

Satelliittipaikannuksen häiriöistä johtuvien virheiden ennaltaehkäisy raideliikenteessä

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos
TkK-tutkielma
Tietotekniikka
Kesäkuu 2025
Julia Mannila

TURUN YLIOPISTO
Tietotekniikan laitos

JULIA MANNILA: Satelliittipaikannuksen häiriöistä johtuvien virheiden ennaltaehkäisy raideliikenteessä

TkK-tutkielma, 29 s.
Tietotekniikka
Kesäkuu 2025

Satelliittipaikannukseen liittyvät häiriöt voivat uhata raideliikenteen turvallisuutta. Tässä tutkielmassa selvitetään systemaattisen kirjallisuuskatsauksen keinoin, mitä uusia ratkaisuja globaaliin satelliittipaikannusjärjestelmään (engl. global navigation satellite system, GNSS) liittyviin häiriöihin on ehdotettu raideliikenteen kontekstissa. Tutkielman aineisto on pääosin vuodelta 2024. Suurinta osaa löydetyistä ratkaisuista ei ole suunniteltu mihinkään tiettyyn GNSS-häiriöön, vaan niissä ratkaistaan esimerkiksi signaalin kulun esteiden tai interferenssin aiheuttamia sekalaisia häiriötilanteita. Usein kyse on GNSS-signaalin katkoista. Osa tutkielmassa käsiteltävistä tutkimuksista puolestaan erikoistuu GNSS-häirinnältä tai -huijauksilta suojautumiseen. Tutkielmassa löydetyt ratkaisumenetelmät kategorisoidaan ja esitetään taulukossa tutkimuskohtaisesti. Yleisimpiä ratkaisuja ovat datafuusio, erilaiset anturit ja kone- ja syväoppiminen. Tyypillisessä ratkaisussa käytetään vaihtoehtoisia paikannusmenetelmiä silloin, kun GNSS-paikannus epäonnistuu. Ratkaisumenetelmissä hyödynnetään lukuisia eri algoritmeja, joista yleisin on Kalman-suodin. Sitä käytetään muun muassa datafuusion toteuttamiseen. Tutkielmassa ei pyritä arvottamaan erilaisia ratkaisumenetelmiä. Myös ratkaisujen soveltuvuudesta eri maantieteellisille alueille olisi hyvä tehdä jatkotutkimusta.

Asiasanat: raideliikenne, GNSS-paikannus, GNSS-häiriö, GNSS-häirintä, GNSS-huijaus, datafuusio, Kalman-suodin, tekoäly

UNIVERSITY OF TURKU
Department of Computing

JULIA MANNILA: Satelliittipaikannuksen häiriöistä johtuvien virheiden ennaltaehkäisy
raide liikenteessä

Bachelor's Thesis, 29 p.
Information Technology
June 2025

Satellite positioning disturbances are a risk for the safety of rail transport. This Bachelor's thesis performs a systematic literature review to identify newly developed solutions to tackle Global Navigation Satellite System (GNSS) disturbances in the context of rail traffic. The gathered literature is mostly from the year 2024. Majority of the found solutions are not designed for any certain GNSS disturbance, but they solve mixed disturbance scenarios instead. These can be caused by interference or signal blockage, for example. Typically, the disruptions are GNSS outages. However, some of the covered research specialises in protection against GNSS jamming or spoofing. The discovered solutions are categorised and presented in a table. The most common solutions are data fusion, different sensors, and machine and deep learning. A typical solution uses alternative positioning methods if GNSS positioning fails. The solutions utilise several algorithms, the most popular of which is the Kalman filter. It is used for data fusion, among other things. This thesis doesn't aim to rank the different solutions. Another need for further research is ensuring the solutions' applicability to different geographical regions.

Keywords: railway, GNSS positioning, GNSS disruption, GNSS jamming, GNSS spoofing, data fusion, Kalman filter, artificial intelligence

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Satelliittipaikannus raideliikenteessä	4
2.1	Sijainnin määrittäminen raideliikenteessä	4
2.2	Satelliittipaikannus lyhyesti	6
2.3	Erityyppiset häiriöt satelliittipaikannuksessa	8
3	Satelliittipaikannusta täydentäviä menetelmiä raideliikenteessä	11
3.1	Datafuusio	11
3.2	Muita datalähteitä	12
3.2.1	INS ja IMU	12
3.2.2	Matka- ja nopeusmittarit	13
3.2.3	Raidekartta	14
3.3	Kalman-suodin	14
3.4	Tekoäly	15
3.4.1	Koneoppiminen	15
3.4.2	Syväoppiminen	16
4	Tulokset	18
4.1	Aineisto ja siinä käsitellyt häiriötilanteet	19
4.2	Satelliittipaikannuksen häiriöiden torjunta	21

4.2.1	Ratkaisuja satelliittisignaalin estymiseen ja määrittelemättö- miin häiriöihin	21
4.2.2	Ratkaisuja GNSS-huijauksiin	26
4.2.3	Ratkaisuja GNSS-häirintään	27
5	Yhteenveto	28
	Lähdeluettelo	30

Lyhenteet

BDS BeiDou - kiinalainen satelliittipaikannusjärjestelmä

CNN Convolutional Neural Network - konvoluutioverkko

EUSPA European Union agency for the Space programme - Euroopan avaruusohjelmavirasto

FNN Feed-forward Neural Network - eteenpäin kytketty neuroverkko

Galileo Euroopan unionin satelliittipaikannusjärjestelmä

GAN Generative Adversarial Network - eräs ohjaamaton koneoppimisalgoritmi

GLONASS Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema - venäläinen satelliittipaikannusjärjestelmä

GNSS Global Navigation Satellite System - globaali satelliittipaikannusjärjestelmä

GPS Global Positioning System - yhdysvaltalainen satelliittipaikannusjärjestelmä

IMU Inertial Measurement Unit - inertiamittausyksikkö

INS Inertial Navigation System - inertianavigointijärjestelmä

IoT Internet of Things - esineiden internet

KF Kalman Filter - Kalman-suodin

LCX Leaky Coaxial Cable - eräänlainen koaksiaalikaapeli

LiDAR Light Detection And Ranging - valoa käyttävä tutkateknologia

LightGBM Light Gradient-Boosting Machine - eräs koneoppimismalli

LoRaWAN Long Range Wide Area Network - eräänlainen laajaverkko

LSTM Long Short-Term Memory - eräänlainen syväoppiva neuroverkko

maglev Magnetic Levitation - sähkömagnetismin avulla leijuva juna

MEO Medium Earth Orbit - keskikorkea Maan kiertorata

mmWave Millimetre Wave - millimetriaalto

RAILISA Rail Information System and Analyses - UIC:n tilastopalvelu

RFID Radio Frequency Identification - radiotaajuinen etätunnistusmenetelmä

RNN Recurrent Neural Network - takaisinkytketty neuroverkko

SATNAV Satellite Navigation System - satelliittipaikannusjärjestelmä

SVDD Support Vector Data Description - eräs luokittelualgoritmi

UIC Union Internationale des Chemins de fer - Kansainvälinen rautatiejärjestö

YK:n DESA Department of Economic and Social Affairs - Yhdistyneiden kansakuntien taloudellisten ja sosiaalisten asiain osasto

1 Johdanto

Kun maailman väkiluku kasvaa (YK:n DESA, 2024), on entistä tärkeämpää panostaa tehokkaisiin ja kestäviin liikenneratkaisuihin. Raideliikennettä pidetään kustannustehokkaana ja tilavana ratkaisuna varsinkin pitkien matkojen tavara- ja henkilöliikenteelle (Filippi ym., 2023; Śladkowski, 2017). Lisäksi sen hiilijalanjälki on suhteellisen pieni (Our World in Data, 2022). Kun raideliikennettä lisätään ja optimoidaan, on pidettävä huolta myös sen turvallisuudesta. Siksi tässä tutkielmassa selvitetään, millaisia ratkaisuja viime vuosina on kehitetty satelliittipaikannuksen häiriöiden torjumiseen raideliikenteessä.

Tutkijoiden kiinnostus satelliittipaikannukseen raideliikenteessä on kasvanut huomattavasti viimeisten 10-15 vuoden aikana (Steuer ym., 2025; Chrzan ym., 2024). Satelliittipaikannuksen käyttökelpoisuus on selvästi huomattu raidealalla, joten sitä halutaan kehittää luotettavammaksi. Aiheesta on tehty kirjallisuuskatsauksia (mm. Steuer ym., 2025 ja Marais ym., 2017), mutta ne tutkivat asiaa kokonaisvaltaisemmasta näkökulmasta.

Tämä tutkielma on suoritettu systemaattisena kirjallisuuskatsauksena. Tutkimuskysymyksenä on:

Mitä teknisiä keinoja on satelliittipaikannuksen häiriöistä johtuvien virheiden torjumiseksi raideliikenteessä?

Teknisillä keinoilla viitataan automaattisiin raideliikenteeseen liittyviin järjestelmiin, eli esimerkiksi junien henkilökunnan toimintatapojen muuttaminen ei kuu-

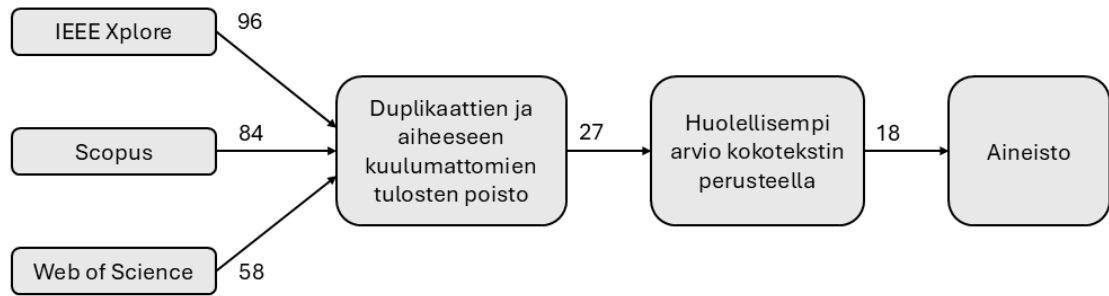
lu tutkielman aiheeseen. Tutkielmassa halutaan löytää konkreettisia ratkaisuiideoita häiriöihin, eli pelkästään häiriöiden esiintymistä tutkiva kirjallisuus rajataan pois. Raideliikenteellä tarkoitetaan raidekulkuneuvojen liikkumista raiteilla, ei esimerkiksi henkilöstön tai raidevikojen paikannusta.

Tutkielma käsittelee vain sellaisia ratkaisuja, joissa hyödynnetään globaalia satelliittipaikannusjärjestelmää (engl. global navigation satellite system, GNSS) (ks. alaluku 2.2). Yleensä ratkaisuissa oletetaan junien paikantavan itse itsensä (engl. self-positioning) reaaliajassa (ks. alaluku 2.1). Häiriöllä tarkoitetaan arvaamatonta GNSS-järjestelmän ei-tarkoituksenmukaista toimintaa, joka voi johtua joko itse järjestelmän viasta tai ympäristötekijöistä. Tunnetut ja ennustettavat laitteiden tai ympäristön ominaisuudet eivät ole häiriöitä.

Kirjallisuushaku suoritettiin 11.2.2025. Hakukannat olivat IEEE Xplore, Web of Science ja Scopus. Hakukieli oli englanti. Koska tutkimusta aiheesta on paljon, kirjallisuushakua rajattiin tarkasti. Merkittävin tutkielmassa käytetty rajaus on vuosilukuvälin kavennus vuonna 2024 julkaistuihin ja sitä uudempiin tutkimuksiin.

Alustavien hakujen perusteella huomattiin, että lähes kaikissa kiinnostavissa tutkimuksissa käytetään lyhennettä GNSS tai jonkin siihen kuuluvan satelliittipaikannusjärjestelmän (engl. satellite navigation system, SATNAV) lyhennettä (ks. alaluku 2.2). SATNAV-järjestelmien lyhenteet, jotka lisäsivät hakutulosten määrää, otettiin mukaan hakulauseeseen. Häiriöitä pyrittiin kuvailemaan mahdollisimman monipuolisesti käyttämällä synonyymejä. Hakulauseessa käytetään myös tiettyjen GNSS-häiriöiden vakiintuneita termejä (ks. alaluku 2.3). Raidealaa kuvattiin termeillä *rail* ja *train*, joista jälkimmäinen on hieman ongelmallinen, sillä sen voi tulkita myös tekoälyn kouluttamisprosessiksi. Lopullinen hakulauseke oli: (GNSS OR GPS OR BDS) AND (disturb* OR interfere* OR error* OR failure* OR jamming OR spoofing) AND ("train"OR rail*).

Tuloksia oli yhteensä 238 (kuva 1). Suurin osa näistä ei liittynyt aiheeseen lain-



Kuva 1: Tiedonhakuprosessi vuokaaviona. Vuosi- ja kielirajaukset on tehty hakukantojen työkaluilla jo ennen ensimmäistä välivaihetta.

kaan, vaan ne käsittelivät tekoälyn kouluttamista. Näitä tuloksia ei kuitenkaan voinut eliminoida muuten kuin manuaalisella työllä, koska myös tutkielman aiheeseen liittyy tekoälyä. Alustavan analyysin perusteella jäljelle jäi 27 tutkimusartikkelia, jotka luettiin kokonaan. Näistä 13 oli saatu tulokseksi vähintään kahdesta hakukannasta. Lopullisen aineiston koko on 18 tutkimusta. Näillä tutkimusartikkeleilla on jonkin verran samoja kirjoittajia.

Tutkielman luvuissa 2 ja 3 käydään läpi tulosten (luku 4) kannalta keskeiset taustatiedot. Luvussa 2 käsitellään tutkielman aiheen perusteita: raideliikenteessä käytettäviä paikannusmenetelmiä ja GNSS-paikannuksen teoriaa. Luvussa 3 esitellään yleisimmät aineistossa mainitut menetelmät, joita voidaan käyttää GNSS-paikannuksen tukena. Näitä ovat datafuusio, Kalman-suodin ja kone- ja syväoppi-minen. Tutkielman aineisto käydään läpi tutkimus kerrallaan luvussa 4. Ensin tarkastellaan aineistossa nimettyjä häiriöitä, minkä jälkeen käydään läpi erilaiset ratkaisumenetelmät. Tutkimukset on jaettu kolmeen kategoriaan niiden käsittelemien häiriöiden mukaan. Näiden kategorioiden sisällä käsittelyjärjestys perustuu ratkaisumenetelmän yleisyyteen. Luvussa 5 tiivistetään tutkielman sisältö ja esitetään johtopäätökset.

2 Satelliittipaikannus raideliikenteessä

Grovesin mukaan paikannus (engl. positioning) tarkoittaa kappaleen koordinaattien määrittämistä. Se on osa navigointia (engl. navigation) eli sijainnin muutosten suunnittelua ja hallintaa. Automaattisessa paikannuksessa ja navigoinnissa käytetään paikannus- ja navigointijärjestelmiä. Nämä järjestelmät voivat olla tarpeesta riippuen kaksi- tai kolmiulotteisia. (Groves, 2013.) Satelliittipaikannusjärjestelmät tarjoavat jatkuvaa kolmiulotteista sijaintidataa radiosignaalien avulla (Kaplan & Hegarty, 2017). Raideliikenteessä voidaan käyttää monia muitakin paikannusmenetelmiä, kuten baliiseja (alaluku 2.1) ja inertianavigointia (alaluku 3.2.1).

2.1 Sijainnin määrittäminen raideliikenteessä

Paikannuksen tarkkuus ja luotettavuus vaikuttavat ilmiselvästi raideliikenteen turvallisuuteen. Groves tarkentaa, että sijaintitiedon tulee olla eheää ja jatkuvaa – kaikilla raideosuuksilla ja kaikkina aikoina. Lisäksi paikannustarkkuuden tulee olla niin hyvä, että voidaan varmuudella määrittää, millä vierekkäisistä raiteista juna on. Muutoin syntyy törmäysriski. Raideliikenteen paikannuksen erityispiirre on se, että junien liikkumatila rajoittuu raiteille. Tämä tarkoittaa, että junan paikannusta voidaan ajatella yksiulotteisena ongelmana. (Groves, 2013.)

Perinteisesti junien paikannuksessa on käytetty raideinfrastruktuuriin liittyviä

menetelmiä. Erilaisilla teknologioilla voi esimerkiksi seurata, onko jokin raideosuus vapaa, tai onko juna ohittanut jonkin tietyn pisteen. Toinen vaihtoehto on suorittaa paikannus raidekulkuneuvoihin integroiduilla järjestelmillä. (Groves, 2013.) Raidevirtapiiri, akselinlaskija ja baliisi ovat tunnettuja raideinfrastruktuuriin liittyviä paikannustekniikoita (Otegui ym., 2017).

Elbahharin ja Heddebautin mukaan raidevirtapiirit (engl. track circuit) ovat ensimmäisiä sähköisiä junien paikannukseen liittyviä järjestelmiä. Niitä varten raide jaotellaan osiin, ja jokaisen osion päähän asennetaan radiolähetin, joka lähettää signaalia kiskoja pitkin. Jos viesti kulkee osion toisessa päässä olevalle vastaanottimelle asti, todetaan raideosuus vapaaksi junista. Raiteella kulkeva juna oikosulkisi virtapiirin niin, ettei signaali pääsisi perille. Raidevirtapiirin tietojen avulla voidaan pitää huolta siitä, että junien välimatka pysyy turvallisena. Jotkin järjestelmät voivat jopa lähettää automaattisia pysähtymis- tai hidastuskäskyjä seuraavalle junalle. (Elbahhar ja Heddebaut, 2018.)

Toinen samaa tehtävää hoitava teknologia on akselinlaskija (engl. axle counter). Se perustuu ohi kulkevan junan pyörien laskemiseen. Pyörän tunnistukseen käytetään usein käämejä, jotka kiinnitetään suoraan raiteeseen. (Grzechca ja Szczeponik, 2020.) Akselinlaskijoita käytetään muun muassa asema-alueilla (Sharma ym., 2024). Asema-alueen molempiin päihin asennetaan akselinlaskijat, joiden laskelmia vertaamalla selviää, onko niiden välillä junaa vai ei. Jos toisen akselinlaskijan arvio ohi kulkeneista junan pyöristä on suurempi kuin toisen, ei ensimmäisen puolelta tullut juna ole vielä poistunut alueelta. (Goundan ja Jhunjhunwala, 1999.)

Elbahhar ja Heddebaut sekä Y. Wu ym. kertovat, että baliisit (engl. balise) ovat pieniä laitteita, joita asennetaan junanraiteille. Ne lähettävät sähköisiä viestejä päältäään kulkeville junille. Baliisit toimivat junasta lähetetyllä sähkömagneettisella energialla. Niiden viesti voi sisältää tietoa esimerkiksi sijainnista, nopeusrajoituksesta tai raiteen ominaisuuksista. (Y. Wu ym., 2018.) Baliiseista on modernimpia-

kin versioita, jotka on suunniteltu esimerkiksi suurnopeusradoille tai raiteen viereen asennettaviksi. (Elbahhar ja Heddebaut, 2018.)

Albrechtin ym. mukaan raideinfrastruktuuriin kytketyt paikannusratkaisut saattavat olla kalliita ja vaikeuttaa rautateiden huoltoa. Siksi monessa paikassa on siirrytty junakeskeisempiin ratkaisuihin. (Albrecht ym., 2013.) Niissä kulkuneuvon täytyy itse tunnistaa oma sijaintinsa ja raportoida se eteenpäin kulunvalvontajärjestelmälle. Tällaisia junien kulunvalvontajärjestelmiä (engl. train control system) on hyvin monenlaisia. (Pascoe ja Eichorn, 2009.)

Albrecht ym. kuitenkin huomauttavat, että junakeskeisiin paikannusjärjestelmiin liittyy riskejä. Paikannuksen täytyy toimia luotettavasti jokaisessa kulkuneuvossa ja jokaisella raideosuudella, jotta raideliikenne sujuisi. Siksi usein käytetään monen paikannusmenetelmän yhdistelmää¹. Esimerkiksi baliiseista voidaan lukea absoluuttisia sijaintitietoja, ja ennen seuraavan baliisin kohdalle saapumista sijainti voidaan arvioida suhteellisesti junan antureiden avulla². (Albrecht ym., 2013.)

Satelliittipaikannuksen käyttäminen absoluuttisen sijainnin arvioimiseen on melko uutta raideliikenteessä. Riski järjestelmän häiriöihin on hidastanut teknologian käyttöönottoa. (Albrecht ym., 2013; Marais ym., 2017.) Seuraavissa alaluvuissa käsitellään satelliittiperusteista paikannusta ja sen tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä.

2.2 Satelliittipaikannus lyhyesti

Jokainen satelliitti ei ole paikannussatelliitti, eivätkä kaikki paikannussatelliitit kuulu samaan satelliittipaikannusjärjestelmään (SATNAV). Kaikki satelliittipaikannusjärjestelmät muodostavat yhdessä globaalin GNSS-järjestelmän (Kaplan & Hegarty, 2017). Grovesin mukaan GNSS-järjestelmä toimii siten, että satelliitit lähettävät navigointisignaaleja, joita käyttäjälaitteet (engl. user equipment) vastaanottavat.

¹ks. alaluku 3.1.

²ks. alaluku 3.2.

Käyttäjälaitteet laskevat sijaintinsa itse signaalien perusteella, eikä niiden tarvitse lähettää mitään satelliiteille. (Groves, 2013.)

Euroopan avaruushjelmavirasto EUSPA:n (2025) mukaan globaaleja ja kaikille avoimia satelliittipaikannusjärjestelmiä on neljä: yhdysvaltalainen GPS, venäläinen GLONASS, Euroopan unionin Galileo ja kiinalainen BeiDou (BDS). Galileo ja BeiDou ovat uudempia kuin GPS- ja GLONASS-järjestelmät. Vuodesta 2018 asti kaikilla näillä järjestelmillä on kuitenkin ollut suunnilleen saman verran satelliitteja. Vuonna 2024 toiminnassa olevia keskikorkean kiertoradan (engl. medium Earth orbit, MEO) GNSS-satelliitteja oli yhteensä yli 110. (EUSPA, 2025.)

GPS- ja GLONASS-järjestelmiä kehitettiin yhtä aikaa 1970-luvulla ensisijaisesti sotilaallisiin tarkoituksiin. Nyt molemmat ovat myös siviilikäytössä. (Groves, 2013.) Kaplan ja Hegarty kertovat, että Galileoa alettiin kehittää Euroopassa ennen vuosituhaten vaihdetta, ja se suunniteltiin alun perinkin globaaliin siviilikäyttöön. BeiDou on niin ikään suunniteltu globaaliin käyttöön, mutta myös tarjoamaan erityisiä palveluita Kiinan alueen käyttäjille. Siihen kuuluu myös geosynkronisen kiertoradan (engl. geosynchronous orbit) satelliitteja. (Kaplan ja Hegarty, 2017.)

Kaplanin ja Hegartyn mukaan yhteen globaalisti kattavaan satelliittipaikannusjärjestelmään kuuluu aina vähintään 24 satelliittia. Ne kiertävät Maata yleensä MEO-radalla. (Kaplan ja Hegarty, 2017.) Paikannussatelliittien kiertoradat ovat selvästi kallellaan suhteessa päiväntasaajaan, jotta satelliittinäkyvyys olisi hyvä myös napa-alueilla (Groves, 2013).

Groves kertoo, että jokaisella satelliittipaikannusjärjestelmällä on avaruusosa (engl. space segment) ja valvontaosa (engl. control segment). Avaruusosalla tarkoitetaan järjestelmän satelliittejä, jotka lähettävät signaaleja valvontaosaan ja käyttäjälaitteille. Valvontaosaan kuuluu joukko Maan pinnalla olevia valvonta-asemia (engl. monitoring station) ja satelliittiyhteysasemia (engl. uplink station) sekä ainakin yksi kontrolliasema (engl. control station). Valvonta-asemat vastaanottavat satelliittien

signaaleja ja lähettävät niitä kontrolliasemalle. Kontrolliasema arvioi, onko joissain satelliiteissa vikaa. Niiden kellot saattavat tarvita kalibrointia tai kiertorata hienosäätöä. Satelliittiyhteysasemat välittävät nämä tiedot satelliiteille. (Groves, 2013.)

Käyttäjälaitteet voivat yleensä lukea signaaleja monesta satelliittipaikannusjärjestelmästä. Ne vastaanottavat signaalin antennilla, joka muuttaa sen sähköiseen muotoon. Laitteen vastaanottimessa sähköinen signaali demoduloidaan kellon avulla. Sijainti lasketaan kahdessa vaiheessa: Ensin arvioidaan antennin etäisyys jokaiseen havaittuun satelliittiin. Sitten laitteen sijainti päätellään näiden etäisyyksien perusteella. (Groves, 2013.)

Grovesin mukaan GNSS-signaali sisältää sen lähetyksajan ja tietoja, joiden perusteella voidaan laskea satelliitin sijainti. Satelliiteissa on atomikelloja, jotta lähetyksaika voidaan määrittää hyvin tarkasti. Satelliittien ja käyttäjälaitteen kellot voivat kuitenkin harhautua. Käyttäjälaitteen tehtäväksi jää korjata nämä virheet ja ilmakehän ominaisuuksista johtuvat vääristymät. (Groves, 2013.)

Satelliittipaikannus vaatii kolmiulotteista laskentaa. Jos tiedetään etäisyys yhteen satelliittiin, voidaan päätellä, että käyttäjälaite on $r1$ -säteisellä pallopinnalla satelliitin ympärillä. Kun otetaan huomioon toiseenkin satelliittiin laskettu etäisyys, sijainti rajautuu ympyrälle. Kolmannen satelliittisignaalin huomioimisen jälkeen jäljellä on enää kaksi mahdollista pistettä. Teoriassa usein vain toinen niistä on Maan pinnalla. (Groves, 2013.) Kaplanin ja Hegartyn mukaan käytännössä tavoitellaan neljän satelliitin näkyvyyttä. Sen saavuttamiseksi GNSS-järjestelmät suunnitellaan niin, että kaikkialta olisi teoriassa yhteys ainakin kuuteen satelliittiin. Näin tavoite toteutuisi, vaikka jokin satelliitti esimerkiksi hajoaisi. (Kaplan ja Hegarty, 2017.)

2.3 Erityyppiset häiriöt satelliittipaikannuksessa

Kaplanin ja Hegartyn teos osoittaa, että GNSS-paikannuksessa tehdään paljon arvioita ja pyöristyksiä, jotka vaikuttavat paikannustarkkuuteen. Esimerkiksi ilmake-

hän eri kerrosten vaikutuksia signaalin etenemiseen kuvataan malleilla, joista ei voi tehdä täydellisiä. Satelliitin ratakin saattaa poiketa hieman suunnitellusta. Myöskään kaikki kellot eivät ole täydellisesti synkronoituja. Näiden epätarkkuuksien lisäksi paikannustilanteessa voi olla ulkoisia häiriötekijöitä. (Kaplan ja Hegarty, 2017.)

Kaplan ja Hegarty jakavat satelliittipaikannuksen häiriöt neljään kategoriaan: interferenssi (engl. interference), ionosfäärin skintillaatio (engl. ionospheric scintillation), monitie-eteneminen (engl. multipath propagation) ja fyysiset esteet (engl. signal blockage). Nämä häiriöt saattavat aiheuttaa virheitä tai epätarkkuutta paikannuksessa tai jopa estää GNSS-paikannuksen kokonaan. (Kaplan ja Hegarty, 2017.) Häiriöiden esiintymistä tai voimakkuutta ei yleensä voi hallita, vaan tulisi löytää ratkaisuja riittävän paikannustarkkuuden säilyttämiseen häiriöistä huolimatta.

Interferenssi. Radiotaajuuden interferenssillä tarkoitetaan GNSS-laitteeseen päätyviä ei-haluttuja signaaleja. Interferenssi voi olla tahatonta, jolloin sen syynä voi olla jokin toinen radiotaajuudella toimiva järjestelmä tai esimerkiksi GNSS-järjestelmä itse. Tyypillisesti satelliittipaikannukselle on varattu oma taajuuskaistansa, ja tahattomassa häirinnässä on usein kyse tämän kaistan ulkopuolisista aalloista. (Kaplan ja Hegarty, 2017.)

Tahallinen interferenssi tapahtuu samalla taajuuskaistalla kuin paikannus. Ilmiöstä on kaksi muotoa: *GNSS-häirintä* (engl. jamming) ja *-huijaus* (engl. spoofing). Häirinnän tavoitteena on häiritä GNSS-järjestelmän toimintaa tukkimalla vastaanottimet mahdollisimman voimakkailla signaaleilla. Tällöin paikannus saattaa epäonnistua kokonaan. GNSS-huijauksessa pyritään johtamaan paikannuslaitteita harhaan hämäävillä signaaleilla. Huijauslaitteet voivat esimerkiksi selvittää kohteen sijainnin, ja lähettää sitä vastaavia paikannussignaaleja, mutta vahvempina kuin GNSS-signaalit. Sitten signaalia muutetaan hiljalleen väärään suuntaan, eikä kohde välttämättä huomaa mitään. (Kaplan ja Hegarty, 2017.) Tahallinen interferenssi on uhka raideliikenteen turvallisuudelle.

Ionosfäärin skintillaatio. Ionosfääri on ilmakehän yläosan kerros, jossa on sähköisesti varautuneita hiukkasia. Normaalisti ne aiheuttavat viivettä signaalin kulkun, mutta jos niiden jakaumassa on paljon epätasaisuuksia, signaali voi vaimentua tai muulla tavoin häiriintyä merkittävästikin. Tätä kutsutaan ionosfäärin skintillaatioksi. Yleensä se vaikuttaa kerralla vain muutamaaan satelliittiin. Auringon liikkeet ja syklit vaikuttavat ilmiön esiintymiseen. (Kaplan ja Hegarty, 2017.)

Monitie-eteneminen. Monitie-eteneminen liittyy myös fyysisiin GNSS-esteisiin. Sitä tapahtuu, kun signaali saapuu perille useaa reittiä, koska se on esimerkiksi heijastunut jostain pinnasta. Paikannuslaite voi vastaanottaa montakin tällaista kaikua. Usein selvästi myöhästyneet kaiut tunnistetaan ja hylätään, mutta jos viivästymä on pieni, se voi häiritä paikannusta. Joskus esteet voivat aiheuttaa sitä, että suorinta reittiä saapunut signaali on heikompi kuin jokin kaiuista. Tämäkin voi sekoittaa paikannusjärjestelmiä. (Kaplan ja Hegarty, 2017.)

Fyysiset esteet. Fyysisiä GNSS-signaalin esteitä ovat esimerkiksi maanpinnan muodot, rakennelmat ja kasvillisuus. Esteet saattavat absorboida tai heijastaa säteilyä, jolloin signaali vaimenee voimakkaasti, eikä välttämättä saavu perille suorinta reittiä. Jos signaalin kulkema reitti ei ole suora, etäisyys sen lähettämään satelliittiin lasketaan väärin, eikä paikannustulos välttämättä pidä paikkaansa. Maan muodot, kuten vuoret, ovat käytännössä läpäisemättömiä, joten jos signaali saapuu perille niistä huolimatta, on sen täytynyt kulkea kiertotietä. Rakennukset saattavat niin ikään vaikuttaa signaalin reittiin ja aiheuttaa monitie-etenemistä. Signaali heikkenee erityisesti, jos GNSS-antenni on rakennuksen sisällä. Kasvillisuus taas tyypillisesti hajauttaa signaalin ja absorboi sitä. Sen läpi kulkeneelle signaalille tapahtuu paljon monitie-etenemistä. (Kaplan ja Hegarty, 2017.)

3 Satelliittipaikannusta täydentäviä menetelmiä raideliikenteessä

Koska satelliittipaikannus on altis erilaisille häiriöille, kriittisiä järjestelmiä ei haluta rakentaa pelkästään sen varaan. Siksi raideliikenteessä käytetään GNSS-paikannuksen tukena muitakin teknologioita. Tässä luvussa käydään läpi sellaiset menetelmät, teknologiat ja termit, jotka on mainittu vähintään kahdessa tutkielman käsittelemässä tutkimuksessa.

3.1 Datafuusio

On olemassa kaksi lähekkäistä englanninkielistä termiä, jotka kuvaavat eri lähteistä saadun datan yhdistämistä: *sensor fusion* ja *data fusion*. Näistä jälkimmäinen on kattotermi ensimmäiselle. (Klein, 2019.) Tutkielman kirjallisuushakua tehtäessä kuitenkin huomattiin, että usein näitä termejä käytetään keskenään sekaisin. Koska tutkielman esittelemissä ratkaisuisa fuusioon saatetaan käyttää muutakin kuin antureilla (engl. sensor) kerättyä dataa, käytetään tässä tekstissä termiä *datafuusio*.

Waltzin ja Llinasin määritelmän mukaan datafuusiossa on kyse siitä, että usealla eri tavalla kerättyä dataa tai informaatiota yhdistellään tarkemman tilannekuvan saavuttamiseksi. Usein data on peräisin antureista. (Waltz ja Llinas, 1990.) Anturit ovat laitteen tai kulkuneuvon tapa havainnoida ympäristöään – ne vertautuvat eliöiden aisteihin. Esimerkiksi itseajavan auton voi olettaa olevan sitä luotettavampi, mi-

tä enemmän ympäristömuuttujia se seuraa samanaikaisesti. Datafuusio voidaan suorittaa erilaisilla matemaattisilla tai tilastollisilla malleilla, kuten Kalman-suotimella (alaluku 3.3) (Mitchell, 2007).

Fuusio voidaan toteuttaa tiukasti tai löyhästi kytkettynä (engl. tightly coupled & loosely coupled). Esimerkiksi jos kaksi anturia on kytketty tiukasti yhteen, niistä tuleva data yhdistetään ilman esikäsitteilyä. Anturit ovat siis erottamattomasti osa samaa järjestelmää. Löyhästi kytketyssä datafuusiossa anturit toimivat itsenäisemmin, ja niiden tuottamat datavirrat yhdistetään vasta välivaiheiden jälkeen. (Mirabadi ym., 1996.) Fuusion kytköksen tiukkuudesta käytetään joskus muitakin termejä, eivätkä niiden merkitykset ole aina yksitulkintaisia (vrt. Groves, 2013).

3.2 Muita datalähteitä

Seuraavat junalaitteiston teknologiat ovat suosittuja datafuusion datalähteitä tutkielman aineistossa. IMU ja matka- ja nopeusmittarit ovat yleisiä junan antureita, jotka keräävät dataa junan liikkeistä. Raidekartta on digitaalinen apuväline, joka auttaa päättelemään junan sijainnin.

3.2.1 INS ja IMU

Groves kertoo, että *inertianavigointijärjestelmän* (engl. inertial navigation system, INS) tehtävä on päätellä kulkuneuvon uusi sijainti lähtötietojen perusteella. Sen kaksi keskeisintä osaa ovat *inertiamittausyksikkö* (engl. inertial measurement unit, IMU) ja navigointiprosessori. IMU:n tehtävä on seurata kulkuneuvon liikkeitä. Navigointiprosessori päättelee kuljetun matkan ja suunnan IMU:n mittausten perusteella. Jotta sijainnin voisi laskea, tulee tietää kulkuneuvon aikaisempi sijainti, nopeus ja asento. (Groves, 2013.)

IMU koostuu inertia-antureista: kolmesta kiihtyvyydsmittarista ja jokaiseen nii-

hin liitetystä gyroskoopista. Gyroskooppien tehtävänä on tunnistaa junan asennon muuttuminen, esimerkiksi ylämäkeen saavuttaessa. Kiihtyvyydsmittarit on asetettu kohtisuoraan toisiaan vasten, jotta ne tunnistaisivat erisuuntaisia voimia. Niistä voidaan päätellä muun muassa junan vauhdin muutokset. Laskiessaan uutta sijaintia INS huomioi gravitaatiovoiman vaikutuksen kiihtyvyyssmittauksissa. (Groves, 2013.)

Grovesin mukaan INS:n kaltaisten pohjatietoihin perustuvien navigointijärjestelmien ongelmana on virheen kumuloituminen. Pieniä virheitä syntyy muun muassa anturien kohinasta ja laskuissa käytetystä pyöristystarkkuudesta. Koska uusi sijainti lasketaan aina edellisen arvion pohjalta, kasvaa virhe hiljalleen aina vain suuremmaksi. INS on kuitenkin hyvä apu GNSS-navigoinnin rinnalle, koska sen toiminnan yhtäjaksoisuus on varmempaa. (Groves, 2013.)

3.2.2 Matka- ja nopeusmittarit

Tutkielman aineiston perusteella matkamittarit (engl. odometer) ovat vakiovarusteita junissa. Malvezzin ym. mukaan yksinkertaisimmillaan junan matkamittari perustuu anturiin, joka mittaa liikkuvan junan pyörän kulmanopeutta. Koska pyörän säde on tiedossa, kulmanopeuden perusteella voidaan laskea pyörän ulkoreunan nopeus. Ideaalissa tilanteessa tämä vastaa junan nopeutta. Samojen mittaustulosten perusteella saadaan arvio junan kulkemasta matkasta. (Malvezzi ym., 2011.)

Junan pyörä voi kuitenkin pyörimisen sijasta myös liukua. Erityisesti kiihdytys ja jarrutus aiheuttavat epätarkkuuksia mittaustuloksiin. Useamman pyörän kulmanopeuden seuraaminen voi auttaa saavuttamaan tarkempia arvioita, mutta ilman kalibrointia järjestelmä ei pysty tarjoamaan tarkkaa sijaintitietoa. Silti kulmanopeusantureita pidetään luotettavina, koska ne ovat yksinkertaisia ja varmatoimisia. (Malvezzi ym., 2011.)

3.2.3 Raidekartta

Koska junien liikkumatila rajoittuu raiteille, paikannuksen kannalta on hyödyllistä tietää rautatien kolmiulotteiset koordinaatit. Rautatien sijainnin kertova datalähde on *raidekartta* (engl. track map) (J. Wang ym., 2016). Raidekartta on tietokanta, joka sisältää koordinaattipisteitä rautatien varrelta (Zheng, 2007). Koordinaattiu-lottuvuuksien lisäksi tietokannan tietueet voivat paljastaa myös muita raiteen tai ympäristön ominaisuuksia pisteessä (Heirich ym., 2020).

J. Wang ym. kertovat, että raidekarttojen tiedot kerätään tarkoilla GNSS-vas-taanottimilla. Pisteitä halutaan tallentaa riittävän pienin välimatkoin, mutta toi-saalta ison tietokannan hallitseminen on kallista (J. Liu ym., 2013). Reaaliaikaises-sa paikannuksessa raidekartta voidaan ottaa mukaan datafuusioon rajaamaan pois mahdollisia sijainteja. Karttasovitusalgoritmi päättelee raidekartan ja muun datan perusteella, millä raiteella juna on. (J. Wang ym., 2016.)

3.3 Kalman-suodin

Aineiston artikkeleista jopa kahdeksassa mainitaan termi *Kalman-suodin* (engl. Kal-man filter, KF). Tutkielman kontekstissa sitä käytetään paikannuksen tarkentami-seen, datafuusion toteuttamiseen ja yleisesti häiriötilanteista selviämiseen. Kalman-suodin on algoritmi, jolla voidaan päätellä tuntemattomien muuttujien arvoja mit-taushistorian perusteella (Kim ym., 2018). Sen avulla saadaan ennuste järjestelmän tulevasta tilasta, vaikka mittaustuloksissa olisi kohinaa (Khodarahmi & Maihami, 2023). Kalman-suodin on riittävän tehokas paikannustarkoitukseen, koska se toimii rekursiivisesti (Groves, 2013).

Grovesin mukaan Kalman-suotimet ovat hyviä ennustamaan varsinkin syste-maattisia virheitä. Tutkielman kontekstissa sellainen voisi olla esimerkiksi navigoin-tijärjestelmän taipumus jäädä jälkeen todellisesta sijainnista. Kalman-suotimet tun-

nistavat myös hitaasti tapahtuvia harhaumia. Ne sopivat reaaliaikaiseen käyttöön eivätkä tarvitse paljon muistia (Khodarahmi & Maihami, 2023). Kalman-suodin huomioi kaiken kerätyn mittausdatan, ei vain uusimpia arvoja. (Groves, 2013.)

Perinteinen Kalman-suodin on tarkoitettu lineaarisille järjestelmille, joissa kohinan oletetaan olevan normaalijakautunutta (Kim ym., 2018). Khodarahmin ja Maihamin mukaan suotimesta on kehitetty myös edistyneempiä versioita. Ne sopivat epälineaarisinkin järjestelmiin ja ratkovat edellisten versioiden kohtaamia ongelmia. (Khodarahmi ja Maihami, 2023.) Erityyppisiä Kalman-suotimia käytetään varsinkin monianturisissa GNSS-navigointijärjestelmissä (Groves, 2013).

3.4 Tekoäly

Tuominen ym. määrittelevät, että tekoäly on kattotermin sellaisille oppimiskykyisille ohjelmille ja laitteille, jotka on suunniteltu auttamaan jossain tietyssä tehtävässä. Koneoppiminen on tunnettu tekoälyn osa-alue, jota voidaan käyttää muun muassa aineiston luokitteluun. Siitä voidaan erotella syväoppiminen, joka sopii myös hyvin monimutkaisiin tehtäviin, kuten luonnollisen kielen prosessointiin. (Tuominen ym., 2019.) Tekoälyn peruskäsitteiden ohella tässä alaluvussa esitellään muutama tutkielman aineistossa esiintynyt menetelmä.

3.4.1 Koneoppiminen

Tuomisen ym. mukaan koneoppiva järjestelmä opetetaan tunnistamaan tapahtumia tai kaavoja ilman, että sille annetaan suoria ohjeita tehtävään. Tämä mahdollistaa järjestelmän automatisaation ja sellaisten ratkaisujen löytämisen, jotka eivät perinteisillä menetelmillä ehkä olisi mahdollisia. Koneoppimiseksi luokitellaan muun muassa aivojen neuronien toimintaa jäljittelevät neuroverkot. (Tuominen ym., 2019.)

Tuominen ym. kertovat, että koneoppiminen jaetaan ohjattuun, ohjaamattomaan

ja vahvistettuun oppimiseen. Ohjatussa oppimisessa koneoppivalle algoritmilta syötetään esimerkkiaineisto ja malli siitä, mitä aineistosta halutaan löytää. Tämän jälkeen algoritmillä voidaan käsitellä muitakin samanlaisia aineistoja. Ohjaamatonta oppimista käytetään, kun aineisto halutaan jakaa ryhmiin, mutta ei välttämättä edes tiedetä, millaisia ryhmiä etsitään. Ryhmittelevälle koneelle ei anneta muita ohjeita kuin se, että luonnollisesti ryhmän jäsenten tulee olla keskenään samankaltaisia. Näiden kahden oppimistyylin välimuoto on puoliohjattu oppiminen, jossa pelkän datan lisäksi koneelle annetaan jonkinlaisia vihjeitä tai ohjenuoria, mutta ei kokonaista koulutusaineistoa (Chapelle ym., 2006). Vahvistetussa oppimisessa koneelle annetaan palautetta sen toiminnasta, mikä kehittää algoritmin päätöksentekokykyä. Oppimistyyli sopii tilanteisiin, joissa konetta käytetään dynaamisessa ympäristössä. (Tuominen ym., 2019.)

Hutter ym. täydentävät, että koneoppivissa järjestelmissä on tulosteeseen vaikuttavia hyperparametreja, kuten neuroverkon kerrosten määrä. Kun hyperparametrit on valittu hyvin, järjestelmän suoritus paranee. Mitä isompi malli on kyseessä, sitä enemmän hyperparametreja on ja sitä vaikeampaa voi olla tunnistaa niiden välisiä vaikutussuhteita. Optimoitavat hyperparametrit voidaan ajatella tuntemattomaksi funktioksi, josta ei tiedetä paljoa. Hyperparametrien optimoimiseksi voidaan käyttää esimerkiksi *Bayesilaista optimointia* (engl. Bayesian optimisation). Se on matemaattinen menetelmä, jonka avulla voidaan löytää funktion globaali minimi tai maksimi resurssitehokkaasti. Pohjimmiltaan Bayesilainen optimointi on iteratiivinen algoritmi, mutta siitä on tekoälyn kehityksen myötä tehty erilaisia versioita muun muassa vaativia tehtäviä varten. (Hutter ym., 2019.)

3.4.2 Syväoppiminen

Tuominen ym. kertovat, että syväoppiva tekoäly koostuu useista kerroksista, joista jokaisella on oma tehtävänsä. Syvän neuroverkon kerroksissa voi olla yhteensä jopa

miljoonia neuroneita. Tällaisen verkon kouluttamiseen tarvitaan hyvin paljon dataa. (Tuominen ym., 2019.) Seuraavaksi esitellään kaksi syväoppimisen menetelmää.

Konvoluutioverkot (engl. convolutional neural network, CNN) ovat eteenpäin kytkettyjä neuroverkkoja (engl. feed-forward neural network, FNN), joita käytetään O'Shean ja Nashin mukaan erityisesti kuvantunnistuksessa. Eteenpäin kytketyissä verkoissa neuronit syöttävät laskemansa tuloksen vain seuraavan kerroksen neuroneille. Koska kuvat ovat usein värillisiä ja huomattavasti isompia kuin monet muut syötteet, vaaditaan niitä käsittelevältä neuroverkolta erityisiä ominaisuuksia. Kuvantunnistuksessa perinteiset neuroverkot kuluttaisivat huomattavasti enemmän laskentakapasiteettia kuin konvoluutioverkot, ja ne saattaisivat silti ylisovittua¹. Konvoluutioverkoissa neuronit on aseteltu eri tavalla, eivätkä ne kytkeydy kuin pieneen määrään seuraavan kerroksen neuroneita. Tämä yksinkertaistaa laskutoimituksia ja tehostaa kuvantunnistusta. (O'Shea ja Nash, 2015.)

LSTM-neuroveikko (engl. long short-term memory) on eräänlainen takaisinkytketty neuroverkko (engl. recurrent neural network, RNN). Staudemeyer ja Morris kertovat, että toisin kuin eteenpäin kytketyissä neuroverkoissa, takaisinkytketyissä verkoissa neuronit voivat syöttää laskemansa tuloksen myös samantasoisille tai alemman kerroksen neuroneille. Verkossa voi siis olla kehärakenteita. Jokaisen neuronin ei myöskään tarvitse yhdistyä kaikkiin seuraavan kerroksen neuroneihin. Perinteisessä takaisinkytketyssä verkossa on kuitenkin ongelma: se ei pysty muistamaan kuin vain 5–10 viimeisintä syötettä, mikä ei riitä kaikkiin sovelluksiin. LSTM-verkossa tämä ongelma ratkaistaan erityisillä muistisolulla ja niiden käyttöä hallitsevilla porteilla. LSTM-neuroverkkoja käytetään muun muassa puheentunnistukseen, konekääntämiseen ja kuvantulkintaan. (Staudemeyer ja Morris, 2019.)

¹ks. ylisovittuminen: Tuominen ym., 2019, s. 52

4 Tulokset

Tutkielman aineistona on 18 tutkimusta, jotka esittelevät kukin yhden teknisen ratkaisun GNSS-häiriöiden sietämiseen tai torjuntaan raideliikenteessä. Kaikissa ratkaisuissa raidekulkuneuvona on lähtökohtaisesti juna, mutta monet niistä ovat varmasti sovellettavissa muunkin tyyppisiin rautatiekulkuneuvoihin. Muutaman ratkaisun todetaan sopivan myös suurnopeusjunille (Z. Sun ym., 2024; Q. Wu ym., 2024; Yin ym., 2024; Zhang ja Li, 2024). Kaksi tutkimusta käsittelee erityisesti maglev-junia (engl. magnetic levitation) (Xu, Fan ja Hu, 2024; Xu, Fan, Hu ja Zhang, 2024). Maglev-junat leijuvat kiskojen päällä sähkömagnetismin avulla, minkä vuoksi ne ovat nopeampia kuin perinteiset junat (Z. Liu ym., 2015). Yhdessä tutkimuksessa (Yin ym., 2024) mainitaan myös maanalaiset junat, joista tunnetuin lienee metro.

Aineisto painottuu maantieteellisesti Kiinaan. Yli puolessa tutkimuksista on tehty testejä Kiinan rautateillä tai hyödynnetty niiltä kerättyä dataa. Tämä saattaa olla heijastus siitä, paljonko rautatiealaan halutaan panostaa eri alueilla. Kansainvälisen rautatiejärjestön (UIC) RAILISA-tilastojen mukaan Kiinan rautatieyhtiö on suurimpien rautatieoperaattorien joukossa niin matkustajien kuin rahdin määrässä (UIC, 2024). Suurnopeusraiteiden kokonaispituuden osalta se on ylivoimaisesti suurin yhtiö (UIC, 2024). Kiinan jälkeen eniten aineistosta erottuva maantieteellinen alue on Eurooppa, eikä muihin alueisiin keskitytä ollenkaan.

4.1 Aineisto ja siinä käsitellyt häiriötilanteet

Tutkielman aineistossa kuvatut GNSS-järjestelmään liittyvät häiriöt esitetään taulukossa 1. Erilaisia häiriöitä kuvailtiin tarkemmin alaluvussa 2.3. Suurin osa tutkimuksista käsittelee GNSS-signaalien kulkua rajoittavia raideympäristön esteitä tai ei niistä häiriötilanteita tarkasti. Jälkimmäiset on merkitty taulukossa kategoriaan "Muu häiriö". Loput tutkimukset erikoistuvat joko GNSS-häirinnältä tai -huijauksilta suojautumiseen. Tästä syystä taulukoissa 1 ja 2 sekä luvussa 4.2 aineisto käydään läpi kolmessa osassa häiriötyypin mukaan.

Muita GNSS-häiriöitä ovat esimerkiksi satunnainen interferenssi, kaupunkiympäristön aiheuttama monitie-eteneminen ja satelliittijärjestelmän viat. Tällaisia häiriöitä käsittelevissä tutkimuksissa on tavoitteena löytää sopeutumiskykyisiä paikannusratkaisuja sen sijaan, että keskityttäisiin tiettyyn häiriötekijään. Esimerkiksi Löffler ja Bengtsson pyrkivät löytämään ratkaisun lyhyisiin GNSS-katkoksiin (Löffler & Bengtsson, 2024). W. Wang ym. taas tutkivat vaikeasti ennustettavia häiriöitä ja harhaumia, joiden taustalla voisi olla esimerkiksi satelliitin kellon synkronointivirhe (W. Wang ym., 2024).

Seitsemän tutkimusta käsittelee GNSS-signaalien estymisestä aiheutuvia häiriöitä (Taulukko 1). Niissä mainitut fyysiset esteet voivat häiritä satelliittisignaalien kulkua. Yleisimpiä esteitä ovat tunnelit ja vuoristot (Chen ym., 2024; Löffler ja Bengtsson, 2024; Q. Wu ym., 2024; Yin ym., 2024; Zhang ja Li, 2024). Lisäksi tiheät metsät ja urbaanit alueet ovat tyypillisiä GNSS-häiriöiden syitä raideliikenteessä (Löffler ja Bengtsson, 2024; Zhang ja Li, 2024). Yinin ym. tutkimus erikoistuu tunneleihin (Yin ym., 2024). Muissa tutkimuksissa esteen tyypillä ei oikeastaan ole merkitystä. Niissä fyysisistä esteistä johtuvat häiriöt vertautuvat yleiseen signaalin katoamiseen. Yue ym. esimerkiksi tutkivat ympäristöjä, joissa on satelliittiyhteyksiä heikentäviä isoja esteitä. Ehdotettu ratkaisu voi kuitenkin soveltua muistakin syistä johtuviin häiriöihin (Yue ym., 2024).

Taulukko 1: Aineistossa käsitellyt GNSS-häiriöt. Tutkimukset on jaettu kolmeen luokkaan häiriötyypin perusteella.

Tutkimus	Fyysiset esteet	GNSS-häirintä	GNSS-huijaus	Muu häiriö
Chen ym., 2024	x			
Ferretti ym., 2024				x
Löffler ja Bengtsson, 2024	x			x
Y. Sun ym., 2024				x
Z. Sun ym., 2024				x
W. Wang ym., 2024				x
Q. Wu ym., 2024	x			x
Xu, Fan ja Hu, 2024				x
Xu, Fan, Hu ja Zhang, 2024	x			x
Yin ym., 2024	x			
Yue ym., 2024	x			
Zhang ja Li, 2024	x			x
Bi ym., 2024a			x	
Bi ym., 2024b			x	
S.-Q. Wang ym., 2025			x	
S.-Q. Wang ym., 2024			x	
Cao ym., 2024		x		
J. Liu ym., 2024		x		
Kokonaismäärä	7	2	4	9

Paikannusjärjestelmiä hämääviä GNSS-huijaushyökkäyksiä käsitellään neljässä tutkimuksessa: Bi ym. (2024a), Bi ym. (2024b), S.-Q. Wang ym. (2025) ja S.-Q. Wang ym. (2024). Näistä S.-Q. Wang ym. (2025) mainitsevat myös synkronoidut huijaushyökkäykset. Niissä huijaussignaali synkronoidaan oikean GNSS-signaalin kanssa, mikä tekee hyökkäyksen tunnistamisesta erityisen vaikeaa (S.-Q. Wang ym., 2025).

J. Liu ym. ja Cao ym. erikoistuvat GNSS-häirintään eli GNSS-vastaanottimia tukkiviin hyökkäyksiin. Cao ym. pyrkivät löytämään ratkaisun, joka sopii erilaisiin häirintätyyppeihin. Tavoitteena on puuttua myös vahvaan häirintään, jossa GNSS-signaalista voi tulla käyttökeltontonta (Cao ym., 2024).

4.2 Satelliittipaikannuksen häiriöiden torjunta

Aineiston kattavuus on tiivistetty taulukkoon 2. Yli puolet tutkimuksista käyttää datafuusiota paikannuksen luotettavuuden parantamiseksi. Viisi tutkimusta hyödyntää digitaalista raidekarttaa, kolme koneoppimista ja kuusi syväoppimista. Kahdeksassa tutkimuksessa näiden menetelmien tukena tai toteuttajana käytetään Kalman-suodinta, ja 12:ssa jotain muuta algoritmia. Neljässä tutkimuksessa hyödynnetään lisäksi tai pelkästään jotain muuta tekniikkaa. (Taulukko 2.)

4.2.1 Ratkaisuja satelliittisignaalin estymiseen ja määrittelymättömiin häiriöihin

Yhteensä 12 tutkimusta ratkoo satelliittipaikannuksen esteisiin liittyviä tai määrittelymättömiä häiriöitä raideliikenteessä. Yleisin näissä tutkimuksissa ehdotettu ratkaisu on GNSS/INS-datafuusio. Sen perusideana on käyttää INS-järjestelmää paikannukseen, kun GNSS-järjestelmässä on liikaa häiriöitä. INS tuottaa luotettavaa sijaintidataa jonkin aikaa, kunhan sille syötetään esimerkiksi GNSS-signaaleista päätelty absoluuttinen sijaintiarvio. Neljässä tutkimuksessa käytetään puhdasta GNSS/INS-fuusiota: Chen ym., Z. Sun ym., W. Wang ym. ja Zhang ja Li. Viisi tutkimusta hyödyntää datafuusiossa GNSS-vastaanotinta ja jotain muuta datalähdettä kuin INS-järjestelmän antureita. Kolmessa näistä myös INS on osa fuusiota (Löffler ja Bengtsson, 2024; Xu, Fan ja Hu, 2024; Yue ym., 2024). Loput kolme tutkimusta ovat kehittäneet täysin muunlaiset ratkaisut (Ferretti ym., 2024; Y. Sun ym., 2024; Yin ym., 2024).

Taulukko 2: Aineistossa esiintyneet ratkaisumenetelmät raideliikenteen GNSS-häiriöihin. Tutkimukset on jaettu kolmeen ryhmään taulukon 1 mukaisesti: sekalaiset häiriöt, GNSS-huijaus ja GNSS-häirintä.

Tutkimus	Data-fuusio	INS	Raide-kartta	Syvä-oppiminen	Muu kone-oppiminen	Kalman-suodin	Muu algoritmi	Muu ratkaisu
Chen ym., 2024	x	x		x				
Ferretti ym., 2024								x
Löffler ja Bengtsson, 2024	x	x	x				x	
Y. Sun ym., 2024			x			x	x	x
Z. Sun ym., 2024	x	x		x		x		
W. Wang ym., 2024	x	x			x	x	x	
Q. Wu ym., 2024	x			x			x	
Xu, Fan ja Hu, 2024	x	x				x	x	
Xu, Fan, Hu ja Zhang, 2024	x					x	x	x
Yin ym., 2024						x	x	x
Yue ym., 2024	x	x					x	
Zhang ja Li, 2024	x	x				x		
Bi ym., 2024a					x		x	
Bi ym., 2024b	x		x	x			x	
S.-Q. Wang ym., 2025					x		x	
S.-Q. Wang ym., 2024				x			x	
Cao ym., 2024	x	x	x	x		x		
J. Liu ym., 2024	x	x	x					
Kokonais määrä	12	9	5	6	3	8	12	4

GNSS/INS-fuusio. W. Wang ym. pyrkivät kehittämään arvaamattomienkin virheiden tunnistusta tiukasti kytketyssä GNSS/INS-järjestelmässä. Ideana on välttää oletusta siitä, että GNSS:n ja INS:n data olisi normaalijakautunutta. Tämä toteutetaan epälineaariseen Kalman-suotimeen tehdyllä muutoksella. Virheiden tunnistuksessa käytetään niin ikään algoritmia, joka ei tee oletuksia datan jakaumasta. Järjestelmä kerää mittaushistoriaa ja käyttää sitä apuna uusien mittaustulosten seurannassa. (W. Wang ym., 2024.)

Zhang ja Li tutkivat BDS-navigointijärjestelmän ja INS:n tiukasti yhdistämistä. Datafuusio toteutetaan eräällä epälineaarilla Kalman-suotimella. Suotimeen on lisätty oletus mittausten epävarmuuden jakaumasta, mikä helpottaa laskutoimituksia ja mahdollistaa datalähteiden painotusten säädön reaaliajassa. Tutkimuksessa menetelmän havaittiin soveltuvan myös suurnopeusjunille ja monimutkaisiin ympäristöihin, joissa on paljon GNSS-paikannuksen häiriötekijöitä. (Zhang ja Li, 2024.)

Z. Sun ym. ja Chen ym. avustavat datafuusiota syväoppivalla tekoälyllä. Chen ym. käyttävät LSTM-neuroverkkoa INS-virheiden kertymisen ehkäisyyn pidempien GNSS-katkojen aikana. Normaalisissa paikannustilanteissa LSTM-malli oppii INS-järjestelmän harhautumistaipumuksia GNSS-datan avulla. Jos satelliittisignaali katoaa ja paikannusvastuu siirtyy INS-järjestelmälle, neuroverkko tukee INS:ää totuudenmukaisen sijaintitiedon tuottamisessa. (Chen ym., 2024.)

Z. Sun ym. yhdistävät LSTM:n konvoluutioverkkoon suurnopeusjunien paikannuksen tarkentamiseksi. CNN-LSTM-mallin oppimista tapahtuu reaaliajassa, kun sekä INS- että GNSS-dataa on saatavilla. Konvoluutio tunnistaa datasta piirteitä, joista LSTM muistaa keskeisimmät. Näin malli voi optimoida järjestelmän toimintaa eri ympäristöoloihin. Epälineaarinen Kalman-suodin säätää mallin parametreja. GNSS-signaalin loppuessa malli voi jatkaa toimintaansa opittujen parametrien avulla. (Z. Sun ym., 2024.)

Muu datafuusio. Seuraavissa tutkimuksissa on käytetty monipuolisempaa datafuusiota. Löfflerin ja Bengtssonin ratkaisussa lyhyiden GNSS-katkojen aikana siirrytään käyttämään IMU-yksikköä ja raidekarttaa paikannukseen. Raidekartta on tehty hakutaulun muotoon, jotta sen hyödyntäminen olisi nopeaa. Sen käyttö mahdollistaa yksiulotteisen lähestymistavan sijainnin arviointiin. Tämä vähentää IMU-dataa käsittelevän algoritmin kompleksisuutta. Optimointi tekee paikannusratkaisusta nopean ja joustavan. Ratkaisu on minimalistinen ja sovellettavissa monenlaisiin junien navigointijärjestelmiin. (Löffler ja Bengtsson, 2024.)

Yue ym. käyttävät IMU:n ohella LiDAR-teknologiaa (engl. light detection and ranging) paikannukseen, kun GNSS-signaali on estynyt. LiDAR-tutkan toiminta perustuu näkyvän valon ja infrapunasäteilyn lähettämiseen ja niiden heijastumien vastaanottamiseen (McManamon, 2019). Tutkimuksessa LiDAR-laite asennettiin junan keulaan, ja sitä käytettiin ikään kuin matkamittarina. LiDAR:in ja IMU:n yhdistelmän todetaan harhautuvan hitaasti. Sijaintitiedon korjausta GNSS-datalla ei siis tarvitse tehdä jatkuvasti, vaikka satelliittisignaaleja olisi saatavilla. (Yue ym., 2024.)

Q. Wu ym. hyödyntävät syväoppivaa tekoälyä, GPS-dataa, nopeusmittareita, reaaliaikaista kameraa ja raidevirtapiirejä suurnopeusjunien paikannukseen. Tutkimuksessa konvoluutioverkolla tunnistetaan kameran kuvasta rautatiepylväitä. Niiden välimatka on tyypillisesti vakio, mutta konvoluutioverkon käytössä on myös tietokanta pylväiden sijainneista. Eri datalähteistä saadut sijaintiarviot yhdistetään algoritmilla, joka asettaa tiedoille painoarvot muun muassa niiden keskinäisen korrelaation perusteella. (Q. Wu ym., 2024.)

Kaksi viimeistä datafuusioratkaisua on suunniteltu maglev-junille. Xu, Fan ja Hu kehittävät Kalman-suotimeen pohjautuvan datafuusioalgoritmin maglev-junille. Algoritmi säätää datalähteiden painotuksia. Fuusio suoritetaan kahdessa vaiheessa, ja siinä yhdistetään GNSS:n, INS:n ja Doppler-tutkan data. (Xu, Fan ja Hu, 2024.) Doppler-tutka mittaa junan nopeutta Doppler-ilmiön avulla (Groves, 2013).

Xun, Fanin, Hun ja Zhangin ratkaisussa lisäanturit liittyvät maglev-junaraiteen järjestelmiin. Käytännössä junan laitteisto tunnistaa ennalta määrättyjä raiteen kohtia. Niitä ovat akselinlaskijat ja baliisien kaltaiset RFID-tagit (engl. radio frequency identification). Tietoa tällaisten pisteiden ohittamisesta käytetään datafuusiossa GNSS-järjestelmän tukena. Datafuusio suoritetaan tehtävää varten mukautetulla Kalman-suotimella. (Xu, Fan, Hu ja Zhang, 2024.)

Muunlaiset ratkaisut. Loput GNSS-esteitä ja määrittelemättömiä häiriöitä käsittelevät artikkelit eivät hyödynnä datafuusiota. Tunneleissa kulkevien junien paikannukseen erikoistuneet Yin ym. ehdottavat LCX-kaapelin (engl. leaky coaxial cable) asentamista tunneleihin. LCX on koaksiaalikaapeli, jolla voidaan lähettää ja vastaanottaa sähkömagneettisia aaltoja. Tässä ratkaisussa sillä levitetään tunneleihin GNSS-signaalien kaltaisia aaltoja, joita voidaan lukea junan GNSS-laitteella. Paikannus saadaan senttimetrin tarkkuudelle käyttämällä kahdentyyppistä signaalia ja algoritmia. Ratkaisun todetaan soveltuvan myös suurnopeusjunille. (Yin ym., 2024.)

Y. Sun ym. esittävät ratkaisun pitkiin GNSS-katkoihin. Ideana on tunnistaa kiskojen kiinnikkeitä millimetriaalloilla (engl. millimetre wave, mmWave) eli korkeataajuisella sähkömagneettisella säteilyllä. Kiinnikkeet tunnistetaan takaisin heijastuneista millimetriaaltosignaaleista tarkoitukseen kehitetyn algoritmin avulla. Sen tukena on Kalman-suodin, joka arvioi junan nopeutta. Kiinnikkeet näkyvät heijastuneessa signaalissa eri tavoin eri nopeuksilla. Junan sijainti päätellään raidekartasta, johon on merkitty kaikki radan kiinnikkeet. (Y. Sun ym., 2024.)

Ferrettin ym. ratkaisua ei ole viety pitkälle käytäntöön. He tutkivat LoRaWAN-arkkitehtuurin (engl. long range wide area network) käyttämistä vaihtoehtoisena paikannusjärjestelmänä GNSS-häiriöiden aikana. Kyseistä IoT-ekosysteemiä (engl. internet of things) ehdotetaan varsinkin yksiraiteisille reiteille. Ratkaisun arkkitehtuuriin kuuluvat ratavälillä molemmissa päissä olevat asemamastot ja niiden välille ketjuksi sijoitetut apumastot. Junat voivat kommunikoida mastojen kanssa myös

GNSS-katkojen aikana. Järjestelmä käyttää hajaspektrimodulaatiota ja on pienitehoinen. (Ferretti ym., 2024.)

4.2.2 Ratkaisuja GNSS-huijauksiin

Jokaisessa GNSS-huijauksia käsittelevässä tutkimuksessa käytetään syvä- tai koneoppimisen menetelmiä (Taulukko 2). Niillä etsitään GNSS-signaalista huijaukseen viittaavia piirteitä eli indikaattoreita. Joissain indikaattoreissa verrataan GNSS-järjestelmän laskelmia jonkin anturin, esimerkiksi matkamittarin, dataan. (Bi ym., 2024a; Bi ym., 2024b; S.-Q. Wang ym., 2025; S.-Q. Wang ym., 2024.)

Bi ym. (2024a) ja S.-Q. Wang ym. (2025) hyödyntävät koneoppimista. Bi ym. (2024a) käyttävät huijaukseen viittaavien piirteiden tunnistamiseen LightGBM-mallia (engl. light gradient-boosting machine). LightGBM:n kaltaiset mallit perustuvat päätöspuihin¹, joita tehostetaan iteroimalla. Tässä ratkaisussa mallin hyperparametrit on hienosäädetty Bayesilaisella optimoinnilla. (Bi ym., 2024a.)

Vaikeasti tunnistettaviin hyökkäyksiin erikoistuneet S.-Q. Wang ym. (2025) käyttävät kolmea indikaattoria huijauksen tunnistamiseen. Menetelmässä GNSS-signaali jaetaan kahteen osignaaliin, jotta huijaukseen viittaavat poikkeamat erottuisivat paremmin. Huijaus tunnistetaan ohjaamattomalla SVDD-mallilla (engl. support vector data description). SVDD on luokittelualgoritmi, joka perustuu tukivektorikoneeseen². Tässäkin ratkaisussa käytetään Bayesilaista optimointia mallin parametrien hienosäätöön. (S.-Q. Wang ym., 2025.)

Kaksi jälkimmäistä menetelmää perustuvat syväoppimiseen. S.-Q. Wangin ym. (2024) kehittämä metodi tunnistaa jopa 11 GNSS-huijauksen indikaattoria syväoppivan tekoälyn avulla. Indikaattoreita on kolmesta erityyppisestä tunnistuksen kategoriasta, mikä parantaa menetelmän luotettavuutta. GNSS-huijaus tunnistetaan

¹ks. päätöspuu: Tuominen ym., 2019, s. 22

²ks. tukivektorikone: Tuominen ym., 2019, s. 19

puoliohjatulla GANomaly-verkolla. (S.-Q. Wang ym., 2024.) GANomaly on eräänlainen GAN-verkko (engl. generative adversarial network), jonka tehtävä on tunnistaa datasta poikkeamia (Akçay ym., 2019).

Bin ym. (2024b) tavoitteena ei ole pelkästään tunnistaa GNSS-huijausyritystä, vaan myös ennustaa käynnissä olevan hyökkäyksen etenemistä ja piirteitä. Junan paikannusjärjestelmään lisätään huijaukselta suojautumisesta vastaava yksikkö, joka käyttää kahdeksaa huijausindikaattoria. Matkamittarin tiedot ovat oleellinen osa järjestelmää. Käytännössä ennustus tehdään tarkoitusta varten optimoidulla LSTM-verkolla. (Bi ym., 2024b.)

4.2.3 Ratkaisuja GNSS-häirintään

Molemmissa GNSS-häirintää käsittelevissä ratkaisuissa käytetään datafuusiota (Cao ym., 2024; J. Liu ym., 2024). J. Liu ym. keskittyvät käynnissä olevan häirinnän tunnistamiseen junassa valmiiksi olevien anturien avulla. Junan sijainti voidaan arvioida esimerkiksi matkamittarin, INS-järjestelmän ja raidekartan datan perusteella. Kun tätä arviota verrataan GNSS-järjestelmän laskemaan sijaintiin, saadaan tietoa satelliittipaikannuksen luotettavuudesta sillä hetkellä. Jos jonkin satelliittikanavan laadun huomataan heikentyneen, voi syynä olla häirintä. (J. Liu ym., 2024.) Tieto GNSS-häirintäepäilystä auttaa raideliikenteen turvallisuuden ylläpitämisessä.

Cao ym. kehittävät erityyppisiin häirintätilanteisiin sopeutuvan ratkaisun. Siinä tiukasti kytkettyyn datafuusioon yhdistetään syväoppimista. Järjestelmässä on kaksi tilaa sen mukaan, onko GNSS-signaalia saatavilla vai ei. LSTM-verkkoa käytetään tilan vaihtamiseen reaaliajassa. Kun satelliittinavigointi on käytössä, paikannusjärjestelmä toimii GNSS/INS-fuusiolla. Paikannuksen tukena on epälineaarinen Kalman-suodin, joka vähentää virheellisiksi arvioitujen GNSS-signaalien painoarvoa laskuissa tarpeen mukaan. Jos häirintä on voimakasta, GNSS korvataan matkamittarin, raidekartan ja INS-järjestelmän fuusiolla. (Cao ym., 2024.)

5 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa käytiin läpi vuosina 2024 ja 2025 julkaistuja rautatieaiheisia tutkimuksia. Niistä etsittiin uusia keinoja satelliittipaikannuksen häiriöistä johtuvien virheiden torjumiseksi raideliikenteessä. Ehtona oli, että menetelmän tulee käyttää GNSS-satelliittipaikannusjärjestelmää. Useimmissa löydettyissä ratkaisuissa GNSS-järjestelmä on ensisijainen paikannusmetodi, jota täydennetään tarvittaessa muilla teknologioilla. Suosituimpia ratkaisumenetelmiä olivat datafuusio, erilaiset anturit ja kone- tai syväoppiminen. Ratkaisuissa käytettiin hyvin monenlaisia algoritmeja, muun muassa Kalman-suodinta.

Suurin osa käsitellyistä tutkimuksista ei keskity vain yhteen GNSS-häiriön aiheuttajaan, mikä tekee niissä ehdotetuista ratkaisuista monikäyttöisiä. Tällaisten tutkimusten käsittelemiä häiriöitä ovat esimerkiksi vuoristojen tai urbaanien alueiden luomat GNSS-katvealueet tai radiotaajuuden interferenssi. Käytännössä ratkaisuissa on kehitetty jokin tapa suoriutua paikannuksesta vaihtoehtoisin menetelmin GNSS-katkojen aikana. Osa ratkaisuista on sen sijaan suunniteltu joko GNSS-häirinnän tai -huijausten ehkäisemiseen. Niissä GNSS-signaalin laatua arvioidaan jatkuvasti ja tarvittaessa paikannus suoritetaan luotettavammilla menetelmillä.

Tutkielmassa kerätyn aineiston ja sitä kautta ratkaisumenetelmien todettiin painottuvan Kiinan alueelle. Tämä tarkoittaa, että kaikki löydetyt ratkaisut eivät välttämättä sovi suoraan esimerkiksi Euroopan rautateille. Lisäksi moni tutkielman käsittelemä tutkimus erikoistuu johonkin tiettyyn häiriötilanteeseen tai perustuu vain

yhteen tietoaaineistoon. Jotta ratkaisumenetelmien luotettavuudesta voitaisiin varmistua, tulisi menetelmien tutkimista jatkaa maantieteellisesti monipuolisemmalla datalla. Toki ratkaisujen toimintaperiaatteet eivät lähtökohtaisesti ole sidoksissa mihinkään tiettyyn rautatiejärjestelmään.

Tutkielma ei ota kantaa siihen, mitkä siinä esitellyistä menetelmistä ovat parhaimpia raideliikenteen tarpeisiin. Tämän selvittäminen vaatisi menetelmien järjestelmällistä vertailua ja mahdollisesti lisätutkimuksia yksittäisistä menetelmistä. Kaikki menetelmät eivät tietenkään ole keskenään vertailtavissa, mutta tutkielmas-
sa löydettiin myös kilpailevia ratkaisutoteutuksia. Lisäksi olisi mielenkiintoista, jos erilaisia ratkaisuja yhdisteltäisiin. Näin voitaisiin kehittää entistä luotettavampia ja häiriönsietoisempia junien paikannusjärjestelmiä. Sekalaisia GNSS-katkoja varten suunniteltuun paikannusjärjestelmään voisi esimerkiksi lisätä GNSS-häirintää ja -huijauksia tunnistavat yksiköt.

Lähdeluettelo

- Akçay, S., Atapour-Abarghouei, A., & Breckon, T. P. (2019). GANomaly: Semi-supervised anomaly detection via adversarial training. Teoksessa C. V. Jawahar, H. Li, G. Mori & K. Schindler (Toim.), *Computer vision – ACCV 2018* (s. 622–637, Vol. 11363). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20893-6_39
- Albrecht, T., Lüddecke, K., & Zimmermann, J. (2013). A precise and reliable train positioning system and its use for automation of train operation. *2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation Proceedings*, 134–139. <https://doi.org/10.1109/ICIRT.2013.6696282>
- Bi, J., Liu, J., Cai, B., & Wang, J. (2024a). Spoofing attack recognition for GNSS-based train positioning using a BO-LightGBM method. *Science Progress*, *107*(4). <https://doi.org/10.1177/00368504241272731>
- Bi, J., Liu, J., Cai, B., & Wang, J. (2024b). A CS-LSTM Model-Based Spoofing Prediction Method for GNSS-Based Train Positioning. *2024 IEEE 2nd International Conference on Control, Electronics and Computer Technology (ICCECT)*, 247–253. <https://doi.org/10.1109/ICCECT60629.2024.10546154>
- Cao, Z.-J., Liu, J., Jiang, W., Cai, B.-G., & Wang, J. (2024). Resilient GNSS/INS-Based Railway Train Localization Using Odometer/Trackmap-Enabled Jamming Discrimination. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *25*(12), 19852–19872. <https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3460689>

- Chapelle, O., Zien, A., & Schölkopf, B. (Toim.). (2006). *Semi-supervised learning*. MIT Press.
- Chen, Y., Jiang, W., Wang, J., Cai, B., Liu, D., Ba, X., & Yang, Y. (2024). An LSTM-Assisted GNSS/INS Integration System Using IMU Recomputed Error Information for Train Localization. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, *60*(3), 2658–2671. <https://doi.org/10.1109/TAES.2023.3328318>
- Chrzan, M., Ciszewski, T., & Nowakowski, W. (2024). Selected applications of satellite technologies in rail transport. *Archives of Transport*, *71*(3), 91–105. <https://doi.org/10.61089/aot2024.z1bfx011>
- Elbahhar, F., & Heddebaut, M. (2018). Advanced train positioning/communication system. Teoksessa A. Hessami (Toim.), *Modern railway engineering*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71768>
- EUSPA. (2025). *GNSS and Secure SATCOM User Technology Report*. Luxembourg. <https://doi.org/10.2878/9596833>
- Ferretti, D., Amato, D., & Verdone, R. (2024). Enhancing LoRaWAN-Based Railway Signalling Systems for Secondary Lines: A Probabilistic Analysis of Multi-Hop Localization. *2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/VTC2024-Fall63153.2024.10757916>
- Filippi, C., Guastaroba, G., Peirano, L., & Speranza, M. G. (2023). Trends in passenger transport optimisation. *International Transactions in Operational Research*, *30*(6), 3057–3086. <https://doi.org/10.1111/itor.13300>
- Goundan, P., & Jhunjhunwala, A. (1999). Axle counter based block signalling for safe and efficient train operations. *Gateway to 21st Century Communications Village. VTC 1999-Fall. IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference (Cat. No.99CH36324)*, *2*, 824–828. <https://doi.org/10.1109/VETECEF.1999.798444>

- Groves, P. D. (2013). *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems* (Second edition). Artech House.
- Grzechca, D., & Szczeponik, A. (2020). Comparison of filtering methods for enhanced reliability of a train axle counter system. *Sensors*, *20*(10), 2754. <https://doi.org/10.3390/s20102754>
- Heirich, O., Siebler, B., Sand, S., Lehner, A., & Crespillo, O. G. (2020). Measurement Methods for Train Localization with Onboard Sensors. *2020 European Navigation Conference (ENC)*, 1–10. <https://doi.org/10.23919/ENC48637.2020.9317435>
- Hutter, F., Kotthoff, L., & Vanschoren, J. (Toim.). (2019). *Automated machine learning: Methods, systems, challenges*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05318-5>
- Kaplan, E. D., & Hegarty, C. (Toim.). (2017). *Understanding GPS/GNSS: principles and applications* (Third edition). Artech House.
- Khodarahmi, M., & Maihami, V. (2023). A review on kalman filter models. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *30*(1), 727–747. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09815-7>
- Kim, Y., Bang, H., Kim, Y., & Bang, H. (2018). Introduction to kalman filter and its applications. Teoksessa *Introduction and implementations of the kalman filter*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80600>
- Klein, L. A. (2019). *Sensor and data fusion for intelligent transportation systems*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.
- Liu, J., Cai, B.-g., Wang, J., & Lu, D.-b. (2024). Sensor-Assisted GNSS Jamming Monitoring in Support of Safe Train Positioning. *2024 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/ICCEM60619.2024.10558954>

- Liu, J., Cai, B., Wang, J., & Yang, Z. (2013). Generating an electronic track map for train collision early warning system. *2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation Proceedings*, 140–145. <https://doi.org/10.1109/ICIRT.2013.6696283>
- Liu, Z., Long, Z., & Li, X. (2015). Maglev train overview. Teoksessa Z. Liu, Z. Long & X. Li (Toim.), *Maglev trains: Key underlying technologies* (s. 1–28). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45673-6_1
- Löffler, W., & Bengtsson, M. (2024). Train Localization During GNSS Outages: A Minimalist Approach Using Track Geometry And IMU Sensor Data. *2024 27th International Conference on Information Fusion (FUSION)*, 1–8. <https://doi.org/10.23919/FUSION59988.2024.10706340>
- Malvezzi, M., Vettori, G., Allotta, B., Pugi, L., Ridolfi, A., & Salotti, F. (2011). Train position and speed estimation by integration of odometers and IMUs.
- Marais, J., Beugin, J., & Berbineau, M. (2017). A Survey of GNSS-Based Research and Developments for the European Railway Signaling. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(10), 2602–2618. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2658179>
- McManamon, P. F. (2019). *Lidar technologies and systems*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.
- Mirabadi, A., Mort, N., & Schmid, F. (1996). Application of sensor fusion to railway systems. *1996 IEEE/SICE/RSJ International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (Cat. No.96TH8242)*, 185–192. <https://doi.org/10.1109/MFI.1996.572176>
- Mitchell, H. B. (2007). *Multi-sensor data fusion*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-71559-7>
- O’Shea, K., & Nash, R. (2015). An Introduction to Convolutional Neural Networks. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1511.08458>

- Otegui, J., Bahillo, A., Lopetegi, I., & Díez, L. E. (2017). A Survey of Train Positioning Solutions. *IEEE Sensors Journal*, 17(20), 6788–6797. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2747137>
- Our World in Data. (2022). *Carbon footprint of travel per kilometer*. Haettu 29.4.2025 osoitteesta <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-footprint-travel-mode>
- Pascoe, R. D., & Eichorn, T. N. (2009). What is communication-based train control? *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 4(4), 16–21. <https://doi.org/10.1109/MVT.2009.934665>
- Sharma, R. K., Sharma, A., & Kanaujia, S. (2024). Wireless sensor network for condition monitoring of axel counter device in railways. Teoksessa O. H. Gupta, N. P. Padhy & S. Kamalasan (Toim.), *Soft computing applications in modern power and energy systems* (s. 113–120). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8007-9_9
- Sładkowski, A. (Toim.). (2017). *Rail Transport—Systems Approach* (Vol. 87). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51502-1>
- Staudemeyer, R. C., & Morris, E. R. (2019). Understanding LSTM – a tutorial into long short-term memory recurrent neural networks. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.09586>
- Steuer, M., Burdzik, R., & Piednoir, F. (2025). Implementation of global navigation satellite systems in railway traffic control systems: Overview of navigation systems, application areas, and implementation plans. *Applied Sciences*, 15(1), 356. <https://doi.org/10.3390/app15010356>
- Sun, Y., Li, J., Yang, C., Du, Z., Zhang, J., & Qiu, X. (2024). MMW-FC: A novel railway fastener detecting method based on millimetre wave radar for train positioning. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 18(7), 1094–1105. <https://doi.org/10.1049/rsn2.12546>

- Sun, Z., Song, H., Zhou, M., Yin, H., & Dong, H. (2024). Integrating GNSS and INS Data with Deep Learning-Enhanced Invariant Extended Kalman Filter for Train Localization. *2024 43rd Chinese Control Conference (CCC)*, 8975–8980. <https://doi.org/10.23919/CCC63176.2024.10661822>
- Tuominen, H., Neittaanmäki, P., Niinimäki, E., Pölönen, I., Rautiainen, I., Äyrämö, S., Ruohonen, T., Nyrhinen, R., Ojalainen, A., Vähäkainu, P., & Äyrämö, S.-M. (2019). *Tekoälyn perusteita ja sovelluksia*. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-39-7796-2>
- UIC. (2024). Railway Statistics Synopsis. Haettu 12.5.2025 osoitteesta https://uic.org/IMG/pdf/railway_statistics_synopsis_2024web_1866037339.pdf
- Waltz, E., & Llinas, J. (1990). *Multisensor data fusion*. Artech House.
- Wang, J., Tao, W.-j., Cai, B.-g., Liu, J., & Toro, F. G. (2016). Generation and Evaluation of the Track Map Database for GNSS-based Train Positioning Using a Map-tool-chain, 1914–1926. <https://doi.org/10.33012/2016.14736>
- Wang, S.-Q., Liu, J., Cai, B.-G., Wang, J., & Lu, D.-B. (2025). BOSVDD-Based GNSS Spoofing Detection for Rail Vehicle Positioning. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 74, 1–18. <https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3504570>
- Wang, S.-Q., Liu, J., Cai, B.-g., Wang, J., & Lu, D.-b. (2024). Multi-Domain Joint Spoofing Detection Based on a Semi-Supervised Detection Network for GNSS-Based Train Positioning. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1–15. <https://doi.org/10.1109/TAES.2024.3496414>
- Wang, W., Shangguan, W., Liu, J., & Chen, J. (2024). Enhanced Fault Detection for GNSS/INS Integration Using Maximum Correntropy Filter and Local Outlier Factor. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 9(1), 2077–2093. <https://doi.org/10.1109/TIV.2023.3312654>

- Wu, Q., Jia, X., Yin, J., Tang, T., & Chen, X. (2024). Real-Time Positioning of Autonomous High-Speed Trains: Combining AI-based Perception and Multi-Source Sensor Data. *2024 43rd Chinese Control Conference (CCC)*, 6602–6608. <https://doi.org/10.23919/CCC63176.2024.10662849>
- Wu, Y., Wei, Z., Weng, J., & Deng, R. H. (2018). Position Manipulation Attacks to Balise-Based Train Automatic Stop Control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *67*(6), 5287–5301. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2802444>
- Xu, Y., Fan, K., & Hu, Q. (2024). Research on Positioning of Permanent Magnet Maglev Trains Based on Weighted Adaptive Kalman Information Fusion. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9319-2_19
- Xu, Y., Fan, K., Hu, Q., & Zhang, X. (2024). Positioning of Suspended Permanent Magnet Maglev Trains Using Satellite–Ground Multisensor Fusion. *IEEE Sensors Journal*, *24*(10), 16816–16825. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3384699>
- Yin, L., Song, T., Ni, Q., Xiao, Q., Sun, Y., & Guo, W. (2024). New Signal and Algorithms for 5G/6G High Precision Train Positioning in Tunnel With Leaky Coaxial Cable. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, *42*(1), 223–238. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2023.3322790>
- YK:n DESA. (2024). *World Population Prospects 2024*. Haettu 23.5.2025 osoitteesta <https://population.un.org/wpp/>
- Yue, L., Lu, D., Cai, B., Wang, J., Liu, J., & Jiang, W. (2024). LIO-SAM for Vehicle Localization Using FGO Architecture. *2024 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 765–770. <https://doi.org/10.1109/ICEAA61917.2024.10701707>
- Zhang, J., & Li, X. (2024). The UKF Train Combination Positioning Information Fusion Algorithm Based on Variational Bayesian Estimation. *2024 3rd Inter-*

national Symposium on Sensor Technology and Control (ISSTC), 167–172.

<https://doi.org/10.1109/ISSTC63573.2024.10824215>

Zheng, Y. (2007). Improving Accuracy and Integrity in Rail Applications through the Integration of GNSS with a Digital Route Map. Haettu 20.3.2025 osoitteesta https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/virtual_library/2007-08-08_Improving_Accuracy_and_Integrity_in_Rail_Applications_through_the_Integration_of_GNSS_with_a_Digital_Route_Map.pdf