

# Eksperimentalna analiza blizinskih i lateracionih metoda pozicioniranja korisnika u urbanom okruženju

Mirjana Simić, Predrag Pejović  
Elektrotehnički fakultet  
Beograd, Srbija  
mira@etf.rs, peja@etf.rs

Darko Šuka  
Elektrotehnički fakultet  
Istočno Sarajevo, Republika Srpska, BiH  
darko.suka@etf.unssa.rs.ba

Milan Bjelica, Milica Mihailović  
Elektrotehnički fakultet  
Beograd, Srbija  
milan@etf.rs, milica\_mih@hotmail.com

*Sadržaj* — U ovom radu izvršena je analiza blizinskih i lateracionih metoda pozicioniranja mobilnog korisnika u urbanom okruženju. Rad obuhvata merenja u mobilnoj mreži u cilju prikupljanja neophodnih podataka za potrebe pozicioniranja, primenu odgovarajućih algoritama u cilju realizacije svake od pomenutih metoda pozicioniranja, kao i uporednu analizu rezultata pozicioniranja svih primenjenih metoda pozicioniranja. Merenja su izvršena u GSM (*Global System for Mobile Communications*) mreži na teritoriji grada Beograda (u centralnim zonama grada). Rezultati rada daju koristan uvid u performanse različitih metoda pozicioniranja, kao i sugestije za izbor najpogodnije metode u urbanom tipu okruženja.

*Ključne riječi* - GSM, pozicioniranje; Cell-ID; centroid; cirkularna lateracija; hiperbolička lateracija;

## I. UVOD

Problem određivanja lokacije (pozicioniranja) korisnika u radio sistemima ne gubi na svojoj aktuelnosti još od prvih dana kada se javila potreba za poznavanjem lokacije mobilnog korisnika unutar ovih sistema. Ideja o lociranju korisnika u radio mrežama počinje u okviru ćelijskih radio mreža. Nastala je u Sjedinjenim Američkim Državama 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. 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. Bez obzira na aktuelnost, razvoj metoda za određivanje lokacije korisnika u radio sistemima u poslednjih petnaestak godina bio je sporiji nego što se to očekivalo. Najveći problem predstavljaju dva oprečna zahteva:

(a) ostvarivanje zadovoljavajuće tačnosti određivanja lokacije (od 10m do 500m u zavisnosti od tipa okruženja i primenjenog rešenja [1]) i (b) korišćenje postojeće mrežne infrastrukture i terminala, bez dodatnih modifikacija. Dakle, cilj je ostvariti zadovoljavajuću tačnost pozicioniranja sa što jednostavnijom metodom pozicioniranja. 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 blizinskom lociranju u ćelijskim radio mrežama kao što su Cell-ID (*Cell Identification*) [2] i centroid [3], jednostavne su za implementaciju, ali nemaju zadovoljavajuću tačnost. Neke tehnike pozicioniranja lokacije mobilne stanice određuju merenjem parametara signala kao što su vreme, nivo signala na prijemu ili ugao, tj. baziraju se na primeni principa lateracije i/ili angulacije [4]. U ovom radu su analizirane Cell-ID i centroid tehnike kao predstavnici blizinskih metoda i cirkularna i hiperbolička lateracija kao predstavnici lateracionih metoda pozicioniranja. Najpre su izvršena merenja u cilju prikupljanja svih neophodnih parametara za primenu svake od navedenih metoda, zatim su realizovani algoritmi svake od metoda u cilju određivanja lokacije mobilne stanice. Na kraju je izvršena uporedna analiza svih analiziranih metoda i doneti zaključci po pitanju pogodnosti za primenu svake od metoda. Zaključci ovog rada odnose se na urbano okruženje, gde su merenja i sporevedena.

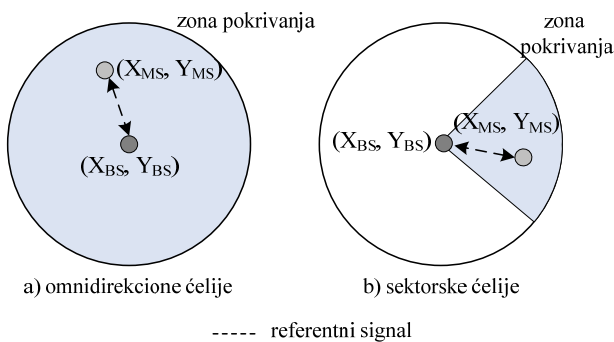
## II. METODE POZICIONIRANJA

Kao što je rečeno, u okviru rada analizirane su Cell-ID i centroid kao predstavnici blizinskih metoda, i cirkularna i hiperbolička lateracija kao predstavnici lateracionih metoda.

### A. Cell-ID

Cell-ID metoda pozicioniranja se zasniva na *proximity sensing* principu, odnosno na identifikaciji najbližeg predajnika poznatih koordinata (bazne stanice) [5]. Ovo je najjednostavnija i najrasprostranjenija metoda pozicioniranja. Alternativni nazivi ove metode su 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. Tačnost Cell-ID metode pozicioniranja zavisi od: tačnosti geografskih koordinata baznih stanica u bazi podataka operatora, veličine servisne ćelije (zapravo od tipa okruženja), tipa ćelije (omnidirekcionne, sektorske). 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. Dominantniji uticaj na tačnost Cell-ID metode ima veličina ćelije, odnosno, tip okruženja u kojem se nalazi bazna stanica. Ova metoda daje lošu (u ruralnim oblastima) do umerenu tačnost (u urbanim oblastima). Dodatno, ionako skromna tačnost može biti dalje smanjena imajući u vidu da, zbog uslova propagacije, servisna ćelija (bazna stanica) ne mora uvek biti ona ćelija koja je najbliža mobilnoj stanici čija se lokacija određuje. Naime, zbog NLOS (*Non-Line-Of-Sight*) propagacije, razlika u snagama predajnika koji pokrivaju određene ćelije, kao i zbog samog algoritma selekcije ćelija i saobraćaja u mreži, može se desiti da servisna bazna stanica (ćelija) ne bude i najbliža bazna stanica. Eksperimentalna istraživanja pokazuju da u 43% slučajeva u urbanom okruženju mobilnu stanicu zaista ne opslužuje najbliža bazna stanica [6]. Srednja vrednost razlike u udaljenosti između mobilne i najbliže bazne stanice i mobilne i servisne bazne stanice (u slučaju kada servisna bazna stanica nije i najbliža bazna stanica) iznosi 90m. Ista istraživanja pokazuju da je u ruralnim i suburbanim područjima, kao i na auto-putevima, servisna bazna stanica češće i najbliža bazna stanica, nego u urbanim zonama. Najzad, na tačnost Cell-ID metode pozicioniranja utiče i tip ćelije (omnidirekciona ili sektorska ćelija). Iako je u oba slučaja neodređenost, tj. maksimalna greška pozicioniranja ista i zavisi od poluprečnika ćelije, oblasti u kojima se korisnik nalazi se razlikuju po obliku. U slučaju sektorske ćelije, oblast u kojoj se korisnik nalazi je kružni isečak, čija površina predstavlja deo površine kruga koji se dobija kao oblast u slučaju omnidirekcionne ćelije, što je prikazano na Sl. 1.



Slika 1. Cell-ID

Dobra strana Cell-ID metode je da ova metoda pozicioniranja ima vrlo visoku dostupnost unutar mreže, obzirom da je za rad ove metode potreban radio kontakt samo sa jednom baznom stanicom. Ipak, kao što je rečeno, Cell-ID metoda ima lošu tačnost, a zbog zavisnosti tačnosti i od okruženja, Cell-ID metoda pozicioniranja nema ni dobar parametar konzistencije. Zbog svega rečenog, Cell-ID metoda se najčešće koristi kao

alternativna metoda pozicioniranja, kada neka od preciznijih metoda pozicioniranja, pod nekim okolnostima, ne bude primenjiva.##

### B. Centroid

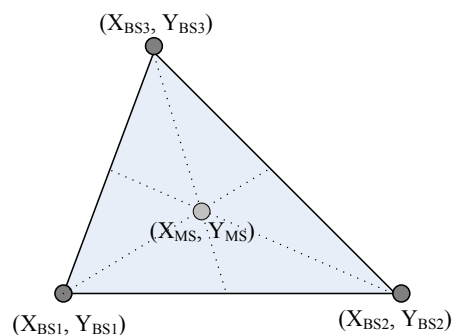
Centroid metoda je metoda pozicioniranja koja koristi položaj referentnih tačaka (baznih stanica) za procenu položaja mobilne stanice. Ova metoda pozicioniranja procenjuje poziciju mobilne stanice na osnovu poznavanja lokacija baznih stanica, koje mobilna stanica može da "vidi" sa neke tačke čija se lokacija procenjuje. Postoje različite varijante centroid metode (srednje kvadratna centroid metoda, aritmetički centroid, itd.), ali će se u svrhe ove eksperimentalne analize koristiti najčešća i najjednostavnija varijanta centroid metode zasnovana na proračunu aritmetičke sredine [3]. Ovaj algoritam izračunava aritmetičku sredinu koordinata svih baznih stanica sa kojih mobilna stanica može da očitava nivo signala (sve bazne stanice u okviru *measurement report*) [7]. Pod pretpostavkom da mobilna stanica detektuje signal sa  $N$  baznih stanica čije su koordinate  $(x_{BSk}, y_{BSk})$ , procenjena lokacija mobilne stanice  $(x_{MS}, y_{MS})$  prema osnovnoj centroid metodi pozicioniranja računa se kao:

$$x_{MS} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_{BSk} \quad (1)$$

$$y_{MS} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y_{BSk} \quad (2)$$

Na Sl. 2 dat je prikaz centroid metode sa tri vidljive bazne stanice.

Dok se kod klasičnog centroid metoda usrednjavaju koordinate baznih stanica koje je mobilni terminal u mogućnosti da detektuje, postoji i alternativni slučaj koji predstavlja unapređenje, a zasniva se na dodeljivanju težinskih faktora vidljivih baznih stanica. Generalno, osnovna centroid metoda predstavlja specijalan slučaj centroid metode sa težinskim koeficijentima (WCL - *Weighted Centroid Localization*), kod koje su težinski faktori za vidljive bazne stanice jednaki jedinici [8].



Slika 2. Centroid

Kod WCL metode, koordinate se množe težinskim faktorima  $w_i$ , koji zavise od rastojanja između mobilne i baznih stanica i tako utiču na tačnost pozicioniranja. Težinski faktori računaju se kao:

$$x_{MS} = \frac{\sum_{k=1}^N w_k x_{BSk}}{\sum_{k=1}^N w_k} \quad (3)$$

$$y_{MS} = \frac{\sum_{k=1}^N w_k y_{BSk}}{\sum_{k=1}^N w_k} \quad (4)$$

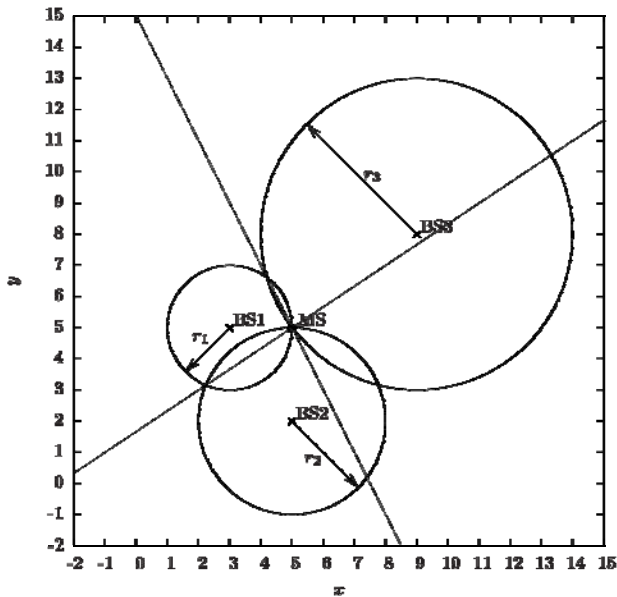
Težinski koeficijenti  $w_k$  su obrnuto proporcionalni rastojanju između bazne i mobilne stanice  $d_k$ , tj.

$$w_k = \frac{1}{d_k^h} \quad (5)$$

Koeficijent  $h$  određuje stepen uticaja baznih stanica na lokaciju mobilne stanice, pri čemu se u literaturi često koristi slučaj  $h = 1$ .

### C. 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,  $BS_k$ ,  $k \in \{1, \dots, N\}$ ,  $N \geq 3$ . Kao i do sada, podrazumeva se da su koordinate baznih stanica  $(x_{BSk}, y_{BSk})$  poznate. Na Sl. 3 dat je primer cirkularne lateracije u kojem učestvuju tri bazne stanice, pri čemu su poznata rastojanja  $r_k$  između mobilne stanice (MS) čija se lokacija određuje i baznih stanica (BS).



Slika 3. Cirkularna lateracija

Minimalni sistem jednačina za cirkularnu lateraciju je:

$$(x_{MS} - x_{BSk})^2 + (y_{MS} - y_{BSk})^2 = r_k^2 \quad (6)$$

za  $k \in \{1, 2, 3\}$ . Ovaj sistem jednačina je nelinearan. U skladu sa geometrijskom interpretacijom prikazanoj na Sl. 3, svaka od jednačina (6) 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 mobilna stanica obezbeđuje treća bazna stanica koja konačno određuje koja od ove dve presečne tačke je lokacija mobilne stanice. 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 mobilna stanica locirane na istoj liniji, što rezultira tangentnim kružnicama. U ovom slučaju za određivanje lokacije mobilne stanice 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. Nelinearni sistem jednačina (6) može se transformisati u linearni sistem jednačina [9] primenom algebarskih transformacija:

$$\begin{bmatrix} x_{BS1} - x_{BS2} & y_{BS1} - y_{BS2} \\ \vdots & \vdots \\ x_{BS1} - x_{BSn} & y_{BS1} - y_{BSn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{MS} \\ y_{MS} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} r_2^2 - r_1^2 + x_{BS1}^2 - x_{BS2}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BS2}^2 \\ \vdots \\ r_n^2 - r_1^2 + x_{BS1}^2 - x_{BSn}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BSn}^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Rešavanje linearizacijom izbegava primenu složenih metoda za rešavanje nelinearnih jednačina, kao i probleme usled neodređenosti rešenja u slučaju kada se preseki kružnica ne poklapaju. Sistem jednačina (7) se može pisati u matricnoj formi:

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} x_{MS} \\ y_{MS} \end{bmatrix} = \mathbf{b} \quad (8)$$

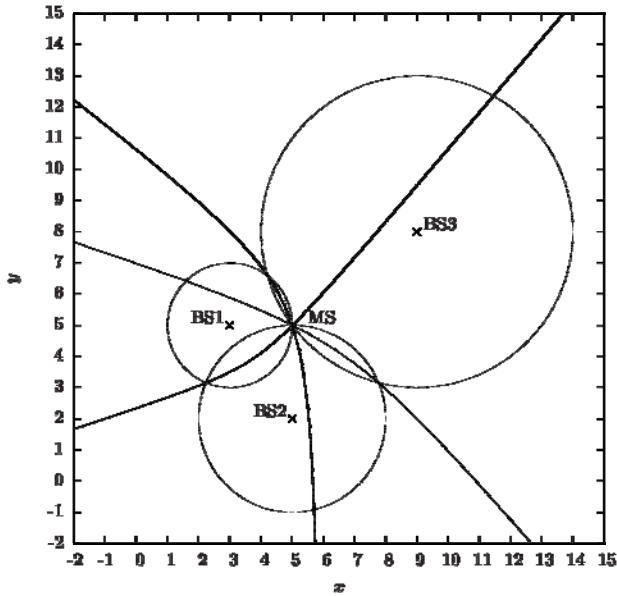
gde se matrica  $\mathbf{A}$  naziva sistemskom matricom (matrica koeficijenata), dok je  $\mathbf{b}$  tzv. *right-hand-side* vektor (vektor slobodnih članova). Za  $N > 3$ , sistem se može rešiti metodom najmanjih kvadrata [10] formirajući kvadratni sistem

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \begin{bmatrix} x_{MS} \\ y_{MS} \end{bmatrix} = \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (9)$$

### D. 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 mobilne stanice 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 mobilne stanice i ovih baznih stanica. Kao i do sada, podrazumeva se da su koordinate baznih stanica  $(x_{BSk}, y_{BSk})$  poznate. Na Sl. 4 dat je primer hiperboličke lateracije u kojoj učestvuju iste bazne stanice, kao i u primeru cirkularne lateracije (Sl. 3). Za razliku od cirkularne lateracije, sada su poznate razlike rastojanja između mobilne stanice i

baznih stanica,  $l_k = l_{k,1} = r_k - r_1$ , gde su  $r_k$  procenjena rastojanja između mobilne stanice MS i bazne stanice  $BS_k$ , kako je definisano u slučaju cirkularne lateracije. Sa Sl. 4 se može primetiti da je geometrijsko mesto tačaka konstantne razlike rastojanja između mobilne stanice i dve bazne stanice hiperbola, otuda i naziv hiperbolička lateracija. Takođe, 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 (Sl. 3).



Slika 4. Hiperbolička lateracija

Računanje lokacije mobilne stanice metodom hiperboličke lateracije svodi se na traženje preseka prethodno definisanih hiperbola. Ovo se može rešiti direktno, tj. rešavanjem sistema nelinearnih jednačina. 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 i ovaj problem je moguće redukovati na sistema linearnih jednačina [11], slično kao u slučaju cirkularne lateracije. Sistem u ovom slučaju ima oblik:

$$\begin{bmatrix} x_{BS1} - x_{BS2} & y_{BS1} - y_{BS2} & -l_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{BS1} - x_{BSn} & y_{BS1} - y_{BSn} & -l_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{MS} \\ y_{MS} \\ r_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} d_2^2 + x_{BS1}^2 - x_{BS2}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BS2}^2 \\ \vdots \\ d_n^2 + x_{BS1}^2 - x_{BSn}^2 + y_{BS1}^2 - y_{BSn}^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

i za  $N > 4$ , rešava se metodom najmanjih kvadrata (9).

### III. EKSPERIMENTALNA ANALIZA

U cilju poređenja blizinskih (Cell-ID i centroid) i lateracionih (cirkularna i hiperbolička lateracija) metoda, izvršena je eksperimentalna analiza pozicioniranja primenom svake od

pomenutih metoda. Eksperimentalna analiza najpre obuhvata merenja koja su obavljena na teritoriji užeg centra grada Beograda. Cilj ovih merenja je prikupljanje svih radio parametara neophodnih za primenu analiziranih metoda pozicioniranja. Dalje su na osnovu poznatih koordinata baznih stanica i izmerenih radio parametara primenjeni algoritmi za procenu nepoznate lokacije mobilne stanice za sve četiri metode pozicioniranja. Na kraju su upoređene greške pozicioniranja za sve metode pozicioniranja i doneti zaključci o pogodnostima za primenu svake metode u urbanom tipu okruženja. Merni instrumenti pomoću kojih su vršena merenja su: mobilni telefon NOKIA za očitavanje neophodnih radio parametara i GPS uređaj za očitavanje tačne lokacije mobilne stanice. Mobilni telefon je bio opremljen posebnim softverom (*Net Monitor*), koji je vršio identifikaciju servisne bazne stanice i očitavao nivoe signala sa servisne i do 6 susednih baznih stanica. Kako su Cell-ID i centroid metoda tzv. *range-free* metode (za njihovu primenu nije potrebna procena rastojanja između mobilne i bazne stanice), jedini podaci koje ove metode zahtevaju bili su identifikacija servisne i susednih baznih stanica. Podrazumeva se da su koordinate svih baznih stanica poznate. Sa druge strane, cirkularna i hiperbolička lateracija u cilju primene zahtevaju procenu rastojanja (cirkularna lateracija) ili razlike rastojanja (hiperbolička lateracija) između mobilne i baznih stanica. Procene rastojanja/razlike rastojanja dobijane su na osnovu izmerenih nivoe signala sa servisne i susednih baznih stanica i primenom odgovarajućeg modela propagacije. U ovoj analizi korišćen je jedan od najčešćih i najjednostavnijih modela propagacije, u kojem je veza snage signala na prijemu  $P_r(r_k)$  i rastojanja  $r_k$  data preko:

$$P_r(r_k) = P_r(r_0) \left( \frac{r_0}{r_k} \right)^n \quad (11)$$

gde je  $r_0$  tzv. referentno rastojanje (tačka u dalekom polju antene),  $P_r(r_0)$  snaga na referentnom rastojanju  $r_0$ , dok je  $n$  tzv. *path-loss* eksponent koji zavisi od tipa okruženja u kojem se odvija propagacija. Snaga na referentnom rastojanju  $P_r(r_0)$  se dobija merenjem ili pretpostavkom da je do referentnog rastojanja  $r_0$  propagacija kao u slobodnom prostoru, što je u praksi najčešće i opravdana pretpostavka. Dakle, za procenu  $P_r(r_0)$  koristi se izraz:

$$P_r(r_0) = P_T G_T G_R \left( \frac{\lambda}{4\pi r_0} \right)^2 \quad (12)$$

gde je  $P_T$  snaga predajnika bazne stanice,  $G_T$  dobitak predajne antene,  $G_R$  dobitak prijemne antene, a  $\lambda$  radna talasna dužina (za GSM:  $\lambda \approx 0.33$  m). Kako nisu postojali podaci o snagama predajnika svake bazne stanice, kao i dobitcima predajnih antena, korišćene su najčešće vrednosti ovih parametara, tj. uzeto je da je  $P_T G_T = 100$  W, dok je, obzirom da je u pitanju mobilni telefon,  $G_R = 1$ . Referentno rastojanje iznosi  $r_0 = 100$  m, a obzirom na tip okruženja, uzeto je da je  $n = 4.5$ . Najzad, tražena procena rastojanja  $r_k$  na osnovu očitane snage signala  $P_r(r_k)$  neophodna za primenu lateracionih metoda je:

$$r_k = r_0 \sqrt{\frac{P_r(r_0)}{P_r(r_k)}} \quad (13)$$

Ovako dobijene procene rastojanja između mobilne stanice i baznih stanica koriste se za procenu lokacije mobilne stanice primenom (7) i (10). Sa poznatom procenjenom lokacijom mobilne stanice  $(x_{MS}, y_{MS})$  dobijene primenom bilo koje od pomenutih metoda pozicioniranja i tačnom lokacijom mobilne stanice dobijene očitavanjem GPS prijemnika  $(x_{GPS}, y_{GPS})$ , greška pozicioniranja računa se kao:

$$err = \sqrt{(x_{GPS} - x_{MS})^2 + (y_{GPS} - y_{MS})^2} \quad (14)$$

#### IV. REZULTATI

Kao što je rečeno, merenja su vršena u centralnim zonama grada Beograda, dakle, u gusto urbanom okruženju. U ovakvom okruženju, raspored i broj baznih stanica češće je određen zahtevima za kapacitetom umesto za pokrivanjem, pa su ovo okruženja sa velikom gustinom baznih stanica. Stoga, treba naglasiti da se rezultati i zaključci koji slede odnose samo na ovakav tip okruženja, gde su merenja i vršena. Iako su merenja vršena na znatno većem broju lokacija, analiza rezultata koja sledi obuhvata 40 mernih lokacija. Razlog je taj što metoda cirkularne lateracije zahteva minimalno tri, a hiperboličke četiri bazne stanice, pa je stoga analiza vršena na lokacijama gde je vidljivo bar četiri bazne stanice, kako bi se moglo izvršiti adekvatno poređenje rezultata.

Prvo je izvršena analiza rezultata dobijenih za Cell-ID metodu. Srednja greška pozicioniranja primenom Cell-ID metode iznosi 249 m. Minimalna greška pozicioniranja iznosi svega 36 m, što je obzirom na minimalne zahteve ove metode odličan rezultat. Sa druge strane, maksimalna greška pozicioniranja iznosi 906 m, što je na prvi pogled neočekivano velika greška, imajući u vidu veliku gustinu baznih stanica u centru grada. Međutim, kao što je već rečeno, servisna bazna stanica ne mora uvek biti ona koja je najbliža mobilnoj stanici čija se lokacija određuje. Detaljnijom analizom lokacije sa najvećom greškom pozicioniranja, tj. uzimanjem u obzir koordinata svih vidljivih baznih stanica i računanjem greške pozicioniranja za svaku od njih, zaista se potvrđuje prethodna pretpostavka. Dobija se najveća greška pozicioniranja baš za servisnu baznu stanicu, tj. ta bazna stanica je fizički najudaljenija od lokacije mobilne stanice, pa otuda i ovolika greška pozicioniranja.

Za ostale metode pozicioniranja, u Tabeli I, dati su proračuni grešaka za različit broj baznih stanica koje učestvuju u pozicioniranju. U slučaju centroid metode minimalno 2, cirkularne lateracije minimalno 3 i u slučaju hiperboličke lateracije minimalno 4 bazne stanice.

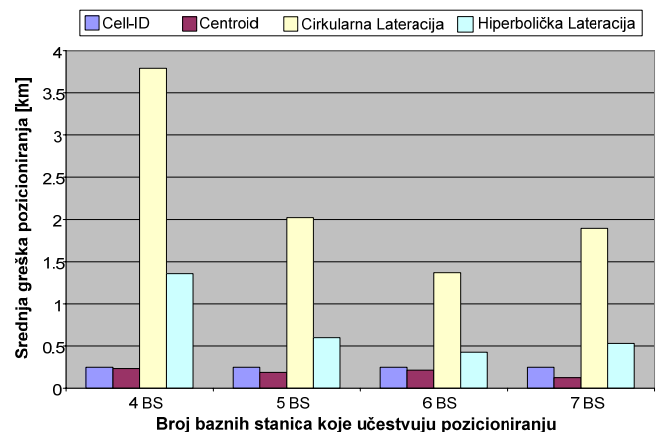
TABELA I. GREŠKE POZICIONIRANJA

Broj baznih stanica	Greška pozicioniranja [km], <i>err</i>		
	Centroid	Cirkularna lateracija	Hiperbolička lateracija
2	0.236	/	/
3	0.231	5.925	/
4	0.232	3.789	1.356
5	0.186	2.02	0.599
6	0.213	1.367	0.426
7	0.125	1.894	0.529

Na osnovu rezultata iz Tabele I može se primetiti da srednja greška pozicioniranja primenom centroid metode uglavnom opada sa povećanjem broja baznih stanica koje ulaze u proračun. Ipak, postoje i odstupanja od opisanog trenda. Naime, centroid metoda pri svom proračunu lokacije koristi sve bazne stanice koje su "vidljive" mobilnoj stanici u trenutku pozicioniranja. To može u nekim situacijama predstavljati prednost ove metode, ali i manu, jer se korišćenjem koordinata bazne stanice koja se nalazi daleko od stvarne lokacije mobilne stanice unosi velika greška pozicioniranja, obzirom da u proračun ravnopravno ulaze bazna stanica koja se nalazi blizu mobilne stanice, kao i bazna stanica koja je znatno udaljena.

U slučaju cirkularne lateracije dobijaju se znatno veće greške pozicioniranja u odnosu i na Cell-ID i centroid metodu. Jedan od razloga za ovako loše rezultate pozicioniranja cirkularne lateracije je taj što način procene lokacije podrazumeva procenu rastojanja između bazne i mobilne stanice na osnovu izmerenog nivoa signala na prijemu. Ovaj parametar je jako osetljiv na *multipath* propagaciju i kao takav generalno vrlo nepouzdan za procenu rastojanja u postupku pozicioniranja, posebno u uslovima složene propagacije, kakva je prisutna u urbanom okruženju. Dodatno, formula (11) koja se koristi za izračunavanje rastojanja između mobilne stanice i bazne stanice je jednostavna, ali i nedovoljno tačna, jer se uticaj okruženja uzima samo preko eksponenta slabljenja,  $n$ , što takođe može biti uzrok većih grešaka pozicioniranja ove metode. Takođe, u ovoj formuli koriste se usvojene vrednosti snage baznih stanica i dobitaka predajnih antena, a ne tačne, što uzrokuje i loše procene rastojanja, a time i loše rezultate pozicioniranja. Najzad, može se primetiti da je u slučaju cirkularne lateracije greška pozicioniranja manja ukoliko više baznih stanica učestvuje u pozicioniranju. Izuzetak je slučaj sa svih 7 baznih stanica (kada se dobija veća greška u odnosu na slučaj sa 6 baznih stanica), a razlog može biti taj što je ovakvih lokacija na terenu bilo najmanje, pa sam uzorak nije dovoljno reprezentativan za konačne zaključke.

Najzad, hiperbolička lateracija pokazuje lošije rezultate u odnosu na Cell-ID i centroid, ali znatno bolje u odnosu na cirkularnu lateraciju. Jedan od uzroka grešaka hiperboličke lateracije svakako je primena parametra nivoa signala za procenu rastojanja, kao i kod cirkularne lateracije.



Slika 5. Srednja greška pozicioniranja blizinskih i lateracionih metoda u urbanom okruženju

Ipak, u slučaju hiperboličke lateracije ovaj problem je manje izražen, jer dolazi do poništavanja velikih grešaka nastalih primenom usvojenih, a ne tačnih vrednosti nekih parametara koji učestvuju u proceni rastojanja (snage i dobici predajnih antena baznih stanica). Do ovog poništavanja dolazi usled samog algoritma hiperboličke lateracije koji se bazira ne na rastojanjima, već na razlikama rastojanja između mobilne i baznih stanica. Na Sl. 5 dat je i grafički prikaz grešaka pozicioniranja za sve analizirane metode, pod ravnopravnim uslovima, što znači samo za isti broj baznih stanica koje učestvuju u pozicioniranju (minimalno 4).

#### V. ZAKLJUČAK

Rad se bavi eksperimentalnom analizom blizinskih i lateracionih metoda pozicioniranja u urbanom okruženju. Kao predstavnici blizinskih metoda analizirane su Cell-ID i centroid, dok su od lateracionih analizirane cirkularna i hiperbolička lateracija. Na osnovu dobijenih rezultata zaključuje se da najmanje greške pozicioniranja ima centroid metoda, a neznatno lošije Cell-ID metoda. Lateracione metode generalno ne bi bile dobar izbor u urbanom okruženju, pri čemu u međusobnom poređenju znatno bolje rezultate pozicioniranja ima hiperbolička lateracija. U konačnom zaključku, a na osnovu dobijenih rezultata tačnosti pozicioniranja, ali i zahteva samih metoda, optimalni izbor u urbanom okruženju bile bi Cell-ID ili centroid metoda, pri čemu bi autori prednost dali Cell-ID metodi zbog manjih zahteva i jednostavnosti na račun neznatno veće greške pozicioniranja.

#### 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," Wiley, Chichester, England, 2005.
- [3] J. Figuerias, S. Fratassi, "Mobile Positioning and Tracking - From Convencional to Cooperative Techniques," Wiley, Chichester, England, 2010.
- [4] M. Simić and P. Pejović, "Positioning in Cellular Networks" in Cellular Networks - Positioning, Performance Analysis, Reliability. A. Melikov, InTech, pp. 51-76, 2011.

- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 3GPP TS 05.08, release 1999 (v8.23.0), Radio subsystem link control, 2005. Available: [http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/05\\_series/05.08](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/05_series/05.08).
- [8] J. Blumenthal., R. Grossmann; F. Golasowski.; D. Timmermann, "Weighted centroid localization in zigbee-based sensor networks," IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, WISP 2007, pp. 1–6, 3-5 October 2007.
- [9] A. Bensky, "Wireless Positioning Technologies and Applications," Artech House, Boston, London, 2008.
- [10] I. N. Bronshtein, K. A. Semendyayev, G. Musiol and H. Muehlig, "Handbook of Mathematics," Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
- [11] 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.

#### ABSTRACT

In this paper, the analysis of proximity and lateration methods for mobile user positioning in an urban environment were performed. The work involves measurements in the mobile network in order to collect the data necessary for positioning purposes, the application of appropriate algorithms in order to implement each of these positioning methods and comparative analysis of the applied positioning methods. Measurements were performed in a GSM network in the city of Belgrade (in the central zones of the city). The results provide a valuable insight into performance of different positioning methods as well as suggestions for selecting the most appropriate method in urban environment.

#### EXPERIMENTAL ANALYSIS OF PROXIMITY AND LATERATION POSITIONING METHODS IN URBAN ENVIRONMENT

Mirjana Simić, Predrag Pejović, Darko Šuka,  
Milan Bjelica, Milica Mihailović