

Selvitys GNSS-palvelujen tarjonnasta ja toiminnasta

Sanna Kaasalainen
Maija Mäkelä
Mika Saajasto
Martti Kirkko-Jaakkola
Heidi Kuusniemi

Tiivistelmä.....	4
1. Tausta	5
1.1. Huoltovarmuuskriittisten toimintojen turvaaminen Suomessa.....	5
1.1.1. Aika- ja paikkatiedon vaikutus kriittiselle infrastruktuurille ja toiminteille	5
1.2. Tämän selvityksen tavoitteet	5
2. GNSS-järjestelmät.....	6
2.1. Perusteet	6
2.2. Maailmanlaajuiset järjestelmät.....	8
2.2.1. Galileo.....	8
2.2.2. GPS.....	10
2.2.3. GLONASS.....	11
2.2.4. BeiDou	11
2.3. Muut paikalliset järjestelmät.....	12
2.3.1. QZSS.....	12
2.3.2. NAVIC.....	12
2.4. Satelliittipaikannusta avustavat palvelut.....	13
2.4.1. Avustejärjestelmät.....	13
2.4.2. Korjauspalvelut.....	15
2.4.3. Satelliiteista riippumattomat paikannusjärjestelmät.....	16
2.5. GNSS aikatiedon lähteenä	19
2.5.1. Aikatieto Suomessa	21
2.5.2. Aikatieto kansainvälisesti	23
2.6. Häiriöt ja tahallinen häirintä.....	24
2.6.1. Häiriöt.....	24
2.6.2. Tahallinen häirintä ja harhautus.....	26
2.7. Arktisen alueen erityispiirteitä paikannuksessa	28
3. Kotimaiset ja kansainväliset toimijat.....	29
3.1. Kansainväliset toimijat.....	29
3.1.1. Esimerkkejä GNSS-palvelujen hyödyntäjistä	30
3.1.2. Kansainvälinen yhteistyö.....	32
3.1.3. Regulaatio ja valvonta	32
3.2. Kotimaiset toimijat ja niiden roolien kuvaus.....	34

3.2.1.	Yritykset	35
3.2.2.	Viranomaiset ja valvonta	36
3.2.3.	Tutkimuslaitokset & korkeakoulut	36
3.2.4.	Tarpeet ja tarkkuus- sekä luotettavuusvaatimukset eri käyttökohteissa	37
3.3.	Kansallinen yhteistyö.....	41
3.3.1.	GNSS-dataa hyödyntävät oheispalvelut ja tuottajat	41
4.	Tulokset	42
4.1.	Havainnot ja johtopäätökset	42
4.1.1.	Mikä toimii hyvin?	42
4.1.2.	Mitä kehitettävää	43
4.1.3.	Puuttuvat roolit ja toimijat	43
4.1.4.	Muuta	44
4.2.	Menetelmiä aika- ja paikkatiedon sekä kriittisten toimien turvaamiselle	44
4.2.1.	Tulevaisuuden kehitysnäkymät	45
5.	Yhteenveto	46
6.	Sanastoa	47

Tiivistelmä

Tausta ja tavoitteet: tavoitteena oli kuvata GNSS-palveluiden tarjonta ja toiminta Suomessa huoltovarmuskriittisten toimintojen kannalta.

Menetelmät: selvitys pohjautuu keskeisimpien sidosryhmien haastatteluihin. Näitä ovat GNSS:iin liittyvät viranomaistahot, turvallisuusviranomaiset, keskeisimmät yritykset, tutkimuslaitokset ja korkeakoulut. Lisäksi on hyödynnetty kansallisia ja kansainvälisiä aineistoja ja raportteja, sekä Suomen Akatemian kriisivalmiuden ja huoltovarmuuden tutkimusohjelmasta rahoitetun tutkimushankkeen loppukäyttäjänälyysisiä. Lisäksi olemme hyödyntäneet sitä uusinta tietoa, jota on saatavissa navigoinnin ja paikannuksen kansainvälisistä tutkimusverkostoista ja kokouksista.

Tulokset ja johtopäätökset: GNSS-palveluiden nykytilan lisäksi selvityksessä tuli esiin huoltovarmuuden kannalta tärkeitä tarpeita ja puutteita, sekä mahdollisia ratkaisuehdotuksia niihin. Näitä ratkaisuja on pohdittu sekä loppukäyttäjähastatteluissa että uusimman tutkimustiedon pohjalta. Keskeisimpiä johtopäätöksiä olivat:

- Paikannus- ja aikapalveluiden tarpeen ja siten GNSS:iin liittyvien markkinoiden kasvu jatkuu edelleen, ja sen myötä korostuu myös näiden palveluiden haavoittuvuus
- Galileo-järjestelmä, erityisesti PRS-signaali, parantaa osaltaan GNSS:n saatavuutta
- Suomessa satelliittipaikannukseen liittyvä toiminta ja viranomaistehtävät ovat hajonneet eri sektoreille ja asiantuntijoista on pulaa
- Kehitettävää:
 - GNSS:aa täydentävä aikasykronointipalvelu erityisesti finanssialan ja tiedonsiirron tarpeisiin
 - Tehokkaampi ja siten edullisempi tapa häirinnän lokalisaatioon
 - Laajempi GNSS-tilannekuvapalvelu kriittisten toimijoiden käyttöön

1. Tausta

1.1. Huoltovarmuuskriittisten toimintojen turvaaminen Suomessa

Aika- ja paikkatiedon tärkeys kriittiselle infrastruktuurille ja sen toiminnoille kasvaa jatkuvasti, ja tätä tietoa saadaan pääasiassa paikannussatelliittien (GNSS) tuottamana. Samaan aikaan satelliittipaikannuksen häiriöistä on tullut jatkuva ja maailmanlaajuinen ongelma, johon on haettu ratkaisuja sekä kansainvälisellä että kansallisella tasolla. Häiriöitä on sekä tahallisia (rikollinen toiminta) että tahattomia (kuten ionosfäärin häiriöt tai muista radiolaitteista tulevat signaalit). Tahallista häirintää (Radio Frequency Interference, RFI) on kahdenlaista: radiohäirintää (jamming), joka peittää signaalin niin, ettei paikannus onnistu, tai harhautusta (spoofing), jossa vastaanottimelle lähetetään saman tyyppistä mutta väärennettyä signaalia.

Euroopan oma satelliittipaikannusjärjestelmä Galileo pyrkii turvaamaan GNSS-palvelujen saatavuutta erilaisilla varmennetuilla (Commercial Authentication Service, CAS) ja viranomaispalveluilla (Public Regulated Service, PRS)¹. Tämän lisäksi sensori- ja hybridipaikannus on jatkuvasti kehittyvä ala, jota mm. autoteollisuus edistää. Paikkatiedon lisäksi entistä tärkeämmässä roolissa on aikatieto, joka on monelle sovellukselle jopa kriittisempi kuin (tarkka) paikanmääritys. Aikakriittisiä toimintoja ovat teleoperaattorit, sähkö- ja energiaverkot sekä finanssiala. Näistä syistä johtuen satelliittipaikannuksesta on kehittynyt huoltovarmuuden kannalta kriittinen teknologia, ja tämä tulee korostumaan entisestään esim. älyliikenteen ja IoT:n (Internet of Things) yleistyessä. Satelliittipaikannuksen saatavuushaaste korostuu arktisella alueella, jossa ionosfäärin ilmiöt ovat voimakkaampia.

1.1.1. Aika- ja paikkatiedon vaikutus kriittiselle infrastruktuurille ja toiminteille

GNSS:n huoltovarmuutta on viime aikoina selvitetty useilla tahoilla. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom on julkaissut vuonna 2020 kriittisen infrastruktuurin EGNSS-vaikuttavuusarvion (KIEVA)², jossa koottiin yhteen GNSS-sijainti- ja aikatietopalveluiden käyttötarpeita kriittisessä infrastruktuurissa. Maanmittauslaitoksen (MML) Paikkatietokeskus (FGI) tutkii satelliittipaikannuksen huoltovarmuutta ja saatavuutta kriittisissä infrastruktuureissa Suomen Akatemian 2020 myöntämässä tutkimushankkeessa ”REASON - Paikkatiedon Turvallisuus ja Saatavuus Kriittisille Infrastruktuureille”³. Maaliskuussa 2021 avattiin myös MML:n ja Traficom:n yhteistyössä kehittämä satelliittipaikannuksen laadunvalvontapalvelu GNSS-Finland Service⁴.

1.2. Tämän selvityksen tavoitteet

Huoltovarmuuskeskus on teettänyt tämän selvityksen osana Digitaalinen turvallisuus 2030-ohjelmaa ja selvityksen tavoitteena oli tarjouspyynnön ja projektisuunnitelman mukaisesti tuottaa kuvaus GNSS-palvelujen tarjonnasta ja toiminnasta. Kuvaus on osa selvitystä huoltovarmuuskriittisten toimintojen GNSS-palvelujen merkityksestä ja turvaamisesta Suomessa. GNSS-palvelut on eritelty

¹ European GNSS Service Centre (EUSPA) [Online]: <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services>

² Kieva-raportti: TRAFICOM/6387/09.03.07/2020

³ REASON-projekti [Online]: <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/reason-paikkatiedon-turvallisuus-ja-saatavuus-kriittisille-infrastruktuureille>

⁴ GNSS-Finland service [Online]: <https://gnss-finland.nls.fi/>

paikannustiedon tuottamiseen (GNSS-järjestelmät ja niiden avustusjärjestelmät sekä esim. aikapalvelu) ja palveluihin, jotka ovat GNSS:n tuottamasta paikka- tai aikatiedosta riippuvaisia (LBS, Location Based Services). Tällaisia huoltovarmuuden kannalta kriittisiä palveluita ovat mm. sähköverkot, maksuliikenne, tiedonsiirto, poliisi- ja pelastustoimi sekä meri- ja lentoliikenne. Tämän selvitys antaa yleiskuvan näistä paikka- ja aikatietoon perustuvista palveluista ja niiden kokonaistilanteesta. Tarjouspyynnön mukaisesti projektin lopputuloksena luvuissa 2 ja 3 kuvataan:

- Kansainväliset GNSS-palvelujen tarjoajat ja tarjonta
- Kotimaisten toimijoiden ja niiden roolit
- Sovellettava regulaatio
- Kotimaisten toimijoiden harjoittama kansallinen yhteistyö
- Kotimaisten toimijoiden harjoittama kansainvälinen yhteistyö

Tärkeimpinä tiedonlähteinä tätä raporttia varten ovat olleet Navigoinnin ja paikannuksen osaston verkostot sekä viime syksynä alkanut Suomen Akatemian kriisivalmiuden ja huoltovarmuuden tutkimusohjelman tutkimushanke REASON, jossa on kerätty tietoa GNSS-toimijoilta, käyttäjiltä ja laajasti eri viranomaisilta. Myös tätä selvitystä varten on haastateltu eri tahoja ja pyydetty lisätietoa niin viranomaisilta (Traficom, VTT MIKES, Ilmatieteen laitos) kuin yrityksiltä (esim. finanssialalta ja lisäksi Fintraffic) ja yliopistoiltakin (Aalto-yliopisto, Tampereen yliopisto). Olemme myös hyödyntäneet kansainvälisiä verkostojamme ja Euroopan paikannusviraston (nykyinen avaruushallintovirasto EUSPA) tuottamia raportteja.

2. GNSS-järjestelmät

2.1. Perusteet

Paikannussatelliitit kiertävät Maata noin 20 000 kilometrin korkeudella ja lähettävät kellonaikaisignaalia. Satelliittisignaalin ilmoittaman lähetysajan ja vastaanottimen arvioiman saapumisajan erotuksesta saadaan arvio signaalin kulkuajasta, ja tämän kulkuajan perusteella voidaan määrittää kunkin satelliitin etäisyys vastaanottimesta. Satelliitit myös lähettävät tietoa omasta sijainnistaan. Kun signaali voidaan havaita vähintään neljästä eri paikannussatelliitista, pystytään ratkaisemaan paikannusvastaanottimen sijainti ja vastaanottimen kellon poikkeama paikannusjärjestelmän ajasta. Kellopoikkeaman ratkaiseminen on oleellinen osa satelliittipaikannusta, ja tästä syystä paikannusjärjestelmät soveltuvat myös tarkan aikatiedon välittämiseen.

Vastaanottimesta satelliitteihin tehtävissä etäisyysmittauksissa mittausvirheet koostuvat pääasiassa ilmakehän aiheuttamista virheistä, signaalin heijastumisesta aiheutuvasta virheestä sekä laitteistovirheistä ja satelliitin kelloon ja sijaintiin liittyvistä mallinnusvirheistä. Virheiden suuruusluokat on esitetty Taulukossa 1. Näistä merkittävimpiä ovat ilmakehään ja signaalin heijastumiseen liittyvät virheet. Satelliitin rata- ja kelloparametrien mallinnusvirheitä voidaan korjata erilaisilla avuste- ja korjausjärjestelmillä, joita käsitellään Kappaleessa 2.4.

Ilmakehässä troposfääri ja ionosfääri vaikuttavat paikannussignaalin kulkuun. Troposfäärin vaikutus on kuitenkin melko vähäinen, ja sen aiheuttamalla virheellä on merkitystä pääasiassa suurta paikannustarkkuutta vaativissa sovelluksissa. Ionosfääri, joka koostuu varautuneista hiukkasista, aiheuttaa suurimman mittausvirheen. Ionosfäärivirhettä voidaan korjata käyttämällä kaksitaajuusmittauksia tai erilaisia ionosfäärimalleja, joita käsitellään Kappaleessa 2.6.

Signaalin heijastumiseen vaikuttaa ympäristö, jossa paikannusvastaanotin on. Avoimessa ympäristössä heijastumista tapahtuu vähän, kun taas esimerkiksi kaupunkiympäristössä korkeiden rakennusten läheisyydessä heijastuminen vaikeuttaa paikantamista merkittävästi. Tästä syystä heijastumisen aiheuttama virhe voi olla joissain tilanteissa huomattavasti suurempi kuin Taulukossa 1 on esitetty. Signaalin heijastumisen vaikutuksia voidaan lieventää vastaanottimen suunnittelussa, esimerkiksi herkkyydessä tunnistaa ensimmäisen saapunut heikompi suora signaali voimakkaamman heijastuneen sijaan.

Taulukko 1: Eri virhelähteiden suuruusluokka yhden taajuuden C/A-etäisyysmittauksissa.⁵

Segmentti	Virhelähde	1 σ -virhe [m]
Avaruus/maa	Kelloparametrien mallinnusvirhe	1.1
	Rataparametrien mallinnusvirhe	0.8
Käyttäjä	Ionosfäärivirhe	7.0
	Troposfäärivirhe	0.2
	Vastaanottimen kohina ja resoluutio	0.1
	Signaalin heijastuminen	0.2

GNSS-signaalien laatua ja eri virhelähteiden hetkellisiä vaikutuksia voidaan valvoa, jos käytössä on vastaanottimia, joiden sijainnit tunnetaan tarkasti. Tähän soveltuu esim. Suomen valtion omistama FinnRef-mittausasemaverkko, joka on alun perin perustettu kansallisen koordinaattijärjestelmän ylläpitoon. FinnRef koostuu noin 50 havaintoasemasta⁶, joissa on korkealuokkaiset GNSS-vastaanottimet ja joiden antennien sijainnit on mitattu tarkasti. Jokainen asema mittaa samoja suureita kuin mikä tahansa GNSS-vastaanotin, eli etäisyyttä ja kantoaallon vaihetta eri satelliitteihin. Näiden mittauksen pohjalta voidaan sekä havaita maankuoren liikettä (koordinaattijärjestelmän ylläpitämiseksi) että erotella eri mittausvirhelähteitä, koska jokaista satelliittia kyetään havaitsemaan monesta eri suunnasta: tällöin esim. satelliitin rataparametrien virheet voidaan erottaa ilmakehän aiheuttamista mittausvirheistä.

FinnRef-verkon tuottamaan mittausdataan perustuu paikannuspalvelu FINPOS⁷, joka tarjoaa sekä virhekorjaustietoa paikannustarkkuuden parantamiseksi että pääsyn alkuperäisiin FinnRef-asemien mittausdatoihin. FINPOS-paikannuspalvelu koostuu kolmesta erillisestä palvelusta: kaikille avoin DGNSS-palvelu, jota voidaan hyödyntää reaaliajassa, RINEX-palvelu (Receiver Independent Exchange Format - kaikille avoin latauspalvelu) sekä RTK-palvelu (Real Time Kinematic), joka on toistaiseksi saatavilla lähinnä tutkimusorganisaatioille. Kaupalliset toimijat ostavat yleensä RTK-palvelun sitä tarjoavilta yrityksiltä, kuten Leica/Hexagon tai Geotrim. FINPOS-palvelun tarjoama paikannustarkkuus vaihtelee noin puolesta metristä (DGNSS) senttimetriluokan tarkkuuteen (jälkikäteen laskettuna RINEX-tiedostoista).

⁵ Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (2006). Understanding GPS: principles and applications. Norwood, MA: Artech House.

⁶ FinnRef GNSS-asetat [Online]: <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/tutkimustoiminta/muut-tutkimus-ja-mittausasemat/finnref-gnss-asetat>

⁷ Yleistä paikannuspalveluista [Online]: <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/finpos-paikannuspalvelu>

2.2. Maailmanlaajuiset järjestelmät

Maailmanlaajuisia paikannussatelliittijärjestelmiä on tällä hetkellä neljä: Eurooppalainen Galileo, Yhdysvaltojen GPS, Venäjän GLONASS ja Kiinan BeiDou. Huomionarvoista on, että maailmanlaajuisista järjestelmistä ainoastaan Galileo on siviilien hallinnoima, muut ovat sotilasjärjestelmiä. Galileo, GPS ja BeiDou käyttävät Code Division Multiple Access (CDMA) -tekniikkaa, jossa satelliitit lähettävät signaalia samalla taajuudella, mutta signaalit erotetaan toisistaan yksilöllisen koodimodulaation avulla. GLONASS taas käyttää Frequency Division Multiple Access (FDMA) -tekniikkaa, jossa jokaisella satelliitilla on oma lähetystaajuutensa.

Paikannusjärjestelmästä riippumatta järjestelmän toiminta voidaan jakaa avaruus-, maa- ja käyttäjäsegmentteihin. Avaruussegmenttiin katsotaan kuuluvaksi järjestelmän satelliitit, ja käyttäjäsegmenttiin paikannuspalvelun eri käyttäjäryhmät. Maasegmentin tehtävänä on esimerkiksi monitoroida satelliitteja ympäri maailman sijoitettujen monitorointiasemien avulla, huolehtia satelliittien ylläpidosta sekä määrittää satelliittien lähettämät rata- ja kellokorjausparametrit ja muu data.

2.2.1. Galileo

Galileo⁸ on Euroopan oma satelliittipaikannusjärjestelmä, jonka ensimmäiset satelliitit laukaistiin vuonna 2011. Tällä hetkellä Galileon konstellaatiossa on 22 satelliittia, ja näin ollen lähes kaikkialla maailmassa on näkyvissä yhdellä kertaa kuudesta kahdeksaan satelliittia. Tulevaisuudessa Galileo täydentyy vielä tarkkuutta ja turvallisuutta lisäävillä palveluilla.

Suomessa kuudesta kahdeksaan satelliitin näkyvyys toteutuu hyvin. GNSS-Finland -palvelun⁴ mukaan vuonna 2021 viikolla 37 (13.9.–19.9.) Utsjoen Kevolla, joka on FinnRef-mittausasemaverkon pohjoisin asema, oli näkyvissä vähintään kuusi ja parhaimmillaan kymmenen Galileo-satelliittia. Samalla viikolla Raaseporissa, joka on FinnRefin eteläisin asema, oli näkyvissä seitsemästä kymmeneen Galileo-satelliittia. Mikäli satelliitteja on vähemmän näkyvissä, paikannustarkkuus heikkenee. Jos näkyvissä on ainoastaan kolme Galileo-satelliittia tai vähemmän, paikannus pelkästään Galileoon perustuen ei ole mahdollista. Tällöin voidaan kuitenkin paikantaa käyttäen muita paikannussatelliittijärjestelmiä.

Galileo lähettää paikannussignaaleja neljällä eri taajuudella⁹, joista E1 (1575.420 MHz) ja E5a/b (1176.450/1207.140 MHz) käsittävät avoimen palvelun, ja E6 (1278.750 MHz) viranomaissignaalin ja tarkkuuspalvelun. E1- ja E5a-taajuudet ovat samat kuin GPS:n L1 ja L5. Useaa taajuutta käyttämällä voidaan mm. kompensoida ionosfäärin aiheuttamaa mittausvirhettä.

Public Regulated Service, PRS

Galileon PRS-palvelu on viranomaiskäyttöön tarkoitettu signaalin salausta hyödyntävä paikannuspalvelu, jonka on tarkoitus olla EU:ssa operatiivisessa käytössä vuoden 2024 aikana ja otetaan myös Suomessa käyttöön vuonna 2024¹⁰. Avoimeen paikannuspalveluun (Open Service, OS) verrattuna PRS ei

⁸ Galileo programme [Online]: <https://www.gsc-europa.eu/galileo/programme>

⁹ European GNSS (Galileo) Open Service, Signal-in-Space interface Control Document, Issue 2.0, January 2021. [Online]: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.0.pdf

¹⁰ Galileo-paikannusjärjestelmän viranomaispalvelu PRS käyttöön Suomessa 2024. [Online]: <https://valtioneuvosto.fi/-/10616/galileo-paikannusjarjestelman-viranomaispalvelu-prs-kayttoon-suomessa-2024>

ole yhtä herkkä häirinnälle ja harhautukselle, vaan se mahdollistaa paikannuksen todennäköisemmin myös haastavissa olosuhteissa. PRS-signaali on ominaisuuksiltaan sellainen, että sen tahaton ja ennen kaikkea tahallinen häirintä on vaikeampaa kuin avoimen palvelun signaalin. Lisäksi signaalin salauksen ansiosta paikannusvastaanottimen harhauttaminen on hyvin haasteellista ja paikannusvastaanotin voi tarkistaa, että vastaanotettu navigointisignaali todella on peräisin luotetusta lähteestä (Galileo-satelliitti). PRS-palvelun käyttöönotto tulee vaatimaan uudentyyppisen vastaanottimen. Parhaillaan on meneillään vastaanottimien tutkimus- ja kehitystyö.

Suomessa nimetty PRS-viranomainen on Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, joka vastaa mm. käyttäjien valtuuttamisesta ja tarvittavien salausavainten jakamisesta¹¹. Galileo-satelliiteista saapuvan PRS-signaalin suora käsittely vaatii vastaanottimen, joka sisältää signaalin salauksen purkamiseen tarvittavan avaimen (ns. itsenäisvastaanotin). Toinen vaihtoehto on purkaa salaus palvelimessa, johon PRS-satelliittisignaalin vastaanottaneella mobiilipäätelaitteella on tietoliikenneyhteys (ns. avustetut vastaanottimet, kuten esim. Virve 2.0 -järjestelmän mobiilipäätelaitteet tulevaisuudessa). Avustetussa vastaanotimessa ei ole salausavainta, vaan avain on laskentapalvelimessa. Tästä syystä avustettu vastaanotin joutuu turvautumaan myös avointen palveluiden signaaleihin, ja PRS toimii näiden signaalien jälkikäteenä varmistajana. Suomessa PRS:n tulevia käyttäjiä ovat viranomaisten lisäksi myös huoltovarmuuden kannalta kriittiset toimijat, kuten esimerkiksi sähköverkot, finanssiala, tietoliikenne ja logistiikka. Erityisesti 5G ja liikenteen automaatio lisäävät PRS:n tarjoaman varmennetun paikka- ja aikatiedon tarvetta.

Open Service Navigation Message Authentication (OS-NMA) ja Commercial Authentication Service (CAS)

PRS:n lisäksi myös Galileon avoimen palvelun signaaliin on tulossa sekä kaikille avoin OS-NMA- että kaupallinen CAS-todennuspalvelu. OS-NMA:n odotetaan olevan täysin toimintavalmis vuoden 2023 loppuun mennessä ja CAS:n vuoden 2025 aikana¹¹. OS-NMA perustuu TESLA-protokollaan (Timed Efficient Stream Loss-tolerant Authentication)¹². Todennuspalvelun käyttö vaatii tähän soveltuvan vastaanottimen, joka käsittelee E1-signaalin (E1B) navigointiviestin mukana lähetettyä todennusinformaatiota. Käytännössä käyttöönotto vaatii vain ohjelmistopäivityksen ja yhden julkisen salausavaimen kaikille satelliiteille. E1-signaali säilyy yhteensopivana myös sellaisten vastaanottimien kanssa, jotka eivät OS-NMA:ta tue. Todennus perustuu julkinen-yksityinen-avainpariin. Se ei vaadi jatkuvaa verkkoyhteyttä, mutta todennuksen tekeminen on melko hidasta ja voi kestää useita minuutteja¹³. OS-NMA:n pääasiallinen tarkoitus on auttaa käyttäjää varmistumaan satelliitin lähettämän navigointiviestin oikeellisuudesta ja näin auttaa ehkäisemään signaalin harhautusta. OS-NMA palvelun varmenteiden luotettavuus on verrattavissa verkkoselaimissa käytettyihin varmenteisiin, eli käyttäjä luottaa varmenteen tulevan luotetulta taholta.

¹¹ Satelliittinavigointijärjestelmien tehokas hyödyntäminen Suomessa. Toimenpideohjelma 2021–2025. (Alustava luonnos)

¹² Galileo Navigation Message Authentication Specification for Signal-in-Space Testing – v1.0 [Online]: https://www.euspa.europa.eu/simplecount_pdf/tracker?file=calls_for_proposals/annex_1-rd4.pdf

¹³ European Space Week 2020. Open Service Navigation Message Authentication. User Consultation Platform 2020. [Online]: https://www.euspa.europa.eu/simplecount_pdf/tracker?file=uploads/ucp_2020_open_service_navigation_message_authentication_0.pdf

CAS-todennus sisältyy Galileon E6-signaaliin (E6C)¹⁴, mutta sen toteutuksen yksityiskohtia ei ole vielä lopullisesti määritetty¹⁵. Maksullisessa CAS palvelussa salausavaimet lähetetään käyttäjille varmennettu-ja kanavia pitkin¹¹. Toisin kuin OS-NMA:n ja E1B-signaalin tapauksessa, E6C salataan jatkuvasti eikä signaali ole lainkaan käytettävissä ilman salausavainta¹⁶.

High Accuracy Service, HAS

HAS tulee olemaan vapaasti saatavilla oleva Precise Point Positioning (PPP) -palvelu, jossa PPP-korjauksia välitetään sekä satelliittiyhteydellä että internetin yli¹⁷. PPP:tä on käsitelty tarkemmin luvussa 2.4.2. Korjauksia tuotetaan Galileon lisäksi myös GPS:lle. HAS:n tavoitteena on mahdollistaa parempi kuin 20 cm paikannustarkkuus vaakasuunnassa ja parempi kuin 40 cm pystysuunnassa 95 % ajasta. Alkuvaiheen HAS palvelun odotetaan olevan saatavilla vuonna 2022, ja sen odotetaan olevan täysin toimintavalmis vuoden 2024 jälkeen¹⁸.

Search And Rescue, SAR

Cospas-Sarsat on satelliittipohjainen hätäsignaalien havaitsemiseen tarkoitettu järjestelmä. Sen tarkoituksena on välittää pelastusviranomaisille sijaintitietoa hätäsignaalista ja näin nopeuttaa pelastustoimia. Galileo-satelliitteihin on rakennettu tuki tälle hätäsignaalijärjestelmälle¹⁹, ja sen käyttäminen vaatii erillisen hätälähettimen. Galileon pelastuspalvelu voi myös lähettää käyttäjälle kuittauksen (Return Link Service, RLS) siitä, että hätäviesti on vastaanotettu. Cospas-Sarsat signaalien välitys on käytössä myös Suomessa, myös RLS-palvelu tulee käyttöön¹¹.

2.2.2. GPS

Global Positioning System (GPS) oli ensimmäinen maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä. Sen ensimmäiset satelliitit laukaistiin 1970-luvulla, ja vuonna 1995 se julistettiin täysin toimintavalmiiksi. GPS on Yhdysvaltojen puolustusministeriön hallinnoima, ja vuoteen 2000 saakka sen tarkkuutta siviilikäyttäjille rajoitettiin (ns. Selective Availability). GPS tarjoaa kahta paikannuspalvelua. Standard Positioning Service (SPS) käyttää taajuuksia L1, L2 ja L5 ja se on suunnattu siviilikäyttäjille. Precise Positioning Service (PPS) on tarkoitettu sotilaskäyttöön, ja käyttää taajuuksia L1 ja L2.

¹⁴ Galileo E6-B/C Codes Technical Note. [Online]: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/E6BC_SIS_Technical_Note.pdf

¹⁵ InsideGNSS. Galileo Authentication and High-Accuracy Service: Coming on Fast. Heinäkuu 2021. [Online]: <https://insidegnss.com/galileo-authentication-and-high-accuracy-service-coming-on-fast/>

¹⁶ Fernandez-Hernandez, I., G. Vecchione, and F. Díaz-Pulido. "Galileo authentication: a programme and policy perspective." 69th International Astronautical Congress. 2018. [Online]: https://www.researchgate.net/profile/Ignacio-Fernandez-Hernandez/publication/328139227_Galileo_Authentication_A_Programme_and_Policy_Perspective/links/5c458b1b92851c22a384a662/Galileo-Authentication-A-Programme-and-Policy-Perspective.pdf

¹⁷ Galileo High Accuracy Service (HAS). [Online]: <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has>

¹⁸ Galileo High Accuracy Service (HAS) Info Note. [Online]: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_HAS_Info_Note.pdf

¹⁹ Search and Rescue (SAR) / Galileo Service. [Online]: <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/search-and-rescue-sar-galileo-service>

2.2.3. GLONASS

Ensimmäiset GLONASS-satelliitit laukaistiin 1980-luvulla Neuvostoliiton toimesta, ja Venäjän jatkaessa hanketta konstellaatio koostui 24 satelliitista vuonna 1995. Vuonna 2007 GLONASSin siviilisignaalin tuli kaikkien saataville.

Muista paikannusjärjestelmistä poiketen GLONASS käyttää FDMA:ta CDMA:n sijaan²⁰. Kuten GPS myös GLONASS tarjoaa siviilikäytön SPS-palvelua taajuuskaistalla G1 (1602.0–1615.5 MHz) ja sotilas-käyttöön tarkoitettua PPS-palvelua kaistalla G2 (1246.0–1256.5 MHz). Kuitenkin uudemmat GLONASS-satelliitit, jotka on laukaistu vuoden 2011 jälkeen, käyttävät sekä FDMA:ta että CDMA:ta rinnakkain²¹. Tämän modernisoinnin tavoitteena on parantaa yhteensopivuutta GPS:n ja Galileon kanssa. GLONASS CDMA-signaalia lähetetään taajuuksilla L1, L2 ja L3 (1600.995 MHz, 1248.06 MHz ja 1202.025 MHz, joilla on sekä avoin että suljettu signaali (L1OC, L1SC jne.). Taajuudet eivät tällä hetkellä täysin vastaa GPS:n ja Galileon L1-, L2- ja L5-taajuuksia, mutta yhteensopivia L1OCM- ja L5OCM-signaaleja tutkitaan²².

2.2.4. BeiDou

Ensimmäiset vuonna 2000 laukaistut kokeelliset BeiDou-satelliitit (BeiDou-1) olivat muista konstellaatioista poiketen geostationäärisiä ja näin ollen käytettävissä vain rajoitetulla alueella. Niiden käytöstä kuitenkin luovuttiin vuonna 2012 toisen sukupolven BeiDou-2 satelliittien myötä. BeiDou-konstellaatio valmistui vuonna 2020, ja siinä on kaikkiaan 61 satelliittia²³. Satelliiteista osa on geostationäärisiä tai geosynkronisella radalla, joten ne näkyvät pääasiassa Kiinan alueella. BeiDoun taajuuksissa on 15MHz:n ero Galileoon ja GPS:aan.

BeiDoun erityispiirteenä on kahdensuuntainen kommunikointi²⁴, joka on herättänyt huolta turvallisuuden ja käyttäjien yksityisyyden kannalta. Erityisten vastaanottimien on mahdollista kommunikoida takaisin BeiDoun satelliiteille ja välittää esimerkiksi käyttäjän sijainnin tai muuta informaatiota takaisin paikannusjärjestelmälle. Tämä ominaisuus ei kuitenkaan ole käytössä suurimmassa osassa BeiDou-signaalia käyttävistä paikannusvastaanottimista, mukaan lukien kuluttajakäyttöön tarkoitetut älypuhelimissa käytetyt paikannussirut.

²⁰ FDMA:n etuna CDMA:han verrattuna on pidetty sen resilienssiä kapeakaistaista häirintäsignaalia vastaan. Nykyään kuitenkin on olemassa häirintälaitteita, jotka voivat lähettää laajakaistaista signaalia. Näin ollen FDMA:n paremmuus tässä suhteessa ei ole niin selvää. Lisäksi FDMA:n käyttö paikannusvastaanottimissa vaatii laajemman kaistan tukemisen, mikä aiheuttaa haasteita käytännön toteutukselle. Käytettäessä FDMA-signaalia tarkkuussovelluksissa (esim. PPP) laskenta monimutkaistuu useiden kantoaaltoaajuuksien vaatiessa useampien tuntemattomien ratkaisemista verrattuna CDMA:han.

²¹ Russian Institute of Space Device Engineering. GLONASS, Interface Control Document, General Description of Code Division Multiple Access Signal System, Edition 1.0, MOSCOW 2016. [Online]: <https://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-General.-Edition-1.0-2016.pdf>

²² IAIN World Congress 2015 20–23 October 2015, Prague, Czech Republic, GLONASS Status and Evolution. [Online]: <http://www.ainav.org/ainav-iwc2015/ainav-2015-keynote-lecture-revnivykh.pdf>

²³ Test and Assessment Research Center of China Satellite Navigation Office. Constellation Status. [Online]: <http://www.csno-tarc.cn/en/system/constellation>

²⁴ GPS World. BeiDou a threat to the West, but perhaps not individuals. 11.8.2020. [Online] <https://www.gpsworld.com/beidou-a-threat-to-the-west-but-perhaps-not-individuals/>

2.3. Muut paikalliset järjestelmät

Maailmanlaajuisten järjestelmien lisäksi alueellisesti käytettäviä paikannussatelliitteja on Japanilla (QZSS) ja Intialla (NAVIC, ent. IRNSS). Korean alueellinen järjestelmä KPS on kehitysvaiheessa, ja sen on tarkoitus tulla operatiiviseksi 2030-luvulla.

2.3.1. QZSS

QZSS²⁵ (Quasi-Zenith Satellite System) on Japanin alueellinen paikannussatelliittijärjestelmä. Se koostuu tällä hetkellä neljästä satelliitista, joista ensimmäinen on laukaistu vuonna 2010. Neljä satelliittia ei riitä paikannukseen itsenäisenä systeeminä, vaan QZSS on suunniteltu toimimaan GPS:n tukena erityisesti kaupunkiympäristössä, missä paikannus on haasteellista korkeiden rakennusten vuoksi. QZSS:n lähettämät signaalit ja taajuudet vastaavat pääosin GPS:n ominaisuuksia.

QZSS:n satelliittien rata on poikkeuksellinen verrattuna muihin paikannuskonstellatioihin ja vähintään yksi satelliitti pysyy koko ajan Japanin yläpuolella yli 60 asteen elevaatiokulmassa. QZSS:n satelliitit ylipäättään näkyvät pääasiassa vain Itä- ja Kaakkois-Aasian sekä Oseanian alueella. Suunnitelmana on lisätä QZSS:n satelliittien lukumäärä seitsemään vuoteen 2023 mennessä²⁶. Tällöin se toimisi alueellisenä itsenäisenä paikannusjärjestelmänä ilman GPS:ää tai muita globaaleja paikannusjärjestelmiä.

2.3.2. NAVIC

NAVIC²⁷ (Navigation with Indian Constellation, ent. IRNSS, Indian Regional Navigation Satellite System) on Intian alueellinen satelliittipaikannusjärjestelmä. Sen ensimmäinen satelliitti laukaistiin vuonna 2013 ja viimeisin vuonna 2018. Järjestelmä koostuu kahdeksasta satelliitista²⁷, jotka tuottavat paikannuspalvelua Intialle ja sen lähialueille. Se tarjoaa sekä kaikille avointa palvelua (SPS) sekä valtuutetuille käyttäjille tarkoitettua rajoitettua palvelua (RS, Restricted Service).

Järjestelmä toimii itsenäisenä paikannuspalveluna, ja toisin kuin QZSS, ei tarvitse tuekseen muita globaaleja paikannusjärjestelmiä. Se lähettää signaalia taajuuksilla L5, joka vastaa GPS:n (L5) ja Galileon (E5a) taajuuksia, sekä S-taajuudella (2492.028 MHz)²⁸. Tulevaisuudessa harkinnassa on laajentaa

²⁵ Quasi-Zenith Satellite System. [Online]: https://qzss.go.jp/en/overview/downloads/isos7j0000000bl4-att/qzss_pamphlet_201909a4.pdf

²⁶ Spacewatch Asia Pacific. Japan Prepares for GPS Failure with Quasi-Zenith Satellites. 2019. [Online]: <https://spacewatch.global/2019/01/japan-prepares-for-gps-failure-with-quasi-zenith-satellites/>

²⁷ Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS): NavIC. [Online]: <https://www.isro.gov.in/irNSS-programme>

²⁸ Indian Regional Navigation Satellite System. Signal in Space ICD for Standard Positioning Service. Version 1.1. 2017 [Online]: https://www.isro.gov.in/sites/default/files/irNSS_sps_icd_version1.1-2017.pdf

järjestelmän toimintaa alueellisesta maailmanlaajuiseksi ja yhteensopivaksi muiden paikannusjärjestelmien kanssa^{29,30}.

2.4. Satelliittipaikannusta avustavat palvelut

Satelliittipaikannuksen tarkkuutta voidaan parantaa hyödyntämällä erilaisia avustavia järjestelmiä ja palveluita. Valittava menetelmä riippuu sovelluskohteesta.

2.4.1. Avustejärjestelmät

Satelliittipohjaiset avustejärjestelmät (SBAS, Satellite Based Augmentation System) välittävät integriteetti- ja avustedataa, joka on kriittistä erityisesti siviili-ilmailun kannalta. Kaikki SBAS:it, esimerkiksi EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) Euroopassa ja WAAS (Wide Area Augmentation System) Yhdysvalloissa, on toteutettu geostationäärisillä satelliiteilla. SBAS:ien tärkeimpiä toimintoja on paikannuksen luotettavuuden monitorointi ja käyttäjien varoittaminen, mikäli satelliittipaikannuksessa on ongelmia. Järjestelmä esimerkiksi ilmoittaa, mikäli jotain tiettyä satelliittia ei tulisi käyttää paikannuksessa vaikkapa satelliitin kellon vioittumisen vuoksi. Paikannusjärjestelmää itsessään ei ole suunniteltu tarjoamaan tällaisia varoituksia nopealla reaktioajalla, joten ulkoisen järjestelmän käyttö varoitusten välittämiseksi on välttämätöntä turvallisuuskriittisissä sovelluksissa. Lisäksi SBAS:it välittävät korjauksia paikannussatelliittien rata- ja kelloparametreihin ja ilmakehän aiheuttamiin viiveisiin signaalin kulussa. Avustesatelliitteja voidaan käyttää myös paikannukseen, mikäli ne mahdollistavat etäisyysmittaukset paikannussatelliittien tapaan.

International Civil Aviation Organization (ICAO) määrittelee SBAS-järjestelmien lähettämän signaalin rakenteen³¹ ja US Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA) vähimmäisvaatimukset vastaanotinten toiminnalle³². Samaan tapaan kuin paikannussatelliittijärjestelmät, myös SBAS:it koostuvat avaruus-, maa- ja käyttäjäsegmenteistä. Maasegmentin tarkoituksena on tuottaa avustesatelliittien lähettämä data mm. monitorointiasemia hyödyntäen. EGNOS:in tapauksessa maasegmenttiin kuuluu mm. RIMS-asemia (Ranging Integrity Monitoring Station). RIMS-asemat havainnoivat satelliittien lähettämää signaalia ja välittävät tekemänsä mittaukset (esim. etäisyydet satelliitteihin) prosessointikeskuskille. Prosessointikeskukset tuottavat useiden eri RIMS-asemien tekemien mittausten perusteella EGNOS:in lähettämät korjaukset. RIMS-asemia on sijoitettu ympäri Eurooppaa ja Pohjois-Afrikkaa. Tällä hetkellä Suomessa on asema ainoastaan Lappeenrannassa, mutta Kuusamoon on rakenteilla toinen RIMS-asema. Suomen lähialueilla asemia on esimerkiksi Norjan Kirkkoniemellä ja Tromssassa sekä Ruotsin Gävlessä.

²⁹ Indian Satellite Navigation Policy – 2021 (Draft). [Online]: https://www.isro.gov.in/sites/default/files/satnav_policy-29.pdf

³⁰ Hindustan Times. ISRO to expand reach of navigation system globally: New draft policy. 3.8.2021. [Online]: <https://www.hindustantimes.com/india-news/isro-to-expand-reach-of-navigation-system-globally-new-draft-policy-101627930648368.html>

³¹ International Civil Aviation Organization ICAO, Standards and Recommended Practices (SARPS), SARPS Volume 1 – Annex 10

³² US Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA), Minimum Operational Performance Standard (MOPS), MOPS for GPS/WAAS airborne equipment, MOPS DO-229

EGNOS tarjoaa avoimen Open Service (OS) -palvelun⁷⁹, ja turvallisuuskriittiselle liikenteelle (kuten ilmailulle) suunnatun Safety of Life (SoL) -palvelun⁸³. Lisäksi EGNOS Data Access System (EDAS) välittää dataa esimerkiksi internetin yli. Muut SBAS-järjestelmät tarjoavat samankaltaisia palveluita käyttäjilleen. Tällä hetkellä EGNOS välittää korjauksia ainoastaan GPS-järjestelmän satelliiteille, mutta tulevaisuudessa se tukee myös Galileon signaaleita⁸³.

Lentoliikenteen näkökulmasta EGNOSin toimintaa Suomessa voidaan arvioida esimerkiksi SoL-dokumentaatioissa⁸³ esitetyn perusteella. Saatavuus määritellään prosenttina ajasta, jolloin palvelun käyttäjien paikannuksen tarkkuus on parempi kuin tilanteeseen määritelty suojaraja (kts SoL-dokumentaatio, Taulukko 6-1). Toisin sanoen saatavuus toteutuu, kun lennon vaiheeseen määritelty tarkkuus-, integriteetti- ja jatkuvuusvaatimukset toteutuvat. Jatkuvuudella tarkoitetaan todennäköisyyttä, jolla kuhunkin lennon vaiheeseen riittäväksi määritelty suorituskyky toteutuu määriteltyä aikayksikköä kohden. Katkos on tilanne, jossa jatkuvuus ei toteudu. Paikannuksen suorituskykyyn vaikuttaa mm. RIMS-asemien sijainti, käytettävien satelliittien määrä sekä ympäristötekijät (kuten ionosfääri).

EGNOSin saatavuus koko Suomen alueella ei-tarkkuuslähestymiseen (Non-Precision Approach, NPA) on yli 99.9%. NPA:n saatavuutta päivätasolla voi tarkastella EUSPA:n verkkosivulla³³. SoL-dokumentaation mukaan Approach with Vertical Guidance APV-1:n saatavuus on lähes koko Suomessa yli 99%, mutta APV-1:n katkosten riski verrattuna muuhun Eurooppaan on kohonnut lukuun ottamatta Lounais-Suomea. Päiväkohtaisten tietojen³⁴ mukaan APV-1-saatavuus on yli 99.9% Koillis-Suomea lukuun ottamatta. Instrumenttilähestymiseen suunnatun LPV-200:n (Localizer Performance with Vertical guidance) saatavuus on yli 99% muutoin kuin Koillis-Suomessa, missä LPV-200 ei ole lainkaan käytettävissä. Lisäksi LPV-200:n katkosten riski muuhun Eurooppaan verrattuna on koholla Lounais-Suomea lukuun ottamatta, ja isossa osassa Lappia katkoksia on odotettavissa paljon. Myös LPV-200:n päiväkohtaista saatavuutta voi tarkastella EUSPA:n verkkosivuilla³⁵.

Saatavuuteen ja katkoksiin Suomessa vaikuttavat erityisesti RIMS-asemien sijainti ja ilmakehän ilmiöt. Suomi sijaitsee EGNOSin kattavuusalueen itäreunalla, eikä Suomen leveysasteilla ole RIMS-asemia Suomesta itään. Tästä syystä erityisesti Itä-Suomen osalta saadaan vähemmän havaintoja (suhteessa muuhun Eurooppaan), joiden perusteella EGNOSin korjaukset tuotetaan. Tällöin näillä alueilla käytettäviin korjauksiin sisältyy suurempi epävarmuus kuin niillä alueilla, joissa RIMS-asemien mittauksia on enemmän käytettävissä. Lisäksi ionosfäärin aktiivisuus on suurempaa pohjoisessa, jolloin se myös vaikuttaa omalta osaltaan korjausten epävarmuuteen.

EGNOSin suorituskyky ei siis ole riittävä lentoliikenteen kannalta erityisesti Pohjois- ja Itä-Suomessa. Kuusamoon rakenteilla olevan RIMS-aseman odotetaan parantavan tilannetta vain osittain. Vuoteen 2030 mennessä lentoliikenteessä tullaan hyödyntämään ensisijaisesti satelliittipaikannusta maalaitepohjaisen paikannuksen sijaan Performance Based Navigation (PBN) -ilmatilakonseptin mukaisesti³⁶. Katkoksiin GNSS:n käytettävyydessä häiriötilanteiden johdosta tullaan kuitenkin varautumaan

³³ EUSPA. NPA Availability. [Online]: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/npa_availability

³⁴ EUSPA. APV-1 Availability. [Online]: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/apv1_availability

³⁵ EUSPA. LPV-200 Availability. [Online]: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/lpv200_availability

³⁶ Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Ilmailun navigaatio- ja valvontalaitejärjestelmien strategia Suomessa 2020–2030. [Online]: <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/NAVSUR%202020-2030.pdf>

säilyttämällä joitain välttämättömiä järjestelmiä turvallisuuden varmistamiseksi. Joka tapauksessa en-
tistä suurempi tukeutuminen satelliittipaikannukseen lentoliikenteessä tulevaisuudessa vaatii EGNOSin
toiminnan parantamista Suomessa erityisesti Pohjois-Suomen osalta.

Maassa sijaitsevat avustejärjestelmät (Ground Based Augmentation System, GBAS) ovat niin ikään
lentoliikenteen tukemiseen tarkoitettuja järjestelmiä. Niitä käytetään lentokenttien läheisyydessä las-
kuissa ja nousuissa, ja niiden käyttö vaatii yhteensopivan vastaanottimen lentokoneessa. GBAS avus-
taa paikannusta samaan tapaan kuin SBAS, mutta toimii ainoastaan paikallisesti joidenkin kymmenien
kilometrien säteellä.

Samalla tavalla kuin SBAS:ien tapauksessa, ICAO ja RTCA määrittävät niiden toteutukseen ja suoritus-
kykyyn liittyviä yksityiskohtia. ICAO määrittää GBAS:in signaalin rakenteen³⁷, ja RTCA määrää GBAS-
vastaanottimien toimintaan liittyvistä yksityiskohdista³⁷. Lisäksi EUROCAE (European Organisation for
Civil Aviation Electronics) määrittää GBAS:in maasegmentin toimintaa³⁸.

GBAS:in maasegmentti koostuu useista GNSS-vastaanottimista, joiden tekemien mittausten perus-
teella lasketaan välitettävät korjaukset. Korjauksen tuottamisessa hyödynnetään vastaanottimien tun-
nettujen sijaintien ja GNSS-mittausten perusteella lasketun sijainnin erotusta. Lisäksi GBAS välittää
SBAS:in tapaan tietoa myös paikannussatelliittien integriteetistä. Korjaukset ja integriteettitieto lähete-
tään GBAS-yhteensopivaan vastaanottimeen käyttäen VHF (Very High Frequency) -datalähetintä.

2.4.2. Korjauspalvelut

Lentoliikenteen ohella myös muilla sovellusalueilla tarvitaan erilaisia korjauksia GNSS-mittauksiin.
Nämä perustuvat esimerkiksi tukiasemaverkon perusteella laskettaviin korjauksiin, ja satelliittien välittä-
mien rata- ja kelloparametrien korvaamiseen tarkemmilla vastineilla. Tyypillisiä sovelluskohteita ovat
esimerkiksi laivojen navigointi rannikkoalueilla sekä rakennusteollisuus. Avustepalveluihin verrattuna
suurempi painoarvo on tarkalla paikkaratkaisulla paikannuksen integriteetin sijaan.

Differentiaali-GNSS ja Real Time Kinematic (RTK)

GNSS-paikannukseen vaikuttavat virheet muuttuvat tyypillisesti melko hitaasti ajan ja sijainnin mukana.
Jos mittausaseman sijainti tunnetaan tarkasti, sen tekemien havaintojen perusteella voidaan parantaa
myös lähistöllä sijaitsevien vastaanottimien paikkaratkaisua. Tarkemmin sanoen, kun mittausaseman ja
satelliittien sijainnit tunnetaan tarkasti, voidaan laskea (lähes) todellinen etäisyys näiden välillä. Kun tätä
verrataan mitattuun etäisyyteen, voidaan määrittää korjaus, joka on käyttökelpoinen joidenkin kymme-
nien kilometrien säteellä mittausasemasta. Paikkaratkaisun tarkkuus on noin metrin luokkaa DGNSS-
tekniikalla. DGNSS-korjauksia välitetään internetin yli esimerkiksi NTRIP-protokollaa (Networked
Transport of RTCM via Internet Protocol) hyödyntäen³⁹.

³⁷ US Radio Technical Commission for Aeronautics (RTCA), Minimum Operational Performance Standard
(MOPS), MOPS for GPS/GBAS airborne equipment, MOPS DO-253.

³⁸ European Organisation for Civil Aviation Electronics, Minimum Operational Performance Specification
(MOPS), MOPS for a Ground Based Augmentation System (GBAS) ground facility to support CAT I approach
and landing, ED-114

³⁹ Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (epäviralli-
nen). [Online]: <https://igs.bkg.bund.de/rootftp/NTRIP/documentation/NtripDocumentation.pdf>

RTK on myös DGNSS-tekniikka, joka hyödyntää erityisesti satelliittisignaalin vaiheen mittamista. Vaihemittaus on mahdollista tehdä tarkasti, ja siitä saadaan etäisyyslukema kertomalla signaalin aallonpituudella kertomalla. Vaihemittausten heikkoutena on ns. jaksotuntematon: vaikka vastaanotin voi laskea satelliitin ensimmäisen havaitsemisen jälkeen signaalin vaiheessa tapahtuneet muutokset tarkasti, se ei tiedä, kuinka monta kanta-aallon jaksoa vastaanottimen ja satelliitin välinen etäisyys oli ensimmäisen vaihevaihtamisen hetkellä. Tämän jaksomäärän ratkaisemiseen on erityyppisiä tukiasemien mittauksiin ja kokonaislukuoptimointiin perustuvia tekniikoita, ja jaksotuntemattoman ratkaisemisen jälkeen vaihemittauksesta voidaan saada sentti- tai millimetritarkkuuden etäisyysmittaus. RTK:lla voidaan saavuttaa senttimetriluokan paikannustarkkuus reaaliajassa ja se on laajalti käytössä erilaisissa ammattilaissovelluksissa. DGNSS- ja RTK-korjaukset ovat tyypillisesti kaupallisten toimijoiden tuottamia. Suomessa niitä tarjoavat mm. Maanmittauslaitos⁴⁰ ja Väylävirasto (rannikkoalueet)⁴¹, sekä yrityksistä esimerkiksi Hexagon⁴² ja Geotrim⁴³.

Precise Point Positioning (PPP)

PPP on DGNSS-tekniikoiden ohella tarkan paikannusratkaisun tuottava menetelmä. Se kuitenkin vaatii GNSS-havaintoja huomattavan pitkältä ajalta (kymmeniä minutteja). PPP perustuu virheitä huolellisesti mallintavaan laskenta-algoritmiin, jossa yhdistetään vastaanottimen usealla taajuudella tekemiä etäisyys- ja vaihemittauksia sekä mittausasemaverkoston tekemien havaintojen perusteella tuotettuja satelliittien kello- ja rataparametreja. Nämä parametrit ovat tarkempia kuin ne, joita satelliitit lähettävät reaaliaikaisesti. PPP:ssä ei kuitenkaan välttämättä tarvita jatkuvaa yhteyttä korjausten tarjoajaan, mikäli sijaintiratkaisun ei tarvitse olla välittömästi käytettävissä. PPP:llä päästään senttimetriluokan paikannustarkkuuteen, tai jopa millimetrituokan tarkkuuteen, mikäli paikka ratkaistaan jälkilaskentana. Esimerkiksi IGS (International GNSS Service) tarjoaa veloitukset tarkkoja kello- ja rataparametreja⁴⁴ (muiden korjausten lisäksi), jotka soveltuvat PPP jälkilaskentaan. Lisäksi edellä mainitut yritykset tarjoavat myös PPP-palvelua.

2.4.3. Satelliiteista riippumattomat paikannusjärjestelmät

Toisen maailmansodan aikana sekä Yhdysvalloissa että Iso-Britanniassa heräsi mielenkiinto kehittää järjestelmä, joka mahdollistaisi kohtuu tarkan navigoinnin pitkälläkin etäisyyksillä. Maiden kehittämät järjestelmät olivat lähes identtiset ja pohjautuivat ajatukseen käyttää matalalla taajuudella lähetettävien radiomajakoiden verkostoa. Iso-Britannia kutsui järjestelmää nimellä 'Gee', ja se oli käytössä vuoteen 1970 asti, jolloin viimeinen majakka lopetti toimintansa. Yhdysvalloissa järjestelmää kutsuttiin nimellä LORAN (lyhenne sanoista Long Range Navigation) ja järjestelmää varten rakennettiin useita asemia eri puolille maailmaa. Kukin asema käsitti yhden pääaseman ja ainakin kaksi aliasemaa, asemien välisten etäisyyksien ollessa tyypillisesti noin 1000 kilometriä.

⁴⁰ Maanmittauslaitos. DGNSS-paikannuspalvelu. [Online]: <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntemalle-kayttajalle/finpos-paikannuspalvelu/dgnss-palvelu>

⁴¹ Väylävirasto. Radionavigaatiopalvelut. [Online]: <https://vayla.fi/palveluntuottajat/ammattimerenkulku/liikkumien-vesivaylilla/radionavigaatiopalvelut>

⁴² Hexagon HxGN Smartnet. [Online]: <https://hxgnsmartnet.com/fi-fi>

⁴³ Geotrim Trimnet VRS. [Online]: <https://geotrim.fi/palvelut/trimnet-vrs/>

⁴⁴ IGS Products. [Online]: <https://igs.org/products/#about>

LORAN-järjestelmässä kukin pääasema-aliasemapari lähettää signaalipulssin tasan yhden millisekunnin aikaerolla toisiinsa nähden. Vastaanottaja havaitsee oskilloskoopilla pulssien saapumisen, pystyy mittaamaan pulssien välisen etäisyyden, ja saa määritettyä aikaeron pulssien saapumisen välillä. Havainnot yhdeltä asemalta eivät vielä riitä vastaanottajan sijainnin selvittämiseksi, vaan mittaus pitää toistaa toisen pääasema-aliasemaparin suhteen. Tällöin sijainti rajautuu kahteen eri pisteeseen, joista toinen voidaan yleensä poistaa käyttämällä hyväksi esim. tietoa vastaanottajan edellisestä sijainnista. Menetelmä tarkkuus heikkenee etäisyyden kasvaessa lähetinasemiin nähden. Tarkkuus on yleisesti noin 1 % havaitsijan ja lähetinaseman välisestä etäisyydestä.

Satelliittinavigoinnin yleistymisen 80- ja 90-luvuilla nopeutti LORAN-järjestelmien asteittaista lakkauttamista, ja 2010-luvulle tullessa useimmat radiomajakat oli joko suljettu tai purettu. Mielenkiinto LORAN-järjestelmää kohtaan on kuitenkin taas herännyt, sillä GNSS-järjestelmien haavoittuvuuksia vastaan suojautuminen vaatii luotettavan varajärjestelmän. Verrattuna vanhempiin LORAN-järjestelmiin, uudistettu LORAN-verkosto, eLORAN (enhanced Long Range Navigation), pystyisi hyödyntämään moderneja vastaanottimia sekä signaalin suunnittelua, jolloin järjestelmän paikannusepävarmuus olisi noin 8–10 metriä⁴⁵.

Inertianavigointi perustuu kiihtyvyyssantureiden ja gyroskooppien keräämän havaintoaineiston käsitteilyyn ja tämän tiedon yhdistämisestä arvioon edellisestä sijainnista ja asennosta. Koska arvio uudesta sijainnista perustuu aina arvioon vanhasta sijainnista ja suunnasta, ja koska sensoreiden mittavirheet suunnasta ja kiihtyvyydestä kasaantuvat, inertianavigoinnin tarkkuus heikkenee ajan kuluessa. Järjestelmän tarkkuutta voidaan parantaa lähettämällä esimerkiksi tutkahavainnoista johdettuja korjausparametreja. Tarkkuuden heikkenemisestä johtuen inertianavigointi järjestelmiä käytetään yleisemmin GNSS-järjestelmien tukena, parantamaan navigointia tilanteissa, joissa GNSS-signaalin kuuluvuus on heikko tai se katoaa kokonaan, esimerkiksi tunneleissa. Inertianavigoinnin suurin etu on se, että kiihtyvyyden ja kulmanopeusmittaukset eivät riipu ympäristökiteijöistä, joten ne eivät ole alttiita ulkoisille häiriöille.

Periaatteessa mitä tahansa radiotaajuuksilla kuuluvaa signaalia, esimerkiksi televisiolähetyksiä, voidaan hyödyntää navigoinnissa⁴⁶. Erityisesti haastavissa kaupunkiolosuhteissa ns. tilaisuuskohtaisten signaalien (Signals of Opportunity, SOOP) hyödyntäminen paikannustarkkuuden parantamisessa on varteenotettava vaihtoehto, sillä mahdollisia signaaleja on käytössä paljon ja niiden teho on usein huomattavasti korkeampi kuin GNSS-järjestelmien. SOOP-signaaleja varten ei myöskään tarvitse rakentaa uusia lähettämiä ja niiden kuuluvuus sisätiloissa on yleensä parempi kuin GNSS-signaalilla, mutta niiden hyödyntämisessä on myös ongelmia. Yksi suurimmista ongelmista on signaalin kulkemiseen kuluneen ajan määrittäminen, koska SOOP-signaaleissa ei yleensä ole aikaleimaa, jolloin signaali on lähtenyt. Toinen ongelma on itse ympäristö, jossa sama signaali saattaa heijastua vastaanottajalle useasta suunnasta, jolloin suoraan saapuneen signaalin erottaminen on vaikeaa. Käytettävissä olevien signaalien määrä saattaa myös vaihdella huomattavasti alueelta toiselle. Navigointi pelkkien SOOP-signaalien varassa on siis haastavaa, mutta niitä voidaan hyödyntää tavanomaisten navigointijärjestelmien tukena.

⁴⁵ 'GPS Backup: Is eLoran the Answer?' [Online]: <https://www.aviationtoday.com/2012/04/12/gps-backup-is-eloran-the-answer/>

⁴⁶ J. Raquet and R. K. Martin, "Non-GNSS radio frequency navigation," 2008 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008, pp. 5308-5311, doi: 10.1109/ICASSP.2008.4518858.

Kvanttinavigointi

Kvanttifysiikan edistysaskeleet ovat avanneet kvanttietokoneiden lisäksi mahdollisuuksia myös muille kohteille, joissa kvanttifysiikkaa voidaan soveltaa. Yksi mahdollinen sovelluskohde on navigointi. Kvanttifysiikkaan pohjautuvaa navigointijärjestelmän osoitettiin parantavan paikannuksen tarkkuutta jo vuonna 2001⁴⁷, mutta käyttökelpoisen navigointijärjestelmän vaatimat tekniset ratkaisut ovat edelleen tutkimuksen kohteena.

Saksassa kvanttiteknologioiden tutkimukseen on panostettu vahvasti ja Ulmiin on juuri avattu uusi Kvanttiteknologioiden instituutti, joka toimii Saksan Avaruus- ja ilmakehäkeskuksen (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) alaisuudessa⁴⁸. DLR:n palveluksessa on tällä hetkellä noin 40 tutkijaa, joiden pääsääntöiset tutkimuskohteet liittyvät kvanttiteknikoiden tutkimukseen, mutta tutkijoiden määrän sekä muun avustavan henkilökunnan määrän odotetaan nousevan yli 200:lla henkilöllä tulevien vuosien kuluessa. DLR:n vision mukaisesti kvanttiteknologioita tullaan tulevaisuudessa käyttämään laajasti niin metrologian kuin geodesian aloilla, mutta myös esimerkiksi telekommunikaatiossa ja navigoinnissa⁴⁹. Edistääkseen kvanttiteknikan tuomista jokapäiväiseen käyttöön DLR tekee tiivistä yhteistyötä Ulmin alueella sijaitsevien yritysten kanssa, joten tutkimustulokset saadaan nopeasti teollisuuden käyttöön.

Myös Iso-Britannia on kasvattanut kvanttiteknologioiden tutkimusta erityisesti GNSS-riippumattomien navigaatoratkaisuiden löytämiseksi. Iso-Britannian puolustusministeriön (Ministry of Defence, MOD) rahoittaman kansallisen kvanttiteknologiaohjelman keskeisenä päämääränä on kehittää ns. kvanttikompassi, jonka avulla erittäin tarkka navigointi onnistuu jopa avaruudessa tai käyttökohteissa, joissa GNSS-signaali ei ole saatavana^{50,51}. Projektin suurimpana haasteena on saada järjestelmän koko riittävän pieneksi, jotta sitä voidaan soveltaa käytännön kohteissa.

Käytännössä kvanttipaikannusjärjestelmät (QPS, Quantum Positioning System) voidaan jakaa kahteen ryhmään: aktiivisiin ja passiivisiin järjestelmiin. Aktiivisen QPS-järjestelmän rakenne muistuttaa tavanomaista GNSS-järjestelmää ja perustuu satelliittien hyödyntämiseen. Tosin QPS-järjestelmässä satelliitit on sijoitettu kolmena parina kiertoradoille, jotka ovat toisiaan vastaan kohtisuorassa (muodostaen xyz-tason).⁵² Radiotaajuuksien sijaan etäisyys satelliittien ja käyttäjän välillä määritetään mittaamalla

⁴⁷ Giovannetti, V., Lloyd, S. & Maccone, L. Quantum-enhanced positioning and clock synchronization. Nature 412, 417–419 (2001). [Online]: <https://doi.org/10.1038/35086525>

⁴⁸ 'DLR opens the Institute of Quantum Technologies in Ulm' [Online]: https://www.dlr.de/content/en/articles/news/2021/02/20210527_dlr-opens-the-institute-of-quantum-technologies-in-ulm.html

⁴⁹ 'Quantum research for outer space' [Online]: <https://www.uni-ulm.de/en/nawi/faculty-of-natural-sciences/nawi-detailseiten/news-detail/article/quantum-research-for-outer-space-new-dlr-institute-of-quantum-technologies-in-space-applications-in-ulm/>

⁵⁰ 'Can Quantum Compass Replace GPS?' [Online]: <https://www.geospatialworld.net/blogs/can-quantum-compass-replace-gps/>

⁵¹ 'Will Quantum Compass Replace Global Navigation Satellite System?' [Online]: <http://gisresources.com/will-quantum-compass-replace-global-navigation-satellite-system-gnss/>

⁵² Donghui Feng 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 237 032027; <https://doi.org/10.1088/1755-1315/237/3/032027>

lomittuneita fotonipareja. Jotta etäisyys vastaanottajan ja satelliittiparin välillä voidaan määrittää tarkasti, on mitattava useita fotonipareja. Lomittuneiden parien tuottaminen on haasteellista, koska hyötysuhde on matala, ja koska aika jolloin pari muodostui on tuntematon. Järjestelmä myös vaatii äärimäisen tarkan mikroradiaaniluokan tarkkuuden satelliittien seurannassa.

Passiiviset QPS-järjestelmät ovat käytännössä inertiajärjestelmiä, kuten gyroskooppeja ja kiihtyvyyssantureita. Siinä missä lasergyroskooppien toiminta perustuu valon interferenssikuvion mittaamiseen, kvanttigyroskoopin toiminta perustuu äärimäisen matalaan lämpötilaan jäähdytettyjen atomien interferenssikuvion mittaamiseen⁵³. Kvanttifysiikan lakien mukaan atomeilla on sekä aaltoliikkeen että hiukasten ominaisuuksia, jolloin atomien aaltoliikeominaisuudet voidaan rinnastaa valon aaltoliikkeen ominaisuuksiin. Lasergyroskooppien tarkkuus riippuu käytetyn valon aallonpituudesta, joten kvanttigyroskooppien tarkkuus on huomattavasti korkeampi, koska vastaavat atomien kvanttiluonteesta johtuvat aallonpituudet ovat paljon lyhyempiä. Kvanttigyroskooppeja tutkitaan aktiivisesti, mutta tällä hetkellä käytännön sovellusten esteenä on laitteistojen suuri koko. Kvanttitekniikan hyödyntäminen gyroskooppeissa tulee parantamaan huomattavasti navigointitarkkuutta sovelluksissa, joissa ei haluta tai ole mahdollista hyödyntää GNSS-paikannusta.

Kvanttigyroskoopin avulla on mahdollista mitata samanaikaisesti myös kiihtyvyyksiä, joten navigointi pelkän kvanttigyroskoopin avulla on mahdollista hyödyntäen esimerkiksi ns. merkintälaskumenetelmää (dead reckoning)⁵⁴. Atomien interferenssin mittaamista voidaan hyödyntää myös kvanttikiihtyvyyssanturin valmistamisessa. Kvanttianturin etuna tavanomaisiin kiihtyvyyssantureihin nähden on huomattavasti suurempi herkkyys kiihtyvyyden muutoksille, jolloin paikannustarkkuus pitkällä etäisyyksillä paranee.

2.5. GNSS aikatiedon lähteenä

Koska satelliittipaikannusjärjestelmien toiminta perustuu oleellisesti signaalin kulkuajan mittaamiseen, GNSS-järjestelmiä voidaan hyödyntää myös tarkan aikatiedon välittämiseen. Jokaisessa paikannussatelliitissa on useampia atomikelloja, joiden avulla satelliitti pysyy paikannusjärjestelmän referenssiajassa. Satelliittien navigointiviestin parametrien avulla korjataan kellon virhettä (poikkeama, poikkeaman muutos sekä muutoksen nopeus) sekä relativistista virhettä. Paikannusvastaanottimien kello taas on tyypillisesti heikkolaatuinen, ja näin ollen vastaanotin ratkaisee kellonsa ja paikannusjärjestelmän referenssiajan erotuksen. Tähän tarvitaan vähintään neljän satelliitin samanaikainen näkyvyys. Erillisten ajastusvastaanottimien tapauksessa vastaanotin on tyypillisesti paikallaan, jolloin sen antennin sijainti voidaan määrittää tarkasti. Tällöin vastaanotin voi hyödyntää tietoa tunnetusta sijainnista, ja ajan määrittämiseen riittää yksikin paikannussatelliitti. Useamman satelliitin käyttö kuitenkin parantaa aikaratkaisua.

⁵³ Gregory W. Hoth, Bruno Pelle, Stefan Riedl, John Kitching, and Elizabeth A. Donley, "Point source atom interferometry with a cloud of finite size", *Appl. Phys. Lett.* 109, 071113 (2016) [Online]: <https://doi.org/10.1063/1.4961527>

⁵⁴ Chen, Yun-Jih and Hansen, Azure and Hoth, Gregory W. and Ivanov, Eugene and Pelle, Bruno and Kitching, John and Donley, Elizabeth A. 'Single-Source Multiaxis Cold-Atom Interferometer in a Centimeter-Scale Cell' *Phys. Rev. Applied* 12, 2019. American Physical Society doi: 10.1103/PhysRevApplied.12.014019, [Online]: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.12.014019>

GNSS-ajanmäärityksen tarkkuuteen vaikuttavat samat tekijät kuin paikannusratkaisun tarkkuuteen yleisestikin, esimerkiksi ilmakehän aiheuttamat viiveet signaalin kulussa ja satelliittien rata- ja kelloparametrien virheet. GPS:n referenssiaika, GPST⁷⁷, on jatkuva aika, joka seuraa UTC(USNO)-aikaa (Coordinated Universal Time, United States Naval Observatoryn ylläpitämä Yhdysvaltojen aikastandardi) mikrosekunnin tarkkuudella, mutta ei kuitenkaan huomioi karkaussekunteeja kuten UTC-aika. GPST alkaa kello 00.00 tammikuun kuudentena vuonna 1980 (UTC). GPS:n navigointiviestissä olevien parametrien avulla GPST voidaan muuttaa UTC(USNO)-ajaksi 20 nanosekunnin (1σ) tarkkuudella. Vastaanottimen määrittämän ajan virheeseen vaikuttavat lisäksi myös satelliitin rata- ja kelloparametrien virheet ($28ns$, 1σ), ja ilmakehän ja vastaanottimen ympäristön aiheuttamat virheet, jotka vaihtelevat.

Galileon referenssiaika, GST⁹, on GPST:n tapaan jatkuva aika, joka alkoi 13 sekuntia ennen keskiyötä 22. elokuuta 1999 (UTC). GST voidaan muuttaa UTC-ajaksi navigointiviestin parametrien avulla 30ns tarkkuudella⁵⁵. Käytännössä ajanmäärityksen tarkkuus on kuitenkin parempi, alle 10ns virhe 95 % ajasta⁵⁶.

GLONASS-aika seuraa UTC(SU)-aikaa (Venäjän kansallinen aika) vähintään millisekunnin tarkkuudella, huomioiden vakio kolmen tunnin poikkeama. GPST:stä ja GST:stä poiketen GLONASS-aika siis sisältää myös karkaussekunnit. GLONASS-satelliitit välittävät parametrit, joilla GLONASS-aika muutetaan UT1 (Universal Time) ja UTC-ajaksi.

BeiDoun referenssiaika, BDT⁵⁷, alkaa keskiyöllä 1 tammikuuta 2006 (UTC). BDT seuraa UTC(NTSC)-aikaa (National Time Service Center) 100ns tarkkuudella (pois lukien karkaussekunnit), ja BeiDoun navigointiviesti sisältää parametrin BDT:n muuttamiseksi UTC-aikaan.

Jotta usean eri paikannussatelliittijärjestelmän signaaleja voidaan käyttää yhdessä, on näiden järjestelmien referenssiaikojen ero tunnettava. Tästä syystä Galileon navigointiviestissä välitetään GPS Galileo Time Offset GGTO-parametri, jolla GST:n voi muuttaa GPST:ksi, tai toisin päin. Muunnoksen tarkkuus on ollut parempi kuin 10ns⁵⁶. Vastaavasti osa GLONASS-satelliiteista (GLONASS-M) välittää muunnosparametrin GLONASS-ajan ja GPST:n välille vähintään 30ns tarkkuudella⁵⁸.

⁵⁵ EUSPA. Galileo Initial services. [Online]: <https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/services/initial-services>

⁵⁶ Inside GNSS. Measuring Galileo Performance: Navigation and Timing Performance Figures of Merit, Part 2. [Online]: <https://insidegnss.com/measuring-galileo-performance-navigation-and-timing-performance-figures-of-merit-part-2/>

⁵⁷ BeiDou Navigation Satellite System, Signal in Space Interface Control Document, Open Service Signal (Version 2.1). China Satellite Navigation Office, November 2016. [Online]: <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfzx/201805/P020180507527106075323.pdf>

⁵⁸ Russian Institute of Space Device Engineering. GLONASS, Interface Control Document, Navigational Radiosignal In bands L1, L2 (Edition 5.1), MOSCOW 2008. [Online]: http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_eng_v5.1.pdf

2.5.1. Aikatieto Suomessa

VTT MIKES⁵⁹ vastaa Suomen UTC⁶⁰-ajan (UTC(MIKE), UTC(k) tarkoittaa että UTC-aika on arvioitu aikalaboratoriossa k^{61}) toteutuksesta ja ylläpidosta⁶² perustuen VTT MIKESin Otaniemen laboratorion kelloihin. Suomen UTC-ajan realisaatiota verrataan viralliseen UTC-aikaan hyödyntämällä kaksitaajuus-GNSS-aikavastaanottimia, ja vertailun perusteella kellojen (3kpl aktiivinen vetymaser) taajuusmalleja päivitetään kuukausittain.

VTT MIKES tarjoaa aikapalvelua esimerkiksi julkisena NTP-palveluna (Network Time Protocol) internetissä (parhaimmillaan noin miljoona eri IP-osoitetta vuorokaudessa), sekä kaupallisena palveluna DNA:n ja CSC/FUNET:in (Tieteen tietotekniikan keskus Oy / Finnish University and Education Network) verkoihin (kymmeniä käyttäjiä) yrityksille ja organisaatioille. Lisäksi joillekin asiakkaille tarjotaan PTP-aikapalvelua erillisillä kuituyhteyksillä.

Tarkkaa aikaa voidaan siirtää pienellä epävarmuudella kuituverkossa PTP High Accuracy päätelaitteilla, jossa parhaisiin tuloksiin päästään yhden kuidun toteutuksilla. Tämä kuitenkin poikkeaa normaaleista tietoliikenneyhteyksistä, joissa käytössä on tyypillisesti kaksi kuitua (ns. up- ja downlink). VTT MIKES on tutkinut valokuituverkossa toteutettuja aikalinkkejä⁶³, ja pilotoinut pitkän matkan yhden kuidun yhteyttä Oulun ja Kajaanin välillä.

Käytännössä tarkkaa aikaa tarvitaan yhä useammalla toimialalla, esimerkkeinä televerkot (erityisesti 5G), digitaaliset sähköasemat sähköverkoissa, ja aikaleimat sähköisessä kaupankäynnissä. VTT MIKES on käynyt keskustelua esimerkiksi Fingridin kanssa sähköverkkojen aikasykronoinnista. Fingrid, Norjalainen Statnett ja Ranskan RTE ovat rahoittaneet esiselvityksen sähköverkkojen aikasykronoinnin vaatimuksista ja toteutuksesta, mutta raportti ei ole julkinen. Statnett on jatkanut järjestelmän suunnittelua ja toteutusta⁶⁴. VTT MIKES on myös keskustellut YLE:n ja Digitan kanssa, sillä

⁵⁹ VTT. SI-mittayksiköt Suomessa, aika ja taajuus. [Online]: <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/si-mittayksikot-suomessa-aika-ja-taajuus>

⁶⁰ UTC-aika eli koordinoitu yleisaika perustuu TAI (International Atomic Time) -aikaan, johon on lisätty karkaussekunnit. UTC-aika muodostetaan kansallisten kellolaboratorioiden kellojen yhdistelmän perusteella BIPM:n (Bureau International des Poids et Mesures) toimesta. [Online]: <https://www.bipm.org/en/time-metrology>

⁶¹ UTC-ajan määrittämiseen osallistuvat laboratoriot on listattu BIPM:n sivuilla. [Online]: <https://www.bipm.org/kcdb/comparison?id=735>

⁶² Valtioneuvoston asetus mittayksiköistä 1015/2014 ja 431/2020

⁶³ M. Merimaa, A. Wallin, "Tarkka aikasykronointi ja aikalinkit maanpuolustuksessa", (2016), MATINE-hankkeen tiivistelmäraportti, ISSN 1797-3457, ISBN (PDF) 978-951-25-2756-4, [Online]: https://www.defmin.fi/files/3671/0034_MATINE_tarkka_aikasykronointi_Summary_Report.pdf

A. Wallin, T. Lindvall, K. Hanhijärvi, "Hajautetut vikasietoiset kelloverkot" MATINE tiivistelmäraportti, ISSN 1797-3457, ISBN 978-951-663-049-9. [Online]: https://www.defmin.fi/files/4563/2500M-0099_Tiivistelmaraportti_Wallin.pdf

⁶⁴ Hauglin, H. / Dunker, T. / Wallin, A. / Tungland, O. / Hurzuk, N. / Loken, R. Redundant secure timing sources and timing distribution to digital power protection and control applications, 2020, Cigre Science & Engineering , Vol. 17 , p. 94-100, [Online]: <https://e-cigre.org/publication/CSE017-cse-017>

mediaverkkojen tuotannossa ja jakelussa on kasvava tarve tarkalle ajalle. Finanssialalla MIFID-2⁶⁵ määrää aikaan liittyvistä kysymyksistä, esimerkiksi kauppapaikkojen täytyy olla synkronoituna UTC-aikaan. Mikäli kaupankäynnin vasteaika on suurempi kuin 1 millisekunti, kauppapaikan ylläpitäjän poikkeama UTC-ajasta ei saa olla tätä suurempi, ja kaupan aikaleima täytyy esittää vähintään 1 millisekunnin resoluutiolla⁶⁶. Vasteajan ollessa alle 1 millisekuntia (esimerkiksi huippunopea algoritminen kaupankäynti) poikkeama UTC-ajasta saa olla korkeintaan 100 mikrosekuntia ja aikaleiman resoluution täytyy olla vähintään 1 mikrosekunti. VTT MIKESin mukaan ei ole selvää, kuinka hyvin MIFID-2:n vaatimukset Suomessa täyttyvät.

Useimmissa sovelluksissa tarkkuusvaatimus on yhden mikrosekunnin luokkaa (tarkemmat tiedot kapaleessa 3.2.4) päätelaitteella, mutta ajansiirron epävarmuuden kasvaessa esimerkiksi etäisyyden tai verkkohyppyjen vuoksi käytännön tarkkuusvaatimus on suurempi. ITU:n (International Telecommunication Union) määrittämät suorituskykyvaatimukset PRTC (Primary Reference Time Clocks) ja ePRTC (enhanced PRTC) -laitteille ovat 100ns⁶⁷ ja 30ns⁶⁸ epävarmuus UTC-aikaan. VTT MIKESin mukaan tämä on hyvin lähellä sitä suorituskykyä, jota kansalliset mittanormaalilaboratoriot pystyvät tuottamaan hyvillä kelloilla hyvissä laboratorio-olosuhteissa.

Liikenne- ja viestintäviraston määräys heinäkuulta 2021⁶⁹ koskien viestintäverkkojen synkronointia edellyttää ITU PRC-standardin noudattamista. Lisäksi edellytetään, että synkronointijärjestelmät ovat kahdennettuja. Järjestelmän on myös pysyttävä ajassa riittävällä tarkkuudella vähintään kaksi viikkoa siinä tilanteessa, että aikasykronointi GNSS-järjestelmän kautta ei ole käytettävissä.

VTT MIKESin alustavien tietojen mukaan teleoperaattorit (Elisa, Telia, DNA) ovat hankkimassa ePRTC-laitteistoja (mahdollisesti 1-2 kpl per operaattori). Mikäli operaattorit jakavat synkronointitietoa keskenään, saadaan näistä muodostettua maan kattava kuuden solmun verkosto. Ilmeisesti myös Erillisverkkojen tarpeet ovat samankaltaisia kuin muilla operaattoreilla. Teleoperaattorit ovat olleet yhteydessä VTT MIKESiin liittyen aikapalveluun Otaniemestä ja operaattoreiden väliseen aikasykronoinnin mitauspalveluun VTT MIKESin toteuttamana. Sopimusta tai toteutusta ei kuitenkaan ole olemassa vielä (tilanne elokuu 2021).

⁶⁵ Finanssivalvonta. Rahoitusvälineiden kaupankäynti, sijoituspalvelut ja sijoittajansuoja – MiFID II ja MiFIR. [Online]: <https://www.finanssivalvonta.fi/saantely/saantelykokonaisuudet/mifid-ii-ja-mifir/>

⁶⁶ Komission Delegoitu Asetus (EU) 2017/574, annettu 7 päivänä kesäkuuta 2016, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2014/65/EU täydentämisestä liiketoimintakellojen tarkkuustasoa koskevilla teknisillä sääntelystandardeilla. [Online]: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0574&from=EN>

⁶⁷ Telecommunication Standardization Sector of ITU. G.8272 : Timing characteristics of primary reference time clocks. Recommendation G.8272/Y.1367 (11/18) [Online]: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.8272-201811-l/en>

⁶⁸ Telecommunication Standardization Sector of ITU. G.8272.1 : Timing characteristics of enhanced primary reference time clocks. Recommendation G.8272.1/Y.1367.1 (11/16) [Online]: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.8272.1-201611-l/en>

⁶⁹ Liikenne- ja viestintävirasto. Määräys viestintäverkkojen ja -palvelujen varmistamisesta sekä viestintäverkkojen synkronoinnista. TRAFICOM/54045/03.04.05.00/2020 [Online]: https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/regulation/M%C3%A4%C3%A4r%C3%A4ys_viestint%C3%A4verkkojen_ja_-palvelujen_varmistamisesta_sek%C3%A4_viestint%C3%A4verkkojen_synkronoinnista.pdf

2.5.2. Aikatieto kansainvälisesti

Ruotsin aikapalvelut⁷⁰ uudistettiin 2000-luvun alussa tehdyn laajan selvityksen myötä. Selvityksen pohjalta aikapalveluiden valvonta ja rahoitus määritettiin posti- ja telehallituksen alaisuuteen, teleoperaattori Netnodin vastatessa aikatiedon jakamisesta kuluttajille. Ruotsin kansallisen ajan (UTC(SP)) määrittäminen sekä aikapalveluiden monitorointi on metrologialaboratorion tehtävä, joka on osa Research Institutes of Swedeniä (RISE).

UTC(SP) on Ruotsin virallinen nimitys UTC(k) standardille, joka on määritetty hyödyntäen klassista pääkello- ja vaiheaskellusmenetelmää. Tällä hetkellä käytössä oleva kellojärjestelmä koostuu neljästä vetymaserista ja kolmesta korkean suorituskyvyn 5071A Cs standardista. UTC(SP) on linkitetty TAI:hin (international atomic time) käyttäen TWSTFT:tä (Two-way satellite time and frequency transfer) sekä hyödyntäen GNSS-järjestelmiä. Järjestelmän päälinkki on TWGPPP-yhdistelmä (Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer/GPS Precise Point Positioning), jonka kalibraatioepävarmuudet ovat 1.1 ns, ja järjestelmä kykenee pitämään ajan ± 5 ns sisällä UTC-ajasta. Koko järjestelmä on hajautettu usealle eri paikkakunnalle, jotka on yhdistetty toisiinsa GNSS-ajansiirtomenetelmin⁷¹.

Vastaavanlainen selvitys aikapalveluiden järjestämisestä on myös teetetty Iso-Britanniassa vuonna 2019. Selvityksessä nostettiin esille GNSS-pohjaisten aikapalveluiden riskit signaalin häiriöiden osalta, sekä huomautettiin internetin yli toimitettavien aikapalveluiden tarkkuuspuutteista (tyypillinen tarkkuus millisekuntien luokkaa). Selvitys myös nosti esiin Iso-Britannian virallisen atomikelloihin pohjautuvan ajan UTC(NPL) haavoittuvuuden, sillä sen määrittäminen on National Physical Laboratory:n (NPL) vastuulla ja laboratorion kaikki toiminnot ovat samassa paikassa⁷². Vastaavanlainen tilanne on aikapalvelun osalta myös Suomessa. Selvityksen pohjalta on käynnistetty hanke, jonka tarkoitus on jakaa Iso-Britannian virallisen ajan ylläpito neljään erilliseen laboratorioon, jotka on yhdistetty toinen toisiinsa vähintään kahdella eri menetelmällä. Kukin erillislaboratorioista kykenee toimittamaan aikapalveluita kuluttajille. Uudistuksen tarkoituksena on taata vakaiden aikapalveluiden saatavuus sekä taata kuluttajien signaalien jäljitettävyyden UTC(NPL):än.

Yhdysvalloissa National Institute of Standards and Technology (NIST) järjesti vuonna 2017 yhteistyössä Yhdysvaltojen energiaministeriön (Department of Energy, DOE) kanssa työpajan, jonka tarkoituksena oli kartoittaa GNSS-järjestelmistä riippumattomia keinoja aikatiedon jakamisessa energiaverkkojen käyttöön⁷³. Työpaja asetti tulevaisuuden varajärjestelmille tavoitteeksi olla käyttäjilleen edullisia toteuttaa (hintaluokka noin 500\$), taata alle 10 – 100 μ s tarkkuus jaetulle aikatiedolle (kohteesta riippuen), sekä varmistaa aikatiedon saatavuus (99.99 % saatavuus). Suurimmat esille tulleet haasteet, uusien menetelmien kehittämiselle olivat kansallisten standardien puute järjestelmien suorituskyvylle ja tiedonvälitykselle, puutteelliset työkalut järjestelmien vikojen tai ulkopuolisten hyökkäysten tunnistamiseen, sekä infrastruktuurin puutteet. Työpajassa esitettiin myös huoli riippuvuudesta GNSS-pohjaisiin menetelmiin.

⁷⁰ 'Swedish Distributed Time Service' [Online]: <https://www.ntp.se/>

⁷¹ Rieck, Carsten, Jaldehag, Kenneth, Ebenhag, Sven-Christian, Jarlemark, Per, Hedekvist, Per Olof, "Time and Frequency Laboratory Activities at RISE," Proceedings of the 51st Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, San Diego, California, January 2020, pp. 169-180. [Online]: <https://doi.org/10.33012/2020.17297>

⁷² 'National Timing Centre programme' [Online]: <https://www.npl.co.uk/ntc>

⁷³ 'Time Distribution Alternatives for the Smart Grid' [Online]: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1500-12.pdf>

Käytyjen keskustelujen pohjalta työpajan loppuraportissa esitetään mahdollisiksi varajärjestelmiksi muun muassa eLORAN-verkosta, kuitupohjaisia verkkoja sekä tietokoneverkkojen yli jaettuja aikaratkaisuja. Myös jo olemassa olevien järjestelmien modernisointi esitettiin yhtenä mahdollisuutena parantaa aikatiedon saatavuutta, esimerkiksi WWVB-radioaseman⁷⁴ (Fort Collins, Colorado) lähetystehon kasvattaminen sekä signaalin muodon parantaminen. WWVB-radioasema on NIST:n operoima, aikatiedon lähettämiseen erikoistunut asema, jonka radiosignaali sisältää aikaleiman. Aseman aika on määritetty atomikellojärjestelmän avulla ja sen epävarmuus on noin $\pm 100 \mu\text{s}$. Signaalin kuuluvuusalue kattaa suurimman osan Yhdysvaltojen manneralueesta sekä Kanadan eteläosat, mutta signaalin kuuluvuus heikkenee kohti Yhdysvaltojen itärannikkoa.

Aikatietoa lähettäviä radioasemia on myös Euroopan alueella, esimerkiksi Saksalaisen DCF77-aseman radiosignaali kuuluu myös Suomessa. DCF77-asema lähettää kahta signaalia, joista toinen on amplitudimoduloitu ja toinen vaihemoduloitu. Amplitudimoduloidun signaalin aikatarkeys on vain millisekuntien luokkaa, mutta vaihemoduloidun signaalin avulla on mahdollista päästä muutaman mikrosekunnin tarkkuuteen^{75,76}. Vastaavia radioasemia on tutkittu VTT:llä ja aiheeseen on tarkoitusta myös perehtyä osana REASON-projektia, joten tutkimustuloksia aikatietoa lähettävien majakoiden hyödyntämisestä Suomen olosuhteissa on tulevaisuudessa saatavilla.

2.6. Häiriöt ja tahallinen häirintä

Häiriöt GNSS signaalin kuuluvuudessa saattavat olla luonnollisia, jolloin ne voivat aiheutua esimerkiksi ilmakehän ilmiöistä tai viallisista tai huonosti suunnitelluista radiolaitteista. Osa häiriöistä on tahallisia.

2.6.1. Häiriöt

Ionosfääri on merkittävimpiä virhelähteitä paikannuksessa ja ajanmääryksessä. Ionosfääri koostuu sähköisesti varautuneista hiukkasista ja vääristää GNSS-signaalin kulkua lisäten etäisyysmittausvirhettä satelliitin ja vastaanottimen välillä. Signaalin virhe riippuu signaalin taajuudesta ja varautuneiden hiukkasten määrästä signaalin reitillä. Varautuneiden hiukkasten määrään taas vaikuttaa mm. auringon aktiivisuus, ionosfäärivirhe on esimerkiksi päiväsaikaan suurempi kuin yöaikaan. Etäisyysmittausvirhe siis vaihtelee vastaavasti, ja se on suuruusluokaltaan tyypillisesti metreistä kymmeneen metriin. Normaaliolosuhteissa ionosfäärivirhettä korjataan yksitaajuusvastaanottimien tapauksessa erilaisilla malleilla. Korjauksessa voidaan myös hyödyntää usealla eri taajuudella tehtyjä mittauksia, mikäli vastaanotin tukee tätä. Ionosfäärimallien tarkoituksena on mallintaa elektronitiheyttä ionosfäärissä, josta voidaan suoraan päätellä sen aiheuttama viive signaalille, jonka taajuus tunnetaan. GNSS-sovelluksissa tyypillisesti käytettyjä malleja ovat Klobuchar ja NeQuick-G. Lisäksi EGNOS välittää korjauksia ionosfääriviiveeseen.

⁷⁴ 'Radio Station WWVB' [Online]: <https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/time-distribution/radio-station-wwvb>

⁷⁵ D. Engeler, Performance analysis and receiver architectures of DCF77 radio-controlled clocks, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 59 (2012) 869–884. doi:10.1109/TUFFC.2012.2272.

⁷⁶ D. Piester, A. Bauch, J. Becker, A. Hoppmann, Time and Frequency Broadcast With DCF77, in: Proceedings of the 43rd Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, 2011, pp. 185–196. [Online]: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=10784>

Sekä Galileo- että GPS-satelliitit lähettävät korjausparametreja, joiden perusteella mittauksista voidaan poistaa osa ionosfäärin aiheuttamasta mittausvirheestä. GPS:n lähettämien parametrien perusteella voidaan laskea Klobuchar-malliin perustuva korjaus, joka poistaa noin 50% ionosfäärin aiheuttamasta mittausvirheestä⁷⁷. Galileon ionosfäärimalli, NeQuick-G on laskennallisesti vaativampi kuin Klobuchar, mutta sen avulla voidaan poistaa noin 70% ionosfäärin aiheuttamasta virheestä⁷⁸.

EGNOSin⁷⁹ ionosfäärikorjaukset mallinnetaan ennalta määritellyissä pisteissä, joiden perusteella arvio ionosfääriviiveestä interpoloidaan kunkin satelliitin signaalille. EGNOSin korjaus vähentää ionosfäärin aiheuttaman etäisyysmittausvirheen noin puoleen metriin pystysuunnassa. EGNOSin korjausten hyödyntämiseen vaaditaan vastaanotin, joka kykenee vastaanottamaan EGNOSin signaalia.

Koska ionosfäärin aiheuttama viive riippuu signaalin taajuudesta, voidaan se ratkaista kahdella eri taajuudella tehtyjä mittauksia käyttämällä lähes kokonaan ja näin parantaa paikannustarkkuutta huomattavasti. Tästä syystä GPS:n modernisointiohjelman yksi tarkoitus on lisätä uusia paikannustaajuuksia myös siviilikäyttäjille⁸⁰, kun aiemmin L2-signaalit ovat olleet ainoastaan sotilaskäytössä. Galileon signaali on saatavilla useammalla taajuudella kaikille käyttäjille. Tällä hetkellä useimmat kuluttajalaitteet vastaanottavat paikannussignaalia vain yhdellä taajuudella, mutta monitaajuusvastaanotinpiirien hinnat ovat laskeneet viime vuosina ja esimerkiksi kaksitaajuusmittauksiin pystyvät älypuhelimet ovat yleisty-
mässä⁸¹.

Skintillaatio on ionosfäärin ilmiö, joka aiheuttaa etäisyysmittausvirhettä vakavampia häiriöitä paikannukselle. Pienessä mittakaavassa esiintyvät epätasaisuudet ionosfäärin elektronitiheydessä saavat satelliittien lähettämän signaalin voimakkuuden häilymään ja aiheuttavat myös signaalin vaiheeseen vaihtelua. Pahimmillaan skintillaatio voi estää GNSS-signaalin vastaanottamisen kokonaan hetkellisesti (ns. loss of lock). Skintillaation esiintyvyyteen vaikuttavat kellon- ja vuodenaika, sekä auringon geomagneettinen aktiivisuus ja auringonpilkkujakson (11 vuotta) vaihe. Skintillaatio on yleisempää päiväntasaajan ja Maan napojen läheisyydessä. Kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö ICAO (International Civil Aviation Organization) monitoroi avaruussäähän liittyviä ilmiöitä erilaisiin indekseihin perustuen ja määrittelee indekseille kynnyksarvoja, joiden ylittyessä voidaan odottaa maltillista tai vakavaa skintillaatiota. Skintillaation esiintymistodennäköisyyksien arviointiin käytetään GNSS-signaalin amplitudista johdettua indeksiä S4 (maltillinen 0.5, vakava 0.8), ja vaiheesta johdettua indeksiä σ_ϕ (maltillinen 0.4, vakava 0.7)⁸².

⁷⁷ NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Interfaces. IS-GPS-200. [Online]: <https://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200M.pdf>

⁷⁸ European GNSS (Galileo) Open Service. Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users. [Online]: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_Ionospheric_Model.pdf

⁷⁹ EGNOS Open Service (OS) Service Definition Document. [Online]: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/egnos_os_sdd_in_force.pdf

⁸⁰ GPS. New Civil Signals. [Online]: <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/>

⁸¹ EUSPA. Market understands value of dual frequency. 28.1.2020 [Online]: <https://www.euspa.europa.eu/newsroom/news/market-understands-value-dual-frequency>

⁸² K. Kauristie, "Global Navigation Satellite Systems Contributing To Space Weather Services For Civil Aviation," 2020 European Navigation Conference (ENC), 2020, pp. 1-5, doi: 10.23919/ENC48637.2020.9317314.

EGNOSin SoL (Safety of Life) -palvelussa⁸³ ionosfäärin aiheuttamien häiriöiden ennakointiin käytetään Ap-indeksiä, joka kuvaa geomagneettista aktiivisuutta. Ap-indeksin raja-arvona pidetään lukua 30, jonka ylittyessä SoL-palvelun suorituskyky on alentunut. Ap-indeksin raja-arvon ylittymisen todennäköisyys vaihtelee auringonpilkkujakson mukaan. Ilmatieteen laitoksen edustajien kanssa käytyjen keskustelujen perusteella⁸⁴ raja-arvo ylittyy auringonpilkkumaksimin ja seuraavien noin neljän vuoden aikana keskimäärin 35-49 päivänä vuodesta. Auringon aktiivisuuden ollessa matalaa auringonpilkkuminimin ja seuraavien noin neljän vuoden aikana Ap-indeksi ylittää 30 vain 23-25 päivänä vuodesta. ICAO:n käyttämistä raja-arvoista S4- ja σ_{ϕ} -indekseille ei ole saatavilla vastaavaa analyysiä.

Huomioitavaa on, että ionosfäärin aiheuttamista vakavista häiriötilanteista ei tällä hetkellä pystytä varoittamaan paikannusjärjestelmien käyttäjiä ennalta⁸⁵, vaan ainoastaan häiriön ollessa jo käynnissä.

2.6.2. Tahallinen häirintä ja harhautus

Tahallinen häirintä tai signaalin esto on EU-tasolla rangaistavaa ja häirintään tarkoitettujen laitteiden valmistus ja myyminen on kielletty. Laitteiden hallussapito on kuitenkin laillista. Ongelmalliseksi tilanteen tekee myös EU:n lainsäädännön takaamat henkilötietojen suojaamiseen liittyvät säädökset, joiden nojalla laitteet, jotka estävät paikkatietojen lähettämisen, ovat nostaneet suosiotaan⁸⁵. Kyseisten laitteiden toiminta perustuu kuitenkin GNSS-signaalin häiritsemiseen, joten niiden käyttö on laitonta.

GNSS-signaalin estämistä hienostuneempi häirinnän muoto on lähettää väärennettyä signaalia, jonka tarkoitus on harhaanjohtaa vastaanottaja uskomaan olevansa muualla kuin missä hän todellisuudessa on. Galileo on tällä hetkellä ainoa GNSS-järjestelmä, joka tarjoaa tavallisille kuluttajille mahdollisuuden todentaa vastaanotetun signaalin alkuperä, jolloin mahdollinen väärennetty signaali voidaan tunnistaa. Signaalin todentamiseksi siihen voidaan esimerkiksi lisätä jokin ominaisuus, joka on ainoastaan vastaanottajan tiedossa. Todennusmenetelmät antavat suojaa signaalin huijaushyökkäyksiä vastaan, mutta ne eivät suojaa signaalinestoa vastaan. Todennuksen toteutustavasta riippuu, suojaako se hyökkäykseltä, jossa aitoa signaalia varmenteineen vastaanotetaan ja tallennetaan myöhemmin toistettavaksi (meaconing).

Yksi keino puolustautua signaalinestoa vastaan on käyttää antennia, jonka säteilykuviota voidaan muuttaa. Tällöin GNSS-signaalin estävä häiriö voidaan suodattaa ja navigointiin tarvittava signaali ei peity häiriön alle. GNSS signaalin estämistä ja häirintää vastaan on siis olemassa menetelmiä, mutta näitä menetelmiä ei useissa käytännön sovelluksissa hyödynnetä kustannussyistä. Useissa siviilimarkkinoille tarkoitetuissa GNSS-vastaanottimissa on myös käytetty hyvin yksinkertaisia antennia, jolloin esimerkiksi kahden radiotaajuuskanavan samanaikainen käyttö ei ole mahdollista ja vastaanottimen suorituskyky heikkenee. Toisaalta teknologian kehittyminen on mahdollistanut pienempien laadukkaiden antennien valmistamisen ja lisännyt niiden käyttöä siviilimarkkinoilla⁸⁶.

⁸³ EGNOS Safety of Life (SoL), Service Definition Document, Issue 3.4. [Online]: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/egnos_sol_sdd_in_force.pdf

⁸⁴ Koskimaa, Petri ja Kauristie, Kirsti. Ilmatieteen laitos. Yksityiskeskustelu, 2021.

⁸⁵ S. Pullen and G. X. Gao, "GNSS jamming in the name of privacy: Potential threat to GPS aviation," Inside GNSS, pp. 21, 35, 41, 2012.

⁸⁶ 'EUSPA: Technology report' [Online]: https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/uploads/technology_report_2020.pdf

Tietokoneiden kasvava laskentateho asettaa uusia haasteita perinteisille salaustekniikoille, ja erityistä huolta aiheuttaa kvanttietokoneiden tutkimus. Kvanttietokoneet tulevat mullistamaan tietojenkäsittelyn, koska ne kykenevät suorittamaan moninkertaisen määrän laskutoimituksia samassa ajassa kuin tavanomaiset tietokoneet. Salauksen murtaminen kvanttietokoneilla ei ole vielä mahdollista, mutta on mahdollista, että niillä kyetään tulevaisuudessa murtamaan myös GNSS-signaalien salaus. Tämän takia esimerkiksi Saksassa Darmstadtin teknillinen yliopisto ja Fraunhofer instituutti aloittivat QuantumRISC-projektin⁸⁷, jonka tarkoituksena on kartoittaa keinoja kvanttihyökkäyksiä vastaan. Vaikka projektin pääpaino on autotekniikka-alalla, projektista saatuja tuloksia pystytään mahdollisesti soveltamaan myös muihin kohteisiin.

Suurin osa GNSS-häirinnästä erityisesti Suomessa on pienimuotoista ja yksittäisten pienten toimijoiden tekemää. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom mukaan häiriöiden määrä on kuitenkin ollut viime vuosina kasvussa. Traficom monitoroi häiriöitä, ja vastaanottaa ilmoituksia GNSS-häiriöistä sähköisen palvelun kautta. Ilmoituksia tekevät tyypillisesti tavalliset kansalaiset. Käytännössä syyksi on osoittautunut esimerkiksi laitevika GNSS-häiriön sijaan. Riskinä on, että tulevaisuudessa häiriöt ja jopa tahallinen häirintä tulevat lisääntymään GNSS-pohjaisten sovellusten (esim. GNSS-ajopiirit, -tietullijärjestelmät, ns. GeoFencing-järjestelmät jne.) lisääntymisen myötä¹¹.

Silloin tällöin on voitu havaita myös voimakkaampaa häirintää. Tämä on yleisempää maailmalla, erityisesti kriisialueilla tai niiden läheisyydessä. Heinäkuussa 2019 Iso-Britannian öljytankkeri joutui harhautuksen uhriksi Hormuzinsalmella Iranin eteläpuolella⁸⁸. Harhauttamisesta epäiltiin Iranin armeijaa. Myös Mustallamerellä on ollut laajamittaista laivojen harhauttamista. Harhautus tapahtuu vähitellen siten, että laiva näyttäisi harhautuneen reitiltä, ja näiden toistuvien harhautumisen seurauksena tehdyt reitin korjaukset vähitellen aiheuttavat laivan kurssin muuttumisen. Suurin osa julkisuuteen tulleista harhautustapauksista onkin tapahtunut merellä, jossa sitä on teknisesti helpompi toteuttaa, mutta sitä on havaittu myös esim. lentokenttien läheisyydessä Venäjällä⁸⁹.

Laajamittaista häirintää voi toteuttaa kytkemällä häirintälaitte eli jammeri suuritehoiseen suunta-antenniin, jonka avulla häirintäsignaalia voidaan lähettää suurella teholla kattamaan suurempi alue, kuin häirintälaitteella yksin. Tällaiset antennit ovat tyypillisiä sotilaskäytössä, ja signaali ja sen tulosuunta on helppo havaita. Harhautukseen voidaan käyttää samanlaista menetelmää vaihtamalla häirintälaitteen tilalle signaalisimulaattori. Maan pinnalla olevalla antennilla voidaan lähettää häirintää 2-5 kilometrin päästä, mutta kuten muussakin radiotoiminnassa, jos halutaan laajempi kattavuus, täytyisi käyttää suuritehoista parabolista antennia (halkaisija esim. 5-10 m) ja lähetyksen tulisi tapahtua ilmastai avaruudesta käsin.

Häiriöiden havaitseminen ja tunnistaminen on usein melko suoraviivaista, mutta niiden lokalisointi ei ole tällä hetkellä erityisen kehittynyttä. Esimerkiksi suuntimalaitteet ovat laajakaistaisia, ja tästä syystä usein on vaikea löytää sijainti, jossa muu (tavanomainen) radiospektrin käyttö ei häiritse suuntimointia.

⁸⁷ 'QuantumRISC' [Online]: https://quantumrisc.org/index_en.html

⁸⁸ Seized UK tanker likely 'spoofed' by Iran, Lloyd's List 16.8.2019: [Online]: <https://lloydslist.maritimeintelligence.informa.com/LL1128820/Seized-UK-tanker-likely-spoofed-by-Iran>

MI-6 probe if seized British tanker was given 'spoofed' Iran coordinates by Russian spies – The Register 24.6.2019: [Online]: <https://rntfnd.org/2019/07/24/mi-6-probe-if-seized-british-tanker-was-given-spoofed-iran-coordinates-by-russian-spies-the-register/>

⁸⁹ Jouni Rantakokko 2019, GNSS-Finland -seminaari [Online]: https://gnssinterference2019.files.wordpress.com/2019/06/rantakokko_20190612_v2.pdf

Laitteet ovat myös kalliita, ja usein suurikokoisia, joten niiden käyttö on kömpelöä. Usein yksittäisen häiriölähteen paikallistaminen voi olla kalliimpaa kuin häiriön aiheuttajan arvo. Traficomilla on laitteisto, jolla häirinnän lähde voidaan paikallistaa, mutta sen operointiin vaikuttavat em. seikat. Lisäksi GNSS-Finland-palvelu⁴ hälyttää Traficomia automaattisesti, mikäli satelliittisignaali havaitaan häiriötä. FinnRef-verkon havaintoasemat ovat kuitenkin suhteellisen harvassa, joten häiriö havaitaan tyypillisesti vain yhdellä asemalla kerrallaan. Tällöin häiriön paikallistaminen on vaikeaa. Esimerkiksi havaintoasemaverkkoa tihentämällä voitaisiin saavuttaa tilanne, jossa häiriölähde havaittaisiin kolmella tai useammalla asemalla, jolloin häiriölähteen likimääräinen lokalisaatio teoriassa onnistuisi.

GNSS-sovellusten ja -palveluiden kysynnän kasvu ja alan toimijoiden lisääntyminen kasvattavat myös tarvetta ymmärtää miten ja miksi GNSS-signaaleja häiritään ja miten häirintää vastaan voidaan suojautua tehokkaammin. Teknistä tietoa erityisesti laajamittaisesta häirinnästä ei ole yleisesti saatavilla, ja myös tutkimusprojekteissa tämän tiedon saatavuutta yleensä rajataan. Navigointi-, paikannus- ja aika-palveluiden turvaaminen tulisi siksi nostaa kriittiseen asemaan kyberturvallisuuskartoituksissa.

2.7. Arktisen alueen erityispiirteitä paikannuksessa

Vaikka GNSS-järjestelmät ovatkin nimensä mukaisesti koko maailman kattavia, arktisilla leveyksillä on huomioitava joitakin satelliittipaikannuksen suorituskykyä heikentäviä tekijöitä⁹⁰. Paikannussatelliittien radat käyttävät noin 55 asteen inkliinaatiokulmaa, pois lukien GLONASS, jonka inkliinaatio on 65°. Inkliinaatio vastaa sekä radan ja päiväntasaajan välistä kulmaa että korkeinta leveyspiiriä, jossa satelliitti voidaan havaita kohtisuoraan yläpuolella (zeniitissä). Näin ollen arktisilla alueilla satelliitit pakkautuvat pienemmälle osuudelle taivasnäkyvistä, mikä voimistaa paikanlaskennan virheitä.

Toinen satelliittipaikannuksen haaste arktisella alueella on avustepalveluiden saatavuus. Arktinen alue on harvaan asuttua, ja siellä myös sekä GNSS-avustepalveluiden tuottamiseen tarvittava infrastruktuuri että avustetiedon välittämiseen tarvittavat tietoliikenneyhteydet ovat kattavuudeltaan selvästi heikompia kuin tiheimmin asutuilla alueilla. Tavallisten tietoliikennesatelliittien käyttäminen avustetiedon välittämiseen ei palvele arktista aluetta hyvin, sillä geostationäärisillä radoilla kulkevat tietoliikennesatelliitit näkyvät korkeille leveyksille niin lähellä horisonttia, että ne jäävät usein ympäristön tai käyttäjän itsensä (esim. laivan runko tai kaartavan lentokoneen siipi) luomiin katveisiin. Tämä haaste koskee erityisesti SBAS-järjestelmiä.

Kolmas merkittävä tekijä arktisella alueella on voimakas ilmakehän aktiivisuus, josta myös revontulet ovat merkinä. Ilmakehän kerroksista satelliittipaikannukseen vaikuttavat merkittävästi ionosfääri ja troposfääri, ja näistä ensin mainittu voi aurinkomyrskyjen aikana aiheuttaa suuria ongelmia. Harvan infrastruktuurin vuoksi arktisella alueella myös satelliittipaikannusta täydentävät tai korjaavat järjestelmät ovat heikommin saatavilla: matkapuhelinverkkopaikannus on tavallistakin epäluotettavampaa, erityisesti lentoliikenteen käyttämää maanpäällistä radionavigointi-infrastruktuuria on heikommin ja karttatieto on usein epätarkempaa kuin tiheästi asutuilla ja liikennöidyillä alueilla. Säätilan ja pimeiden talvien vuoksi myös näkyvyys on usein heikko.

⁹⁰ Kirkko-Jaakkola, Martti, et al. "Challenges in Arctic Navigation and Geospatial Data: User Perspective and Solutions Roadmap." (2020). [Online]: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-576-7>

3. Kotimaiset ja kansainväliset toimijat

3.1. Kansainväliset toimijat

GNSS-järjestelmiä hyödyntävien palveluiden, GNSS-järjestelmien ja näissä käytettyjen komponenttien kansainväliset markkinat ovat kasvaneet tasaisesti viime vuosien aikana. GNSS-markkinoiden on myös ennustettu jatkavan tasaista kasvua ja markkinoiden oletetaan kaksinkertaistuvan vuoteen 2029 mennessä. Maailmanlaajuisesti tarkasteltuna markkinat ovat jakautuneet pääsääntöisesti kolmelle maantieteelliselle alueelle, joista Aasia on selvästi suurin 35 % osuudella (Kiina ~20 %, Japani ~10 % ja Etelä-Korea ~5 %). Yhdysvallat ja Eurooppa seuraavat perässä 28 % ja 27 % osuuksilla. Muiden alueiden yhteenlaskettu markkinaosuus jää siten noin 10 % kokoiseksi⁹¹.

GNSS-palveluita hyödyntäviä ja laitteita tuottavia toimijoita ovat eri valtioiden viranomaisten ja puolustusorganisaatioiden lisäksi yksityiset yritykset, joiden erityisosaaminen vaihtelee laitevalmistuksesta palveluiden tuottamiseen. Yritysten toimialat voidaan jakaa karkeasti neljään eri luokkaan: vastaanotin- ja komponenttivalmistajat, palveluntuottajat, järjestelmien soveltajat sekä GNSS-tuotteiden ja -palveluiden käyttäjät. Osa yrityksistä toimii useilla näistä osa-alueista, esimerkiksi Apple, Google, ja Microsoft, tuottavat sekä GNSS-pohjaisia palveluita että GNSS-sovelluksia hyödyntäviä laitteita.

Komponentti- ja laitevalmistajat tuottavat joko kokonaisia GNSS-vastaanottimia tai -komponentteja, esimerkiksi antennejä, joita hyödynnetään GNSS-vastaanottimissa. Suurimmat alan yritykset ovat vahvasti keskittyneet Yhdysvaltojen ja Euroopan alueelle, mutta viiden suurimman yrityksen listalla (Broadcom (US), Garmin (US), Hexagon (SE), Honeywell (US), Mediatek (CN)) on myös yksi toimija Aasiasta. Lisätuista yrityksistä ainoastaan Mediatekilla ei ole omaa tuotantoa vaan se keskittyy komponenttien suunnitteluun ja jakeluun. Muut nimetyistä yrityksistä toimivat laajasti eri maantieteellisillä alueilla. Tosin Broadcom on ulkoistanut puolijohdekomponenttien valmistuksen, mutta heidän komponenttitoimittajiltaan on toimitiloja useissa eri maissa Euroopassa, Amerikassa ja Aasiassa.

Yleisellä tasolla laitevalmistajilla on useita toimittajia tavanomaisille komponenteille, kuten piirilevyille ja mekaanisille osille. Tavanomaisten komponenttien valmistajia on myös markkinoilla runsaasti, joten tavarantoimittajan vaihtaminen on myös mahdollista, mikäli ongelmia esimerkiksi tavarantoimituksessa ilmenee. Ongelmaksi muodostuvat kuitenkin mikrosirut, koska valmistajia on markkinoilla vähemmän ja kaikki suuret tehtaot sijaitsevat Aasiassa. Euroopassa on muutamia mikrosiruja valmistavia yrityksiä, mutta nämä ovat usein erikoistuneet, ja kaiken kaikkiaan tuotetut sirumäärät ovat vähäisiä. Komponenttien hinnoittelussa on myös selvä ero, sillä Euroopassa tuotetut komponentit ovat pääsääntöisesti kalliimpia.

Järjestelmien soveltajat hyödyntävät GNSS-vastaanottimia omissa tuotteissaan, kuten älypuhelimissa tai autoissa, mutta navigointiominaisuudet eivät ole tuotteen pääsääntöinen tarkoitus. Alan suurin toimija on teknologiayritys Apple (US), mutta useat monialayritykset kuten Bosch (DE) ja China First Heavy Industries (CN), sekä autovalmistajat kuten Ford (US), General Motors (US) ja Honda (JP), hyödyntävät paikannusominaisuuksia tuotteissaan.

⁹¹ 'EUSPA: GNSS Market report, 2019' [Online]: <https://www.euspa.europa.eu/european-space/euspace-market/gnss-market/gnss-market-report>

Palveluntuottajat ovat yrityksiä, jotka tuottavat palveluita kuluttajille, tai esimerkiksi satelliittipaikannuksen tarkkuuteen ja nopeuteen liittyviä palveluita. Kansainvälisiä suuria palveluntuottajia ovat esimerkiksi Alphabet Inc. (Google, US), Microsoft (US), Denso (JP) ja Here Technologies (NL). GNSS-palveluita ja -ratkaisuja tuottavien suurten kansainvälisten yritysten lista alleviivaa markkinoiden jakautumista Amerikan, Euroopan ja Aasian kesken.

3.1.1. Esimerkkejä GNSS-palvelujen hyödyntäjistä

Tähän lukuun on kerätty suurimpia GNSS-järjestelmiä hyödyntäviä aloja ja esimerkkejä siitä, miten GNSS-ratkaisuja hyödynnetään. Lista ja siinä esitetyt esimerkit eivät ole kattava katsaus alan toimijoihin tai siihen, miten esimerkiksi paikannusta hyödynnetään eri aloilla, sillä eri toimijoita ja sovelluksia on tuhansia⁹². Liikenteen ja aikakriittisten palveluiden osalta GNSS-tarkkuusvaatimuksia on avattu enemmän luvussa 3.2.4.

Maatalous

Maailman väestömäärä kasvaa, ja lisääntyneet vaatimukset kulutetun ravinnon kalorimäärästä sekä kuluttajien kasvava kiinnostus lähituotetuille tai eettisesti kestäville tuotteille ovat kasvaneet huomattavasti erityisesti länsimaissa. Lisääntyvä kulutus sekä kuluttajien vaatimukset asettavat uusia haasteita ravinnon tuotannolle. Toisaalta uudet teknologiat, kuten kaukokartoitus, optisten sensoreiden käyttö maaperän valvonnassa sekä GNSS-ratkaisut, ovat mahdollistaneet uudenlaisen täsmämaatalouden kehityksen. Täsmämaatalous pyrkii hyödyntämään eri lähteistä kerättyä tietoa ja siten keskittämään esimerkiksi lannoitteiden tai kasteluveden käyttöä ja työvoimaa tai koneita alueille, joissa niistä on eniten hyötyä. GNSS-ratkaisut auttavat maataloja esimerkiksi seuraamalla karjan liikkumista tai mahdollistamalla viljelykoneiden ajamisen täsmällisesti määritetyillä reiteillä. Maatalouden vaatima GNSS-palveluiden tarkkuus riippuu hieman käyttökohteesta. Usein muutaman metrin tarkkuus paikannuksessa on riittävä, mutta joissakin sovelluksissa, kuten viljeltävän tuotteen istutuksessa, voidaan vaatia kymmenien senttimetrin tarkkuutta.

Ilmailu

Ilmailu on yksi ensimmäisistä aloista, joka otti satelliittipaikannuksen laajamittaisesti käyttöön. Ala on edelleen edelläkävijä GNSS-sovellusten käyttöönotossa. GNSS-järjestelmiä täydentävien palveluiden, kuten EGNOS, hyödyntäminen lentoliikenteessä on parantanut merkittävästi lentoturvallisuutta, mutta myös helpottanut lentotoimintaa vaativissa olosuhteissa, esim. laskeutumista huonojen sääolosuhteiden aikana. Galileo-paikannusjärjestelmän käyttöönotto tulee edistämään lentoliikenteen turvallisuutta ja tehokkuutta parantamalla useita eri taajuuksia hyödyntävien järjestelmien saatavuutta. Teknologian kehittyminen ja miehittämättömien alusten yleistyminen, avaa myös uusia mahdollisuuksia ilmailualalle. Helposti saatavilla oleva ja tarkka paikannustieto tulee mahdollistamaan lennokkien aikaisempaa laajemman käytön esimerkiksi valvonta- ja pelastustehtävissä tai tavarantoimituksessa.

Meriliikenne

GNSS-paikannus on yksi tärkeimmistä työkaluista, joita meriliikenteessä on käytössä muiden sähkömagneettisten järjestelmien (kuten tutkan) lisäksi. Tarkan ja nopeasti päivittyvän paikkatiedon

⁹² 'EUSPA: GNSS User needs and requirements' [Online]: <https://www.euspa.europa.eu/euspace-applications/euspace-users/user-needs-and-requirements>

saatavuus on korostunut varsinkin vilkkaasti liikennöityjen satamien läheisyydessä, jossa aluksen sijainti ja nopeus pitää olla tarkasti tiedossa. Uusien järjestelmien käyttöönotto sekä aluksissa että satamissa tulee tulevaisuudessa parantamaan laivaliikennettä merkittävästi. Teknologian kehitys tulee myös tulevaisuudessa mahdollistamaan itsenäisesti liikkuvien alusten käytön, jolloin luotettavan paikannuksen merkitys tulee entuudestaan korostumaan. Siviiliveneilyn lisääntyminen sekä meripelastustoimen vaatimukset myös osaltaan alleviivaavat uusien GNSS-järjestelmien tarpeellisuutta ja tulevat hyötymään paikannutarkkuuden paranemisesta.

Raideliikenne

Raideliikenteen käyttämät GNSS-palvelut ovat pitkään liittyneet lähinnä matkustajatietojärjestelmiin, mutta eurooppalainen rautatieliikenteen hallintajärjestelmä ERTMS (European Rail Traffic Management System) on etenemässä tasolle 3, jolla voidaan hyödyntää satelliittipaikannusta. EU-hanke CLUG (Certifiable Localisation Unit with GNSS in the Railway Environment)⁹³, pyrkii kehittämään juniin asennettavan seurantayksikön, jonka avulla junien sijainti on mahdollista määrittellä kustannustehokkaasti ja tarkasti. Seurantayksikön toiminta perustuu EGNOS-avustettuun GNSS-signaaliin sekä muiden sensorien tuottaman tiedon yhdistelmään, joka toimitetaan raideliikennettä hallinnoivien järjestelmien käyttöön. Vilkkaasti liikennöidyillä raideosuuksilla tarkka tieto kunkin junan sijainnista on turvallisuuden ja rahtiliikenteen kannalta tärkeässä asemassa, joten GNSS-pohjaiset sovellukset ovat hyödyllisiä. GNSS-palveluiden hyödyntäminen raideliikenteessä on myös usein haastavaa, johtuen toimintaympäristöstä, jossa GNSS-signaalin ja vastaanottimen välissä on esteitä, kuten tunneleita ja ratojen varsilla olevia rakennuksia.

Tieliikenne

Tiiviisti rakennettu kaupunkiympäristö aiheuttaa omat haasteensa luotettavalle paikannukselle, mutta autoihin integroidut paikannusjärjestelmät ovat yleistyneet nopeasti. Paikannuksen ja navigoinnin lisäksi uudet automallit hyödyntävät ympäristöstä kerättyä tietoa myös ajoturvallisuuteen liittyvissä ominaisuuksissa, kuten törmäyksenesto- ja ajoradan hallintajärjestelmissä. Eri sensoreiden tuottama tieto yhdistettynä tarkkaan paikannukseen on jo mahdollistanut tietystä määrin itsenäisesti ajavien autojen kehittämisen, joten uusien GNSS-järjestelmien mahdollistama tarkkuus tulee vauhdittamaan alan kehitystä. Ajoneuvon paikan tarkka tietämys tulee myös helpottamaan tieliikennettä valvovien viranomaisten työtä ja mahdollistaa esimerkiksi ruuhkamaksujen tai tietullien automaattisen keräämisen. Rahtiliikenteessä satelliittipaikannusta voidaan käyttää tavarankuljetukseen käytettyjen ajoneuvojen seurannan lisäksi myös itse rahdin seurantaan. GNSS-paikannuksen tarkkuuden parantuminen on myös mahdollistanut tuotteiden seurannan koko toimitusketjun ajan, tuotteen lähtiessä valmistajalta siihen hetkeen asti, kuin tuote saapuu ostajalle⁹⁴.

Aikakriittiset palvelut

GNSS mahdollistaa tarkan paikkatiedon lisäksi myös ajan tarkan määrittelyn. Vertaamalla eri GNSS-satelliiteista vastaanotettuja signaaleita vastaanottaja pystyy synkronoimaan oman kellonsa satelliittien mukana olevien hyvin tarkkojen atomikellojen aikaan. Tarkat aikaleimat ovat tärkeitä muun muassa

⁹³ 'Project CLUG' [Online]: <https://clugproject.eu/en>

⁹⁴ 'EUSPA: GNSS Market report, 2019' [Online]: <https://www.euspa.europa.eu/european-space/euspace-market/gnss-market/gnss-market-report>

finanssialalla, jossa osakekurssien hinnat saattavat muuttua nopeasti, jolloin osakkeiden osto- ja myyntiajat pitää tietää tarkasti. Myös useat yhteiskunnalle kriittiset järjestelmät, kuten sähkö- ja televerkot (erityisesti 5G) tarvitsevat tarkasti määritellyn ajan toimiakseen.

3.1.2. Kansainvälinen yhteistyö

European Union Agency for Space Program (EUSPA) on virasto, jonka tehtävä on tuottaa avaruuspohjaisia työkaluja ja ratkaisuja Euroopan Union jäsenmaille. Galileo- ja EGNOS-järjestelmien luotettavat ja turvalliset paikannus- ja navigaatiopalvelut ovat siten yksi EUSPA:n päätehtävistä. Paikannus- ja navigaatiopalveluiden lisäksi virasto edistää yhteistyötä teollisuuden toimijoiden välillä, rahoitta GNSS-tutkimus- ja kehityshankkeita EU:n sisällä, tukee kansainvälistä tutkimusta ja osallistuu kansainvälisten standardien määrittämiseen.

European Space Agency (ESA) pyrkii myös osaltaan edistämään kansainvälisestä yhteistyötä GNSS-sovelluksiin ja järjestelmiin liittyen. ESA:n johtama COLOSSUS-projekti⁹⁵, jonka tarkoituksena on tarkkailla satelliittinavigaation luotettavuutta eri mittakaavoissa aina globaalilta tasolta kansallisille ja alueellisille tasoille. COLOSSUS-projektissa hyödynnetään eri puolilla maapalloa jatkuvasti käytössä olevien GNSS-vastaanottimien (Continuously Operating GNSS Receiver, CORS) verkostoa⁹⁶, joka kerää havaintoja eri GNSS-järjestelmistä useilla eri taajuuksilla hyödyntäen erilaisia vastaanottimia. Verkosto koostuu osittain eri organisaatioiden tieteellistä toimintaa varten perustetuista asemista ja kansallisista asemista, mutta mukana on myös yksityisten yritysten asemia. Asemilta kerätyt havainnot käsitellään pilvipohjaisessa palvelussa, joka pystyy itsenäisesti käsittelemään ja ryhmittelemään GNSS-signaalissa havaittuja häiriöitä ja vikoja. Havaintoaineiston karttuessa COLOSSUS pystyy tunnistamaan tyypillisimmät GNSS-palveluiden häiriöt eri järjestelmien ja jopa yksittäisen satelliitin tarkkuudella. Havaituista häiriöstä muodostetaan tietokanta, jonka avulla voidaan tuottaa tietoa eri häiriöiden ja GNSS-palveluiden poikkeamien todennäköisyyksistä eri maantieteellisillä alueilla ja esimerkiksi siitä, millaisia häiriöitä eri GNSS-vastaanottimissa esiintyy. On tosin epäselvää, kykeneekö COLOSSUS-projekti tuottamaan mahdolliset lisäpalvelut itse, vai jäävätkö ne loppukäyttäjien vastuulle. Mahdollisen GNSS-häiriön sattuessa COLOSSUS myös kykenee antamaan lisätietoa siitä, onko kyseessä paikallinen häiriö vai esimerkiksi laajempi ilmakehän ilmiö. Tieto häiriön luonteesta saadaan lähes välittömästi, koska havaintoja kerätään jatkuvasti ja samanaikaisesti eri puolilta maailmaa.

3.1.3. Regulaatio ja valvonta

Radiotaajuuksilla toimivat järjestelmät, kuten GNSS, älypuhelimet sekä langattomat verkot, muodostavat kriittisen osan modernia toimivaa yhteiskuntaa. Näiden järjestelmien käyttö on myös jatkuvasti kasvussa, mutta käytettävissä olevia radiotaajuuksia on rajallinen määrä. Kansainvälinen telekommunikatio liitto (International Telecommunication Union, ITU) on suositellut, että radiotaajuuksien käyttö tulisi minimoida, koska ne voi luokitella rajalliseksi luonnonvaraksi (Artikla 44⁹⁷).

⁹⁵ 'ESA Navigation Innovation and Support Programme: COLOSSUS' [Online]: <https://navisp.esa.int/project/details/7/show/>

⁹⁶ 'ESA to use CORS networks for global error mapping' [Online]: <https://www.gpsworld.com/esa-to-use-cors-networks-for-global-error-mapping/>

⁹⁷ 'ITU constitution' [ONLINE]: <https://www.itu.int/council/pd/constitution.html>

Kansainvälisellä tasolla GNSS järjestelmiä säädellään Soft Law⁹⁸ säädöksillä, mutta yksittäisillä valtioilla ja esimerkiksi EU:lla on voimassa omat tarkat säädöksensä, jotka koskevat GNSS-sovellusten myymistä ja käyttöä. Radiolaitteiden sekä radiotaajuuksien sääntelystä EU:ssa vastaavat yhteistyössä Euroopan Komissio, Euroopan telekommunikaatiostandardien instituutti (European Telecommunications Standards Institute, ETSI)^{99,100}, sekä Euroopan posti- ja telekommunikaatiokonferenssin (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations, CEPT) elektronisen kommunikaation komitea (Electronic Communications Committee, ECC). Radiotaajuuksien käytön kehittämiseen liittyvissä asioissa Euroopan komissiota avustaa myös radiotaajuuksien lainsäädäntöryhmä (Radio Spectrum Policy Group, RSPG), joka julkaisee kannanottoja radiotaajuuksien käyttöön liittyvissä kysymyksissä¹⁰¹.

GNSS-palveluiden kansainvälisestä koordinaatiosta vastaa pääsääntöisesti Kansainvälinen GNSS-komitea (International Committee on GNSS, ICG), joka on alakomitea Yhdistyneiden kansakuntien (YK) avaruuden rauhallisen käytön komiteasta (Committee on Peaceful Uses of Outer Space, COPUOS). COPUOS:s saa myös huomattavaa organisatorista tukea YK:n ulkoavaruuden asian virastolta (United Nations Office for Outer Space Affairs, UNOOSA). Vastaavasti ITU johtaa kansainvälisellä tasolla radiotaajuuksien käytön synkronointia ja ITU:n radio-ohjesäännöt, jotka muodostavat osan YK:n ohjesäännöistä, säätelevät GNSS- ja radiotaajuuksia. ITU:n ohjesääntöjä ja käytäntöjä voidaan soveltaa kansainvälisesti ja muodostavat sopimusehdot, jotka sääntelevät haitallisten häiriöiden vaikutusta radiolaitteisiin ja radiolaitteiden aiheuttamia häiriöitä.

Yhdysvaltojen aktiivisesta roolista YK:ssa, ICG:ssa, ITU:ssa, ja muissa toimielimissä johtuen GNSS-palveluihin ja järjestelmiin liittyvät kansainväliset standardit ovat yhteneväisiä Yhdysvaltain lakien kanssa¹⁰². Toisaalta GPS, jota hallinnoi Yhdysvaltain avaruusvoimat, on edelleen maalimanlaajuisesti suosituin GNSS-järjestelmä. EU ja Yhdysvallat ovat sopineet GNSS taajuuksien koordinoinnin järjestämisestä häiriöiden vähentämiseksi sekä laatineet niin kutsutun 'US-EC' sopimuksen tulevien Galileo ja GPS-järjestelmiin pohjautuvien navigaatiojärjestelmien markkinoinnista sekä käytöstä¹⁰³.

⁹⁸ Guzman, Andrew & Meyer, Timothy. (2010). International Soft Law. The Journal of Legal Analysis. 2. 171. 10.2139/ssrn.1353444.

⁹⁹ "Radio Spectrum," ETSI. [Online]: <https://www.etsi.org/technologies/radio/>

¹⁰⁰ ETSI and ECC, "The European regulatory environment for radio equipment and spectrum: An Introduction," Version 2.1, pp. 1-3, July 2016. [Online]: https://www.etsi.org/e-brochure/radio/ETSI_ECC%20Brochure_2016_Web.pdf

¹⁰¹ European Commission, Radio Spectrum Policy Group, Draft for public consultation: RSPG Opinion on the implementation of the current RSPG and its revision to address the next period. [Online]: <https://rspg-spectrum.eu/rspg-opinions-main-deliverables/>

¹⁰² P. B. Larsen, "International Regulation of Global Navigation Satellite Systems," Journal of Air Law and Commerce, Vol. 80, Issue 2, pp. 365-421, Spring 2015.

¹⁰³ European Parliament legislative resolution of 26 October 2011 on the draft Council decision on the conclusion of the Agreement on the promotion, provision and use of GALILEO and GPS satellite-based navigation systems and related applications between the European Community and its Member States, of the one part, and the United States of America, of the other part (11117/2011 – C7-0185/2011 – 2011/0054(NLE)), OJ C 131E, 8.5.2013. [Online]: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52011AP0463&qid=1628773074536>

Kaikilla EU:n jäsenmailla tulisi olla yhtenäiset säädökset koskien GNSS-järjestelmien valmistusta, maahantuontia sekä markkinointia, mutta käytännössä säädöksissä on vaihtelua maiden välillä¹⁰⁴. Radiotaajuuksien sääntelyyn ja GNSS-laitteisiin liittyvät EU-tason päätökset pyrkivät muun muassa yhtenäistämään radiotaajuuksien käyttöön liittyviä teknisiä asetuksia (päätös 676/2002/EC), sekä mahdollistamaan eri laitteiden ja sovellutusten yhteentoimivuuden (päätös 243/2012/EU).

EU:n alueella myytävien radio- ja GNSS-laitteiden tulee täyttää EU:n direktiivien ja asetusten vaatimukset, jotta ne saavat CE-merkinnän¹⁰⁵. Oleellisin näiden laitteiden valmistusta ja myyntiä koskeva direktiivi on radiolaitedirektiivi (Radio Equipment Directive, RED, 2014/53/EU)¹⁰⁶, jonka mukaan valmistettujen radiolaitteiden tulee toimia tehokkaasti radiotaajuuksilla haitallisten interferenssien vähentämiseksi. RED-direktiivi asettaa radiolaitteiden maahantuojille ja valmistajille vaatimuksia myös laitteita koskevan dokumentaation osalta. Dokumentaation tulee olla saatavilla ainakin 10 vuotta laiteen valmistuksesta ja siihen tulee kirjata selvästi esimerkiksi se, millä teholla ja taajuuskaistalla laite toimii. Myös laitteen sarjanumeron ja mallin tulee olla selvästi esillä. Asetusten takana on pyrkimys mahdollistaa laitteiden seuranta ja lisätä valmistajien vastuuvollisuutta laitteista.

GNSS:iin ja yleisemmin radiolaitteisiin sovelletaan myös muita EU-direktiivejä. Valmistusmateriaalien tulee täyttää vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta säädetty direktiivi (Restriction of Hazardous Substances 2011/65/EU)¹⁰⁷, ja sähköllä toimivien laitteiden tulee täyttää elektromagneettisen yhteensopivuuden (Electromagnetic Compatibility, 2014/30/EU)¹⁰⁸ ja matalien jännitteiden (Low Voltage, 2014/35/EU)¹⁰⁹ direktiivit. Kyseiset direktiivit liittyvät myös läheisesti CE-merkinnän saamiseen, joten laitteiden valmistus, markkinointi ja maahantuonti vaatii huolellisen selvityksen, jotta voidaan varmistua, että laitteet täyttävät kaikki vaaditut direktiivit.

3.2. Kotimaiset toimijat ja niiden roolien kuvaus

Liikenne- ja viestintäministeriössä (LVM) on parhaillaan lausuntokierroksella uusi ”Satelliittinavigointijärjestelmien tehokas hyödyntäminen Suomessa” -toimenpideohjelma 2021–2025. Uusi

¹⁰⁴ S. Bu-Pasha, "Vulnerabilities in Localization with regard to GNSS and Harmful Radio Interference: International and EU Law Aspects," IEEE Access, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2805282

¹⁰⁵ "CE Marking" [Online]: https://ec.europa.eu/growth/single-market/ce-marking_en

¹⁰⁶ M 536 Commission Implementing Decision C (2015) 5376 final of 4.8.2015 on a standardisation request to the European Committee for Electrotechnical Standardisation and to the European Telecommunications Standards Institute as regards radio equipment in support of Directive 2014/53/EU of the European Parliament and of the Council, [Online]: https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/mandates/index.cfm?fuseaction=search_detail&id=556

¹⁰⁷ Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment Text with EEA relevance, OJ L 174, 1.7.2011. [Online]: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AL%3A2011%3A174%3ATOC>

¹⁰⁸ Directive 2014/30/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility (recast), OJ L 96/79, 29.3.2014. [Online]: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AL%3A2014%3A096%3ATOC>

¹⁰⁹ Directive 2014/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of electrical equipment designed for use within certain voltage limits Text with EEA relevance, OJ L 96, 29.3.2014. [Online]: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AL%3A2014%3A096%3ATOC>

toimenpideohjelma on tarkoitus julkaista syyskuussa 2021, ja se on jatkoa vuosien 2017–2020 ohjelmalle¹¹⁰, jossa asetettiin 17 konkreettista toimenpidettä satelliittinavigointijärjestelmien laajaan hyödyntämiseen Suomessa.

3.2.1. Yritykset

LVM:n GNSS-toimenpideohjelmassa todetaan, että GNSS-alan yritystoiminta Suomessa on vahvistunut ja satelliittijärjestelmien tuottamaa tietoa hyödyntävien tuotteiden ja palveluiden tarjonta loppukäyttäjille on yleistynyt. Yritykset myös tarjoavat viranomaisille paitsi laitteita, myös huoltovarmuuden ja yhteiskunnan toiminnan kannalta oleellisia toimintoja (PRS-vastaanottimet ja operaattoritoiminta) samalla tavoin, kuin esim. pankit toimivat tällä hetkellä vahvan tunnistautumisen mahdollistajina. Yrityksiä on myös laajasti mukana GNSS-tutkimuksessa, jolla on mahdollistettu uusia palveluita, esim. Euroopan mitta-kaavassa Galileon aikapalvelun määrittely. Ylipäätään koko avaruustoiminta on vahvasti viranomaisten, tutkimuslaitosten ja yritysten yhteistyötä. Esim. sektoritutkimuksen yhteistyö yritysten kanssa edistää uusien innovaatioiden saamista valtionhallinnon käyttöön.

Tärkeimpiä paikannusalan yrityksiä Suomessa ovat laitevalmistajat U-Blox, Septentrio (vastaanottimia), Radientum (antenneja), RogerGPS (GNSS-toistimia). Pieniä startup-yrityksiä tulee alalle jatkuvasti, kuten Kindhelm ja Missing Link, ja elokuussa 2021 uusi valmistaja Arctic Positioning Systems, joka toi markkinoille maailman pienimmän aurinkoenergialla toimivan GNSS-vastaanottimen. DA-Group on ensimmäinen suomalainen yritys, joka on valtuutettu Galileo PRS-laitteiden valmistajaksi, ja tarjoaa myös häirinnän poistolaitteita. Palveluoperaattorina PRS:lle Suomessa toimii Erillisverkot. RTK-avustuspalveluita tarjoavat Hexagon/Leica ja Geotrim. Lisäksi on suuri joukko eri osien valmistajia, ohjelmistojen tai palveluntuottajia, joiden liiketoiminnassa GNSS on tärkeässä roolissa (paikannuksen kannalta relevantteja ovat esim. HERE ja Instan kaltaiset suuret yritykset), mutta niiden varsinainen toimiala ei ole GNSS vaan esim. kommunikaatio yleisesti liittyen 5G:hen, IoT:hen, lokalisointiin, älyratkaisuihin, tilannekuvaan tai kyberturvallisuuteen (esim. Ramboll, Unikie, Huld, Harp Technologies, Terratec, GIM, Fleetrange, Atlas Elektronik, Sensible4). Myös usealle liikenne-, infrarakentamis- ja kuljetusalan yritykselle on GNSS merkittävä osa tuotteiden ja palvelujen toimintaa, kuten esimerkiksi Wärtsilä Voyage, Destia tai Ramboll. Sisätila- tai hybridipaikannukseen tarvittavaa laitteistoa ja ratkaisuja tuottaa Suomessa myös iso joukko yrityksiä, kuten Indoor Atlas, Quuppa, Exafore, VimAI, Nordic Inertial, Streetpath, Smarteye Systems, Noccela, Iiwari, Murata). FGI:n vuosittain järjestämä sisätilapaikannuksen INTO-seminaari¹¹¹ on koontanut yhteen sisätila- ja hybridipaikannuksen toimijoita Suomessa. Seminaarit jatkuvat vuonna 2022.

Suomessa tehdään pääasiassa GNSS-vastaanottimien tuotekehitystä ja prototyyppejä. Varsinainen valmistus siirretään yleensä alihankkijalle lukuun ottamatta erikoiskomponentteja, joita suomalaiset yritykset valmistavat itse. Komponenttivalmistajia (yleiskomponentit, piirilevyt ja mekaniikka) on eri puolilla maailmaa, mutta mikrosirujen valmistus keskittyy vahvasti Aasian suuriin tehtaisiin. Eurooppalaiset valmistajat ovat pieniä ja hinnat ovat korkeampia. Nämä asiat vaikuttavat suomalaisten yritysten mahdollisuuksiin saada komponentteja, mikäli niiden saatavuudessa tulisi ongelma. Yritykset varautuvat tähän varastojen avulla.

¹¹⁰ 'Satelliittinavigointijärjestelmien tehokas hyödyntäminen Suomessa. Toimenpideohjelma 2017–2020' [Online]: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-530-9>

¹¹¹ INTO-seminaari: <https://intoseminar.com/>

3.2.2. Viranomaiset ja valvonta

Suomen avaruushallinto ja -toiminta on hajautettu eri sektoreille, mutta sitä koordinoi työ- ja elinkeinoministeriö (TEM), jonka alla toimii avaruusasian neuvottelukunta, jonka sihteeristön navigointijaostossa on edustaja Traficomista. Avaruustoiminnan hajoaminen eri hallinnonaloille koskee myös satelliittipaikannusta ja erityisesti sen tuottamia palveluita. Satelliittipaikannusjärjestelmät kuuluvat Suomessa LVM:n toimialaan, ja pääasiallinen viranomainen on Traficom, jonka vastuulle kuuluu lakisääteisenä tehtävänä radiohäiriöiden selvittäminen. Tärkein prioriteetti tässä on huoltovarmuskriittinen radioliikenne. Traficom vastaa myös Galileon palvelutuotannosta Suomessa (tehtäviin kuuluu EU:n GNSS-järjestelmien kehittämisen kansallinen koordinointi ja Suomen edustaminen näihin liittyvissä työryhmissä) sekä kyberturvallisuudesta¹¹². Traficom on lisäksi kansallinen PRS-viranomainen. Paikannuspalveluita, kuten GNSS-mittausasemien verkkoa (FinnRef) ylläpitää maa- ja metsätalousministeriön hallinnonalaan kuuluva Maanmittauslaitos (MML), joka on myös FINPOS-paikannuspalvelun tuottaja¹¹³. Näiden lisäksi MML ylläpitää Suomessa EGNOS-järjestelmän RIMS-valvonta-asemia (Ranging and Integrity Monitoring Stations): yhtä asemaa Vironlahdella ja tulevaisuudessa myös rakenteilla olevaa Kuusamon asemaa.

Navigoinnin ja paikannuksen tutkimus Suomessa on keskittynyt Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskuksen kahteen osastoon (Navigointi ja paikannus sekä Geodesia ja geodynamiikka). Suomen virallista aikapalvelua, joka perustuu satelliittipaikannukseen, ylläpitää TEM:in alainen VTT MIKES. Tällä tavoin GNSS:iin liittyvät toiminnot ovat hajautuneet useammalle hallinnon sektorille siten, että valvonta kuuluu Traficomille, ja palveluita tuottavat MML ja VTT MIKES.

3.2.3. Tutkimuslaitokset & korkeakoulut

Suomessa satelliittipaikannukseen liittyvä tutkimus ja kehitys on vuosikymmenten ajan keskittynyt MML:n tutkimusyksikköön Paikkatietokeskukseen (FGI – vuoteen 2015 asti Geodeettinen laitos), jossa sitä tutkitaan sekä Navigoinnin ja paikannuksen osastossa (satelliitti- ja sensoripaikannus) sekä Geodesian ja geodynamiikan osastossa, joka tutkii ja kehittää paikannuksessa tarvittavia vertailujärjestelmiä. Maanmittauslaitoksen tuotanto ylläpitää Suomen pysyvää GNSS-mittausasemaverkkoa (FinnRef®) sekä siihen liittyvää FINPOS-paikannuspalvelua.

Maaliskuussa 2021 avattu GNSS-Finland-palvelu monitoroi ja ilmoittaa satelliittipaikannussignaalien poikkeamista Traficomille. Palvelun verkkosivut ja karttasovellus ovat avoimena kaikille käyttäjille, ja lisäksi Paikkatietokeskuksella on meneillään uusia hankkeita järjestelmän kehittämiseksi, koska tällä hetkellä se hyödyntää vain hyvin pienen osan FinnRef -asemien tuottamasta tiedosta eli kantoaallon signaali-kohinasuhteen (CNR - Carrier-to-Noise Ratio). Tämä tutkimus jatkuu Euroopan Avaruusjärjestön (ESA) rahoittamassa PNT Traffic Light - PETAL-hankkeessa¹¹⁴, jossa arvioidaan seurantapalvelun laajempaa toteutettavuutta arktisella alueella. ESA rahoittaa vastaavanlaisen palvelun tutkimus- ja kehitystyötä myös maailmanlaajuisesti¹¹⁵.

¹¹² Kyberturvallisuuskeskus [Online]: <https://www.kyberturvallisuuskeskus.fi/fi/toimintamme/satelliittipaikannus?toggle=Galileon%20viranomaispalvelu%20%28PRS%29&toggle=Avoin%20palvelu>

¹¹³ FINPOS [Online]: <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntemalle-kayttajalle/finpos-paikannuspalvelu>

¹¹⁴ PETAL-hanke [Online]: <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/pnt-traffic-light-petal>

¹¹⁵ GPS World [Online]: <https://www.gpsworld.com/esa-to-use-cors-networks-for-global-error-mapping/>

GNSS-alaan liittyvää koulutusta annetaan hyvin rajoitetusti Suomessa muutamassa yliopistossa ja ammattikorkeakoulussa, ja varsinaista GNSS-koulutusohjelmaa ei ole tällä hetkellä tarjolla. GNSS:iin liittyen tarjotaan pääasiassa yksittäisiä kursseja osana muuta opetusta. Esimerkiksi Aalto-yliopistossa on aiemmin ollut apulaisprofessori Maaria Nordmanin mukaan maanmittausalan koulutuslinja, mutta se on ajettu alas. Geoinformatiikan maisteriohjelmassa GNSS-opetus on pääasiassa geodesian suuntausvaihtoehdossa, mutta käytännössä GNSS:iin liittyvää sisältöä on yhdellä pakollisella peruskurssilla ja yhdellä syventävällä kurssilla muutamilla kurssin luennoilla. Lisäksi maisteriohjelman opiskelijoista vain pieni osa valitsee geodesian suuntauksen.

Tampereen yliopistossa GNSS:iin liittyvää tutkimusta tehdään useissa tutkimusryhmissä, joiden ydinosaamisalaa ovat esimerkiksi signaalinkäsittely, paikannusalgoritmit sekä -vastaanottimet. Professori Jari Nurmen mukaan Tampereen yliopisto tuottaa alalle eniten osaajia Suomessa, mutta käytännössä GNSS:iin liittyvän opinnäytetyön tekijöitä on kourallinen vuosittain. Tyypillisesti GNSS:iin liittyvä syvempi osaaminen muodostuu nimenomaan opinnäytetyötä (diplomityö, väitöskirja) tehdessä kurssien sijaan. GNSS:iin liittyvää opetusta on Tampereella joitain kursseja pääasiassa Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunnassa.

Vaasan yliopistossa on tietotekniikan professori Heidi Kuusniemen aloitteesta otettu Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateemisen yksikön opetustarjontaan syventävien opintojen tasoinen GNSS Technologies -kurssi vuodesta 2019, jossa on mukana opettaja myös MML:n Paikkatietokeskuksesta. Tämä kurssi on tarjolla avoimesti FITech-verkostoyliopisto Finnish Institute of Technology:n kautta kaikille hakukille ja se on myös tarjolla Aalto yliopiston sekä Tampereen yliopiston opiskelijoille. Kurssin suorittaa vuosittain noin 20 opiskelijaa.

Ammattikorkeakouluista Metropolia, Lapin ja ruotsinkielinen Novia ammattikorkeakoulut tarjoavat GNSS-opetusta osana maanmittaustekniikan insinööritasoisia koulutusohjelmiaan. GNSS-tekniikat ovat oleellinen osa maanmittauksen ja kartoituksen insinöörityötä.

Pula GNSS-alan osaajista ei kosketa ainoastaan Suomea, vaan myös muualla maailmassa on hankaluuksia rekrytoida alan osaajia. Koulutustilanne on myös muualla Euroopassa samankaltainen kuin Suomessa, varsinaisia GNSS-koulutusohjelmia ei juurikaan ole. Mahdolliseksi ratkaisuksi GNSS-osaajien lisäämiseksi on ehdotettu esimerkiksi GNSS:iin liittyvän MOOC:in (Massive Online Open Course) tuottamista eri asiantuntijatahojen ja yliopistojen toimesta. Tämä voisi toimia myös alan näkyvyyden lisäämiseen opiskelijoiden ja myös muun väestön keskuudessa. Yliopistojen edustajat ovat keskustelleet asiasta, mutta konkreettista suunnitelmaa tästä ei vielä ole. Nykyisellään GNSS-alan yritykset tekevät yhteistyötä pääasiassa eri tutkimusryhmien kanssa, mutta alan yritysten näkyvyyttä ja yhteistyötä opiskelijoiden suuntaan olisi hyvä lisätä.

3.2.4. Tarpeet ja tarkkuus- sekä luotettavuusvaatimukset eri käyttökohteissa

Suomen Akatemian rahoittamassa REASON-projektissa on tehty yhteenvetoa eri toimialojen GNSS-käyttäjätarpeista. Projektissa tehtiin käyttäjähaastatteluja useille tahoille: Traficom (taajuusvalvonta, kyberturvallisuuskeskus, lento- ja meriliikenne), sisäministeriön eri yksiköt, Finanssiala, Fingrid, Insta Def-Sec, Erillisverkot, sekä rakennusalan toimijoita ja teleoperaattoreita. Tämän selvityksen yhteydessä on lisäksi haastateltu uudelleen Traficomien taajuusvalvontaa ja kyberturvallisuuskeskusta sekä VTT MIKE-Sin johtajaa ja aikapalvelusta vastaavia tutkijoita sekä henkilöitä Fintrafficilta ja Ilmatieteen laitokselta, ja lisäksi tietoa on saatu finanssi- ja kommunikaatioalojen yrityksistä ja paikannusalan laitevalmistajilta.

Kaikki haastateltavat eivät halunneet omaa organisaatiotaan mainittavan raportissa erikseen (erityisesti yritysten edustajat), vaan halusivat antaa tiedot yleisluontoisesti koko alaa koskevana.

Aika- ja paikkatiedon tarkkuusvaatimuksia on koottu Taulukossa 2. Lähes kaikki loppukäyttäjät korostivat paitsi saatavuus- ja tarkkuustarpeita, myös tiedontarvetta vikatilanteista ennakoimista ja varajärjestelmiin siirtymistä varten. Sekä tätä selvitystä että REASON-projektia varten tehdyissä käyttäjähaastatteluisissa tuli ilmi myös muita luotettavuuteen liittyviä näkökohtia:

Taulukko 2. Vaatimukset taulukoituna käyttökohteittain. Lähde: REASON-projektissa tehty käyttäjäraportti, FGI, 2021

Toimiala	Käyttökohde	Paikannus	Ajanmääritys
Finanssiala	Pörssi, pankit		1 μ s
Televerkot	Teleoperaattorit, tiedonsiirto		100 ns–1.1 μ s
Poliisi, pelastustoimi	Poliisi- ja pelastustoimi (112)	1-100 m	1 s
Puolustusteollisuus	Puolustusteollisuus		1 s
	Puolustusteollisuuden viestintä		1 μ s
	Merenkulku	10 m	2s ¹¹⁶
	Tulenjohto		1 s
Rakennusteollisuus	Rakennusteollisuus	1 cm	
Sähkönsiirto	Digitaaliset sähköasemat		1 μ s
	Sähkölinjan vian paikannus		100 ns
Liikenne	Siviili-ilmailu	0.5 m ¹¹⁷	
	Siviilimerenkulku	10 m ¹¹⁶	2s ¹¹⁶

- Tietoliikenne - Koko verkon laajuudelta ajan on oltava yhtenäinen ja synkronoitu vähintään 1.1 mikrosekunnin tarkkuudella. Tätä heikompi tarkkuus pysäyttää tukiasemat välittömästi, jolloin 5G-verkko ajautuu alas ja vanhempien verkkojen käytettävyyks heikkenee. Jotta voidaan tunnistaa kuituverkossa asymmetriaa aiheuttavia muutoksia, tarvitaan n. 100 ns tarkkuutta ajanmääritykselle. Tämän tarkkuusvaatimuksen johdosta on tarvetta järjestelmälle, joka tunnistaa paikannussignaalin häiriöitä.
- Teleoperaattorit - sekä teleoperaattorien että VTT MIKESin taholta on esiintynyt tarvetta paremmalle ajansiirtopalvelulle, jotta lakisääteinen kahden viikon mittainen ajan ylläpito ilman GNSS-signaalia olisi mahdollinen. Suomessa teleoperaattorit joutuvat varautumaan tähän itse, ja tätä on turvattu heidän omilla grand master -kelloillaan sekä linkityksellä VTT MIKESin kelloihin Otaniemessä, toisin kuin esim. Ruotsissa, jossa on valtakunnallinen aikasykronointi. Tarkka aika tarvitaan yhtenäisesti koko verkon alueelle, ja jo 1.1 μ s virhe pysäyttää tukiaseman. Suurimpana haasteena tässä nähdään ajan siirto. Ajanmäärityksestä on enemmän luvussa 2.5.

¹¹⁶ International Maritime Organization, "Revised Guidelines for the Onboard Operational Use of Shipborne Automatic Identification Systems (AIS)," Resolution A.1106(29), December 2015.

¹¹⁷ M.-S. Jeong et al, "Flight test evaluation of ILS and GBAS performance at Gimpo International Airport.," GPS solutions, 2016, p. 473–483. [Online]: <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0457-1>

- Finanssiala – Finanssialaa sääntelee MiFID2-direktiivi, joka vaatii tarkan ajanmäärityksen ja kellojen synkronoinnin rahoitusvälineiden kaupankäyntiin¹¹⁸, ja tästä syystä esim. pankit käyttävät NTP-palveluita (tosin pohjoismaisten pankkien kauppapaikat ovat muualla kuin Suomessa). Tarkkuusvaatimus riippuu siitä, millä tavalla kauppaa käydään. Pörssissä tämä tarkkuusvaatimus on mikrosekunnin luokkaa. Mikrosekunnin resoluutio tarvitaan erityisesti ultranopeassa kaupankäynnissä (high frequency trading, HFT), jossa transaktioita tapahtuu satoja tuhansia sekunnissa. Jos ajanmäärityksessä on häiriö, pörssi suljetaan ja aikaleimat tarkistetaan myöhemmin. Finanssialan mukaan Helsingin pörssistä ei ole raportoitu tällaisia häiriöitä. Ajan synkronointi nousi yhdeksi keskeiseksi asiaksi useassa haastattelussa, asiasta lisää luvussa 2.5.
- Sähkönsiirto - Digitaalisissa sähköasemissa tarvitaan mikrosekuntien tarkka aika tai digitaalisen sähköaseman ja näin sähköverkon käyttö voi estyä laajalla alueella. Tarkan ajanmäärityksen vuoksi jokaisella sähköasemalla on käytössä GNSS-antenni ja grand master -kello. Sähkölinjan vian paikantamiseen sähköasemien välillä tarvitaan 100 ns tarkkuutta. Erityisesti tahallinen GNSS:n häirintä ja harhautus voi potentiaalisesti aiheuttaa vakavia ongelmia sähköjen jakeluun¹¹⁹.
- Poliisi- ja pelastustoimi (112) - Pelastustoimessa yleensä sekuntiluokan ajan määrittäminen on riittävää. Jotkut kommunikointimenetelmät voivat kuitenkin vaatia kellojen olevan synkronoitu nanosekuntiluokan tarkkuudella. Ajanmäärityksen oikeellisuus (ja erityisesti tieto virhetilanteista) on tärkeä myös niissä tilanteissa, joissa paikkatietoa tarvitaan todistusaineistona oikeudessa vahvistamaan henkilön sijainti tietyllä hetkellä. Paikannustiedot ovat kriittisiä, mikäli osoitetta ei ole tiedossa tai olosuhteet ovat vaativia. Tarvittaessa pelastustoimi turvautuu perinteisiin menetelmiin, kuten paperisen kartan käyttöön. Savusukelluksessa paikkatiedon tarkkuus on kriittisempi, mutta silloin turvaututaan usein sisätilapaikannukseen. Poliisi- ja pelastustoimen kannalta heikompikin paikannustarkkuus (satojen metrien luokkaa) on riittävä esim. yksiköiden sijaintien seuraamiseen, tai lähimmän yksikön lähettämiseksi kohteeseen. Kohteen tunnistukseen (esim. oikea rakennus) tämä tarkkuus ei kuitenkaan riitä. Lisäksi on tarvetta häirinnän lokalisointiin partiotuiminnassa.
- Puolustusteollisuus - Yleisesti sekuntiluokan tarkkuus on riittävä, jotkin laitteet vaativat tarkemman ajan synkronointia varten. Viestintäjärjestelmissä on tarve mikrosekuntiluokan ajanmääritykselle (joskus tarkemmallekin). Turvallisuussovelluksissa ovat myös yleistymässä droonit, joita ei pysty lennättämään ilman paikannusta. Drooneja voi lennättää myös näköyhteyden ulkopuolella (ns. BVLOS-lennättäminen, Beyond Visual Line of Sight) ja sitä voi tällä hetkellä tehdä erityisellä luvalla esim. tilapäisellä vaara-alueella. Uusi EU:n drooniasetus, jonka siirtymäaika loppuu ensi vuoden alussa, edellyttää BVLOS-toiminnalta erityinen-kategorian toimintalupaa (Traficomilta), jonka jälkeen on myös helpompi tilastoida käyttäjiä tarkemmin.
- Liikenne
 - Lentäminen ilman GNSS:aa on turvallista myös varajärjestelmiä käyttäen, mutta silloin kokonaisen lentokentän kapasiteetti alenee merkittävästi. Varakeinoina ovat konventionaaliset tarkkuuslähestymismenetelmät tai lennonjohdon ohjeet, kuten tutkavektorointi. Osaa lentoasemista ei voida operoida ollenkaan, jos satelliittipaikannusta ei ole saatavana. EU-asetus 2018/1048 velvoittaa

¹¹⁸ A complete guide to time stamping regulations in the financial sector, NPL [Online]: https://www.npl.co.uk/getattachment/5b94a9f8-bd79-478e-ba25-8fc56f51be33/NPLTimeComplete_Guide.pdf.aspx?lang=en-GB&ext=.pdf

¹¹⁹ Kankaanpää, Jari-Pekka. "GNSS Related Threats to Power Grid Applications." (2021). [Online]: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe202103096912>

siirtymään GNSS-operointiin, mutta Suomen siirtymäsuunnitelmaa ei ole vielä julkaistu¹²⁰. Suomessa on kuusi lentoasemaa, joilla mittarilentotoiminta edellyttää GNSS:N käyttöä: Enontekiö, Joensuu, Kajaani, Kuusamo, Lappeenranta ja Savonlinna. Muilla lentoasemilla on käytössä myös muita menetelmiä, mutta tulevaisuudessa mittarilentomahdollisuus jää vain muutamille keskeisimmille asemille¹²¹. GNSS:n saatavuus on kriittisintä juuri laskuissa ja nousuissa. Vaikka tarkkuus ei näissä ole niin kriittinen, aikatiedon tarkkuus voi olla kriittinen lentokentillä muiden kuin ilmailuissa käytettävien järjestelmien kannalta (mm. isojen kenttien - esim. Heathrow - omat sähköverkot). Oma lukunsa on vielä kasvavat droonimarkkinat, joita varten sääntely on vielä kehitteillä, mutta tarkkuusvaatimus tulee vastaamaan miehitettyä ilmailua.

- o Myös merenkulkua avustavat järjestelmät käyttävät GNSS:aa. Huviveneiden kohdalla ongelmaksi on muodostunut se, että luotetaan liian sokeasti paikannukseen. Merenkulussa GNSS:n lisäksi käytetään tutkaa, optista tähystystä ja paikallistuntemusta (luotsit), ja navigoinnin pitäisi onnistua myös kartan ja maamerkkien avulla sekä em. rinnakkaisjärjestelmillä. Paikannuksen tarkkuus avomerellä ei ole yhtä kriittinen kuin satamissa: paikallisilla häiriöillä ei avomerellä ole suurta merkitystä, koska alusten nopeudet ovat yleensä niin hitaita, että reaktioaikaa on yleensä kymmeniä minutteja. Optiset havainnot riittävät törmäysten välttämiseen. Tästä huolimatta terrestriaalijärjestelmiä (kuten LORAN ja eLORAN) pohditaan uudestaan otettavaksi käyttöön juuri GNSS-häirinnän vuoksi. Meriliikennettä ohjataan rannikkoalueilla samaan tapaan kuin lentoliikenteen ohjaus. Koska EGNOS-palvelua ollaan laajentamassa myös meriliikenteeseen, FGI on tutkinut yhteistyössä Väyläviraston kanssa myös EGNOS-järjestelmän hyödyntämistä Suomenlahdella. Tätä tarvitaan, koska laivojen korkeustieto on tulevaisuudessa entistä tärkeämpi lastin optimoimisen takia. Paikannus on myös tärkeä osa autonomista merenkulkua.
- o Tieliikenteessä älypuhelimien navigointisovellukset ovat syrjäyttäneet reittinavigointiin käytettävät erilliset autonavigaattorit, ja niiden tarjoama joukkoistettu tietovirta mahdollistaa myös reaaliaikaisen liikennetiedon käyttäjille. Apple CarPlay ja Android Auto -teknologioilla älypuhelimia voi käyttää myös auton infonäytöllä. Navigaattorien käyttö on niin yleistä, että Traficomista arvioitiin, että esim. GNSS-häiriö voi aiheuttaa liikennejärjestelmän puuroutumisen ja pahimmillaan maaliikenteen pysähtymisen, koska ajonopeudet hidastuvat merkittävästi ilman navigointia. Tämä tulee korostumaan autonomisten autojen yleistyessä. Jos esim. 10 vuoden sisällä 10 % autoista on itseajavia, niiden pysähtyminen kokonaan riittäisi puuroutamaan liikenteen. 1 m paikannustarkkuus tarvitaan autojen törmäyksen toimintaan, kun taas automaattiliikenteen tarkkuusvaatimus on vähintään 10 cm luokkaa¹²².
- o EU-alueen rautatieliikenne on digitalisoitumassa, joten GNSS:n saatavuus tulee kriittiseksi. Myös Suomen on otettava käyttöön eurooppalainen rautatieliikenteen ERTMS-hallintajärjestelmä, jonka 3. taso hyödyntää GNSS:aa sijaintitiedon tuottamisessa. Tavoitteena on, että järjestelmä toimii vuoteen 2040 mennessä. Myös Euroopan parlamentin raportti raideliikenteen turvallisuudesta suosittaa EU:n raideliikenneteollisuutta ottamaan satelliittipohjaiset junienseurantajärjestelmät käyttöön

¹²⁰ Ilmailun navigaatio- ja valvontalaitejärjestelmien strategia Suomessa 2020 – 2030 [Online]: https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/regulation/Traficom%20Ilmailun%20navigaatio-%20ja%20valvontalaitestrategia_%20luonnos_%20päivitetty%202020.pdf

¹²¹ Ilmailukäsikirja [Online]: https://www.ais.fi/ais/aip/ge/EF_GEN_1_5_EN.pdf

¹²² Arctic PNT [Online]: <https://arctic-pnt.org/2018/03/09/robottautoja-testataan-lapin-alytiella/>

mahdollisimman nopeasti¹²³. GNSS-häiriö tulee aiheuttamaan merkittävää haittaa junaliikenteelle. Digirata-hankkeessa¹²⁴ pilotoidaan junien kulunvalvontaa ja siinä testataan myös 5G-järjestelmiä.

- Lisäksi paikannusriippuvaisia ovat useiden alojen työkoneet esim. metsä- tai rakennusteollisuudessa. Paikannustarkkuuden toleranssit vaihtelevat eri sovelluskohteissa 2–20 cm välillä. Rakennusteollisuudessa on usein vaatimuksena senttimetrin korkeustarkkuus. Koneohjatut koneet ovat kaikista eniten riippuvaisia GNSS:sta ja pysähtyvät, jos sitä ei saada, mikä aiheuttaa töiden viivästyistä. Näitä ovat mm. kaivinkoneiden anturit, joiden perusteella tiedetään kauhauksen korkeus. Anturit ovat nykyään yleisesti käytössä rakennusteollisuudessa ja riippuvaisia RTK-GPS:n 2 cm tarkasta paikannuksesta.

3.3. Kansallinen yhteistyö

3.3.1. GNSS-dataa hyödyntävät oheispalvelut ja tuottajat

GNSS-palveluista on tullut näkymättömissä oleva osa, johon yhteiskuntamme nojaa vahvasti, olivatpa kyseessä sitten paikannus-, navigointi- tai aikapalvelut. Uhkien kasvaessa GNSS-järjestelmien kestävyys on pakko vahvistaa. Sekä Iso-Britannian että Yhdysvaltojen teettämien selvitysten mukaan suositeltavin tapa vahvistaa GNSS-järjestelmien paikannus-, navigaatio- ja aikapalveluja on hyödyntää ns. järjestelmäratkaisua, jossa satelliittipohjaista paikannusta tuetaan muilla ratkaisuilla. Esimerkiksi eLORAN-järjestelmä hyödyntämällä matalalla kiertoradalla olevia satelliitteja ja kehittämällä ajan siirtoa kaapeli- tai kuituverkon yli. GNSS-signaalin kuuluvuutta voidaan myös parantaa kehittämällä parempia antennejä tai hyödyntämällä vastaanottimia, jotka voivat käsitellä useamman GNSS-järjestelmän signaalia samanaikaisesti^{125,126}.

Siinä missä paikkaratkaisun saamiseen ja ylläpitämiseen on kehitetty erilaisia varajärjestelmiä (erityisesti sensorit ja muilla kuin GNSS-taajuuksilla tehtävä radionavigointi), ajanmäärityksen varajärjestelmät ja ajansiirto ovat edelleen haastavia. Tällä hetkellä aikasynkronointia tarvitsevat palveluntuottajat joutuvat itse varautumaan aikapalvelun häiriöihin. Teleoperaattorit ylläpitävät omia grand master-kellojaan (yleensä 2-3 kpl) ja pyrkivät vertaamaan niitä VTT MIKES-aikaan. Pankkialalla synkronointipalvelu myös joko tuotetaan itse tai ostetaan kaupalliselta toimittajalta. KIEVA-raportin mukaan haasteena ovat valtakunnanrajat, koska poikkeusoloissa voisi aiheutua merkittäviä hankaluuksia mm. maksuliikennejärjestelmissä, jos aikasynkronointi ei toimi Suomeen. Yksi ratkaisu näihin haasteisiin voisi olla Ruotsin ja Iso-Britannian mallin mukainen kansallinen hajautettu aikapalvelu internet-protokollalla.

VTT MIKES hyödyntää geodeettisia kaksitaajuus-GNSS-aikavastaanottimia virallisen ajan ylläpidossa. Aikavastaanottimilla muodostetaan yhteys VTT MIKESin ylläpitämän UTC(MIKE)-ajan ja BIPM:n

¹²³ 'Railway safety and signalling: Assessing the state of play of the ERTMS deployment' [Online]: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0327_EN.html

¹²⁴ Digirata-hanke [Online]: <https://digirata.fi>

¹²⁵ 'Protect, Toughen, and Augment Global Positioning System for Users' [Online]: <https://www.gps.gov/governance/advisory/recommendations/2018-09-topic-papers.pdf>

¹²⁶ 'Satellite derived time and position: Blackett review' [Online]: <https://www.gov.uk/government/publications/satellite-derived-time-and-position-blackett-review>

(Bureau International des Poids et Mesures) ylläpitämän UTC-ajan¹²⁷ vertailemiseksi. Vertailu (ns. Circular-T) on jatkuvaa ja tulokset julkaistaan kuukausittain. VTT MIKES siis osallistuu UTC-ajan määrittämiseen. Vertailun tulosten perusteella atomikellojen taajuusmallia päivitetään kuukausittain.

Lentotoiminta on yksi tärkeimmistä GNSS-oheispalvelujen hyödyntäjistä, sillä EGNOS-järjestelmä on kehitetty juuri lentoliikennettä varten. EGNOS:in LPV 200-palvelun on tarkoitus korvata nykyisiä mittarilähestymislaitteita, mutta Suomessa ongelmaksi tulee niiden toimintavarmuus, sillä EGNOS-signaali ei kunnolla kata koko Suomea. Ongelmia on korkeilla leveysasteilla, jossa signaalin vastaanottamisessa on haasteita. Tätä korjaamaan saadaan uusi EGNOS RIMS-asema Kuusamoon, mutta se ei poista koko ongelmaa. GNSS-häiriöiden tehokkaampi monitorointi ilmailun näkökulmasta parantaisi tilannetta sekä Suomessa että kansainvälisesti. Koordinoinnin ja kansainvälisen yhteistyön tarve on tässä ilmeinen, ja ilmailuala hyötyisi esim. tiedolla Galileoon järjestelmätason ongelmista. Euroopan avaruusvirasto EUSPA on yhdessä EU-komission, EASAn ja EUROCONTROLin (European Organisation for Safety of Air Navigation) kanssa käynnistämässä seurantamekanismia, joka myös varoitettaisiin ilmatilan käyttäjiä tilanteessa, jossa GNSS:n suorituskyky ei täytä ilmailun vaatimuksia. Tämä GNSS-monitorointistrategia vastaa monitorointitarpeeseen Euroopan tasolla.

Yksi potentiaalinen uhka sekä GNSS- että EGNOS-järjestelmille on avaruussää. Aurinkomyrsky aiheuttaa pahimmillaan katkoksen GNSS-datan saatavuuteen ja pysäyttää tässä tapauksessa myös ajansiirron. GNSS-järjestelmiä voidaan käyttää paikannuksen lisäksi myös ionosfäärin ja avaruussään monitorointiin. Esimerkiksi TomoScand-hankkeessa¹²⁸ hyödynnetään muiden mittauslähteiden ohella FinnRefin GNSS-havaintoja avaruussään monitorointiin Suomessa¹²⁹.

4. Tulokset

4.1. Havainnot ja johtopäätökset

4.1.1. Mikä toimii hyvin?

GNSS-palveluita hyödyntävien tai palveluita tuottavien yritysten määrä Suomessa on kasvussa ja vastaavasti myös paikannus- ja aikapalveluiden tarpeen odotetaan tulevaisuudessa kasvavan. Kokonaisuutena GNSS-markkinat ovat kasvussa paitsi Suomessa myös kansainvälisesti. Alan toimijoiden laaja tietotaito ja ymmärrys asiakkaiden tarpeista tulee selvästi ilmi uusien vihreitä arvoja tukevien tuotteiden kehittämisellä, esimerkiksi hyödyntämällä aurinkopaneeleita paikannuslaitteissa. Suomessa toimivat yritykset ovat myös vahvasti yhteiskunnallisia toimijoita: ne osallistuvat tieteellisen tutkimuksen tekemiseen ja tukevat viranomaistoimintaa mm. huoltovarmuuteen liittyvissä kysymyksissä. GNSS-markkinoiden vakaan kasvun takaamiseksi alan toimijoiden tarpeiden ymmärtäminen ja näihin vastaaminen on tärkeässä asemassa. Osaan tarpeista on kyetty jo vastaamaan, esimerkkinä GNSS-Finland-palvelu, mutta kehityskohteiden määrä tulee tulevaisuudessa kasvamaan. Uusien projektien suunnittelu ja toteutus on kuitenkin Suomessa hyvällä mallilla, sillä paikannus- ja aikapalveluiden parissa ja laajemmin koko avaruussektorilla työskentelevät tahot, yksityiset yritykset, tutkimuslaitokset sekä valtion virastot

¹²⁷ Bureau International des Poids et Mesures. BIPM technical services: Time Metrology. [Online]: <https://www.bipm.org/en/time-metrology>

¹²⁸ TomoScand. [Online]: <https://space.fmi.fi/MIRACLE/tomoscand/>

¹²⁹ Avaruussääkeskus. Avaruussää Suomessa. [Online]: <https://rwc-finland.fmi.fi/>

tekevät yhteistyötä. Uusien GNSS-järjestelmien tarjoamat mahdollisuudet on myös ymmärretty, esimerkiksi Galileon PRS-signaalin vastaanottimien valmistaminen sekä mahdollisuus tehdä signaaliin kehittämiseen liittyvää tutkimusta. Galileo PRS-palvelun odotetaan osaltaan parantavan GNSS:n huoltovarmuutta Euroopassa.

4.1.2. Mitä kehitettävää

Kansallisen aikasykronoinnin tarve on noussut esiin useissa haastatteluissa sekä tämän selvityksen yhteydessä että Paikkatietokeskuksen aiempien tutkimushankkeiden (REASON, GNSS-Finland –palvelu) aikana. Vaikka VTT MIKESin laboratorioissa olevat kellot pysyvät käynnissä suurienkin häiriöiden aikana (kuten aurinkomyrskyt), aikatietoa ei saada eteenpäin sillä kuitulinkit eivät toimi pitkällä etäisyyksillä yhtä hyvin kuin GNSS. Jos hajautettu aikapalvelu toteutettaisiin esim. Ruotsin mallin mukaan, tarvittaisiin kaikkiaan 5-7 vetymaser- ja Cs-kelloa toiminnan jatkuvuuden varmistamiseksi. Tässä mallissa vikasietoisuutta parannetaan siten, että samassa sijainnissa käytettävät kellot kahdennetaan. Kellojen hinnat alkavat noin 100000 eurosta, joten 10 vuoden käyttöiällä kunkin kellon vuosibudjetti olisi noin 10000-15000€ vuodessa. VTT MIKESin johtajalta Martti Heinoselta saadun tiedon mukaan VTT MIKESin ajan ylläpidon kokonaisbudjetti on vuodessa 220k€, josta hankintojen, investointien ja laboratorion ylläpidon osuus on noin 80k€ vuodessa.

Nykytilanteessa häirinnän lokalisaatioon vaadittavan laitteiston käyttö on kallista ja sen operointi on kömpelöä. Laajamittaisen ja kustannustehokkaan häirinnän lokalisaation mahdollistamiseksi on tehtävä kehitystyötä. Esimerkiksi pienten ja edullisten kuluttajatasen vastaanottimien hyödyntäminen yhdessä GNSS-Finlandin kanssa mahdollistaisi nykyistä huomattavasti tiheämmän verkon luomisen. Tällöin voitaisiin paikallistaa häiriöitä GNSS-signaalissa huomattavasti nykyistä tehokkaammin. Lisäksi tiheämpi verkko mahdollistaisi esimerkiksi paremman avaruussään monitoroinnin ja mallintamisen Suomessa ja paremman varautumisen äärimmäisiin avaruussään ilmiöihin. Tiheämpi verkko todennäköisesti avaisi muitakin uusia mahdollisuuksia GNSS-mittausten hyödyntämiseen. Tutkimusta aiheesta tarvitaan enemmän.

Tällä hetkellä MML:n tarjoama GNSS-Finland –palvelu käyttää FinnRef-verkon tuottamasta tiedosta vain murto-osan, ja kysyntää on ollut mm. häiriötiedon saamiseen takautuvasti (tätä tietoa on FinnRefistä jo saatavana mutta GNSS-Finland –palvelu ei tällä hetkellä tallenna tietoa), häiriön syyn selvittämiseen (tämä vaatii signaalin muodon analysointia sekä esim. avaruussäähavaintojen yhdistämistä seurantalpalveluun), aikapalvelun seurantaan (joka tällä hetkellä on tekeillä) sekä mahdollisesti kattamaan EGNOS- sekä tuleva PRS-palvelu. EGNOSin osalta maanlaajuinen signaalin laadunseuranta parantaisi palvelua erityisesti pohjoisessa, jossa signaalin saatavuus on muutenkin ollut rajatumpaa.

4.1.3. Puuttuvat roolit ja toimijat

Suomesta löytyy toimijoita kattamaan lähes kaikki GNSS-palvelujen tuottamiseen liittyvät yksittäiset aspektit. Merkittävin tekijä, joka on vaikuttanut Suomessa GNSS-palvelujen tilannekuvan puuttumiseen, on toiminnan hajanaisuus. Paikannuksen turvallisuutta ja saatavuutta koskevia toimintoja on monen eri hallinnonalan virastoissa: MML tuottaa paikannuspalvelua ja tekee käytännössä ainoana siihen liittyvää tutkimusta, taajuusvalvonta keskittyy Traficomiin, joka myös vastaa kyberturvallisuudesta ja esim. liikenteessä tarvittavista luvista (ja lisäksi Väylävirastolle kuuluvat infrastruktuuria käsittelevät asiat). Aikapalvelua ylläpitää VTT MIKES. Avaruushallinto on keskittynyt työ- ja elinkeinoministeriöön. Myös sisäministeriössä ja Puolustusvoimissa käsitellään paljon sellaisia turvallisuuteen liittyviä asioita, joiden

kannalta paikannus on oleellista. Avaruussäähän liittyvä tieto ja osaaminen keskittyy Ilmatieteen laitokseen. Vaikka yhteistyötä onkin paljon, tämä hajanaisuus aiheuttaa välillä tietokatkoksia.

Myös alan koulutus ja tutkimus on osittain hajaantunutta. Lisäksi koulutus on yrityscentän viestien mukaan riittämätöntä sovellusalueiden osaajatarpeisiin nähden. Vaikka Paikkatietokeskus on virallisesti alan ainoa tutkimusyksikkö, yliopistoissa ja tutkimuslaitoksissa tehdään jonkin verran GNSS:iin liittyvää tutkimusta. Tästä on enimmäkseen hyötyä, mutta kaikkien avaruusaiheiden keskittäminen samaan organisaatioon tuo myös merkittäviä synergiaetuja. Esim. Saksan avaruuskeskus DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) pystyy yhdistämään GNSS:n (Saksa on mukana Galileo-tutkimuksessa) muuhun avaruustoimintaan ja uusiin innovaatioihin, kuten kvanttimekaniikan tutkimuksen hyödyntämisen paikannuksessa lähitulevaisuudessa.¹³⁰ Saksa onkin ottamassa tieteellistä etumatkaa tässä aiheessa verrattuna muihin maihin. Yhdysvalloissa avaruushallinto keskittyy NASA:an (National Aeronautics and Space Administration), kun taas GPS:ää ylläpitää Yhdysvaltain avaruusvoimat.¹³¹ Suomi on toimijana huomattavasti pienempi, mutta parempi synergia edesauttaisi GNSS-tilannetietoisuutta ja helpottaisi mahdollisten puuttuvien toimintojen tehokkaampaa kehitystä. Synergia mahdollistaisi myös tehokkaamman rahoituksen tarvittaville palveluille.

4.1.4. Muuta

Vaikka satelliittipaikannusta on tehty jo kymmeniä vuosia, teknologia on silti jatkuvasti uudistuvaa ja näin sillä tulee olemaan jatkuva kytkös tutkimukseen ja kehitykseen. Tämä näkyy myös kansainvälisessä avaruustoiminnassa. Tätä kytköstä korostaa, että paikka- ja aikatieto on digitalisaation ytimessä: lähes kaikki tieto sisältää sijainti- tai aikaleiman, ja digitaaliset palvelut ovat entistä enemmän sijaintiperusteisia (esim. joukkoliikenteen reittioppaat, sähköpotkulautojen vuokraus, ruokalahetykset ja –kuljetukset, pelit kuten Pokemon Go, sekä varauspalvelut ja sanomalehtien digiversiot, jotka räätälöivät tarjonnan käyttäjän sijainnin perusteella). Tämän takia paikannuksen viimeisin asiantuntijatieto tulee aina perustumaan tutkimukseen, ja monissa maissa viranomaistoimintaan liittyvä asiantuntijarooli keskittyy tutkijoille. Tutkimustoiminnalle on tyypillistä rahoituksen epävarmuus. Yhtäältä kilpailtu rahoitus on toimiva keino ylläpitää tutkimuksen laatua, mutta toisaalta toiminnan jatkuvuus kriittisten toimintojen kannalta ei välttämättä toteudu ilman erityistä rahoitusta. Suomessa tämän ongelman ratkaisuna on enimmäkseen tilaustutkimus.

4.2. Menetelmiä aika- ja paikkatiedon sekä kriittisten toimien turvaamiselle

Ruotsissa, Iso-Britanniassa ja Yhdysvalloissa tehdyissä selvityksissä on ilmaistu selkeästi huoli yhteiskunnalle kriittisten palveluiden riippuvuudesta GNSS:stä sekä paikannuksen että aikapalveluiden osalta. GNSS-satelliitit ovat alttiita luonnollisille häiriöille, kuten aurinkomyrskyille, joiden ennustaminen on äärimäisen haastavaa. Voimakkaan myrskyn osuessa maapalloon, on mahdollista, että kaikki GNSS-pohjaiset järjestelmät menettävät toimintakykynsä, jolloin varajärjestelmät ovat kriittisiä toiminnan turvaamisessa¹³². Sekä Iso-Britannian että Yhdysvaltojen selvityksessä mahdolliseksi satelliittinavigoinnin varajärjestelmäksi nostettiin, maanpäällisten radiomajakoiden verkosto eLORAN. Vastaanotintekniikan

¹³⁰ DLR opens the Institute of Quantum Technologies in Ulm [Online]: https://www.dlr.de/content/en/articles/news/2021/02/20210527_dlr-opens-the-institute-of-quantum-technologies-in-ulm.html

¹³¹ gps-gov [Online]: <https://www.gps.gov>

¹³² 'GPS Backup: Is eLoran the Answer?' [Online]: <https://www.aviationtoday.com/2012/04/12/gps-backup-is-eloran-the-answer/>

kehittyminen sekä parannukset lähetettävän signaalin muodossa mahdollistavat navigoinnin jopa 8-10 metrin tarkkuudella, sekä noin 100 ns tarkkuuden aikapalveluille¹³³. Vaikka eLORAN ei yllä modernien GNSS-järjestelmien tarkkuuteen, varajärjestelmänä se kuitenkin mahdollistaa navigoinnin useissa eri käyttötarkoituksissa. Periaatteessa eLORAN-verkosta voitaisiin myös käyttää tukemaan nykyisiä GNSS-järjestelmiä, esimerkiksi DGNSS-asemina.

Inertiapaikannusta ja sen yhdistämistä muihin sensoreihin ja signaalilähteisiin voidaan käyttää paikannukseen GNSS:n ollessa kokonaan poissa käytöstä. Inertiapaikannuksessa tunnetaan vähintään sijainti suhteessa navigoinnin lähtöpisteeseen. Hyödyntämällä radiomajakoita tai muita ns. opportunistisia signaaleja voidaan selvittää myös absoluuttinen sijainti ulkotoiloissa, ja inertianavigoinnilla ja eri sensorifuusion menetelmillä voidaan paikantaa myös sisätiloissa. Paikkatietokeskuksessa on tehty tutkimusta erityisesti jalankulkijoiden GNSS-riippumattomasta paikannuksesta, jossa hyödynnetään mm. pieniä kullattajatasoisia inertiasensoreita, barometrejä ja muita soveltuvia sensoreita^{134, 135}. Näiden paikannusmenetelmien potentiaalisia käyttäjiä ovat erityisesti pelastustoimi ja puolustusvoimat.

Suomessa toimivien laite- ja komponenttivalmistajien tuotanto on pääsääntöisesti ulkoistettu alihankkijoille, joten täällä tehdään vain tuotekehitystä ja laitteiden testausta. Yritysten tulisi kuitenkin kiinnittää huomiota koko valmistusketjun turvaamiseen. Taloudellisten riskien ymmärtämisen ja minimoimisen lisäksi tuotantoprosessit on hyvä sertifioida myös alihankkijoiden osalta laadun takaamiseksi. Toiminnan turvaamiseksi poikkeusoloissa ja kriittisten komponenttien saatavuuteen on myös hyvä kiinnittää huomiota. Saatavuusongelmat on myös hyvä selvittää alihankkijoiden osalta, esimerkiksi suosiiiko jokin alihankkijoista isompaa asiakasta pienten asiakkaiden kustannuksella.

Galileon PRS-signaalin tutkimus ja kehitystyö on meneillään ja valmistuessaan PRS-signaali, ja sitä hyödyntävät laitteet tulevat takaamaan mahdollisimman vähähäiriöisen toimintaympäristön niin viranomaisille kuin pelastuspalveluillekin. PRS-signaalin hyödyntäminen tulisi siten nostaa ratkaisevaan asemaan kyberturvallisuuskartoituksissa, jotka käsittelevät paikannus- tai aikakriittisiä kohteita ja palveluita¹³⁶.

4.2.1. Tulevaisuuden kehitysnäkymät

Tulevaisuudessa 5G ja tekoäly tulevat vahvistamaan digitaalista murrosta entisestään, koska ne mahdollistavat tehokkaamman tietoyhteyden, jota käyttävät mm. pilvipalvelut (ja big data), IoT, teollinen internet, autonominen liikkuminen jne. Nämä kaikki edellyttävät tarkkaa paikka- ja aikatietoa¹³⁷. Lisäksi 5G tulee täydentämään satelliittipaikannusta, koska tukiasemien tiheämpi verkko mahdollistaa etäisyysmittaukset ja siten paikan määrittämisen. Tarve paikannukselle tulee siis vielä nykyisestäänkin

¹³³ 'GPS Backup: Is eLoran the Answer?' [Online]: <https://www.aviationtoday.com/2012/04/12/gps-backup-is-eloran-the-answer/>

¹³⁴ INTACT - Infrastruktuurista riippumaton taistelijan tilannetietoisuus. [Online]: <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/intact-infrastruktuurista-riippumaton-taistelijan-tilannetietoisuus>

¹³⁵ CANDO - Collaborative Augmented Navigation for Defence Objectives. [Online]: <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/cando-collaborative-augmented-navigation-defence-objectives>

¹³⁶ 'PRS signal for public security' [Online]: <https://www.gsc-europa.eu/news/public-regulated-service-prs-equals-public-security-3>

¹³⁷ Euroopan komissio. 5G. [Online]: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/5g>

korostumaan. Tämä koskee myös GNSS:aa, sillä toisiaan täydentävät paikannusmenetelmät ovat tällä hetkellä ainoa tapa turvata jatkuva paikannuksen saatavuus.

Nopeista edistysaskelista huolimatta kvanttitekniologioiden saattamisessa jokapäiväiseen käyttöön navigointi- ja aikaratkaisujen lähteeksi on vielä useita esteitä. Yksi merkittävimmistä ongelmista taloudellisten rajoitteiden lisäksi on käyttövalmiin kvanttinavigointijärjestelmän rakenteen puute. Useat tutkimusryhmät ovat kehittäneet yksittäisiä osia navigointijärjestelmästä, mutta ei ole vielä selvää, miten toimiva järjestelmä tulisi rakentaa tai miten kvanttinavigointijärjestelmän signaali saadaan siirrettyä pitkien matkojen päähän. Ratkaisut kumpaankin kysymykseen ovat vielä teoreettisella tasolla, ja ensimmäiset käytökelpoiset kvanttijärjestelmät tulevat todennäköisesti olemaan väliaikaisia. Tästä johtuen kolmanneksi kysymykseksi muodostuu, miten tavanomaiset GNSS-järjestelmät yhdistetään tulevaisuudessa kvanttijärjestelmien kanssa. Kvanttijärjestelmien kehittäminen sekä niiden käyttöönoton suunnittelu on tarpeellista, sillä ne tulevat tarjoamaan GNSS-järjestelmiä vakaampia, tarkempia ja ennen kaikkea turvallisempia aika- sekä paikkatietoratkaisuja. Kvanttijärjestelmien käyttöönotto sekä ylläpitäminen tulee kuitenkin olemaan huomattavasti kalliimpaa, ja siksi GNSS-järjestelmät tulevat olemaan kustannustehokkain vaihtoehto käyttökohteisiin, joissa signaalin tarkkuus ja turvallisuus eivät ole kriittisiä.

Tulevaisuuden menetelmistä on syytä mainita vielä LEO-piensatelliitteihin (Low Earth Orbit) eli cube-sateihin perustuva paikannus. Piensatelliitit kiertävät lähempänä maata kuin GNSS-satelliitit, ne ovat edullisempia toteuttaa, ja niiden ympärille on rakentumassa paljon avaruustoimintaa lähitulevaisuudessa. Myös signaali on vahvempi ja siten niissä on potentiaalia myös sisätilapaikannukseen. Suomessa on alkanut tähän liittyen kehityshanke, jossa piensatelliittipaikannusta on tarkoitus tutkia ja kehittää¹³⁸.

5. Yhteenveto

GNSS-teknologia on pitkälle kehittyntä, mutta siihen kohdistuvat uhat ja koko ajan lisääntyvä tarve tarkalle ja luotettavasti saatavalle paikka- ja aikatiedolle vaativat jatkuvaa teknologioiden kehitystä. Tätä tarvetta lisää käynnissä oleva digitaalimurros. Suomessa GNSS-palvelujen saatavuus ja turvallisuus on kohtuullisen hyvä, mutta tiettyjä puutteita ja uhkia on havaittavissa, joiden vaikutusten minimointiin olemme esittäneet vaihtoehtoja tässä raportissa. Tärkeimpiä niistä ovat signaalin laadun kattavampi monitorointi ja menetelmät ajan synkronointiin. Alan kansainvälinen ja kotimainen tutkimus tulee edistämään myös GNSS:n ja ylipäätään paikannuksen resilienssiä: kansainvälisesti on menossa monitoroinnin kehityksen lisäksi myös tuntuva panostus kvanttitekniologioihin, piensatelliitteihin ja sensori- ja hybridipaikannukseen. Tämä kehitys jatkuu myös Suomessa, ainakin mikäli alan tutkimuksen ja koulutuksen resurssit säilyvät sellaisina, että alalle riittää tarpeeksi asiantuntijoita.

¹³⁸ INCUBATE-projekti: <https://www.uwasa.fi/en/articles/small-satellites-can-provide-method-accurate-navigation-indoors-incubate-project-receives>

6. Sanastoa

APV	Approach with Vertical Guidance
BDT	BeiDou:n referenssiaika
BeiDou	Běidǒu Wèixīng Dǎoháng Xitǒng, Kiinan operoima GNSS-järjestelmä
BIPM	Bureau international des poids et mesures
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight
CAS	Commercial Authentication Service
CDMA	Code Division Multiple Access
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CLUG	Certifiable Localisation Unit with GNSS in the railway environment
CNR	Carrier-to-Noise Ratio
COPUOS	Committee on Peaceful Uses of Outer Space
CORS	Continuously Operating GNSS Receiver
Cospas-Sarsat	Globaali satelliittien välityskapasiteettia käyttävä meripelastuksen organisaatio
CSC	Centre for Scientific Computing, Tieteen tietotekniikan keskus Oy
DGNSS	Differential GNSS
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Saksa
DOD	Department of defence, Yhdysvallat
DOE	Department of energy, Yhdysvallat
ECC	Electronic Communications Committee
EDAS	EGNOS Data Access System
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service, Eurooppalainen SBAS järjestelmä
eLORAN	Enhanced Long Range Navigation
ePRTC	Enhanced Primary Reference Time Clocks
ERTMS	European Rail Traffic Management System
ESA	European Space Agency
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EUROCAE	European Organisation for Civil Aviation Electronics
EUROCONTROL	European Organisation for Safety of Air Navigation
EUSPA	European Union Agency for Space Program
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FGI	Paikkatietokeskus (Finnish Geospatial Research Institute)
FINPOS	MML:n ylläpitämä satelliittipaikannuspalvelu
FinnRef	Suomen valtakunnallinen GNSS-mittausasemaverkko
FinnTraffic	Liikenteenohjausyhtiö, Suomen valtion omistama
FITech	Finnish Institute of Technology, verkostoyliopisto
FUNET	Finnish University and Research Network
Galileo	Eurooppalainen GNSS järjestelmä
GBAS	Ground Based Augmentation System
GGTO	GPS Galileo Time Offset
GLONASS	Globalnaja navigatsionnaja sputnikovaja sistema, Venäjän operoima GNSS-järjestelmä

GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System, Yhdysvaltojen operoima GNSS-järjestelmä
GPST	GPS referenssiaika
GST	Galileon referenssiaika
HAS	High Accuracy Service
HFT	High Frequency Trading
ICAO	Civil Aviation Organization
ICG	International Committee on GNSS
IGS	International GNSS Service
IoT	Internet of Things
ITU	International Telecommunication Union
KIEVA	Kriittisen Infrastruktuurin EGNSS-Vaikuttavuusarvio
LBS	Location Based Services
LEO	Low-Earth-Orbit
LORAN	Long Range Navigation
LPV-200	Localizer Performance with Vertical guidance
LVM	Liikenne- ja viestintäministeriö
MML	Maanmittauslaitos
MOD	Ministry of defence, Iso-Britannia
MOOC	Massive Online Open Course
NASA	National aeronautics and space administration
NAVIC	Intian alueellinen paikannussatelliittijärjestelmä (ent. IRNSS)
NIST	National institute of standards and technology
NPA	Non-Precision Approach
NPL	National physical laboratory, Iso-Britannia
NTP	Network Time Protocol
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
OS	Open Service
OS-NMA	Open Service Navigation Message Authentication
PBN	Performance Based Navigation
PPP	Precise Point Positioning
PPS	Precise Positioning Service
PRS	Public Regulated Service
PRTC	Primary Reference Time Clocks
QPS	Quantum Positioning System
QZSS	Quasi Zenith Satellite System, Japanin alueellinen paikannussatelliittijärjestelmä
REASON	Paikkatiedon Turvallisuus ja Saatavuus Kriittisille Infrastruktuureille
RED	Radio Equipment Directive
RFI	Radio Frequency Interference
RIMS	Ranging and Integrity Monitoring Station
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RISE	Research institutes of Sweden
RLS	Return Link Service
RSPG	Radio Spectrum Policy Group

RTCA	Radio technical commission for aeronautics, Yhdysvallat
RTK	Real Time Kinematic
SAR	Search and Rescue
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SoL	Safety of Life
SOOP	Signals of opportunity
SPS	Standard Positioning Service
TAI	International Atomic Time (Temps Atomique International)
TEM	Työ- ja elinkeinoministeriö
TESLA	Timed Efficient Stream Loss-tolerant Authentication
Traficom	Liikenne- ja viestintävirasto
TWGPPP	Two-Way GPS Precise Point Positioning
TWSTFT	Two-way satellite time and frequency transfer
UNOOSA	United Nations Office for Outer Space Affairs
USNO	United States Naval Observatory
UTC	Coordinated Universal Time
VHF	Very High Frequency
VTT	Teknologian tutkimuskeskus Oy
VTT MIKES	Mittatekniikan keskus, osa VTT:tä
WAAS	Wide Area Augmentation System