

Sami Perälä

LANGATTOMAN PAIKANNUKSEN PERUSTEET

Kandidaatintyö
Informaatiotekniikan ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Mikko Valkama
Marraskuu 2024

TIIVISTELMÄ

Sami Perälä: Langattoman paikannuksen perusteet
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Marraskuu 2024

Työn tarkoituksena on antaa kattava yleiskatsaus langattoman paikannuksen teknisiin perusteisiin, menetelmiin ja sovelluksiin. Satelliittipaikannuksessa tarkastellaan Maata kiertäviä satelliitteja, joiden paikannus perustuu niiden jatkuvasti lähettämiin signaaleihin. Näiden signaalien vastaanottamisella on mahdollista päätellä tarkka sijainti. Toisaalta langatonta paikannusta voidaan toteuttaa eri tiedonsiirtoteknologioilla maanpinnalla, joiden kantamat vaihtelevat. Langattoman paikannuksen tarpeet vaihtelevat erilaisissa ympäristöissä, ja niiden ymmärtäminen on olennaista paikannuksen tehokkaassa toteuttamisessa. On huomattavaa, että satelliittipaikannus toimii heikommin sisätiloissa kuin ulkotiloissa ja tässä maanpäälliset paikannusteknologiat tulevat käyttöön täydentäen satelliittipaikannusta.

Työssä keskitytään myös tarkastelemaan paikannusmenetelmiä, kuten AOA (Angle of Arrival), TOA (Time of Arrival) ja TDOA (Time Difference of Arrival). Paikannusmenetelmät perustuvat eri geometrisiin tapoihin arvioida halutun kohteen sijainti. Tukiasemat toimivat mittauksissa keskeisinä yhteyspisteinä, jotka mahdollistavat signaalien vastaanoton ja niiden perusteella sijainnin laskennan. AOA hyödyntää saapuvan signaalin kulmaa määrittääkseen sijainnin, TOA perustuu signaalin saapumisaikaan ja TDOA perustuu eri tukiasemien väliseen aikaeroon.

Työ toteutettiin kirjallisuusselvityksenä, ja pääasiallisina lähteinä käytettiin useita teoriaan keskittyviä kirjoja. Lähteet ovat pääosin ajankohtaisia, koska aiheen tutkimus kehittyy jatkuvasti ja osa työstä edellyttää uusinta tietoa.

Uudessa ajankohtaisessa 5G-mobiiliverkossa on otettu käyttöön 5G NR (New Radio). Tämä uusi tekniikka on suunniteltu täydentämään satelliittipaikannusta erityisesti sisätilaolosuhteissa. 5G NR tarjoaa mahdollisuuden tarkkaan paikannukseen, mikä on erityisen tärkeää esimerkiksi logistiikka- ja tuotantoalalla, missä tarkat sijaintitiedot ovat välttämättömiä.

Avainsanat: paikannus, langaton paikannus, satelliittipaikannus, TOA

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: ChatGBT-4o

Käyttötarkoitus: Käytetty tekstin kielenhuollossa.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Työkalua on käytetty läpi työn.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. LANGATON PAIKANNUS YLEISESTI	2
2.1 Satelliittiverkkojen paikannus	2
2.1.1 GPS	2
2.1.2 Galileo	3
2.2 Maanpäälliset radioverkot	4
2.2.1 Mobiiliverkko	5
2.2.2 Esineiden Internet	6
2.2.3 Cellular IoT	6
3. LANGATTOMAN PAIKANNUKSEN TEKNISET PERUSTEET	8
3.1 Triangulaatio	8
3.2 Trilateraatio	9
3.3 Multilateraatio	10
4. 5G-PAIKANNUS	11
4.1 Arkkitehtuuri	11
4.2 Paikannus	12
4.2.1 Alalinkki paikannus	13
4.2.2 Ylälinkki paikannus	14
4.3 Paikannusmittaukset	14
5. YHTEENVETO	15
LÄHTEET	16

LYHENTEET JA MERKINNÄT

3GPP	3rd Generation Partnership Project, Mobiiliverkkojen standardointijärjestöjen yhteistyöorganisaatio
2G	Second Generation Mobile Technology, Toisen sukupolven matkapuhelinteknologia
3G	Third Generation Mobile Technology, Kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologia
4G	Fourth Generation Mobile Technology, Neljännen sukupolven matkapuhelinteknologia
5G	Fifth Generation Mobile Technology, Viidennen sukupolven matkapuhelinteknologia
5G NR	5G New Radio, 5G Uusi Radioteknologia
AOA	Angle of Arrival, Tulokulma
AMF	Access and Mobility Management Function, Liikenteen hallinnan ja pääsyn hallintatoiminto
BLE	Bluetooth Low Energy, Bluetooth matala energiankulutus
E-CID	Enhanced Cell ID, Parannettu solutunniste
DL-AoD	Downlink Angle of Departure, Lähetyskulma alalinkissä
DL-TDOA	Downlink Time Difference of Arrival, Alalinkin saapumisaikaero
EC	European Commission, Euroopan komissio
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service, Eurooppalainen geostationaarinen navigointilisäpalvelu
EPC	Evolved Packet Core, Kehittynyt pakettikytkentäverkko
ESA	European Space Agency, Euroopan avaruusjärjestö
gNB	Next Generation NodeB, Seuraavan sukupolven tukiasema
GNSS	Global Navigational Satellite System, maailmanlaajuinen satelliittinavigointijärjestelmä
GPS	Global Positioning System, Maailmanlaajuinen paikannusjärjestelmä
IoT	Internet of Things, Esineiden internet
ITS	Intelligent Transportation Systems, Älykkäät liikennejärjestelmät
LBS	Location-Based Services, Sijaintiperusteiset palvelut
LFM	Linear Frequency Modulation, Lineaarinen taajuusmodulaatio
LoE	Location of Everything
LTE	Long-Term Evolution
MEO	Medium Earth Orbit, Keskikorkea Maan kiertorata
mmWave	Millimeter Wave, Millimetriaallot
MN	Mobile Network, Mobiiliverkko
NG-RAN	Next Generation Radio Access Network, Seuraavan sukupolven radioliittymäverkko
NR	New Radio, Uusi Radioteknologia
PRS	Positioning Reference Signal
PRS-RSRP	Positioning Reference Signal - Reference Signal Received Power
RAT	Radio Access Technology, Radioliityntäteknikka
RN	Relay Node, Toistinsolmu
RSTD	Reference Signal Time Difference, Referenssisignaalin aikaero
SRS	Sounding Reference Signal
TDOA	Time Difference of Arrival, Saapumisaikaero
TOA	Time of Arrival, Saapumisaika
UE	User Equipment, Käyttäjän laite
UL-AoA	Uplink Angle of Arrival, Tulokulma ylälinkissä
UL-TDOA	Uplink Time Difference of Arrival, Ylälinkin saapumisaikaero

WLAN
WWAN

Wireless Local Area Network, Langaton lähiverkko
Wireless Wide Area Network, Langaton laajaverkko

1. JOHDANTO

Langaton paikannus on vaikuttanut huomattavasti maailmaan viime vuosikymmenin aikana. Erityisesti suuressa roolissa on GPS (Global Positioning System), jossa Maan kiertoradalla olevat satelliitit mahdollistavat langattoman paikannuksen missä tahansa paikassa. Paikantaminen perustuu radiosignaaleihin, joita lähettävät esimerkiksi GPS-satelliitit. Näiden radiosignaalien matka avaruudessa tapahtuu valon nopeudella, mutta maan ilmakehässä voi esiintyä esteitä, jotka vaikuttavat signaalin kulkuun. [1] Satelliittipaikannuksen lisäksi on myös maanpäällisiä radioverkkoja, joilla voidaan toteuttaa langatonta paikannusta esim. mobiiliverkon avulla.

Tässä työssä perehdytään langattomaan paikannukseen ja sen teknisiin perusteisiin yleisesti sekä sovelluksiin 5G-verkoissa. Tarkastelussa on muutamia yleisesti käytössä olevia tekniikoita paikannuksen toteuttamiseen. Työn tavoitteena on luoda perusteellinen ymmärrys paikannuksen toteuttamisesta tilannekohtaisesti.

Työn luvussa 2 tarkastellaan langattoman paikannuksen erilaisia menetelmiä yleisellä tasolla ja niiden keskeisiä eroja. Luvussa 3 syvennytään paikantamisen teknisten toteutuksien eri menetelmiin. Luvussa 4 keskitytään erityisesti 5G-tekniikan arkkitehtuuriin ja sen paikantamisen ominaisuuksiin. Lopuksi viimeisessä luvussa tiivistetään työn keskeiset tulokset ja tehdään yhteenveto.

2. LANGATON PAIKANNUS YLEISESTI

Langaton paikannus on olennainen osa nykypäivää, mahdollistaen paikantamisen ja sijainnin määrittämisen ilman fyysistä kytköstä paikannettaviin kohteisiin. Paikantaminen on tullut entistä hyödyllisemmäksi teknologian edetessä, missä sijaintitietoja tarvitaan laajasti erilaisissa sovelluksissa ja palveluissa. Langattoman paikannuksen kehitys on johtanut erilaisten menetelmien syntymiseen, joita ovat satelliittiverkot ja maanpäälliset radioverkot. Sekä sisätiloissa että ulkona tapahtuvassa paikannuksessa on omat vaatimukset ja haasteensa, jotka vaativat erilaisia lähestymistapoja ja teknologioita. Tässä luvussa käsitellään yleisellä tasolla perehtyen eri menetelmien perusteisiin.

2.1 Satelliittiverkkojen paikannus

Kun keskustellaan paikannusjärjestelmistä yleisesti, ensimmäisenä tulee mieleen usein GPS-järjestelmää, joka on yksi tunnetuimmista GNSS:n (Global Navigation Satellite Systems) edustajista. Satelliitit ovat yksi keskeisimmistä komponenteista satelliittinavigointijärjestelmässä. [2] Lisäksi on olemassa useita muita uudempia satelliittijärjestelmiä, jotka ovat eri maiden toteuttamia. Nämä järjestelmät tuovat mukanaan erilaisia innovaatioita, mutta ne perustuvat kaikki samoihin periaatteisiin. Satelliittipaikannuksessa on edelleen tilaa parantaa tarkkuutta ja luotettavuutta, ja esimerkiksi GPS-järjestelmää kehitetään jatkuvasti. [3]

Satelliittijärjestelmät perustuvat yleisesti TOA (Time of Arrival) -periaatteeseen paikannuksen määrittämisessä ja laskennassa. Tarkat ja synkronoidut kellot lähettimissä ovat olennainen osa näitä laskelmia. [2] Paikannusjärjestelmä verkon eri komponenttien ollessa synkronoitu keskenään on tärkeää esim. tarkkuuden kannalta.

2.1.1 GPS

GPS (Global Positioning System) on Yhdysvaltain puolustusministeriön kehittämä avaruuteen sijoittuva paikannusjärjestelmä, joka koostuu 24:stä maata kiertävästä satelliitista. Alun perin GPS oli sotilaallinen järjestelmä, mutta myöhemmin se otettiin myös siviilikäyttöön. [2] GPS-satelliitit sijaitsevat noin 12 000 mailin korkeudella ja kiertävät Maan kahdesti yhden vuorokauden aikana. Niiden kiertoradat on suunniteltu siten, että missä tahansa maanpinnalla on näkyvissä vähintään neljä satelliittia. Tarkka paikannus satelliittien avulla edellyttää nanosekunnin tarkkuutta aikamittauksissa, minkä vuoksi GPS-lähettimet on varustettu atomikelloilla. Vastaanottimissa puolestaan käytetään

edullisempaa kelloa, mutta niiden on oltava synkronoituina satelliittien kellojen kanssa tarkan paikannuksen mahdollistamiseksi. [3]

2.1.2 Galileo

Galileo on eurooppalainen hanke maailmanlaajuiselle satelliittinavigointijärjestelmälle, joka on hyväksytty ja rahoitettu EC:n (European Commission) ja Euroopan avaruusjärjestön (ESA) toimesta. Eurooppalainen panostus satelliittinavigointialalle alkoi Eurooppalaisen Geostationaarisen Navigointilisäjärjestelmän (EGNOS) ohjelmalla, jonka tarkoituksena oli tarjota satelliittipohjaisia lisäsignaaleja käyttäjille GPS:n suorituskyvyn parantamiseksi. [3]

Galileo on avoin järjestelmä ja yhteensopiva GPS:n kanssa mutta riippumaton siitä. Yhteensopivuusominaisuudet GPS:n ja muiden järjestelmien kanssa olivat ensisijainen vaatimus Galileo- ja GPS-signaalien yhdistettyyn käyttöön perustuvien palvelujen tarjoamisen mahdollistamiseksi ainakin massamarkkinoiden sovelluksissa. Tämä tarkoittaa sitä, että käyttäjät voivat paikantaa itsensä millä tahansa GNSS-satelliitti yhdistelmällä. [3]

Galileo on ensimmäinen siviilikäyttöön tarkoitettu satelliittipaikannus- ja navigointijärjestelmä. Sen kokonaismalli koostuu täysin käyttöönotetusta 30 satelliitin kokoonpanosta, jotka on sijoitettu kolmeen pyöreään Medium Earth Orbit (MEO) -tasoon varmistaen koko maapallon pinnan peittämisen. [3]

Galileon käyttöönotto tuo useita parannuksia verrattuna GPS:n suorituskykyyn ohittaen osan sen rajoituksista. Galileo tarjoaa lisäominaisuutena erilaisia palvelukategorioita eri tyyppin loppukäyttäjille, erityisesti tarkkuuden, saatavuuden, jatkuvuuden ja luotettavuuden suhteen. Järjestelmän suunnitteluvaiheessa tunnistettiin neljä navigointipalvelua ja yksi palvelu pelastusoperaatioiden tukemiseksi, jotta voitaisiin kattaa laajin käyttäjien tarpeiden joukko, mukaan lukien ammattikäyttäjät, tutkijat, massamarkkinakäyttäjät ja hengenpelastajat. [3]

Seuraavat Galileo-satelliittipalvelut oli tarkoitus tarjota maailmanlaajuisesti ja riippumattomasti muista järjestelmistä:

- Avoin paikannus- ja aikatietopalvelu (OS)
- Hengenpelastuspalvelu (SoL)
- Kaupallinen palvelu (CS)
- Rajoitettu viranomaispalvelu (PRS)
- Etsintä- ja pelastuspalvelun tuki (SAR)

Yllä mainitut palvelut ovat otettu jo käyttöön. [3] Palvelut ovat ilmaisia käyttäjille, mutta vaativat laitetuen, jonka suurin osa laitteistosta sisältää jo.

2.2 Maanpäälliset radioverkot

Toisaalta satelliittipaikannus ei ole ainoa tapa toteuttaa paikannusta, vaan on myös tarpeen käyttää maanpäällisiä paikannusjärjestelmiä. Vaikka satelliittipaikannus ylittää maailmanlaajuisesti tarvitaan silti toisia paikannus menetelmiä, sillä satelliittipaikannus vaatii lähes esteettömän näkökentän paikannettavaan kohteeseen. Paikannusjärjestelmien kyky paikantaa käyttäjä perustuu erilaisiin menetelmiin ja algoritmeihin, joita on lukuisia määriä käytössä eri paikannusjärjestelmissä tilanteen mukaan.

Lokalisointi on prosessi, jossa kohteen sijainnin määrittäminen toteutetaan tietyillä referenssipisteillä, kun taas paikannus on kohteen koordinaattien tarkastelua avaruudessa. Lokalisointijärjestelmät koostuvat kahdesta pääkomponentista: 1) kiinteät referenssipisteet (RN), jotka sijaitsevat tiedetyillä paikoilla, kuten GPS-satelliitit, ja 2) liikkuvat solmut (MN), jotka toimivat tunnisteina, joiden sijainti on määritettävä. MN:ien sijainti määritetään etäisyydellä tai kulmalla RN:istä tai niiden välisestä etäisyyden poikkeamasta. Paikannusjärjestelmiä voidaan luokitella mittakaavan, tyyppin ja käyttäjän roolin perusteella. [4]

Yksi paikannusjärjestelmän keskeisistä haasteista on MN:ien suhteellisen sijainnin tarkastelu RN:ien suhteen. Monia algoritmeja on ehdotettu, jotka perustuvat aikaan, signaalin voimakkuuteen ja etenevien signaalien suuntaan [4]. Kaksi pääkomponenttia, jotka liittyvät näihin algoritmeihin ovat kiinteät RN:t sekä tuntemattomat MN:t. Nämä tekniikat luokitellaan ajan, signaalin voimakkuuden ja suuntakulmien perusteella [4]. Luvussa kolme käsitellään tarkemmin muutaman yleisimmän menetelmän periaatteet.

Paikannusjärjestelmiä voidaan ryhmitellä monin eri tavoin, kuten sisätilojen ja ulkotilojen järjestelmiin tai solupohjaisiin ja anturiverkkopohjaisiin paikannusjärjestelmiin [6]. Lisäksi Internet of Things (IoT) on lähiaikoina yleistynyt uusi teknologia, joka toimii anturiverkon kanssa yhdessä [5].

Satelliitit kykenevät kattamaan ulkoalueet lukuun ottamatta niitä, jotka ovat peitossa tai sisäalueita, kuten metsäpuistoja, rakennuksia tai kellaritasoja. Satelliittipaikannus ei kykene täysin kattamaan näitä alueita, joten vaihtoehtoisia ratkaisuja on otettu käyttöön. Sisäpaikannusjärjestelmät kykenevät määrittämään esineiden sijainnin peitetyillä alueilla, kuten rakennuksissa. [4] Käytettyihin sisäpaikannusjärjestelmiin kuuluu esim. WLAN tai Bluetooth järjestelmät.

2.2.1 Mobiiliverkko

Mobiiliverkko paikannuksella on pitkä historia ja se on joka datayhteys sukupolvena kehittynyt tarkemmaksi ja nopeammaksi lisäten uusia ominaisuuksia teknologian kehittyessä. Sen kehittämisen alkuperäisiä tarpeita oli saada toimiva ja nopea hätäsoiton paikannus teknologia. Tässä luvussa keskitytään enemmän vanhempien mobiiliverkko teknologioiden paikannukseen. Uudemman 5G-mobiiliverkkoon liittyvää paikannusta käsitellään erityisesti luvussa neljä.

Matkapuhelinverkot ovat ensisijaisesti suunniteltu tarjoamaan viestintä mahdollisuuksia mobiilikäyttäjille ja ovat infrastruktuuripohjaisia verkkoja, jotka on otettu käyttöön tietyllä alueella. Yksi niiden ominaisuuksista on taajuusresurssien tehokas hyödyntäminen taajuusjatkuvuuden ansiosta. Käytännössä taajuuden uudelleenkäyttö on Matkapuhelinverkon määrittävä ominaisuus. [6]

Matkapuhelinverkkojen solujen muoto vaihtelee monien tekijöiden mukaan, kuten maantieteellisistä olosuhteista, ympäristöparametreista ja verkkoparametreista [6]. Näihin kuuluvat muun muassa maaston muodot, rakennusten sijainnit, tukiasemien sijainti ja niiden lähetysteho sekä käytetyt pääsytekniikat [6].

Käyttäjän sijainnin arviointi matkapuhelinverkossa vaatii erilaisia parametrejä syötettäväksi algoritmeihin tarkan sijainnin laskemiseksi. Esimerkiksi etäisyys voidaan arvioida etenemispolun häviöstä ja signaalin aallon etenemisajasta [6]. Parametrejä on monia muitakin kuten signaalin saapumisaika, saapumisaikaero ja saapumiskulma [6]. Näitä parametrejä hyödynnetään erilaisissa menetelmissä arvioimaan käyttäjän sijainti, joita käsitellään tarkemmin luvussa kolme.

Matkapuhelimen sijainti määritetään kerätyn datan avulla erilaisten saatavilla olevien menetelmien avulla. Nämä menetelmät voidaan jakaa deterministisiin, todennäköisyyspohjaisiin ja sormenjälkimenetelmiin. Deterministiset menetelmät perustuvat geometriisiin suhteisiin, kuten kiinteisiin etäisyyksiin ja kulmiin, ja olettavat radioetenemisparametrit tunnetuiksi. Todennäköisyyspohjaiset menetelmät käsittelevät saatavilla olevaa dataa matkapuhelimen sijainnista spatiaalisina todennäköisyystiheysfunktioina. Sormenjälkimenetelmät tallentavat matkapuhelimen havaitsemat sijaintiparametrit sormenjälkien muodossa. Sijainti määritetään vertaamalla havaittua sormenjälkeä ennalta tallennettuihin sormenjälkitietokannan vektoreihin. [6]

2.2.2 Esineiden Internet

Viime vuosina Esineiden internet (IoT) on noussut merkittäväksi osaksi teknologia-alaa ja akateemista tutkimusta. Se muodostaa yleisen ja monimuotoisen verkoston, joka yhdistää ihmisiä ja esineitä. Tämä esineiden internet paradigma on verkostoituneiden asioiden muodostama kokonaisuus, joka kerää dataa ympäristöstä erilaisten antureiden avulla. [4]

IoT:n pääasiallinen tavoite on tarjota älykkäitä hallintajärjestelmiä ympäröivien kohteiden tehokkaaseen ohjaukseen [4]. Sen avulla voidaan toteuttaa monipuolisia sovelluksia ja palveluita eri mittakaavoissa, aina syrjäisillä alueilla sijaitsevista älykkäistä kohteista kaupunkiympäristöjen älykkäisiin järjestelmiin, kuten älykkäisiin kaupunkeihin, älykkäisiin liikennejärjestelmiin (ITS) ja älykkäisiin terveyskeskuksiin [4]. Langattoman paikannuksen näkökulmasta IoT-alustaan voidaan integroida erilaisia teknologioita, kuten Wi-Fi, Bluetooth ja monia muita, mahdollistaen näin erilaisia tapoja hankkia kohteiden sijaintitietoja.

Analysoimalla viime vuosikymmenen IoT-tutkimuksia havaitaan, että Location-Based Services (LBS) käsitettä on sovellettu laajalti sisätiloissa, kuten sairaaloissa, rakennuksissa ja ostoskeskuksissa [4]. Vuonna 2017 esiteltiin käsite nimeltä Location of Everything (LoE) älykkäässä ostosjärjestelmässä, mikä kuvastaa paikannusjärjestelmien eräitä toteutuksia IoT-järjestelmissä [4]. Esimerkiksi BLE (Bluetooth Low Energy) on yksi laajalti käytetyistä tekniikoista monissa IoT -sovelluksissa, ja tämä johtuu sen monista eduista, kuten vähäisestä virrankulutuksesta ja alhaisista kustannuksista [5]. Käytännössä IoT-laitteiden päätarkoitus langattoman paikannuksen roolissa on toimia alustana erilaisille paikannuksen toteuttaville teknologioille.

2.2.3 Cellular IoT

Matkapuhelinjärjestelmät ovat kehittyneet merkittävästi siihen pisteeseen, että ne kykenevät tukemaan IoT-sovelluksia muodostaen yhtenäisen systeemin. Tätä kutsutaan nimellä Long Term Evolution (LTE) tai 4G. Aikaisempien 2G- ja 3G-teknologioiden ongelmana IoT-ratkaisuissa oli niiden laitteiden suuri virrankulutus verrattuna uudempiin LTE-laitteisiin [7].

Cellular IoT yhdistää siten IoT-verkon ja matkapuhelinverkon, mitä voidaan kuvata struktuurilla, joka jakautuu laitekerrokseen ja yhteyskerrokseen. Laitekerros kuvaa fyysistä laitetta tai esinettä IoT-järjestelmässä. Tämä kerros toimii keskeisenä komponenttina, joka tallentaa tärkeitä IoT-antureiden tuottamia tietoja [7]. Yhteyskerros on langaton tai langallinen yhteysväylä, joka toimii porttina Internetiin. Tämä yhteys voi perustua

WLAN-tekniikkaan, kuten Wi-Fi, Bluetooth tai Zigbee, tai WWAN-tekniikkaan, kuten matkapuhelinverkkoihin [7].

LTE-verkkoarkkitehtuuri koostuu useista keskeisistä komponenteista, mukaan lukien UE (User Equipment), E-UTRAN-radiopääsyverkko (RAN), jossa matkapuhelintukiaseimat, tunnetaan myös nimellä eNodeB tai eNB, sekä Evolved Packet Core (EPC), joka vastaa UE-laitteiden hallinnasta ja verkkoliikenteestä. [7]

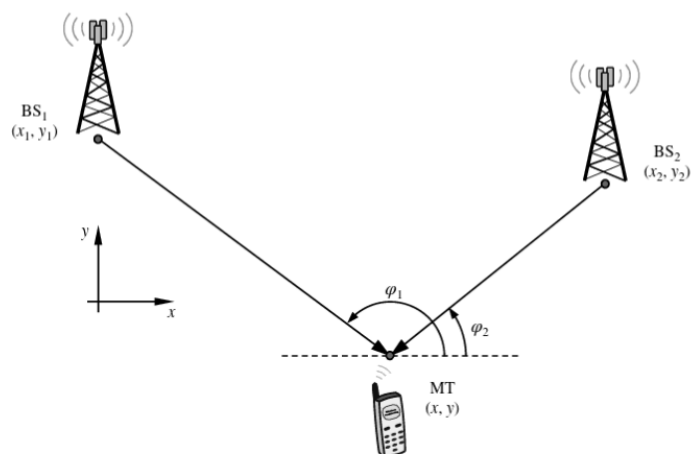
Kaksi standardoitua Cellular IoT -tekniikkaa on LTE-M ja NB-IoT. LTE-M on suunniteltu keskittämään IoT-sovelluksiin ja sillä voidaan tukea ääni- ja videopalveluita, kun taas NB-IoT tarjoaa erittäin syvän kattavuuden ja tukee erittäin edullisia laitteita. Nämä kaksi tekniikkaa täydentävät toisiaan, ja niitä voidaan käyttää yhdessä tehokkaasti palvelemaan IoT-käyttäjää. [10]

3. LANGATTOMAN PAIKANNUKSEN TEKNISET PERUSTEET

Itse kohteen sijainnin määrittäminen geometrian ja laskennan avulla toteutetaan erilaisilla menetelmillä tai algoritmeilla. Nämä algoritmit hyödyntävät parametreja, jotka ovat peräisin ilmassa kulkevista signaaleista. Laitteisiin on integroitu komponentteja, jotka mahdollistavat näiden signaalien lähettämisen, vastaanottamisen ja niistä haluttujen parametrien lukemisen. Näitä menetelmiä on langattomassa paikannuksessa useita, jotka pohjautuvat erilaisiin laskennallisiin periaatteisiin. Tietyn menetelmän valinta tapahtuu tilanteen mukaan, huomioiden useita eri tekijöitä. Tässä luvussa esitellään muutama yleisimmin käytettyä menetelmää.

3.1 Triangulaatio

Yksi paikannuksen määrittämisen menetelmistä on triangulaatio, jossa käyttäjän sijainnin laskemisessa hyödynnetään kolmiota. Kaksiulotteisessa tapauksessa voidaan esimerkiksi hyödyntää AOA (Angle of Arrival) -menetelmää, jossa määritetään, mistä suunnasta signaali saapuu käyttäjälle. Tässä samassa kaksiulotteisessa esimerkkita-pauksessa on kaksi tukiasemaa ja käyttäjän sijainti muodostamassa kolmion. Tämän esimerkin yhteydessä oletetaan tukiasemien orientaation olevan tunnettu ja niiden sijaintien vakiintuneita. [2]



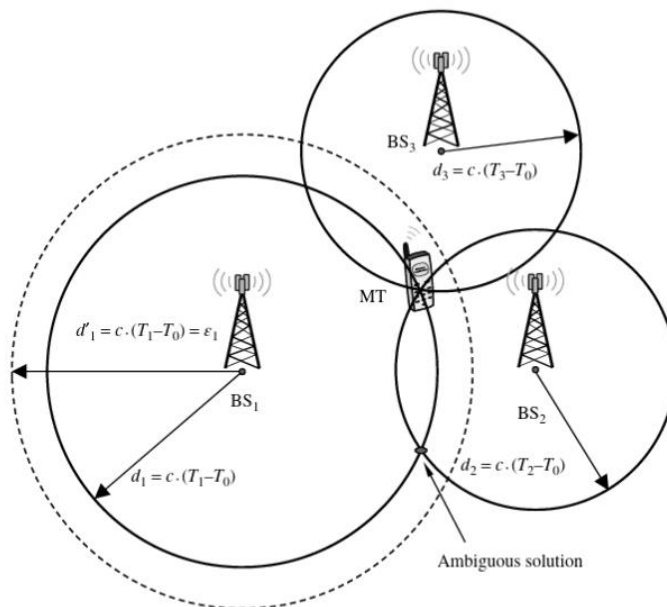
Kuva 1. AOA menetelmän periaate. [2]

Triangulaation laskemiseen liittyy useita erilaisia monimutkaisuuksia, kuten onko mitaus alalinkkiin vai ylälinkkiin ja onko käyttäjän orientaatio tunnettu vai tuntematon. Ala-

linkki tarkoittaa tilannetta, jossa signaali siirtyy tukiasemalta käyttäjälle, kun taas ylälin-
kissä tapahtuu päinvastainen siirtymä. Tässä esimerkissä mittaukset oletetaan ideaali-
siksi, mutta todellisissa laskelmissa on otettava huomioon epätarkkuustekijät, kuten
sähköpiirien lämpökohina, mittauslaitteiston rajallinen kulmaresoluutio ja tukiasemien
epävarmuus. [2]

3.2 Trilateraatio

Toinen paikannuksen määrittämisen menetelmistä on trilateraatio, jossa käyttäjän si-
jainti päätellään siitä, mitkä ovat sen etäisyydet useasta tukiasemasta. Etäisyyksien
laskemiseksi voidaan esimerkiksi hyödyntää TOA (Time of Arrival) -menetelmää, jossa
mitataan signaalin siirtoaika tukiasemalta kohteeseen, minkä perusteella etäisyydet
voidaan määrittää. [2] Näin ollen käyttäjän etäisyys voidaan laskea tietystä tukiase-
masta, jonka koordinaatit ovat oletetusti tiedossa. Tästä voidaan muodostaa etäisyy-
den säteinen ympyrä, jonka keksipisteenä on kyseinen tukiasema. Käyttäjän sijainti on
tämän ympyrän jossain pisteessä. Saman menetelmän voi toteuttaa useammalle tuki-
asemalle, mikä vähentää epävarmuutta käyttäjän sijainnista jokaisen uuden ympyrän
myötä. [1]



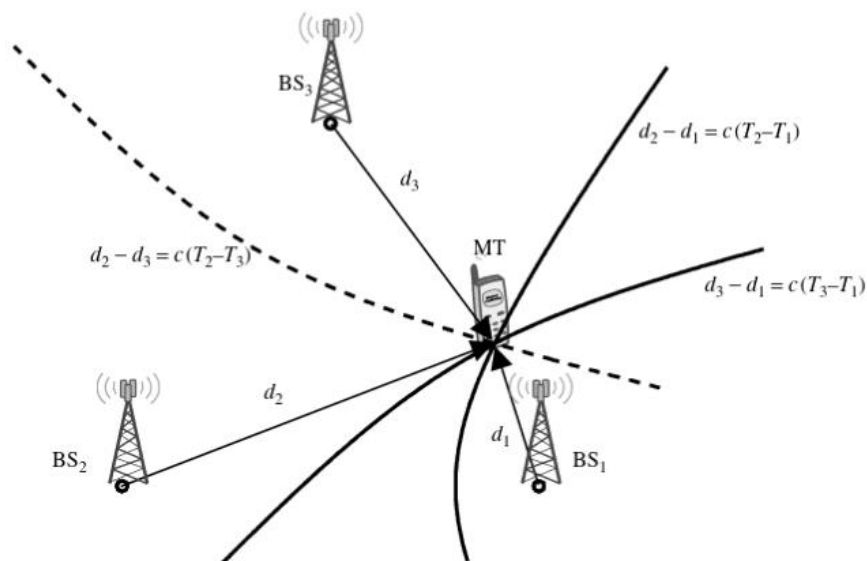
Kuva 2. TOA menetelmän periaate. [2]

Kolmen tukiaseman avulla voidaan jo ratkaista sijainnin epävarmuus kahdessa ulottu-
vuudessa TOA-menetelmällä. käyttäjän sijainnin määrittäminen kolmiulotteisessa ym-

päristössä on myös mahdollista, mutta siinä tapauksessa muodostetaan palloja ympyröiden sijaan. Toisaalta tarvittavien tukiasemien mittauksien määrä nousee kolmesta neljään. [2]

3.3 Multilateraatio

Kolmas paikannuksen määrittämisen menetelmistä on multilateraatio, jossa käyttäjän sijainti suhteessa tukiasemiin päätellään näiden etäisyyksien erotuksista. Tällaisen erotuksen laskentaa varten voidaan hyödyntää esimerkiksi TDOA (Time Difference of Arrival) -menetelmää. [2] TDOA-menetelmässä oletetaan, että tukiasemien sijainnit pysyvät paikallaan. Menetelmä on periaatteeltaan samankaltainen kuin TOA-menetelmä, mutta nyt aikaerojen laskemisen myötä muodostuu ympyröiden sijasta hyperbelejä tukiasemien kohdalle. Hyperbeli on ne pisteiden paikat tasossa siten, että etäisyyksien ero kahdesta pisteestä on vakio. Käyttäjän potentiaalinen sijainti on jokin piste hyperbelillä. Hyperbeli muodostuu kahden tukiaseman avulla, ja siten toinen hyperbeli voidaan muodostaa kolmella tukiasemalla. Käyttäjän potentiaalisen sijainnin voidaan määrittää olevan hyperbelien leikkauspisteessä. [3]



Kuva 3. TDOA menetelmän periaate. [2]

Toisin kuin TOA-menetelmässä, TDOA-menetelmä ei vaadi kellon synkronointia tukiasemien ja käyttäjän välillä. TDOA:ssa kaikki tukiasemat vastaanottavat saman käyttäjän lähettämän signaalin, ja siksi saapumisajan virheet ovat samansuuruiset jokaisessa tukiasemassa. [3]

4. 5G-PAIKANNUS

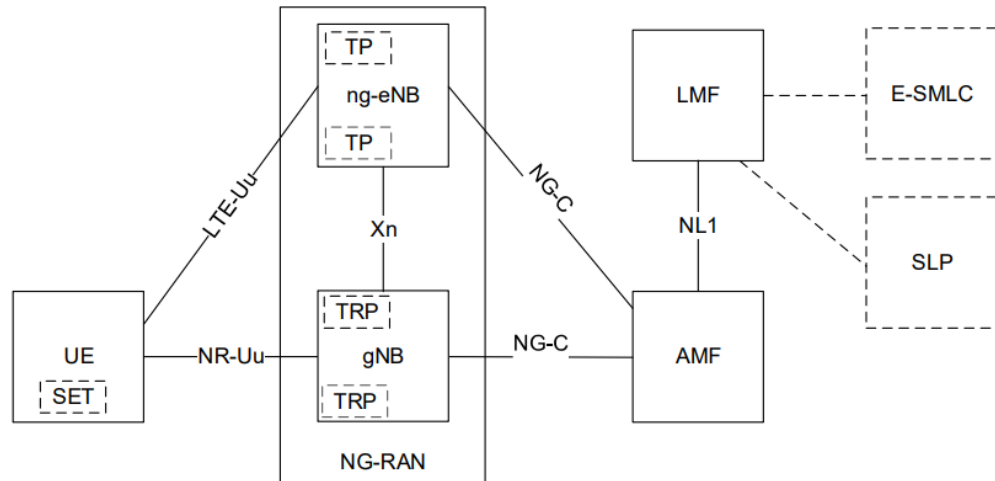
5G yleistyy huimaa vauhtia ja sen verkosto laajenee jatkuvasti. Merkittävimmät muutokset 5G:ssä on suuremmat tiedonsiirto nopeudet, pienemmät latenssit ja suurempi kapasiteetti. Paikannuksen toteuttaminen on ollut mahdollista myös aikaisemmissa mobiiliverkko sukupolvissa, mutta uuden viidennen sukupolven 5G-tekniikan standardissa langaton paikannus on enemmän edistynyt. Tässä luvussa käsitellään 5G:n arkkitehtuuria ja tapoja toteuttaa paikannuksia.

4.1 Arkkitehtuuri

5G:ssä on otettu käyttöön uusi langaton tiedonsiirtojärjestelmä, 5G NR (New Radio), joka on kehitetty 3rd Generation Partnership Project (3GPP) -organisaation toimesta ja toimii Radio Access Technology (RAT) -teknologiana. NG-RAN (Next Generation Radio Access Technology) on keskeinen komponentti 5G-verkossa, vastaten langattoman yhteyden ylläpidosta käyttäjien välillä [8]. 5G NR arkkitehtuuri on peräisin 4G arkkitehtuurista, missä on otettu käyttöön lukuisia uudistuksia.

LTE:hen verrattuna NR tarjoaa monia etuja, joita ovat: korkeampien taajuuskaistojen hyödyntäminen korkeamman tiedonsiirron tukemiseksi, parannettu energiatehokkuus, pienempi viive suorituskyvyn parantamiseksi ja tietynlainen rakenne mahdollistaen beamforming-tekniikan [11]. Erityisesti tarkempaa paikannusta varten 5G-verkko sisältää myös mmWave-taajuuskaistoja, jotka mahdollistavat laajakaistaisempien signaalien käytön [12]. Lisäksi NR parantaa eteenkin paikannus sovelluksia logistiikka ja tuotanto sektoreilla, jotka vaativat tarkkoja tuloksia.

NG-RAN-solmu koostuu kahdesta tukiasemasta: 5G-tukiasema (gNB) ja 4G-tukiasemasta (ng-eNB) [8]. Kummatkin tukiasemat ovat kytkettynä AMF (Access and Mobility Management Function) -solmuun 5G-ydinverkkoon [8]. Tämän seurauksena samassa järjestelmässä NG-RAN tukee sekä NR-laitteita että vanhempia LTE-laitteita [11]. NG-RAN arkkitehtuuri on hahmotettu kuvassa 4.



Kuva 4. UE:n paikannuskokonaisarkkitehtuuri sovellettuna NG-RAN:iin. [9]

AMF valvoo kulunvalvontaa ja turvallisuutta sekä liikkuvuuden hallintaa [10]. AMF vastaanottaa pyynnön tietyn kohde UE:n liittyvän sijaintipalvelun suorittamisesta tai AMF voi myös itse päättää aloittavan suorittamaan sijaintipalvelun toisen UE:n puolesta. Tässä vaiheessa AMF lähettää sijaintipalvelupyynnön LFM:lle (Location Management Function), joka käsittelee tämän pyynnön ja suorittaa tarvittavat toimenpiteet sijainnin määrittämiseksi. LFM palauttaa valmiin tuloksen sijaintipalvelusta AMF:lle, joka puolestaan lähettää sen eteenpäin vielä takaisin UE:lle. [9]

4.2 Paikannus

Satelliittipaikannus kohtaa haasteita usein sisätiloissa ja tiheillä kaupunkialueilla ja monesti on nykyään tarve paikannukselle näissä ympäristöissä. 5G NR mahdollistaa teleoperaattoreiden käyttämään paikannusta sisä- ja ulkotiloissa aikaisempia paikannusteknologioita tarkemmin ja luotettavammin [10]. Paikannuspalveluita tarvitaan monissa eri käyttötarkoituksissa, kuten hätäpuheluiden sijainnin määrittämisessä, autonomisessa ajamisessa ja tehtaan automaattisten trukkien seurannassa [10]. Lisäksi 5G-verkot tarjoavat innostavan mahdollisuuden käyttää yhtä teknologiaa, joka kattaa sekä paikannuksen että tiedonsiirron yhdistetyssä ratkaisussa [10].

5G-paikannus voi täydentää tai toimia vaihtoehtona perinteiselle GNSS-järjestelmälle monissa tilanteissa, joissa GNSS-kattavuus ei ole saatavilla. Toisaalta 5G-paikannus voidaan myös yhdistää GNSS-paikannuksen kanssa tarkkuuden parantamiseksi. Lisäksi 5G-verkkoja voidaan käyttää avustus datan lähettämiseen korkean tarkkuuden GNSS-teknikoissa.

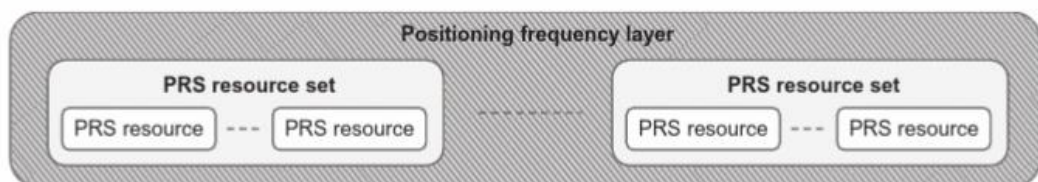
Paikannustekniikoita 5G-verkoissa on useita, kuten esimerkiksi Downlink Time Difference of Arrival (DL-TDOA) ja Uplink Time Difference of Arrival (UL-TDOA). Nämä menetelmät ovat kehitetty erityisesti 5G:ssä parantamaan paikannuksen tarkkuutta. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään näiden perustoiminnallisuuksia.

Toisaalta UE:lle voidaan määrittää sijainti käyttäen aiemmin mainittuja paikannusmenetelmiä, kuten Time of Arrival (TOA), Angle of Arrival (AOA) ja Time Difference of Arrival (TDOA). Lisäksi 5G tuo mukanaan uusia paikannusmenetelmiä, kuten NR Enhanced Cell ID (E-CID), Downlink Angle of Departure (DL-AoD), Uplink Angle of Arrival (UL-AoA) ja Multi-cell Round Trip Time (multi-RTT). 5G:ssä tuettuja paikannukseen käytettyjä langattomia radioteknologioita ovat esimerkiksi WLAN, Bluetooth, satelliittiyhteydet ja mobiiliverkot.

4.2.1 Alalinkki paikannus

Alalinkki paikannus on tuettu ns. referenssisignaalin PRS (Positioning Reference Signal) sekä siihen liittyvästä mittaus- ja raportointimekanismista. Haluttua laitetta paikantaessa se on konfiguroitu ennästään mittaamaan useilta eri tukiasemilta peräisin olevia paikannusviitesignaaleja ja raportoimaan nämä mittaukset verkkoon jatkokäsittelyä ja sijainnin arviointia varten. [11]

PRS on alalinkkisygnali, joka on tarkoitettu TOA-mittauksia varten. Tavallisesti mitaukset suoritetaan useilla PRS:illä, jotka tulevat eri tukiasemilta, sillä muuten halutun laitteen sijainti olisi vaikea määrittää esimerkiksi triangulaatiota käyttäen. Tarvitaan siis useita toisistaan poikkeavia PRS:iä, joita voidaan mahdollisesti lähettää eri kantaaloilla. NR käyttää hierarkiaa, jossa on paikannustaajuuskerroksia, PRS-resurssijoukkoja ja PRS-resursseja rakenteen määrittämiseksi. [11] Paikannustaajuuskerrosta on havainnollistettu kuvassa 5.



Kuva 5. Paikannustaajuuskerros. [11]

Yksi paikannustaajuuskerros sisältää yhden tai useamman PRS-resurssijoukon, joka sisältää samasta asemasta peräisin olevia PRS-resursseja. Jokainen PRS-resurssi vastaa tyypillisesti yhtä sädettä kyseiseltä asemalta. Näin ollen laite voidaan konfigu-

roida mittaamaan tiettyä PRS-resurssia PRS-resurssijoukossa, jonka avulla sijaintipalvelin saa tietoa ei vain siitä, mihin asemaan raportoidut mittaukset liittyvät, vaan myös tiettyä sädettä, joka kyseisestä paikasta lähtee. [11]

4.2.2 Ylälinkki paikannus

Tämä menetelmä toimii samankaltaisesti alalinkin paikannuksen kanssa, mutta sen sijaan, että käytettäisiin PRS-signaaleja, hyödynnetään SRS-signaaleja (Sounding Reference Signal). Lisäksi, kun kyseessä on ylälinkki, UE-laitteet lähettävät signaaleja ja tukiasemat vastaanottavat ne. On merkittävä, että lähetetyn signaalin on ulotuttava riittävän kauas kattamaan paitsi tietty tukiasema myös sen naapuriasemat, sillä paikannusmittaukset edellyttävät useamman tukiaseman osallistumista laskuihin.

4.3 Paikannusmittaukset

Yhdessä PRS:n käyttöönoton kanssa otetaan käyttöön myös uusia mittauksia tukemaan alalinkkipaikannusta. Kolme eri mittausparametria on määritelty PRS:lle: PRS-RSRP (positioning reference signal received power), RSTD (relative-signal-time-difference measurement), ja Rx-Tx time difference. [11]

PRS-RSRP:tä käytetään ensisijaisesti yhdessä muiden paikannustekniikoiden kanssa. Sen tärkein käyttötarkoitus on integroida se muihin paikannustekniikoihin, ja sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi sormenjälkien tunnistamisessa tai lisäsyötteenä arvioitaessa muiden PRS:ään liittyvien mittausten tarkkuutta. RSTD-mittaus on kahden eri solmun lähettämän kahden PRS:n vastaanottoajan eron mitta. Se on erittäin hyödyllinen signaali paikannustarkoituksiin, esimerkiksi triangulaation yhteydessä. Rx-Tx-aikaero raportoi laitteelta alalinkki-kehyyksen alun ja vastaavan ylälinkki-kehyyksen alun välisen aikaeron. [11]

Kyseisiä mittausparametreja varten on kehitetty standardoituja menetelmiä, jotka perustuvat tiettyyn mittausparametriin, joista muutama lueteltiin aikaisemmin. Joitakin esimerkkejä standardoiduista menetelmistä ovat: DL-TDOA, DL-AoD, UL-TDOA, UL-AoA ja Multi-RTT [12]. Menetelmät voivat myös perustua useampaan eri mittausparametriin samanaikaisesti [12].

Tarkat ja ajantasaiset mittaukset ovat keskeisiä luotettavan paikannuksen varmistamisessa. Tämän vuoksi on olemassa standardoituja vaatimuksia mittausjakson maksimikestolle, jonka aikana mittaukset on suoritettava, sekä maksimivirheelle ilmoitetussa mittauksissa. Mittausten ajanjakso kattaa ajan, joka tarvitaan enintään neljän mittaustuloksen saamiseksi, samalla kun saavutettu tarkkuus ei tulisi olla huonompi kuin vastaava mittatarkkuusvaatimus. [12]

5. YHTEENVETO

Tässä kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin langattoman paikannuksen perusteisiin esittelemällä muutamia eri menetelmiä paikannuksen toteuttamiseksi sekä esiteltiin pinta-puolisesti yleisimmin käytetyt algoritmit tarkkojen sijaintitietojen laskemiseen. Paikannusteknologian nopean kehityksen vuoksi työssä keskityttiin tarkemmin uusimpiin menetelmiin kuten, 5G-tekologiaan perustuviin paikannusmenetelmiin. Myös vanhempia menetelmiä on yhä käytössä, sillä ne ovat edelleen tarpeellisia ympäristöissä, joissa paikannus vaatii tiettyjä kriteerejä.

Paikannusmenetelmät voidaan jakaa pääasiassa sisä- ja ulkotiloihin, sillä mikään yksittäinen menetelmä ei kykene tehokkaasti toimimaan kummassakin. Satelliittipaikannus, kuten GPS, on ulkotiloissa ja erityisesti avoimissa ympäristöissä yleisimmin käytetty menetelmä sen hyvän tarkkuuden ja laajan kattavuuden ansiosta. Kuitenkin GPS tarkkuus heikkenee tiheästi asutuilla alueilla, sillä se vaatii lähes suoran näköyhteyden satelliitteihin. Toisaalta sisätiloissa tai tiheästi rakennetuilla kaupunkialueilla käytetään useimmiten maanpäällisiä radioverkkoja, kuten mobiiliverkkoja paikannukseen. Radioverkot koostuvat kiinteistä referenssipisteistä ja liikkuvista solmupisteistä, joista jälkimmäinen on paikannettava kohde eli käyttäjä. Radioverkkojen kattavuus on kuitenkin rajallinen, ja ne soveltuvat parhaiten kaupunkialueille, joissa referenssipisteitä on tiheästi.

Käyttäjän fyysisen sijainnin laskennassa hyödynnetään referenssipisteitä ja niiden välistä signaalinkulku-aikaa. Signaalien lähetys- ja vastaanottoajat tallennetaan, ja näiden avulla voidaan laskea käyttäjän sijainti käyttämällä algoritmeja, jotka perustuvat esimerkiksi AOA, TOA ja TDOA menetelmiin.

5G-tekologian käyttöönotto on tuonut parannuksia langattomaan paikannukseen, erityisesti sisätiloihin ja tiheään rakennettuihin kaupunkiympäristöihin. 5G NR mahdollistaa tarkat paikannusratkaisut, jotka hyödyntävät korkeita taajuuskaistoja ja matalia latensseja. Tätä teknologiaa voidaan hyödyntää myös satelliittipaikannuksen rinnalla sen täydentämiseksi ja siten paikannustarkkuuden parantamiseksi.

Langaton paikannus on monipuolistunut ja kehittynyt uusien teknologioiden myötä. Vaikka satelliittipaikannus tarjoaa edelleen kattavan ratkaisun ulkotiloihin, maanpäällisen radioverkon ja 5G-tekologian käyttö sisätiloissa ja tiheissä kaupunkiympäristöissä on nousussa. Näiden tekniikoiden yhteiskäyttö mahdollistaa tarkemman, nopeamman ja luotettavamman paikannuksen.

LÄHTEET

- [1] P. Misra, P. Enge, Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance. 2nd ed., Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [2] A. Dammann, C. Mensing, S. Sand, Positioning in Wireless Communications Systems, John Wiley & Sons, Incorporated, 2014.
- [3] R. Michael Buehrer, R. Zekavat, Handbook of Positioning Location: Theory, Practice and Advances. 2nd. Edition, John Wiley & Sons, Incorporated, 2019.
- [4] P. Farahsari, A. Farahzadi, J. Rezazadeh, A. Bagheri, A Survey on Indoor Positioning Systems for IoT-Based Applications, IEEE internet of things journal, 2022
- [5] S. Tomažič, Indoor Positioning and Navigation, MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021
- [6] A. Melikov, Cellular Networks: Positioning, Performance Analysis, Reliability, IntechOpen, 2011.
- [7] D. McCain, C. Coursey, Implementing Cellular IoT Solutions for Digital Transformation, 1st ed., Packt Publishing, 2023
- [8] F. Launay, NG-RAN and 5G-NR: 5G Radio Access Network and Radio Interface., 1st. Edition, John Wiley & Sons, Incorporated, 2021.
- [9] 3GPP TS 38.305 V17.6.0, Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in NG-RAN (Release 17), June 2019.
- [10] A. Ghosh, R. Ratasuk, P. Rost, 5G-Enabled Industrial IoT Networks. 1st ed., Artech House, 2022.
- [11] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, 5g Nr: The Next Generation Wireless Access Technology. 2nd. Edition, Elsevier Science & Technology, 2020.
- [12] S. Dwivedi, Positioning in 5G networks, arXiv.org, 2021