

Ugotavljanje položaja v sodobnih javnih mobilnih omrežjih

Boštjan Batagelj, Tomi Mlinar, Sašo Tomažič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Katedra za informacijske in komunikacijske tehnologije

E-pošta: bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Positioning in modern public mobile networks

Abstract. *The article deals with the possibilities of position determination in modern public mobile networks. The 2G network already knew cellular identification, which determined the user's position based on the coverage of a single sector of the base station. It worked everywhere, but its accuracy depended on the size of the cell or sector. Higher accuracy can already be achieved by measuring the strength of the received power, but this requires knowing the signal losses on the radio link. Based on this, the distance of the user from nearby base stations is estimated. Then, the position of the user is determined based on the intersection of the virtual circles formed by the calculated distance values around the base stations. Since the strength of the received power depends on the orientation of the user's device and the environment in which the user is located, the accuracy is good only when the user is in direct line of sight or near the base station. The Timing Advance function was already used with 2G, where the base station sends a command to the user's terminal based on which it sets the expected time delay when receiving a signal from the user.*

With 5G and 6G, it is expected that the user's position can be determined to within a meter or even a few centimeters. New technical solutions will be used, such as determining the angle of transmission and reception, measuring the signal propagation time across multiple cells, and measuring the time difference when user devices only receive signals, as is typical for a satellite navigation signal receiver. The latter method, in particular, allows users to determine their position without the network knowing, since it does not use network resources.

1 Uvod

Aktualna različica brezžičnih mobilnih javnih omrežij pete generacije (5G), ki po zmogljivosti več kot zadovoljuje zahteve sodobnih uporabnikov, poleg širokopasovne mobilnosti [1], povečane odzivnosti, stalne razpoložljivosti, povečane varnosti in ostalih izboljšav, prinaša še natančnejšo ugotavljanje položaja naprave ali uporabnikovega terminala. Mobilno omrežje 5G nam verjetno ne bo ponudilo vsega, kar smo od njega pričakovali, še posebno, če se bo gradilo v nesamostojnem načinu delovanja [2]. Veliko obljubljenega v 5G bo prinesla šele naslednja šesta generacija (6G), ki jo glede na razvoj dosedanjih petih generacij lahko pričakujemo okrog leta 2030.

Tehnologija 6G, ki naj bi bila po vseh parametrih boljša od predhodnih, se razvija predvsem za dobrobit človeštva. Služila bo tudi v spopadu s sodobnimi izzivi človeštva, kot so epidemije in naravne nesreče, saj bomo lahko spremljali, kako se ljudje gibljejo in reševali življenja tudi brez kršitve njihove zasebnosti.

Ugotavljanje položaja je ena ključnih lastnosti sodobnih javnih mobilnih omrežji, ki odpira številne primere uporabe na področju digitalizacije. Industrija si ob digitalizaciji želi tudi avtomatiziranih proizvodnih procesov in mobilnih robotov s centimetrsko natančnostjo ugotavljanja trenutnega položaja, še zlasti v zaprtih prostorih, kjer globalni satelitski navigacijski sistemi ne delujejo [3]. V športu in rehabilitaciji v kombinaciji z biomehansko povratno vezavo [4] poznavanje položaja pripomore k pravilnemu motoričnemu učenju športnika in spremljanju njegovega treninga.

Članek podaja pregled možnosti za ugotavljanje položaja v sodobnih javnih mobilnih omrežjih. Že omrežje druge generacije (2G) je omogočalo celično identifikacijo, ki je določila položaj uporabnika glede na pokrivanje posameznega sektorja bazne postaje. Delovala je povsod, vendar je bila njena natančnost odvisna od velikosti celice oziroma sektorja. Večjo natančnost lahko dobimo že z merjenjem jakosti sprejete moči, pri čemer pa moramo poznati izgube signala na radijski poti. Iz tega lahko ocenimo oddaljenost uporabnika od bližnjih baznih postaj in nato določimo položaj uporabnika s pomočjo presečišč navideznih krožnic, ki jih okrog baznih postaj tvorijo izračunane vrednosti razdalj. Ker je jakost sprejete moči odvisna od orientacije uporabniške naprave in okolja, v katerem je uporabnik, je natančnost dobra samo, če je uporabnik v neposrednem vidnem polju oziroma bližini bazne postaje. Že v 2G je delovala tudi funkcija učasovanja. Bazna postaja pošlje uporabniškemu terminalu ukaz, na osnovi katerega nastavi pričakovano časovno zakasnitev pri sprejemu signala uporabnika.

V 5G in 6G pričakujemo ugotavljanje položaja uporabnika na en meter ali celo nekaj centimetrov natančno. Uporabljene bodo nove tehnične rešitve, kot so to določitev kota oddaje in sprejema, večcelična meritev časa potovanja signala in meritev razlike časov, ko uporabniške naprave zgolj sprejemajo signale, kot je značilno za sprejemnik satelitskega navigacijskega signala. Predvsem slednji način bo uporabniku omogočil, da ugotovi svoj položaj, ne da bi za to vedelo omrežje, saj pri tem ne bo izkoriščal omrežnih virov [5, 6].

2 Teoretične možnosti za ugotavljanje položaja s pomočjo radijskih svetilnikov

Sodobni postopki ugotavljanja položaja se poslužujejo elektronskih naprav, ki so inženirski zgled kompleksne in prefinjene visokofrekvenčne tehnike. Elektronski postopki ugotavljanja položaja so v svojem bistvu osnovani na po prostoru razporejenem sistemu visokofrekvenčnih elektromagnetnih svetilnikov. Sprejemna naprava lahko s procesiranjem signalov iz teh svetilnikov in ob poznavanju njihovega položaja bolj ali manj natančno ugotovi svoj položaj. Pri tem se za ugotavljanje dvodimenzionalnega položaja poslužuje enega od naslednjih geometrijskih postopkov:

- s pomočjo dveh azimutov (sistemi theta-theta),
- s pomočjo dveh oddaljenosti (sistemi rho-rho),
- s pomočjo oddaljenosti in azimuta (sistemi rho-theta) ali
- s pomočjo razlik oddaljenosti do treh svetilnikov (hiperbolični sistemi).

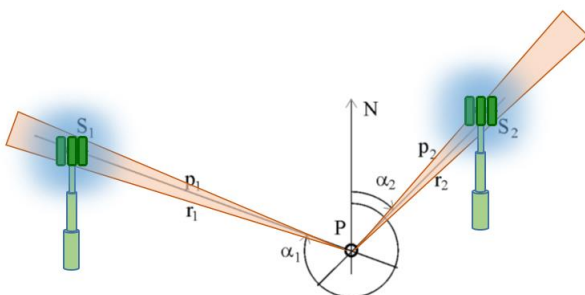
Zgoraj opisani načini veljajo za določitev položaja predmeta v dveh dimenzijah. Če želimo določiti položaj v treh dimenzijah, moramo imeti na voljo vsaj štiri svetilnike.

3 Sistem theta-theta v sodobnih mobilnih omrežjih

Pri postopku za ugotavljanje trenutnega položaja s pomočjo dveh azimutov (sistemi theta-theta) uporabnik na neznani lokaciji izmeri kot med referenčno smerjo, ki jo določa sever, in usmerjenostjo proti baznim postajam, katerih lokacije so poznane. S pomočjo izmerjenih kotov nato poišče presečišče premic, ki določijo njegov položaj. Taki sistemi pri določanju položaja niso prav natančni, saj je meritev kotov zelo nenatančna, kot to prikazuje slika 1. Poleg tega pa je pogrešek sorazmeren oddaljenosti med uporabnikom in svetilnikom, ki ga lahko izračunamo s pomočjo enačbe (1):

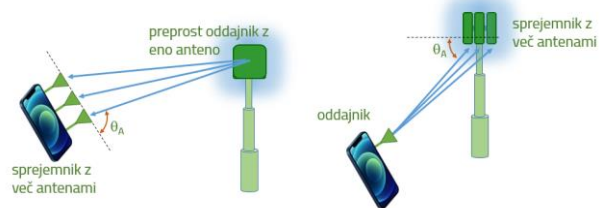
$$\Delta P = r \cdot \sin(\Delta\alpha) \approx r \cdot \Delta\alpha [rd] \quad (1)$$

kjer je ΔP pogrešek razdalje, r oddaljenost med uporabnikom in bazno postajo in $\Delta\alpha$ pogrešek pri meritvi kota. Če sta premici p_1 in p_2 pravokotni je območje pogreška najmanjše, zato je smiselno pri meritvi izbirati tiste bazne postaje, ki so glede na položaj uporabnika pravokotne druga na drugo.

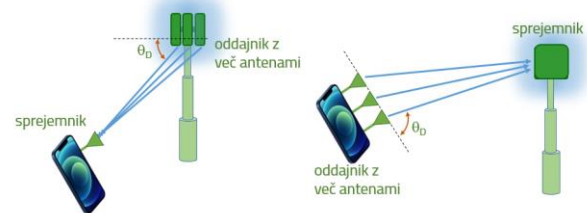


Slika 1. Določanje položaja s sistemom theta-theta.

Za določitev smeri bazne postaje se uporablja sistem z več antenami, pri čemer je več anten lahko na sprejemu, kot prikazuje slika 2, ali na oddaji, kot prikazuje slika 3. Pri sistemu, ki ima več anten na sprejemni strani, se meri kot prispetja (angl. Angle of Arrival – AoA). Vsaka antena sprejme signal z različno fazo iz česar se izračuna smer antene. Pri sistemu, ki ima več anten na oddajni strani se meri kot oddaje (angl. Angle of Departure – AoD). Vsaka antena odda ob svojem času, iz česar sprejemnik sprejme signale različnih faz in izračuna kot oddaje.



Slika 2. Več anten na sprejemniku omogoča meritev AoA.



Slika 3. Več anten na oddajniku omogoča meritev AoD.

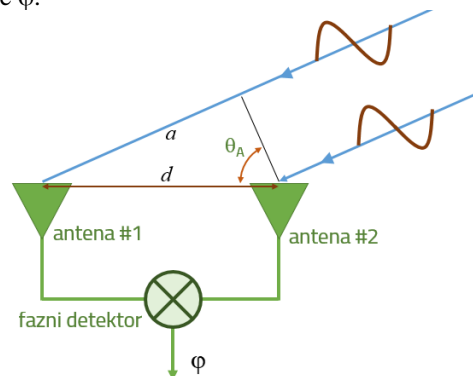
V obeh primerih, AoA in AoD, lahko izračunamo kot iz izmerjene fazne razlike signalov, ki prispejo na anteno, kot prikazuje slika 4. Fazno razliko φ izračunamo po enačbi (2):

$$\varphi = \frac{a}{\lambda} \cdot 2\pi = \frac{d}{\lambda} \cdot 2\pi \cdot \sin\theta_A \quad (2)$$

in

$$\theta_A = \arcsin\left(\frac{\varphi\lambda}{2\pi d}\right) \quad (3)$$

Kot θ_A pod katerim prihajajo signali, je odvisen od razdalje med antenama d , valovne dolžine elektromagnetnega valovanja λ in in izmerjene fazne razlike φ .

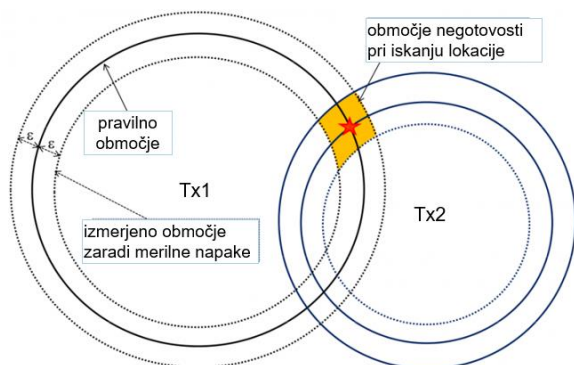


Slika 4. Izračun kota sprejema iz fazne razlike.

Oblikovanje snopa s fazo med antenami [7] je učinkovitejše v področju milimetrskih valov (angl. Millimeter Wave – mmW), kjer pripomorejo tudi optične tehnologije. [8]

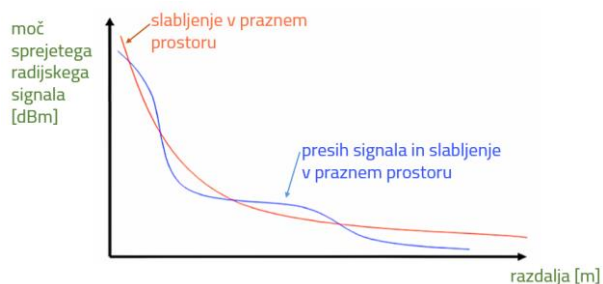
4 Sistem rho-rho v sodobnih mobilnih omrežjih

Pri postopku za ugotavljanje trenutnega položaja s pomočjo dveh oddaljenosti (sistemi rho-rho) uporabnik na neznani lokaciji izmeri razdaljo med njim in baznimi postajami z znanimi lokacijami (slika 5). Svojo lokacijo določi s postopkom trilateracije, to je na osnovi presečišč navideznih krožnic, ki jih okoli baznih postaj tvorijo izračunane vrednosti razdalj. Položaj uporabnika je določen kot stičišče dveh krogov, ki imata v središču bazni postaji. Če meritve niso točne, nastopi napaka pri merjenju, ki vodi v območje negotovosti, kot prikazuje rumeno polje na sliki 5. Velikost in oblika področja negotovosti je odvisna od relativnega položaja svetilnikov. Poleg tega ima presečišče dveh krožnic dve rešitvi, kar vodi do dvoumnosti, ki jo je mogoče reševati s tem, da se izmeri še oddaljenost od tretje bazne postaje ali pa si pomagamo s poznavanjem izhodiščnega položaja, ki je najverjetneje blizu trenutnega položaja.



Slika 5. Določanje položaja s sistemom rho-rho.

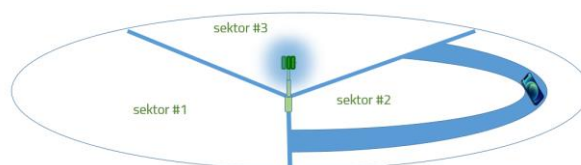
Najenostavnejši način za merjenje razdalje med uporabnikom in bazno postajo je na osnovi meritve sprejete moči (angl. Received Signal Strength – RSS). Izvedba na obstoječem omrežju je preprosta in zahteva le majhne dodatne stroške. Meritev je neodvisna od modulacijskega postopka in hitrosti prenosa podatkov ter ne zahteva sinhronizacije med napravami. Najbolje deluje v neposredni bližini bazne postaje, saj je natančnost odvisna od oddaljenosti in okolja, kot prikazuje slika 6.



Slika 6. Problem ugotavljanja oddaljenosti iz izmerjene sprejete moči.

Ker v dinamičnem mobilnem okolju ni mogoče poznati izgub signala na radijski poti, na merilni rezultat pa vpliva tudi orientacija uporabniške naprave, je dobrodošla primerjava z vnaprej narejeno učno bazo podatkov.

Pri meritvi razdalje je natančnejša meritev s pomočjo časa. Že v specifikacijah 3GPP Rel-8, ki so osnova za 2G, je bila definirana celična identifikacija (angl. Cell-ID), ki deluje v vseh omrežjih, vendar je njena natančnost odvisna od velikosti radijske celice oziroma sektorja, kot to prikazuje slika 7. V 4G je bila celična identifikacija izboljšana, v t.i. »Enhanced Cell ID« z učasovanjem. Predučasenje (angl. Timing Advance) je ukaz, ki ga pošlje bazna postaja uporabniškemu terminalu, da nastavi pričakovano časovno zakasnitev pri sprejemu signala uporabnika.



Slika 7. Celična oziroma sektorska identifikacija.

V omrežju 5G je uvedena funkcija meritve časa obhoda za več celic (angl. Multi-cell round-trip time – RTT). Uporabniška naprava pošlje zahtevo vsem baznim postajam (gNB) in sprejme pripadajoč odziv od več različnih gNB. Z uporabo časa obhoda lahko brez časovne sinhronizacije z meritvijo ugotovimo razdalje med posameznimi gNB. Merimo čas, ki ga posamezen okvir porabi, da pride od oddajnika do sprejemnika in nazaj, pri tem pa moramo upoštevati tudi čas, ki ga potrebuje bazna postaja za obdelavo signala. Razdaljo d med oddajnikom in sprejemnikom izračunamo na osnovi svetlobne hitrosti c po enačbi (4):

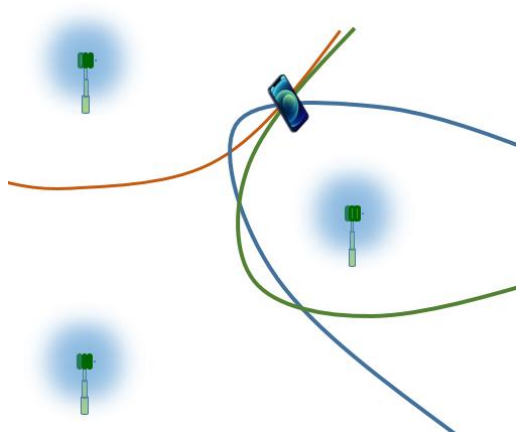
$$d = \frac{RTT}{2} \cdot c \quad (4)$$

Za natančnejšo določitev časa je potrebna čim večja pasovna širina signala, kar je prednost sistema širokopasovne radijske komunikacije (angl. Ultra Wideband – UWB). Sodobna mobilna omrežja imajo na razpolago mnogo radijskega spektra, kar bi lahko izkoristili tudi za natančnejše meritve časa.

5 Hiperbolični sistem v sodobnih mobilnih omrežjih

Pri postopku za ugotavljanje trenutnega položaja s pomočjo hiperbolične navigacije, uporabnik na neznani lokaciji izmeri razlike v časih med njim in baznimi postajami na poznanih lokacijah. Sprejemnik 5G sprejme zgolj relativne čase posameznih baznih postaj (angl. Downlink Time Difference Of Arrival – DL-TDOA) in izračuna svojo lokacijo, kot je to prikazano na sliki 8. V sistemu LTE, ki ga opisujejo specifikacije 3GPP Rel-15, je ta funkcija poznana kot zapažena časovna razlika prihoda (angl. Observed Time Difference Of Arrival – OTDOA) [9]. V obeh primerih se meri časovna razlika baznih postaj, ki pa morajo biti

vse sinhronizirane. Uporabniški terminali v tem primeru zgolj sprejemajo, podobno kot sprejemnik satelitskega navigacijskega signala. Bazne postaje pa v ta namen oddajajo referenčni signal za pozicioniranje (angl. Positioning Reference Signal). Natančnost izračuna položaja uporabnika je odvisna od sinhronizacije in meritve časovnih razlik.



Slika 8. Postopek za določanje trenutnega položaja s pomočjo razlik oddaljenosti do treh baznih postaj (hiperbolični sistem).

6 Zaključek

V članku so opisani postopki za ugotavljanje trenutnega položaja po specifikacijah 3GPP Rel-16. Pri uporabi več baznih postaj se lahko določimo položaj po različnih metodah, tako da merimo kot prispetja signala (AoA), kot oddaje signala (AoD), obhodni čas signala (RTT) in zapaženo časovno razliko sprejetega signala (OTDOA). Če je na voljo ena sama bazna postaja, pa lahko uporabimo metodo rho-theta, pri kateri se oddaljenost med uporabnikom in bazno postajo lahko izmeri s pomočjo obhodnega časa signala (RTT) in kot s pomočjo kota prispetja signala (AoA). Kombinacija različnih metod za ugotavljanje položaja uporabnika in dodajanje novih funkcionalnosti v specifikacije nam omogoča večjo natančnost določenega položaja. Pri sodobnih brezvrvičnih sistemih (5G, še natančneje pa v 6G), kjer je načeloma na voljo dovolj pasovne širine, lahko pričakujemo določanje položaja uporabnika ali predmeta s centimetrsko natančnostjo.

Zahvala

Delo je podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v okviru projekta J2-3048 in raziskovalnega programa P2-0246.

Literatura

- [1] B. Batagelj: Širokopasovni internet je tudi - 5G. Monitor, jun. 2021, letn. 31, št. 6, str. 32-34, <https://www.monitor.si/clanek/sirokopasovni-internet-je-tudi-5g/207663/>
- [2] M. Grebenc, B. Batagelj: Nesamostojno omrežje 5G, 25. seminar radijske komunikacije 2022: Ljubljana, 2. do 4. februarja 2022, Ljubljana, <http://srk.fe.uni-lj.si/zborniki/SRK2022.pdf>
- [3] M. Šelj, Ugotavljanje lokacije uporabnika v notranjih prostorih. Diplomsko naloga, 2022. [Dostopano 15 julij 2022]. Pridobljeno <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=135224>
- [4] A. Kos, V. Milutinović, A. Umek: Challenges in wireless communication for connected sensors and wearable devices used in sport biofeedback applications, Future Generation Computer Systems, let. 92, str. 582-592, 2019 <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.03.032>.
- [5] F. Gustafsson and F. Gunnarsson, "Mobile positioning using wireless networks: possibilities and fundamental limitations based on available wireless network measurements," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 22, no. 4, pp. 41-53, July 2005, doi: 10.1109/MSP.2005.1458284.
- [6] A. H. Sayed, A. Tarighat in N. Khajehnouri, "Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 22, no. 4, pp. 24-40, July 2005, doi: 10.1109/MSP.2005.1458275.
- [7] Patrik Ritoša, Boštjan Batagelj, Matjaž Vidmar, "Optically steerable antenna array for radio over fibre transmission", Electronics Letters, vol. 41, št. 16, str. 917-918, Aug. 2005.
- [8] Patrik Ritoša, Boštjan Batagelj. Overview of optically driven antenna systems. V: SUKHOIVANOV, Igor A. (ur.), SVICH, Vasily A. (ur.), SHMALIY, Yuriy (ur.). Second International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers : proceedings volume. [Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers]: = SPIE, 2008. Str. 1-9, ilustr. Proceedings of SPIE, vol. 7009. ISBN 978-0-8194-7219-9. ISSN 0277-786X. http://spie.org/x648.html?product_id=793861.
- [9] Sven Fischer, "Observed Time Difference Of Arrival (OTDOA) Positioning in 3GPP LTE" Qualcomm, 2014 <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/otdoa-positioning-in-3gpp-lte.pdf>