

This is a self-archived version of an original article. This version may differ from the original in pagination and typographic details.

Author(s): Kataja, Jyrki; Haapala, Hannu

Title: 5G-verkon kuuluvuuden takareunan tunnistaminen maasto-olosuhteissa

Year: 2024

Licence: CC BY 4.0

License url: [Deed - Attribution 4.0 International - Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Please cite the original version:

Kataja, J. & Haapala, H. (2024). 5G-verkon kuuluvuuden takareunan tunnistaminen maasto-olosuhteissa. *Suomen maataloustieteellisen seuran tiedote* 42. <https://journal.fi/smst/article/view/143656/91475>

DOI: 10.33354/smst.143656

5G-verkon kuuluvuuden takareunan tunnistaminen maasto-olosuhteissa

Jyrki Kataja ja Hannu Haapala

Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Biotalousinstituutti, Tuumalantie 17, 43130 Saarijärvi

e-mail: jyrki.kataja@jamk.fi

Sekä maa- että metsätaloudessa langaton tiedonsiirto tulee näyttämään entistä suurempaa roolia toimivan ja tehokkaan digitalisoituneen toiminnanohjausjärjestelmän perustana. Jatkuvasti kehittyvät ja nopeutuvat tietoliikenneverkot mahdollistavat reaaliaikaiseen kuvaan sekä nopeaan mittaus- ja ohjaussignaaliin perustuvat toimintatavat ja jopa etäohjausta hyödyntävät uudet teknologiset ratkaisut niin maatilojen talouskeskuksissa, peltolohkoilla kuin metsäpalstoilla. Perinteisesti uudet tehokkaaseen tiedonsiirtoon pystyvät kaupalliset langattomat tietoliikenneverkot rakennetaan kattaviksi maanteitä noudattaen. Alemman tieverkon ja etenkin yksityisteiden alueella näiden langattomien tietoliikenneverkkojen käytettävyys kuitenkin heikkenee olennaisesti. Vain pieni osa maatilojen talouskeskuksista sekä peltojen ja metsälöiden pinta-alasta sijaitsee riittävän lähellä sellaista maantietä, jolle esimerkiksi 5G-verkko on kaupallisten toimijoiden puolesta rakennettu. Digitalisaation mahdollistamat tiedon keräämisestä ja käytöstä syntyvät tietoliikenneyhteyksien laatuun ja saatavuuteen liittyvät rajoitteet ja mahdollisuudet voivat muodostua tulevaisuudessa maa- ja metsätalouteen uuden merkittävän infrastruktuuritekijän perinteisten sähkö- ja tieverkkojen lisäksi. 5G-verkon signaalin kantamaan vaikuttavat käytetty taajuus, lähetinteho, lähetinantennin korkeus sekä alueen pintamalliin ja vallitsevaan säätilaan liittyvät ominaisuudet. 5G-verkon signaalin kantama jää optimiolosuhteissakin 3.5 GHz:n taajuuksilla alle kilometriin ja 700 MHz:n taajuuksilla muutamiin kilometreihin. 5G-verkon signaalin etenemisvaimennus voidaan laskea etenkin vapaassa tasaisessa tilassa ja siten kantaman perustason simulointi alueellisesti onnistuu helposti. Rakennukset, metsän puusto sekä vaihtelevat maan pinnan korkeudet vaikuttavat paljon todelliseen 5G-verkon signaalin kantamaan. Maastossa kohoavat kohdat ja rakennusten tai metsäsaarekkeiden kulmat voivat muodostaa esteitä, joiden taakse voi muodostua alueita, joilla signaalin voimakkuus heikkenee simulointimalleista poiketen tasolle, jolla 5G-verkon yhteys ei enää riitä luotettavaan ja nopeaan tiedonsiirtoon. Biotalouskampuksen Älymaatila -hankkeessa (2021–2023) selvitettiin yhtenä toimenpiteenä menetelmiä 5G-verkon kantaman toiminnallisen takarajan tunnistamiseksi kenttäolosuhteissa erilaisilla maa- ja metsätalouden kohteilla. Tutkimuskohteet sijaitsivat sekä kaupallisten toimijoiden 5G-verkkojen kuuluvuuden raja-alueilla että tutkimuskohdetta varten toteutetulla erillisverkkoratkaisulla. Sekä maan pinnan korkeuserojen vaihtelun että esimerkiksi etäohjattavan työkoneen 5G-vastaottimen sijoituspaikan havainnollistamiseksi mittaukset toteutettiin kolmella eri korkeudella maan pinnasta. Mittausmenetelmällä pystyttiin todentamaan 5G-verkon signaalin kantamaan syntyvät peittoalueen katveet ja sen muutokset etenkin vertikaalisesti tarkasteltaessa

Avainsanat: älymaatalous, langaton tiedonsiirto, 5G-verkko, maaseutualueet

Johdanto

Digitalisaatio sekä tehokkaammat tietoliikenneyhteydet luovat pohjan kehittyvälle älybiotaloudelle, joka antaa lisääntyvän ja tarkentuvan tiedon avulla uusia mahdollisuuksia vastata toimialan niin paikallisiin kuin globaaleihin haasteisiin. Tulevaisuudessa sekä maa- että metsätalouden tulee olla resurssiviisasta, vähähiilistä ja ympäristöä säästävää, mutta samalla taloudellisesti kannattavaa liiketoimintaa. Älykkäiden teknologisten ratkaisujen tuottama ajantasainen tieto yhdistettynä menneiden kasvukausien havaintodataan antaa myös mahdollisuuden vastata ilmastonmuutoksen myötä lisääntyviin poikkeuksellisiin ilmiöihin (kuivuus, märkyys, tautipaine ym.).

Maasto-olosuhteissa reaaliaikainen tietoliikenne toteutetaan hyödyntäen erilaisia langattomia tietoliikenneyhteysteknologioita. Biotalouskampuksen Älymaatila -hankkeessa (2021–2023) selvitettiin yhtenä toimenpiteenä menetelmiä 5G-verkon kantaman toiminnallisen takarajan tunnistamiseksi kenttäolosuhteissa erilaisilla maa- ja metsätalouden käyttökohteilla. Langaton tiedonsiirto tulee näyttämään entistä suurempaa roolia toimivien ja tehokkaiden digitalisoituneiden tuotannon ja toiminnanohjauksen järjestelmien perustana. Yksi suurimmista 5G-verkon sekä -teknologian kehittymisen ajureista on koneiden välisen kommunikaation, Internet-of-Things (IoT), kehittyminen (Mattison 2017). Jatkuvasti kehittyvät ja nopeutuvat tietoliikenneverkot mahdollistavat reaaliaikaiseen kuvaan sekä nopeaan mittaus- ja ohjaussignaaliin perustuvat toimintatavat ja jopa etäohjausta hyödyntävät uudet teknologiset ratkaisut niin maatilojen talouskeskuksissa, peltolohkoilla kuin metsäpalstoilla.

Uuden sukupolven tietoliikenneteknologioita on otettu tasaisesti käyttöön noin 10 vuoden välein. Kehityksen voidaan katsoa alkaneen 1G-verkoista, jotka toivat markkinoille ensimmäiset matkapuhelimet vuonna 1982. Vastaavasti

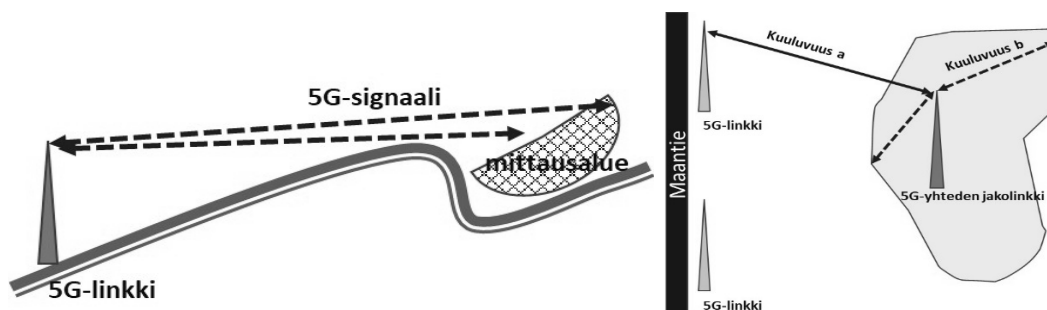
ensimmäiset 2G teknologiaa hyödyntävät matkapuhelimet tulivat markkinoille 1992 ja niitä seurasi 3G-teknologia vuonna 2001. Ensimmäiset standardisoidut 4G-teknologiaa hyödyntävät ratkaisut otettiin käyttöön vuonna 2012 ja nyt on 5G-teknologian aika. Jokaisen uuden teknologiasukupolven on tuotettava merkittäviä toiminnallisia parannuksia sekä tiedonsiirtonopeuden kasvua edelliseen sukupolveen verrattuna, jotta investoiminen uuteen teknologiaan olisi järkevää. Yksi 5G-verkoon liittyvistä vaatimuksista on laajempi kattavuus sekä kattavuuden reuna-alueiden stabiilimpi kuuluvuus ja toiminta kuin aikaisemman 4G-sukupolven teknologioilla (Shinde et al. 2016).

Käytännössä Sandhyan ym. (2016) esille nostama 5G-teknologian kehittämisvaiheen vaatimustavoitteen laajempi kattavuus ja eteenkin reuna-alueiden stabiilisuus on mielenkiintoinen tutkimuskohde, koska uudet tehokkaaseen tiedonsiirtoon pystyvät 5G-teknologiaa hyödyntävät tietoliikenneverkot rakennetaan kattaviksi maanteitä noudattaen. Tietoliikenneinvestoinnit saadaan kannattaviksi helpoiten siellä missä on paljon käyttäjiä ja siten siirrettävää dataa on enemmän. Siksi alemman tieverkon ja etenkin yksityisteiden alueilla näiden tietoliikenneverkkojen käytettävyyden selvittäminen on mielenkiintoista. Tavoitteena oli selvittää, pystytäänkö menetelmällä löytämään raja-alueita, joilla 5G-verkon kuuluvuus ja siten käytettävyys alkaa heikkenemään olennaisesti. Digitalisaation mahdollistamat tiedon keräämisestä ja käytöstä syntyvät tietoliikenneyhteyksien laatuun ja saatavuuteen liittyvät rajoitteet ja mahdollisuudet tulevat luomaan tulevaisuudessa biomassan hyödyntämiselle toisen merkittävän infrastruktuuritekijän perinteisen tieverkon lisäksi. Vain pieni osa maatalojen talouskeskuksista sekä peltojen ja metsälöiden pinta-aloista sijaitsee vilkkaasti liikennöityjen maanteiden varsilla, joten 5G-verkon kuuluvuuden ja siten käytettävyyden 5G-verkon palveluntarjoajien kuuluvuuskarttoja tarkempi ennustamismenetelmä olisi tärkeä apuväline.

Materiaali ja menetelmät

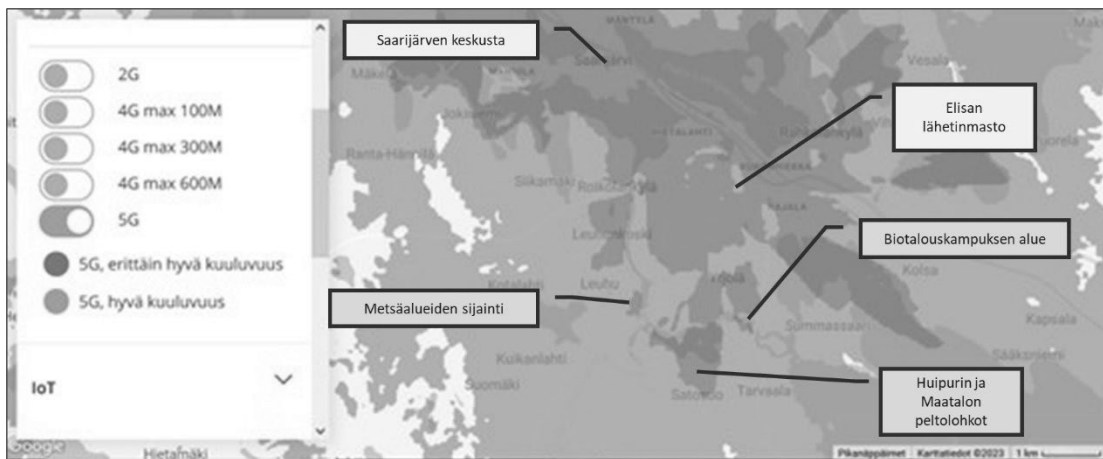
Perusrakenteeltaan 5G-verkko koostuu tukiasemista, joita Kuvassa 1 kutsutaan 5G-linkkeiksi. Ne ovat fyysisesti yhdistetty valokuituverkkoon. Tukiasema muodostaa radioyhteyden 5G-verkon toimialueella sijaitsevaan verkon käyttäjän päätelaitteeseen. Verkon käyttäjän lähettäessä dataa siirtyy tieto päätelaitteen antennista mikroaaltosäteilynä tukiasemalle, josta data siirretään valokuituverkkoa pitkin valopulsseina palveluntarjoajan servereille.

Tutkimuksessa 5G-verkon kuuluvuuden takareunan tunnistamiseen maasto-olosuhteissa käytettiin signaalin kenttävoimakkuuden mittausta. Kenttävoimakkuudella tarkoitetaan tukiasema-antennilta vastaanotetun signaalin tehoa tietyssä sijainnissa. Erilaisista 5G-signaalin laatuparametreista käytettäväksi valittiin RSRP (Reference Signal Reference Power), joka ilmaisee vastaanotettavan signaalin tehotasoa kanavaakohtaisesti. Friisin yhtälön mukaan signaalin vastaanotettu teho on kääntäen verrannollinen käytetyn taajuuden ja matkan neliöön. Antennien välisen etäisyyden ja käytetyn lähetystaajuuden ohella maaston esteet kuten mäet ja notkot, puusto, rakennukset sekä sääolosuhteet vaikuttavat 5G-signaalin etenemiseen (ITU-R 2016). Tutkimuksessa mitattiin kenttävoimakkuuksia kahdessa erilaisessa kohde-esimerkissä, joista ensimmäisessä mitattiin kaupallisen palveluntarjoajan 5G NSA-verkon kuuluvuutta kuvan 2 mukaisesti erilaisissa maa- ja metsätalouskohteissa. Tavoitteena oli selvittää, voidaanko RSRP-arvoa hyödyntäen löytää kohdealueilta vertikaalisia vyöhykkeitä, joilla 5G-signaalin kuuluvuus olisi riittävä mahdolliseen signaalin jakoon kohteessa (Kuva 1). Toisessa kohde-esimerkissä mitattiin paikallisesti toteutetun 5G NR-verkon kuuluvuutta vaihtelevien maastokorkeuksien alueilla tavoitteena simuloida työkoneseen asennetun lähetinantennin kenttävoimakkuuden vaihteluita etäisyyden ja maastokorkeuden vaihdella (Kuva 1).



Kuva 1. Mittausperiaatteet maaston esteiden vaikutuksen havaitsemiseksi 5G-signaalin kuuluvuuteen

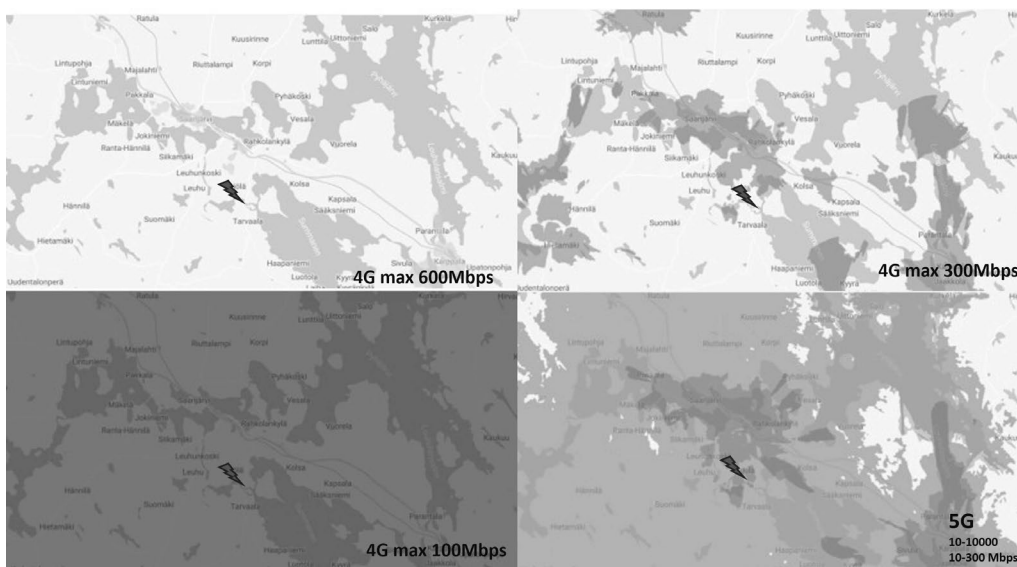
Palveluntarjoajat esittävät 5G-verkojensa peittoalueet kuuluvuuskarttoina. Tällöin viitataan laajaan useasta tukiasemasta koostuvaan langattoman tietoliikenneverkon toiminta-alueeseen, jonka sisällä kentänvoimakkuus vaihtelee tietyissä rajoissa (Kuva 2 ja Kuva 3). Kuuluvuuskarttojen peittoalueet lasketaan tukiasemien lähetystehojen ja korkeuden sekä antennien keilojen suuntauksen ja muodon perusteella huomioiden maaston korkeusvaihtelut ja muut merkittävät esteet. Kuuluvuuskarttojen ja alueellisten ilmakuvien avulla pyrittiin määrittelemään sekä kaupalliselle 5G NSA -verkolle että paikalliselle 5G NR -verkon kuuluvuusalueille sellaisia alueita, joissa esimerkiksi maaston muodot, rakennukset, puut ja muut esteet voivat heikentää signaalin voimakkuutta ja aiheuttaa häiriöitä yhteyksiin. Kuvassa 2 esitetyt Biotalouskampuksen, metsäalueiden sekä Huipurin ja Maatalon peltolohkot muodostivat koealueet erittäin hyvän ja hyvän kuuluvuuden raja-alueilla.



Kuva 2. Elisan 5G NSA -verkon kuuluvuuskartta Biotalouskampuksen lähialueella (muokattu <https://elisa.fi/kuuluvuus/>, 8/2023)

Tulokset

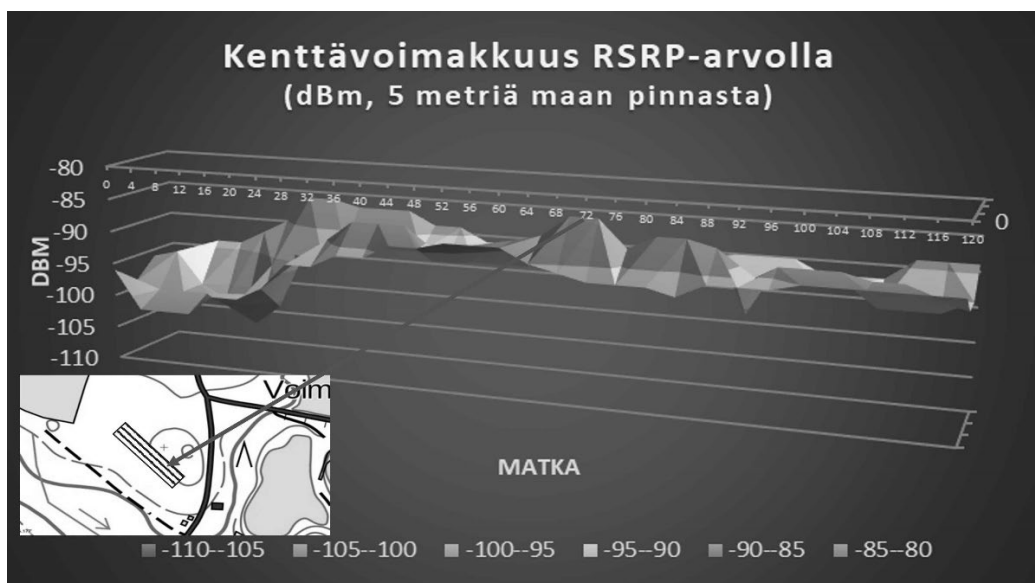
Saarijärven seudun maastolle on tyypillistä vaarojen, notkojen ja järvien vuorottelu, jolloin maastoon syntyy runsaasti signaalin hyvän kuuluvuuden katvealueita. Tämä näkyy Kuvan 3 kuuluvuusaluekartoissa 5G peittoalueen selkeänä tähtimäisenä hyvän kuuluvuuden alueena. Jos 5G NSA -verkon hyödyntämissovellukset ovat vaativat, edellyttäen lähes reaaliaikaista tiedonsiirtoa, maastossa pienetkin korkeuserot voivat heikentää signaalin kuuluvuuden tasolle, jolla käytetty yhteys siirtyy kuuluvampaan 4G LTE -verkkoon. 5G NSA käyttää 4G-verkkoa yhteyden muodostamiseen päätelaitteisiin ja 5G-taajuutta hyödynnetään varsinaiseen datan siirtoon.



Kuva 3. Elisan 4G/5G NSA -verkkojen kuuluvuuskartat Biotalouskampuksen lähialueella (muokattu <https://elisa.fi/kuuluvuus/>, 8/2023)

5G NSA -verkon kuuluvuutta ja siten verkon käytettävyyttä mitattiin signaalin kenttävoimakkuuden muutoksilla kolmiulotteisissa mittausmatriisissa, jonka mukautui maanpinnan korkeuskäyrien muutoksiin (Kuva 1) mittauskorkeuksien ollessa 2 m, 3.5 m ja 5 m. Kenttävoimakkuudella tarkoitetaan 5G-tukiasema-antennilta vastaanotetun signaalin tehoa tietyssä sijainnissa. Kenttävoimakkuuden RSRP-arvo (dBm) kertoo vastaanotetun signaalin vaimenemisen. 5G-signaalin erinomaisen kuuluvuuden rajana voidaan pitää alle -84 dBm tasoa. Signaalin kuuluvuus on hyvällä tasolla, kun vaimeneminen on välillä -85 – -102 dBm. 5G-signaalin vaimenemisen ollessa yli -102 dBm:n tasolla yhteyttä pidetään huonona. Signaalin tehon heikentyessä tietoliikenteen yhteysvirheiden määrä kasvaa, jolloin applikaatiot joutuvat lähettämään samaa viestiä yhä uudelleen varmistaakseen riittävän laadukkaan tiedonsiirron ja samalla saavutettava tiedonsiirtonopeus laskee (Kutila ym. 2020, Barb ja Otesteanu 2020).

Kuvassa 4 on esitetty 5 metrin mittauskorkeudelta mitattu signaalin vaimeneminen RSRP-arvoina metsäisessä mittauskohteessa 2.5 km päässä Elisan 700 MHz:n lähetystaajuudella toimivasta 5G-tukiasemasta. Mittausjärjestelyllä pyrittiin jäljittelemään ensimmäisen kohde-esimerkin mukaisen käyttötarkoituksen tilannetta. Kun tarkastellaan Kuvassa 4 esitettyjä maastomittauskohteen kenttävoimakkuusarvoja 5 metrin mittauskorkeuksilla, voidaan havaita, että erittäin hyvän kuuluvuuden taso saavutetaan toisella mittauslinjalla 68 ja 75 metrin välillä. Vastaavasti kolmannella ja neljännellä mittauslinjalla on 0–25 metrin välillä mitattu suuria jopa yli -105 dBm vaimennuksia. Alemmilla 2 metrin ja 3.5 metrin mittauskorkeuksilla mitatut kenttävoimakkuusarvojen vaimentumiset nousivat koko mittausmatriisin alueella yli -100 dBm:n. Myös muilla metsä- ja peltokohteilla tehdyissä mittauksissa vastaavalla tavalla pystyttiin löytämään vyöhykkeet eri laatutasoisille signaaleille. Erittäin hyvän kuuluvuuden tasot alkoivat monissa kohteissa myös jo 2 metrin mittausasolta ja kattoivat jo 3.5 metrin korkeudessa koko kohdealueen kokonaan. Vastaavasti heikon kuuluvuuden alueita löytyi yhtä kohdealuetta lukuun ottamatta kaikissa muissa kohteissa, ja ne eivät läheskään aina toteutuneet kohdealueen pintamallin mukaisesti. Säätilan vaikutuksia mittaus tuloksiin ei pystytty todentamaan.



Kuva 4. 5G NSA verkon maastomittauskohteen kenttävoimakkuusarvoja 5 metrin mittauskorkeuksilla

5G SA -verkon testejä varten toteutettiin Digitan Privaattiverkkojen mobiilia testiympäristöä hyödyntäen erillisverkko Biotalousinstituutin alueelle. Tällä koejärjestelyllä pyrittiin jäljittelemään toisen kohde-esimerkin mukaista käyttötarkoitusta eli liikkuvan työkoneneen kuuluvuustarkastelua. 5G SA -verkko hyödyntää 5G NR -runkoverkkoa, jolloin on mahdollista toteuttaa esim. verkon viipalointi ja siten toiminnallisuuksien joustavan resurssointi tarpeen mukaan. Verkkoa hyödyntävien laitteiden viive olisi alle 1 ms mahdollistaen mm. ajoneuvojen etöohjauksen. Erillisverkon toteutuksessa käytettiin 160° lähetyскеilla 9 m:n korkeudella. Kuvassa 5 kolme tummaa aluetta kuvaavat paikkoja, joilla kenttävoimakkuuden mittaustulokset (RSRP) kahden metrin korkeudella laskivat alle -102 dBm:n. Vastaavasti Kuvan 5 keskellä oleva vaalealla reunaviivalla korostettu hyvin vaihtelevan muotoinen alue on erinomaisen kuuluvuuden alue, jossa suoralla yhteydellä 5G NR -verkkoon olisi mahdollista operoida tehtäviä, joissa tarvitaan lähes reaaliaikaista yhteyttä.



Kuva 5. 5G SA -verkon mittauskohteen kenttävoimakkuuden heikon kuuluvuuden (RSRP) alueet 2 metrin mittauskorkeudella

Kuvan 5 erinomaisen kuuluvuuden alueen yläpuolella olevat heikon kuuluvuuden alueet johtuvat maaston korkeuseroista ja ne sijaitsevat painanteissa. Alapuolella heikon kuuluvuuden alue johtuu tukiaseman yhdeksän metrin korkeudesta ja korkeasta puustoisesta kallioharjanteesta välimaastossa. Myös Biotalouskampuksen lämpökeskus-rakennuksen vaikutus näkyy erinomaisen kuuluvuuden alueen rajan kiilana tukiasemalta tarkasteluna suunnassa klo 11. Siirryttäessä 3.5 m:n mittauskorkeuteen yläpuolen heikon kuuluvuuden alueet hävisivät kokonaan. Siirryttäessä 5 m:n mittauskorkeuteen alapuolenkin heikon kuuluvuuden alue oli pienentynyt siten, että siitä oli jäljellä vain noin aarin kokoinen alue Kuvan 5 heikkoa kuuluvuutta osoittavan alueen vasemmassa reunassa.

Tulosten tarkastelu

Tutkimuksen tavoitteena oli testata kenttävoimakkuuden mittaamisen soveltuvuutta 5G-signaalin kuuluvuuden takarajan havaitsemiseen maasto-olosuhteissa. Mittausmenetelmänä päätelaitteella, Samsung S23, ja kenttävoimakkuuden eri mittausohjelmistoilla tehdyt mittaukset suunnitelluilla mittauskorkeuksilla 2 m, 3.5 m ja 5 m osoittautuivat toimiviksi ratkaisuksi. Sekä kaupallisella 5G NSA -verkolla että erillisverkkototeutuksena tehdyllä 5G SA -verkolla saatiin selville kohde-esimerkkityyppisten mukaiset kuuluvuuden tasoalueet.

Mittauskorkeudet toteutettiin jatkettavalla mittausvarrella, jonka käytettävyys varsinkin peitteisessä maastossa oli hankalaa. Pelto-olosuhteissa mittausvarret toimivat hyvin, mutta päätelaitteen asentoon mittavarren päässä on kiinnitettävä huomiota, sillä päätelaitteen antenni pitää pystyä suuntaamaan samaan suuntaa kaikissa mittauspisteissä. Varsinkin tuulisina mittauspäivinä päätelaitteen kallistelu mittavarren päässä aiheutti poikkeamia mittaustuloksiin. Samoin päätelaitteen antennin ja tukiaseman väliin tulevien lähiesteiden mahdollinen vaikutus tulee ottaa huomioon päätelaitetta kiinnitettäessä esim. työkoneseen. Päätelaitteen antennin asento on huomioitava myös käytettäessä dronea mittauslinjojen ja -korkeuksien toteutukseen. Tässä tutkimuksessa dronen käytöstä luovuttiin, koska käytettävissä ei ollut RTK-korjattua paikannusta käyttävää dronea, joten mittauslinjat ja -korkeudet eivät olisi pysyneet tavoitteellisella tasolla.

Johtopäätökset

Testattu menetelmä ja käytössä olleet päätelaitteet sekä mittausohjelmistot osoittautuvat käyttökelpoisiksi tavoitteena olleen 5G-verkon kuuluvuustasojen määrittämisessä maasto-olosuhteissa. Koejärjestelyissä saatiin rakennusten, metsän puuston sekä vaihtelevan maan pinnan korkeuserojen vaikutukset todennettua 5G-verkon signaalin kuuluvuuteen mittaustilanteessa. Tämä näkyi em. esteiden taakse muodostuneina alueina, joissa signaalin kuuluvuus mitattiin simulointimalleista poikkeavalle alemmalle tasolle, jolla 5G-verkon yhteys ei enää riittäisi luotettavaan ja nopeaan tiedonsiirtoon.

Käytettävyyttä tarkasteltaessa mittausmastoon kiinnitetty mittalaite oli hankala käyttää varsinkin peitteisessä metsämaastossa. RTK-korjausta hyödyntävän dronen käyttö mittauslinjojen ja -korkeuksien toteutukseen nopeuttaisi mittausjärjestelyjä huomattavasti, mutta samalla olisi kiinnitettävä erityistä huomiota päätelaitteen antennin asentoon ja suuntaukseen 5G-tukiasema huomioiden.

Jotta digitalisaation hyödyt konkretisoituisivat mahdollisimman hyvin myös biomassan kasvua hyödyntävien ritysten näkökulmasta, on tärkeää tunnistaa jo tuotantorakenteita suunniteltaessa tiedon keräämiseen ja käyttöön tarvittavien tietoliikenneyhteyksien laatuun ja saatavuuteen liittyvät rajoitteet ja mahdollisuudet. Tämä korostuu varsinkin niillä alueilla, jotka eivät sijaitse vilkkaasti liikennöityjen maanteiden läheisyydessä, koska 5G-verkon kuuluvuuden ja käytettävyyden varmistaminen on edellytys monien uusien sekä maa- että metsätalouden teknologisten ratkaisujen tehokkaalle käytölle. Tässä artikkelissa kuvattu toimintatapa 5G-verkon kuuluvuuskarttoja tarkempaan ennustamiseen tilatason näkökulmasta on askel eteenpäin tässä työssä.

Kirjallisuusluettelo

Barb, G. & Ottesteanu, M. 2020. 4G/5G: A Comparative Study and Overview on What to Expect from 5G. In: 2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). Milan, Italy. <https://doi.org/10.1109/TSP49548.2020.9163402>

ITU-R 2016. Calculation of free-space attenuation. International Telecommunication Union. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-3-201611-S!!PDF-E.pdf

Kuttila, M., Kauvo, K., Aalto, P., Garrido, M.V., Niemi, M. & Zheng, Y. 2020. 5G Network Performance Experiments for Automated Car Functions. In: 2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF). Bangalore, India. <https://doi.org/10.1109/5GWF49715.2020.9221295>

Mattison, S. 2017. Overview of 5G requirements and future wireless networks. In: ESSCIRC 2017 - 43rd IEEE European Solid State Circuits Conference. Lueven, Belgium. <https://doi.org/10.1109/ESSCIRC.2017.8094511>

Shinde, S. Nikam, A. & Joshi, S. 2016. An overview of 5G technology. International Research Journal of Engineering and Technology 3: 2390–2394. <https://www.irjet.net/archives/V3/i4/IRJET-V3I4475.pdf>