standardizovana OTDOA merenja. PE komponente se instaliraju na različitim lokacijama od onih gde su bazne stanice. Jedna od interesantnih razmatranja idu u smeru integracije PE komponentata u okviru ripitera.

PE komponente vrše sinhronizaciju u odnosu na emisiju sa baznih stanica, tj. u odnosu na DL transmisiju. Svaki PE vrši emitovanje simbola u unapred određenim intervalima u okviru DL multifrejma. Koordinate PE elemenata su poznate mreži, tako da je poznato i vreme multifrejma dodeljeno PE. Dakle, merenje vremena prispeća signala sa pozicionih elemenata na mobilnoj stanici se koristi kao dodatno OTDOA merenje. S obzirom da su PE elementi sinhronizovani na bazne stanice i da je njihova pozicija poznata, a emisija se vrši sa tačno utvrđenim kašnjenjem u odnosu na granica frejma, nema potrebe za merenjima od strane LMU.

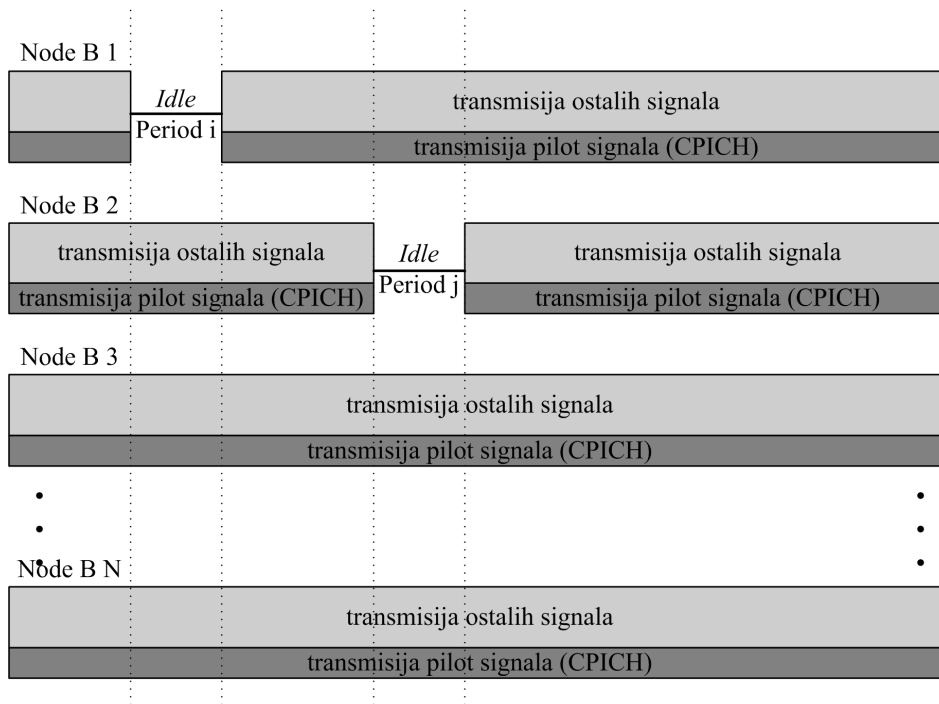
Emisija signala sa PE komponentata može biti unapred konfigurisana ili se konfigurise od strane mreže koja komunicira sa PE preko radio interfejsa. Preko radio interfejsa se konfigurise emisiona šema ponavljanja multifrejma, kao i snaga emisije PE. PE emisija se može izvoditi na zahtev ili može biti periodična tako da se ponavlja u svakom multifrejmu. Sa druge strane, poznato je da uvođenje novih elemenata uvek povećava cenu implementacije. Što se tiče pozicionih elemenata PE, oni su male zapremine (veličine mobilne stanice), njihova emitujuća snaga je reda veličine emisije mobilne stanice i mogu se napajati sa malih solarnih panela. Zbog svega ovoga, njihova cena nije previsoka. Takođe, konfigurise se preko radio interfejsa i ne zahtevaju nikakve modifikacije na strani baznih stanica što znači da ni ukupna cena implementacije metode nije visoka.

PE-IPDL varijanta OTDOA metode unosi poboljšanja u odnosu na standardizovanu IPDL metodu u određenim sredinama ili lokacijama gde mobilna stanica 'ne čuje' dovoljan broj baznih stanica, tj. PE elementi se ponašaju kao bazne

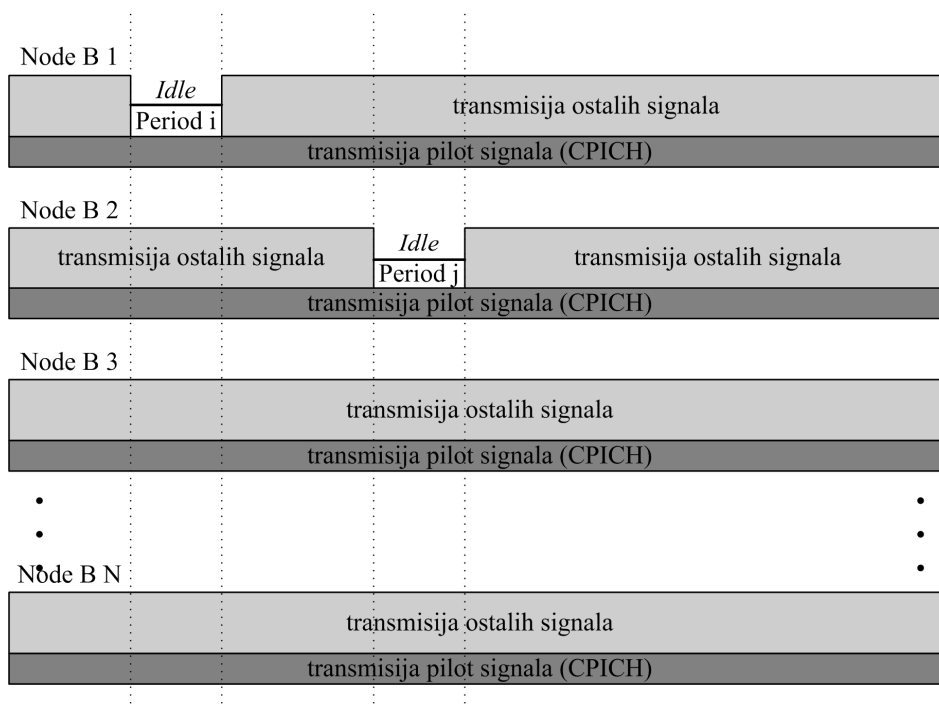
stanice i poboljšava se *hearability* na mobilnim terminalima. To je najčešće slučaj na ivici pokrivanja, u ruralnom ili *indoor* okruženju. Tačnost PE-IPDL tehnike dosta zavisi od srednjeg rastojanja između mobilne stanice i PE komponente, tako da broj instaliranih PE komponenata dosta utiče na performanse pozicioniranja. Rezultati simulacije [83] ilustruju povećanje tačnosti PE-IPDL u poređenju sa standardnom IPDL tehnikom za oko 10% u urbanom okruženju. Za PE-IPDL je predviđeno da bude opciona tehnika koja bi se koristila u sklopu ili nezavisno od neke druge tehnike pozicioniranja. Merenja koja zahteva PE-IPDL su vrlo slična merenjima standardne OTDOA-IPDL i, ako je podržana od strane terminala, operator može birati da li će ignorisati ovu mogućnost, da li će instalirati nekoliko PE komponenata kako bi omogućio servis pozicioniranja kada ostale metode to ne mogu, ili će instalirati dovoljan broj PE komponenata u cilju povećanja tačnosti pozicioniranja.

Varijante OTDOA tehnike, IC-IPDL i CVB, *hearability* problem rešavaju primenom tehnike poništavanja interferencije i estimacije kanala. Obe metode (IC IPDL i CVB) koriste tehnike obrade signala u cilju smanjenja *hearability* problema umesto periodičnog prekidanja transmisije signala sa baznih stanica (kao kod obične IPDL). Obe tehnike primenjuju tzv. virtuelno prekidanje transmisije signala sa baznih stanica u softverskom domenu. Princip rada se zasniva na tome da, kada se javi zahtev za pozicioniranjem, signale na DL istovremeno mere i mobilna stanica ali i same bazne stanice. Rezultati merenja se šalju u SMLC gde se primenjuje algoritam poništavanja interefrencije kojim se značajno slabe željeni interferirajući signali sa obližnjih baznih stanica kako bi se omogućila merenja slabijih signala sa udaljenijih baznih stanica i izračunala neophodna OTD vremena. Algoritam se može sprovesti i iterativnim slabljenjem (poništanjem) interferirajućih signala jedan-po-jedan, počev od najjačeg (sa referentne bazne stanice). Na ovaj način, omogućena su merenja slabijih signala, koja se, u normalnom režimu, ne bi detektovala zbog jačine interferirajućih signala sa bližih baznih stanica.

Treba naglasiti da obe tehnike značajno smanjuju *hearability* problem a da pritom održavaju stabilnost čitavog sistema, tj. ne ukidaju pilot signale. Naime, kao što je poznato, OTDOA-IPDL metoda, *hearability* problem rešava uvođenjem perioda kada bazne stanice u potpunosti prekidaju transmisiju svih signala, uključujući i pilot signale (*idle* periodi). Sa druge strane, nezavisno od LCS servisa, pilot signali su u standardnom radu mreže koriste za sinhronizaciju, *handover*, inicijalno traženje ćelije, a kasnije i proces selekcije/reselekcije ćelije [86]. Mobilne stanice kontinualno 'oslušuju' pilot signale i na osnovu njih biraju najpogodnije ćelije. Dakle, u toku trajanja *idle* perioda za potrebe OTDOA-IPDL, ostali korisnici u sistemu kao i ceo sistem mogu trpeti štetne posledice prekida pilot signala, što najzad uzrokuje nestabilnost celog komunikacionog sistema. Zbog toga, obe tehnike softverske eliminacije interferencije (IC-IPDL i CVB) nemaju negativan uticaj na stabilnost čitavog komunikacionog sistema. IC-IPDL metoda [84] primenjuje *idle* periode u cilju rešavanja *hearability* problema, ali ne prekida transmisiju pilot signala za vreme *idle* perioda i na taj način održava stabilnost sistema. Implementacija *idle* perioda kod standardne IPDL i IC-IPDL prikazana je na slici 8.6 i slici 8.7, respektivno.



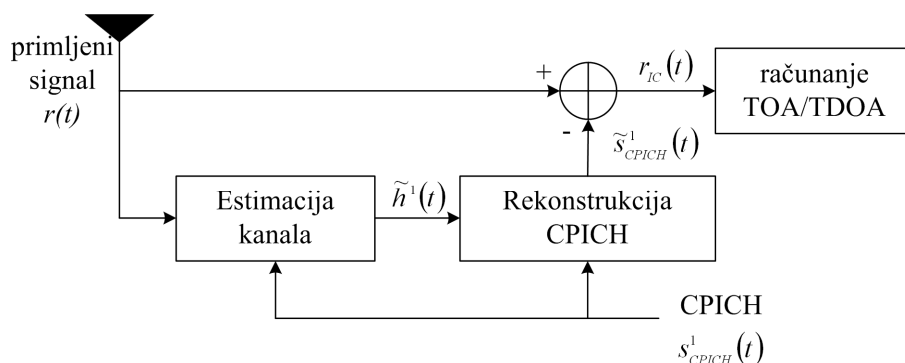
Slika 8.6. *Idle* periodi kod standardne IPDL.



Slika 8.7. *Idle* periodi kod IC-IPDL.

U predloženoj IC-IPDL metodi, bazne stanice održavaju emisiju CPICH i tokom *idle* perioda. Može se primetiti da u ovakvom scenariju održavanje CPICH transmisije ne bi puno rešio *hearability* problem, jer i CPICH signali bliskih baznih stanica onemogućavaju merenja signala sa udaljenijih. Da bi se rešio ovaj problem, primenjuje se tehnika poništavanja interferencije gde se iz dolaznog signala eliminišu interferirajući signali (počev od najjačeg pilota CPICH sa servisne bazne stanice, pa

nadalje...). Eliminacija se vrši tako što se najpre izvrši rekonstrukcija željenog CPICH signala, a zatim i njegovo oduzimanje od primljenog signala (slika 8.8).



Slika 8.8. Poništavanje interferencije kod IC-IPDL.

Uporedna procena tačnosti standardne IPDL i IC-IPDL tehnike pozicioniranja date su u tabeli 8.5 [84].

Tabela 8.5. Procena radijalne greške kod IPDL i IC-IPDL.

Sredina	IPDL (%)		IC-IPDL (%)	
	100m	300m	100m	300m
Gusto Urbana	32.4	81.6	31.2	81.2
Urbana	83.8	98.2	81.0	96.7
Sve sredine	59.4	91.1	57.0	89.9

U tabeli 8.5 su date verovatnoće da radijalna greška pozicioniranja bude manja od 100m i 300m za sredine gusto urbana, urbana i sve sredine (usrednjeno). Može se primetiti da obe metode imaju približno iste performanse po pitanju tačnosti pozicioniranja, iako IC-IPDL ne prekida emisiju pilot signala, što joj je prednost jer se ne narušava stabilnost sistema.

CVB tehnika je IC-IPDL tehnika koja primenjuje algoritam poništavanja interferencije na sve DL kanale a ne samo pilot signal. Princip rada CVB tehnike je da merenja DL kanala simultano vrše i mobilna stanica i bazne stanice, da bi se onda rezultati ovih merenja prosledili u SMLC, gde se vrši primena tehnike poništavanja interferencije, odnosno, eliminacija signala interferirajućih baznih stanica [85]. CVB je zapravo naziv softverskog procesa kojim se u okviru SMLC vrši eliminacija interferencije iz primljenog signala. Implementacija CVB tehnike je vrlo jednostavna, obzirom da zahteva samo sitne softverske izmene na nivou mobilne i baznih stanica. *Hearability*, tj. broj baznih stanica sa kojih se vrši merenje je duplo veći nego kod IPDL u istim uslovima. Procene performansi CVB tehnike pokazuju moguća znatna poboljšanja i po pitanju tačnosti pozicioniranja, obzirom da je očekivana greška pozicioniranja oko 20m u 67% slučajeva procene pozicije. Ova metoda se pokazala dosta robusnijom i na prisustvo *multipath* propagacije.

8.3.2. OTDOA u LTE

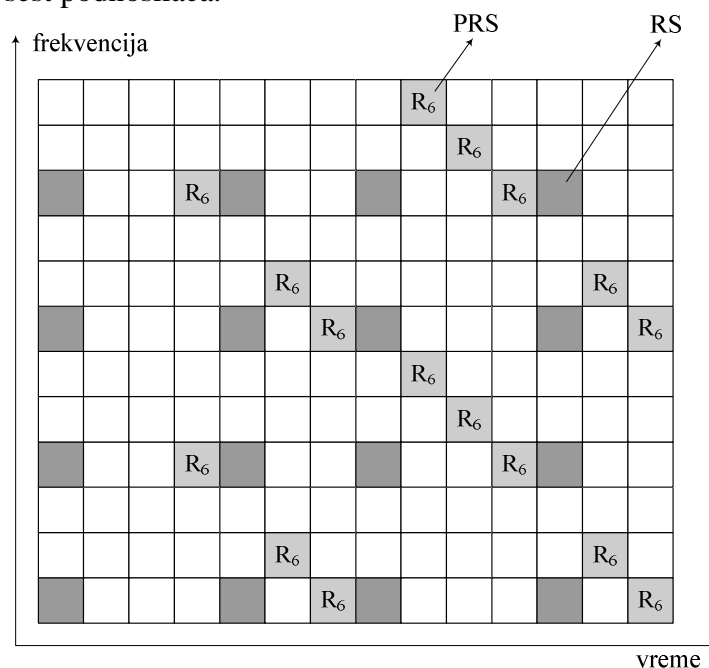
OTDOA metoda pozicioniranja u LTE je slična kao istoimena metoda u UMTS ili E-OTD u GSM. Kao i ove dve metode, OTDOA u LTE se bazira na merenjima na *downlinku*, merenju vremenskih razlika prispeća signala sa eNodeBs do

UE i primeni postupka hiperboličke lateracije u cilju proračuna nepoznate lokacije UE. U slučaju GSM E-OTD merenja se vrše na BCCH kanalima, u UMTS OTDOA merenja se vrše na pilot signalima, dok se u LTE OTDOA merenja vrše na tzv. *cell-specific Reference Signals* (RS) (ćelijski referentni signali). Dakle, mere se vremenske razlike prispeća RS signala od nekoliko baznih stanica (eNodeBs) do UE. To su tzv. *Reference Signal Time Difference* (RSTD) vremenske razlike, gde se zatim standardno primenjuje hiperbolička lateracija [87].

Ipak, ispostavilo se da primena ovih referentnih signala za potrebe pozicioniranja u LTE nije bila dovoljna. Razlog je taj što primena hiperboličke lateracije zahteva minimum tri bazne stanice (servisnu i bar dve susedne), pa se javio problem detekcije dovoljnog broja signala za pozicioniranje, odnosno dovoljnog broja 'vidljivih' referentnih tačaka, tj. baznih stanica. Dakle, očigledni *hearability* problem je prisutan i kod OTDOA metode pozicioniranja u LTE. U LTE slučaju, referentni signali se mogu detektovati samo u uslovima kada je $SINR \geq -6\text{dB}$. Simulacije u toku procesa standardizacije su pokazale da se neophodna treća bazna stanica (tj. druga susedna) može detektovati samo u 70% slučajeva [66], [67], što je nezadovoljavajuća dostupnost servisa pozicioniranja. Situacija bi realno bila još i lošija, obzirom da se u simulacijama pretpostavilo okruženje bez interferencije.

Ovo je bio razlog da se, počev od *Release 9*, uvedu posebni referentni signali, namenjeni isključivo za pozicioniranje. To su tzv. *Positioning Reference Signals* (PRS) signali, namenjeni za povećanje dostupnosti servisa pozicioniranja kroz povećanje broja referentnih tačaka, tj. baznih stanica. Preciznije rečeno, PRS se uvode za rešavanje *hearability* problema. Treba primetiti da je ovo prva pojava signala namenjenih samo za pozicioniranje, koji nisu postojali ni u jednom od prethodnih ćelijskih sistema (GSM, UMTS).

PRS signali se periodično emituju zajedno sa RS signalima u grupama uzastopnih DL podfrejmova. Učestanost emitovanja mora biti dovoljno velika kako bi se izvršila neophodna merenja vremena. Na slici 8.9 prikazano je umetanje PRS signala u OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*) *Resource Block* (RB) [66]. Preklapanje između PRS u susednim ćelijama izbegnuto je frekvencijskim pomerajem od šest podnosilaca.



Slika 8.9. Umetanje PRS u OFDM *Resource Block* u LTE.

Kako bi se povećala osetljivost detekcije PRS kao i prostor pretrage susednih ćelija, mreža može pomoći mobilnoj stanici (UE) slanjem pomoćnih podataka. Ovi podaci mogu sadržati vremenske razlike transmisije signala sa svake od susednih ćelija u odnosu na servisnu, kao i dužinu prozora pretrage u smislu maksimalne razlike propagacionog kašnjenja u primenjenom okruženju.

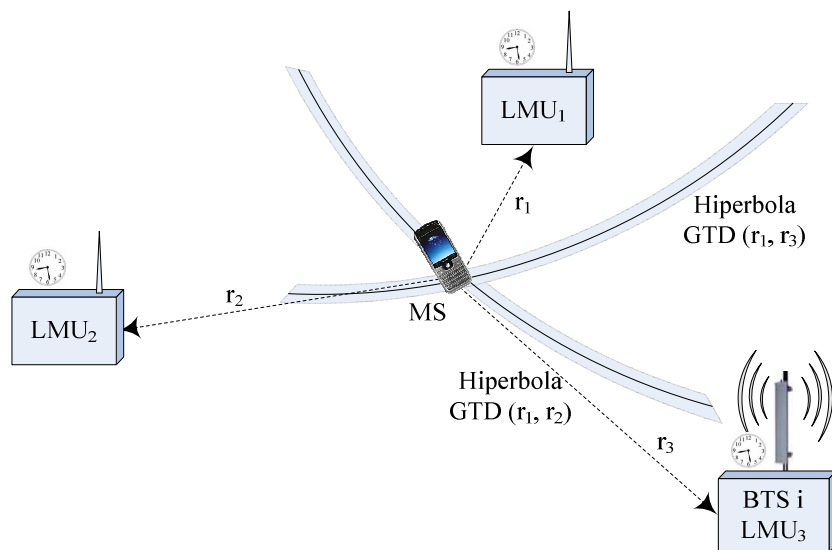
Takođe, treba naglasiti i da OTDOA merenja PRS susednih ćelija zahtevaju da UE unapred zna koje PRS da pretražuje. Obzirom da su poznate geografske koordinate predajnih antena, E-SMLC za svaku ćeliju može kreirati listu kandidata susednih ćelija, bez tradicionalnog planiranja liste suseda (*neighbour list planning*). Ovi podaci se zatim mogu dostaviti UE kao pomoćni podaci.

Na osnovu sprovedenih simulacija, očekivana greška pozicioniranja OTDOA metode u LTE iznosi 50m - 200m [88].

8.4. U-TDOA

8.4.1. U-TDOA u GSM

U-TDOA je metoda standardizovana za pozicioniranje u GSM [49]. Kao i E-OTD, zasniva se na merenju vremena i primenjuje princip hiperboličke lateracije (poglavlje 5.2.2). Za razliku od E-OTD ovo je *network-based* rešenje. U okviru U-TDOA metode pozicioniranja meri se vreme prispeća (TOA) poznatog signala sa mobilne stanice do tri ili više LMU jedinica, slika 8.10. Od izmerenih vrednosti TOA, SMLC računa TDOA, a zatim primenjuje hiperboličku lateraciju u cilju dobijanja nepoznatih koordinata mobilne stanice. Poznati referentni signal je normalni *burst* koji generiše mobilna stanica u *dedicated* modu rada bilo na SDCCH (*Stand-alone Dedicated Control Channel*) ili TCH (*Traffic Channel*) kanalu. Stoga, prvi bitan preduslov koji zahteva U-TDOA metoda pozicioniranja je da mobilna stanica mora biti u *dedicated* modu rada, obzirom da LMU jedinice mogu meriti neophodna vremena samo ako mobilna stanica emituje signal. U slučaju kada se mobilna stanica nalazi u *idle* modu, a javi se zahtev za pozicioniranjem te mobilne stanice primenom U-TDOA tehnike pozicioniranja, mreža mora stimulisati emisiju signala sa mobilne stanice (asinhroni *handover*) kako bi se obavila neophodna merenja. Kada je transmisija u toku, mora se obezbediti i da traje dovoljni dugo kako bi se postigla zadovoljavajuća tačnost. Preporučeno trajanje je između 20 i 80 frejmova [2].



Slika 8.10. U-TDOA u GSM.

Sledeći bitan preduslov koji zahteva U-TDOA metoda pozicioniranja je dovoljan broj LMU jedinica u okruženju mobilne stanice čija se pozicija određuje. Prema minimalnom uslovu (trilateracija), u bliskom okruženju mobilne stanice čija se pozicija određuje mora se nalaziti barem tri LMU jedinice, ali je za veće tačnosti poželjno da ih bude i više od tri.

U slučaju kada se mobilna stanica nalazi u *dedicated* modu rada kada stigne zahtev za pozicioniranjem, SMLC najpre identifikuje servisnu baznu stanicu i fizički UL kanal (radio kanal i vremenski slot) dodeljen toj mobilnoj stanici. Te podatke dostavlja BSC. Na osnovu podatka o servisnoj baznoj stanici, opciono i TA parametru, SMLC selektuje bar tri LMU jedinice koje su najbliže ciljanoj mobilnoj stanici, a zatim ih konfigurira za neophodna merenja. Ta konfiguracija obuhvata definisanje početka i trajanja merenja, vreme u odnosu na koje će se obavljati merenje (GPS vreme ili GSM vreme servisne bazne stanice), kao i fizički kanal koji treba oslušivati. Za vreme samog merenja, LMU jedinice prate prethodno definisan signal sa mobilne stanice i beleže vreme prispeća tog signala. Izmerene vrednosti TOA prosleđuju se ka SMLC u kojem se računa TDOA, primenjuje hiperbolička lateracija i računaju nepoznate koordinate mobilne stanice.

U slučaju kada se mobilna stanica nalazi u *idle* modu rada kada stigne zahtev za pozicioniranjem primenom U-TDOA metode pozicioniranja, a kako je preduslov koji zahteva ova metoda pozicioniranja da mobilna stanica emituje signal jer se neophodna merenja vremena vrše na UL, SMLC najpre preko BSC inicira konekciju sa ciljanom mobilnom stanicom. U tom postupku, BSC standardno vrši postupak *paging*-a, autentifikacije i *ciphering*-a. Rezultat je određivanje servisne bazne stanice kao i alokacija fizičkog kanala za UL transmisiju. Kao i u prethodnom slučaju, ove podatke koristi SMLC za konfiguraciju LMU jedinica koje učestvuju u postupku pozicioniranja. Najzad, da bi se izvršila neophodna merenja, potrebno je obezbediti i neku transmisiju podataka obzirom da mobilna stanica realno nema potrebe za slanjem bilo kakvih podataka. Da bi se stimulisao prenos podataka, BSC simulira potrebu za postupkom *handover*-a, slanjem komande mobilnoj stanici da izvrši promenu sa prethodno dodeljenog na drugi fizički kanal. Na osnovu ove komande, mobilna stanica standardno započinje *handover* proceduru tako što pokušava da pristupi novom kanalu preko *access burst*-a, i upravo je ovo signal čije vreme

prispeća mere LMU jedinice. Ovaj postupak mobilna stanica ponavlja više puta, što LMU jedinice koriste za višestruka merenja vremena u cilju povećanje tačnosti. Najzad se postupak prekida uz signalizaciju o neuspešnom *handover*-u, ali su zato sva neophodna merenja za potrebe pozicioniranja završena i rezultat merenja vremena LMU jedinice prosleđuju u SMLC gde se i vrši proračun lokacije mobilne stanice.

Tačnost određivanja lokacije mobilne stanice primenom U-TDOA metode pozicioniranja veća je u ruralnim i suburbanim područjima u poređenju sa urbanim, i to prvenstveno zbog problema višestruke propagacije koji je izraženiji u urbanim zonama. Isti argument za manju tačnost važi i za *indoor* okruženja. Brojne simulacije su pokazale da se tačnost U-TDOA metode može značajno poboljšati povećanjem broja LMU jedinica u sistemu.

Tabela 8.6 pokazuje očekivane greške pozicioniranja TDOA metode u zavisnosti od broja LMU jedinica koje učestvuju u postupku određivanja lokacije mobilne stanice [10].

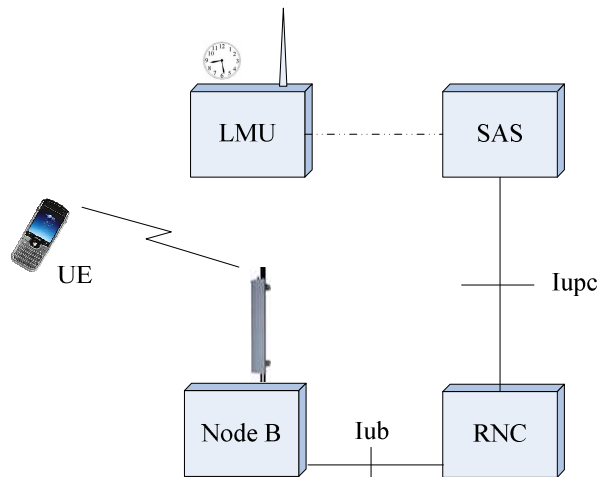
Tabela 8.6. Greška pozicioniranja U-TDOA metode (za stepen pouzdanosti od 67%).

Broj LMU	Ruralno	Suburbano	Urbano
TDOA (3 LMU)	70m	75m	100m
TDOA (5 LMU)	30m	40m	95m
TDOA (7 LMU)	25m	30m	85m

Vreme potrebno da se dobije podatak o procenjenoj lokaciji ovom metodom je oko 10s. Osnovna prednost u odnosu na E-OTD metodu je što je U-TDOA *network-based* metoda, što znači da se sva merenja i proračuni vrše na strani mreže, pa nisu potrebne nikakve promene na postojećim terminalima (mobilnim stanicama). Veliki nedostatak je cena obzirom da je, za razliku od E-OTD, neophodno instalirati znatno veći broj LMU jedinica. Nedostatak predstavlja i to što U-TDOA metoda prilično utiče na radio kapacitet obzirom da svakom pokušaju pozicioniranja prethodi pokušaj asinhronog *handover*-a, što vodi dodatnoj signalizaciji preko radio interfejsa.

8.4.2. U-TDOA u UMTS

U-TDOA je metoda pozicioniranja koja je standardizovana za pozicioniranje u UMTS [57]. Ovo je metoda koja je od svih pomenutih UMTS metoda pozicioniranja poslednja prihvaćena u standard (tek od *Release 7*, 2005. godine). Uopšte, U-TDOA princip, bilo da je u UMTS, GSM ili LTE, nastao je kao rezultat devetogodišnjeg istraživanja od strane *TruePosition*, vodećeg provajdera u oblasti lokalizacije korisnika u bežičnim mrežama za potrebe javne i nacionalne bezbednosti u SAD. U-TDOA metoda se zasniva na merenju vremena i primenjuje princip hiperboličke lateracije (poglavlje 5.2.2). U pitanju je *network-based* rešenje u okviru kojeg se meri vreme prispeća (TOA) poznatog signala sa mobilne stanice do tri ili više LMU jedinica. Od izmerenih vrednosti TOA, RNC/SAS računa TDOA a zatim primenjuje hiperboličku lateracija u cilju dobijanja nepoznatih koordinata mobilne stanice. Dakle, princip rada je isti kao i kod istoimene metode standardizovane u GSM. Na slici 8.11 prikazana je UMTS arhitektura koja podržava U-TDOA metodu pozicioniranja. Jedina razlika u odnosu na sliku 7.2 je direktna veza LMU jedinice i SAS, ali ovaj interfejs još uvek nije specificiran.



Slika 8.11. U-TDOA u UMTS.

U-TDOA je standardizovana za pozicioniranje u UMTS kao metoda koja bi trebalo da obezbedi najbolje performanse u najrazličitijim tipovima okruženja i pod različitim uslovima za pozicioniranje, a pod pretpostavkom minimalne kompleksnosti i uticaja na postojeću mrežnu infrastrukturu. Otuda potiču i neke bitne prednosti U-TDOA u odnosu na ostale metode standardizovane u UMTS. Jedna od najvažnijih razlika U-TDOA u odnosu na OTDOA (poglavlje 8.3.1) je veći kapacitet u smislu obrade podataka i proračuna same pozicije mobilne stanice. Ovo je najvećim delom posledica toga što je U-TDOA *network-based* a OTDOA *mobile-based/assisted* rešenje, odnosno, što mobilna stanica ima ograničene mogućnosti i ograničenu snagu koju može rezervisati za potrebe pozicioniranja. Sem toga, kod OTDOA mobilna stanica vrši merenja pilot signala sa više baznih stanica, jedan po jedan, dok istovremeno obavlja standardne funkcije u ćelijskoj mreži, dok u slučaju U-TDOA procesori brojnih LMU jedinica rade simultano kako bi izvršili lociranje ciljane mobilne stanice. Takođe, U-TDOA dodatno omogućava i simultano lociranje većeg broja mobilnih stanica, kao i akviziciju podataka sa velikog broja udaljenih LMU jedinica.

Osim od standardnih uslova koje zahteva trilateracija, preduslov rada U-TDOA metode pozicioniranja je i da se mobilna stanica nalazi u *connected* modu rada, tačnije u CELL_DCH ili CELL_FACH modu.

Scenario pozicioniranja je sličan kao i kod istoimene metode standardizovane za GSM. Nakon prijema zahteva za pozicioniranjem, RNC najpre obezbeđuje zahtevani *connected* mod rada mobilne stanice, CELL_DCH ili CELL_FACH, i sve informacije neophodne za merenja (Cell-ID, SC (*Scrambling Code*), ...) prosleđuje u SAS. SAS, kao i u slučaju GSM, na osnovu ovih podataka konfiguriše LMU jedinice koje treba da obave neophodna merenja vremena. Ukoliko je u pitanju CELL_DCH mod rada, UL transmisija preko *dedicated* kanala već postoji, pa LMU jedinice sva neohodna merenja vrše na DPCCH ili DPDCH (*Dedicated Physical Data Channel*) kanalu u slučaju FDD moda, odnosno, na DPCH kanalu u slučaju TDD moda. Ukoliko je u pitanju CELL_FACH mod rada, ne postoji *dedicated* UL kanal, već mobilne stanice dele zajednički UL kanal i UL transmisija obično ni ne postoji. Kako bi se obezbedili neophodni signali za merenja na UL, RNC mora izvršiti forsiranu transmisiju podataka sa mobilne stanice, kao i u slučaju U-TDOA u GSM. To je najčešće određen broj prekodiranih bita čija se transmisija ponavlja određeno vreme, dovoljno da LMU jedinice obave sva neophodna merenja. Za razliku od prethodnog slučaja, ovde se merenja vrše na PRACH (*Physical Random Access Channel*) ili

PCPCH (*Physical Common Packet Channel*) kanalu. Najzad, rezultati merenja se standardno šalju u SAS gde se vrši i konačni proračun pozicije ciljane mobilne stanice.

Treba naglasiti da, ukoliko se mobilna stanica nalazi u CELL_DCH modu rada, LCS servisi ne doprinose dodatnoj interferenciji, jer se merenja vrše na već postojećim resursima. Ukoliko se nalazi u nekom drugom modu rada, doprinos LCS servisa interferenciji u sistemu postoji jer se stimuliše emisija mobilne stanice neophodna za pozicioniranje, ali taj doprinos nije veći od onog koji postoji u slučaju *dedicated* UL saobraćaja, i to u trajanju do 500ms, koliko je neophodno da LMU jedinice izvrše sva neophodna merenja [89].

U-TDOA metoda pozicioniranja ne zahteva izmene ni na nivou postojećih baznih stanica, ni na nivou postojećih mobilnih stanica, i može se primeniti i u FDD i u TDD modu. Takođe, dalja unapređenja metode bilo bi lako implementirati jer bi se modifikacije bile softverske i to na nivou RNC i LMU jedinica.

Za razliku od OTDOA, U-TDOA ne zahteva implementaciju *idle* perioda na DL, što značajno utiče na stabilnost čitavog sistema.

Testiranja U-TDOA metode pokazala su njenu superiornost i u odnosu na A-GPS (poglavlje 8.5) po pitanju dostupnosti, naročito u okruženju smanjene optičke vidljivosti sa GPS satelitima (*indoor* uslovi i gusta urbana okruženja).

Greška pozicioniranja kao i kašnjenje su isti kao i u slučaju U-TDOA u GSM, i u najboljem slučaju iznose 40m i 5s, respektivno [89].

8.4.3. U-TDOA u LTE

U-TDOA je metoda pozicioniranja koja je standardizovana za pozicioniranje u LTE [3]. Ovo je metoda poslednja prihvaćena u standard, tačnije, tek od *Release 11*. Princip rada i performanse su slične kao kod istoimene metode u UMTS i GSM, s'tim što se merenja vrše takođe na *uplinku* ali se kao signali čija se vremena prispeća od UE do eNodeBs mere koriste već pominjani *Sounding reference signals* (SRS). Takođe, i ovde se koriste LMU jedinice za potrebe sinhronizacije i povećanje broja referentnih tačaka, samo što su one u slučaju LTE mreža gotovo uvek integrisane u okviru eNodeBs (troškovi znatno smanjeni).

8.5. A-GNSS (A-GPS)

A-GNSS je metoda pozicioniranja standardizovana u GSM, UMTS i LTE. Za razliku od prethodnih metoda pozicioniranja koje su čisto ćelijske, A-GNSS se oslanja na satelitsku infrastrukturu, tj. postojeće sisteme za globalno pozicioniranje. Najpopularniji od postojećih satelitskih sistema za globalno pozicioniranje je GPS, pa se pod pojmom A-GNSS obično podrazumeva A-GPS (*Assisted Global Positioning System*) metoda pozicioniranja.

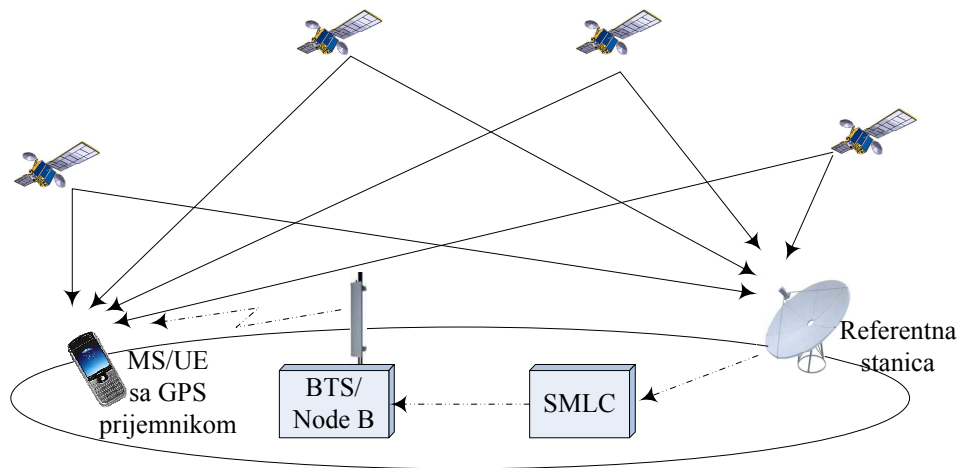
Imajući u vidu činjenicu da GPS ima globalno pokrivanje i visoku tačnost, kao logična se nametnula ideja o mogućoj primeni GPS za potrebe pozicioniranja korisnika u ćelijskim mrežama, odnosno, za potrebe LCS. Ipak, imajući u vidu FCC zahteve po pitanju LCS, GPS pokazuje vrlo ozbiljne nedostatke, kao što su loša energetska efikasnost, odnosno, velika potrošnja baterije GPS prijemnika, moguće veliko kašnjenje usled velike vrednosti TTF (Time To First Fix), kao i loša dostupnost, naročito u *indoor* okruženju. Sa druge strane, GPS je samostalan sistem za

pozicioniranje i ne poseduje nikakvu mogućnost korišćenja za potrebe komunikacije. U cilju da se iskoristi dobra tačnost GPS sistema u pogledu pozicioniranja, a da se istovremeno izbegnu prethodno pomenuti problemi, nastala je ideja o integraciji GPS sistema i ćelijskih mreža, koja je proizvela novu, satelitsko-ćelijsku metodu pozicioniranja, A-GPS.

Osnovna ideja A-GPS metode pozicioniranja je formiranje tzv. GPS referentne mreže. Alternativni naziv ove mreže je *wide-area DGPS (Differential GPS)* mreža. Lokacija GPS referentne mreže unutar postojeće ćelijske mreže birana tako da je uvek obezbeđena optička vidljivost prijemnika referentne mreže i satelita koji se u tom trenutku nalaze iznad tog dela zemljine kugle. Ova mreža je povezana sa ćelijskom mrežom, a zadatak joj je da kontinualno nadgleda stanje konstelacije i obezbeđuje pomoćne podatke za potrebe pozicioniranja kao što su gruba lokacija mobilne stanice (najčešće je to lokacija servisne bazne stanice), vidljivost satelita, *ephemeris* korekcije, korekcije vremena kao i *Doppler*-ov pomeraj. Za potrebe A-GPS metode pozicioniranja nije neophodno da se svaka ćelija opremi sopstvenom referentnom mrežom. Umesto toga, jedna referentna mreža dovoljna je za pokrivanje područja poluprečnika od oko 200km [90]. Osim izmena na nivou mreže, A-GPS metoda zahteva i izmene na nivou mobilne stanice, koja mora biti opremljena GPS prijemnikom (ili GPS senzorom). Kada se javi zahtev za pozicioniranjem, pomoćni podaci koje obezbeđuje GPS referentna mreža se dostavljaju GPS prijemniku (senzoru) u okviru ciljane mobilne stanice, što omogućava brzi odziv kao i veću osetljivost samog prijemnika. Vreme akvizicije se znatno smanjuje obzirom da je lista dostupnih satelita već poznata GPS prijemniku mobilne stanice zahvaljujući predikciji prijemnika referentne mreže. Posledično, smanjuje se i potrošnja baterije mobilne stanice. Kada GPS prijemnik integrisan u okviru ciljane mobilne stanice prikupi signale sa dostupnih satelita, izmerena pseudo-rastojanja se dostavljaju u SMLC (GSM), RNC ili SAS (UMTS) ili E-SMLC (LTE) gde se vrši proračun konačne lokacije mobilne stanice, ili se proračun lokacije vrši u okviru same mobilne stanice. Za dodatno smanjenje vremena akvizicije ali i povećanje tačnosti pozicioniranja, osim pomenutih, mobilnoj stanici tj. GPS prijemniku u okviru nje, mogu se dostavljati i dodatni pomoćni parametri kao što su DGPS korekcije, *almanac* podaci, jonosfersko kašnjenje i UTC ofset. Princip rada A-GPS metode pozicioniranja prikazan je na slici 8.12 [2].

Kao i u slučaju E-OTD metode u GSM i OTDOA u UMTS i LTE, A-GPS se može realizovati kao *mobile-based* ili *mobile assisted* rešenje.

Mobile-assisted A-GPS pristup odlikuje se time što se konačna lokacija ne računa u okviru same mobilne stanice, već se tradicionalna GPS funkcija proračuna pozicije prepušta ćelijskoj mreži. Da bi podržala *mobile-assisted* A-GPS mod rada, mobilna stanica mora biti opremljena tzv. GPS senzorom, što obuhvata antenu, odgovarajući RF modul kao i digitalni procesor za proračun pseudo-rastojanja. Na osnovu pomoćnih podataka koje dobija od referentne mreže, GPS senzor računa pseudo-rastojanja koja zatim prosleđuje u SMLC (GSM), RNC ili SAS (UMTS) ili E-SMLC (LTE) gde se i vrši konačan proračun lokacije. Radi povećanja tačnosti, na proračunata pseudo-rastojanja ili konačnu poziciju mogu se dodati i DGPS korekcije, i to se takođe vrši u okviru pomenutih mrežnih elemenata.



Slika 8.12. A-GNSS (A-GPS).

Mobile-based A-GPS pristup, za razliku od *mobile-assisted* A-GPS, zahteva instalaciju kompletnog GPS prijemnika u okviru mobilne stanice. Razlog je taj što se u okviru *mobile-based* pristupa u okviru mobilne stanice vrši i konačni proračun lokacije. Scenario je isti kao u slučaju *mobile-assisted* A-GPS pristupa, samo što se proračunata pseudo-rastojanja ne prosleđuju mreži, već ih koristi sama mobilna stanica kako bi proračunala sopstvenu poziciju. Takođe, radi povećanja tačnosti, i ovde se mogu koristiti i DGPS korekcije koje obezbeđuje referentna mreža.

A-GPS metoda pozicioniranja imaju najbolju tačnost u odnosu na ostale metode pozicioniranja. Greška pozicioniranja je najmanja u ruralnim oblastima, i iznosi oko 10m, dok u urbanim zonama dolazi do izražaja problem senki naročito između visokih zgrada, pa raste i greška pozicioniranja. Kašnjenje A-GPS metode se procenjuje na do 10s. Priraštaj opterećenja A-GPS metode zavisi od toga da li je primenjena *mobile-based* ili *mobile-assisted* varijanta. Generalno, *mobile-based* rešenje zahteva manje signalizaciono, ali veće računarsko opterećenje (na strani mobilne stanice). Iako je dugo važno da ozbiljan nedostatak ove metode predstavljaju neophodne i softverske i hardverske izmene u okviru mobilne stanice, u novije vreme sve veći broj proizvođača mobilnih terminala se odlučuje da već i standardni terminali sadrže implementiran GPS prijemnik.

Literatura

- [1] The FCC, "Fact Sheet—FCC Wireless 911 Requirements," FCC, January 2001.
- [2] A. Küpper, "Fundamentals of Positioning in Location-based Services: fundamentals and operation," *John Wiley & Sons*, Chichester, United Kingdom, 2005.
- [3] 3GPP TS 23.271. *Location Services (LCS) Service description*.
- [4] J. Figueiras, S. Frattasi, "Mobile Positioning and Tracking - From Conventional to Cooperative Techniques," *John Wiley & Sons*, Chichester, United Kingdom, 2010.
- [5] "Positioning with LTE," *Ericsson White Paper*, September 2011.
- [6] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 11, pp.116-130, 2009.
- [7] Federal Communications Commission (FCC), "Wireless E911 Location Accuracy Requirements," FCC 14-13, PS Docket No. 07-114, March 2014.
- [8] Federal Communications Commission (FCC), "Wireless E911 Location Accuracy Requirements," Fourth Report and Order. FCC 15-9, PS Docket No. 07-114, February 2015.
- [9] Coordination Group on Access to Location Information for Emergency Services (CGALIES), "Final report. Report on implementation issues related to access to location information by emergency services (E112) in the European Union," 2002.
- [10] MOVIES project, "Location Service Study Report D.2.3.1, for European Commission," 2002.
- [11] S.Y. Seidel, T.S. Rappaport, S. Jain, M.L. Lord, R. Singh, "Path loss, scattering, and multipath delay statistics in four European cities for digital cellular and microcellular radiotelephone," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, No 4, pp. 721-730, November 1991.
- [12] T.S. Rappaport, "Wireless Communications Principles and Practice," Second Edition. *Prentice Hall*, 2001.

- [13] B.Sklar, "Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems .I. Characterization," *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, No 7, pp. 90-100, July 1997.
- [14] M.L. Dukuć, "Principi telekomunikacija," *Akademski Misao*, 2008.
- [15] T. Wigren, "Fingerprinting localisation using round trip time and timing advance," *IET Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 419-427, 2012.
- [16] J. Wennervirta and T. Wigren, "RTT positioning field performance," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 7, pp. 3656-3661, 2010.
- [17] 3GPP TS 05.10, *GSM/EDGE Radio Access Network, Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio subsystem synchronization*.
- [18] M. Simić, P. Pejović, "A comparison of three methods to determine mobile station location in cellular communication systems," *European Transactions on Telecommunications*, no. 8, vol. 20, pp. 711-721, December 2009.
- [19] K. Yu, I. Sharp and Y. J. Guo, "Ground-Based Wireless Positioning," *John Wiley & Sons*, Chichester, United Kingdom, 2009.
- [20] C. Drane, M. Macnaughtan, G. Scott, "Positioning GSM Telephones," *IEEE Communication Magazine*, vol. 36, No 4, pp. 46-54, 59, April 1998.
- [21] Y. Zhao, "Standardization of mobile phone positioning for 3G systems," *IEEE Communication Magazine*, vol. 40, no. 7, pp. 108-116, July 2002.
- [22] G. Sun, J. Chen, W. Guo, K.J.R. Liu, "Signal processing techniques in network-aided positioning—A survey of state-of-the-art positioning designs," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, No 4, pp. 12-23, July 2005.
- [23] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 37, no. 6, pp. 1067-1080, 2007.
- [24] M. H. Vahidnia, M. R. Malek, N. Mohammadi, and A. A. Alesheikh, "A hierarchical signal-space partitioning technique for indoor positioning with WLAN to support locationawareness in mobile map services," *Wireless Personal Communications*, vol. 69, no. 2, pp. 689-719, 2013.
- [25] L. Chen, L. Pei, H. Kuusniemi, Y. Chen, T. Kröger, and R. Chen, "Bayesian fusion for indoor positioning using bluetooth fingerprints," *Wireless Personal Communications*, vol. 70, no. 4, pp. 1735-1745, 2013.
- [26] S. S. Saab and Z. S. Nakad, "A standalone RFID indoor positioning system using passive tags," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58 , no. 5, pp. 1961-1970, 2011.

- [27] P. Müller, H. Wymeersch and R. Piché, "UWB positioning with generalized Gaussian mixture filters," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 13, no. 10, pp. 2406-2414, 2014.
- [28] K. Pahlavan, X. Li, and J. Makela, "Indoor geolocation science and technology," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 2, pp. 112-118, February 2002.
- [29] S.-H. Fang, T.-N. Lin and K.-C. Lee, "A novel algorithm for multipath fingerprinting in indoor WLAN environments," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 9, pp. 3579-3588, September 2008.
- [30] B. Li, J. Salter, A. G. Dempster, and C. Rizos, "Indoor positioning techniques based on wireless LAN," In *First IEEE International Conference on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications*, pp. 13-16. Sydney, Australia, 2006.
- [31] P. Bahl, V. N. Padmanabhan, and A. Balachandran, "Enhancements to the RADAR user location and tracking system," *Technical report*, Microsoft Research, 2000.
- [32] K. Kaemarungsi , P. Krishnamurthy, "Properties of Indoor Received Signal Strength for WLAN Location Fingerprinting," In *Proceedings of 1st Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems*, pp. 14-23, Boston, USA, 2004.
- [33] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, "RADAR: In-Building RF-based User Location and Tracking System," In *Proceedings of INFOCOM 2000*, vol. 2, pp. 775-784, Tel Aviv, Israel, 2000.
- [34] B. Ignjatović, B. Andjelinić, and M. Simić, "Impact of the user orientation on WLAN positioning based upon the access point with the strongest signal," In *Telecommunication in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS), 2013 11th International Conference on*, vol. 1, pp. 233-236, 2013.
- [35] M. Simic, P. Pejovic, "An Algorithm for Determining Mobile Station Location Based on Space Segmentation," *IEEE Communication Letters*, vol. 12, no. 7, pp. 499-501, 2008.
- [36] D. Manolakis, "Efficient solution and performance analysis of 3-D position estimation by trilateration," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, No 4, pp. 1239-1248, October 1996.
- [37] A. Bensky, "Wireless Positioning Technologies and Applications," *Artech House*, Boston, London, 2008.
- [38] M. Simić and P. Pejović, "Positioning in Cellular Networks," in *Cellular Networks - Positioning, Performance Analysis, Reliability*, A. Melikov, *InTech*, pp. 51-76, 2011.

- [39] D. Fox, J. Hightower, H. Kautz, L. LLiao, D. Patterson, "Bayesian techniques for location estimation," *Proceedings of UBIComp Workshop*, pp. 16-18, 2003.
- [40] T. Roos, P. Myllymäki, H. Tirri, "A statistical modeling approach to location estimation," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 1, No 1, pp. 59-69, January-March 2002.
- [41] P. Kontkanen, P. Myllymäki, T. Roos, H. Tirri, K. Valtonen, H. Wettig, "Topics in probabilistic location estimation in wireless networks," *15th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2004*, vol. 2, pp. 1052-1056, 5-8 September 2004.
- [42] M. Simić, P. Pejović, "A Probabilistic Approach to Determine Mobile Station Location with Application in Cellular Networks," *Annals of Telecommunications*, vol. 64, no. 9-10, pp. 639-649, May 2009.
- [43] M. Simić, P. Pejović "Deterministički pristup određivanju lokacije mobilnog korisnika u radio sistemima," *Tehnika-Elektrotehnika*, vol. 69, no. 5, pp. 810-817.
- [44] I. N. Bronshtein, K. A. Semendyayev, G. Musiol and H. Muehlig, "Handbook of Mathematics," *Springer*, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
- [45] M. D. Gillette and H. F. Silverman, "A linear closed-form algorithm for source localization from time-differences of arrival," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 15, no. 1, pp. 1-4, 2008.
- [46] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML GUIDE TO THE EXPRESSION OF UNCERTAINTY IN MEASUREMENT, *International Organization for Standardization*, Switzerland, 1993.
- [47] A. Papoulis, "Probability, random variables and stochastic processes," *McGraw Hill*, New York, 1991.
- [48] R. Zekavat, R. M. Buehrer, "Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances," *John Wiley & Sons*, New Jersey, 2011.
- [49] 3GPP TS 43.059. *GSM/EDGE Radio Access Network, Functional stage 2 description of Location Services (LCS) in GERAN*.
- [50] 3GPP TS 48.008. *Mobile Switching Centre — Base Station System (MSC–BSS) Interface; Layer 3 Specification*.
- [51] 3GPP TS 49.031. *Location Services (LCS); Base Station System Application Part LCS Extension (BSSAP-LE)*.
- [52] 3GPP TS 44.031. *Mobile Station (MS) – Serving Mobile Location Centre (SMLC) Radio Resource LCS Protocol (RRLP)*.
- [53] 3GPP TS 44.071. *Mobile Radio Interface Layer 3 Location Services (LCS) Specification*.

- [54] 3GPP TS 48.031. *Serving Mobile Location Centre — Serving Mobile Location Centre (SMLC — SMLC); SMLCPP Specification.*
- [55] 3GPP TS 44.035. *Broadcast Network Assistance for Enhanced Observed Time Difference (E-OTD) and Global Positioning System (GPS) Positioning Methods.*
- [56] 3GPP TS 23.041. *Technical Realization of Cell Broadcast Service (CBS).*
- [57] 3GPP TS 25.305. *Stage 2 Functional specification of UE positioning in UTRAN.*
- [58] 3GPP TS 25.331. *Radio Resource Control (RRC) Protocol Specification.*
- [59] 3GPP TS 25.430. *UTRAN Iub Interface; General Aspects and Principles.*
- [60] 3GPP TS 25.453. *UTRAN Iupc Interface PCAP Signaling.*
- [61] 3GPP TS 25.423. *UTRAN Iur Interface RNSAP Signalling.*
- [62] 3GPP TS 48.018. *General Packet Radio Service (GPRS); Base Station System (BSS) – Serving GPRS Support Node (SGSN); BSS GPRS Protocol (BSSGP).*
- [63] 3GPP TS 25.413. *UTRAN Iu Interface RANAP Signalling.*
- [64] 3GPP TS 29.002. *Mobile Application Part (MAP) Specification.*
- [65] 3GPP TS 36.305. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, Stage 2 functional description of UE positioning in E-UTRAN.*
- [66] S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, “LTE – The UMTS Long Term Evolution - From Theory to Practice,” 2nd ed., *John Wiley & Sons*, Chichester, United Kingdom, 2011.
- [67] M. Thorpe, M. Kottkamp, A. Rössler, J. Schütz, “LTE Location Based Services - Technology Introduction,” *Rohde & Schwarz White paper*, April 2013.
- [68] E. Trevisani, A. Vitaletti, “Cell-ID location technique, limits and benefits: an experimental study,” *Proceedings of 6th IEEE Workshop on WMCSA*, pp. 51–60, 2-3 December 2004.
- [69] J.H Reed, K.J. Krizman, B.D. Woerner, T.S. Rappaport, “An overview of the challenges and progress in meeting the E-911 requirement for location service,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 4, pp. 30–37, 59, April 1998.
- [70] M. A. Spirito, “On the accuracy of cellular mobile station location estimation,” *IEEE Transactions Vehicular Technology*, vol. 50, no. 3, pp. 674-685, May 2001.
- [71] W. Buchanan, J. Munoz, R. Manson, K. Raja, “Analysis and migration of location-finding methods for GSM and 3G networks,” *Proceedings of 5th IEE Int. Conference 3G Mobile Communications Technology*, pp. 352–358, 2004.

- [72] M. I. Silventoinen, T. Rantalainen, "Mobile station emergency locating in GSM," *Proceedings of IEEE International Conference on Personal Communications*, pp. 232–238, February 1996.
- [73] 3GPP TS 25.215. *UMTS; Physical layer; Measurements (FDD)*.
- [74] 3GPP TS 25.225. *UMTS; Physical layer; Measurements (TDD)*.
- [75] 3GPP TS 25.133. *UMTS; Requirements for support of radio resource management (FDD)*.
- [76] J. Borkowski, J. Niemelä, J. Lempiäinen, "Performance of Cell ID+RTT Hybrid Positioning Method for UMTS Radio Networks," *Proceedings of 5th European Wireless Conference*, pp. 487-492, February 2004.
- [77] J. Borkowski, J. Niemälä, and J. Lämpäinen, "Enhanced Performance of Cell ID+RTT by Implementing Forced Soft Handover Algorithm," *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 5, pp. 3545–3549, 26-29 September 2004.
- [78] 3GPP TR 25.853. *UMTS; Technical Specification Group Radio Access Network; Delay Budget within the Access Stratum*.
- [79] C. Johnson, H. Joshi, J. Khaleb, "WCDMA radio network planning for location services and system capacity," *Proceedings of International Conference on 3G Mobile Communications Technologies*, pp. 340-344, May 2002.
- [80] 3GPP TSG-RAN WG1 doc. no R1-040567. *Expected performance of OTDOA-IPDL positioning - initial indications based on live measurements*, 2004.
- [81] 3GPP TSG-RAN WG1 doc. no R1-99b79. *Time Aligned IP-DL positioning technique*, 1999.
- [82] B. Ludden, L. Lopes, "Cellular based location technologies for UMTS: a comparison between IPDL and TA-IPDL," *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 2, pp. 1348-1353, May 2000.
- [83] 3GPP TSG-RAN WG1 doc. no R1-00-1186. *Initial Simulation Results of the OTDOA-PE positioning method*, 2000.
- [84] S. Kim, Y. Jeong, C. Lee, "Interference-cancellation based IPDL method for position location in WCDMA systems," *Transactions on Vehicular Technology*, vol. 54, issue 1, pp. 117-126, January 2005.
- [85] P. J. Duffett-Smith, M. D. Macnaughtan, "Precise UE positioning in UMTS using cumulative virtual blanking," *Proceedings of International Conference on 3G Mobile Communication Technologies*, pp. 355-359, May 2002.
- [86] 3GPP TS25.211. *Physical channels and mapping of transport channels onto physical channels (FDD)*.

[87] S. Fischer, "Observed time difference of arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE," *Qualcomm White Paper*, 2014.

[88] "An overview of LTE positioning," *Spirent White Paper*, February 2012.

[89] 3GPP TSG-RAN WG1 doc. no RP-040164. *Inclusion of Uplink TDOA UE positioning method in the UTRAN specifications*, 2004.

[90] 3GPP TR 25.850. *UE positioning in UTRAN Iub/Iur protocol aspects*.