Satelliittiteknologian merkitys sotilastoiminnassa: Tulevaisuuden ennakointia vuoteen 2035 asti

Professori Marko Höyhtyä, Maanpuolustuskorkeakoulu

Abstract

This review article analyses the role of satellite technologies in military operations, providing technology foresight until 2035. We analyze the performance of commercial systems including satellite communications, remote sensing, and positioning systems. Development trends in each technology area is given, for example discussing what are the capabilities that 6G will bring to military users and how Galileo system will provide encrypted and highly accurate services to the critical users. Then, a short history of satellite technologies in wars since 1990's is described, highlighting the increased importance of satellites and commercial satellite technologies. Recent examples from ongoing Russo-Ukrainian war are given. The article provides a classification of military satellite capabilities and discusses how satellite technologies will evolve during the next decade. A roadmap outlining the important future developments is defined and a short discussion regarding on-going national foresight work and initial findings on the critical change factors is given. The article works both as an introduction to satellite capabilities and how they are used to support operations on Earth as well as a roadmap to the future.

Johdanto

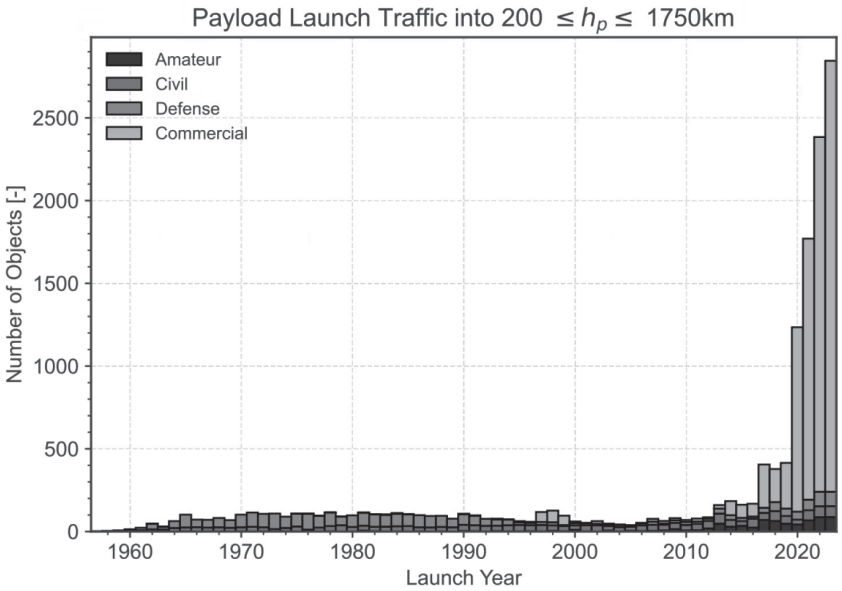
Puolustusvoimien tärkein tehtävä ja olemassa olon oikeutus on uskottavan puolustuskyvyn luominen ja ylläpitäminen – ja tarvittaessa tätä kykyä käyttämällä niin ennalta ehkäistä kuin torjua Suomea vastaan kohdistuvat sotilaalliset uhkat (Kosola 2007). Tätä tehtävää ei pystytä toteuttamaan ilman soveltuvaa teknologista suorituskykyä, joka on sekä toimintavarmaa että joukoille hyvin koulutettua. Teknologiaennakoinnin avulla pyritään identifioimaan potentiaaliset mahdollisuudet ja uhkat, joita uudet teknologiat tuovat tullessaan. Tähän liittyy siviiliteknologian kehityksen aktiivinen seuraaminen, ympäristön ja

yhteiskunnan muuttumisen seuranta ja geopoliittisen pelikentän vaikutusten ymmärtäminen. Tärkeässä roolissa on käynnissä olevien sotien ja konfliktien tarkka analyysi ja niistä omaan toimintaan otettavat opit. Esimerkiksi Ukrainan sota on näyttänyt niin droonitoiminnan kuin kaupallisen avaruusteknologian merkityksen kasvun ja voidaankin sanoa, että Ukrainan sodassa satelliittiteknologian merkitys on ollut suurempi kuin missään ihmiskunnan aiemmassa konfliktissa (Höyhtyä & Uusipaavalniemi 2023).

Avaruusteknologia viittaa tässä artikkelissa järjestelmiin, joiden integraalisena osana ja mahdollistajana ovat avaruudessa kiertoradallaan lentävät satelliitit ja niiden hyötykuormat. Satelliittiteknologiaa käytetään tukemaan toimintaa maassa monin eri tavoin. Tärkeimmät maan päällä tapahtuvaa toimintaa tukevat sovelluskohteet ovat 1) Viestinnän mahdollistaminen kaikkialla, 2) Paikannus ja ajastuspalvelut, 3) Kaukokartoituspalvelut. Lisäksi satelliiteilla on tärkeitä tieteellisiä tehtäviä ja kaikkia edellä mainittuja teknologioita hyödynnetään avaruustieteessä, joka on neljäs tärkeä sovelluskohde. Avaruustiede pyrkii mm. ennustamaan avaruussäätä ja tarjoamaan näin ajantasaista avaruustilannekuvaa myös puolustusvoimien käyttöön (Tanskanen et al. 2024).

Satelliittien tarjoamat palvelut ovat luonteeltaan kaksoiskäyttöisiä ja lisäävät sotilastoiminnan suorituskykyä. Siinä missä sosiaalisen median käyttäjä voi lähettää reaaliaikaista videota tietystä paikasta seuraajilleen Starlinkin terminaalin avulla, voi sotilaskäyttäjä hyödyntää samaa järjestelmää ajantasaisen tilannekuvan saamiseen taistelukentältä. Tämä on havaittu mm. Ukrainan sotaa seuratessa. Avaruusteknologia kehittyy kaupallisella puolella erittäin nopeasti ja satelliittien määrä on kasvanut muutamassa vuodessa jo yli 10000 satelliittiin. Näistä ylivoimaisesti suurin osa on matalilla kiertoradoilla olevia viestintäsatelliitteja, joilla tarjotaan tietoliikennepalveluita niin siviilikäyttäjille kuin viranomaistoimijoille ja sotavoimille kaikkialla maailmassa. Myös kuvantavien satelliittien määrä kasvaa jatkuvasti ja paikannussatelliittien suorituskyky paranee sukupolvi toisensa jälkeen.

Kuvassa 1 on esitettynä lähteen (ESA 2024) mukainen matalille kiertoradoille laukaistujen satelliittien määrä vuosittain koko avaruustoiminnan historiassa vuodesta 1957 lähtien. Kuvasta nähdään selvästi kaupallisen toiminnan dominointi 2020-luvulla. Satelliittien lukumäärän nopeasti kasvaessa on ajantasainen avaruustilannekuva ja avaruusliikenteen hallinta koko ajan tärkeämpää myös avaruusturvallisuuden kannalta (Höyhtyä et al. 2022, ESA 2024). Satelliitit liikkuvat kiertoradallaan kymmenen kertaa kiväärin luotia nopeammin, yli seitsemän kilometriä sekunnissa. Törmäys toiseen satelliittiin tai pieneenkin muovin tai alumiinin kappaleeseen voi näissä nopeuksissa tehdä satelliitista avaruusromua ja lisää riskiä uusille törmäyksille. Jotta törmäyksiltä jo olemassa olevaan avaruusromuun ja tarkoituksellisestikin normaaleilta kiertoradoilta



Kuva 1. Matalille LEO-kiertoradoille vuosittain laukaistujen satelliittien määrä kategorioittain. Kuva lähteestä (ESA 2024).

poikkeaviin satelliitteihin voidaan välttyä, on oltava hyvät havainnointijärjestelmät niin maassa kuin avaruudessa. Lisäksi satelliitteihin kehitetään väistämiskykyä. Toisaalta väistöt kuluttavat arvokasta ratakorjauksiin tarvittavaa polttoainetta ja vähentävät näin satelliittien käyttöikää.

Sotateknologia pohjautuu yhä enemmän siviiliteknologiaan ja kaksikäyttöisiin tuotteisiin. Tästä huolimatta sotilaskäyttöön valjastettu järjestelmä eroaa merkittävästi siviiliteknologian luonteesta johtuen vastustajasta ja hänen toiminnastaan. Vastustaja pyrkii tiedustelemaan ja oppimaan järjestelmiämme ja niissä käytettyjä tekniikoita sekä vaikuttamaan niihin tai jopa tuhoamaan ne. Sotatekniikassa on käynnissä jatkuva toimenpideketju, jossa jokaiselle toimelle pyritään kehittämään vastatoimi. On seurattava vastustajan toimintaa ja opittava jatkuvasti uutta, pidettävä yllä turvallisuutta ja osattava salata ja harhauttaa vastapuolta omassa toiminnassa. Oikeilla valinnoilla voidaan saavuttaa tietyillä osa-alueilla ylivertainen suorituskyky ja lukumääräisesti suurempaan viholliseen verrattuna merkittävä etulyöntiasema. Tässä artikkelissa tarkastellaan erityisesti satelliittiteknologian erityispiirteitä, kehitystä ja merkitystä tulevaisuuden sotilastoiminnassa. Kaupallisten avaruusjärjestelmien käyttö tuo mukanaan omia haasteita. Tuleeko vastustajalle kyvykkyyksiä tarjoavasta yrityksestä sotilaskohde?

Avaruusteknologian erityispiirteitä

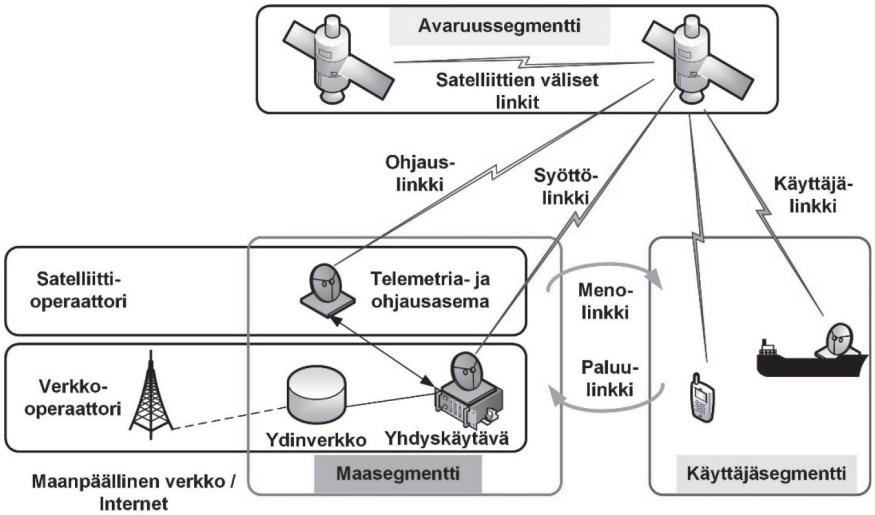
Ennen kuin sukellamme erilaisten avaruusjärjestelmien tulevaisuuden näkymiin, on hyvä käydä läpi kaikkien satelliittijärjestelmien erityispiirteitä ja toimintaperiaatteita. Tämä auttaa ymmärtämään, kuinka järjestelmät on toteutettu ja antaa pohjatiedon tulevaisuuden ennakoinnin ja sovellettavuuden näkökulmasta.

Toimii kaikkialla: Avaruusteknologia eroaa merkittävästi melkein kaikista muista teknologioista siinä, että se ei välitä maan rajoista. Satelliitit liikkuvat kiertoradallaan maapallon ympärillä, mahdollistaen globaalit palvelut. Esimerkiksi viestintäsatelliitit tarjoavat infrastruktuurin, jonka avulla samoilla päätelaitteilla voidaan toteuttaa yhteydet maalla, merellä ja ilmassa myös eri maiden alueilla toimittaessa.

Kiertoradat voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan eli matalaan kiertorataan (LEO, Low Earth Orbit), keskikorkeaan kiertorataan (MEO, Medium Earth Orbit) ja geosynkroniseen kiertorataan (GEO). Lisäksi erityisesti napa-alueiden peittämiseksi pienellä satelliittimäärällä käytetään HEO-ratoja (Highly Elliptical Orbit). GEO-radalla koko maapallon kattamiseen arktisia alueita lukuun ottamatta tarvitaan vain kolme satelliittia, jotka on sijoitettu 35 786 kilometrin korkeudelle päiväntasaajan yläpuolelle. LEO-radoilla eli alle 2000 km ratakorkeudella voidaan saavuttaa koko maapallon peitto, mutta tarvitaan huomattavasti enemmän satelliitteja. Viestintäjärjestelmissä mennään useiden satojen satelliittien kokonaisuuteen, kun halutaan kaikkialla koko ajan toimivat yhteydet. MEO-radat ovat erityisesti paikannus- ja navigointijärjestelmien, kuten GPS ja Galileo, käytössä. Tärkeänä tutkimus- ja kehityskohteena ovat monikerrosverkot, joissa voidaan fiksulla tavalla yhdistää eri kiertoradoilla olevat satelliitit samaan järjestelmään. Näin saadaan yhdistettyä vaikkapa GEO-satelliitin laajat peittoalueet ja tasainen viive LEO-järjestelmien suureen kapasiteettiin ja mataliin, mutta vaihtuviin viiveisiin (Höyhtyä et al., 2024). Tällä saadaan toiminnalle resilienssiä ja voidaan tehdä älykästä reititystä eri sovellusten ja käyttäjien vaatimusten mukaisesti.

Hajautettu arkkitehtuuri: Satelliittijärjestelmien osat on hajautettu maantieteellisesti kauas toisistaan. Ylätasolla järjestelmä voidaan jakaa kolmeen pääsegmenttiin tai -lohkoon kuten kuvassa 2 esitetään. Kuvattujen lohkojen lisäksi erillinen tärkeä kokonaisuus on laukaisutoiminta, jolla satelliitit saadaan halutulle paikalleen kiertoradalla.

1) Avaruussegmentti sisältää satelliitit ja niiden väliset suorat viestintäyhteydet eli satelliittien väliset linkit. Satelliitteja voi olla yksi tai useampi. Kun samaan satelliittijärjestelmään kuuluu useampi satelliitti, siitä käytetään nimitystä konstellaatio. Tyypillisesti kyseessä on vähintäänkin kymmeniä



Kuva 2. Satelliittijärjestelmän lohkot ja tiedonsiirtolinkit. © Marko Höyhtyä

satelliitteja sisältävä kokonaisuus, mutta konstellaatiossa voi olla tuhansiakin satelliitteja.

2) Maasegmentin tärkeimmät osat ovat telemetria- ja ohjausjärjestelmä, jolla operoidaan satelliittia ja sen hyötykuormaa sekä maa-asema (yhdyskäytävä), jolla kytkeydytään ulkopuoliseen verkkoon ja jossa sijaitsevat usein myös datan analysointiin ja laskentaan liittyvät toiminnot.
3) Käyttäjäsegmentti eli käyttäjät ja heidän päätelaitteensa kuten Starlink-terminaalit, älypuhelimet tai erilliset paikannuslaitteet. Päätelaitteilla käytetään satelliittijärjestelmän tarjoamia palveluita kuten Internet-yhteyksiä tai paikannusta ja navigointia haluttuun kohteeseen.

Avaruustoiminnan jakautuminen. Varsinainen avaruustoiminta voidaan jakaa kolmeen luokkaan (Piirainen 2022, OECD 2022):

1) Avaruusteknologiaa tuottava toiminta (upstream), joka nimensä mukaisesti suunnittelee ja toteuttaa satelliitit ja niiden hyötykuormat, kantoraketit ja muun satelliittijärjestelmien tarvitseman teknologian. Tuottavaan toimintaan kuuluvat myös maa-asemien ylläpito ja operointi. Tämä on kaikkien avaruusohjelmien ja avaruustoiminnan tieteellinen, teknologinen ja teollinen perusta.
2) Soveltava avaruustoiminta (downstream), jossa olemassa olevia satelliitteja ja niiden tuottamaa dataa ja signaaleja hyödyntäen toteutetaan erilaisia palveluita käyttäjille. Tähän kuuluvat esimerkiksi paikannuslaitteiden valmistus ja erilaiset navigointisovellukset sekä kaukokartoitusdatan pohjalta tehdyt ohjelmistot ja palvelut kuten metsäpalovaroitukset.

3) Avaruusjohdannainen toiminta (space-derived) käsittää toiminnan, joka hyödyntää avaruustoimintaa varten kehitettyä teknologiaa, mutta millä ei ole enää suoraa yhteyttä avaruustoimintaan. Esimerkkejä ovat vaikkapa paikannusta hyödyntävät sovellukset kuten Woltin palvelut tai arktisiin olosuhteisiin suunnatut tekniset materiaalit, jotka pohjimmiltaan kehitettiin astronauttien käyttöön.

Satelliitin rakenne ja hyötykuorma: Satelliitin tärkein osa on hyötykuorma, joka määrittää syyn toimittaa satelliitti avaruuteen. Kaikki muut osat satelliitissa ovat olemassa sitä varten, että hyötykuorma (esim. optinen kamera) voi toteuttaa tehtävänsä. Satelliittialustan on oltava robusti ja sisällä olevaa elektroniikkaa hyvin suojaava. Sähköenergiaa tuotetaan aurinkopaneelien avulla ja lämmönsäätöjärjestelmä pitää laitteiston lämpötilan sopivalla tasolla. Satelliitin asentoa säädetään magneettivääntimien tai gyroskooppien avulla niin, että viestintäyhteydet ja kameroiden suuntaus kohteeseen on mahdollista. Sotilastoiminnan kannalta nämä ja kaikki muut tukijärjestelmät ovat kriittisen tärkeitä suojattavia, sillä ilman niiden haluttua toimintaa ei hyötykuormakaan voi suorittaa sille tarkoitettua tehtävää. Esimerkiksi asennonsäätöjärjestelmän lamauttaminen voi tehdä tiedustelusatelliitista käyttökelvottoman, koska ei voida suunnata satelliitin kameraa/sensoreita haluttuun suuntaan.

Kiinteä kytkeytyminen sotilastoimintaan: Avaruusteknologia on alusta lähtien ollut kiinteästi kytköksissä sotilastoimintaan ja puolustusjärjestelmiin. Tämä näkyy myös kaupallisten toimijoiden yksiköiden nimissä, joissa usein nähdään yhdistelmä ”Space and Defence”. Kuten Kuva 1 osoittaa, oli avaruustoiminta pitkälti valtio- ja sotilasvetoista toimintaa vuosikymmenten ajan. Tällä hetkellä kaupallinen toiminta on kasvanut voimakkaasti, mutta samalla kaikki maailman sotavoimat käyttävät yhä enemmän kaupallisia avaruuskyvykkyyksiä toimintansa tukemiseen niin rauhan kuin kriisin aikana.

Suora vaikuttaminen järjestelmään haastavaa**:** Avaruudessa oleviin osiin on hankalampi vaikuttaa kuin maan päällä oleviin osiin ja järjestelmiin ja onnistuu vain harvoilta valtiollisilta toimijoilta. Vaikuttamiseen on kuitenkin kehitetty erilaisia kyvykkyyksiä. Satelliitteja voidaan häiritä vahvoilla suunnatuilla häirintälähettimillä. Niihin voidaan pyrkiä vaikuttamaan kineettisesti esimerkiksi ajamalla satelliitti törmäyskurssille. Käytetään myös varsinaisia vasta-avaruuskykyjä ja aseita (ASAT, anti-satellite weapon) ja tuhotaan kiertoradalla oleva satelliitti ohjusiskulla. Vasta-asekyvykkyyttä ovat demonstroineet niin USA, Venäjä kuin Kiinakin. Pääasiassa vaikuttamaan pyritään kuitenkin maasegmentin kautta.

Kyberulottuvuus. Avaruusjärjestelmiä kohtaan suoritetaan paljon erilaisia kyberoperaatioita. Itse satelliittiin on vaikea päästä käsiksi fyysisesti, mutta esimerkiksi Venäjä pyrkii viemään Luch-vakoilusatelliittejaan viestintäsatelliittien

läheisyyteen voidakseen nauhoittaa lähetyksiä ja purkaa niitä rauhassa päästäkseen käsiksi viestinnän sisältöön (Rummukainen 2023). Pääasiassa kyberiskut pyritään suuntaamaan maa-asemiin ja pääsemään niiden kautta lamauttamaan järjestelmää tai muuttamaan sitä käyttökelvottomaksi. Tärkeä osa-alue tulevaisuuden järjestelmien suojaamisessa on toimitusketjun tietoturva, ettei vastapuoli pääse käsiksi esimerkiksi asennonsäätöjärjestelmän komponentteihin ja ohjelmistoon.

Teknologian kehitys ja kaupallisten järjestelmien suorituskyky

On useita eri tapoja jaotella satelliittijärjestelmiä niiden tarjoamien palveluiden perusteella. Fundamentaalisesti kaupalliset järjestelmät jakautuvat kolmeen pääluokkaan eli viestintään, kaukokartoitukseen ja paikannukseen. Lisäksi on olemassa erillisiä avaruustieteisiin ja avaruustilannekuvan muodostamiseen ja ylläpitämiseen tarkoitettuja järjestelmiä. Pääluokkien satelliittien tehtävät ja käytössä olevien satelliittien lukumäärät toukokuussa 2023 on esitetty Taulukossa 1 ja tarkemmat kuvaukset kustakin luokasta omissa kappaleissaan.

Taulukko 1. Satelliittijärjestelmien luokittelu ja satelliittien lukumäärät (UCS 2023).

Pääluokka	Päätehtävä	Lukumäärä (5/2023)	Tyypilliset kiertoradat
Viestintä	Yhteydet ihmisille ja laitteille, myös siellä missä maanpäälliset verkot eivät mahdollisia.	5524	LEO ja GEO
Kaukokartoitus /tiedustelu	Maapallon ja siellä olevien kohteiden kuvantaminen. Ilmakehän seuranta.	1259	LEO
Paikannus	Paikannus-, navigointi- ja aikasignaalipalvelut.	154 yhteensä, kussakin GNSS-järjestelmässä 20–30 satelliittia.	Keskikorkea MEO-rata

Satelliittiviestintä

Mitä se on: Satelliittiviestintä käsittää kaiken sellaisen tiedonsiirron, jossa yhtenä osana viestintäpolkua data kulkee satelliitin kautta. Tavoitteena on useimmiten kommunikoida kahden maan päällä olevan pisteen välillä hyödyntäen satelliitin tarjoamaa viestintäyhteyttä. Käyttäjänä voi olla myös lentokone tai muu lentävä laite. Satelliitit ovat oleellinen osa globaalisti käytettävissä olevia tiedonsiir-

tojärjestelmiä ja mantereiden välistä liikennettä ohjataan jatkuvasti satelliittien kautta. Pääasiallisina sovelluskohteina ovat olleet ihmisten väliset puhe- ja datayhteydet, mutta enenevissä määrin myös sensoridatan siirto ja koneiden välinen viestintä. Meri- ja ilmaliikenteessä kommunikointi ei onnistu ilman satelliittiyhteyksiä. Käytännössä kaikissa satelliiteissa on oltava kyky kommunikoida maaaseman kanssa eli myös paikannus- ja kaukokartoitussatelliitit on varustettu satelliittiviestinnän mahdollistavilla järjestelmillä. Reaaliaikaisen tiedonsiirron ja puheviestinnän mahdollistavat viestintäjärjestelmät suunnitellaan niin, että käyttäjä voi olla yhteydessä vähintään yhden satelliitin kanssa mihin tahansa aikaan toimittaessa. IoT- ja sensoridataan liittyvät satelliitit taas voivat kerätä sensorin datan yli lentäessään ja purkaa sen sitten vaikkapa kahden tunnin päästä maa-asemalle ylilennon aikana.

Viestintämenetelmät: Käytettyjä menetelmiä voidaan jakaa sekä käyttötavan että teknologian mukaan. Käyttäjä voi olla yhteydessä satelliittiin joko suoraan tai epäsuorasti. Jälkimmäinen tapa tarkoittaa tapausta, jossa varsinainen satelliittilinkki luodaan kyvykkään satelliittipäätelaitteen avulla ja varsinainen käyttäjälaite kuten kännykkä tai sensori on yhteydessä reitittävään laitteeseen maanpäällisen radioteknologian kuten 5G tai WiFi avulla. Suurin osa satelliittiyhteyksistä toteutetaan radiotaajuuksilla. Matalimmat taajuudet kuten 1-2 GHz kaistat tarjoavat luotettavat yhteydet kaikkiin sääolosuhteisiin, mutta kapasiteetiltaan ne ovat rajoittuneita. Korkeilla yli 10 GHz taajuuksilla saadaan suuret datanopeudet laitteisiin. Esimerkiksi Starlinkin laitteilla saavutetaan parhaimmillaan yli 60 Mbps siirtonopeus laitteesta satelliitin suuntaan ja yli 250 Mbps satelliitista laitteelle. Korkeammilla taajuuksilla yhteydet muuttuvat alttiimmiksi häiriöille ja voivat katketa kovalla vesisateella. Radiosignaalien lisäksi käytössä on myös laseryhteyksiä etenkin satelliittien välillä, mutta myös satelliiteista maahan. Näitä yhteyksiä tarvitaan esimerkiksi kvanttiavainten siirrossa erittäin luotettavien yhteyksien luomiseksi.

Trendit ja kehityssuunnat:

3GPP-kehitystyö ja suorat yhteydet pieniin päätelaitteisiin: Perinteisesti satelliittijärjestelmät on toteutettu omina erillisinä järjestelminään eikä niillä ole ollut todellista yhteistoimintakykyä. Starlink-satelliitteihin voi olla yhteydessä vain Starlinkin omilla päätelaitteilla. Sama koskee myös OneWeb-järjestelmää, Iridiumin ratkaisua ja niin edelleen. Standardointijärjestö 3GPP (3rd Generation Partnership Project) pyrkii standardoimaan tulevaisuuden satelliittijärjestelmien teknologiat ja rajapinnat niin, että samalla päätelaitteella voisi olla yhteydessä usean eri operaattorin järjestelmään samalla tavalla kuin maanpäällisissä verkoissa on tilanne. Koko satelliittiviestinnän historian merkittävimmäksi liiketoimintamahdollisuukseksi on arvioitu suorat yhteydet satelliittien

ja pienten päätelaitteiden välillä. Jos tavallisella älypuhelimella voidaan kytkeytyä verkkoon satelliitin kautta, voi käyttäjämäärä kasvaa nopeasti satoihin miljooniin. Suoriin yhteyksiin on kolme vaihtoehtoista toteutustapaa (Fu et al. 2023). 1) Käytetään jo olemassa olevia satelliitteja kapeakaistaiseen hätäviestintään. Tämä on toteutettu mm. Applen iPhone -puhelimeen matalan kiertoradan Globalstar-yhteyksien kautta. 2) Integroidaan älypuhelimeen standardoitu kapeakaistainen IoT-yhteys kuten NB-IoT. Teknologia on tähänkin jo olemassa ja pieniä demonstraatiosatelliitteja on kiertoradalla. 3) Päätavoite standardoinnissa on toteuttaa laajakaistaiset 5G-yhteydet satelliitin ja päätelaitteen välillä. Tämä tulee toteutumaan lähivuosina ja tulee muokkaamaan voimakkaasti koko satelliittiviestintämarkkinoita. 5G ja 6G ovat Naton listoilla tulevaisuuden sotilastoimintaa disruptoivia teknologioita (NATO 2024).

Suuret ja matalaviiveiset LEO-konstellaatiot: Merkittävimmät viime vuosien kehityshankkeet ovat kaikki olleet satojen tai jopa tuhansien satelliittien matalien kiertoratojen konstellaatioita. Näihin kuuluvat jo yli 6000 satelliitin Starlink, noin 600 satelliitin OneWeb ja kiinalaisten 13 000 satelliitin suunnitelmat. Ne tarjoavat edellisen sukupolven satelliittijärjestelmiin verrattuna suurempia datanopeuksia, matalampia viiveitä ja toimivat myös arktisilla alueilla. Trendi selvästi jatkuu ja lupia on haettu eri toimijoiden toimesta kymmenille tuhansille uusille satelliiteille niin Kiinasta, Euroopasta kuin Yhdysvalloista. Kaikki järjestelmät eivät varmasti tule kaupallisesti pärjäämään. Starlink on päässyt jo taloudellisesti plussan puolelle.

Monikerrosverkot: Jokaisella järjestelmäarkkitehtuurilla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. GEO-satelliitin vahvuutena on laaja peittoalue ja vakiona pysyvä viive. Heikkoutena taas järjestelmän rajallinen kapasiteetti ja viiveen pituus pitkästä viestintäetäisyydestä johtuen. LEO-järjestelmän vahvuus on kokonaiskapasiteetti, toiminta arktisilla alueilla ja matalat viiveet. Heikkoutena taas on viiveiden vaihtelu ja tarve vaihtaa satelliiteilta toiselle muutamien minuuttien välein. Tällä hetkellä kehitystrendinä ovatkin monikerrosverkot, joissa pyritään integroimaan saumattomasti yhteen eri kiertoradoilla olevat satelliittijärjestelmät ja näin saamaan aikaa erittäin korkea saatavuus ja suuri resilienssi (Höyhtyä et al. 2024). EU kehittelee omaa monikerrosjärjestelmää kilpailemaan Starlinkin kanssa ja tukemaan kriittisiä käyttäjiä niin rauhan kuin sodan aikana. Tälle hankkeelle on annettu nimi IRIS^2 (Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite). Hankkeen kunnianhimoinen aikataulu on saada järjestelmä operatiiviseen kuntoon jo 2027 mennessä (EUSPA 2024). Tämä tuskin tulee kokonaisuudessaan toteutumaan.

Kaukokartoitus ja tiedustelu

Mitä se on: Kaukokartoitus tarkoittaa etämittausta, jossa mittalaite on kaukana kohteestaan esimerkiksi satelliitin tai ilma-aluksen kuten helikopterin, droonin tai lentokoneen kyydissä. Paikalla tehtävään *in situ*-mittaukseen verrattuna etuina ovat maantieteellisesti kattavat mittaukset kustannustehokkaasti pitkiltäkin ajanjaksoilta. Tärkeimmät kaukokartoituksen sovelluskohteet ovat maanpinnalla ja ilmakehässä tapahtuvien ilmiöiden havainnointi ja ennustaminen sekä eri sovellusalueille tehtävät tilannekuvapalvelut. Satelliitit ovat merkittävin ilmastonmuutoksen seurannan työkalu ja niiden avulla mitataan niin ilmakehässä tapahtuvia muutoksia kuin vaikkapa jäätiköiden pienentymistä. Tärkeitä sovelluskohteita ovat luonnonvarojen kartoitus ja valvonta kuten metsätaloudelle tehdyt sovellukset sekä pelastus ja katastrofinhallintatehtävät, joissa satelliittien avulla saadaan esimerkiksi ajantasaista tulvatilannekuvaa. Satelliittien datan pohjalta on koko ajan käynnissä lukuisia tutkimushankkeita, joissa kehitetään yhä uusia sovelluskohteita.

Kaukokartoitusmenetelmät voidaan jakaa kahteen pääluokkaan eli passiivisiin ja aktiivisiin menetelmiin. Passiiviset menetelmät perustuvat siihen, että lentävässä laitteessa oleva instrumentti mittaa ja kerää kohteen heijastamaa sähkömagneettista säteilyä optisilla aallonpituusalueilla. Toimitaan siis päiväaikaan ja kerätään dataa kohteesta myös säiden armoilla. Pilvisellä kelillä ei satelliitin keräämä data ole juuri käyttökelpoista. Useissa sovelluksissa ja alueilla kuvausolosuhteet ovat sopivat ja näkyvillä aallonpituuksille sekä infrapunaalueen aallonpituuksilla toimittaessa mahdollistetaan kasvillisuuden seurantaan ja luokitteluun tai vaikkapa täsmämaanviljelyyn liittyviä sovelluksia. Kun erottelukyky maassa on luokkaa 10 metriä (pikselikoko), puhutaan jo korkean resoluution optisesta satelliitista. Parhaimmillaan kaupalliset järjestelmät kuten Ukrainan alueelta mediassa paljon käytetty Maxar pääsevät jopa 30 sentin erottelukykyyn. Tällä pystytään jo varsin hyvin identifioimaan kohteita.

Aktiiviset tutka- ja lidar-järjestelmät toimivat niin, että mittaava instrumentti lähettää signaaleita ja mittaa näiden heijastuksia. Satelliiteista kuvattaessa käyttökelpoisia ovat lähinnä radiosignaaleihin perustuvat tutkat. Esimerkiksi synteettisen apertuurin tutka (SAR) mahdollistaa kuvauksen pilvien läpi ja yöaikaan toimittaessa ja näin laajentaa huomattavasti käyttökelpoista datankeruuaikaa. SAR-kuvausta käytetään esimerkiksi metallisten kohteiden löytämiseen ja tulvavahinkojen seurantaan. Parhaat maaresoluutiot kaupallisissa järjestelmissä ovat pikselikooltaan 25 cm x 25 cm. Haasteena aktiivisessa SAR-kuvantamisessa on energian kulutus pienissä satelliiteissa ja siitä seuraavat vähäiset kuvausajat per ratakierros.

Trendit ja kehityssuunnat:

Reaaliaikaisuus: Perinteiset kaukokartoitussatelliitit kuten Euroopan Copernicus-järjestelmän Sentinel-2 pystyy kuvaamaan samaa paikkaa maapallolla viiden päivän välein 10–60 metrin spatiaalisella erottelukyvyllä käytetystä aallonpituudesta riippuen. Se toimii ihan hyvin moneen ympäristön seuraustarpeeseen. On kuitenkin selkeä tarve pystyä tarkempaan ja reaaliaikaisempaan seurantaan useissa eri käyttötapauksissa mukaan lukien sotilastoiminta. Siksi tällä hetkellä kehitetään paljon konstellaatioita, joilla aikaresoluutio saadaan paremmaksi. Kuvia voidaan ottaa joka vuorokausi tai jopa muutamien tuntien välein. Tämä on tavoitteena amerikkalaisessa Planet-järjestelmässä ja suomalaisten yritysten hankkeissa. Iceyen lisäksi Kuva Space on rakentamassa sadan satelliitin hyperspektrikuvauksen järjestelmää 2030 mennessä. Ensimmäinen Hyperfield-1 satelliittin laukaistiin kiertoradalleen elokuussa 2024.

Tekoälylaskennan kehitys: Koko ajan lisääntyvä ja reaaliaikaisempi kaukokartoitusdata tarvitsee käyttökelpoiseksi informaatioksi muuttamiseen tehokkaita analysointi- ja laskentamenetelmiä. Luotettavat, kestävät ja skaalautuvat koneoppimismenetelmät on identifioitu tärkeäksi kehityskohteeksi (Piirainen et al. 2022). Neuroverkkomenetelmiä ja pilvilaskentaa kehitetään jatkuvasti. Toisaalta mietinnässä on ollut myös reunalaskennan ratkaisut turhaa dataa vähentämään. Yksinkertaisimmillaan optinen satelliitti osaisi itse havaita ottaneensa kuvan pelkästä pilvestä eikä lähettäisi tätä maa-asemalle analysoitavaksi.

Federoidut järjestelmät: Naton APSS (Allied Persistence Surveillance From Space) on suurin monikansallinen avaruusinvestointi koko allianssin historiassa. Tavoitteena on yhdistää seitsemäntoista jäsenmaan (ml. Suomi, Norja ja Ruotsi) valtiollisten ja kaupallisten toimijoiden avaruudellisia suorituskykyjä uuteen virtuaaliseen ”Aquila”-konstellaatioon. MoU allekirjoitettiin osallistuvien maiden kesken heinäkuussa 2024 ja samalla siirryttiin viisivuotiseen toteutusvaiheeseen, jonka aikana panostetaan kehitykseen yli miljardi dollaria. Julkisten tietojen mukaan ensimmäinen kaupallinen toimija, joka tuottaa APSS-järjestelmälle dataa ja kyvykkyyksiä on Planet Labs, joka operoi noin kahtasataa kaukokartoitussatellittia (Air & Space Forces Magazine 2024). Tavoitteena on pystyä monitoroimaan maalla ja merellä olevia kiinnostavia alueita ja kohteita aiempaa paremmalla resoluutiolla niin ajallisesti kuin spatiaalisesti.

Saman suuntaista prosessia tehdään Euroopassa määritellyn avaruusstrategian mukaisesti eli tavoitteena on kasvattaa alueellista suvereniteettia ja vähentää riippuvuutta ulkopuolisista toimijoista. Euroopan puolustusrahasto EDF:n rahoittama SPIDER (Space based Persistent ISR for Defence and Europe Reinforcement) on käynnissä oleva hanke, jossa Suomea edustaa Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy. Hankkeessa on mukana 15 EU:n maata sekä Norja ja kehitystä vetää Ranskan Airbus & Defence. Myös tässä hankkeessa iden-

tifioidaan (eurooppalaiset) valtiolliset ja kaupalliset järjestelmät yhteen federoituun satelliittitiedustelujärjestelmään niin, että voidaan yhdestä käyttöliittymästä saada käyttöön halutulle alueelle niin tutka-, optista, signaalitiedustelu kuin tarvittaessa videodataakin.

Sekä APSS että SPIDER pyrkivät siihen, ettei käyttäjän tarvitse sopia jokaisen toimittajan kanssa erikseen dataa saadakseen, vaan järjestelmä tarjoaa tarvittavan tiedon halutulle ajanhetkelle. Toki kaupalliset lainalaisuudet on oltava mukana, jotta tarvittavat kaupalliset kyvykkyydet ovat yleensä saatavilla kyseisten federoitujen järjestelmien kautta.

Paikannus- ja aikapalvelut

Mitä se on: Paikannuspalvelut ja tarkka aika ovat toimivan yhteiskunnan kannalta kriittisen tärkeitä palveluita. Satelliittipaikannus perustuu useiden yhtä aikaa näkyvien navigaatiosatelliittien lähettämiin tarkkoihin aikasignaaleihin, joiden perusteella päätelaite kykenee laskemaan paikkansa muutaman metrin tarkkuudella (Kaplan & Hegarty 2017). Kaikissa navigointisatelliiteissa on tarkka atomikello, johon pohjautuvaa aikasignaalia sekä omaa sijaintitietoaan satelliitit lähettävät vastaanottimille. Neljällä satelliitilla saadaan paikka ratkaistua ja suuremmalla satelliittien määrällä tarkkuus kasvaa. Lisäksi on kehitetty ja edelleen kehitetään erilaisia tarkkuutta ja paikannuksen luotettavuutta lisääviä avusteita ja toiminnallisuuksia, joilla päästään parhaimmillaan senttimetriluokan tarkkuuteen. Satelliittipaikannuksen ja -ajastuksen avulla mahdollistetaan muun muassa etsi- ja pelasta -tehtävät, sujuvat liikennejärjestelyt ja sähköverkkojen toiminta sekä valtava määrä kuluttajille suunnattuja sovelluksia.

Paikannusmenetelmät: Satelliittipaikannukseen viitataan nykyisin termillä GNSS (Global Navigation Satellite System). On olemassa neljä erillistä GNSS-järjestelmää, jotka ovat peräisin USAsta (GPS), Venäjältä (GLONASS), Kiinasta (Beidou) sekä Euroopasta (Galileo). Eurooppalaisittain kehityksestä vastaa Euroopan unionin avaruusohjelmavirasto EUSPA, joka johtaa Galileo-järjestelmän kehitystä. Galileo on kokonaan siviilien ylläpitämä järjestelmä, jota käytännössä kaikki modernit päätelaitteet tukevat. Paikannusta voidaan tehdä yhden GNSS-järjestelmän signaaleilla, yhdistämällä useiden järjestelmien signaaleja ja käyttäen erilaisia avustepalveluita. Pelkkään satelliittipaikannukseen pohjautuen päästään tyypillisesti joidenkin metrien tarkkuuteen ja tämä riittää useissa sovelluksissa vallan mainiosti. Maanpäällisten referenssilähettimien avulla tarkkuus voidaan nostaa senttimetriluokkaan.

Trendit ja kehityssuunnat:
GNSS-riippumaton paikannus: Globaalit järjestelmät toimivat kohtalaisen kapeilla ja tunnetuilla kaistoilla ja vastaanottimia on kohtalaisen helppo häiritä. Ilmaliikenteessä on jatkuvasti GNSS-häiriöitä ja joudutaan muuttamaan lentosuunnitelmia ja reittejä. Paikka- ja aikatiedon kriittisyyden takia on panostettu yhä voimakkaammin löytämään vaihtoehtoisia tapoja ja GNSS-riippumattomia menetelmiä. 6G-verkkojen paikannuskyky tulee olemaan merkittäväsi parempi kuin aiemmissa mobiiliverkon sukupolvissa (Behravan 2023). Paikannuksen tarkkuus pitää olla senttimetriluokassa robottien ohjauksessa. Ratkaisuina käytetään korkeampia taajuuksia, heijastavia pintoja ja radiojärjestelmän monitorointiominaisuuksia. Tavoitteena on saavuttaa tarkka 3D-paikannus ja komplementoida GNSS-järjestelmän toimintaa sisätiloissa ja haastavissa ympäristöissä. Erittäin mielenkiintoinen kehityspolku on LEO-satelliittien käyttö paikannuksessa. Tästä on saatu paljon lupaavia tuloksia ja päästy senttimetriluokan tarkkuuteen (Prol et al. 2024). Tämä tarkoittaa, että tulevaisuudessa kolmiulotteinen 6G-verkko tuo merkittäviä uusia kyvykkyyksiä myös etäisille alueille.

Tietoturvallinen paikannus: Häirinnän lisäksi paikannukseen pyritään vaikuttamaan väärentämällä signaalia niin, että laite paikantaa itsensä väärään paikkaan. Tällöin kyseessä on spoofing-hyökkäys. Kyvykkäiden vastatoimien takia GNSS-järjestelmiä ei pystytä aina luotettavasti käyttämään ja tämä on ongelma ja sitä ratkaisemaan on kohdennettu paljon resursseja. Galileo PRS (Public Regulated Service) on viranomaispalvelu ja koko Euroopan suurin tietoturvahanke. PRS-palvelu kestää kybervaikuttamista ja häiriötä huomattavasti paremmin kuin normaali GNSS-palvelu (Kyberturvallisuuskeskus 2023). PRS-järjestelmän signaali on voimakkaampaa, sitä lähetetään kahdella taajuudella ja se on vahvasti salattua. Tällä parannetaan paikannuksen luotettavuutta vaikeissa oloissa ja häirinnän alla.

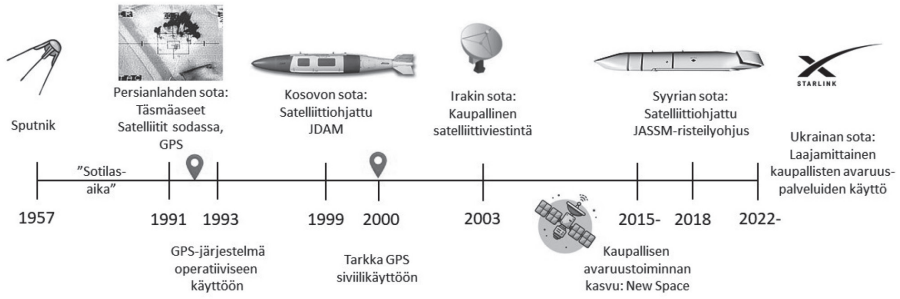
Avaruusteknologia nykyaikaisessa sodankäynnissä

Tällä hetkellä länsimaat mukaan lukien Yhdysvallat ja Eurooppa on vielä vahvin avaruustekijä maailmassa. Venäjän avaruustoimintaa on ponnistettu Putinin aikana vahvasti ylöspäin, vaikkakin kaluston suorituskyky on heikompaa ja teknologia osin vanhentunutta. Ukrainan sodan myötä länsimäisten komponenttien saatavuusongelmat ovat myös vaikuttaneet kehityksen hidastumiseen. Pakotteiden takia Venäjän kyky käyttää kaupallisia satelliittipalveluita on ollut varsin rajallinen. Kiina sen sijaan on panostuksillaan päässyt jo erittäin vahvaan asemaan ja haastaa tällä hetkellä Yhdysvaltoja jo tosissaan maailman herruu-

desta (Wall 2024). Vuodesta 2018 lähtien Kiina on jo triplannut tiedustelusatelliittiensa määrän ja kehittänyt merkittävän arsenaalin vasta-aseita avaruudessa käytettäväksi.

Avaruustoiminnan lyhyt sotilashistoria

Avaruusaika alkoi vuonna 1957, kun Neuvostoliitto onnistui laukaisemaan Sputnikin kiertoradalle. Tämä käynnisti suurvaltojen eli Yhdysvaltojen ja Neuvostoliiton välisen kilpajuoksun, jossa kehitettiin sekä uusia avaruudellisia suorituskykyjä että niiden vastatoimia. Kehitettiin teknologiaa tiedusteluun ja viestintään. Jo 1950-luvun lopulla ja 1960-luvun alussa oli testattu useita eri satelliittien tuhoamiskyvykkyyksiä aina yläilmakehässä räjäytettävästä ydinpommista lähtien. Satelliittipaikannuksen GPS-järjestelmää alettiin kehittämään 1970-luvulla ja operatiiviseen toimintaan se tuli 24 satelliitin konstellaatiolla 1993. Signaalia tarjottiin alkuun tarkempana sotilaskäyttöön kuin siviilikäyttöön. Tästä luovuttiin myöhemmin ja tarkemmat signaalit ovat olleet siviilienkin saatavilla vuodesta 2000 lähtien. Kuva 3 kuvaa tiivisti avaruustoiminnan satelliittihistoriaa aina Sputnikin ajoista käynnissä olevaan Ukrainan sotaan asti.



Kuva 3. Avaruustoiminnan sotilashistoria Sputnikista Ukrainan sotaan. © Marko Höyhtyä

1990-luku: Persianlahden sotaa käytiin 1990–1991 ja sitä on kutsuttu ensimmäiseksi satelliittiavusteiseksi sodaksi suureksi osaksi siitä syystä, että GPS tuli sotilaskäyttöön, auttaen Yhdysvaltoja operoimaan ja navigoimaan tehokkaasti aavikko-olosuhteissa. Sodassa otettiin käyttöön myös muita uusia teknologioita. Yhdeksän prosenttia pommeista oli laserohjattuja täsmäaseita, mutta ne aiheuttivat 75 % strategisten kohteiden tuhoista. Samalla huomattiin, että pilvinen sää estää tämän tyyppisten aseiden käytön ja alettiin kehittämään inertia- ja

satelliittipaikannukseen pohjautuvia JDAM-pommeja (Loeb 2002). Kosovon sodassa vuosikymmenen lopulla JDAMit olivat operatiivisessa käytössä tarjoten kustannustehokkaan vaihtoehdon (alle 20 k$ per kpl) risteilyohjuksille. Yli 650 satelliittiavusteisesti täsmäohjattua pommia pudotettiin kohteisiinsa suurella tarkkuudella ja ne olivat muuttamassa merkittävästi tapaa käydä sotia.

2000-luku: Jos edellisen vuosikymmenen järjestelmät olivat vielä vahvasti sotilasteknologiaa, alkoivat kaupalliset järjestelmät lisätä merkittävyyttään 2000-luvulle tultaessa. Irakin sodassa 2003 merkittävä osa viestinnästä toteutettiin kaupallisilla järjestelmillä. Yli 60 % sotilasviestinnästä siirtyi kaupallisten satelliittijärjestelmien yli, ja niiden suorituskyky bittinopeudella mitattuna oli parempi kuin sotilasjärjestelmissä (Wilson 2003, Stanniland & Curtin 2013). Tiedustelusatelliitit ja ilmassa olevat järjestelmät keräsivät ensiarvoisen tärkeää tietoa vastapuolen toiminnasta ja liikkeistä.

2010-luku: Tilanne muuttui vielä voimakkaammin 2010-luvun puolivälissä, kun kaupallisen avaruustoiminnan ja laukaisujen volyymi alkoi kasvaa erittäin paljon sotilastoimintaa suuremmaksi. Niin sanottu uuden avaruuden aika (New Space) voidaan katsoa alkaneeksi noin 2015 ja sen jälkeen useasta pienestä maasta kuten Suomesta on tullut avaruusvaltioita. Satelliitit ovat pienentyneet, kustannukset niin toteutuksissa kuin laukaisuissa laskeneet ja niin kaupallisilla organisaatioilla kuin pienillä valtioilla on varaa omaan avaruustoimintaan. 2018 Syyriassa otettiin käyttöön vaikeasti havaittavat JASSM-risteilyohjukset, jotka laukaistaan ilmasta maahan. Nämä satojen kilometrien kantamalla varustetut kaukovaikutteiset aseet voidaan laukaista esimerkiksi F-35 hävittäjästä. Ohjus käyttää satelliitti- ja intertianavigointia ja pystyy täsmävaikuttamaan vahvasti suojattuihinkin kohteisiin 450 kilogramman taistelukärjellään. GPS-häirinnän alla ja liikkuviin kohteisiin iskiessä ohjuksen hakupäässä olevien infrapuna- ja laserpaikannuslaite aktivoituu. Suomi on hankkinut JASSM-ohjuksia käyttöönsä.

2020-luku: Ukrainan sota alkoi helmikuussa 2022, kun Venäjä hyökkäsi maahan. Ennen hyökkäyksen alkua toteutettiin kyberisku Viasatin satelliittijärjestelmään ja lamautettiin kyky viestiä kyseisellä järjestelmällä niin Ukrainassa kuin laajoilla alueilla muuallakin Euroopassa (Höyhtyä & Uusipaavalniemi 2023, Samson 2024). Jo tämä hyökkäys osoittaa, että kaupallisten järjestelmien merkitys oli Venäjällä tiedossa heti alusta lähtien. Sodan aikana satelliitteja on käytetty hyvin monenlaisiin tarkoituksiin, joista käymme läpi seuraavassa eri kategorioita:

- Satelliittiviestinnässä sodan tärkein järjestelmä on ollut Starlink. Ukrainan alueella on ollut käytössä kymmeniätuhansia päätelaitteita (23000 jo syyskuussa 2022) ja näiden avulla niin sotilaat kuin siviilit ovat voineet viestiä toistensa ja ulkomaailman kanssa silloinkin, kun maanpäälliset

viestintäverkot tai sähkölinjat ovat olleet tuhottuina. Järjestelmä on tuonut merkittävästi lisää resilienssiä koko yhteiskuntaan.

- GPS tai yleisemmin GNSS-järjestelmät ja niiden merkittävyys kaikissa operaatioissa on ollut hyvin tiedossa ja sen avulla on ohjattu täsmäaseita kuten HIMARS-raketinheitinjärjestelmän ATACMS-tykistöohjuksia sodan aikana. GPS:n ja Starlinkin avulla on ohjattu drooni-toimintaa ja ohjattu tykistön tulta ja pystytty pitämään ajantasaista tilannekuvaa taistelukentän tapahtumista. Merkittävyyden takia myös voimakas GNSS-häirintä on ollut arkipäivää ja tällä on pyritty mm. tekemään drooni-operointi hyökkäystoiminnassa mahdollisimman haastavaksi.
- Kaupallisten kuvantavien järjestelmien käyttö on ollut sodan alusta asti merkittävässä roolissa viestimään sodan kauhuista ja toteutetuista sotarikoksista sekä tilannetiedoista. Yhdysvaltalaisen Maxar-järjestelmän kuvia on julkaistu sanomalehdissä suurelle yleisölle. Kuvissa on esitetty kuinka suuri venäläiskolonna etenee kohti Kiovaa tai millaista tuhoa iskut Mariupolin sairaalaan saivat aikaan. Ukraina on käyttänyt Iceye-satelliittien SAR-kuvauskykyä menestyksekkäästi tuhottavien kohteiden etsinnässä.

Missään aiemmassa sodassa eivät molemmat osapuolet ole hyödyntäneet yhtä paljon satelliitteja ja niiden vastatoimia. Yhtä aikaa sota itsessään on ollut rajoittunutta eli Yhdysvallat ja Venäjä ovat pyrkineet välttämään laajempaa eskalaatiota (Guranz 2024). Kaupalliset avaruuspalvelut ovat arkipäivää kaikille asevoimille. Ne tuovat merkittävää suorituskykyä sekä operatiiviseen toimintaan että koko yhteiskunnan resilienssiin. Ukrainan sodan voidaan sanoa olevan ensimmäinen laajamittainen kaupallisia avaruuskyvykkyyksiä hyödyntävä sota eikä vielä ole tarkasti tiedossa mitkä tällaisen toiminnan seuraukset osallistuville kaupallisille yrityksille ovat. Varsinaisten sotatoimien lisäksi esimerkiksi kohdennetuista kyberiskuista on raportoitu. Tällä osa-alueella kaupalliset järjestelmät kuten Iceye ja Starlink ovat onnistuneet hyvin eli niihin ei ainakaan julkisten tietojen mukaan olla pystytty murtautumaan aktiivisista yrityksistä huolimatta.

Avaruusjärjestelmien luokittelu sotilaskäytössä

Sotilastoiminnan kannalta avaruusjärjestelmien kyvykkyydet voidaan jakaa samankaltaisiin luokkiin kuin kaupallisten järjestelmien yhteydessä kuvatut fundamentaaliset pääluokat. Lisäksi avaruustoiminnan kannalta hyvin olennai-

sia ovat avaruustilannekuvakyvykkyydet, laukaisutoiminta ja jo edellä mainitut satelliittien vastatoimet. Tässä artikkelissa rajaamme käsittelyn kolmeen esitettyyn luokkaan ja niiden mahdollistamiin sotilaspalveluihin.

Sotilaallisia satelliittipalveluita ovat:

1) Tiedustelu-, valvonta ja maalittaminen (intelligence, surveillance and reconnaissance, ISR) kattaa sotilaallisen kaukokartoituksen kyvykkyydet. Satelliiteissa on käytössä kameroita, signaalitiedustelulaitteita, tutkia ja muita sensoreita. Tehtävänä on löytää vihollisen joukot, rakennelmat, ja sotamateriaali. Samoilla satelliiteilla tuotetaan myös ohjusten ennakkovaroitukset, sää- ja olosuhdetiedot sekä kartoituspalvelut. Voidaan sanoa, että ISR-järjestelmien tarjoama tilannekuva on sotilastoiminnan pohja.
2) Viestintäsatelliittien avulla kommunikoidaan pitkienkin etäisyyksien yli, jaetaan tietoa ja johdetaan toimintaa. Etäohjattavat järjestelmät kuten korkealla lentävät droonit ohjataan satelliittilinkkien avulla. Satelliittiviestinnän rooli oman toiminnan koordinoinnissa ja ohjauksessa on kriittisen tärkeä etenkin syrjäisillä ja kansainvälisillä alueilla toimittaessa.
3) Paikannus-, navigointi- ja ajastuspalvelut (positioning, navigation and timing, PNT) toteutetaan GNSS-satelliittien avulla. Tämä mahdollistaa omien joukkojen ja kaluston paikan määrittämisen, navigoinnin kohteeseen sekä erilaisten täsmäaseiden käytön. Aikasignaalien avulla voidaan koordinoida tarkasti toimintaa.

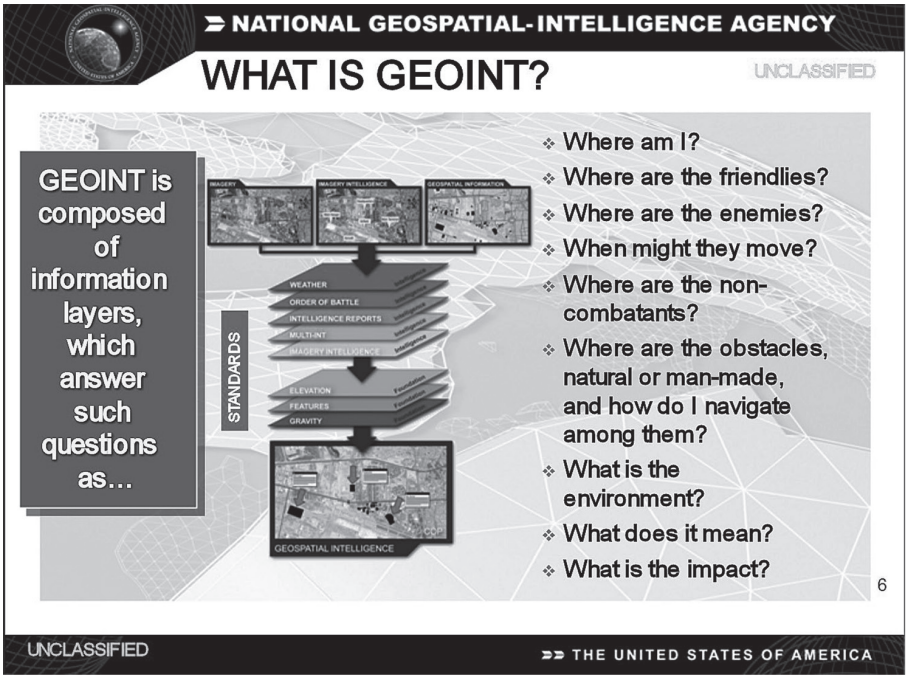
Taulukossa 2 on esitettynä avaruusteknologian sotilassovellukset ja esimerkkijärjestelmiä. Luonnollisesti moni tarkempi kyvykkyys tässä kategoriassa on salaista tietoa.

Kuva 4 esittelee geospatiaalisen tiedustelun (GEOINT) toimintaperiaatteen. Kyse on kerrostetusta datasta, jossa kartta- tai kuvamateriaalin päällä esitetään eri lähteistä kerätyt tiedot, jonka avulla vastataan kuvassa näkyviin kysymyksiin. Samaan kuvaan voidaan fuusioida tiedot säästä, ympäristöstä, laitteiden paikoista ja sekä sensorien että ihmisten toimittamista tiedustelutiedoista.

Tiekartta: Kohti avaruustoimintaa vuonna 2035

Miltä avaruustoiminta sitten tulee näyttämään seuraavan vuosikymmenen jälkeen? Kysymykseen vastaamiseksi käytössä on ollut seuraavat tulevaisuudentutkimuksen menetelmät:

1) Asiantuntijuuteen pohjautuva tiekarttatyö ja sitä tukeva kirjallisuuskatsaus
2) Osallistavat haastattelut ja työpajat ja näistä tehdyt tulevaisuusskenaariot



Kuva 4. Geospatiaalinen tiedustelu. Lähde: Wikimedia Commons. Tekijä NGA.

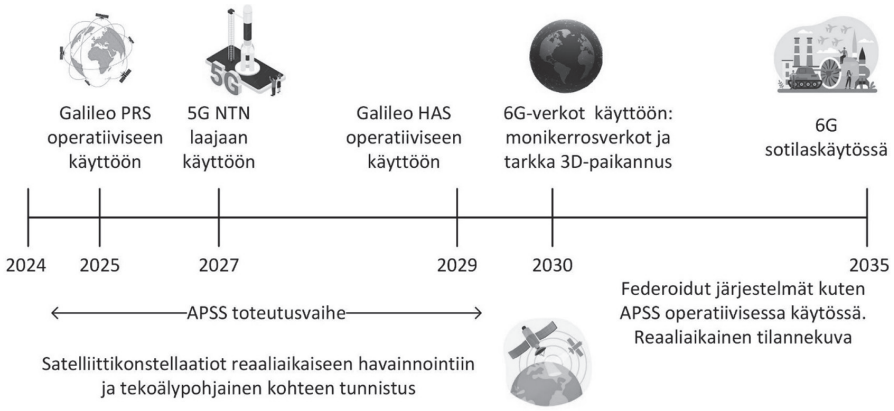
Tässä artikkelissa käymme lyhyesti läpi tiekarttaosuuden, jota edellisten kappaleiden materiaalikin tukee. Skenaariotyön osalta tarkastellaan tiiviisti tunnistettuja muutostekijöitä työpajoissa ja haastatteluissa kerättyjen aineistojen ja alustavan analyysin pohjalta.

Tiekartta satelliittiteknologian käytöstä tulevaisuuden taistelukentällä

Tiekartta on vahvaan asiantuntijaosaamiseen pohjautuva menetelmä (Popper 2008). Olen itse työskennellyt valitulla avaruusteknologiasektorilla noin 15 vuoden ajan, usein läheisessä yhteistyössä alan teollisuuden ja Euroopan Avaruusjärjestön kanssa. Hahmoteltu tiekartta hyödyntää useaa eri tietolähdettä. Osittain kyseessä on itselleni kertynyt hiljainen tieto, osittain edellisissä kappaleissa kirjallisuuden ja viitteistetyn materiaalin avulla kuvatut tulevaisuuden trendit ja osittain erilaisissa standardointi- ja regulaatio-organisaatioissa kuten 3GPP ja ITU parhaillaan tehtävä työ lähitulevaisuuden teknologian edistämiseksi.

Taulukko 2. Sotilaallisten satelliittijärjestelmien luokittelu ja esimerkkijärjestelmiä

Pääluokka	Alaluokka	Tehtävä	Esimerkkijärjestelmä
ISR-järjestelmät	Signaalitiedustelu, SIGINT	Havaita sähkömagneettinen toiminta, tunnistaa kohteita ja kerätä tietoa vihollisen sähköisestä infrastruktuurista.	Orion Mentor-9, Yhdysvaltojen GEO-radan satelliitti
	Ohjusvaroitus	Havaita ballististen ohjusten laukaisut ja mahdollistaa seuranta ja nopea vastatoiminta.	Venäläinen EKS-järjestelmä, GEO-radan satelliitit
	Valvonta	Jatkuva maassa, ilmassa ja merillä tapahtuvan toiminnan seuranta ja tilannekuvan luonti.	Planet SkySat -konstellaatio. 20 LEO-satelliittia.
	Kuvaustiedustelu, IMINT	Satelliittikuvia analysoimalla löytää ja identifioida tärkeät kohteet.	Brittiläinen Tyche-satelliitti, 500 km korkeudella
	Geospatiaalinen tiedustelu, GEOINT	Yhdistää eri järjestelmien tiedustelutiedot kartalle ja esittää kohteen paikan, ominaisuudet ja tapahtuvat muutokset.	EU:n satelliittikeskus SatCen koostaa GEOINT-tietoa
Viestintä-palvelut	Ilmailun viestintä	Lentokoneiden ja lennokkien yhteydet lennonjohtoon ja muihin maassa ja merillä oleviin yksikköihin.	Viasatin GEO-satelliitit ja päätelaitteet hävittäjissä.
	Merivoimien viestintä	Laivaston yhteydet, tilannekuva- ja johtamisjärjestelmien toiminta.	Thalesin SurfSat-terminaalit pinta-aluksiin. Sekä MEO- että GEO-yhteydet.
	Maavoimien viestintä	Puhe- ja datayhteydet etäisille alueille. Tulenjohtoratkaisut. Yhteydet kotiväkeen.	Starlink-järjestelmän käyttö Ukrainassa. LEO-konstellaatio.
	IoT-satelliitit	Sensoridatan keräys ja siirto, tilannekuvan päivitystehtävät.	Sateliot LEO-konstellaatio
	Ohjusten viestintä	Pitkän kantaman ohjusten kyky siirtää sensoridataa, vaihtaa ohjauksen mukaan kohdetta yms.	MBDA Teseo-ohjukset esim. laivojen tuhoamiseen.
PNT-suorituskyky	Omien kohteiden paikannus	Kyky paikantaa itsensä ja omat laitteet.	GNSS-järjestelmät, LEO-paikannus esim. Starlinkin avulla.
	Navigointi kohteeseen	Antaa ohjeistus käyttäjälle mitä reittiä pitkin päästä haluttuun paikkaan.	Kaikki GNSS-järjestelmät
	Ajastuspalvelut esim. tietoliikenne-järjestelmälle	Tarkka aikasynkronointi sitä vaativille järjestelmille ja toimintakykyisenä pitäminen.	Galileo PRS-järjestelmä ja suojatut signaalit
	Täsmäaseiden käyttö	Satelliittipaikannuksen avulla ase kuten liitopommi tai ohjus pystyy navigoimaan kohteeseensa.	GPS-III satelliitit M-koodilla suojatumpaan sotilaskäyttöön.
	Ilmailun ja merenkulun tilannekuva	Paikkatieto mukaan niin sensoridataan kuin omien joukkojen ja järjestelmien osalta, kriittinen osa tilannekuvaa.	Kaikki GNSS-järjestelmät ja LEO-paikannus.



Kuva 5. Satelliittiteknologian tiekartta: Uusia kyvykkyyksiä viestintään, tiedusteluun ja paikannukseen. © Marko Höyhtyä

Tiekartan laadinnassa on perehdytty myös EDA:n raporttiin, jossa ennustetaan avaruuden muuttuvan täysin operatiiviseksi alueeksi tai domainiksi 2040 mennessä (EDA 2021) sekä Naton tiedeorganisaatio STO:n julkaisemiin trendeihin (NATO 2023). Euroopan avaruusstrategia (EU 2024) kuvaa osaltaan hyvin tulevaisuuden uhkakuvia kuten kineettisiä aseita, avaruusrobotiikkaa, kyberiskuja ja avaruusromua. Informaation pohjalta pystymme arvioimaan mihin suuntaan avaruustoiminta on teknologisesti seuraavan kymmenen vuoden aikana menossa ja millaisia kyvykkyyksiä myös sotilastoiminnan käyttöön on tulossa. Kuva 5 esittää viestinnän, paikannuksen ja tiedustelun kehitystä seuraavan kymmenen vuoden aikana.

Galileo PRS ja HAS (High Accuracy Service): Galileo-järjestelmän tarkkuus on jo nykyisin parempaa kuin GPS-järjestelmässä ja siihen on tulossa lähivuosien aikana useita sotilastoimintaan soveltuvia parannuksia. Jo aiemmissa kappaleissa puhuttiin häiriösietoisesta ja vahvasti salatusta PRS-signaalista. Se tekee varsin vaikeaksi harhauttamisen ja väärän tiedon syöttämisen. Vastaanottimet PRS-järjestelmälle ovat joko erillisvastaanottimia, joissa on itsessään PRS-kyvykkyys tai sitten ns. saarekepalvelimia, joilla voidaan varmentaa vaikkapa satama-alueen tai muun rajatun ympäristön palvelut. Päätelaite on luotettavalla viestintäyhteydellä kiinni palvelimessa ja käyttää tätä tietoa oman paikkansa varmentamiseen ilman, että siinä itsessään on tarve olla PRS-tuettu vastaanotin integroituna. Julkisten lähteiden mukaan PRS-järjestelmän paikannustarkkuus tällä hetkellä on vertikaalidimensiossa < 12 m ja horisontaalisesti < 6.5 m, mutta sitä voidaan parantaa vielä tulevaisuudessa huomattavasti HAS-palvelun avulla.

HAS-palvelu on Galileo-järjestelmiin tulossa oleva erittäin tarkan paikannuksen palvelu, jonka määrittelyvaihe eli vaihe nolla loppui vuonna 2022. Tällä hetkellä ollaan palvelun toteutusvaiheessa ja alustavan käytön vaiheessa, jossa kaikkia toiminnallisuuksia ei vielä ole käytössä. Operatiiviseen käyttövaiheeseen koko tarkkuudella päästäneen lähivuosien aikana. Palvelussa hyödynnetään usean konstellaation signaaleja (Galileo ja GPS) sekä maanpäällistä Internet-yhteyttä. Käyttäjälaitteen PPP-algoritmin (Precise Point Positioning) avulla päästään jopa 40 cm vertikaaliseen tarkkuuteen ja horisontaalisesti 20 cm tarkkuuteen. HAS-palvelu tulee olemaan mahdollistaja useille sotilasmielessäkin kiinnostaville sovelluksille kuten tarkalle autonomiselle ajamiselle, turvallisuuskriittisille sovelluksille ja drone-navigoinnille.

6G-teknologia tuo tullessaan paljon sotilastoimintaan soveltuvia teknisiä kyvykkyyksiä niin viestintään, paikannukseen kuin ympärillä tapahtuvien asioiden monitorointiin (Höyhtyä 2024). Jo 5G-verkot ovat suorituskyvyltään ja viranomaisviestintään kehitetyiltä ratkaisuiltaan olleet erittäin kiinnostavia myös sotilaskäytön näkökulmasta (NCIA 2021, Walker 2021). 5G:n avulla voidaan esimerkiksi viipaloida fyysinen verkko erillisiksi virtuaalisiksi verkoiksi ja taata kriittisen viestinnän viipaleen palvelunlaatu ja korkea tietoturva. Moniantenniteknologiat taas mahdollistavat sekä erittäin korkean kapasiteetin että hyvin suunnatut lähetykset, joilla vastapuolen häirintätoimetkin muuttuvat haastavammiksi. 6G edelleen kehittää 5G:n ominaisuuksia pidemmälle, mutta tuo mukanaan myös useita uusia toiminnallisuuksia. Oleellisia ovat mm. alusta asti mukana oleva avaruuskomponentti ja matalat taajuudet, joilla molemmilla luodaan edellytykset etäisten alueiden viestinnälle. Verkko on kolmiulotteinen ja siinä ovat mukana niin maanpäällinen infrastruktuuri kuin ilmassa ja avaruudessa olevat osat. Arkkitehtuuri mahdollistaa viestinnän lisäksi erittäin tarkan senttimetriluokan 3D-paikannuksen, komplementoiden GNSS-järjestelmiä ja tuoden kyvykkyyttä myös GNSS-taajuuksien häirinnästä kärsivälle alueelle. Verkko toimii myös sensorina radiotaajuuksien alueella ja tuo mukanaan ympäristön seurantaan uutta kyvykkyyttä.

Federoidut tiedustelujärjestelmät ja satelliittikonstellaatiot: Tällä hetkellä avaruuspohjaista tiedustelua tehdään hyvin useilla erillisillä valtioiden järjestelmillä ja kaupallisilla satelliiteilla. Jotkut järjestelmät tarjoavat hyvää ja tarkkaa signaalintiedustelukyvykkyyttä, toiset tuovat mukanaan hyvän aikaresoluution tutkadataan ja kolmannet taas pystyvät hyvin tarkkaan optiseen kuvaukseen silloin, kun pilvet tai yö ei tätä estä. Tällä hetkellä erittäin tärkeä tutkimus- ja kehityskohde alalla ovat federoidut satelliittitiedustelujärjestelmät. Niissä tavoitteena on yhdistää erilaiset kaupalliset ja valtiolliset järjestelmät yhteen ja mahdollistaa käyttäjälle kaiken tarvittavan data saaminen saman käyttöliittymän kautta. Tämä yksinkertaistaa toimintaa, vähentää sopimusten määrää ja

antaa mahdollisuuden pyytää aina tarvittava data samasta osoitteesta. Käyttäjä voi pyytää vaikkapa päivittäistä hyperspektridataa tietyltä alueelta ja federoitu järjestelmä antaa tarvittavat tiedot siihen kytkettyjen järjestelmien avulla. Haasteita tällä mallillakin toki on ja osallistuvien organisaatioiden on määritettävä millä ehdoilla ja kenelle mitäkin tietoa voidaan jakaa. Datan suojauksessa on myös oltava erittäin tarkkana ottaen huomioon luokiteltavan datan vaatimukset. APSS-järjestelmän lisäksi myös Euroopalla on kehitystä käynnissä Euroopan Puolustusrahasto EDF:n rahoittamassa SPIDER-hankkeessa. Federoitujen järjestelmien ohella erittäin tärkeä kehityssuunta on yhä reaaliaikaisemman tiedustelun mahdollistaminen avaruudesta. Tätä tavoitellaan kehittämällä kymmenien tai jopa satojen satelliittien konstellaatioita, joilla voidaan kuvata samaa kohdetta päivittäin tai useita kertoja päivässä.

Infolaatikossa käydään läpi tulevaisuuden tärkeitä järjestelmiä.

Infolaatikko: Tulevia järjestelmiä 2030-luvulle mentäessä

ISR-järjestelmät	Federoidut yhteisjärjestelmät, joiden avulla yhdistetään usean eri satelliittijärjestelmän ja lähteen tieto saman käyttöliittymän taakse. Esimerkiksi Naton APSS-järjestelmä yhdistää kaupallisia ja sotilaallisia satelliittidatoja. Lisäksi kehitetään koko ajan enemmän piensatelliittien konstellaatioita, joilla pystytään yhä reaaliaikaisempaan kohteiden kuvantamiseen.
Viestintäjärjestelmät	6G-järjestelmät tuovat mukanaan standardoidut viestintäratkaisut ja suorat yhteydet pienten päätelaitteiden ja satelliittien välille. Monikerrosverkot kuten Eurooppalainen IRIS² lisäävät niin viranomaisviestinnän kuin sotilasviestinnän resilienssiä. Järjestelmät operatiivisessa käytössä 2030-luvulla.
PNT-järjestelmät	Galileo-järjestelmän uudet kyvykkyydet kuten PRS ja GPS-järjestelmän uusi sukupolvi lisäävät niin paikannuksen tarkkuutta kuin myös kyberhyökkäysten ja häirinnän sietoisuutta. Matalien kiertoratojen satelliitit ja 6G-teknologia tulevat mahdollistamaan yhä tarkemman 3D-paikannuksen.

Avaruustoiminnan kehityssuunnat ja geopolitiikan näkymät: Skenaarioiden muutostekijät

Kansallisesti on toteutettu useita hankkeita avaruustoiminnan kehityssuuntien ennakoimiseksi. Suomeen on myös tehty uudistettu avaruusstrategia täsmentämään aiempaa vuoteen 2025 tähdännyttä strategiaa, jossa keskeisenä tavoitteena oli tehdä Suomesta maailman houkuttelevin avaruusliiketoiminnan ympäristö. Uudessa strategiassa on maailman tilannetta huomioiden korostettu

myös turvallisuuden ja puolustuksen näkökulmaa. Vuonna 2021 oli käynnissä Business Finlandin rahoittama 6G_Sat -hanke, jossa haastateltiin laajasti teollisuuden, ministeriöiden ja rahoittajien edustajia ja määriteltiin kansallista tiekarttaa satelliittiviestinnän näkökulmasta. Valtioneuvoston kanslia taas rahoitti vuonna 2022 AVARTAVA-hanketta, jossa analysoitiin avaruustoiminnan kriittisyyttä koko yhteiskunnan kannalta. Samassa hankkeessa mietittiin myös uhkaskenaarioita tulevaisuuden varalle (Piirainen et al. 2022).

Tällä hetkellä ennakointityötä tehdään aktiivisesti Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan (MATINE) arktisuuden ja avaruustoiminnan teemaryhmässä. Vuosina 2023 ja 2024 on järjestetty useita työpajoja, joissa on mietitty kansallisia kehityssuuntia niin teknologian kuin strategian ja kansainvälisten yhteistyöverkostojen näkökulmasta. Uusia verkostoja on syntynyt ja syntymässä mm. EDF:n ja Naton kautta. Tavoitteena on ollut tarkastella tulevaisuuden muutosta 5-10 vuoden aikajänteellä ja pohtia Suomen kykyä hyödyntää avaruustoimintaympäristöä ja toimia siinä. Koska varsinainen skenaarioiden kirjoitus ja analysointi on vielä kesken ja kokonaisuudesta on tarkoitus kirjoittaa oma Tiede ja Ase -artikkeli ensi vuoden julkaisuun, käymme tässä läpi vain lyhyesti työssä esiin nousseita tekijöitä.

Työpajoissa on ollut mukana laaja joukko poikkitieteellisiä arktisen toiminnan asiantuntijoita ja avaruusteknologian parissa työskenteleviä ihmisiä. Työpajoissa on ollut osallistujia teollisuudesta, yliopistoista ja tutkimuslaitoksista sekä puolustushallinnosta. Työssä on jakauduttu kolmeen eri ryhmään: 1) Satelliittien ja satelliittipalveluiden kehitys, 2) Avaruuden uudet puolustukselliset yhteistyöalueet Suomen näkökulmasta, kuten Nato ja EDF ja 3) Kansallinen avaruusstrategia ja kyvykkyydet. Kullakin alueella on tunnistettu asioita, trendejä ja muuttujia, joiden uskotaan vaikuttavat teemaan 5-10 vuoden aikana. Näistä asioista on sitten tunnistettu sellaiset kriittiset tekijät, joilla on merkittävä vaikutus, mutta huono ennustettavuus tai tuntemattomat seuraukset.

Tavoitteena työssä on ollut löytää muutostekijöitä, joita analysoimalla saadaan muodostettua varsinaiset skenaariot valitsemalla kaksi toisistaan riippumatonta tekijää nelikentän pohjaksi. Taulukossa 3 on strategiaan liittyviä muutostekijöitä. Skenaariotyö kuvaa mahdolliset tulevaisuudenkuvat ja antaa samalla työkaluja kuvattuihin asioihin varautumiseen. On hyvin erilaista toimia rauhanaikana kaikkien noudattaessa yhteisiä pelisääntöjä kuin blokkiutuneessa kriisiajan tilanteessa.

Taulukko 3. Kansallisen avaruustoiminnan strategiaan liittyviä muutostekijöitä.

Muutostekijä	Ääripää	Vastakkainen ääripää
Avaruuden kansainvälinen sääntely ja sopimukset	Laaja ja toimiva sääntöpohja	Murentunut sääntely
Sodat ja konfliktit Euroopassa	Rauhallinen ja yhtenäinen Eurooppa	Euroopassa sota
Resurssit avaruuskehitykseen	Markkinaehtoinen toiminta, avoin kilpailu	EU:n ohjelmat ja valtiovetoisuus
Yhteiskunnan resilienssi ja riippuvuus satelliittipalveluista	Palvelut käytössä, varajärjestelyin turvattu	Riippuvuudet ja haavoittuvuudet estävät käyttöä

Johtopäätökset

Teknologian ja kaupallisen avaruustoiminnan kasvu on ollut viimeisten vuosien aikana kiihtyvän nopeaa. Samanaikaisesti maailmantilanteesta johtuen on vahva tarve nimenomaan puolustusteknologiselle kehitykselle ja innovaatioille. Kaikki maailman sotavoimat käyttävät jo nyt kaupallisia satelliittipalveluita ja trendi tulee jatkumaan voimakkaana tulevaisuudessa. Olemme käyneet tässä artikkelissa läpi satelliittitoiminnan lyhyen avaruushistorian ja kehitystrendit niin viestinnän, paikannuksen kuin tiedustelun avaruusjärjestelmissä. Ennakointimielessä olemme katsoneet ajanjaksoa 2035 asti. Tulossa on erittäin mielenkiintoisia satelliittikyvykkyyksiä niin kaupallisten toimijoiden puolella mm. 6G-teknologian kehityksen myötä kuin myös valtiollisten toimijoiden ja sotilasorganisaatioiden kuten Naton APSS-kehityksen myötä. Suomen on syytä olla aktiivisesti mukana niin kehityksessä kuin ottamassa käyttöönkin uusia suorituskykyjä. Osaaminen on rakennettava rauhan aikana ja teknologisen ylivoiman mahdollisuus kannattaa hyödyntää.

Lähteet

Air & Space Forces Magazine (2024). "NATO signs first contract for its largest space program ever," https://www.airandspaceforces.com/nato-contract-satellite-imagery-space/.

Alves H., Mikhaylov K. & Höyhtyä M. (2024). *Integration of MTC and Satellites for IoT toward 6G Era*, Wiley-IEEE Press.

Behravan A. et al. (2023). "Positioning and sensing in 6G: Gaps, Challenges, and Opportunities," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 18.

European Defence Agency (EDA). (2021). "EDA Technology Foresight Exercise 2021".

European Space Agency (ESA). (2024). "Annual space environment report," https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf.

European Union (EU). (2024). "European Union space strategy for security and defence."

EUSPA. (2024). European Union Agency for the Space Programme, IRIS2, https://www.euspa.europa.eu/eu-space-programme/secure-satcom/iris2.

Fu I.-K. et al. (2023). "Satellite and terrestrial network convergence on the way toward 6G," *IEEE Wireless Communications*, vol. 30.

Guranz R. (2024). "Satellites in the Russia-Ukraine war," Strategic Studies Institute, US War College.

Höyhtyä M. et al. (2022). "Satellite communications in the 6G era: A European view for multi-layer systems and space safety," *IEEE Access*, vol. 10.

Höyhtyä M. & Uusipaavalniemi S. (2023). "The space domain and the Russo-Ukrainian war," In *Hybrid CoE Working Papers*, The European Centre of Excellence for Countering Hybrid Threats.

Höyhtyä M. et al. (2024). "Multi-layered satellite communications systems for ultra-high availability and resilience," *Electronics*, 13(7), 1269.

Höyhtyä M. (2024). "6G:n merkitys sotilasviestinnässä ja harvaan asuttujen alueiden ratkaisuna: Teknologiaennakointia 2030-luvulle," Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. Julkaisusarja.

Kaplan E. D. & Hegarty C. J. (2017). *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*. Kolmas painos. Artech House.

Kosola J. (2007). *Suorituskyvyn elinjakson hallinta*, Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos, Julkaisusarja 5, Nro 7.

Kyberturvallisuuskeskus. (2023) "Galileon viranomaispalvelu PRS," https://www.kyberturvallisuuskeskus.fi/fi/toimintamme/satelliittipaikannus/galileon-viranomaispalvelu-prs.

Loeb V. (2002). Burst of brilliance. *Washington Post, https://www.washingtonpost.com/archive/lifestyle/magazine/2002/12/15/bursts-of-brilliance/0c06b132-2d70-41e6-882e-5c4ece8f5fcf/*.

North Atlantic Treaty Organization (NATO). (2024). "Emerging and disruptive technologies," https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_184303.htm.

NATO. (2023). "Science & Technology Trends 2023–2043," https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2023/3/pdf/stt23-vol1.pdf.

NATO Communications and Information (NCI) Agency. (2021). "NATO tech agency explores the potential of 5G for the alliance," https://www.ncia.nato.int/about-us/newsroom/nato-tech-agency-explores-the-potential-of-5g-for-the-alliance.html.

Organisation for Economic Co-operation and development. (2022). "OECD handbook on measuring the space economy," 2nd Edition. https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/8bfef437-en.

Piirainen K. A., Haila K., Salminen V., Halme K., Lamminkoski H., Häme T., Höyhtyä M. & Halme E. (2022) "Avaruus arjessamme: Avaruustoiminnan yhteiskunnallinen vaikuttavuus (AVARTAVA) loppuraportti," Valtioneuvoston kanslia. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163952.

Popper R. (2008). "How are foresight methods selected?" *Foresight*, vol. 10.

Prol F. S. et al. (2024). "Simulations of dedicated LEO-PNT Systems for precise point positioning: Methodology, parameter analysis, and accuracy evaluation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, Early access version.

Rummukainen, T. Pitkänen, E. Sarlin ja S. Tuominen. (2023). "Näin Venäjä vakoilee," https://yle.fi/a/74-20060257.

Samson, V. (2024). "Space and Counterspace Technologies in Future Warfare". in *Future Warfare and Critical Technologies: Evolving Tactics and Strategies*, Wiley.

Sheehan, M. (2007). *The international politics of space*. Routledge.

Stanniland A. & Curtin D. (2013). "An examination of the governmental use of military and commercial satellite communications," In: Pelton, J.N., Madry, S., Camacho-Lara, S. (eds) *Handbook of Satellite Applications*. Springer.

Tanskanen E. et al. (2023). "Avaruustilannekuva varautumisen ja puolustuksen näkökulmasta," *Maanpuolustus-lehti*.

UCS (2023). Union of Concerned Scientists – Satellite Database. https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database.

Walker S, Rice D., Kahn M. and Clark J. (2021), "Why the world's militaries are embracing 5G," *IEEE Spectrum*.

Wall M. (2024). "China moving at "breathtaking speed" in final frontier, Space Force says" https://www.space.com/china-space-progress-breathtaking-speed-space-force.

Wilson J. R. (2003). "Satellite communications key to victory in Iraq," *Military Aerospace Electronics*, https://www.militaryaerospace.com/home/article/16709259/satellite-communication-key-to-victory-in-iraq.