

Matti Ala-Poikela

VÄÄRENNETYN SATELLIITTI- PAIKANNUSSIGNAALIN HAVAITSEMINEN RF-SORMENJÄLJEN AVULLA

Kandidaatintyö
Informaatiotekniikan ja viestinnän tiedekunta
Maaliskuu 2022

TIIVISTELMÄ

Matti Ala-Poikela: Väärennetyn satelliittipaikannussignaalin havaitseminen RF-sormenjäljen avulla

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma

Maaliskuu 2022

Satelliittipaikannusta hyödyntävä laite voi joutua tilanteeseen, jossa ulkopuolinen taho pyrkii harhauttamaan laitteen sijainnin määrittystä väärennetyllä satelliittipaikannussignaalilla. Väärennetty satelliittipaikannussignaali vastaa paikannukseen käytettävän informaation osalta satelliittista peräisin olevaa aitoa satelliittipaikannussignaalia. Tällöin väärennettyä satelliittipaikannussignaalia vastaanottava laite voi määrittää sijaintinsa todellisesta sijainnistaan poikkeavaksi, ja laite voi jopa ajautua johonkin ulkopuolisen tahon määrittämään sijaintiin. Täten väärennetyt signaalit olisi hyödyllistä havaita, esimerkiksi RF-sormenjäljen avulla. RF-sormenjälki sisältää vastaanotetusta signaalista irrotetun piirteen, jonka avulla signaalin alkuperä voidaan tunnistaa ja näin ollen varmistua vastaanotetun signaalin aitoudesta. Mikäli satelliittipaikannussignaalien vastaanottaja huomaa olevansa harhautusyrityksen kohteena, voi hän lopettaa satelliittipaikannuksen käyttämisen välttyäkseen ulkopuolisen tahon harhautukselta ja mahdolliselta johdattelulta.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia, miten RF-sormenjäljen avulla voidaan havaita, että vastaanotettujen signaalien joukossa on myös väärennettyjä satelliittipaikannussignaaleja. Ensin perehdytään aiheeseen liittyvään teoriaan esitellen satelliittipaikannuksen perusperiaatteita, jonka jälkeen tehdään katsaus RF-sormenjälkiin sekä luokittimiin. Teoriaosuuden jälkeen sekä aitoja että väärennettyjä satelliittipaikannussignaaleja kerätään laboratoriolaitteilla. Kerätyn datan pohjalta muodostetaan luokitinmalli, jonka avulla pyritään havaitsemaan väärennetyt satelliittipaikannussignaalit. RF-sormenjälkenä käytetään lyhytaikaista Fourier'n muunnosta (STFT), ja tallennetuille RF-sormenjäljille suoritetaan pääkomponenttianalyysi (PCA). RF-sormenjälkien pääkomponenteista muodostetaan opetus- ja testijoukko. Tukivektorikone (SVM) opetetaan opetusjoukolla, jonka jälkeen opetetun mallin luokittelukykyä arvioidaan testijoukolla.

Lopputuloksena opetettu SVM-luokitin kykenee luokittelemaan sille annetut testijoukon näytteet 100 %:n tarkkuudella oikeisiin luokkiin: aitoihin ja väärennettyihin signaaleihin. Tarkastelemalla eri luokkien RF-sormenjäljistä saatuja pääkomponentteja on eri luokkien välillä havaittavissa selkeä ero. Luokitteluun käytetään kuitenkin hyvin pientä määrää dataa, jolloin luokitinmallin todellista tarkkuutta ei voida tarkasti määrittää eikä tulosta voida pitää täysin luotettavana. Lisäksi mittausympäristö dataa kerätessä ei ole täysin todenmukainen, sillä väärennetyt signaalit lähetetään radiotien sijaan koaksiaalikaapelin välityksellä. Voidaan kuitenkin sanoa, että väärennetyn satelliittipaikannussignaalin havaitseminen RF-sormenjäljen avulla on mahdollista.

Avainsanat: RF-sormenjälki, väärennetty satelliittipaikannussignaali, STFT, SVM

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämän kandidaatintyön idea kehkeytyi vuoden 2021 kesän loppupuolella työskennellessäni Tampereen yliopistolla tutkimusapulaisena. Tajusin, että voin tehdä kandidaatintyöni keräämäni mittausdatan ympärille, joten käytin tilanteen hyödyksi. Työtä tehdessä sainkin oppia paljon uusia asioita muun muassa satelliittipaikannuksesta, RF-sormenjäljistä ja luokittimen käyttämisestä.

Haluaisin kiittää työni tarkastajaa Markus Allénia, jolta sain neuvoja työn parantamiseen ja edistämiseen aina tarvittaessa. Tarkastajani lisäksi haluaisin kiittää myös Wenbo Wangia, jolta sain suuren avun datan keräämisessä ja sen käsittelyssä. Hänen ansioitaan säästyin mahdollisesti elinikäisiltä aivovaurioilta, jotka olisivat seuranneet pitkäaikaisesta pään hakkaamisesta seinään. Työn alkuperäinen karkea idea on myös hänen käsialaansa, ja työssä tehdyt mittaukset ovat myös osana hänen tekemässään tutkimuksessa.

Iso kiitos kuuluu myös kaikille lähipiirini ihmisille, jotka ovat auttaneet minua selviämään tähän työhön täysin liittymättömissä askareissa, niin koulussa kuin kotonakin. Ilman heitä olisi motivaatiota työn tekemiseen saanut hakea, ja työn ohessa tehdyt opintoni olisivat varmasti kärsineet.

Tampereella, 3.3.2022

Matti Ala-Poikela

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. SATELLIITTIPAIKANNUS.....	3
2.1 Yleiskatsaus eri satelliittipaikannusjärjestelmiin	3
2.2 Sijainnin määrittäminen satelliittien avulla	6
2.3 Väärennetty satelliittipaikannussignaali	9
3. RF-SORMENJÄLKI JA SEN HYÖDYNTÄMINEN.....	11
3.1 Lyhytaikainen Fourier'n muunnos ja muita RF-sormenjälkiä	11
3.2 Erilaisia luokittimia	14
4. DATAN KERÄÄMINEN JA SIGNAALIN ALKUPERÄN TUNNISTAMINEN.....	18
4.1 Käytetty laitteisto ja ohjelmisto.....	18
4.2 Datan keräämisen vaiheet.....	21
4.3 Datan käsittely ja RF-sormenjälkien luokittelu	22
5. TULOSTEN ANALYSOINTI	25
6. YHTEENVETO	29
LÄHTEET	30

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Esimerkkutilanne satelliittipaikannusta hyödyntävän laivan harhauttamisesta. Kuvassa oleva laiva laskee sijaintinsa neljän GNSS-satelliitin signaalien sekä harhautuslaitteesta peräisin olevan väärennetyn satelliittipaikannussignaalin perusteella. Musta nuoli kuvaa laivan suunnitelman mukaista reittiä, jota kyseinen laiva luulee kulkevasa. Harhautuksen seurauksena laiva kuitenkin kulkee todellisuudessa punaisen nuolen osoittamaa reittiä. Piirretty lähteeseen [16] perustuen.....</i>	10
Kuva 2.	<i>Ikkunafunktion käyttäminen. Signaalin 50 ensimmäistä näytettä ikkunoidaan 50 näytteen mittaisella Hann-ikkunafunktiolla, jolloin lopputuloksena on signaalin näytteiden ja ikkunafunktion tulo. Vastaavanlainen operaatio toimii myös muilla ikkunafunktioilla. Kuvan esimerkkisignaali on todellisuudessa vain joukko satunnaisia kokonaislukuja, eikä näin ollen sisällä varsinaisesti mitään informaatiota.....</i>	13
Kuva 3.	<i>Tukivektorikoneen rajapinta ja marginaali piirrettynä kahden luokan väliin (siniset ja vihreät ympyrät), jossa mustalla reunustetut ympyrät esittävät tukivektoreita [27]. Kuvassa näkyvät yhtälöt poikkeavat hieman aiemmin määritellyistä kaavoista (9) ja (10), mutta lopputuloksena saatu päätöspinta on sama.....</i>	16
Kuva 4.	<i>Datankeruuvaiheen mittausjärjestelyt. Tilanteesta riippuen haaroittimeen liitetään pelkästään antenni tai harhautuslaite tai molemmat samanaikaisesti.....</i>	19
Kuva 5.	<i>GNSS Planning Online -sivuston [29] piirtämä kuva taivaalla näkyvistä satelliiteista. Kuvassa näkyvät pienet vihreät ympyrät ovat GPS-satelliitteja ja vihreällä piirretyt viivat ovat satelliittien lentoradat. G-etuliitteen jälkeinen luku kertoo, mitä GPS-satelliittia kyseinen ympyrä edustaa.</i>	20
Kuva 6.	<i>Kuvaaja yhdestä RF-sormenjäljestä, joka saadaan laskemalla STFT kerätyn datan näytteiden yli. Ikkunafunktiona käytössä on 128 näytteen mittainen Hann-ikkunafunktio.....</i>	23
Kuva 7.	<i>Opetetun SVM-luokitinmallin tarkkuus 20 luokittelukerran jälkeen. Luokka 1: Aidot GNSS-signaalit L1 kaistalla. Luokka 2: Aitojen GNSS-signaalien ja yhden väärennetyn GPS-signaalin muodostama summasignaali L1-kaistalla. Luokka 3: Kahdeksan väärennettyä GPS-signaalia L1 kaistalla.</i>	25
Kuva 8.	<i>Ero eri luokkien sisältämien RF-sormenjälkien välillä. Kuvassa on piirrettynä jokaisen luokan yhdestä satunnaisesta 1 ms:n mittaisesta osuudesta laskettu STFT.....</i>	26
Kuva 9.	<i>Yhden testijoukon sisältämät 20 merkittävintä pääkomponenttia. 20 pääkomponentista merkittävin sijaitsee aina vaaka-akselin kohdassa 1 ja vähiten merkittävä kohdassa 20.</i>	26

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AltBOC	alternative binary carrier offset
BDS	BeiDou Navigation Satellite System
BOC	binary carrier offset
BPSK	binary shift keying
c	valonnopeus
C/A	coarse acquisition
CDMA	code division multiple access
CWT	continuous wavelet transform
DFT	discrete Fourier transform
ECEF	Earth-centered Earth-fixed
ECI	Earth-centered inertial
ENU	east north up
FDMA	frequency division multiple access
GEO	geosynchronous equatorial orbit
GLONASS	Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
IGSO	inclined geosynchronous orbit
LDA	linear discriminant analysis
MEO	medium Earth orbit
NavIC	Navigation with Indian Constellation
P	precision
PCA	principal component analysis
PRN	pseudo random noise
QPSK	quadrature phase shift keying
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RF	radio frequency
RFF	radio frequency fingerprinting
RFI	radio frequency interference
SATNAV	satellite navigation
SAR	search and rescue
STFT	short-time Fourier transform
SVM	support vector machine
TOA	time of arrival
USRP	Universal Software Radio Peripheral

1. JOHDANTO

Nykyään satelliittipaikannuksella on paljon eri sovelluskohteita, ja satelliittipaikannus on myös osana monen jokapäiväistä elämää. Satelliittipaikannusta hyödynnetään usein navigoinnissa, jolloin halutaan kulkea jostain sijainnista toiseen vailla omaa tietämystä oikeasta reitistä. Tällöin satelliittipaikannuksen tuomat palvelut ovat kätevästi apuna.

Joskus vastaan voi kuitenkin tulla tilanne, jossa jokin ulkopuolinen taho haluaa tahallisesti harhauttaa satelliittien avulla navigoivaa laitetta. Tällöin tämä ulkopuolinen taho lähettää omaa, satelliittipaikannussignaalia vastaavaa väärennettyä signaaliaan ja täten vaikeuttaa laitteen todellisen sijainnin määrittämistä. Tarpeeksi taitavan harhautusyrityksen seurauksena laite voi jopa ajautua johonkin ulkopuolisen tahon määrittämään sijaintiin, jonne navigoivan laitteen ei ole tarkoitus mennä.

Vuoden 2020 maaliskuussa Yhdysvaltain hallitus sai tiedon tilanteesta, jossa heidän satelliittipaikannusjärjestelmäänsä hyödyntävä laite ei pystynyt määrittämään todellista sijaintiaan. Laite oli navigointisovelluksen mukaan liikkunut 35 km/h vauhdilla ympyränmuotoisella radalla, vaikka laite oli todellisuudessa pysynyt paikallaan. Vuonna 2016 Iran sai haltuunsa kaksi Yhdysvaltain merivoimien käytössä olevaa alusta, kun ne olivat ajautuneet Iranin vesistölle. On spekuloitu, että Iran olisi johdatellut nämä alukset tahallisesti vesistöilleen lähettämällä väärennettyjä satelliittipaikannussignaaleja Yhdysvaltain alusten vastaanottimiin. Vaikka kumpikaan valtioista ei ole vahvistanut väitteitä, ovat Yhdysvaltain viranomaiset silti todenneet esimerkiksi droonin ohjaamisen olevan vastaavanlaisella tavalla mahdollista. [1] Tähän tietoon perustuen myös laivojen sekä lentokoneiden harhauttaminen voisi olla mahdollista.

Yksi ratkaisu harhautusyrityksen ehkäisemiseen on tunnistaa, että vastaanotettujen signaalien joukossa on myös väärennettyjä satelliittipaikannussignaaleja. Tämä on mahdollista muun muassa tutkimalla radiosignaalien piirteitä radio frequency (RF) fingerprint eli RF-sormenjäljen avulla. RF-sormenjälki on tietynlainen tunniste, joka sisältää tietyn erotetun piirteen vastaanotetusta signaalista. Vastaanotettu radiosignaali voidaan RF-sormenjäljen avulla yhdistää johonkin ennalta tunnettuun laitteeseen. Vaihtoehtoisesti voidaan varmistua siitä, etteivät kaikki vastaanotetut signaalit ole peräisin ennalta tunnetusta lähteestä, kuten satelliiteista.

Kun satelliittipaikannussignaalin vastaanottaja huomaa jonkin signaalin olevan peräisin jostain muualta kuin satelliitista, voi vastaanottaja hetkeksi lopettaa satelliittipaikannuksen käyttämisen kokonaan. Tällöin vältytään siltä, että jokin ulkopuolinen taho pääsisi johdattelemaan signaalin vastaanottajan jonnekin, minne vastaanottajalla ei ole aikomusta päätyä. Kun jossain vaiheessa varmistutaan taas satelliittipaikannussignaalien todenperäisyydestä, voidaan satelliittipaikannusta jälleen huoletta käyttää.

Tämän työn tavoitteena on esitellä, miten RF-sormenjäljen avulla voidaan havaita, että vastaanotetut satelliittipaikannussignaalit sisältävät myös väärennetyjä signaaleja. Tätä varten työssä valitaan yksi RF-sormenjälki ja luokitin, joiden avulla vastaanotettujen signaalien alkuperä pyritään selvittämään. Tämän jälkeen luokittelun tulosta analysoidaan, ja tehdään päätelmät opetetun luokitinmallin toimivuudesta ja luotettavuudesta.

Tämän työn kanssa vastaavanlainen tutkimus on esimerkiksi vuonna 2017 julkaistu M. Sunin et al. tutkimus [2], jossa perehdytään tämän työn tavoin väärennetyjen satelliittipaikannussignaalin havaitsemiseen hyödyntäen RF-sormenjälkeä. Kyseisessä tutkimuksessa hyödynnettävä RF-sormenjälki poikkeaa kuitenkin tässä työssä hyödynnettävästä RF-sormenjäljestä. Vuonna 2020 julkaistussa C. Xun et al. tutkimuksessa [3] käytetään tämän työn kanssa sekä vastaavanlaista RF-sormenjälkeä että vastaavanlaista luokitinta. Kyseisen tutkimuksen aiheena on kuitenkin tästä työstä poiketen dronien lennättämisessä käytettyjen signaalien tunnistaminen.

Työn rakenne on seuraava: Aluksi perehdytään työn kannalta oleelliseen teoriaan aloittaen luvusta 2, jossa käydään läpi satelliittipaikannukseen liittyviä eri ominaispiirteitä, käytäntöjä sekä häiriösignaalien tuomia vaikeuksia satelliittipaikannuksessa. Teoriaosuus jatkuu luvussa 3, jossa esitellään, miten radiosignaalin alkuperän tunnistamista varten signaalien piirteitä irrotetaan ja tallennetaan RF-sormenjäljeksi sekä miten niitä voidaan luokittimen avulla luokitella. Tämän jälkeen testataan teorian toimivuutta käytännössä. Luvussa 4 tutustutaan työssä käytettyyn mittalaitteistoon sekä ohjelmistoon, jonka jälkeen esitellään kerätyn datan käsittelyyn liittyviä seikkoja. Luvussa 5 kootaan datan käsittelystä saadut tulokset yhteen ja pohditaan työssä käytettyjen menetelmien laadukkuutta. Luku 6 toimii yhteenvetona, jossa käydään läpi tärkeimmät työn aikana esille tulleet havainnot sekä pohditaan aiheen tulevaisuuden näkymiä lyhyesti.

2. SATELLIITTIPAIKANNUS

Työssä käsitellään satelliittipaikannussignaaleista saatuja RF-sormenjälkiä ja satelliittipaikannusta hyödyntävän laitteen harhauttamista, joten on myös oleellista tietää jotain itse satelliittipaikannuksesta. Tässä luvussa perehdytään satelliittipaikannukseen liittyvään, tämän työn kannalta oleelliseen teoriaan. Ensin käydään läpi nykyisin käytössä olevia eri satelliittipaikannusjärjestelmiä, jonka jälkeen edetään sijainnin määrittämisen peruseriaatteeseen. Luvun loppuun tarkastellaan myös häirinnän ja harhauttamisen aiheuttamia vaikeuksia satelliittipaikannuksessa.

2.1 Yleiskatsaus eri satelliittipaikannusjärjestelmiin

Tällä hetkellä maailmanlaajuisia satelliittipaikannusjärjestelmiä, engl. Global Navigation Satellite Systems (GNSS), on käytössä yhteensä neljä kappaletta:

- Yhdysvaltain hallinnoima Global Positioning System (GPS),
- Venäjän hallinnoima Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS),
- Euroopan unionin hallinnoima Galileo ja
- Kiinan hallinnoima BeiDou Navigation Satellite System (BDS). [4, s. 2]

Näiden neljän järjestelmän lisäksi lasketaan GNSS-termiin joskus mukaan myös muita satelliittipaikannusjärjestelmiä: Intian hallinnoima Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS), joka tunnetaan myös nimellä Navigation with Indian Constellation (NavIC), sekä Japanin hallinnoima Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) [5]. GNSS-termin alkuperäisen määritelmän mukaisesti nämä kaksi ovat kuitenkin vain tietyn maantieteellisen alueen kattavia järjestelmiä, eivätkä näin ollen lukeudu varsinaisiin GNSS-termin mukaisiin järjestelmiin. Mikäli halutaan puhua kaikista satelliittipaikannusjärjestelmistä, voidaan käyttää termiä satellite navigation (SATNAV) systems eli SATNAV-järjestelmät. GPS, GLONASS, Galileo ja BeiDou kykenevät toimimaan joko täysin itsenäisesti tai muiden järjestelmien kanssa yhdessä suoden tarkemman sijaintitiedon. [4, s. 2] Sen sijaan IRNSS sekä QZSS toimivat pääasiassa tarkentavina järjestelminä tietyllä maantieteellisellä alueella [4, s. 8–10]. IRNSS on kuitenkin viime vuosien aikana kehittynyt ja voi toimia nykyisin myös täysin itsenäisenä järjestelmänä [6]. Tässä työssä GNSS-termi kattaa aiemmin mainitut neljä järjestelmää: GPS, GLONASS, Galileo ja BDS. Termillä

satelliittipaikannusjärjestelmät tai SATNAV-järjestelmät viitataan tässä työssä kaikkiin edellä mainittuihin satelliittipaikannusjärjestelmiin.

Eri satelliittipaikannusjärjestelmillä on eroja, mutta useat toiminnot ovat hyvin samankaltaisia järjestelmien välillä. Jokainen järjestelmä on jaettu kolmeen segmenttiin, jotka ovat maasegmentti, käyttäjäsegmentti sekä avaruussegmentti. Maasegmentti pitää sisällään laitteistot, joilla muun muassa seurataan satelliittien tilaa ja ylläpidetään satelliittien kelloja. Käyttäjäsegmentti sisältää pääasiassa vastaanotinlaitteen, ja avaruussegmenttiin kuuluu itse kiertoradalla olevat satelliitit. [7] Avaruussegmentin yhteydessä käytetään myös usein termiä konstellaatio, jolla tarkoitetaan yhden satelliittipaikannusjärjestelmän yhdessä toimivien satelliittien kokonaisuutta. Satelliittipaikannusjärjestelmän konstellaatio mahdollistaa järjestelmän toimivuuden sille määrätyllä alueella. [4, s. 45]

Yhdysvallat otti vuonna 2011 GPS:n käyttöön laajennettavan 24-paikkaisen konstellaation [8], joka on jo useiden vuosien ajan koostunut yli 24 satelliitista [4, s. 91]. Nykyisin GPS muodostaakin avaruussegmenttinsä yhteensä 31 satelliitista, jotka kiertävät Maata keskikorkealla kiertoradalla, engl. medium Earth orbit (MEO) [8]. Ratatasoja on yhteensä kuusi kappaletta eli satelliitit kiertävät yhteensä kuudella eri MEO-radalla [4, s. 91]. Mikäli satelliitteja olisi käytössä samanaikaisesti 24 kappaletta, kiertäisi yhdellä radalla täten aina neljä satelliittia, mutta nykyisen 31 satelliitin tapauksessa yhdellä radalla voi olla myös enemmän kuin neljä satelliittia.

GPS-satelliitit lähettävät signaalinsa samalla taajuuskaistalla samanaikaisesti hyödyntäen koodijakoista monikäyttöä, engl. code division multiple access (CDMA), eri satelliittien signaalien erotteluun. Jokaisella satelliitilla on oma pseudo random noise (PRN) -koodinsa, jotka ovat satelliittien välillä lähes korreloimattomia. Paikannussignaalin sisältämän PRN-koodin avulla satelliitit voidaan erotella toisistaan, mutta sitä käytetään myös sijainnin määrittämisessä. PRN-koodeja on GPS:n käytössä pääasiallisesti kaksi kappaletta: coarse acquisition (C/A) -koodi sekä lähinnä armeijakäyttöön tarkoitettu precise (P) -koodi. P-koodia voidaan kutsua myös Y-koodiksi, mikäli se on salattu. Sijainnin kannalta P-koodi onkin C/A-koodia tarkempi ja monimutkaisempi. Signaalissa C/A-koodi toistuu 1 ms:n välein ja P-koodi puolestaan viikon välein. [4, s. 152–167] Moderni GPS käyttää näiden lisäksi vielä muita koodeja, mutta niiden toimintaperiaate on samankaltainen C/A- ja P-koodien kanssa [4, s. 167–175]. GPS:n paikannussignaali pitää myös sisällään navigointidatan, josta käy ilmi sekä kyseisen satelliitin tarkat koordinaatit että muiden satelliittien karkeat koordinaatit eri ajanhetkillä [7].

Navigointidata ja PRN-koodi moduloidaan kantoaallon kanssa binary phase shift keying (BPSK) -modulointitekniikalla. GPS käyttää kolmea eri kantoaaltoa eri keskitaajuuksilla:

L1 keskitaajuudella 1 575,42 MHz, L2 keskitaajuudella 1 227,6 MHz sekä L5 keskitaajuudella 1 176,45 MHz. Moderni GPS jakaa nämä taajuuskaistat vielä useampaan eri osaan tarjoten modernimpia palveluita käyttäjilleen. [4, s. 167–175][7]

Venäjän GLONASS muodostaa avaruussegmenttinsä yhteensä 24:stä navigointiin tarkoitettua satelliitista. Satelliitit on jaoteltu kolmelle ratatasolle eli yhdellä kiertoradalla on yhteensä kahdeksan satelliittia. [9] Myös GLONASS hyödyntää PRN-koodeja, jotka ovat samaan tapaan GPS:n kanssa siviilikäyttöinen C/A-koodi sekä armeijakäyttöinen P-koodi. GPS:stä poiketen GLONASS hyödyntää satelliittien erottelussa CDMA:n sijasta frequency division multiple access (FDMA) -monikäyttöä eli taajuusjakoista monikäyttöä. [4, s. 204] Nämä signaalit muodostavat kolme kaistaa: L1-kaistan keskitaajuudella 1 602,0 MHz, L2-kaistan keskitaajuudella 1 246,0 MHz sekä L3-kaistan keskitaajuudella 1202,0 MHz [9]. Koska käytössä on FDMA-kantoaalto, voidaan jokaisessa satelliitissa käyttää samaa PRN-koodia [4, s. 204]. Moderni GLONASS kuitenkin tukee osittain myös CDMA-monikäyttöä [9].

Galileon avaruussegmentti koostuu 24:stä kiertoradalla olevasta satelliitista ja lisäksi 6 satelliittia toimii varalla [10]. Myös Galileo erottelee eri satelliittien signaalit toisistaan CDMA-monikäytöllä. Galileo-satelliittien käytössä olevia navigointisignaaleja on yhteensä neljä: E1 keskitaajuudella 1 575,42 MHz, E5a keskitaajuudella 1 176,45 MHz, E5b keskitaajuudella 1 207,14 MHz sekä E6 keskitaajuudella 1 268,75 MHz. Galileo moduloi kantaaltonsa muun muassa binary carrier offset (BOC), alternative binary carrier offset (altBOC) ja BPSK-modulointitekniikalla. [4, s. 240–244] Galileo on verrattain uusi satelliittipaikannusjärjestelmä, jonka suunnittelu aloitettiin vasta 1990-luvulla [4, s. 217]. Näin ollen Galileo tarjoaa tavallisen satelliittipaikannuksen lisäksi myös hyvin moderneja palveluita, kuten kaupallista palvelua (engl. commercial service) sekä maailman laajuiselle pelastustoiminnalle tarkoitettua search and rescue (SAR) -palvelua. SAR-palvelun toiminnan ideana on ilmoittaa hätäsignaalia lähettävälle laitteelle, että pelastusjärjestelyt kyseiseen sijaintiin ovat alkaneet. Palvelu on suunnattu lähinnä meripelastusorganisaatio Cospas-Sarsatin jäsenille. [4, s. 219–221]

BeiDou-järjestelmän avaruussegmentin käytössä on yhteensä 47 satelliittia, joista osa on MEO-radalla, osa geostationaarisella radalla, engl. geosynchronous equatorial orbit (GEO), ja osa kaltevalla geosynkronisella radalla, engl. inclined geosynchronous orbit (IGSO) [11]. BeiDou-järjestelmä käyttää yhteensä viittä eri taajuuskaistaa: B1C keskitaajuudella 1575,42 MHz, B1I keskitaajuudella 1561,098 MHz, B2a keskitaajuudella 1176,45 MHz, B2b keskitaajuudella 1207,14 MHz ja B3I keskitaajuudella 1268,52 MHz

[12]. BeiDou käyttää GPS:n ja Galileon tapaan CDMA-monikäyttöä sekä BPSK-modulaatiota kantaallossaan, mutta myös quadrature phase shift keying (QPSK) on käytössä [4, s. 298].

Japanin kehittämä QZSS koostuu yhteensä neljästä kiertoradalla olevasta satelliitista ja käyttää yhteensä viittä eri taajuuskaistaa: L1, L2, L5, L6 ja S. Kaistojen L1, L2 sekä L5 keskitaajuudet vastaavat GPS:n samannimisten kaistojen käyttämiä keskitaajuuksia. L6-kaistan keskitaajuus on 1278,75 MHz ja S-kaistan puolestaan 2 GHz. QZSS-satelliitit kiertävät Japanin valtion yläpuolelta Australian yläpuolelle muodostaen elliptisen kiertoradan. [13] IRNSS muodostaa avaruussegmenttinsä yhteensä seitsemästä satelliitista, ja signaalit etenevät kahdella taajuuskaistalla: L5 keskitaajuudella 1176,45 MHz ja S keskitaajuudella 2492,028 MHz [6]. L5-kaistan keskitaajuus vastaa jälleen GPS:n käytössä olevan L5-kaistan keskitaajuutta.

Taulukko 1. Yhteenveto eri satelliittipaikannusjärjestelmien pääominaisuuksista [4][6–13].

Järjestelmä	GPS	GLONASS	BeiDou	Galileo	QZSS	IRNSS
Ylläpitäjä	Yhdysvallat	Venäjä	Kiina	Euroopan Unioni	Japani	Intia
Satelliittien lukumäärä	31	24	47	24	4	7
Taajuuskaistat	L1, L2, L5	L1, L2, L3	B1C, B1I, B2a, B2b, B3I	E1, E5a, E5b, E6	L1, L2, L5, L6, S	L5, S
Monikäyttötekniikka	CDMA	FDMA, CDMA	CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Kantaalio- n modu- lointitek- niikka	BPSK	BPSK	BPSK, QPSK	BOC, CBOC, AltBOC, BPSK	BPSK	BPSK, BOC

Yllä olevaan taulukkoon 1 on kerätty oleelliset tiedot eri satelliittipaikannusjärjestelmistä, joka toimii samalla yhteenvedonä aiemmin esitellyistä eri SATNAV-järjestelmien asioista. Eri satelliittipaikannusjärjestelmien käytössä on myös pitkälti samalla keskitaajuudella sijaitsevat taajuuskaistat ja monikäyttötekniikkana CDMA, poikkeuksena GLONASS, joka käyttää FDMA:ta.

2.2 Sijainnin määrittäminen satelliittien avulla

Satelliittien lähettämät signaalit sisältävät navigointidatan ja PRN-koodin, joiden avulla sijainti määritetään. Navigointidata sisältää muun muassa kyseisen satelliitin kolmiulotteisen sijainnin tarkat (x_i, y_i, z_i) -koordinaatit eri ajanhetkillä. [7] Tällöin indeksillä i viitataan johonkin satelliittiin. Varsinainen käyttäjän sijainnin määrittäminen tehdään laske-
malla etäisyys satelliittiin hyödyntämällä time of arrival (TOA) -konseptia [4, s. 19]. Kun

paikannussignaali vastaanotetaan, verrataan signaalin lähetys- ja vastaanottoaikaa keskenään. Näiden ajanhetkien erotus ilmaisee ajan, joka signaalilla on kestänyt edetä satelliitin lähettimestä käyttäjän vastaanottoon. Satelliittien lähettämät signaalit etenevät valonnopeudella, jolloin valonnopeuden ja signaalin etenemiseen kuluneen ajan tulo määrittää myös etäisyyden lähettimen ja vastaanottimen välillä [7].

Koska halutaan tietää käyttäjän kolmiulotteinen sijainti, täytyy selvittää käyttäjän (x_u, y_u, z_u) -koordinaatit. Mikäli satelliittien kellojen ja käyttäjän kellon oletetaan olevan synkronoituja keskenään, sijainnin määrittämiseen riittää teoriassa kolme satelliittia. Tällöin sijainti voidaan määrittää silti kahteen pisteeseen, joista toinen on Maan päällä ja toinen jossain muualla. Mikäli tiedetään käyttäjän sijaitsevan Maan pinnalla, voidaan kahdesta pisteestä helposti valita oikea. [4, s. 22–24]

Satelliitin navigointidatan sisältämä lähetysaika perustuu satelliitin omaan kelloon. Satelliittien kellot ovat hyvin tarkkoja ja ne ovat synkronoituja keskenään eli jokainen kello on samassa ajassa. Käyttäjän kelloa ei kuitenkaan ole synkronoitu satelliittien kelloihin, joten käyttäjän kellon osoittama aika todennäköisesti eroaa satelliittien kellojen osoittamasta ajasta jonkin verran. [7] Voidaankin ajatella, että sijainnin laskemisessa on mukana tietynsuuruinen kellovirhe, joka on satelliittien kellojen näyttämän ajan ja käyttäjän kellon näyttämän ajan erotus. Mikäli jätetään kellovirhe huomioimatta, saadaan jokaisesta satelliitista laskettua vain pseudoetäisyys (engl. pseudo range), joka on satelliitin ja käyttäjän välisen etäisyyden sekä kellovirheen aiheuttaman virhe-etäisyyden summa [7]. Kellovirheen huomioimatta jättäminen voi aiheuttaa sijainnissa monien kilometrien virheen. Esimerkiksi 1 ms:n ero aiheuttaisi jo noin 300 km:n virheen valonnopeuden likiarvon ollessa $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s [4, s. 22].

Kellovirheen takia sijainnin määrittämiseen tarvitaan kolmen satelliitin sijaan vähintään neljä satelliittia [7]. Tällöin saadaan käyttäjän koordinaatit ja kellovirhe selville sekä eliminoidaan toinen ratkaisu sijainnille [4, s. 22–24]. Toisin sanoen saadaan selville pseudoetäisyyden ja kellovirheen aiheuttaman virhe-etäisyyden erotus eli todellinen etäisyys satelliitin ja käyttäjän välillä.

Käyttäjän vastaanottaessa satelliittipaikannussignaalia täytyy navigointidatan lukeminen aloittaa jonkin alikehyksen alusta. Esimerkiksi GPS-signaalin sisältämä navigointidata koostuu kehyksistä, jotka puolestaan rakentuvat useista alikehyksistä. Navigointidatan avulla käyttäjä saa merkityksi signaalin lähetysajan, ja tarkemman ajan käyttäjä saa PRN-koodin avulla. [7] Navigointidata ja PRN-koodi luetaan jokaisesta satelliitista erikseen. Eri satelliittien signaalit ovat tällöin vastaanotinpäässä eri vaiheissa, jolloin syntyy tietyn ajan mittainen viive eri satelliittien alikehysten lukuaikojen välille [7].

Kun satelliitin navigointidatan kehukset on saatu luettua vastaanotinpäässä, etäisyys yhteen satelliittiin voidaan määrittää kaavan (1) avulla [7]:

$$\sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} - c \cdot \Delta b = \rho_i + c \cdot \Delta t_i. \quad (1)$$

Kaavassa Δb on kellovirhe, c valonnopeus ja x_i, y_i ja z_i satelliitin koordinaatit signaalin lähetyshetkellä. Käyttäjän koordinaatteja x_u, y_u ja z_u sekä kellovirhettä Δb signaalin vastaanottohetkellä ei tiedetä. [7]

Käyttäjän täytyy sijainnin muodostamista varten lukea navigointidata ja PRN-koodi vähintään neljästä satelliitista. Käyttäjän varsinainen sijainti saadaan tällöin laskettua muodostamalla kaavan (1) avulla neljän yhtälön yhtälöryhmä kaavan (2) mukaisesti, jolloin ratkaistavana on mittalaitteen koordinaatit sekä kellovirhe [7]:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 + (z_1 - z_u)^2} - c \cdot \Delta b = \rho_1 \\ \sqrt{(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 + (z_2 - z_u)^2} - c \cdot \Delta b = \rho_2 + c \cdot \Delta t_2 \\ \sqrt{(x_3 - x_u)^2 + (y_3 - y_u)^2 + (z_3 - z_u)^2} - c \cdot \Delta b = \rho_3 + c \cdot \Delta t_3 \\ \sqrt{(x_4 - x_u)^2 + (y_4 - y_u)^2 + (z_4 - z_u)^2} - c \cdot \Delta b = \rho_4 + c \cdot \Delta t_4. \end{cases} \quad (2)$$

Aikaero eri satelliittien alikehysten lukuhetkien välillä on $\Delta t_i = \delta t_{max} - \delta t_i$, $i = 2, 3, 4$. Tällöin δt_{max} on aikaero ensimmäisen satelliitin alikehysten lukuhetken sekä sijainnin laskemishetken välillä eli käytännössä $\delta t_{max} = \delta t_1$. Aikaero toisen satelliitin alikehysten lukuhetken ja sijainnin laskemishetken välillä on δt_2 ja niin edelleen. [7] Termin Δt_1 ollessa nolla voidaan myös termi $c \cdot \Delta t_1$ jättää yhtälöryhmän ensimmäiseltä riviltä kokonaan pois. Kun yhtälöryhmän tuntemattomat termit ratkaistaan, saadaan vastaanotinlaitteen sijainti määritettyä pisteeseen (x_u, y_u, z_u) . Tällöin ratkaistuna on myös kellovirhe Δb . [7]

Jotta sijainnin määrittäminen toimisi oikein, satelliittien koordinaattien sekä käyttäjän koordinaattien täytyy sijaita yhteisessä koordinaatistossa. Usein satelliittipaikannusjärjestelmien yhteydessä esille tulevia koordinaattijärjestelmiä ovat esimerkiksi Earth-centered inertial (ECI), Earth-centered Earth-fixed (ECEF) ja east north up (ENU) -järjestelmät. Näiden järjestelmien välillä voidaan siirtyä helposti. [4, s. 24–30]

Satelliittipaikannuksessa on myös muita virhelähteitä. Nämä virheet vaikuttavat yleensä jo pseudoetäisyyksien mittaamisvaiheessa, jolloin myös kaavan (2) ratkaisuksi saatu käyttäjän sijainti on jonkin verran virheellinen. Virhelähteitä sijainnin määrittämisessä on muun muassa signaalin monitie-eteneminen, signaalin eteneminen eri väliaineissa ja tavalliselle siviilikäyttäjälle tarjolla olevat rajalliset resurssit [7]. Lisäksi myös hyvin tarkat satelliittien kellot sisältävät pieniä virheitä [4, s. 621–622], jolloin tarkkoja lähetysaikoja ei täysin tiedetä.

2.3 Väärennetty satelliittipaikannussignaali

Satelliittipaikannussignaalit ovat Maan pinnalla hyvin heikkotehoisia johtuen siitä, että ne lähetetään hyvin pitkän matkan päästä ja signaalien energia on PRN-koodin avulla hajautettu hyvin leveälle kaistalle. Tämän vuoksi satelliittipaikannussignaalit ovat myös hyvin herkkiä erilaisille häiriöille, jotka aiheutuvat samalla taajuuskaistalla etenevistä sähkömagneettisista aalloista. Häiriösignaali voi olla peräisin luonnollisista lähteistä tai se voi olla samalla taajuuskaistalla etenevä, joko tahatonta tai tahallista häiriötä aiheuttava radiosignaali. Radiotaajuuksilla tapahtuvasta häiriöstä käytetään yleisesti termiä radio frequency interference (RFI), joka tarkoittaa radiosignaalien häiriötä yleisellä tasolla. Nykyään RFI:n ehkäisy on entistä perustellumpaa, sillä yhä useamman laitteen ja järjestelmän toiminta riippuu osittain tai jopa täysin satelliittipaikannuksen tuomien palveluiden toimivuudesta. [14]

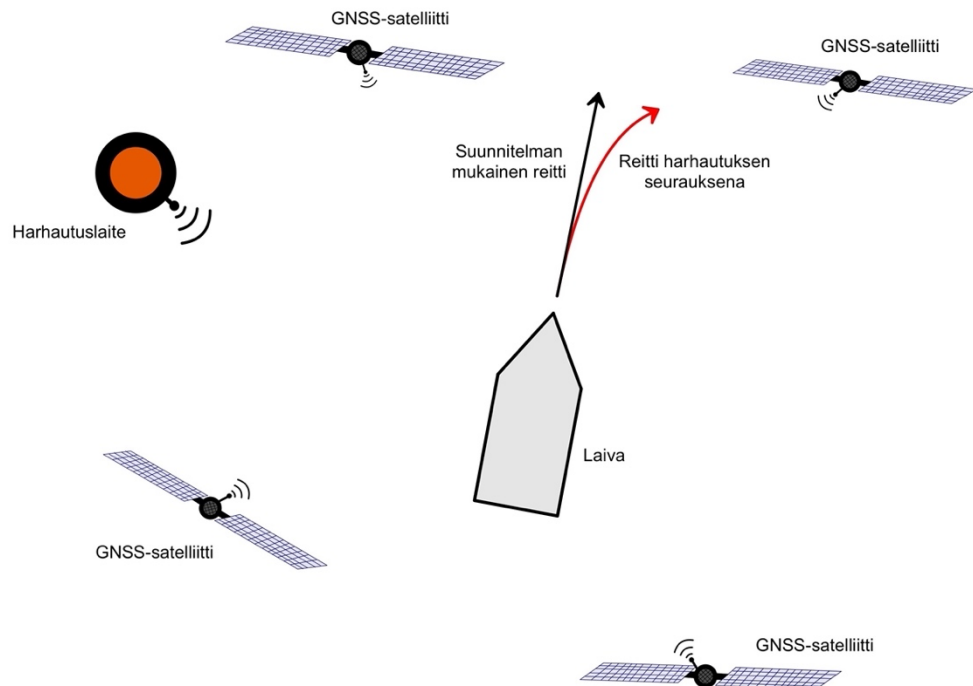
Luonnollisesta lähteestä peräisin oleva RFI johtuu useimmiten ionosfäärin elektronipitoisuudesta. Ionosfäärin läpi etenevä radiosignaali kokee muun muassa viivästystä ja vääristymiä signaalin aaltomuodossa ja vaiheessa. Ionosfäärin lisäksi myös monitie-eteneminen lasketaan luonnolliseksi häiriöksi. Tahaton RFI aiheutuu puolestaan muiden satelliittijärjestelmien lähettämistä signaaleista sekä muiden samoilla taajuusalueilla toimivien järjestelmien radiosignaaleista. [14]

Tahallinen RFI jakautuu myös kahteen eri kategoriaan, joita kuvaillaan englanninkielisillä termeillä jamming ja spoofing. Termi jamming voidaan suomentaa termillä radiohäirintä tai radiohäiritseminen [15] tarkoittaen tässä yhteydessä tahallista häirintää. Spoofing-termistä voidaan puolestaan käyttää suomennosta harhauttaminen [15], kuten myös tässä työssä. Spoofing-signaalista eli satelliittipaikannussignaaleja mukailevista signaaleista käytetään tässä työssä sen sijaan suomennosta väärennetty satelliittipaikannussignaali. Radiohäirinnän ja harhauttamisen välinen ero on hyvä ymmärtää niin tämän työn kannalta kuin myös yleisestikin.

Satelliittipaikannuksessa radiohäirinnällä tarkoitetaan tilannetta, jossa jokin ulkopuolinen taho yrittää häiritä navigointisignaalin vastaanottamista. Tällöin häiritsijän tarkoituksena on lähettää satelliittipaikannussignaalin kanssa samalla kaistalla etenevää signaalia tarpeeksi suurella teholla, jolloin signaalin vastaanottaminen vaikeutuu tai siitä tulee kokonaan mahdotonta. Tämä johtaa siihen, että satelliittipaikannuksen tarkkuus joko heikenee huomattavasti tai satelliittipaikannusta ei voida enää lainkaan käyttää kyseisellä alueella. [14]

Harhauttaminen viittaa tilanteeseen, jossa jokin ulkopuolinen taho lähettää väärennettyä satelliittipaikannussignaalia, joka vastaa informaatioltaan aidon satelliitin lähettämää paikannussignaalia. Tällöin ulkopuolisen tahon lähettämä signaali ikään kuin tekeytyy jokikin satelliitiksi tarkoituksena harhauttaa signaalin vastaanottajaa. Onnistuneessa harhautusyrityksessä vastaanottaja luulee kyseessä olevan oikea satelliitti. [14] Väärennetyn signaalin sisältämä, paikannukseen käytettävä informaatio voi vastata myös usean eri satelliitin paikannussignaalin sisältämää informaatiota yksittäisen satelliittipaikannussignaalin sijasta. Tällöin kyseinen harhautuslaite tekeytyy useammaksi kuin yhdeksi satelliitiksi lähettämällä useasta väärennetyistä signaaleista koostuvaa summasignaalia.

Harhautuksen seurauksena satelliittipaikannusta hyödyntävä laite määrittää sijaintinsa todellisesta sijainnistaan poikkeavaksi. Tällöin kyseinen laite luulee kuitenkin koko ajan olevansa aikomuksenmukaisella reitillään, vaikka todellisuudessa onkin aivan muualla. Kuva 1 toimii havainnollistavana esimerkkinä harhautustilanteesta.



Kuva 1. Esimerkkutilanne satelliittipaikannusta hyödyntävän laivan harhauttamisesta. Kuvassa oleva laiva laskee sijaintinsa neljän GNSS-satelliitin signaalien sekä harhautuslaitteesta peräisin olevan väärennetyn satelliittipaikannussignaalin perusteella. Musta nuoli kuvaa laivan suunnitelman mukaista reittiä, jota kyseinen laiva luulee kulkevansa. Harhautuksen seurauksena laiva kuitenkin kulkee todellisuudessa punaisen nuolen osoittamaa reittiä. Piirretty lähteeseen [16] perustuen.

Yleisestikin RFI:n torjuminen on nykyisin tärkeässä osassa satelliittipaikannuksessa. Tavallisten ihmisten käytössä olevien paikannuspalveluiden lisäksi muun muassa lentokoneiden ja laivojen toiminta on vahvasti satelliittipaikannuksesta riippuvainen [17].

3. RF-SORMENJÄLKI JA SEN HYÖDYNTÄMINEN

Mahdolliset harhautusyritykset vaikeuttavat satelliittipaikannusprosessia, joten olisi hyödyllistä havaita olevansa harhautusyrityksen kohteena. Yksi ratkaisu väärennettyjen satelliittipaikannussignaalien havaitsemiseen on hyödyntää RF-sormenjälkeä. RF-sormenjälki voidaan mieltää tunnisteeksi, joka sisältää tietyn irrotetun piirteen vastaanotetusta signaalista. Lähetinlaitteiden sisäiset rakenteet eroavat jonkin verran toisistaan, jolloin myös eri lähteistä peräisin olevista vastaanotetuista radiosignaaleista erotettujen piirteiden välillä on havaittavissa eroja. Esimerkiksi eri lähetinlaitteiden sisältämät vahvistimet, suotimet, kondensaattorit ja piirilevyn valmistusmateriaalit eroavat hieman toisistaan jopa saman valmistajan yksittäisen tuotesarjan eri laitteiden välillä. Nämä erot ovat havaittavissa myös laitteiden lähettämässä radiosignaaleissa ja täten myös signaaleista saaduissa RF-sormenjäljissä. [18]

Sormenjälki-nimitys toimii tietynlaisena analogiana ihmisten sormenjälkien ja radiosignaaleista saatavien tunnisteiden välillä: Ihmisten sormenjäljet ovat uniikkeja, ja yhdet sormenjäljet voidaan yhdistää vain yhteen ihmiseen. Samoin myös radiosignaaleista saatavat tunnisteet voidaan yhdistää vain yhteen lähetinlaitteeseen. Toisin sanoen jokainen radiosignaalia lähettävä laite voidaan tunnistaa vastaanotinpäässä RF-sormenjäljen avulla [18].

Kokonaisuudessaan radiosignaalin alkuperän tunnistamisprosessissa RF-sormenjäljen avulla on kaksi vaihetta: piirteiden irrottaminen (engl. feature extraction) ja tallentaminen RF-sormenjäljeksi sekä signaalin alkuperän tunnistaminen (engl. identification) RF-sormenjäljen avulla. Tästä kaksivaiheisesta prosessista käytetään nimitystä radio frequency fingerprinting (RFF). [18] Tunnistamisvaiheessa käytetään yleensä apuna luokitinta. Tässä luvussa esitellään ensin, miten vastaanotetun signaalin piirteitä voidaan irrottaa, jonka jälkeen käydään läpi erilaisia luokittimia, joiden avulla väärennetyn satelliittipaikannussignaalin varsinainen havaitseminen tapahtuu.

3.1 Lyhytaikainen Fourier'n muunnos ja muita RF-sormenjälkiä

Signaalin piirteiden irrottamiseen on useita eri tapoja, joista yksi on laskea vastaanotetun datan näytteille lyhytaikainen Fourier'n muunnos, engl. short-time Fourier transform (STFT), kuten C. Xun et al. tutkimuksessa [3] on tehty. STFT saadaan laskemalla joukko diskreettejä Fourier'n muunnoksia, engl. discrete Fourier transform (DFT). Kun $s(n)$ on

näytteistetty signaali, jossa luku n on näytteen indeksi, DFT saadaan laskettua lähteestä [19] muokatun kaavan (3) avulla:

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot e^{-j2\pi kn/N}. \quad (3)$$

Tällöin N on signaalin $s(n)$ sisältämien näytteiden lukumäärä ja $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$. Lopputulos $S(k)$ on täten myös näytteistetty signaali.

Varsinainen STFT signaalille $s(n)$ voidaan laskea lähteestä [20] muokatun kaavan (4) avulla:

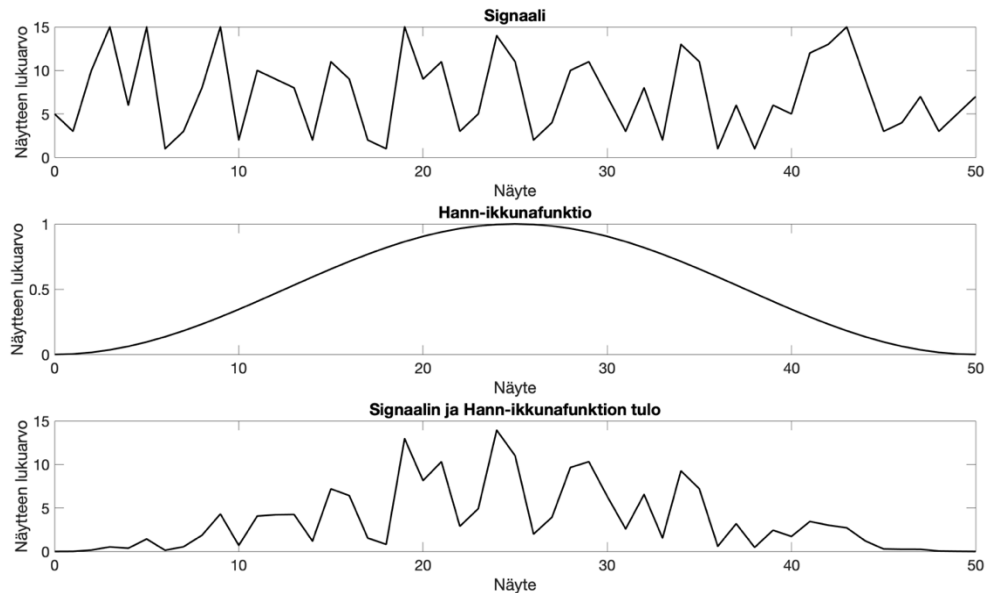
$$S_m(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(n)w(n - mR) \cdot e^{-j2\pi kn/N}. \quad (4)$$

Kaavassa (4) esiintyvä $w(n - mR)$ kuvaa ikkunafunktiota, jonka sijainnin määrittää kokonaisluku m ja yhden siirron suuruutta merkitsevä luku R . Jälleen $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$. Kun lasketaan ikkunafunktion $w(n - mR)$ ja signaalin $s(n)$ tulolle DFT, saadaan tulokseksi S_m eli yksi DFT ikkunoidulle datalle kohdassa mR . Varsinainen STFT saadaan laskettua liu'uttamalla ikkunafunktiota eteenpäin ja laskemalla DFT ikkunoidulle datalle useammassa eri kohdassa. Ikkunafunktion liu'uttaminen voidaan tehdä muuttamalla lukua m , jolloin ikkunafunktio siirtyy luvun R verran näytteissä eteenpäin. Vierekkäiset DFT:t eli S_m ja S_{m+1} voivat myös mennä näytteiden osalta hieman päällekkäin. Tällöin ikkunan pituuden ollessa L näytettä ja ikkunoiden mennessä M näytettä päällekkäin luku R määritetään olevan $R = L - M$. [20] Yhteenvetona STFT tuottaa siis joukon DFT:itä, jotka on laskettu näytteissä eri kohtaan ikkunoidulle datalle.

Ikkunafunktion käyttö on hyvin olennainen osa STFT:tä, ja ikkunafunktion parametrien ja tyyppin vaihtaminen vaikuttaa suoraan laskun lopputulokseen. Ikkunafunktion tärkeimpiä tehtäviä alueen rajaamisen lisäksi on poistaa ylitysvärähtelyn (engl. ringing) aiheuttamia virheitä [20]. Ylitysvärähtely johtuu pääasiassa Gibbs-ilmiöstä [21]. Ikkunafunktio poistaa ylitysvärähtelyä vaimentamalla näytteiden voimakkuutta funktion määräämän alueen reunakohdista [22, s. 146]. Vaimennuksen voimakkuus ikkunafunktion reunakohdissa riippuu siitä, mitä ikkunafunktiota käytetään. Esimerkiksi Hann-ikkunafunktio määritetään lähteestä [23] muokatun kaavan (5) avulla

$$w(n) = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi n}{L}\right) \right], \quad |n| \leq L/2, \quad (5)$$

jossa L on ikkunan pituus. Kun $|n| > L/2$, ikkunafunktion arvo on nolla. Hann-ikkunafunktion lisäksi muita mahdollisia ikkunafunktioita ovat esimerkiksi Hamming- ja Blackman-ikkunafunktiot [22, s. 149–150]. Ikkunafunktion käyttöä on hahmotettu Hann-ikkunafunktion avulla kuvassa 2.



Kuva 2. Ikkunafunktion käyttäminen. Signaalin 50 ensimmäistä näytettä ikkunoidaan 50 näytteen mittaisella Hann-ikkunafunktiolla, jolloin lopputuloksena on signaalin näytteiden ja ikkunafunktion tulo. Vastaavanlainen operaatio toimii myös muilla ikkunafunktioilla. Kuvan esimerkksignaali on todellisuudessa vain joukko satunnaisia kokonaislukuja, eikä näin ollen sisällä varsinaisesti mitään informaatiota.

Fourier'n muunnos tarjoaa pääasiassa tavan tarkastella signaalin taajuuksia. Kuitenkin ajan sisältämä informaatio usein katoaa, koska Fourier'n muunnos toimii pääasiassa stationaarisille signaaleille. [24] STFT:n tapauksessa tätä yritetään kompensoida laskeamalla DFT ajallisesti lyhyelle osuudelle signaalista ikkunafunktion avulla, jolloin signaalista saadaan myös hieman ajallista informaatiota esille. Usein parempana pidetty vaihtoehto STFT:lle on continuous wavelet transform (CWT). CWT esittää suoran signaalin sisältämän taajuusinformaation ajan funktiona [24], jolloin se soveltuisi hyvin STFT:n korvaavaksi menetelmäksi. Myös CWT:tä voisi käyttää piirteiden irrottamisessa.

STFT:n ja CWT:n lisäksi muita tapoja piirteiden erottamiseen on esimerkiksi Wigner bispektri (engl. Wigner bispectrum) [2] ja I/Q-symbolien offset [25]. Eri piirteidenirrottamistapoja on vielä paljon enemmän. Tässä on kuitenkin vain pieni pintaraapaisu eri mahdollisuuksista.

3.2 Erilaisia luokittimia

Varsinainen hyöty RF-sormenjäljistä saadaan silloin, kun väärennetty satelliittipaikannussignaali voidaan niiden avulla tunnistaa. Tätä varten täytyy taltioida useita RF-sormenjälkiä samaa piirteenerrotusmenetelmää hyödyntäen, jonka jälkeen varsinainen väärennetyn signaalin tunnistaminen saadaan aikaan luokittimen avulla. Suotuisassa tilanteessa opetettu luokitinmalli pystyy luokittelemaan sille annetut tuntemattomat näytteet oikein hyvällä tarkkuudella, jolloin kyseistä mallia voitaisiin käyttää signaalin alkuperän tunnistamiseen sekä väärennetyn satelliittipaikannussignaalin havaitsemiseen.

Usein käytetty menetelmä datan luokittelussa on ohjattu oppiminen, engl. supervised learning. Ohjatun oppimisen perusidea on se, että luokitin opetetaan opetusjoukon avulla, jonka jälkeen testijoukon avulla selvitetään, kuinka hyvin opetettu luokitinmalli pystyy luokittelemaan sille annetut tuntemattomat näytteet oikein. Opetusjoukko koostuu joukosta näytteitä ja jokaista näytettä vastaa jokin luokka. Opetusvaiheessa luokittimelle paljastetaan, mihin luokkiin kukin näyte kuuluu, jolloin lopputuloksena on opetettu malli. Testijoukko on vain joukko näytteitä, ja luokittimen tehtävänä on tunnistaa mihin luokkaan kukin näyte kuuluu. [26, s. 85]

Näytteet esitetään yleensä vektoreina ja ne muodostavat yhdessä datajoukon kaavan (6) mukaisesti

$$X = \begin{pmatrix} x_1^{(1)} & \cdots & x_1^{(p)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n^{(1)} & \cdots & x_n^{(p)} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

jossa näytevektorit ovat p -ulotteisia rivivektoreita ja niitä on yhteensä n kappaletta. Merkinnällä x_k tarkoitetaan tällöin rivin k näytevektoria ja merkinnällä $x^{(i)}$ näytevektoreiden i :tä komponenttia, jolloin $k = 1, 2, 3, \dots, n$ ja $i = 1, 2, 3, \dots, p$. Vastaavasti myös merkintä $x_k^{(i)}$ tarkoittaisi datajoukon vektorin k komponenttia i . [26, s. 9] Yksittäinen näytevektori x_k on siis eri komponenteista $x_k^{(i)}$ rakentuva vektori, jossa jokainen komponentti antaa jotain hyödyllistä lisäinformaatiota näytteestä. Esimerkiksi luokiteltaessa liikennemerkkejä voisi näytevektoreiden komponentteja olla muun muassa muoto, värit ja koko.

Jokaista näytevektoria x_k vastaa myös jokin luokka y_k . Luokkia voi olla tilanteesta riippuen joko kaksi tai enemmän. [26, s. 85–86] Esimerkiksi liikennemerkkejä luokiteltaessa eri luokkia voisi olla muun muassa rajoitusmerkki, kieltomerkki, opastusmerkki ja sääntömerkki.

Kuten RF-sormenjälkien kohdalla, myös erilaisia luokittimia on useita. Yksi tällainen on esimerkiksi lineaarinen erottelija, joka tunnetaan myös nimellä lineaarinen diskriminantti,

engl. linear discriminant analysis (LDA). LDA:n toiminta perustuu kahden luokan väliin piirrettävään päätöspintaan, joka sijaitsee luokkien massakeskipisteiden puolivälissä. Tällöin luokat sijaitsevat mahdollisimman kaukana toisistaan. Päätöspinta voi olla kaksiulotteiselle datalle suora, kolmiulotteiselle datalle taso tai suuremmalle kuin kolmiulotteiselle datalle hypertaso (engl. hyperplane). Päätöspinnan määrittämisessä käytetään alla olevaa kaavaa (7)

$$w \cdot x^T + b = 0, \quad w \in \mathbb{R}^p, \quad b \in \mathbb{R}, \quad (7)$$

jossa x^T on transpoosi näytevektorista x . Luokan 1 massakeskipisteen ollessa μ_1 ja luokan 2 massakeskipisteen ollessa μ_2 määritellään reaalityyppinen luku $b = -w \cdot (\mu_1^T + \mu_2^T)/2$. Kun dimensio $p = 2$, niin on vektori $w = \mu_1 - \mu_2$ on vektori, jolle projisoituna kahden luokan välinen varianssi suhteessa luokkien sisäiseen varianssiin maksimoituu. Eli luokkien sisäisen varianssin ollessa v_w ja luokkien välisen varianssin ollessa v_b täytyy suhde maksimoida kaavan (8) avulla seuraavasti:

$$J = \frac{w^T \cdot v_b \cdot w}{w^T \cdot v_w \cdot w}. \quad (8)$$

Dimension ollessa $p = 3$ on w taso, ja dimension ollessa $p > 3$ on w hypertaso, ja vastaavasti myös päätöspinnan tapauksessa. [26, s. 91–93]

LDA on kuitenkin joissain tilanteissa epätarkka johtuen siitä, että luokkien välinen päätöspinta piirretään luokkien massakeskipisteiden puoleenväliin. Tästä voi seurata tilanne, jossa päätöspinnan lähellä sijaitsevista näytteistä selvästi suurempi osa muodostuu ainoastaan toisen luokan näytteistä. Toisin sanoen päätöspinta voi sijaita hieman lähempänä toisen luokan näytteitä, jotka sijaitsevat kauempana luokan massakeskipisteestä. Toisena puutteena on se, että lineaarinen erottelija ei toimi kovinkaan hyvin epälineaaristen luokkarajojen kanssa [26, s. 91–93].

Toinen vaihtoehto luokittelun on käyttää tukivektorikonetta, engl. support vector machine (SVM). SVM:n tapauksessa luokkien välisen päätöspinnan ympärille sovitetaan myös tukivektoreiden avulla marginaali, joka pyritään maksimoimaan. Yhden näytevektorin luokan y_k ollessa joko 1 tai 2 täytyy tukivektorikoneen toteuttaa alla olevat kaavat (9) ja (10):

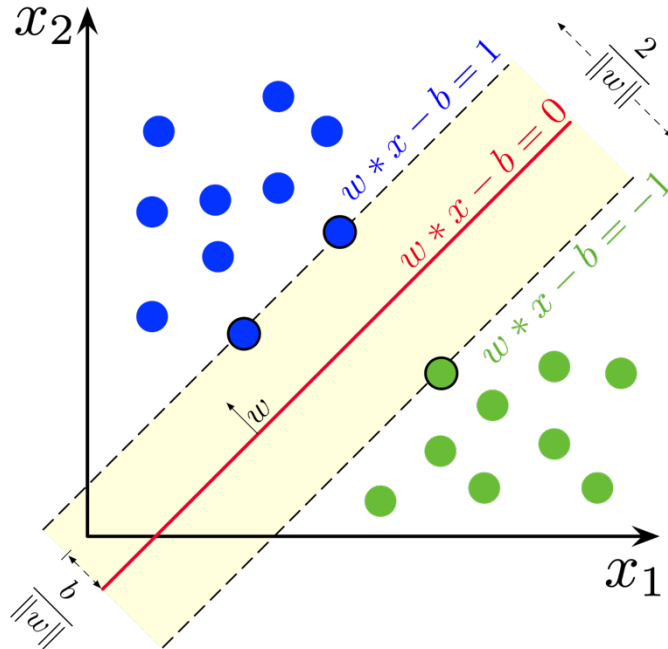
$$w \cdot x_k^T + b \geq +1, \quad \text{jos } y_k = 1, \quad (9)$$

$$w \cdot x_k^T + b \leq -1, \quad \text{jos } y_k = 2. \quad (10)$$

Kaavoille (9) ja (10) voi löytyä useampia eri ratkaisuja, jolloin lopullinen ratkaisu valitaan siten, että kaavan (11) mukainen arvo

$$J = \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (11)$$

saadaan minimoitua. Huonosti separoituville luokille ei välttämättä löydy kaavojen (9) ja (10) mukaisia ratkaisuja, jolloin voidaan antaa osan näytteistä jäädä joko marginaalin sisäpuolelle tai jopa luokan rajaavan päätöspinnan vastakkaiselle puolelle. [26, s. 93–95] SVM:n toimintaa havainnollistaa kuva 3.



Kuva 3. Tukivektorikoneen rajapinta ja marginaali piirrettynä kahden luokan väliin (siniset ja vihreät ympyrät), jossa mustalla reunustetut ympyrät esittävät tukivektoreita [27]. Kuvassa näkyvät yhtälöt poikkeavat hieman aiemmin määritellyistä kaavoista (9) ja (10), mutta lopputuloksena saatu päätöspinta on sama.

Kuvan 3 mukaisessa tilanteessa luokkien rajat ovat lineaariset, jolloin myös LDA soveltuisi hyvin luokitteluun näytteet. LDA-luokittimeen verrattuna SVM:n etu on kuitenkin siinä, että se kykenee myös löytämään rajapinnan sellaisille luokille, joiden välinen raja on epälineaarinen. Tähän tarkoitukseen SVM hyödyntää niin kutsuttua kernelitemppua, engl. kernel trick. Kernelitemppun avulla luokiteltava datajoukko kuvataan korkeampidimensioiseen avaruuteen, jolloin luokkien välinen raja voidaan esittää lineaarisen rajapinnan avulla. Tärkeänä huomiona on nimenomaan se, että datajoukkoa ei itsessään siirretä korkeampaan dimensioon. Olkoon X alkuperäinen datajoukko ja X' datajoukosta X laskettu korkeampidimensioinen versio. Kernelitemppu vastaa tällöin tilannetta, jossa datajoukon X' sisältämät skalaaritulot korvataan kernelifunktiolla datajoukossa X . [26, s. 93–95] Toisin sanoen datajoukko X kuvataan korkeampidimensioiseen avaruuteen kernelifunktion avulla.

LDA ja SVM luokittelevat datan pääasiassa vain kahden luokan välillä. Niitä voidaan kuitenkin käyttää myös useamman luokan yhteydessä. Tällöin luokittelu tapahtuu etsimällä

jokaisen kahden luokan välinen rajapinta erikseen tai käyttämällä useampaa luokittelijaa. [26, s. 92][28]

SVM:n huono puoli on, että korkeaan dimensioon kuvatus datajoukon luokittelu voi olla prosessoinniltaan hyvinkin raskasta [26, s. 93–95]. Ennen kuin SVM-luokittelu käytetään luokitteluun, voidaan luokiteltavan datajoukon näytevektoreiden dimensiota p redusoida hyödyntämällä esimerkiksi pääkomponenttianalyysiä, engl. principal component analysis (PCA), kuten C. Xun et al. tutkimuksessa [3]. PCA:n ideana on redusoida datajoukon dimensiota poistamalla näytevektoreiden komponentteja, mutta samalla säilyttäen mahdollisimman suuri osa datajoukon varianssista [26, s. 37–41]. Lopputuloksena PCA jättää jäljelle näytevektoreiden pääkomponentit, jotka sisältävät suurimman osan alkuperäisen joukon varianssista. PCA on siitä hyödyllinen työkalu, että se lyhentää luokitteluun kuluva prosessointiaikaa. [3]

LDA:n ja SVM:n lisäksi on olemassa myös paljon muita käytössä olevia luokittimia, joita ovat esimerkiksi lähimmän naapurin luokitin ja päätöspuu, jotka ovat käytössä myös C. Xun et al. tutkimuksessa [3]. Lähimmän naapurin luokitin perustaa luokittelupäätöksensä sen näytteen mukaan, joka on mahdollisimman samanlainen [26, s. 95–96]. Päätöspuu järjestää näytevektoreiden sisältämät komponentit hierarkkiseen rakenteeseen, jonka avulla luokittelupäätös tehdään [26, s. 97–100].

4. DATAN KERÄÄMINEN JA SIGNAALIN ALKUPERÄN TUNNISTAMINEN

Tavoitteena on tutkia, voiko RF-sormenjäljen avulla todellisuudessa havaita, että vastaanotettujen signaalien joukossa on myös väärennettyjä satelliittipaikannussignaaleja. Datana keräämisessä on käytössä kolme eri mittausjärjestelyä:

1. Aitojen GNSS-signaalien vastaanottaminen L1-kaistalta.
2. Aitojen GNSS-signaalien ja yhden väärennetyn GPS-signaalin muodostaman summasignaalin vastaanottaminen L1-kaistalta.
3. Kahdeksan väärennetyn GPS-signaalin vastaanottaminen L1-kaistalta.

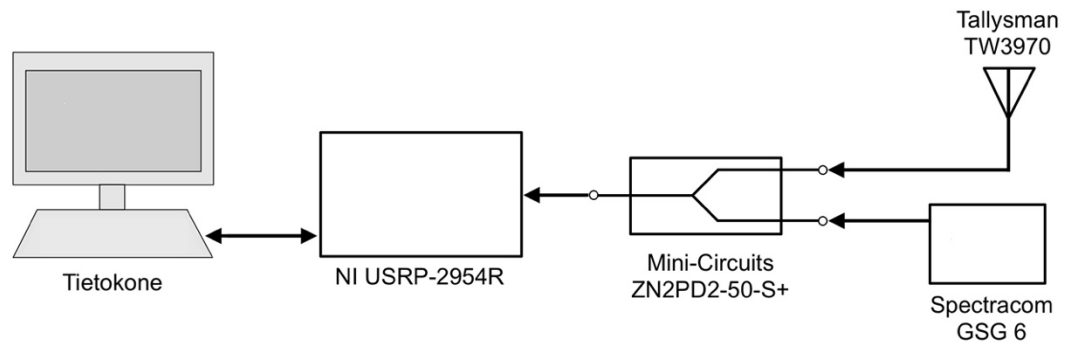
L1-kaistalla viitataan tässä tapauksessa GPS:n L1-kaistaan, jonka kantoaallon keskitajuus on sama Galileon E1-kaistan ja BeiDoun B1C-kaistan kanssa. Näiden lisäksi myös osa GLONASS:n käyttämän L1-kaistan signaaleista sisältyy kerättyyn dataan. IRNSS- ja QZSS-järjestelmien signaalit ovat alueellisia ja niiden kuuluvuus on Suomen alueella huono. Tämän vuoksi mittausjärjestelyissä keskitytään GNSS-signaaleihin.

Datankeruuvaiheessa 1. ja 3. mittausjärjestelyn mukaisten signaalien informaatio sisältö halutaan GPS-satelliittien osalta täsmävän toistensa kanssa. Tämä tarkoittaa sitä, että signaaleista saatavat informaatiot esimerkiksi ajan ja eri GPS-satelliittien karkeiden sijaintien osalta vastaavat toisiaan. Tällöin voidaan paremmin korostaa lähettimien sisäisten rakenteiden ja kanavan aiheuttamia eroja. Datankeruuvaiheen 2. mittausjärjestelyn mukainen tilanne vastaa harhautustilannetta.

Kun kolmen eri mittausjärjestelyn mukainen data saadaan kerättyä, data käsitellään ja suoritetaan RFF. Tallennettujen RF-sormenjälkien tunnistamisessa hyödynnetään luokitinta. Tässä luvussa esitellään datan kerääminen ja käsittely sekä RF-sormenjäljen luokittelu tämän työn osalta tarkemmin.

4.1 Käytetty laitteisto ja ohjelmisto

Radiosignaalien datan keräämisessä käytetään usein Universal Software Radio Peripheral (USRP) -laitetta. Tässä työssä L1-kaistan signaalit vastaanotetaan NI USRP-2954R-laitteella. Laitteeseen kytketään mittausjärjestelystä riippuen joko mittauslaboratorion ulkopuolella sijaitseva Tallysman TW3970 -antenni, väärennettyjä satelliittipaikannussignaaleja generoiva Spectracom GSG-6 -harhautuslaite tai molemmat samanaikaisesti Mini-Circuits ZN2PD2-50-S+ -haaroittimen avulla. Mittausjärjestelyä on havainnollistettu alla olevassa kuvassa 4.



Kuva 4. *Datankeruvaiheen mittausjärjestelyt. Tilanteesta riippuen haaroittimeen liitetään pelkästään antenni tai harhautuslaite tai molemmat samanaikaisesti.*

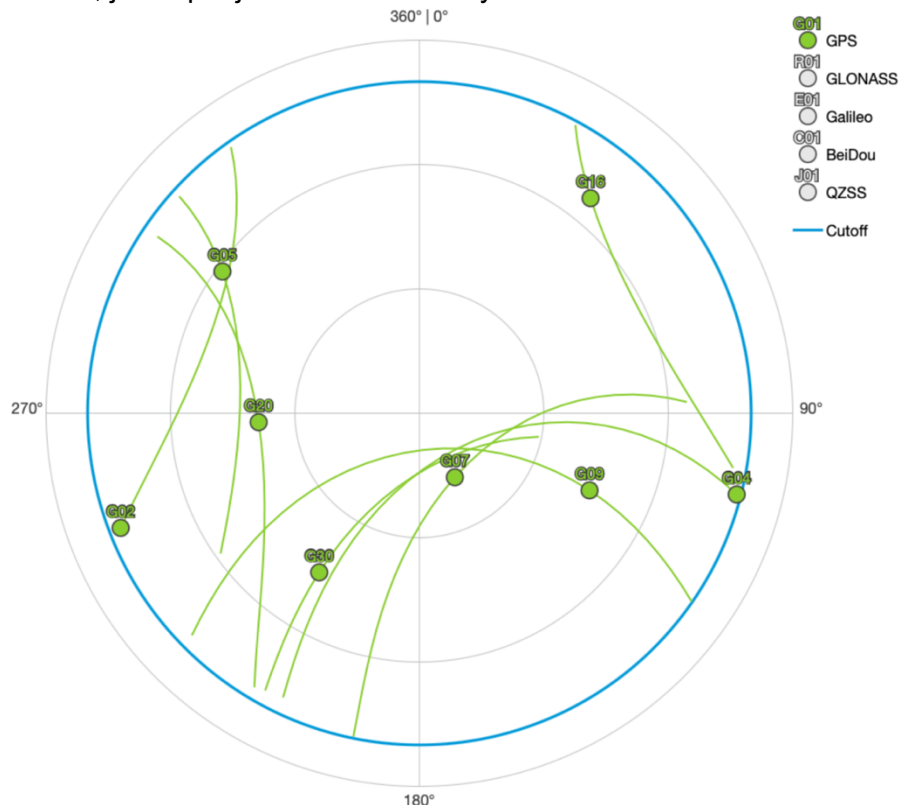
Datankeruuta varten USRP-laitetta ohjataan valmiilla NI LabVIEW -ohjelmalla, joka tallentaa vastaanotetun datan tiedostoon. Mittaamisen jälkeen valmiilla Matlab-ohjelmakoodilla tarkastetaan, että kerätystä datasta saadaan varmasti eroteltua kyseisellä ajanhetkellä taivaalla näkyvät GPS-satelliittien signaalit ja tilanteen mukaisesti myös väärennetyt GPS-signaalit.

Väärennettyjä GPS-signaaleja generoivaa Spectracom GSG-6 -laitetta ohjataan GSG StudioView -ohjelmistolla, johon syötetään halutun sijainnin koordinaatit ja korkeus sekä jokin haluttu ajanhetki. Spectracom-laite generoi halutulla ajanhetkellä ja halutussa sijainnissa taivaalla näkyvien GPS-satelliittien signaalit muodostaen kokonaisuudessaan yhden signaalin, jota lähetetään laitteen yhdestä ulostulosta. Tilanteesta riippuen laite generoi siis joko yhden väärennetyn GPS-signaalin tai kahdeksan väärennetyn GPS-signaalin muodostaman summasignaalin. Kyseisen summasignaalin informaationsältö vastaa täysin kahdeksasta GPS-satelliiteista vastaanotetun datan informaatiota sillä ajanhetkellä ja siinä sijainnissa, jotka laitteen parametreiksi on annettu. Ainoana erona GPS-satelliitista vastaanotettuun signaaliin on se, että Spectracom GSG-6 -laitteesta peräisin oleva signaali kulkee koaksiaalikaapelia pitkin ja GPS-satelliiteista peräisin olevat signaalit kulkevat radioteitse. Tällöin esimerkiksi vastaanotetun signaalin signaali-kohina-suhde on eri.

Väärennettyjä signaaleja generoidessa täytyy tietää, minkä satelliitin signaali halutaan milloinkin generoida. Kun vastaanotetaan 2. mittausjärjestelyn mukaisia signaaleja, valitaan generoitavaksi signaaliksi jokin taivaalla näkymättömän satelliitin signaali. Vastavasti 3. mittausjärjestelyn mukaisessa tilanteessa signaalin sisältämä paikantamiseen käytettävä informaatio halutaan GPS-satelliittien osalta täsmäävän 1. mittausjärjestelyn yhteydessä kerätyn datan informaation kanssa. Tähän tarkoitukseen käytetään tässä työssä apuna GNSS Planning Online -sivustoa [29], jolta näkee muun muassa eri satel-

liittien sijainnit taivaalla jossain halutussa sijainnissa ja jollain halutulla ajanhetkellä. Sivusto piirtää halutun ajanhetken ja sijainnin mukaiset taivaalla näkyvät satelliitit sekä niiden lentoradat kuvan 5 mukaisesti.

Kuva 5 on niin sanottu skyplot-kuva, joka näyttää sen hetkiset taivaalla näkyvät satelliitit halutussa sijainnissa. Kuvassa havainnoitsija on aivan kuvan keskellä vaaka- ja pystysuoran akselin risteymäkohdassa. Suurimman ympyrän ulkopuolella olevat astemerkinnot ilmaisevat atsimuuttikulman (engl. azimuth angle) ja pienemmät ympyrät korkeuskulman (engl. elevation angle). Atsimuuttikulman kohdissa 0° ja 360° sijaitsee pohjoinen, kohdassa 90° itä, kohdassa 180° etelä ja kohdassa 270° länsi. Suurin ympyröistä ilmaisee horisontin, jolloin korkeuskulman arvo on 0° . Toiseksi pienimmän ympyrän kohdalla korkeuskulman arvo on 30° ja pienimmän ympyrän kohdalla 60° . Ympyröiden keskikohta on havainnoitsijan yläpuolella kohtisuorassa ja korkeuskulman arvo on kyseisessä pisteessä 90° . Kuva näyttää satelliitit ja niiden lentoradat sinisellä merkityn ympyrän sisäpuolella. Tämä ympyrä piiryy parametreiksi annetun rajakulman (engl. cutoff angle) perusteella, jolloin sinisen ympyrän sisäpuolella korkeuskulman arvo on rajakulmaa suurempi. Kuva voidaan tietyllä tapaa ajatella olevan kohtisuoraan havainnoitsijan yläpuolelta otettu kuva, jossa pohjoinen on kuvassa ylhäällä.



Kuva 5. GNSS Planning Online -sivuston [29] piirtämä kuva taivaalla näkyvistä satelliiteista. Kuvassa näkyvät pienet vihreät ympyrät ovat GPS-satelliitteja ja vihreällä piirretyt viivat ovat satelliittien lentoradat. G-etuliitteen jälkeinen luku kertoo, mitä GPS-satelliittia kyseinen ympyrä edustaa.

Mittausdataa täytyy keräämisvaiheen jälkeen vielä käsitellä, jonka jälkeen käsitelty mitausdata vielä luokitellaan. Molempiin edellä mainittuihin vaiheisiin käytetään tässä työssä Matlab-ohjelmistoa.

4.2 Datan keräämisen vaiheet

Ensimmäisenä kerätään 1. mittausjärjestelyn mukainen data. Tämä tapahtuu melko suoraviivaisesti kytkemällä USRP-laitteen sisäänmenoon mittauslaboratorion ulkopuolella sijaitseva antenni koaksiaalikaapelin välityksellä. Tämän jälkeen L1-kaistalta vastaanotetaan 25 MHz:n kaistanleveydellä yhteensä noin 80 s:n mittainen osuus dataa. Sitten tarkastetaan, että kerätty data todella sisältää dataa niistä satelliiteista, joiden pitäisi näkyä kyseisellä ajanhetkellä taivaalla.

Seuraavaksi kerätään 2. mittausjärjestelyn mukainen data. Tällöin USRP-laitteeseen kytketään kuvan 4 mukaisesti sekä mittauslaboratorion ulkopuolella sijaitseva antenni että harhautuslaite. Koska 2. mittausjärjestelyn mukaisiin signaaleihin sisältyy myös yksi väärennetty GPS-signaali, täytyy kyseinen signaali ensin generoida Spectracom GSG-6 -laitteella. Tällöin väärennetyn GPS-signaalin tulee esittää sellaista satelliittia, joka ei näy kyseisellä ajanhetkellä taivaalla. Tällä tavalla varmistutaan siitä, ettei väärennettyä signaalia vastaanavan satelliitin signaalia pystytä samanaikaisesti vastaanottamaan. Mikäli taivaalla näkyisi GPS-satelliitit G4, G8, G15, G16 ja G23, voisi väärennetty signaali esittää satelliittia G24, koska satelliitista G24 lähetettyä signaalia ei pystyttäisi kyseisellä ajanhetkellä vastaanottamaan. G-etumerkintä ilmaisee kyseessä olevan GPS-satelliitti, ja etumerkinnän perässä oleva luku kertoo, mihin GPS-satelliittiin viitataan. Dataa kerätään jälleen 25 MHz levyiseltä kaistalta yhteensä 80 s:n mittainen osuus. Lopuksi tarkastetaan, että vastaanotetusta datasta saadaan eriteltyä väärennetty signaali sekä taivaalla näkyvien GPS-satelliittien signaalit.

Viimeisenä kerätään 3. mittausjärjestelyn mukainen data. Itse datankeruuprosessi on samankaltainen edeltävien mittausjärjestelyiden kanssa. Ensin generoidaan 8 väärennetyn GPS-signaalin summasignaali. Tämä signaali lähetetään koaksiaalikaapelin välityksellä USRP-laitteelle ja data kerätään talteen. Kahdeksan väärennettyä GPS-signaalia generoidaan siten, että sijainti vastaisi mahdollisimman hyvin mittauslaboratorion todellista sijaintia. Myös väärennetyn signaalin ajanhetken tulee vastata ajanhetkeä, jolloin 1. mittausjärjestelyn mukainen datankeruu suoritetaan. Tällä tavalla 1. mittausjärjestelyn aikana kerättyjen aitojen GPS-signaalien sisältämä data ja väärennettyjen GPS-signaalien data täsmäävät toistensa kanssa mahdollisimman hyvin. GSG StudioView -ohjelmisto piirtää myös kuvan 5 kaltaisen kuvan, josta nähdään, mitkä satelliitit ovat taivaalla

näkyvissä kyseisessä sijainnissa ja kyseisellä ajanhetkellä. GSG StudioView -ohjelmiston piirtämää kuvaa ja GNSS Planning Online -sivuston piirtämää kuvaa vertailemalla saadaankin vielä varmistettua, että ollaan oikeasti generoimassa aikomuksen mukaiset väärennetyt signaalit. Tässäkin tapauksessa kerätään yhteensä 80 s:n mittainen ajanjakso 25 MHz taajuuskaistalla, ja lopuksi tarkastetaan, että talteen kerätystä datasta saadaan eroteltua oikeiden satelliittien mukaiset väärennetyt signaalit.

Väärennetyjä signaaleja generoidaan ajallisesti sen verran pitkä osuus, että signaali saadaan vastaanotettua kohtalaisen helposti. Sekä 2. mittausjärjestelyssä että 3. mittausjärjestelyssä väärennetyä signaalia generoidaan yhteensä tunnin mittainen osuus. Tällöin 80 s:n mittainen osuus saadaan kerättyä USRP-laitteella talteen kohtalaisen helposti. Jotta väärennetyn signaalin vastaanotto olisi mahdollisimman lähellä aitojen GNSS-signaalien vastaanottoa, lähetetään signaalit -105 dBm:n teholla Spectracom -laitteelta USRP-laitteelle.

4.3 Datan käsittely ja RF-sormenjälkien luokittelu

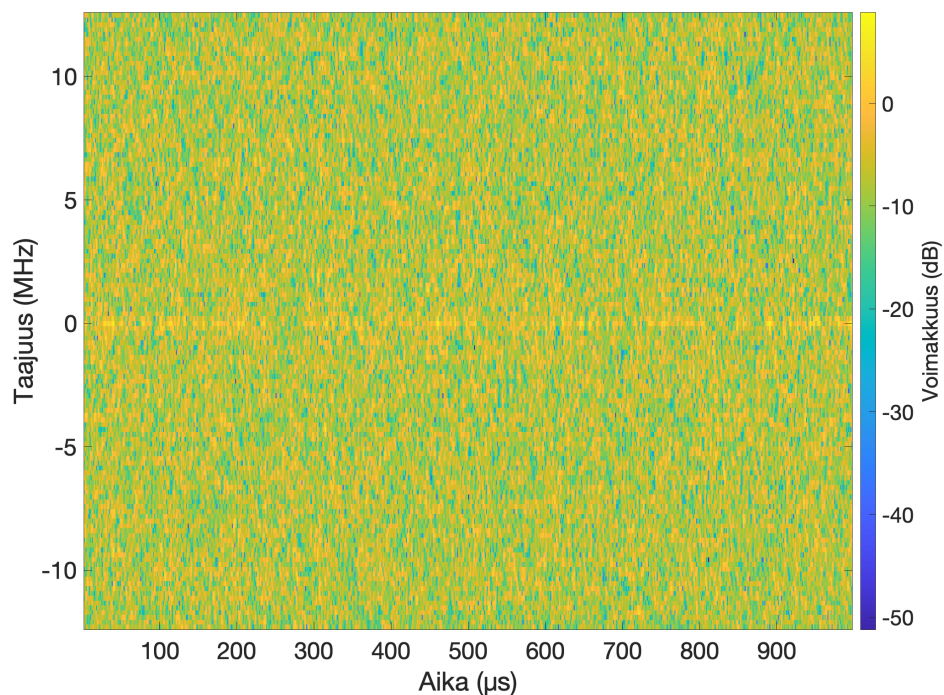
Varmistuttaessa siitä, että talteen kerätty data todella sisältää informaatiota, jota voitaisiin käyttää myös satelliittipaikannuksessa, voidaan siirtyä mittausdatan käsittelemiseen ja luokitteluun. Luokittelua varten jaetaan kolme luokkaa, jotka vastaavat aiemmin esillä olleita mittausjärjestelyitä. Tällöin luokiksi muodostuu seuraavat kolme luokkaa:

1. Aidot GNSS-signaalit L1 kaistalla.
2. Aitojen GNSS-signaalien ja yhden väärennetyn GPS-signaalin muodostama summasignaali L1-kaistalla.
3. Kahdeksan väärennetyä GPS-signaalia L1 kaistalla.

Datan keräämisen jälkeen tallessa on kolme 80 s:n mittaista dataosuutta, jotka saadaan kolmen eri mittausjärjestelyn mukaisella tavalla. Luokkien muodostusta varten dataosuuksien keskikohdista leikataan yhteensä 1 s:n mittainen osuus, jolloin lopputuloksena on yhteensä kolme 1 s:n mittaista dataosuutta. Nämä jaetaan vielä tuhanteen 1 ms:n mittaiseen osuuteen, jolloin 1 ms:n mittaisia osuuksia on yhteensä 3 000 kappaletta. Pituuksi valitaan 1 ms, koska tässä ajassa GPS-signaalin C/A-koodi ehtii toistua L1-kaistalla yhden kerran. Tällöin signaalin sisältämä, huomattavasti pitempikestoinen navigointiviesti ei pääse dominoimaan näytteiden välillä. Vain 1 s:n mittaisen osuuden käyttäminen on tässä työssä perusteltu sillä, että luokittelu on hyvin raskas prosessi ja käytössä olevan tietokoneen prosessointiteho on pieni. Pidemmän osuuden käyttö täten pidentäisi prosessointiaikaa ja veisi samalla hyvin paljon kiinteää muistia tietokoneesta.

Jotta 3. mittausjärjestelyn mukaiset dataosuudet vaikuttaisivat todenmukaisemmilta, lisätään mitatun signaalin päälle vielä keinotekoisia kohinaa. Tällöin vaikuttaisi enemmän siltä, että vastaanotetut 8 väärennetyä GPS-signaalia etenisivät radioteitse vastaanottiin sen sijaan, että kanavana olisi koaksiaalikaapeli, kuten todellisuudessa on. Kohinaa lisätään sen verran, että signaalin kantoaalto-kohinasuhde on mahdollisimman lähellä aitojen GNSS-signaalien kantoaalto-kohinasuhdetta.

Vastaanotetun datan 1 ms:n mittaiset osuudet koostuvat kompleksiarvoisista näytteistä, jotka kuvaavat vastaanotettua signaalia. Näille luvuille lasketaan kaavan (4) mukaisesti STFT, jonka jälkeen lasketaan saatujen kompleksiarvojen teho ja muunnetaan arvot desibeleiksi. Tällä tavalla jokaisesta 1 ms:n mittaisesta osuudesta saadaan halutut piirteet irrotettua ja taltioitua RF-sormenjälki. Kuvassa 6 on nähtävissä yhden RF-sormenjäljen sisällöstä piirretty kuvaaja. STFT:n ikkunafunktiona käytetään kaavan (5) mukaista Hann-ikkunafunktiota pituudeltaan $L = 128$ näytettä, ja näytteet menevät $M = 96$ näytettä päällekkäin. Tällöin kaavan (4) mukainen yhden siirron pituus on $R = 32$ näytettä.



Kuva 6. Kuvaaja yhdestä RF-sormenjäljestä, joka saadaan laskemalla STFT kerätyn datan näytteiden yli. Ikkunafunktiona käytössä on 128 näytteen mittainen Hann-ikkunafunktio.

STFT:n avulla saadut RF-sormenjäljet jaetaan aiemmin mainittuun kolmeen luokkaan, jolloin jokainen luokka muodostuu 1000 RF-sormenjäljen kokoisesta datajoukosta. Yksi näyte saadaan muodostamalla yhden RF-sormenjäljen sisältämistä lukuarvoista näytevektori. Näytteet jaetaan 300 näytteen kokoiseen opetusjoukkoon ja 120 näytteen kokoiseen testijoukkoon. Taulukossa 2 on eritelty opetus- ja testijoukon muodostus luokkien sisältämistä näytteistä hieman tarkemmin. Sekä opetus- että testijoukko normalisoidaan

parantaen luokittelun tarkkuutta. Lopuksi varmistetaan vielä, ettei samoja näytteitä löydy opetus- ja testijoukosta.

Taulukko 2. *Luokittelussa käytettyjen näytteiden lukumäärä kokonaisuudessaan, opetusjoukossa ja testijoukossa. Yksi näyte sisältää yhden RF-sormenjäljen lukuarvoista muodostetun näytevektorin.*

	Näytteiden kokonaislukumäärä	Näytteiden lukumäärä opetusjoukossa	Näytteiden lukumäärä testijoukossa
Luokka 1	1000	100	40
Luokka 2	1000	100	40
Luokka 3	1000	100	40
Kaikki luokat	3000	300	120

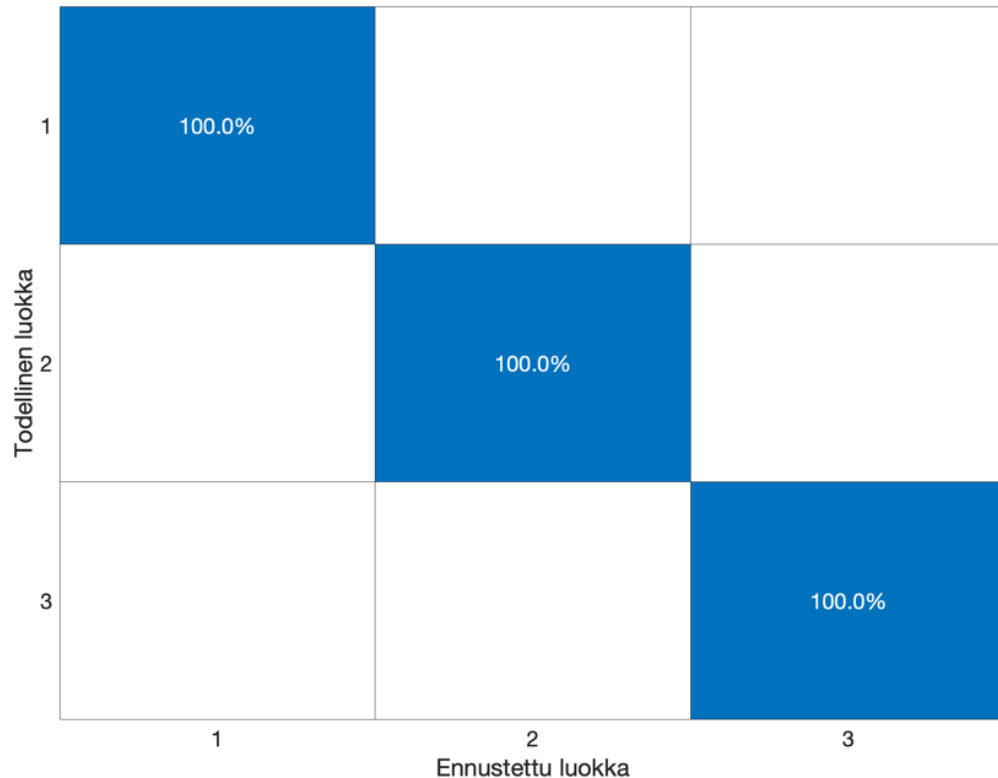
Sekä opetus- että testijoukon sisältämät näytteet valitaan satunnaisesti, ja näytteitä valitaan kaikista 3000 näytteestä taulukon 2 mukainen määrä. Satunnaisuudella saadaan luokittelun kannalta parempi otanta näytteistä, koska ne eivät ole peräkkäisiä. Toisin sanoen ero kahden 1 ms:n mittaisen osuuden välillä on tällöin selkeämpi verrattuna siihen, että näytteet olisivat peräkkäisiä.

Seuraavaksi opetusjoukon näytteille suoritetaan PCA ja testijoukon näytteet siirretään samaan pääkomponenttiavaruuteen opetusjoukon kanssa. Dimensio redusoidaan tämän työn osalta 20:een, jolloin luokittelun prosessointiaikaa saadaan lyhennettyä huomattavasti. Yhden näytteen dimensio ennen PCA:ta on 99 584 eli dimensio pienenee hyvin paljon, lähes 5 000-kertaisesti alkuperäisestä.

Lopuksi SVM-luokitin opetetaan opetusjoukolla, jonka jälkeen testataan, kuinka hyvin opetettu malli kykenee luokittelemaan testijoukon 120 näytettä. Jotta saataisiin parempi lopputulos, luokittelu suoritetaan yhteensä 20 kertaa muodostaen opetus- ja testijoukko jokaisella kerralla eri näytteistä. Koska SVM toimii pääasiassa vain kahden luokan välillä, luokittelussa käytetään kolmea eri SVM-luokitinta samanaikaisesti.

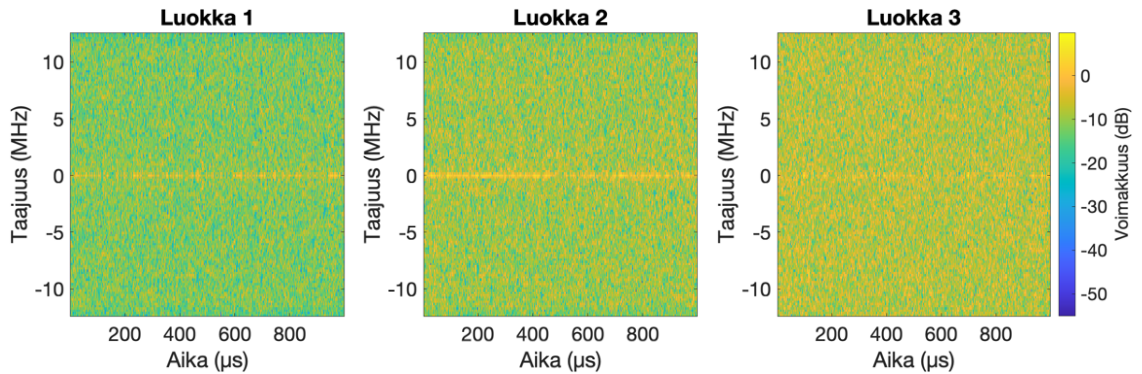
5. TULOSTEN ANALYSOINTI

Opetettu luokitinmalli kykenee luokitsemaan sille annetut testijoukon näytteet 100 %:n tarkkuudella. Luokittelun tulosta voi tarkastella myös alla olevasta kuvasta 7, jossa tulos on koottuna yhteen matriisiin. Täydellinen luokittelutarkkuus herättää kysymyksiä, joihin tässä luvussa pyritään vastaamaan.



Kuva 7. Opetetun SVM-luokitinmallin tarkkuus 20 luokittelukerran jälkeen. Luokka 1: Aidot GNSS-signaalit L1 kaistalla. Luokka 2: Aitojen GNSS-signaalien ja yhden väärennetyn GPS-signaalin muodostama summasignaali L1-kaistalla. Luokka 3: Kahdeksan väärennettyä GPS-signaalia L1 kaistalla.

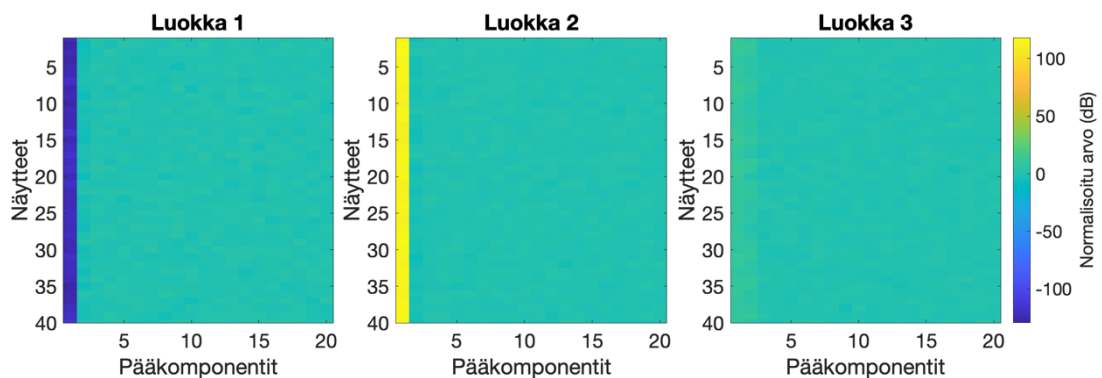
Täydellisen luokittelutarkkuuden syitä voidaan lähteä tarkastelemaan eri luokkien RF-sormenjäljistä piirrettyjen kuvaajien avulla. Mikäli erot ovat selkeästi silmin havaittavissa, on myös korkea luokittelutarkkuus helppo hyväksyä. Alla olevassa kuvassa 8 on havainnollistettu luokkien välisiä eroja pelkkien RF-sormenjälkien osalta ennen PCA:ta.



Kuva 8. Ero eri luokkien sisältämien RF-sormenjälkien välillä. Kuvassa on piirrettynä jokaisen luokan yhdestä satunnaisesta 1 ms:n mittaisesta osuudesta laskettu STFT.

Kuvan 8 avulla voidaan havaita, että eri luokkien näytteistä piirrettyjen RF-sormenjälkien välillä on selkeä ero. Keskitäajuudella 0 Hz näkyvän kantaallon ympärillä oleva kohina on jokaisen luokan näytteessä erisuuruinen. Kuvassa 8 on kuitenkin vain yksi RF-sormenjälki kunkin luokan 1 ms:n osuuksista, joten siitä ei voida tehdä täysin kokonaisvaltaista analyysia. Voi olla, että joillain suorituskerroilla luokkien välinen ero RF-sormenjäljissä on pienempi. Näin ollen pelkkien RF-sormenjälkien perusteella ei vielä kannata tehdä lopullisia päätelmiä luokittimen toimivuudesta.

Varsinainen RF-sormenjälkien luokittelu tehdään niistä laskettujen 20 merkittävimmän pääkomponentin perusteella. Tämän vuoksi tarkastellaan myös, miten eri luokkien näytteiden sisältämät pääkomponentit eroavat toisistaan, ja voiko myös niiden välillä nähdä selkeän eron. Kuvassa 9 on piirrettynä PCA:n avulla saadut yhden testijoukon 20 merkittävintä pääkomponenttia, jotka luokitinmalli luokittelee.



Kuva 9. Yhden testijoukon sisältämät 20 merkittävintä pääkomponenttia. 20 pääkomponentista merkittävin sijaitsee aina vaaka-akselin kohdassa 1 ja vähiten merkittävä kohdassa 20.

Kuvassa 9 näkyvien pääkomponenttien avulla näytteet voidaan jakaa oikeisiin luokkiin myös silmämääräisesti melko helposti. Selkeä ero on kuitenkin nähtävillä vain ensimmäisten pääkomponenttien kohdalla. Muut pääkomponentit ovat joka luokan näytteissä

kutakuinkin yhtä suuria eli niiden perusteella luokittelu on ainakin silmämääräisesti hyvin haastavaa. Kuva 9 selittää kuitenkin, miksi luokittelu onnistuu niin hyvin.

Ensimmäisen 20 pääkomponentin osuus näytteiden kokonaisvarianssista on noin 16,4 %, joka on hyvin vähän. Tämän perusteella myös luokittelun tulosta ei voida pitää luotettavana. Pieni osuus kokonaisvarianssista voidaan selittää sillä, että luokittelussa käytettiin hyvin vähän näytteitä. Luotettavampi tulos saataisiin lisäämällä näytteiden määrää sekä opetus- että testijoukossa, jolloin pääkomponenttien osuus kokonaisvarianssista myös hyvin todennäköisesti kasvaisi. Toisaalta myös luokittelussa käytetyn talteen kerätyn signaalin 1 s:n mittaisen osuuden pidentäminen mitä luultavimmin kasvattaisi 20 pääkomponentin sisältämää osuutta kokonaisvarianssista.

Talteen kerätystä 80 s:n mittaisesta datasta käytetään luokittelussa vain 1 s:n mittaista osuutta. Tämä voi johtaa siihen, että sattumalta 80 s:n mittaisesta datasta poimitaan 1 s:n mittainen osuus juuri sellaisesta kohdasta, jossa eri luokkien väliset erot ovat selkeämmin havaittavissa. Mikäli datasta poimittaisiin esimerkiksi 10 s:n mittainen osuus luokitteluun, voisi lopputulos olla erilainen, sillä signaali ehtisi tässä ajassa myös vaihdella enemmän. Vaihtoehtoisesti 1 s:n osuuksien poimiminen jostain eri kohdasta signaaleja voisi johtaa eri lopputulokseen. Myös tästä syystä luokittelun tulos on kyseenalainen.

Mittausjärjestelyistä maininnan arvoista on se, että väärennettyjen satelliittipaikannussignaalien käyttämä kanava on koaksiaalikaapeli. Todellisuudessa vastaavanlaista tilannetta ei edes tapahtuisi. Satelliitit sijaitsevat avaruudessa, joten ne myös lähettävät signaalinsa langattomasti. Eli tilanne, jossa jokin laite vastaanottaisi nimenomaan satelliiteista peräisin olevaa paikannussignaalia koaksiaalikaapelin välityksellä on käytännössä mahdoton. Koaksiaalikaapelin välityksellä satelliittipaikannussignaaleja on oikeastaan mahdollista vastaanottaa vain tämän työn 2. ja 3. mittausjärjestelyn kaltaisessa testitilanteessa.

Mikäli jatkossa tehdään tämän työn kaltainen tutkimus, voitaisiin väärennetty satelliittipaikannussignaali lähettää myös radioteitse, ja vastaanottaa signaalit samalla antennilla jokaisen kolmen mittausjärjestelyn mukaisessa tilanteessa. Tällöin vastaanotinantennin rakenteelliset ominaisuudet sisältyisivät myös väärennettyihin signaaleihin, jolloin aitojen ja väärennettyjen signaalien väliset eroavaisuudet todennäköisesti pienenisivät. Tällainen järjestely on kuitenkin vaikea toteuttaa, koska väärennetyt satelliittipaikannussignaalit täten myös häiritsisivät lähiympäristön muita signaaleja. Tämä muun muassa vaikeuttaisi lähiympäristön laitteiden navigointia, jolloin kyseessä olisi tietyllä tapaa vahingollinen harhautustilanne. Satelliiteista vastaanotetut paikannussignaalit ovat Maan pinnalla

hyvin heikkotehoisia eli radioteitse lähetetyt väärennetyt signaalit aiheuttaisivat vain pienelläkin teholla lähetettynä häiriötä ympäristössään. Kyseinen järjestely voitaisiin siis järjestää vain ympäristössä, jossa väärennettyjen satelliittipaikannussignaalien lähettämisestä radioteitse ei koituisi haittaa.

6. YHTEENVETO

Työn päätavoitteena oli selvittää, miten RF-sormenjäljen avulla voidaan havaita, että vastaanotettujen satelliittipaikannussignaalien joukossa on myös väärennettyjä signaaleja. Johtopäätöksenä voidaan sanoa, että STFT toimii RF-sormenjälkenä, jonka avulla väärennetyn satelliittipaikannussignaalin läsnäolo voidaan havaita. Opetettu SVM-luokintamalli pystyi havaitsemaan väärennetyn satelliittipaikannussignaalin 100 %:n tarkkuudella.

Työssä käytetyt menetelmät eivät kuitenkaan olleet parhaimmat. Suurimpana rajoitteena oli luokittelussa käytetyn tietokoneen laskentatehon puute, jonka vuoksi luokittelussa tyydyttiin käyttämään hyvin pientä määrää dataa. Myös osa työn mukaisista mittausjärjestelyistä ei vastannut täysin todellista paikannustilannetta. Parempi versio mittausjärjestelyille olisi lähettää myös väärennetyt satelliittipaikannussignaalit radioteitse. Tämän toteuttaminen radiotaajuuksien käytöstä annettuja säädöksiä rikkomatta on kuitenkin vaikeaa.

Tähän mennessä RFF-tutkimusta on tehty runsaasti, mutta satelliittipaikannukseen liittyen sitä on kuitenkin melko niukasti tarjolla. Tekniikan kehittyessä myös harhautuslaitteet todennäköisesti kehittyvät entistä älykkäämmiksi, joka puolestaan voi johtaa harhautusyrityksien yleistymiseen. Tämän vuoksi RFF-tutkimukselle ja väärennettyjen signaalien havaitsemiselle on tarvetta myös satelliittipaikannuksessa. Pelkän väärennetyn satelliittipaikannussignaalin läsnäolon havaitsemisen lisäksi yksi tulevaisuuden tutkimuksien mahdollinen suunta voisi olla, että havaittaisiin väärennetyt signaalit signaali-kohtaisesti. Toisin sanoen vastaanotetun summasignaalin sisältämät, eri satelliitteja vastaavat signaalit tarkastettaisiin aitouden osalta yksitellen. Tällöin satelliittipaikannusta ei tarvitsisi kytkeä kokonaan pois päältä välttyäkseen harhautukselta, vaan voitaisiin jättää pelkät väärennetyt signaalit huomioimatta.

LÄHTEET

- [1] D. Goward, GPS circle spoofing discovered in Iran, GPS World, 2020, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 13.10.2021): <https://www.gpsworld.com/gps-circle-spoofing-discovered-in-iran/>
- [2] M. Sun, L. Zhang, J. Bao, Y. Yan, RF fingerprint extraction for GNSS anti-spoofing using axial integrated Wigner bispectrum, Journal of Information Security and Applications, Vol. 35, 2017, pp. 51–54.
- [3] C. Xu, B. Chen, Y. Liu, F. He, H. Song, RF Fingerprint Measurement For Detecting Multiple Amateur Drones Based on STFT and Feature Reduction, Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS), 2020, pp. 4G1-1–4G1-7.
- [4] E. D. Kaplan & C. J. Hegarty, Understanding GPS/GNSS: principles and applications, 3rd ed., Artech House, Boston, 2017, 993 p.
- [5] Other Global Navigation Satellite Systems (GNSS), National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing (PNT), verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.9.2021): <https://www.gps.gov/systems/gnss/>
- [6] IRNSS SIGNAL-IN-SPACE ICD FOR SPS VERSION 1.1, Chapters 2–3, Indian Space Research Organization (ISRO), 2017, pp. 2–9. Saatavissa: <https://www.isro.gov.in/irnss-programme>
- [7] G. Bacci, E. Falletti, C. Fernández-Prades, M. Luise, D. Margaria, F. Zanier, Satellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques, Chapter 2, Academic Press, 2012, pp. 25–74.
- [8] Space Segment, National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing (PNT), verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.9.2021): <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- [9] About GLONASS, Прикладной потребительский центр Госкорпорации "Роскосмос", verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.9.2021): https://www.glonass-iac.ru/en/about_glonass/
- [10] System, European GNSS Agency, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.9.2021): <https://www.gsc-europa.eu/galileo/system>
- [11] System Status: Constellation Status, Test and Assessment Research Center of China Satellite Navigation Office, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.11.2021): <http://www.csno-tarc.cn/en/system/constellation>
- [12] System Status: System Introduction, Test and Assessment Research Center of China Satellite Navigation Office, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.11.2021): <http://www.csno-tarc.cn/en/system/introduction>
- [13] Quasi-Zenith Satellite System Performance Standard (PS-QZSS-002), Chapter 3, Cabinet Office, Government Of Japan, 2020, pp. 6–9. Saatavissa: <https://qzss.go.jp/en/technical/ps-is-qzss/ps-is-qzss.html>

- [14] F. Dovis, GNSS interference Threats and Countermeasures, Chapters 1.1–1.2, Artech House, Boston, 2015, pp. 17–22.
- [15] Lisäpanostusta satelliittipaikannushäirinnän vastaiseen yhteistyöhön Pohjoismaissa, Maanmittauslaitos, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.10.2021): <https://www.maanmittauslaitos.fi/ajankohtaista/lisapanostusta-satelliittipaikannushairinnan-vastaiseen-yhteistyohon-pohjoismaissa>
- [16] TECHNOLOGY ASSESSMENT: Defense Navigation Capabilities, Full Report, United States Government Accountability Office, 2021, p. 5. Saatavissa: <https://www.gao.gov/products/gao-21-320sp>
- [17] P. Savolainen, Asiantuntija: GPS-häirintä on harmittavan helppoa, signaalin voi peittää roskalla – "Netistä voi tilata laitteen muutamalla kympillä", MTV uutiset, 2018, verkkosivu. Saatavissa: <https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/asiantuntija-gps-hairinta-on-harmittavan-helppoa-signaalin-voi-peittaa-roskalla-netista-voi-tilata-laitteen-muutamalla-kympilla/7174292>
- [18] P. Scanlon, I. O. Kennedy, Y. Liu, Feature extraction approaches to RF fingerprinting for device identification in femtocells, Bell Labs Technical Journal, Vol. 15, no. 3, 2010, pp. 141–151.
- [19] Discrete Fourier Transform, The MathWorks, Inc., verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.11.2021): <https://www.mathworks.com/help/signal/ug/discrete-fourier-transform.html>
- [20] STFT, Short-Time Fourier Transform, The MathWorks, Inc., verkkosivu. Saatavissa: (viitattu 11.11.2021): https://www.mathworks.com/help/signal/ref/stft.html#mw_f6bebd3d-2957-47ad-94bc-6982eed99a32_sep_mw_c056db1e-cade-47af-bf56-37cd76eee5db
- [21] K. Khare, Fourier Optics and Computational Imaging, Chapter 2.2, John Wiley & Sons, Inc., 2015, pp. 24–28.
- [22] K. M. M. Prabhu, Window functions and their applications in signal processing, Chemical Rubber Company (CRC) Press and Taylor & Francis, 1st ed., 2014, 382 p.
- [23] F. J. Harris, On the use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform, Proceedings of the IEEE, Vol. 66, no. 1, 1978, p. 60.
- [24] L. Aguiar-Conraria & M. J. Soares, THE CONTINUOUS WAVELET TRANSFORM: MOVING BEYOND UNI- AND BIVARIATE ANALYSIS, Journal of economic surveys, Vol. 28, Iss. 2, 2014, p. 344.
- [25] V. Brik, S. Banerjee, M. Gruteser, S. Oh, Wireless device identification with radiometric signatures, Proceedings of the 14th Association for Computing Machinery (ACM) international conference on mobile computing and networking, 2008, pp. 116–127
- [26] T. A. Runkler, Data Analytics: Models and Algorithms for Intelligent Data Analysis, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1st ed., 2012, 137 p.
- [27] Larhmam, SVM margin, CC BY-SA 4.0, 2018. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/File:SVM_margin.png#file

- [28] Support Vector Machine (SVM), The MathWorks Inc., verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.12.2021): <https://www.mathworks.com/discovery/support-vector-machine.html>
- [29] GNSS Planning Online, Trimble Inc., verkkosivu. Saatavissa (viitattu 19.11.2021): <https://www.gnssplanning.com/>