Kvanttisensoriteknologian sotilaallinen käyttö

Juha-Pekka Nikkarila

Abstract

The disruption and spoofing of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) have become significant challenges in modern warfare. For instance, Russia has demonstrated its capability to block GNSS signals and manipulate the information they provide. Quantum sensor technology, particularly quantum inertial sensors and quantum clocks as part of sensor fusion, is expected to offer a viable solution for Positioning, Navigation, and Timing (PNT) in contested environments within the next decade. These quantum sensors enable precise and reliable positioning and timing without the need for external satellite signals. The development of quantum inertial sensors and quantum clocks has progressed significantly, with broad operational readiness anticipated between 2030 and 2040. Quantum inertial technology, in particular, shows potential to enhance the navigation systems of autonomous underwater vehicles, while quantum clocks could provide accurate timing across various operational environments. Although challenges remain, such as the large size of devices and their sensitivity to environmental factors, quantum sensor technology offers substantial advantages in improving long-term positioning accuracy and operational reliability. The advancement of quantum sensor technology reduces reliance on space-based infrastructure and supports more precise and dependable military capabilities.

1. Johdanto

Tässä tutkimuksessa analysoidaan kvantti-inertiasensoreihin pohjautuvan paikannus-, navigointi- ja ajanmääritysteknologian (*Positioning, Navigation, Timing*, PNT) vaikutuksia sodankäynnin eri osa-alueilla. Sodankäynnin ytimessä ovat tuli, liike ja suoja [1, p. 154], [2, p. 74], mutta myös johtamisen ja informaation hallinta ovat olennaisia komponentteja. Tehokas viholliseen

vaikuttaminen (tuli), liikkeen avulla väistäminen ja suojautuminen ovat kaikki riippuvaisia nopeasta ja täsmällisestä päätöksenteosta sekä sen toteutuksesta.

1.1. Tilannetietoisuus ja sodankäynnin periaatteet

Tilannetietoisuuden parantaminen ja päätöksentekoprosessin nopeuttaminen ovat sodankäynnissä olennaisia. Nämä periaatteet korostuvat erityisesti OODA-silmukassa (*Observe-Orient-Decide-Act*) [3]. Parannettu tilannetietoisuus tarjoaa edellytykset aloitteen ottamiselle ja strategisen edun saavuttamiselle viholliseen nähden. Havainnointivaiheen tarkoituksena on tuottaa mahdollisimman kattava ja virheetön tilannekuva nopeasti, mikä vähentää epävarmuutta ja tukee nopeaa päätöksentekoa. Tarkat aika- ja paikkatiedot voivat näin ollen olla ratkaisevia omien tappioiden minimoimisessa ja vihollisen vahinkojen maksimoimisessa.

Tulen, liikkeen ja suojan tarkoituksenmukainen käyttö vaatii omien joukkojen sijainnin tarkkaa tuntemista sekä vihollisen nykyisen sijainnin ja tulevien liikkeiden ennustamista. Lisäksi operatiivisten toimenpiteiden täsmällinen ja koordinoitu toteuttaminen edellyttää tarkkaa aikatietoa ja synkronointia. Jokaisella sodankäynnin tasolla, taisteluteknisestä strategiseen, koordinoidut toimet ovat ratkaisevia. Esimerkiksi Patrian AMV-ajoneuvoissa käytettävä 120 mm Nemo-kranaatinheitinjärjestelmä mahdollistaa MRSI-tulipurskeen (*Multiple Rounds Simultaneous Impact*), jossa jokainen kranaatti laukaistaan siten, että ne iskevät maaliin samanaikaisesti, maksimoiden tuhovoiman ja yllättämällä vihollisen [4, p. 2].

1.2. Paikannuksen ja navigoinnin haasteita

Paikannus perustuu usein satelliittijärjestelmiin, kuten GNSS:ään (*Global Navigation Satellite System*) [5]. Satelliittipaikannuksessa vastaanotin määrittää sijaintinsa mittaamalla signaalien kulkuajat useista satelliiteista ja laskemalla niiden perusteella tarkan sijainnin. Neljäs satelliitti mahdollistaa lisäksi tarvittavan aikasynkronoinnin [5], [6, pp. 6, 8].

Satelliittipaikannus on kuitenkin altis häirinnälle ja harhautukselle (*jamming* ja *spoofing*). Esimerkiksi Venäjä on osoittanut kykenevänsä estämään GNSS-signaalin käytön sekä vääristämään sen antamia tietoja [7]. Keväällä 2022 Venäjän hyökättyä Ukrainaan havaittiin häiriöitä satelliittipaikannuksessa, esimerkiksi Suomen itäosissa ja Mustanmeren alueella [8]. Euroopan lento-

turvallisuusvirasto EASA onkin suositellut varautumista vaihtoehtoisiin paikannusjärjestelmiin [9].

Satelliittipaikannuksen haavoittuvuus johtuu erityisesti sen yksisuuntaisesta ja salaamattomasta tiedonsiirrosta. Vaikka kehitteillä on uusia todennus- ja salausmenetelmiä, ne eivät välttämättä poista täysin häirinnän riskiä [6, p. 5]. Venäjän toimet ovat osoittaneet, että satelliittipaikannukseen ei aina voi luottaa. Satelliittipaikannusta häiritsevät hyökkäykset ovat nousemassa merkittäväksi strategiseksi uhaksi [7, p. 3].

Myös vaihtoehtoisia paikannusmenetelmiä, kuten radiomajakoihin perustuvia järjestelmiä, voidaan häiritä tai tuhota [10, p. 237], [11]. Teodoliittiin perustuva optinen paikannus on yksi harvoista menetelmistä, joita ei voida häiritä ulkopuolelta [10, p. 16].

Inertiasensorit tarjoavat mahdollisuuden paikantaa ilman ulkoisia signaaleja [12, p. 8]. Kiihtyvyyden, ajan ja anturin asentotiedon mittaukseen perustuva paikannus ei vaadi jatkuvaa ulkoista yhteyttä, mutta ilman ulkoista synkronointia paikannustarkkuus heikkenee voimakkaasti ajan myötä [12].

1.3. Kvanttiteknologian mahdollisuuksia

Klassisen inertiapaikannuksen merkittävä haaste on paikannustarkkuuden heikkeneminen ajan kuluessa, mikä johtuu mittaustarkkuuden epätarkkuuksista ja virheiden kumuloitumisesta [12, p. 26]. Nykyiset teknologiat saattavat täyttää suurimman osan tarpeista, mutta kvantti-inertiapaikannus voi tarjota huomattavia parannuksia paikannusteknologioihin. Tämä tutkimus pyrkii selvittämään, kuinka kvanttisensoriteknologia voisi ratkaista nykyiset paikannusongelmat ja miten Puolustusvoimien tulisi valmistautua tämän teknologian kypsymiseen.

On perusteltua olettaa, että suurvallat etsivät aktiivisesti satelliittipaikannukselle vaihtoehtoisia menetelmiä. Tämä tutkimus keskittyy erityisesti kehittyvään kvanttisensoriteknologiaan, mutta tarkastelee myös olemassa olevia ratkaisuja. Tarkoituksena on selvittää, voiko teknologiakehitys tarjota ratkaisun satelliittipaikannuksen haasteisiin.

Vaikka kvanttiteknologiat perustuvat monimutkaisiin kvanttimekaniikan ilmiöihin, niitä voidaan hyödyntää puolustusjärjestelmissä. Työn sujuvuuden varmistamiseksi työssä esitetään lyhyesti kvanttimekaniikan perusteet ja sen teknisiä sovelluksia. Kvanttiteknologiat perustuvat kvanttimekaniikan ilmiöihin, jotka ovat luonnontieteiden ehkäpä monimutkaisimpia ja vaikeimmin ymmärrettäviä. Näitä ilmiöitä kuitenkin hyödynnetään, ja siksi tässä työssä esitellään lyhyesti kvanttimekaniikan perusperiaatteet. Yksi keskeinen

kvanttimekaniikan ilmiö on kvanttilomittuminen [13], jossa kaksi hiukkasta voivat olla kytkeytyneessä tilassa, vaikka ne olisivat kaukana toisistaan. Tällöin yhden hiukkasen tila voidaan määrittää toisen kautta, mikä mahdollistaa ainutlaatuisia teknisiä sovelluksia, kuten kvantti-internetin. Lomittumisen hyödyntäminen on kuitenkin haastavaa, ja teollisen mittakaavan sovellukset ovat vielä kehitysvaiheessa.

Vaikka kvanttiteknologiat voivat tuoda uusia mahdollisuuksia paikannukseen, ne eivät todennäköisesti täysin korvaa perinteisiä menetelmiä. Uuden teknologian käyttöönotto edellyttää uutta infrastruktuuria, joten perinteisillä menetelmillä on edelleen kilpailuetua. Kvanttiteknologian ja perinteisten teknologioiden vertaileminen on kuitenkin välttämätöntä. On tärkeää arvioida myös nykyisten teknologioiden kehitystä ja tunnistaa tilanteet, joissa kvanttiteknologiat voivat tarjota merkittäviä etuja verrattuna nykyisiin paikannusmenetelmiin.

2. Tutkimusmenetelmät

Tässä luvussa käsitellään tutkimuksen teoreettisia perusteita, kvanttimekaniikkaa lyhyesti sekä erityisesti kvantti-inertiasensoreiden teknologiaa ja sovelluksia. Kvantti-inertiasensorit valittiin tutkimuskohteeksi, koska niiden arvioidaan olevan ensimmäisiä sodankäynnissä käytettäviä kvanttiteknologioita. Kvantti-inertiasensoreiden tarkkuus, joka on noin sata kertaa parempi kuin klassisten menetelmien, tekee niistä lupaavia paikannusjärjestelmiä [14, p. 22].

2.1. Luonnontieteelliset perusteet

Tutkimuksessa noudatetaan positiivista tieteenfilosofiaa [15]. Tulokset perustuvat aiempaan kokeelliseen luonnontieteelliseen tutkimukseen. Käytännössä kirjoitus koostuu kirjallisuustutkimuksesta, jonka perusteella muodostetaan yleiskuva teknologian nykytilanteesta. Kirjallisuustutkimus tukee tutkitun teknologian tulevaisuuden kehityksen arviointia. Tämän jälkeen tutkimuksessa siirrytään rakentavaan tutkimusotteeseen, jossa kehitetään malli kvantti-inertiasensoreiden käytöstä taistelukentällä, ja esitetään kuvaus niiden rakenteesta ja suorituskyvystä.

Paikannus voidaan tehdä aktiivisin menetelmin, kuten satelliittipaikannus (GNSS), tai passiivisin menetelmin, kuten inertiapaikannus. Inertiapaikannus on erityisen vastustuskykyinen häirinnälle, koska se ei vaadi ulkoisia referenssisignaaleja [16, pp. 3-4]. Sen suurin haaste on kuitenkin mittausvirheiden

kumuloituminen ajan myötä, mikä heikentää tarkkuutta. Tämä ilmiö johtuu inertiamittausanturin mittausvirheestä, joka kertautuu ajan kuluessa [17], [28, p. 44].

Ajan mittaaminen on ollut keskeinen kiinnostuksen kohde ihmiskunnalle, ja sen tarkentuminen on mahdollistanut siirtymisen kohti reaaliaikaista tiedonvälitystä [18, p. 42]. Kvartsikiteet, joiden värähdystaajuus on vakaa, otettiin käyttöön 1900-luvun alkupuolella, mutta ne ovat riippuvaisia ympäristöolosuhteista eivätkä siksi ole täysin stabiileja [18, p. 46]. Atomikellot, joiden konseptin esitti William Thompson vuonna 1879, ovat tarkempia, koska niiden värähdystaajuus perustuu luonnonvakioon [36, p. 46]. Ensimmäinen atomikelloihin perustuva sekunnin mittastandardi otettiin käyttöön vuonna 1954, ja nykyään käytössä olevat atomikellot, kuten NIST-F1, tarjoavat erittäin korkean tarkkuuden [36, p. 49; 72, p. 74]. Atomikellojen käyttöä rajoittaa niiden suuri koko ja tehonkulutus, mutta ne ovat silti tärkeä osa modernia ajanmääritystä [20, p. 4; 37, p. 4].

Kvanttimekaniikka muodostaa perustan kvantti-inertiasensoreille, jotka käyttävät kvantti-ilmiöitä, kuten kvanttisuperpositiota ja kvanttilomittumista, saavuttaakseen erittäin tarkkoja mittauksia. Kvanttimekaaninen järjestelmä voi olla kahden kvanttitilan superpositiossa, mikä on keskeistä monissa kvanttimekaniikan sovelluksissa, mukaan lukien tarkat mittaukset [21, pp. 1-10]. Tämä ilmiö muodostaa perustan tutkimuksessa käsiteltäville sensoriteknologioille. Kvanttisuperpositiossa hiukkanen voi olla useassa tilassa yhtä aikaa, ja sen aaltofunktio muodostuu tilojen lineaarikombinaationa. Esimerkiksi magneetti- tai sähkökenttien vaikutuksesta hiukkasen tiloissa ilmenee pieniä, mutta mitattavissa olevia eroja. Kvanttisuperpositiota hyödynnetään mittaustarkkuuden parantamiseksi siten, että mittauksen alussa tilojen määrä rajataan yhteen, ja mittauksen aikana kahteen mahdolliseen tilaan. Näitä mahdollisia tiloja ovat esimerkiksi hiukkasen perustila ja ensimmäinen viritystila [22, pp. 7-8]. Tämä mahdollistaa hyvin tarkan ajan ja/tai kiihtyvyyden mittauksen, mikä parantaa inertiapaikannuksen tarkkuutta ja stabiiliutta merkittävästi. Sen vuoksi kvanttisuperpositio tarjoaa tarkan tavan mitata voimia. Tulos on jäljitettävissä yksittäisen hiukkasen tilan erittäin hyvin kontrolloituun muutokseen, mikä on erityisen hyödyllistä sovelluksissa, joissa mittaustapahtuma tapahtuu paikallisesti sensorissa.

Kvanttilomittuminen on kvanttimekaniikan ominaisuus, jossa kaksi erillistä kvanttitilaa kytkeytyy yhteen, jolloin hiukkaset voivat jakaa saman tilan riippumatta niiden välisestä etäisyydestä [23, pp. 78-79]. Tämä ilmiö mahdollistaa kvanttiedonsiirron, jossa tietoa siirretään kahden paikan välillä, ja sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi tietoliikenteen salauksessa, kuten kvanttiavaintenvaihdossa (QKD) [24, p. 81]. Kvanttilomittuminen on kuitenkin teknisesti

haastava ilmiö hallita, ja sen sovellukset, kuten kvanttiverkottaminen, ovat vielä kehitysvaiheessa. Kvanttilomittuminen voisi tulevaisuudessa mahdollistaa mittaustulosten jakamisen ilman erillistä tiedonsiirtojärjestelmää, mutta sen teknologinen valmius on vielä epävarmaa [25], 26]. Kvantti-inertiasensoreiden kvanttiverkottaminen jätetään tästä tutkimuksesta pois.

Kvanttimekaniikan mukaan aineella on olemassa samanlainen kaksoisluonne kuin valolla, ja tästä ominaisuudesta käytetään nimeä aaltohiukkasdualismi. [27]. Kvanttimekaniikan mukaan hiukkasen ominaisuuksia ja tilaa kuvaa sen aaltofunktio $\psi(\boldsymbol{r})$. Käytettäessä Diracin merkintää, hiukkasen ominaisuuksia kuvaava tilavektori voidaan kirjoittaa muodossa [28, s. 32]

$$|\psi\rangle = \sum_j \sigma_j |\hat{\varphi}_j\rangle. \tag{1}$$

Hiukkasen tilavektori voidaan esittää j-kannan mukaisena lineaarikombinaationa, jossa kantavektorit $|\hat{\varphi}_j\rangle$ painottuvat kompleksilukuisilla kertoimilla σ_j. Kun hiukkasen aaltofunktio on tiedossa, se sisältää kaiken tarvittavan tiedon hiukkasen olennaisista ominaisuuksista.

2.2. Kvanttisensoriteknologia

Kvantti-inertiapaikannus perustuu kvanttimekaniikkaan ja erityisesti kylmien atomien interferometriaan (CAI). Tämä menetelmä mahdollistaa erittäin tarkan kiihtyvyyden mittaamisen. Tarkemman kiihtyvyysmittauksen avulla tuotetaan aiempaa tarkempi paikannus. CAI-menetelmässä atomit kylmennetään erittäin mataliin lämpötiloihin, jotta niiden aaltofunktiot saadaan havaittaviksi ja mittaustulokset tarkemmiksi [22, p. 7], [29, p. 9].

Interferometrista voidaan rakentaa inertiasensori, jonka avulla saadaan mitattavan vaihe-eron $\Delta\Phi$ avulla sekä kappaleen hetkellinen kiihtyvyys $\boldsymbol{a}$ että kulmanopeus $\boldsymbol{\Omega}$ selvitettyä [22, s. 11]:

$$\Delta\Phi = \Phi_{\boldsymbol{a}} + \Phi_{\boldsymbol{\Omega}} = \boldsymbol{k}_{\text{eff}} \cdot \boldsymbol{a}T^2 + 2\boldsymbol{k}_{\text{eff}} \cdot (\boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{v})T^2, \tag{2}$$

missä $\boldsymbol{k}_{\text{eff}}$ on vastakkain kulkevien laserpulssien aaltolukujen erotus, $\boldsymbol{v}$ atomien kulkunopeus, ja T vuorovaikutustapahtuman kuluva aika. Näistä $\boldsymbol{v}, \boldsymbol{k}_{\text{eff}}$ ja T tiedetään ja niitä pystytään kontrolloimaan. Yhtälössä 2 esiintyvät operaattorit ovat vektorien pistetulo (.) ja ristitulo (×).

Vaihe-ero $\Delta\Phi$ vaikuttaa tilojen siirtymistodennäköisyyteen $\mathrm{P}(\Delta\Phi)$ [22, s. 11]

$$\mathrm{P}(\Delta\Phi) = \frac{N_e}{N_e + N_f} = \mathrm{P}_0 - \frac{C}{2}\cos(\Delta\Phi). \tag{3}$$

Yhtälössä N_e edustaa viritystilassa olevien atomien suhteellista osuutta ja N_f perustilassa olevien atomien vastaavaa osuutta. Parametri C on interferometriaan liittyvä näkyvyysparametri (*interferometric visibility*), joka mittaa laserpulssien koherenttiutta ja on ideaalitilanteessa arvoltaan 1. Suure P_0 kuvaa alkutilannetta ja sen arvo on ideaalitapauksessa 1/2 [22, pp. 11-13].

Menetelmän avulla voidaan siten luoda yhteys kappaleen kiihtyvyyden $\boldsymbol{a}$, kulmanopeuden $\boldsymbol{\Omega}$ sekä tarkasti hallittavien suureiden (kuten $\boldsymbol{k}_{\text{eff}}$, lämpötila T ja kappaleen nopeus $\boldsymbol{v}$) ja mittauksessa yhden kappaleen tarkkuudella laskettavien elektronien lukumäärän välillä. Yhteys pätee sekä perus- että viritystilassa. Jos parametrit C ja P_0 saavuttavat ideaalitilanteen arvot, yhtälö yksinkertaistuu seuraavaan muotoon [22, p. 11].

$$\begin{cases} \mathrm{P}(\Delta\Phi) = \frac{N_e}{N_e+N_f} = \frac{1}{2}(1-\cos(\Delta\Phi)), \text{ missä} \\ \Delta\Phi = T^2\boldsymbol{k}_{\text{eff}} \cdot (\boldsymbol{a} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{v}) \end{cases} \tag{9}$$

Kylmien atomien spektroskopian avulla voidaan määrittää kappaleen kiihtyvyys ja kulmanopeus [22, p. 11]. Tämä tapahtuu vaihtelemalla mittauksessa käytettävien atomien nopeutta ja tutkimalla perus- ja viritystilassa olevien elektronien suhteelliset määrät. Yllä on esitetty yksinkertaistettu kuvaus kylmien atomien interferometrialla tehdyn kiihtyvyysmittauksen fysikaalisesta perustasta.

Kvantti-inertiasensorit voivat mullistaa navigointijärjestelmät tarjoamalla erittäin tarkan paikannuksen ilman ulkoista synkronointia [12], [13].

Kvanttimekaniikkaan perustuvassa painovoimakartoituksessa (QGC, *quantum graviation cartography*) mitataan paikallisesti Maan putoamiskiihtyvyyttä ja verrataan sitä aiempiin mittauksiin. Tämä mahdollistaa tarkan paikannuksen ympäristöissä, joissa perinteiset järjestelmät eivät ole luotettavia [12], [22, s. 6], [20, s. 4]. Kvanttigravimetrian avulla voidaan mitata paikallista putoamiskiihtyvyyttä tarkasti, mikä mahdollistaa navigoinnin. Tämä menetelmä perustuu CAI-tekniikkaan ja tarjoaa tarkan tavan mitata Maan painovoimaa [22, s. 6], [30, p. 1].

Kvanttisensoriteknologiaa voidaan häiritä joko suoraan mittaussignaaliin vaikuttamalla tai toissijaisten kanavien, kuten sähkömagneettisen säteilyn, avulla. Kvanttisensoreiden häirinnän vastustuskyky on kriittinen tekijä niiden sotilaallisen käytön kannalta.

Kvanttikellot ovat kehittyneempi versio atomikelloista, ja niiden tarkkuus perustuu kvanttimekaanisiin ilmiöihin. Atomikellot perustuvat luonnon atomien kvantti-ilmiöiden mittaamiseen, mutta kvanttikelloissa myös mitattava kvanttitila luodaan itse. Kvanttikellojen avulla voidaan parantaa ajan mittaamisen tarkkuutta ja vähentää energiankulutusta [20, p. 4], [31, p. 692].

Atomikellot ovat parantaneet ajan tarkkuutta ja mittastandardien stabiiliutta merkittävästi. Atomikellojen käyttöä rajoittavat niiden suuri koko, paino ja tehonkulutus. Vaikka tavalliset atomikellot hyödyntävät kvanttimekaniikkaa, ne eivät ole kvanttikelloja. Termi ”kvanttikello” viittaa kelloihin, jotka luovat ja hyödyntävät tarkoituksellisesti kvanttimekaniikan ilmiöitä. Kvanttikelloissa teknologia jakautuu kahteen pääluokkaan, joista ensimmäinen on miniatyrisoidut kvanttikellot ja toinen optiset kvanttikellot. Ensimmäisillä pyritään erityisesti pienentämään kellojen kokoa ja tehonkulutusta, ja toisilla pyritään saavuttamaan aiempaa tarkempi ajanmittaus.

2.3. Kvanttisensoriteknologian soveltaminen

Tutkimuksessa käytetään käyttötapauksia kvantti-inertiasensoreiden mahdollisuuksien ja rajoitusten arvioimiseksi sotilaallisessa kontekstissa. Tärkeimpiä tekijöitä ovat teknologian koko, paino, tarkkuus, stabiilius, ja tehonkulutus [32, pp. 140-141], [22, pp. 24-26].

Kvantti-inertiasensoreilla ja kvanttikelloilla on potentiaalia parantaa merkittävästi sotilaallisia paikannus- ja navigointijärjestelmiä. Teknologian kehityksen seuraaminen ja sen sovellusten testaaminen sotilaallisessa ympäristössä ovat tärkeitä tulevaisuuden sotilasoperaatioiden kannalta [22, p. 11], [12].

Tutkimuksessa teknologian valmiusastetta arvioidaan Euroopan komission TRL-asteikolla (Taulukko 1). Kvantti-inertiasensoreiden teknologinen kypsyys on keskeinen arviointikohde, sillä se vaikuttaa teknologian sovellettavuuteen sotilaallisissa konteksteissa [33, p. 29]

Taulukko 1. Teknologian kypsyysaste (Technology Readiness Level, TRL) Euroopan komission määritelmän [74, s. 29] mukaisesti.

TRL	*Euroopan komission määritelmä (English)*	*Euroopan komission määritelmä suomeksi*
1	*Basic principles observed*	*Ilmiön yleiset periaatteet havaittu*
2	*Technology concept formulated*	*Teknologian sovelluskonsepti muodostettu*
3	*Experimental proof of concept*	*Teknologian toimivuus osoitettu käytännössä (soveltuvuusselvitys)*
4	*Technology validated in lab*	*Teknologia validoitu laboratorio-olosuhteissa*
5	*Technology validated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)*	*Teknologia validoitu relevantissa ympäristössä*

6	*Technology demonstrated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)*	*Teknologian toimivuus demonstroitu relevantissa ympäristössä*
7	*System prototype demonstration in operational environment*	*Järjestelmän prototyyppi demonstroitu todellisessa käyttöympäristössä*
8	*System complete and qualified*	*Järjestelmä valmis ja kelpuutettu*
9	*Actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of key enabling technologies; or in space)*	*Varsinainen järjestelmä valmis ja osoitettu toimivaksi todellisessa käyttöympäristössä*

3. Tulokset

3.1. Yhteenveto

Kvantti-inertiapaikannuksen ja kvanttikellojen kehitystä ohjaa tavoite satelliittiriippumattomaan paikannukseen. Kvantti-inertiapaikannus on teknologiavalmiudeltaan TRL 4-6, kun taas kvanttigravimetria on hieman pitemmällä, noin TRL 5-6. Kaupalliset sovellukset ovat odotettavissa aikavälillä 2025-2035, mutta miniatyrisoitujen järjestelmien kehitys voi jatkua vuoteen 2040 asti. Kvanttikellojen teknologinen kypsyysaste on TRL 5-7, ja niiden kaupallinen käyttö voi alkaa jo vuosina 2025–2030. Näiden teknologioiden keskeisiä haasteita ovat kapea dynaaminen mittausalue ja häiriöherkkyys, erityisesti magneettikentille ja akustisille signaaleille. Häirintää voidaan kuitenkin vähentää huolellisella suunnittelulla ja suojauksella, esimerkiksi EMP-suojauksella.

Mikrosirukokoisen kylmien atomien interferometrian teknologia on vielä kehityksen alkuvaiheessa (TRL 3), ja niiden laitteistojen koko sekä kylmennystarve rajoittavat kaupallista käyttöä. Miniatyrisointia kehitetään esimerkiksi Bose-Einstein-kondensaattien ja ydinmagneettisen resonanssin avulla.

Euroopan komission mukaan kvanttikellojen kehittämiseen on perusteltua ohjata julkista rahoitusta [20], jotta saavutetaan teknologinen autonomia ja vältetään strateginen riippuvuus Yhdysvalloista. Vaikka kvanttikellot eivät vielä ole vientirajoitusten alaisia, niiden sotilaskäyttö voi muuttaa tilannetta. Myös Iso-Britannia on suunnannut julkisia varoja miniatyrisoitujen kvanttikellojen kehittämiseen.

Sensorifuusio yhdistää kvanttiteknologian perinteisiin paikannusteknologioihin, kuten satelliitti- ja inertiapaikannukseen, luoden hybridijärjestelmän, joka parantaa tarkkuutta ja toimintavarmuutta [11, ss. 277-280]. Tämä yhdistelmä vähentää pää- ja sivukanavahyökkäysten sekä mittauselektroniikan

häirinnän riskejä, mikä tekee sensorifuusiosta lupaavan menetelmän tarkemman paikannuksen toteuttamiseen.

3.2. Kvanttiteknologian avulla tuotettu paikannus

Vuoden 2021 Euroopan komission raportin mukaan kvantti-inertiapaikannuksen valmiusaste on TRL 4, ja kylmien atomien interferometriaan perustuvien kiihtyvyysantureiden kypsyysaste on TRL 4-6 [12, s. 35]. Vuonna 2020 julkaistussa raportissa tämä teknologia arvioitiin vielä olevan TRL 4-tasolla [22, s. 6]. Myös toisessa tutkimuksessa (vuodelta 2021) kvantti-inertiapaikannuksen teknologian arvioitiin olevan kehitystasolla TRL 4-5. Teknologian arvioitiin kypsyvän TRL 9 -tasolle aikavälillä 2025-2035 . Teknologia on osoittautunut erittäin stabiiliksi, tuottaen 10 metrin ryömintävirheen 50 000 sekunnissa. [12, s. 26]. Vaikka kvantti-inertiapaikannus on stabiiliudeltaan ylivoimainen muihin teknologioihin verrattuna, se on myös kustannuksiltaan kalliimpi.

Kylmäatomi-interferometriaan (CAI) ja fotonimikropiireihin perustuvat kvantti-inertiapaikannusmenetelmät ovat lupaavia vaihtoehtoja satelliittiriippumattomaan paikannukseen. CAI:n avulla saavutetaan korkea paikannustarkkuus, mutta sen suurikokoinen laitteisto ja kylmennystarve rajoittavat kaupallista käyttöä. Kuitenkin miniatyrisoidut sovellukset, kuten mikrosirukokoiset sensorit, ovat kehitteillä ja voivat merkittävästi parantaa teknologian käytettävyyttä. Kvantti-interferometrian kehitys on aktiivista, ja noin 50 tutkimusryhmää työskentelee sensoreiden parantamiseksi [34, s. 8]. Menetelmän kypsyys on kuitenkin vasta alkuvaiheessa, TRL 3. Miniatyrisointi ja kylmäatomi-interferometriaan perustuvan gravimetrian avulla tehty paikannus on edistyneintä, mutta sekin tarvitsee tukimenetelmiä, kuten satelliittipaikannusta, varmistaakseen sijainnin tarkkuuden. Kylmäatomi-interferometria vaikuttaisi olevan kvantti-inertiapaikannuksen menetelmistä kaikkein pisimmällä, mutta esimerkiksi DARPA:n C-SCAN-projektissa tutkitaan myös muita kvantti-inertiapaikannuksen teknologioita kuten ydinmagneettinen resonanssi (NMR) ja atomien interferometriaa (AI) [35]. Mikrosirukokoisen kylmien atomien interferometrian teknologian valmiusaste on arvioitu olevan tasolla TRL 3, mikä osoittaa, että teknologia on vielä kehityksen alkuvaiheessa [12, p. 35]. Miniatyrisointia mahdollistavat ainakin kaksi erillistä menetelmää: Bose-Einstein-kondensaatit (BEC, Bose-Einstein-Condensates) ja ydinmagneettinen resonanssi (NMR, Nuclear Magnetic Resonance). NMR:ää hyödynnetään muun muassa mikrosirukokoisen gyroskoopin toteuttamisessa [12, pp. 27-28], ja menetelmä on tunnettu myös lääketieteellisestä kuvantamisesta. Bose-Einstein-kondensaateissa

käytetään hyväksi bosonien kasaantumista tiiviiksi joukoksi erittäin matalassa, nanokelvin-luokan lämpötiloissa [22, p. 6].

Kvanttigravimetrit ovat edistyneimpiä kvanttiteknologioihin perustuvista paikannusmenetelmistä, ja niiden kypsyysaste on TRL 9, mikä tarkoittaa, että ne ovat jo markkinoilla kaupallisessa käytössä [36, s. 17]. Menetelmässä mitataan paikallista gravitaatiota, ja verrataan tuloksia taulukoituihin arvoihin paikannuksen selvittämiseksi. Tämä tekee kvanttigravimetriasta erityisen hyödyllisen jatkuvassa navigoinnissa. Menetelmän haittapuoli on kuitenkin sen herkkyys liikkeelle ja värähtelyille, mikä rajoittaa sen käyttöä liikkuvissa laveteissa.

3.3. Kvanttikellot

Kvanttikelloja voidaan luokitella kellon koon mukaan, mikä vaikuttaa niiden soveltuvuuteen eri käyttötarkoituksiin. DARPA aloitti 2000-luvun alussa ohjelman kehittääkseen paristokäyttöisen kvanttikellon sotilaskäyttöön. Tämä johti ensimmäisen miniatyrisoidun atomikellon (*Miniature Atomic Clock*, MAC) valmistumiseen vuonna 2008 ja ensimmäisen mikrosirukokoisen atomikellon (*Chip-Scale Atomic Clock*, CSAC) tuotantoon vuonna 2011 [20, pp. 4-5]. Mikrosirukokoiset kvanttikellot voidaan toteuttaa eri teknologioilla, kuten CPT (mikroaaltosäteilyn aallonpituudella toimiva, *Coherent Population Trapping*) tai CAI [20, pp. 4-5].

Kvanttikellojen, kuten CSAC ja MAC, teknologinen kehitys on nopeaa, ja ne voivat olla kaupallisessa käytössä jo lähitulevaisuudessa [20, s. 15]. CSAC-kellojen valmiusaste on TRL 5-7, ja ne tarjoavat lupaavan vaihtoehdon erityisesti sotilaskäyttöön. Kvanttikellojen tarkkuus ja stabiilius ovat parantuneet huomattavasti, ja ne ovat kilpailukykyisiä perinteisiin atomikelloihin nähden, erityisesti pienemmän koon ja alhaisen tehonkulutuksen ansiosta. Miniatyrisoidut kvanttikellot voivat tarjota erittäin tarkan ajanmittauksen ja soveltua esimerkiksi GNSS-järjestelmien varmuuskopiointiin. [18, p. 19]

Kokonaisuutena kvanttiteknologiat tarjoavat merkittäviä mahdollisuuksia tarkkuuden ja stabiiliuden parantamisessa, mutta ne kohtaavat myös haasteita häiriöherkkyyden ja miniatyrisoinnin osalta. Nämä haasteet on kuitenkin mahdollista voittaa teknologian kehittyessä ja järjestelmien suunnittelun parantuessa.

3.4. Sensoriteknologian häirintä

Sensorien toimintaa voidaan häiritä kolmella pääasiallisella tavalla: pääkanava-, sivukanavahyökkäykset ja elektroniikan häirintä. Pääkanavahyökkäyksessä vaikutetaan suoraan mitattavaan suureeseen, kuten lämpötilaan tai valoon, antamalla sensorille virheellistä tietoa. Sivukanavahyökkäykset hyödyntävät sensorin herkkyyttä toissijaisille signaaleille, kuten akustiselle häirinnälle, vaikuttaakseen mittaustuloksiin. Elektroniikan häirintä, kuten sähkömagneettinen säteily, voi tuottaa haitallisia virtoja, jotka häiritsevät tai jopa tuhoavat mittausjärjestelmän. Hyökkäykset voidaan myös luokitella aktiivisiin ja passiivisiin menetelmiin. [38, ss. 26-29]

3.5. Kvanttisensoriateknologian rajoitteet ja häirintä

Kvanttiteknologian paikannuksessa esiintyy useita häiriöherkkyyksiä. Kvantti-inertiapaikannuksen ja -gravimetrian anturit reagoivat ulkoisiin magneettikenttiin ja tärinään, joten ne tulisi suojata niiltä [22, p. 9]. Sähkökentän ja sähkömagneettisen säteilyn vaikutus voidaan poistaa Faradayn häkillä [39, p. 977]. Näiden suojatoimien suunnittelu nostaa kustannuksia, mutta ne ovat välttämättömiä erityisesti liikkuvissa sovelluksissa. Kvantti-inertiasensorit ovat herkkiä ylimääräisille kiihtyvyyksille, tärinälle, akustisille aalloille sekä magneetti- ja sähkökentille, mikä tekee niistä alttiita sivukanavahyökkäyksille.

Sähkömagneettista säteilyä ja sähkökenttiä vastaan suojautuminen on usein yksinkertaista, mutta magneettikentän ja akustisten aaltojen hyökkäykset voivat olla haastavampia torjua. Hyökkäyksiä voidaan kuitenkin estää integroidulla suunnittelulla ja useampien riippumattomien menetelmien avulla [40, pp. 404-405]. Myös järjestelmän elektroniikka on suojattava, sillä se voi olla alttiina sähkömagneettisille pulsseille [40, pp. 404-405].

Kvanttisensoreiden häirintä on haastavaa, mutta mahdollista erityisesti sivukanavan hyökkäyksillä, jotka hyödyntävät sensorin herkkyyttä ulkoisille vaikutuksille. Pääkanavan hyökkäykset ovat erittäin vaikeita toteuttaa, koska ne vaatisivat sensorin fyysisen manipuloinnin. Suojautumista helpottaa sensorien suunnitteluvaiheessa toteutettu häiriöiden eliminointi.

4. Johtopäätökset

Tutkimus osoittaa, että kvantti-inertiasensorit ja kvanttikellot ovat avainasemassa strategisen autonomian parantamisessa ja esimerkiksi häiriönkestävän pai-

kannuksen tuottamisessa. Kvanttikellot ovat kehittyneet merkittävästi ja niiden teknologinen valmiusaste (TRL) on saavuttanut tason 7-9, mikä viittaa niiden nopeaan yleistymiseen vuosien 2025–2035 aikana, erityisesti CSAC-teknologian osalta. Tämä teknologia vähentäisi avaruusdimensioriippuvuutta, mikä olisi merkittävä etu sotilaallisissa operaatioissa.

Kvantti-inertiasensorit ovat kehityksessä hieman jäljessä, mutta niiden odotetaan kypsyvän tasolle TRL 9 noin vuosien 2030–2040 aikana. Ensimmäiset sovellukset tulevat todennäköisesti olemaan suurten alusten paikannus- ja navigointijärjestelmissä meritoimintaympäristössä. Kuluttajalaitekokoon integroitu kvantti-inertiapaikannus yleistynee vasta 2035–2045, mutta voi toteutua aiemminkin, jos miniatyrisointiteknologia, kuten BEC, onnistuu.

Tutkimus korostaa, että kvanttiteknologian kehityksessä on huomattavia haasteita, kuten antureiden suuri koko, korkea hinta ja tehonkulutus. Lisäksi teknologian häiriöherkkyys sähkö- ja magneettikentille, sekä akustisille aalloille, on merkittävä rajoite, jota voidaan kuitenkin vähentää suunnitteluratkaisuilla.

On tärkeää seurata teknologian kehittymistä myös laajemminkin, erityisesti sensorifuusion alueella. Kvanttisensoriteknologia tulee olemaan osa hybridiratkaisuja, jotka yhdistävät klassiset ja kvanttisensorit. Kvantti-inertiasensoreihin perustuva satelliittiriippumaton paikannusjärjestelmä on mahdollisesti saavutettavissa seuraavan kahdenkymmenen vuoden aikana, ja tämä teknologia voi merkittävästi muuttaa sodankäyntiä.

Lopuksi

Kirjoitus perustuu kursiivisesti tutkijan kirjoittamaan Yleisesikuntaupseerin tutkinnon diplomityöhön ”*Kvanttisensoriteknologia sodankäynnissä*” [TLIII]. Kirjoittaja haluaa osoittaa kiitoksensa diplomityönsä erinomaisesta ohjauksesta työ ohjaajille, eli Maanpuolustuskorkeakoulun tutkimusjohtaja Prof. Hannu Karille ja insevl Sami Sundströmille. Lisäksi kirjoittaja haluaa osoittaa kiitoksensa Suomalaisen strategisen tutkimuksen ja seurannan tukisäätiölle (STRATU) tämän tutkimuksen tukemisesta, sekä STRATU:lle ja Suomen Sotatieteellinen Seura ry:lle (SSTS) niiden tekemästä arvokkaasta työstä Suomen strategisen ja sotatieteellisen tutkimuksen edistämiseksi. Lopuksi kirjoittaja kiittää kurssitovereitaan yleisesikuntaupseerikurssilla YEK61, sekä lukuisia muita ajassa eteenpäin matkustamisen kokemusasiantuntijoita. Onneksi emme ole vielä perillä.

Lähteet

[1] J. F. C. Fuller, The Foundations of the Science of War, London: Hutchinson & Co, 1926.

[2] M. Huttunen, Monimutkainen taktiikka, Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Taktiikan laitos, 2010.

[3] J. Boyd, ”The Essence of Winning and Losing,” J. Boydin muistiinpanot, 1996. [Online]. Available: https://danford.net/boyd/essence.htm. [Haettu 25.10.2021 Lokakuu 2021].

[4] Patria, *Prochure, 120mm Mortar System -Patria NEMO,* 2022.

[5] Maanmittauslaitos, ”Satelliittipaikannus,” 21 Lokakuu 2021. [Online]. Available: https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/satelliittipaikannus. [Haettu 21.10.2021 Lokakuu 2021].

[6] S. Kaasalainen, M. Mäkelä, M. Saajasto, M. Kirkko-Jaakkola ja H. Kuusniemi, ”Selvitys GNSS-palvelujen tarjonnasta ja toiminnasta,” 2021.

[7] C4ADS, ”Above Us Only Stars -Exposing GPS Spoofing in Russia and Syria,” C4ADS, 2019.

[8] L. Kangas, ”Yle uutiset,” Yle, 19 Maaliskuu 2022. [Online]. Available: https://yle.fi/uutiset/3-12043017/64-3-63579. [Haettu 25 Maaliskuu 2022].

[9] EASA, ”EASA publishes SIB to warn of intermittent GNSS outages near Ukraine conflict areas,” European Union Aviation Safety Agency, 17 Maaliskuu 2022. [Online]. Available: https://www.easa.europa.eu/newsroom-and-events/news/easa-publishes-sib-warn-intermittent-gnss-outages-near-ukraine-conflict#group-easa-downloads. [Haettu 25 Maaliskuu 2022].

[10] M. Vermeer, *Navigoinnin menetelmät: Johdatus teknologiseen navigointiin,* Aalto University, 2020, p. 344.

[11] ”FAA National Headquarters (FOB–10B), Mission Support Services Policy (AJV-P), Navigation Aids,” 2022.

[12] M. Travagnin, ”Cold atom interferometry for inertial navigation sensors,” *Publications Office of the European Union,* 2020.

[13] A. Einstein, B. Podolsky ja N. Rosen, ”Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?,” *Phys. Rev.,* osa/vuosik. 47, nro 10, p. 777–780, 5 1935

[14] M. &. A. Electronics, ”DARPA eyes photonic integrated circuits for non-GPS position, navigation, and timing (PNT),” 1.8.2018 Elokuu 2018. [Online]. Available: https://www.militaryaerospace.com/computers/article/16726508/darpa-eyes-photonic-integrated-circuits-for-nongps-position-navigation-and-timing-pnt. [Haettu 28.10.2021 Lokakuu 2021].

[15] L. P. &. T. A. Saunders, Research Methods for Business Students, 6. painos toim., Pearson Education Limited, Italia, 2012.

[16] G. T. Schmidt, ”Navigation sensors and systems in GNSS degraded and denied environments,” Chinese Journal of Aeronautics, osa/vuosik. 28, pp. 1–10, 2015.

[17] G. Schmidt, ”INS/GPS Technology Trends, NATO RTO Lecture Series, RTO-EN-SET-116,” *Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology,* 2011.

[18] M. A. Lombardi, ”The evolution of time measurement, Part 2: quartz clocks [Recalibration],” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine,* osa/vuosik. 14, pp. 41–48, 2011.

[19] M. A. Lombardi, ”The evolution of time measurement, part 3: atomic clocks [Recalibration],” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine,* osa/vuosik. 14, pp. 46–49, 2011.

[20] M. Travagnin, Chip-scale atomic clocks : physics, technologies, and applications, Publications Office, European Commission and Joint Research Centre, 2021.

[21] P. A. M. Dirac ja others, The principles of quantum mechanics, Oxford university press, 1981.

[22] M. Travagnin, ”Cold atom interferometry sensors, physics and technologies,” 2020.

[23] S. Khatri ja M. M. Wilde, ”Principles of quantum communication theory: A modern approach,” *arXiv preprint arXiv:2011.04672,* 2020

[24] F. Cavaliere, E. Prati, L. Poti, I. Muhammad ja T. Catuogno, ”Secure Quantum Communication Technologies and Systems: From Labs to Markets,” *Quantum Reports,* osa/vuosik. 2, p. 80–106, 2020

[25] J. Rubio, P. A. Knott, T. J. Proctor ja J. A. Dunningham, ”Quantum sensing networks for the estimation of linear functions,” *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical,* osa/vuosik. 53, p. 344001, 8 2020

[26] X. Guo, C. R. Breum, J. Borregaard, S. Izumi, M. V. Larsen, T. Gehring, M. Christandl, J. S. Neergaard-Nielsen ja U. L. Andersen, ”Distributed quantum sensing in a continuous-variable entangled network,” *Nature Physics,* osa/vuosik. 16, pp. 281–284, 2020

[27] L. de Broglie, ”Recherches sur la théorie des Quanta,” *Ann. Phys. Migration – université encours d'affectation,,* osa/vuosik. 10, pp. 22–128, 1925.

[28] R. B. Griffiths, Consistent Quantum Theory, Cambridge University Press, 2002.

[29] R. Dumke, Z. Lu, J. Close, N. Robins, A. Weis, M. Mukherjee, G. Birkl, C. Hufnagel, L. Amico, M. G. Boshier, K. Dieckmann, W. Li ja T. C. Killian, ”Roadmap on quantum optical systems,” *Journal of Optics,* osa/vuosik. 18, p. 093001, 8 2016

[30] M. Schilling, É. Wodey, L. Timmen, D. Tell, K. H. Zipfel, D. Schlippert, C. Schubert, E. M. Rasel ja J. Müller, ”Gravity field modelling for the Hannover 10 m atom interferometer,” *Journal of Geodesy,* osa/vuosik. 94, 11 2020.

[31] Xu, Sun, Berman, Duncan G. Steel, Allan S. Bracker, D. Gammon ja L. J. Sham, ”Coherent population trapping of an electron spin in a single negatively charged quantum dot,” *Nature Phys,* osa/vuosik. 4, p. 692–695, 2008.

[32] J. Kosola, Vaatimustenhallinnan opas, Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos, Julkaisusarja 5, No 12, 2013.

[33] ”Commission Decision C(2014)4995, Annex 22, Part G, Technology readiness levels (TRL),” 2014.

[34] K. Kubiak, ”Quantum Technology and Submarine Near-Invulnerability,” 2020.

[35] DARPA, ”Micro-Technology for Positioning, Navigation and Timing (Micro-PNT) (Archived),” Defense Advanced Research Projects Agency, [Online]. Available: https://www.darpa.mil/program/micro-technology-for-positioning-navigation-and-timing. [Haettu 11 11 2022].

[36] R. Geiger, A. Landragin, S. Merlet ja F. Pereira Dos Santos, ”High-accuracy inertial measurements with cold-atom sensors,” *AVS Quantum Science,* osa/vuosik. 2, p. 024702, 2020.

[37] M. Travagnin, ”Next-Generation Chip Scale Atomic Clocks,” *Joint Research Centre (JRC),* 2022.

[38] M. Borowczak, ”Side Channel Attack Resistance: Migrating towards High Level Methods,” 2013.

[39] H. Young ja R. Freedman, University Physics with Modern Physics, 13. painos, Boston: Pearson, Addison-Wesley, 2012

[40] J. Kosola ja T. Solante, Digitaalinen taistelukenttä -informaatioajan sotakoneen tekniikka, Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos, 2013