

**MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU**

**SENSORITEKNOLOGIA RAKENNETUN ALUEEN TAISTELUSSA**

Tutkielma

Kapteeni  
Riku Rantakari

Esiupseerikurssi 64  
Maasotalinja

Huhtikuu 2012

## MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi <b>Esiupseerikurssi 64</b>	Linja <b>Maasotalinja</b>
Tekijä <b>Kapteeni Riku Rantakari</b>	
Tutkielman nimi <b>Sensoriteknologia rakennetun alueen taistelussa</b>	
Oppiaine johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka MPKK:n kurssikirjasto
Aika Huhtikuu 2012	Tekstisivuja 38 Liitesivuja 1
<b>TIIVISTELMÄ</b> <p>Nykyajan sodankäynti painottuu yhä enemmän taisteluun informaatiosta. Informaation perusteella muodostetaan tilannekuva, jonka avulla päätökset tehdään. Informaation hankinnassa on sensoriteknologia keskeisessä asemassa. Kaupunkien merkityksen korostumisen seurauksena pääosa nykyajan taisteluista tullaan käymään ainakin osittain rakennetulla alueella. Sensorien toiminnan kannalta rakennettu alue on aivan erilainen ympäristö kuin esimerkiksi metsämaasto. Esimerkiksi lyhyet tähytystäisyydet erityisesti sisätiloissa, rajoitettu näkyvyys, erilaisista materiaaleista valmistetut rakennukset ja pinnat sekä valoisuuden vaihtelu sisätiloissa asettavat uusia vaatimuksia sensorien suorituskyvylle.</p> <p>Tutkimuksessa tarkastellaan uhkamallina Yhteiskunnan turvallisuusstrategian mukaista strategista iskuja, jonka osakohteina voivat olla esimerkiksi sähkön jakelun valvomot ja materiaalin varastotilat. Näiden kohteiden lisäksi tarkastellaan ulkotiloja yleisesti. Tutkimus on kirjallisuustutkimus ja sen tarkastelutapa on tekninen.</p> <p>Tutkimuksen ensimmäisen osan tarkoituksena on selvittää eri sensoreiden suorituskyky ja kehityksen tulevaisuudennäkymiä. Tutkimuksen toisessa osassa tarkastellaan eri sensorijärjestelmien sopivuutta tilannekuvan hankkimiseen ja ylläpitoon rakennetulla alueella kahta esimerkkitapausta soveltaen. Tavoitteena on selvittää rakennetun alueen asettamat reunaehdot eri sensorijärjestelmille.</p> <p>Tutkimuksen tulokset osoittavat, että yksittäiseen teknologiaan perustuva sensori ei ole suorituskykyinen rakennetulla alueella. Eri teknologiat soveltuvat eri olosuhteisiin ja monien nykyisten järjestelmien suorituskyky rakennetulla alueella on hyvin rajoittunut. Tutkimuksen perusteella tulevaisuudessa korostuvat erityisesti optronisten sensorien integrointi yhteen laitteeseen, liikuteltavat sensorit sekä langattomat sensoriverkot.</p> <p>Sensoriteknologia rakennetulla alueella vaatii runsaasti lisätutkimusta esimerkiksi sensorin lavetin merkityksestä ja taistelunkestävyydestä sekä taktisten miehittämättömien ilmalusten käytöstä sisä- ja ulkotiloissa.</p>	
<b>AVAINSANAT</b> Sensori, rakennettu alue, asutuskeskustaistelu, lämpökamera, valonvahvistin, tutka, akustinen, RSSI, lasertutka, maavalvontatutka, sensoriteknologia	

# SENSORITEKNOLOGIA RAKENNETUN ALUEEN TAISTELUSSA

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1.	Tutkimuksen rakenne, tutkimusongelma ja rajaukset.....	2
1.2.	Tutkimuksen nykytila ja lähdemateriaali .....	4
2.	SENSORITEKNOLOGIAT.....	7
2.1.	Johdanto .....	7
2.2.	Audiotaajuudet .....	8
2.3.	Radiotaajuudet.....	12
2.4.	Mikroaallot.....	13
2.5.	Lasertutka.....	15
2.6.	Infrapuna-alueen sensorit .....	17
2.7.	Näkyvän valon sensorit.....	20
2.8.	Ultraviolettialueen sensorit .....	22
3.	RAKENNETTU ALUE TAISTELUTILANA .....	24
3.1.	Johdanto .....	24
3.2.	Tarkastelukohteiden valinta .....	26
3.3.	Ulkoalue yleisesti .....	26
3.4.	Case teollisuushalli tai varastorakennus.....	29
3.5.	Case toimistorakennus .....	32
4.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	35

LÄHTEET

LIITTEET

## SENSORITEKNOLOGIA RAKENNETUN ALUEEN TAISTELUSSA

### 1. JOHDANTO

Tietoyhteiskunnan sodankäynnin piirteisiin kuuluu se, että sotaa käydään kolmen fyysisen ulottuvuuden lisäksi ajassa ja sähkömagneettisessa spektrissä sekä tietoverkoissa. Ratkaisevana tekijänä taistelussa ei ole liikkuvuus ja tulivoima vaan informaatio, jonka avulla vaikutus voidaan kohdistaa oikeaan aikaan oikeaan paikkaan ja oikealla tavalla. Kasvanut informaation tarve on synnyttänyt termin informaationsodankäynti – taistelu informaation hallinnasta. Johtamisen kannalta kriittistä informaatiota ovat esimerkiksi omien ja vihollisten joukkojen sijainti, liike, toiminta, maaston ja ympäristön kulkukelpoisuus sekä sää. Kaikista näistä osatekijöistä muodostuu tilannekuva, jonka perusteella johtaja ja yksittäinen sotilaskin kykenevät tekemään toimintaansa vaikuttavia päätöksiä. Ratkaisevaa päätöksenteon kannalta on informaation oikeellisuus ja nopeus. Perinteisen lähetin tuoma tilannetieto saattaa olla vanhentunut tunteja aiemmin.

Yksinkertaisimmillaan lähialueen tilannekuva voisi muodostua havainnoimalla ympäristöä ja lisäksi tähyttämällä kiikareilla. Omien joukkojen sijainti saatetaan todentaa GPS-paikantimilla ja huonoissa valaistusolosuhteissa voidaan tähytyskykyä parantaa valonvahvistimilla ja lämpökameroilla. Miehitetyillä ja miehittämättömillä ilma-aluksilla sekä tutkilla saadaan tietoa näkökentän ulkopuolelta.

Valtaosa viime vuosikymmenten ja lähitulevaisuuden taisteluista käydään rakennetuilla alueilla ja taisteluja kyetään vain harvoin toteuttamaan täysin rakentamattomilla alueilla. Perinteisten maastonkohtien rinnalle tai edelle tärkeydessä luokitellaan liikenteen solmukohtat, satamat, lentokentät sekä hallinnon ja elinkeinoelämän keskuskeskukset. Katsantokannan mukaan ne mielletään joko pidettäväksi kohteiksi tai vallattaviksi alueiksi. Rakennettu alue on taistelu-ympäristönä selkeästi haastavampi kuin metsämaasto tai aukeat alueet [38]. Jalkaväkitaisteluja käydään kolmessa fyysisessä ulottuvuudessa, joten esimerkiksi tunnelit ja rakennusten eri kerrokset on otettava huomioon. Rakennukset rajoittavat näkökenttää ja tulen käyttöä, mutta toisaalta ne tarjoavat ainakin näkösuojaa.

Sensorien kannalta teolliset rakenteet ja rakennukset asettavat runsaasti rajoituksia. Lämpökamerat eivät näe seinien ja ikkunalasien läpi. Valonvahvistimilla voidaan tähyttää vain ikkunoista näkyviä kohteita. Tutkat eivät näe rakennusten sisälle. GPS-paikantimet eivät toimi sisätiloissa, ja kenttäradioiden kantamat lyhenevät merkittävästi. Useimmat elektro-optiset sensorit on suunniteltu keskipitkille ja pitkille tähytysetaisyyksille, ja niiden suorituskyky lyhyillä etäisyyksillä on heikko. Lisäksi tiedonsiirto aiheuttaa haasteita. Miten saatu tieto saadaan koottua päätöksentekijälle ja edelleen hajautettua käyttäjälle? Useimmat jalkaväen käyttöön tarkoitetut sensorit on tarkoitettu tuottamaan informaatiota vain käyttäjälle, ja laitteet eivät kykene jakamaan tietoa verkon välityksellä muille [39].

### 1.1. Tutkimuksen rakenne, tutkimusongelma ja rajaukset

Tutkimuksen näkökulma on tekninen, ja se jakaantuu kahteen pääosaan. Ensimmäisessä pääosassa selvitetään eri sensorien suorituskyky ja tulevaisuuden näkymät. Tavoitteena on selvittää eri sensorien rajoitukset ja vertailla eri sensoreiden soveltuvuutta erilaisen informaation hankintaan. Tutkimusmetodina käytetään kirjallisuustutkimusta. Toisessa pääosassa tarkastellaan eri sensorijärjestelmien sopivuutta tilannekuvan hankkimiseen ja ylläpitoon rakennetulla alueella. Tavoitteena on selvittää rakennetun alueen asettamat reunaehdot eri sensorijärjestelmille.

Päätutkimuskysymys on: ”Millaisia eri taajuusalueisiin perustuvia sensoreita voidaan käyttää jalkaväen taistelussa rakennetulla alueella tilannekuvan muodostamiseksi?”

Alatutkimuskysymyksiä ovat:

- Millaisilla jalkaväen käyttöön tarkoitetuilla sensoreilla voidaan nykyään muodostaa tilannekuva ja mitkä ovat niiden rajoitukset?
- Miten rakennettu alue vaikuttaa eri sensorien suorituskykyyn?

Tutkimuksen rajaukset on muodostettu Yhteiskunnan turvallisuusstrategian, lain Puolustusvoimista, sensoreita käyttävän joukon, sähkömagneettisen spektrin ja uhkan perusteella. Taulukossa 1 on lueteltu Yhteiskunnan turvallisuusstrategian mukaiset uhkamallit [58].

Taulukko 1 Yhteiskunnan turvallisuusstrategian (YTS) mukaiset uhkamallit

**Uhkamallit**


---

voimahuollon vakavat häiriöt  
 tietoliikenteen ja tietojärjestelmien vakavat häiriöt  
 kuljetuslogistiikan vakavat häiriöt  
 yhdyskuntatekniikan vakavat häiriöt  
 elintarvikehuollon vakavat häiriöt  
 rahoitus- ja maksujärjestelmän vakavat häiriöt  
 väestön terveyden ja hyvinvoinnin vakavat häiriöt  
 julkisen talouden rahoituksen saatavuuden häiriintyminen  
 suuronnettomuudet, luonnon ääri-ilmiöt ja ympäristöuhat  
 terrorismi ja muu yhteiskuntajärjestystä vaarantava rikollisuus  
 rajaturvallisuuden vakavat häiriöt  
 poliittinen, taloudellinen ja sotilaallinen painostus  
 sotilaallisen voiman käyttö

---

Suomen sotilaallisen maanpuolustuksen suunnittelussa käytetään nykyään kolmea eri uhkamallia. Painostusvaiheeseen voi kuulua poliittisen, taloudellisen tai sotilaallisen painostuksen käyttöä ja rajoitettua sotilaallisen voiman käyttöä. Strategisessa iskussa pyritään yllätyksellisellä sotilaallisen voiman käytöllä pakottamaan valtakunnan johto vastustajan haluamaan ratkaisuun. Kolmantena uhkamallina on laajamittainen hyökkäys alueiden valtaamiseksi, jonka aloitukseen liittyy usein strateginen isku. [46] Näistä strateginen isku liittyy Yhteiskunnan turvallisuusstrategian viimeisimpään uhkamalliin, ja se voi kohdistua puolustusjärjestelmän kohteita vastaan sekä muita yhteiskunnan toiminnan kannalta merkittäviä kohteita vastaan [58].

Mahdollisina kohteina voidaan pitää esimerkiksi yhteiskunnallisesti merkittäviä varastoja, sähkönjakelun keskuksia, voimalaitoksia, tärkeitä tuotantolaitoksia, pohjaveden pumppaamoita, sairaaloita ja keskeisten viranomaisten tiloja. Näistä erityisesti sairaalat nauttivat sodan kansainvälisten oikeussääntöjen suojaa ja myös osa voimalaitoksista vaarallisia voimia sisältävänä kohteena. Pohjaveden pumppaamoita voidaan myös pitää siviilikohteina, joilla turvataan kansalaisten elinmahdollisuudet ja joihin vaikuttaminen on sodan oikeussääntöjen perusteella kielletty. Lisäksi pumppaamot sijaitsevat usein metsäalueilla, jolloin ne eivät varsinaisesti ole rakennettuja alueita. Toisaalta vesihuollon osalta valvomot ovat keskeisessä asemassa, sillä jos normaali vesihuolto lamautetaan väliaikaisesti, joutuu viranomaisen lisäämään voimavarojaan vesihuollon järjestämiseksi.

Nyky-yhteiskunnan tehokas toiminta perustuu toimivaan sähköjakeluun, tietoliikenteeseen ja logistiikkaan. Niihin vaikuttamalla voidaan yhteiskunnan toimivuutta heikentää merkittävästi. Sähköjakelun häiriöillä vaikutetaan myös tietoliikenteen toimivuuteen. Voidaan kuitenkin ajatella, ettei vastustaja halua tuhota merkittävästi kriittistä infrastruktuuria, joten voimaitosten ja muuntoasemien sijaan keskityttäneen verkonhallinnan kannalta keskeisiin valvomotiloihin. Esimerkiksi Helsingin Energian Sähkötalossa toimivat sähkön- ja kaukolämpötuotannon keskusvalvomot, joilla valvotaan sähköjakelua noin 400 000 asiakkaalle ja lämmönjakelua suurimmalle osalle pääkaupunkiseudusta [20].

Tutkimuksessa tarkasteluun on valittu uhkamalleista strateginen isku sen keskeisen roolin vuoksi. Painostusvaiheessa taisteluja ei vielä välttämättä käydä, ja laajamittaisenkin hyökkäyksen katsotaan todennäköisesti alkavan strategisella iskulla. Rakennuksista on valittu ensimmäiseksi tarkasteltavaksi kohteeksi samoja piirteitä sisältävät viranomaisen hallintorakennukset ja sähköjakelun sekä vesihuollon valvomotilat. Toiseksi tarkasteltavaksi kohteeksi on valittu tukkuliikkeiden keskusvarastoa tai teollisuushallia edustava rakennus. Sensoreista käsitellään jalkaväen käyttöön tarkoitettut sensorit. Toisin sanoen tutkimuksessa keskitytään pienikokoisiin kannettaviin sensoreihin eikä tutkimuksessa käsitellä mahdollisesti jalkaväen käytössä olevia miehittämättömiä ilma-aluksia. Vaikka taistelulajeissa eri sensoreiden käytettävyyttä saattaa vaihdella, ei tutkimuksessa keskitytä selvittämään, mitkä sensorit sopisivat kuhunkin taistelulajiin parhaiten.

Sähkömagneettisesta spektristä ei käsitellä signaalitiedusteluun sopivia sensoreita, ja taajuusalueen osalta käsitellään vain relevantteja taajuuksia. Näin ollen esimerkiksi hyvin korkea-taajuinen röntgensäteily jätetään tutkimuksen ulkopuolelle. Tutkimuksessa ei myöskään käsitellä radioaktiivisen säteilyn, kemiallisten taisteluaineiden ja biologisten aseiden käytön ilmaisevia sensoreita.

## 1.2. Tutkimuksen nykytila ja lähdemateriaali

Eri sensoreiden tekniikkaa on tutkittu kohtuullisen paljon. Maanpuolustuskorkeakoulun tutkimukset ja julkaisut havainnollistavat sotilaskäyttöön tarkoitettujen sensorien suorituskyvyn nykyhetkellä ja arvioivat tulevaisuuden järjestelmiä. Eri sensortechnologioista on runsaasti tutkimuksia saatavilla, jopa hyvin yksityiskohtaista tietoa.

Taistelukentän optisia olosuhteita ja niiden vaikutusta pimeänäkölaitteisiin on tutkinut kapteeni Petteri Lampinen [30] sekä tiedustelun ja tulenjohdon sensoreita kadetti Asko Mäki [34]. Kapteeni Petri Majuri on tutkinut sensorien käyttöä taistelukentän valvonnassa taktiselta kannalta tarkasteltuna [33]. Tutkimuksissa on kuitenkin käsitelty vain metsämaastoa, eikä niissä ole huomioitu rakennetun alueen erikoispiirteitä. Maanpuolustuskorkeakoulun julkaisussa *State-of-the-Art in Sensors* käsitellään tulevaisuuden sensorijärjestelmiä [25]. Julkaisu sisältää työpapereita nanoteknologian sovellutuksista laivojen häivetekniikkaan. Kadettiker-santti Riku Rantakari on tutkinut panssarivaunujen uhanvaroittimia ja aktiivisia suojajärjes-telmiä [47].

Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskuksen (TEKES) Turvallisuus-ohjelmaan liittyy vuonna 2008 aloitettu *Wireless Sensor Systems in Indoor Situation Modeling (WISM)* -projekti. Ensimmäinen vaihe päättyi vuonna 2009 ja toinen vaihe alkoi vuonna 2010. Projekti keskittyy langattomiin sensorijärjestelmiin sisätiloissa ja se on tuottanut tähän mennessä mo-dulaarisen langattoman sensorialustan, johon liittyen on toteutettu lukuisa määrä tutkimuksia tekniseltä kannalta tarkasteltuna. Projektiin liittyy myös tutkimuksia sensorin paikallistami-seen ilman GPS-signaalia. Tällöin on hyödynnetty esimerkiksi ultraääntä ja radioaaltoja. Ultraäänien ja radioaaltojen signaalin voimakkuuden hyödyntämistä on sotilassovelluksissa julkisissa lähteissä tutkittu vähän.

The U.S. Army Research Laboratory on tutkinut tilannetietoisuutta ja viestintää taistelussa rakennetulla alueella [50]. Tutkimuksessa arvioitiin ryhmän taisteluun liittyviä kriittisiä tieto-tarpeita. NATO:n raportti *Urban Operations in the Year 2020* julkaistiin vuonna 2003. Raportin mukaan viidestätoista keskeisimmästä suorituskyvyn kehityskohteesta 68 prosenttia liittyi materiaalin kehittämiseen. Kolme tärkeimmäksi arvioitua kehitysohjelmaa olivat tiedon-keruukeskus, sotilaan tilannetietoisuus ja mikroelektroniset sensorit [40]. Jatkotyönä edelliselle raportille NATO:n *Sensors for Urban Operations* -työryhmän tarkoituksena on arvioida nykyhetken ongelmia sensorteologiassa rakennetun alueen operaatioissa ja laatia vaati-musmäärittely tämän alueen operaatioihin tarkoitetuille sensoreille [39]. Työn on arvioitu valmistuvan vuonna 2012.

Eri sensorteologioihin liittyvää tutkimusta on tehty runsaasti. Esimerkiksi The International Society for Optical Engineeringin (SPIE) julkaisuissa on työpapereita, joissa on verrattu esimerkiksi matemaattisen mallin ja käytännön testien välistä yhteneväisyyttä tarkka-ampujan ilmaisevan järjestelmän osalta.



Tutkittavista sensoriteknologioista moni lienee jo käytössä. Tosin käyttö rajoittuu tekniikan kalleudesta ja kehitysasteesta johtuen lähinnä erikoisjoukkoihin. Israelin armeijan kommandojoukkojen entisen komentajan mukaan esimerkiksi piiritystilanteessa ammattitaitoinen terrorisminvastainen yksikkö pystyy seuraamaan yksittäisen henkilön liikkeitä jatkuvasti [4].

Taistelua rakennetulla alueella ovat tutkineet esimerkiksi majuri Ari Lehmuslehti [31] ja yllluutnantti Jussi Honkonen [21]. Tutkimuksissa on käsitelty ensisijaisesti taistelua rakennetulla alueella taktiselta näkökulmalta, mutta sensorien käyttöä tutkimukset eivät sisällä.

## 2. SENSORITEKNOLOGIAT

### 2.1. Johdanto

Sensorijärjestelmien toiminta perustuu joko maalista heijastuvan tai sen itsensä lähettämän fysikaalisen suureen mittaamiseen [29]. Sensori-sanan etymologia pohjautuu englannin kielen sense-sanaan, joka tarkoittaa aistimista. Sensori siis aistii jotakin. Kohteesta heijastuva säteily voi olla aktiivisen sensorin lähettämää, epäsuorasta maalin valaisusta syntyvää tai tavallista luonnossa esiintyvää säteilyä. Kohteen itsensä synnyttämä säteily voi olla mustan kappaleen säteilyä, jota kaikki absoluuttista nollapistettä lämpimämmät kohteet lähettävät. Lisäksi kohde voi omaan toimintaansa liittyen lähettää säteilyä esimerkiksi radiotaajuuksilla (radiot, sähkölaitteet, generaattorit), infrapuna-alueella (häirintälähettimet), näkyvän valon alueella (valot, suuliekit) tai ultraviolettialueella (aseiden suuliekit). Lisäksi voidaan mitata magneettisuutta, mekaanista aaltoliikettä ja painetta. Sensorijärjestelmät voidaan luokitella esimerkiksi aallonpituusalueen, liikkuvuuden, aktiivisuuden tai passiivisuuden ja käyttökohteen mukaan.

Sensorien avulla hankitun informaation avulla voidaan saavuttaa vastustajaan nähden informaatioylivoima, jolloin kyetään pääsemään vihollisen johtamissyklin sisälle ja pitämään aloite toiminnassa itsellä. Tällöin kyetään käyttämään esimerkiksi tulta ja liikettä tehokkaammin [29]. Teknisiä apuvälineitä ei saa kuitenkaan kunnioittaa liikaa. U.S Marine Corps Warfighting (MCDP 1) varoittaa liiallisesta luottamisesta teknisiin järjestelmiin ja toisaalta puutteellisesta kyvystä hyödyntää järjestelmiä täysimääräisesti. Tärkeiksi huomioitaviksi seikoiksi on otettu esiin:

- Tekniset välineet ovat käyttökelpoisia vain, jos ne lisäävät taistelutehoa. Jokainen väline tarvitsee lisäksi huoltojärjestelmän.
- Teknologia voi parantaa keinoja ja välineitä, joilla sotaa voidaan käydä, mutta inhimillistä ajattelua niiden ei pitäisi korvata.
- Teknisillä välineillä ei voi korjata kaikkia ongelmia. Myös doktriinin ja taktiikan kehittäminen on oleellista tekniikan rinnalla.
- Tekniikan tuoma lisäetu on vain väliaikaista. Vastustaja kehittää aina joko teknisen tai taktisen vastakeinon.
- Tekniikasta ei saa tulla riippuvaiseksi. Toimintakyky on säilytettävä ilman teknisiä apuvälineitäkin.
- Tekniikan käytön on oltava kurinalaista. Esimerkiksi tarkka tilannetieto voi johtaa tilanteeseen, jossa alaisia johdetaan liian tarkasti. [56]

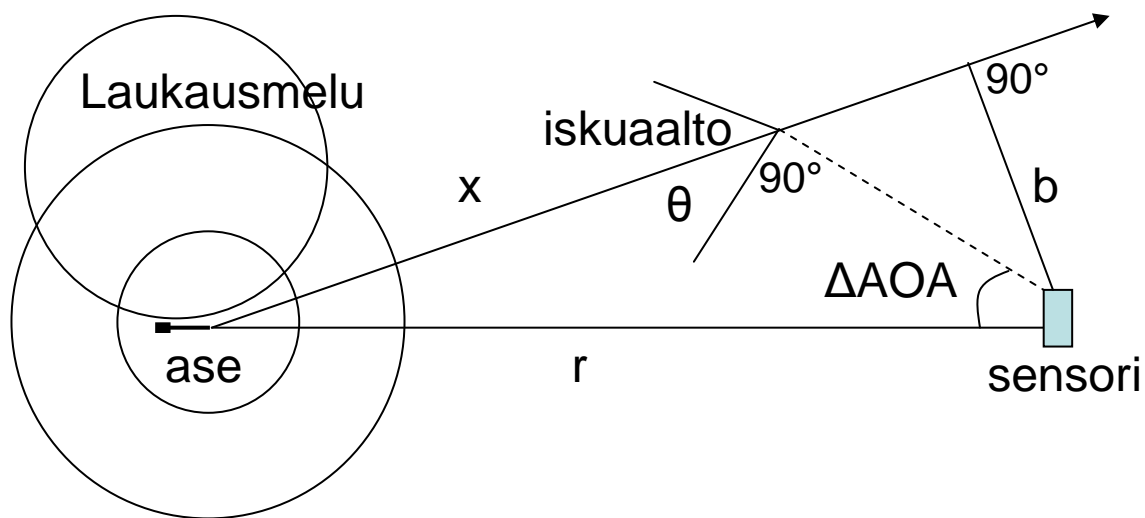
Seuraavaksi käsitellään eri sensoriteknologioita pääasiallisesti sähkömagneettisen spektrin mukaisessa järjestyksessä. Jokaisesta eri teknologiasta on pyritty tuomaan esille myös kaupallisia sovelluksia, joiden avulla saadaan käsitys sensorien tämän hetkisestä suorituskyvystä. Sensorien suorituskyyky eri olosuhteissa kootaan liitteeseen 1.

## 2.2. Audiotaaajuudet

Akustisia sensoreita on yleisimmin käytetty sukellusveneiden havaitsemiseen ja vastustajan epäsuorantulen yksiköiden paikantamiseen. Kaikuluotaimilla ja vastatykistötutkilla kyetään saamaan parempi paikantamistarkkuus, mutta akustisen sensorin yhtenä houkuttelevana piirteenä on sen passiivisuus. Epäsymmetrisen sodankäynnin yleistyminen on johtanut yhtenä osatekijänä myös tarkka-ampujien paikantamiseen soveltuvien akustisten sensorien kehittämiseen.

Akustinen sensori edellyttää vähintään yhtä mikrofonia, jolla voidaan havaita ääni ja suunta. Yhdellä mikrofoniolla voidaan käytännössä vain todeta äänen olemassaolo, suunnan luotettavampaan määrittämiseen tarvitaan kaksi tai useampia mikrofoneja. Mitä useampi mikrofoni on käytettävissä ja mitä leveämpi niiden muodostama rintama on, sitä tarkemmin äänen suunta saadaan määritettyä. Äänen suunnan määrittämisen kannalta rakennettu alue on sensoreille akustisesti haastava ympäristö. Ääniaaltojen heijastuminen seinistä ja useat etenemisreitit vaikeuttavat äänen lähtöpisteen paikantamista. Sensori saattaa siis saada samasta lähteestä peräisin olevan ääniaallon eri suunnista eri tavoin heijastuneena. Matkalla ääniaalto saattaa myös sirotta ja taipua [29].

Useimmat maavoimien käyttöön tarkoitetut akustiset sensorijärjestelmät ovat keskittyneet havaitsemaan ja paikantamaan tarkka-ampujia. Kiväärin luodin nopeus ylittää yleensä äänennopeuden, jolloin syntyy iskuaalto ilman puristuessa voimakkaasti kokoon luodin kärjessä ja levitessä luodin perästä. Aallon kulma lentorataan nähden riippuu luodin nopeudesta; luodin nopeuden hidastuessa kulma kasvaa. Oleellinen informaatio iskuvaallon havaitsemisen lisäksi on piipun suusta lähtenyt laukaussmelu, joka etenee äänen nopeudella. Kuvassa 1 on yksinkertainen geometrinen malli, jota voidaan käyttää määrittämään saapumisaika (Time of Arrival, TOA) ja tulokulma (Angle of Arrival, AOA) kahden akustisen aallon osalta.



Kuva 1. Laukausmelun ja iskuaallon eteneminen kivääricaliiperisellä aseella ammuttaessa.

Jos heijastukset jätetään huomiotta, laukaussmelun aaltorintama etenee aseelta sensorille äänennopeudella. Iskuaallon kulma sensoriin nähden muuttuu luodin nopeuden hidastuessa, mutta laskentakaavaa iskuaallon saapumisesta sensorille voidaan yksinkertaistaa olettaen luodin nopeuden olevan vakio. Ääniaaltojen saapumisaika on helposti laskettavissa käyttäen fyysikan peruslaskukaavoja ja hyödyntäen kuvassa 1 näkyvää geometriaa. Kulmalle  $\theta$  riittävän tarkka arvio saadaan kaavasta:

$$\theta = \arcsin(1/M), \quad (1)$$

jossa  $M$  (Mach) on luodin nopeus jaettuna äänennopeudella.

Noin 400 metrin etäisyydelle ei luodin nopeus merkittävästi hidastu, joten teoreettinen etäisyys ampujasta sensorille saadaan kaavasta:

$$r = [c \cdot (TOA_{\text{laukaus}} - TOA_{\text{isku}})] / [1 - \cos(AOA_{\text{laukaus}} - AOA_{\text{isku}})], \quad (2)$$

jossa  $c$  on äänennopeus,  $TOA_{\text{laukaus}}$  ja  $TOA_{\text{isku}}$  laukaussmelun ja iskuaallon saapumisajat sensorille sekä  $AOA_{\text{laukaus}}$  ja  $AOA_{\text{isku}}$  laukaussmelun ja iskuaallon tulokulmat sensorille.

Valtaosa tarkkuuskiväärien luodeista on ylitääninopeudella eteneviä, jotta niillä voidaan vaikuttaa tarkemmin ja pidemmälle. Aliääniluoteja käytettäessä lentorata on kaarevampi ja luodin hitaudesta johtuen liikkuvaan kohteeseen on vaikeampi osua. Aliääniluodeilla ei synny iskuaaltorintamaa, vaan vaimentunut laukaussmelu on ainoa akustisesti havaittava ilmiö. Mikäli käytössä on riittävä määrä sensoreita, voidaan jo pelkän laukaussmelun perusteella paikantaa ampuja. Langatonta tarkka-ampujan paikantavaa järjestelmää tutkittaessa on arvioitu [53], että tällöin tarvittaisiin kahdeksasta kymmeneen näköyhteydessä olevaa sensoria ja silti havain-

toetäisyyden kasvaessa yli 50 metriin ei paikannustarkkuutta voitaisi pitää riittävänä. Iskuaallon perusteella ei voida määrittää ampujan tarkkaa sijaintia, mutta sen perusteella voidaan määrittää luodin lentorata, jos sensoreita on riittävästi. Yhdistämällä iskuaallosta ja laukausmelusta sensorien avulla saatava informaatio voidaan paikannus toteuttaa tarkasti. Tutkimustilanteessa on sotilaiden harjoituskäyttöön tarkoitettussa kylässä 100 x 100 metrin alueelle asennettu 56 langatonta akustista sensoria. Tällä koeasettelulla päästiin metrin tarkkuuteen ampujan sijainnista. Huomioitavaa on, että noin kolmasosa sensoreista oli näköyhteyden päässä ampujasta ja ne saivat näin ollen heijastumattoman ääniäallon laukausmelusta. Noin kymmenen sensoria havaitsi ääniäallon, joka oli heijastunut ja noin puolet sensoreista ei saanut havaintoa.

Raytheonin Boomerang on ajoneuvoon tai maajalustalle sijoitettava akustinen järjestelmä, joka paikantaa ampujan. Järjestelmä perustuu seitsemään eri suuntaan osoittavan mikrofoniin, joihin lentävän luodin aaltorintama osuu eri aikaan. Järjestelmä huomio myös laukausäänen, joka saapuu aaltorintaman jälkeen ja laskee ampujan sijainnin suunnan. Järjestelmä ilmaisee sekä ääneen ilmoittamalla että visuaalisesti luodin tulosuunnan. Järjestelmän ilmaiseman etäisyyden keskihajonnaksi 300 metrin ampumaetäisyydeltä on saatu noin 50 metriä ja suunnan keskihajonnaksi yksi aste. Mittausten tieteellistä luotettavuutta heikentää kuitenkin se, että tekijät ovat olleet Raytheonin palveluksessa [35]. Boomerangista on edelleen kehitetty taistelijan käyttöön sopiva noin 340 grammaa painava Boomerang Warrior-X, jota taistelija kantaa varusteissaan. Valmistaja ilmoittaa suuntavirheeksi alle 7.5 astetta ja etäisyysvirheeksi  $\pm 20$  prosenttia [48]. Valmistaja ei ilmoita, mihin etäisyyden arviointi perustuu, mutta todennäköisesti laite vertailee luodin ja laukausmelun aikaeroa. Taistelijan käyttöön soveltuvan sensorin selvästi heikompi suuntaresoluutio on selitettävissä pienikokoisella mikrofoni-matriisilla.

Ranskalaisen 01dB-Metravibin PILAR MKII-W on Boomerangia vastaava järjestelmä, jonka ilmoitetaan pystyvän havaitsemaan ja paikantamaan pienikaliiperisten aseiden laukausten lisäksi singon ja kranaatinheittimien kranaatit sekä panssarintorjuntaohjukset. Järjestelmä perustuu neljän mikrofoniin muodostamasta tetraedrin muotoisesta mikrofoniiryhmästä, keskusyksiköstä ja näytöstä. Valmistaja ilmoittaa sekä korkeus- että sivusuunnan tarkkuudeksi  $\pm 2$  astetta ja suurimmaksi havaintoetäisyydeksi 1500 metriä. Järjestelmä on tarkoitettu ajoneuvokäyttöön tai maajalustalle asennettavaksi.[1] Valmistaja on kehittänyt myös kiväärikaliiperiseen aseeseen kiinnitettävän akustisen sensorin, joka kykenee annettujen tietojen perusteella  $\pm 10$  asteen tarkkuuteen ja siirtämään havaintotiedot tarvittaessa ulkopuoliselle näytölle [2].

Boomerangin ja PILARw:n kanssa hyvin samankaltainen akustinen järjestelmä on kanadalaisen MacDonald Dettwiler Associatesin Ferret. Se perustuu mikrofoniatriisiin ja laajakaistaisiin paineantureihin, joiden avulla voidaan havaita ja analysoida laukausselua ja iskuaalto. Työpaperissa [8] todetaan, että tehtyjen mittausten perusteella järjestelmän etäisyysvirhe on noin kahdeksan prosenttia ja suuntavirhe noin prosentin ampumaetäisyyden ollessa 100 - 800 metriä riippumatta siitä liikkuuko ajoneuvo vai ei.

Maajalustalle tai ajoneuvoon asennettavan akustisen sensorin tarkkuus on hyvin samansuuntainen valmistajasta riippumatta. Osa asiaan liittyvistä tutkimuksista on ainakin näennäisesti riippumattomia. Kenttäkokeiden tuloksiin pitää kuitenkin aina suhtautua kriittisesti, sillä tuloksiin liittyviä muuttuvia tekijöitä on runsaasti. Suuntaa antavina tuloksia voidaan kuitenkin pitää. Akustiset sensorit kykenevät havaitsemaan ympäristöstään tulevia muitakin akustisia herätteitä kuin laukausselun. Samaan yksikköön voidaan yhdistää myös seismisiä ja magneettisia herätteitä ilmaisevat sensorit. Havainto kohteesta voidaan tehdä 30 - 100 metrin päästä riippuen kohteen antaman herätteen voimakkuudesta. Tällaisella sensorilla voidaan esimerkiksi valvoa jokin tietty alue, jolloin laite ilmaisee yksinkertaisimmillaan herätteen läsnäolon. Laite voi myös uhkakirjastoon perustuen luokitella havaitun kohteen ja ilmaista esimerkiksi sen liikkumissuunnan. Aluevalvontaan tarkoitetuissa laitteissa voidaan esimerkiksi virrankulutukseltaan suurempi kameravalvonta aloittaa akustisen herätteen perusteella.

Henkilöiden määrä voidaan saada selville akustisesta signaalista pääkomponenttianalyysin (PCA) tai itsenäisten komponenttien analyysin (ICA) perusteella ilman, että operaattori kuuntelee signaalia ja pääättelee henkilöiden määrän [10]. Automatisoitu päättely kuormittaa henkilöstöä vähemmän ja tarjoaa silti luotettavan tavan arvioida henkilöiden määrän kohteessa. Langattomien akustisten sensorien tavoiteltavina ominaisuuksina voidaan pitää pientä kokoa, alhaista virrankulutusta, suurta herkkyyttä, riittävää äänenpaineenkestoa (räjähdysket ja laukausselua) ja kykyä välittää informaatio eteenpäin.

Yhtenä tulevaisuuden kehityskohteena voisi olla Boomerang Warrior-X -tyyppisen taistelija-kohtaisen sensorin pienentäminen ja verkottaminen lähellä olevien sensorien kanssa. Näin taistelijat langattomine akustisine sensoreineen muodostaisivat mikrofoniiryhmän, jolla voitaisiin päästä parempaan akustisen signaalin lähtöpisteen paikannukseen. Kriittisinä tekijöinä tällaisellekin järjestelmälle ovat tieto sensorien sijainnista sekä yhteinen tarkka aika. Sensorisolmut kykenevät paikantamaan suhteellisen sijaintinsa muihin solmuihin mittaamalla esimerkiksi langattomassa verkossa kulkevan paketin kuluaikaa [19]. Absoluuttisen

sijaintitiedon selvittämiseksi tulee kuitenkin yksi tai useampi solmu ankkuroida todelliseen sijaintiin.

### 2.3. Radiotaajuudet

Radioaalloilla tarkoitetaan yleisesti sähkömagneettista säteilyä, jonka taajuus on 3 Hz - 300 GHz. Käytännössä oleelliset taajuusalueet tämän tutkimuksen kannalta ovat langattomien verkkojen IEEE 802.11n -standardin mukaiset 2.4 GHz:n (WLAN, Bluetooth ja ZigBee) ja 5 GHz:n (WLAN) sekä IEEE 802.15.4a -standardin mukainen erittäin laajakaistaisen (UWB, Ultra Wide Band) signaalin taajuusalue. UWB voi käyttää kolmea laajaa taajuuskaistaa, jotka ovat 250 - 750 MHz, 3.244 - 4.742 GHz ja 5.944 - 10.234 GHz [52]. UWB:n etuna on sen käyttökelpoisuus etäisyyden määrittämiseen, kun taas 802.11n -standardi on suunniteltu ensisijaisesti tiedon siirtoon.

Yksi verrattain uusista ja vielä tutkimusasteella olevista keinoista paikantaa kohde on mahdollisuus selvittää kohteen sijainti sisätiloissa perustuen vastaanotetun radiosignaalin voimakkuuteen (RSSI, Received Signal Strength Indicator). Paikannusjärjestelmä voidaan rakentaa kohteeseen etukäteen, mutta käytännössä taistelukäyttöön soveltuvan järjestelmän tulisi olla kohteeseen helposti toimitettava, verkon muodostava ja pitkälle automatisoitu. Paikannusta on testattu kokeellisesti avoimeen tilaan luodussa keinotekoisessa langattomien sensorisolmujen muodostamassa huoneessa. Lisäksi samassa yhteydessä on tutkittu yksinkertaisten esteiden (pylväät ja koristekasvit) vaikutusta paikannuksen tarkkuuteen. Koeolosuhteissa sensorit oli sijoitettu noin metrin korkeiden jalustojen päälle, joka ei esimerkiksi sotilaskäytössä vastaisi kohteeseen toimitettavan paikannusjärjestelmän todellista käyttöä. Sen sijaan taistelijan varusteissa kulkevan sensorin korkeus lattiatasosta voi hyvinkin vastata koejärjestelyjä. Tutkimusta voidaan kuitenkin pitää suuntaa antavana sotilaskäyttöön sopivia järjestelmiä suunniteltaessa. Suurimmaksi paikannuksen virheeksi saatiin 0.24 metriä, kun solmuja oli 16 kappaletta [26]. Testatun tilan pinta-ala vaihteli 16:sta 64:ään neliömetriin. Kokeessa verraten pienissä tiloissa pinta-alan suurentaminen ei merkittävästi heikentänyt tarkkuutta.

Aikajakokanavaperiaatteella toimivan verkon solmut lähettävät ja vastaanottavat vuorotellen. Haasteena on solmujen (node/mote) radiolähetteen kantama sisätiloissa. IEEE 802.15.4 -standardin mukaiset matalatehoiset radiot kantavat 70 metrin päähän, mutta sisätiloissa päästään tyypillisesti noin kymmenen metrin yhteysväleihin. Toisena haasteena on eri solmujen vastaanottamien signaalien mittauksen ennustamattomuus perustuen verkon asymmetriseen rakenteeseen. Kolmantena haasteena on vaatimus tiedon reaaliaikaiselle välittämiseksi keskus-

solmulle paikannuksen tarkkuuden takaamiseksi.[26] On myös havaittu, että solmujen lähetysteho pitää optimoida ympäristön mukaan [57]. Liian suuri lähetysteho aiheuttaa runsaasti häiritseviä heijastumia, kun taas liian alhainen teho johtaa signaalin häviämiseen taustakohinaan.

Yhtenä kriittisenä tietovaatimuksena Rakennetun alueen taistelun käsikirjan luonnoksen mukaan on johtajien tietoisuus alaistensa sijainnista [45]. Taistelijan mukana kulkeva GPS-paikannin mahdollistaa omien joukkojen paikantamisen. Sisätiloissa ei yhteyttä GPS-satelliitteihin välttämättä synny, joten paikannus pitää toteuttaa esimerkiksi inertia-antureihin perustuen. Tällöin voidaan saada paikkatieto taistelijasta myös korkeussuunnassa sekä mahdollisesti taistelijan asento. Taistelijan sijainti voidaan välittää esimerkiksi WLAN-verkossa muille ryhmän jäsenille, jolloin edellä mainittu kriittinen tietovaatimus täyttyy. Vastaanotetun signaalin voimakkuuteen perustuva omien joukkojen paikantaminen taistelijan mukana kulkevilla RSSI-sensoreilla on haasteellista. Signaalin voimakkuuteen vaikuttavat esimerkiksi heijastumiset, monitie-eteneminen, tilan mittasuhteet, materiaalit ja liikkuvat kohteet [51]. Omien joukkojen paikantamiseen sisätiloissa soveltuu paremmin vasteaikaan (RTT, Round-trip Time) perustuva paikantaminen, joka voidaan toteuttaa esimerkiksi tavallisilla langattomia verkkoja hyödyntävillä pienillä kannettavilla tietokoneilla [19].

## 2.4. Mikroaallot

Mikroaalloilla tarkoitetaan taajuusaluetta 3 - 300 gigahertsiin (GHz) eli aallonpituusaluetta 10 cm:stä 1 millimetriin. Taajuusalueina käytetään termejä SHF (3 - 30 GHz) ja EHF (30 - 300 GHz) [29]. EHF-alueutta kutsutaan myös aallonpituuden vuoksi millimetri-alueeksi. Mikroaaltojen eteneminen perustuu näköyhteysreittiin ja myös ilmakehän sekä sääilmiöiden vaikutus etenemiseen on otettava huomioon. Tyypillisiä sotilaallisia sensorisovelluksia tällä taajuusalueella ovat erilaiset tutkat. Osa uudemman sukupolven laajakaistatutkista (Ultra Wide Band, UWB) käyttää taajuusalueenaan UHF-taajuusalueen yläpäättä ja SHF-alueen alapäättä.

Maastovalvontatutka on tarkoitettu taistelukentän valvontaan. Jalkaväen käyttöön tarkoitettun tutkan on oltava pienikokoinen ja riittävän kevyt, jotta sitä voidaan liikuttaa. Lisäksi tutkan on kyettävä erottamaan maaston, kasvillisuuden, rakennusten ja sään aiheuttaman tutkavälkkeen joukosta ajoneuvot ja ihmiset. Tästä syystä yleisimpänä ratkaisuna on käyttää pulssi-Doppler-periaatteella toimivaa tutkaa, jolla liikkuvat kohteet voidaan erottaa paikallaan olevista.



Vaatimus tutkan antennin pienestä koosta ja kyvystä havaita ihminen asettaa reunaehdoja myös tutkan taajuudelle. Jotta resoluutio saadaan riittävän suureksi, on taajuuden oltava riittävän korkea ja keilan riittävän kapea. Tyypillisesti maastonvalvontatutkat toimivatkin joko 8 - 12 (X-alue) tai 12 - 18 (Ku-alue) GHz:n alueilla. Näillä alueilla sateen aiheuttama vaimennus pysyy alle 1 dB/km tasolla. Vain erityisen lyhytkestoisten rankkasateiden aikana vaimennus saattaa nousta 2 - 4 dB/km tasolle. Sateen merkitystä voidaan pienentää käyttämällä joko vertikaalisesti polarisoitua [14] tai ympyräpolarisoitua aaltoa, koska muodoltaan litistyneet sadeepisarat vaimentavat enemmän horisontaalisesti polarisoituneita aaltoja. Sumun vaikutus taajuusalueella on alle 0.1 dB/km.

Maastovalvontatutkalla voidaan valvoa tiettyä sektoria liikuttamatta antennia tai antennia voidaan pyörittää ympäri 360 asteen valvontasektorin luomiseksi. Mitä nopeammin antennia pyöritetään, sitä vähemmän aikaa tutkalla on aikaa vastaanottaa heijastunutta signaalia. Esimerkiksi DRS Technologies ilmoittaa maastonvalvontatutkansa MSTAR V6:n etäisyysresoluutioksi  $\pm 10$  metriä ja ihmisen havaintoetäisyydeksi 13 kilometriä [13]. Tutka toimii Ku-alueella eli keskitaajuudeksi alueelta voidaan valita 15 GHz. Minimietäisyydeksi ilmoitetaan sata metriä ( $R_{\min}$ ). Pienin havaintoetäisyys määrittää pulssin pituuden ( $\tau$ ).

$$R_{\min} \approx (c \cdot \tau) / 2 \quad \text{eli} \quad \tau \approx 2 \cdot R_{\min} / c \approx 0.7 \mu\text{s} \quad (3)$$

Tällä pulssinpituuksella saadaan etäisyysresoluutioksi

$$\Delta R = c \cdot \tau / 2 = 210 \text{ m}, \quad (4)$$

joka ei ole ilmoitettujen tietojen mukainen ( $\Delta R_{\text{req}}$ ). Näin ollen tutkassa on käytettävä pulssikompressiota. Taajuuspyyhkäisyä käytettäessä pyyhkäisykaistaksi saadaan

$$f_{\text{sweep}} = c / (2 \cdot \Delta R_{\text{req}}) = 15 \text{ MHz} \quad (5)$$

Tyypillisesti tutkien pulssikompressioon käytetään vaihemodulaatioon perustuvaa Barker-koodia. On huomattava, että valmistajan ilmoittamat ominaisuudet ovat huippuarvoja. Näin ollen esimerkiksi suurin havaintoetäisyys ja paras etäisyysresoluutio toteutuvat vain rajoitetulla valvontasektorilla, eivät 360 asteen valvonnassa.

Seinän läpi toimivan tutkan tekniikkaa on tutkittu viime aikoina runsaasti. Monet eri viranomaiset tarvitsevat kyseistä tutkaa; sitä voidaan käyttää esimerkiksi sotilaallisissa operaatioissa, poliisin käytössä ja pelastusviranomaisten käytössä etsittäessä henkilöitä esimerkiksi rautatiealueista. NykYTEknologia mahdollistaa kohteiden havaitsemisen seinän takaa ja erottamaan

elävän kohteen esimerkiksi sydämen ja hengityksen aiheuttaman Doppler-siirtymän vuoksi [18]. Verrattain uudesta teknologian alasta kertoo se, että tällä hetkellä käytössä on vain yksi kaupalliseen käyttöön valmiiksi asti päässyt tuote. SoldierVision-seinäututkaa valmistava TimeDomain ilmoittaa tutkan kykenevän havainnoimaan 20 metrin etäisyydelle puu-, tiili- tai kipsilevyseinän taakse, mutta vain 20 senttimetrin etäisyydelle betoniseinän taakse [37]. Valmistaja ei kuitenkaan kerro tutkan tarkempaa toimintataajuutta tai signaalin ominaisuuksia. On mahdollista, että seinätutkaan liittyvä teknologia nähdään niin tärkeänä, että siihen liittyvät mittaustulokset ja laitteiden parametrit pyritään pitämään salassa.

Seinän läpi toimiva tutka käyttää hyvin laajaa taajuuskaistaa ja erittäin lyhyitä pulsseja havaitakseen ei-metallisen seinän takana olevia kohteita. Signaali lähetetään seinään, osa signaalista läpäisee seinän, heijastuu huoneessa olevista kohteista ja palaa takaisin seinän läpi. Tutkan säteilyn läpäisykykyyn vaikuttavat eniten taajuus, seinämateriaali ja seinän kosteus [37]. Matalammilla taajuuksilla läpäisy on parempi, mutta tarkkuus heikompi. 2-110 GHz:n alueella säteilyn läpäisy on verrattain hyvää vaimennuksen ollessa 0 - 7 desibelin luokkaa mineraalivillassa, kipsilevyssä, lasissa ja vanerissa. Sen sijaan lastulevy, MDF-levy (medium-density fibreboard, puolikova kuitulevy), tiili ja 22 millimetrin puupaneeli vaimentavat säteilyä voimakkaasti vaimennuksen ollessa 5 - 27 desibeliä [28][37]. Seinän paksuuden kasvaessa myös vaimennus lisääntyy.

Eri seinämateriaalin vaikutusta tutkasäteilyn etenemiseen on tutkittu, mutta monikerroksisten eri materiaaleista koostuvien seinien vaikutusten arviointi on hyvin monimutkaista. Toisaalta Suomessa voitaisiin keskittyä tutkimaan täällä yleisimpiä rakenneratkaisuja, jolloin voitaisiin luoda ainakin kohtuullinen malli tutkasäteilyn etenemisille yleisimmin käytetyissä seinärakenteissa.

## 2.5. Lasertutka

Lasertutkat ovat aktiivisia sensoreita, joiden toimintatapa muistuttaa mikroaaltotutkia toimintataajuuden ollessa kuitenkin huomattavasti korkeampi. Näin ollen pienemmällä aallonpituudella verrattuna radiotaajuuksiin saavutetaan parempi resoluutio kolmessa ulottuvuudessa [22]. Optisen säteilyn heikkoutena on kuitenkin suurempi ilmakehän vaimennus, joka rajoittaa lasertutkan suurinta havaitsemisetäisyyttä. Laserista lähtevässä valossa fotonit ovat samassa vaiheessa eli säteily on koherenttia. Koherentin valon mahdollisuuksia ovat esimerkiksi

- energian keskittäminen pitkän etäisyyden päähän esimerkiksi laseretäisyysmittarissa
- energian keskittäminen pienelle alueelle
- kemiallisten ja biologisten taisteluaineiden havainnointi
- tiedonsiirto optisissa yhteyksissä
- korkealla tarkkuudella toimivat kuvausjärjestelmät satelliiteissa.[36]

Laserista lähtevä valo pysyy kohtuullisen hyvin koossa ja sen vaimennus säteen leviämisen johdosta on vähäistä. Lasersäteen hajonta eli divergenssi riippuu paljon lähettävän laitteen optiikasta. Säteen kulkeminen aukosta aiheuttaa Fraunhoferin diffraktioksi kutsutun ilmiön, jolloin lasersäde on tyypillisesti keskustastaan kirkkaampi kuin ulkoreunasta ja säteen poikkeileikkauksen intensiteetti voidaan arvioida kohtuullisesti Gaussin hajonnalla [36]. Mitä pienemmän aukon läpi säde joutuu kulkemaan, sitä enemmän säde hajoaa. Tämän vuoksi sotilasovelluksissa laserin optiikan koon tulisi olla mahdollisimman suuri käyttötarkoituksen huomioon ottaen.

Lasertutkien ongelmana oli pitkään niiden hyvin rajoittunut kyky alueen valvontaan yksielementtisellä sensorilla. Alueen havainnointi vei kauan ja liikkuvia kohteita ei pystytty ilmaistamaan. Teknisen kehityksen myötä myös lasertutkissa ollaan siirtymässä pyyhkäisevien sensorien sijasta tuijottaviin sensoreihin, jolloin laajempi alue saadaan kerralla nopeasti havainnoitua. Muodostamalla uhkakirjasto mahdollista ajoneuvoista ja aseista voidaan lasertutkalla saada automaattisesti tieto esimerkiksi panssarivaunun tyypistä. Edellytyksenä on tietenkin, että kohde on saatu mallinnettua tietokantaan ja että eri panssarivaunumallit eroavat toisistaan riittävästi. Esimerkiksi BMP-1 -rynnäköpanssarivaunun havainto voi kokeellisen tutkimuksen mukaan olla 40%:n todennäköisyydellä myös BMP-2 -rynnäköpanssarivaunu [59].

Etäisyysporttia (Gated Viewing, GV) hyödyntämällä voidaan havainnoida esimerkiksi kasvilisuuden, ikkunoiden ja naamioverkkojen takana olevia kohteita. Esimerkiksi 40 nanosekunnin etäisyysportilla saadaan muodostettua kuva ympäristöstä noin kuuden metrin välein perustuen kaavaan 6.

$$s=c \cdot t/2, \tag{6}$$

jossa  $s$  on etäisyys,  $c$  valonnopeus ja  $t$  aika eli etäisyysportin leveys. Etäisyysporttia hyödyntämällä saavutetaan esimerkiksi seuraavia etuja:

- heijastusten vaikutukset savusta, ilmakehästä ja maastosta johtuen pienenevät.
- pitkillä matkoilla havaitaan paremmin optiset laitteet (esimerkiksi kiikarit ja lämpökamerat).

- kohteen etäisyys voidaan määrittää kuvista saatavan tiedon perusteella.
- kohteista saadaan myös havainto ääriwiivoista.[32]

Rakennetulla alueella lasertutkaa voitaisiin käyttää näkemään ikkunalasien, sälekaihtimien ja ikkuna-aukkoihin mahdollisesti näkösuojaksi asennettujen ohuiden kankaiden taakse. Täysin suljettujen sälekaihtimien taakse lasertutkakaan ei näe, mutta jo kahdesta kolmeen millimetrin rako säleiden välissä mahdollistaa lasertutkalla havainnoinnin kaihtimien taakse [32]. Aiemmin lasertutkiin käytettiin ensisijaisesti 1.06 ja 10.6 mikrometrin aallonpituuksia sopivan ilmakehän läpäisyn ja laserteknologian vuoksi [22]. Nykyään sen sijaan suositaan silmäturvallista hyvin ilmakehää läpäisevää Erbium-laserin 1.5 mikrometrin aallonpituutta [32].

## 2.6. Infrapuna-alueen sensorit

Kaikki absoluuttista nollapistettä lämpimämmät kohteet lähettävät sähkömagneettista säteilyä. Fysiikassa käytetään termiä musta kappale sellaisesta ideaalista fyysisestä kappaleesta, joka absorboi kaiken sähkömagneettisen säteilyn eikä heijasta sitä, mutta säilyttääkseen termisen tasapainonsa emittoi vastaanottamansa energiamäärän säteilyä. Säteilyn tehotehoisuus eri aallonpituusalueilla riippuu kappaleen lämpötilasta. Wienin siirtymälain mukaan säteilyn intensiteettimaksimi saadaan kaavasta:

$$\lambda_{\max}=b/T, \quad (7)$$

jossa vakio  $b$  on Wienin siirtymävakio  $2898 \mu\text{mK}$ . Näin ollen esimerkiksi ihmisen (noin  $36^\circ\text{C}$ ) lähettämä säteilyn intensiteettimaksimi on noin  $9.37$  mikrometrin alueella.

Luonnossa olevat kappaleet eivät kuitenkaan ole teoreettisia mustia kappaleita, vaan kappaleet myös heijastavat tai päästävät lävitseen osan niihin kohdistuneesta säteilystä. Näistä käytetään nimitystä harmaa kappale. Harmaan kappaleen lähettämänä säteilymäärä saadaan Stefanin-Boltzmannin laista johtamalla.

$$W_b=\varepsilon\sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}, \quad (8)$$

jossa  $\varepsilon$  on kappaleen emissiivisyys,  $\sigma$  Stefanin-Boltzmannin vakio  $5.670400 \cdot 10^{-8} \text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{K}^{-4}$  ja  $T$  kappaleen lämpötila Kelvinin asteikolla. Läpinäkymättömän kappaleen emissiivisyys- ja reflektiivisyyskertoimien summa on yksi.

Infrapunasäteily käsittää aallonpituudet näkyvän valon (780 nanometriä) alueelta millimetrin aallonpituuteen asti. Toisaalta joidenkin näkemysten mukaan infrapunasäteily päättyy 50 tai 300 mikrometrin aallonpituuteen. Infrapuna-alue voidaan jakaa usealla eri tavalla osiin, mutta yksi sotilaskäytössä tyypillisimminkin esiintyvistä luokitteluista on esitetty taulukossa 2. Valonvahvistimet hyödyntävät näkyvän valon (400 - 780 nanometriä) lisäksi jonkin verran lähi-infrapuna-alueen säteilyä.

Taulukko 2 Infrapuna-alueen jakaminen osiin taajuusalueen mukaan

<b>Englanninkielinen lyhenne</b>	<b>Käsite</b>	<b>Suomennos</b>	<b>Aallonpituusalue</b>
NIR	Near Infrared	Lähi-infrapuna	0.7 - 1.1 $\mu\text{m}$
SWIR	Short-Wavelength Infrared	Lyhytaaltoinfrapuna	1.1 - 3.0 $\mu\text{m}$
MWIR	Medium-Wavelength Infrared	Keskiaaltoinfrapuna	3.0 - 5.0 $\mu\text{m}$
LWIR	Long-Wavelength Infrared	Pitkäaaltoinfrapuna	5.0 - 20 $\mu\text{m}$

Ilmakehän alaosan eli troposfäärin läpäisevyys asettaa omat reunaehdonsa infrapuna-alueen sensoreille. Lähi- ja lyhytaaltoinfrapunasäteily sekä keskiaaltoinfrapunasäteily läpäisevät ilmakehää pääosin hyvin. Sen sijaan pitkäaaltoinfrapunasäteilyn aallonpituudet 5 - 8 mikrometriä ja 14 - 20 mikrometriä ovat huonosti ilmakehää läpäiseviä. Kaavan 7 mukaisesti taulukkoon 3 on laskettu eri infrapuna-alueiden osalta kappaleiden lämpötilat, joilla säteilyintensiteetin maksimi saavutetaan.

Taulukko 3 Eri infrapuna-alueiden raja-arvojen mukaiset säteilyintensiteetin maksimia vastaavat lämpötilat

<b>Infrapuna-alue</b>	<b>Aallonpituuden alaraja</b>	<b>Aallonpituuden yläraja</b>
<u>NIR</u>	0.7 $\mu\text{m}$	1.1 $\mu\text{m}$
Säteilyintensiteettimaksimi	3866° C	2360° C
<u>SWIR</u>	1.1 $\mu\text{m}$	3.0 $\mu\text{m}$
Säteilyintensiteettimaksimi	2360° C	692° C
<u>MWIR</u>	3 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$
Säteilyintensiteettimaksimi	692° C	305° C
<u>LWIR</u>	8 $\mu\text{m}$	14 $\mu\text{m}$
Säteilyintensiteettimaksimi	88° C	-67° C

Taulukosta 3 voidaan todeta, että LWIR-alueen säteilyintensiteettimaksimit vastaavat riittäväällä tarkkuudella maapallolla ilmeneviä taustalämpötiloja ( $-67^{\circ}\text{C}$  -  $88^{\circ}\text{C}$ ). Näin ollen kyseinen taajuusalue sopii parhaiten esimerkiksi ihmisten ja ympäristön lämpöisten kohteiden havainnointiin. MWIR-alueen säteilyintensiteettimaksimit vastaavat suihkumoottorin lämpötilaa ja tätä aluetta on hyödynnetty erityisesti lämpöön hakeutuviissa ilmatorjuntaohjauksissa.

Tyypillisesti 3 - 5 tai 8 - 14 mikrometrin ilmakehän ikkunoiden alueella toimivat lämpökamerat näkevät savun lävitse. Savun partikkelikoko vaihtelee palavasta aineesta riippuen noin 0.01 - 1.0 mikrometrin välillä, joten savun partikkeleiden koko on selvästi pienempi kuin lämpökameroiden näkemä aallonpituusalue. Tällaiset aallonpituuteen nähden pienet kappaleet eivät juuri vaikuta säteilyn etenemiseen [29][22]. Sen sijaan sumun partikkelikoko on erityisesti MWIR-alueella toimivan lämpökameran aallonpituusalueella, joten sumu heikentää merkittävästi tällaisen sensorin suorituskykyä [43]. Sopivissa olosuhteissa voidaan paljaalla silmällä havaita kohde, jota lämpökamera ei kykene näkemään. Sadepisarat ovat selvästi lämpökameroiden käyttämää aallonpituutta suurempia partikkeleita, jolloin vaimennus perustuu partikkeleiden lukumäärään. Kova sade siis heikentää lämpökameroiden suorituskykyä merkittävästi [29].

Lämpökamera voi havaita kohteen vain, mikäli kohde erottuu taustastaan riittävästi eli lämpökontrasti on riittävän suuri. Ilmaisuihin voi perustua joko termiseen ilmaisuun tai fotonien ilmaisuun. Terminen ilmaisuus lämpenee kohteesta tulevan lämpösäteilyn vaikutuksesta ja mittaa lämpötilan muutoksia. Fotonien ilmaisuun perustuva ilmaisuus sen sijaan suoraan vastaanottamansa fotonit. Terminen ilmaisuus voidaan toteuttaa jäähdyttämättömänä, mutta sen ilmaisuherkkyys ja nopeus eivät ole yhtä hyviä kuin jäähdytetyn ilmaisimen. Jäähdytetty ilmaisuus on huomattavasti herkempi ( $10^3$ ), mutta jäähtyminen vie aikaa ja aiheuttaa melua.

Nykyiset jalkaväen käyttöön tehdyt lämpökamerat on suunniteltu taistelukentän olosuhteisiin avoimeen maastoon. Näin ollen niiden näkökenttä vaihtelee yleensä noin kolmen ja kymmenen asteen välillä. Rakennetulla alueella, missä tähytysetäisyydet ovat tyypillisesti lyhyet, näkökentän tulisi olla ensisijaisesti laaja. Erityisesti sisätiloissa suurentava optiikka voi olla jopa käyttökelvoton muutamien metrien tähytysetäisyyksillä. Rakenteet estävät lämpökameraa havaitsemasta kohteita ja lisäksi on huomattava, että lämpökamera ei näe ikkunalasin toisella puolella olevaa tilaa. Tavallinen lasi ei läpäise yli 2.7 mikrometrin aallonpituuksia, joten lämpökameroissa linssit on valmistettu tyypillisesti piistä, sinkkiselenidistä tai germaniumista [29].

Viime aikoina ovat yleistyneet jäädyttämättömät bolometri-ilmaisimeen perustuvat lämpökamerat. Näiden herkkyys ja nopeus on huonompi kuin jäädytettyjen ilmaisimien, mutta jäädyttämättömillä ilmaisimilla havaintojen teko voidaan aloittaa ilman jäähtymiseen kuluva viivettä. Tähistysetäisyydet jäävät näin ollen lyhyemmiksi, mutta tällä ei ole yleensä merkitystä rakennetulla alueella. Lisäksi bolometritekniikka mahdollistaa pienikokoisten lämpökameroiden valmistamisen, joskin huonommasta herkkyydestä johtuen optiikan tulee olla valovoimaisempi ja siten rakenteellisesti isompi [29].

## 2.7. Näkyvän valon sensorit

Näkyvänä sähkömagneettisen säteilyn alueena pidetään ihmissilmälle näkyvää aallonpituus-alueita. Tämä näkyvä valo kattaa lähteistä riippuen noin 380 - 780 nanometrin aallonpituus-alueen. Näkyvän valon alueella voidaan käyttää videokameroita CCD- tai CMOS-tekniikkaan perustuen, valonvahvistimia tai matalavalotelevisiota. Savu, pöly ja sumu sekä voimakas sade haittaavat tai estävät näillä laitteilla havainnoinnin.

Videokameralla voidaan havainnoida näkyvän valon alueella olevia kohteita ja tarvittaessa tallentaa ja lähettää tietoa eteenpäin. Rakennetulla alueella tähistysetäisyydet ovat pääsääntöisesti lyhyitä, jolloin kameralta ei vaadita korkealaatuista optiikkaa. Näin ollen järjestelmissä voidaan hyödyntää edullisia jo yleisessä kaupallisessa käytössä olevia COTS-tuotteita (Commercial Off The Shelf). Koska videokamera toimii samalla aallonpituusalueella kuin ihmissilmä, se ei tarjoa juurikaan lisäarvoa tilannekuvan ylläpitämiselle ilman lisäominaisuuksia. Yhtenä vaihtoehtoisena lisäominaisuutena on kyky hahmontunnistukseen. Hahmontunnistuksen avulla videokameralla varustettu järjestelmä voisi automaattisesti ilmaista mahdollisen uhkan ilman, että käyttäjä jatkuvasti tarkkailee kameran avulla ympäristöään. Kuvamateriaalia voidaan jakaa tarvitsijoille nykytekniikan ansiosta helpommin. Kameran muistikortti voi sisältää langattoman toiminnallisuuden, jolloin kuvamateriaali voidaan jakaa langattomasti nopeasti eteenpäin. Joukkueenjohtaja voisi tarkastella tilannetta taistelijoiden kameroiden välityksellä, jos järjestelmä kykenisi välittämään kuvamateriaalia verkon solmujen välityksellä. Yksittäisen Wi-Fi -lähettimen kantamaksi sisätiloissa valmistaja ilmoittaa noin 15 metriä [16].

Toisena lisäominaisuutena näkyvän valon kameralla voidaan tuottaa langattoman verkon avulla myös kuvaa tilasta, jossa ei omia joukkoja ole. Tätä tarkoitusta varten on kehitetty jo muutamia kaupallisia ratkaisuja. Exavisionin Spybowl on painekäsikranaatin kokoinen kohteeseen heitettävä tai vieritettävä kumipäällysteinen pallo. Se sisältää neljä eri suuntiin osoit-

tavaa kameraa ja mikrofoniin. Valmistajan mukaan laite kykenee lähettämään kuvaa ja ääntä HF-alueen radiolla sisätiloissa 30 metrin ja ulkona 100 metrin päähän [54]. Oven raosta tai oviaukosta voidaan tähyttää pienikokoisella kurkistuskameralla, jolloin taistelija kykenee näkemään tilan ennen sisään menoa rakennusta vallattaessa [15].

Recon Roboticsin Recon Scout Throwbot XT on ScoutSpybowlia hieman kookkaampi mustavalkovideokameralla varustettu sylinterimäinen langaton optinen ja kauko-ohjattava sensori. Se on rakennettu kestäväksi heittäminen ja se kykenee lähettämään videokuvaa operaattorille. Pimeitä tiloja varten sensorissa on automaattisesti käynnistyvä infrapunavalaisu. Laite kykenee liikkumaan myös maastossa, mutta tällöin toiminta-aika jää lyhyemmäksi kuin tasaisilla pinnoilla. Valmistaja ei ilmoita esteen ylityskykyä, mutta renkaan korkeudesta ja hammastetusta rakenteesta voidaan päätellä noin kuuden senttimetrin ylityskyky. Tällä ylityskyvyllä voidaan kulkea rakennuksissa kynnysten, mattojen ja muiden matalien kohteiden yli. Portaissa ei laite pääsääntöisesti kykene liikkumaan, sillä Suomessa portaiden askelkorkeus vaihtelee asetuksen mukaisesti pääsääntöisesti 130 - 190 millimetrin välillä [62]. Lisävarusteena saatavan jatkovarren avulla laitteella voidaan tähyttää tähyttäjän pituudesta riippuen noin 3.5 metrin korkuisen esteen yli [49].

SuperDroidRobots on kehittänyt edellistä paremmin esteiden yli liikkuvan telavetoisen pienikokoisen sensorilavetin. Lavetti voidaan varustaa erilaisilla sensoreilla ja valmistaja on testannut näkyvän valon kameraa infrapunavalaisu mahdollisuudella ja pienikokoista lämpökameraa [55]. Kamera voidaan nostaa normaalista noin 30 senttimetrin korkeudesta nostojärjestelmän avulla noin 2.5 metrin korkeuteen. Laite kykenee liikkumaan portaikossa, mutta esimerkiksi Recon Scout Throwbot XT:iin verrattuna sensorin toimittaminen rakennuksen toiseen kerrokseen on hitaampaa.

Useimmissa sovellutuksissa käytetään mustavalkokameroita, joiden etuna on niiden parempi herkkyys ja näin ollen ne tarvitsevat vähemmän valaistusta. Yhtenä merkittävänä seikkana voidaan pitää siirtymistä vähitellen CCD-tekniikasta (Charge-Coupled Device) CMOS-tekniikkaan (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Tyypillinen 256 x 256 pikseliä käsittävä CCD-kuvakennon tehontarve on yhdestä kahteen wattia, kun taas CMOS-kennon teho vaatimus on vain 10 - 20 milliwattia [5]. CCD-tekniikan etuna on kuitenkin parempi kuvanlaatu kustannuksiin nähden, joten näitä kahta eri tekniikkaa voidaan käyttää tarpeen mukaan eri sovelluksiin.



Valonvahvistin vahvistaa nimensä mukaisesti siihen tulevan valon eli fotonit, jolloin saadaan muodostettua ihmissilmälle intensiteetiltään parempi kuva huonoissa valaisuolosuhteissa. Valonvahvistimet toimivat nykyisin näkyvän valon ja lähi-infrapunan alueella eli noin 500 - 900 nanometrin aallonpituudella. Maastossa kesäaikaan lähi-infrapuna-alueen hyödyntämisestä saadaan lisäarvoa, sillä 800 - 1400 nanometrin alueella lehtivihreää sisältävien kasvien heijastavuus on kaikkein suurimmillaan [60]. Tämä lisää havaittavissa olevan valon määrää. Rakennetulla alueella tästä ominaisuudesta ei saada merkittävää hyötyä, koska kasvillisuutta on vähemmän.

Rakennetulla alueella erityisesti rakennusten sisällä ongelmaksi saattaa muodostua valon vähäinen määrä. Ikkunattomassa kellarissa valoa ei välttämättä ole riittävästi valonvahvistimen toimimiseen. Myös tavallisissa huoneistoissa valon määrä saattaa olla liian vähäinen yöaikaan, koska tähdistä ja kuusta saapuvasta valosta vain pieni osa päätyy ikkunoista rakennusten sisälle. Yhtenä ratkaisuna voidaan käyttää aktiivista infrapunavalaisua. Monissa valonvahvistimissa tällainen ominaisuus on jo olemassa. Valaisu voidaan toteuttaa pienitehoisella lähi-infrapuna-alueella toimivalla ledillä, jolloin virrankulutus ei muodostu ongelmaksi. Aktiivisen valaisun merkittävä heikkous on sen räikeä näkyminen vastustajan pimeänäkölaitteille.

## 2.8. Ultraviolettialueen sensorit

Ultraviolettisäteily käsittää lähteistä riippuen noin 100 - 380 nanometrin aallonpituusalueen. Tyypillisimmin ultraviolettialueella toimivaa sensoria käytetään ilma-alusten passiivissa ohjusvaroittimissa. Niiden toiminta perustuu ohjuksen kuuman rakettimoottorin säteilemän infrapuna- ja ultraviolettisäteilyn ilmaisuun. Ultraviolettialueella toimivan sensorin etuna on Auringosta peräisin olevien heijastusten puuttuminen 230 - 280 nanometrin alueella, koska ilmakehän ylimpien osien otsoni estää säteilyä saapumasta ilmakehän alaosiin. Ilmakehän alaosissa ultraviolettisäteily etenee kuitenkin hyvin, koska otsonia ei ole. On arvioitu, että ohjuksen laukaisutapahtuma voitaisiin havaita muutaman kilometrin etäisyydellä [29]. Myös kivääricaliiperisten aseiden ruutikaasujen palaminen luodin poistuessa piipusta voidaan havaita ultraviolettialueen sensorilla. Ongelmana ultraviolettialueen sensoreilla voidaan pitää omien joukkojen asejärjestelmien aiheuttamia virrehälytyksiä. Näin ollen kiivaissa taisteluissa sensorin käytöstä saatava hyöty voi olla vähäinen.

Tarkka-ampujia paikantavien akustisten järjestelmien ongelmana on paikantaa sellaisia ampujia, jotka käyttävät aliääninopeusluoteja. Tällöin ei saada tietoa sekä laukauksesta että etenevän luodin iskuaallosta. Tällöin voisi olla mahdollista hyödyntää ultraviolettialueen sensoria tarkka-ampujan paikantamiseen suuliekin perusteella. Ultraviolettialueen sensoreita ei kuitenkaan ole juuri kehitetty jalkaväen käyttöön. Todennäköisesti sensorin käytettävyys kiivaissa taisteluissa on hyvin rajallista virheilmaisista johtuen ja sensori itsessään ei tuo merkittävää lisäarvoa tilannekuvan kannalta. Ultraviolettialueen säteily on näkymätöntä ihmissilmälle, mutta esimerkiksi tavanomaisten videokameroiden ja kameroiden piipohjaiset ilmaisimatriisit kykenevät ilmaisemaan myös ultravioletti- ja lähi-infrapunasäteilyä [7]. Kaupallisiin tuotteisiin on lisätty sopivat suodattimet, joilla ei-toivotut taajuusalueet saadaan poistettua. Poistamalla suodattimet saadaan kyseisten taajuusalueiden säteily ilmaistua kameroilla. Mikäli halutaan ilmaista vain ultravioletti- tai lähi-infrapunasäteilyä voidaan kameroihin asentaa halutun alueen päästösuojin (band pass). Tällaisella sensorilla kyetään erottamaan esimerkiksi kohde, joka on suojattu hyvin visuaalista tähytystä että lämpötähytystä vastaan. Tämä onnistuu, mikäli kohteen ultraviolettialueen heijastavuus poikkeaa merkittävästi ympäristöstä.

### 3. RAKENNETTU ALUE TAISTELUTILANA

#### 3.1. Johdanto

Taistelukentän käsitteestä on siirrytty käyttämään taistelutila-käsitettä, joka kuvaa paremmin nykyaikaista sodankäyntiä. Erityisesti rakennetulla alueella taisteluja voidaan käydä maanpinnan tason lisäksi eri kerroksissa ja maan alaisissa tunneleissa. Fyysisen ulottuvuuden lisäksi aikaa on pidetty neljäntenä, sähkömagneettista spektriä viidentenä ja tietoverkkosodankäyntiä kuudentena ulottuvuutena. Kapteeni Teemu Nurmelan esiuupseerikurssin tutkimustyön mukaan kriisinhallintajoukon taistelutila voidaan jakaa fyysiseen ja inhimilliseen ulottuvuuteen sekä informaatioulottuvuuteen [41]. Inhimillinen ulottuvuus sisältää fyysisessä ulottuvuudessa esiintyvän väestön ja muut joukot. Tämän tutkimuksen kannalta keskeiset tarkasteltavat ulottuvuudet ovat fyysinen ulottuvuus ja teknologioiden osalta sähkömagneettinen spektri.

Rakennettu alue voidaan jakaa taistelutilan fyysisen ulottuvuuden mukaan karkeasti neljään luokkaan, jotka ovat tiheästi rakennettu keskusta-alue, teollisuusalue, kerrostaloalue ja pientaloalue. Kaikista näistä alueista voi löytyä piirteitä toisistaan, esimerkiksi pientaloalue voi sisältää myös teollisuusalueelle tyypillisiä hallirakennuksia. Termiä asuntoalue käytetään sekä kerrostalo- että pientaloalueista [61].

Keskustassa rakennukset ovat korkeita ja lähellä toisiaan. Keskustalle ovat luonteenomaisia monikerroksiset kivi-, betoni-, ja betonielementtirakennukset katutasossa sijaitsevina liike-tiloineen, kapeahkot kadut sekä vähäiset torit ja puistot. Teollisuusalueille ovat luonteenomaisia matalat ja tilavat hallimaiset rakennukset, laajat varasto- ja liikealueet sekä verkkoaidat. Rakennukset ovat yleensä betoni-, teräs- tai puuelementeistä sekä tiilestä rakennettuja. Ohikulkuteiden varsille on nopeasti muodostunut erillisiä ja nopeasti kasvavia teollisuuden ja kaupan alueita. Asuntoalueiden rakennustapa vaihtelee korkeasta ja tiheästä kerrostalorakentamisesta väljään omakoti- ja rivitalorakentamiseen. Lähiöiden kerrostalot ovat pääosin betonielementeistä rakennettuja. Pääosa rivitaloista ja omakotitaloista on puuta tai tiiltä tai niiden yhdistelmiä. Asuntoalueet muodostavat usein erillisiä, ulkoilu- ja liikennealueiden erottamia kokonaisuuksia. Silloin kun kyseisten lähiöiden etäisyys keskustasta tai toisistaan on yli kilometri, voidaan niitä pitää taktillisesti tarkasteltuna erillisinä asutuskeskuksina [45]. Asuntoalueet ovat yleensä syrjässä pääliikenneväylistä ja ne rajoittuvat monesti metsään tai peltoihin. Asuntoalueilla on runsaasti avoimia kenttiä, puistoja ja pysäköintialueita.

Keskimääräisiä tähytys- ja tulenkäyttöetäisyyksiä on arvioitu asutuskeskustaisteluoppaassa [44]. Kadut ja tiet ovat asutuskeskusten alueella pääosin alle 25 metriä leveitä, mutta pääliikenneväylillä ja ohitusteillä katualueet voivat olla selvästi leveämpiä. Katujen suorien osuuksien pituudet ovat pääosin alle 500 metriä. Alueellisesti korkeuserot ja muut esteet pienentävät tähytettävissä ja tulitettavissa olevien katuosuuksien pituutta. On arvioitu, että taisteltaessa rakennetulla alueella 90% maaleista on alle 50 metrin etäisyydellä [45]. Taulukkoon 4 on koottu keskimääräisiä tulenkäyttöetäisyyksiä asutuskeskuksessa [44]. On huomioitava, että lähteenä olleessa ohjesäännössä ei ole mainittu tutkimusta, johon luvut perustuvat.

Taulukko 4 Keskimääräiset tulenkäyttöetäisyydet asutuskeskuksessa

<b>Alue</b>	<b>Keskimääräinen tulenkäyttöetäisyys</b>
Keskustojen liikekortteli	150 metriä
Pientaloalueet	225 metriä
Teollisuusalueet	460 metriä

Yksi sensorin keskeinen ominaisuus on sen kyky havaita kohteita eri etäisyyksiltä. Taulukon 4 arvot huomioiden voidaan lähtökohtaisesti pitää jalkaväen sensoreille riittävänä havaintoetäisyytenä rakennetulla alueella noin 500 metriä. Kun valoisuuden ja ilmassa olevien partikkeleiden (sade, sumu, pöly, savu) vaikutus jätetään huomioimatta, suurin osa nykyisin käytössä olevista sensoreista täyttää tämän vaatimuksen. Sen sijaan langattomiin verkkoihin perustuvien sensorien sekä seinätutkan kantamat jäävät lyhyemmiksi. Lyhintä toimintaetäisyyttä ei käytännössä tarvitse huomioida kuin lasertutkalla ja maastonvalvontatutkalla. Näistä ensin mainitulla lähikatve on muun muassa lyhyemmästä aallonpituudesta johtuen noin viisi metriä [32] ja jälkimmäisellä noin sata metriä [13]. Aktiiviseen valaisuun perustuvissa valonvahvistimissa valaisu toteutetaan pienitehoisella infrapunaledillä, jolloin sensorilla kyetään näkemään enintään muutaman kymmenen metrin päähän täysin pimeässä. Toisaalta samoissa olosuhteissa tavallisella valonvahvistimella ei näkisi mitään.

Rakennettu alue on fyysisenä toimintaympäristönä moniulotteinen ja tilannekuvan muodostaminen ja ylläpitäminen on vaikeaa. Taistelijat saattavat olla toisistaan fyysisesti 30 senttimetrin päässä teräsbetoniseinän erottamana, jolloin heillä ei ole näkö- eikä kuuloyhteyttä ja radioyhteykskään ei välttämättä toimi. Seuraavaksi tarkastellaan erilaisten sensoriteknologioiden soveltuvuutta muutamaa valittuun tapaukseen liittyen.

### 3.2. Tarkastelukohteiden valinta

Rakennetun alueen monimuotoisuus ei mahdollista tutkimuksen tekemistä kaikkia olosuhteita kattavaksi. Tässä tutkimuksessa tarkastelukohteet on valittu soveltaen Puolustusministeriön laatiman Yhteiskunnan turvallisuusstrategian uhkamalleja, jotka on lueteltu taulukossa 1. Elintärkeät kohteet on luokiteltu ja dokumentoitu, mutta ne ovat luonnollisesti turvaluokiteltua materiaalia. Yhtenä mahdollisuutena yleistämiseen, voidaan tarkastella eri rakennustyyppisiä ja edelleen niiden rakennusmateriaalien vaikutusta eri sensorien toimintaan.

### 3.3. Ulkoalue yleisesti

Rakennetun alueen katu- ja puistoalueita tarkasteltaessa korostuu taistelutilan kolmiulotteisuus verrattuna esimerkiksi metsämaastoon. Uhka voi kohdistua talojen katoilta, ikkunoista, katujen suunnassa ja jopa maanpinnan alapuolelta esimerkiksi tunneleista. Kuten jo aiemmin todettiin, tähyystyettäisydet ovat verrattain lyhyitä ja rakennukset sekä muut rakenteet rajoittavat tulen käytön etäisyyttä ja sensorien havainnointikykyä.

Yhdeksi tärkeimmistä kehittämiskohteista rakennetun alueen taisteluun liittyen NATO:n työryhmä nimeää tarkka-ampujien paikantamiseen sopivan järjestelmän [39]. Lähtökohtaisesti nykyiset pääasiallisesti akustisiin sensoreihin perustuvat laitteet on suunniteltu nimenomaan rakennetun alueen taisteluun Irakin ja Afganistanin kokemusten perusteella. Integroimalla laitteeseen lasertutka, voitaisiin tarkka-ampujia pyrkiä paikantamaan aktiivisesti jo ennen kuin vastustaja on ampunut laukaustakaan. Ulkoalueita, esimerkiksi risteysalueita, voidaan myös valvoa muilla akustisilla tai seismisillä sensoreilla.

Radiotaajuuksiin perustuvilla vastaanotetun signaalin voimakkuutta mittaavilla sensoreilla voidaan esimerkiksi valvoa tiettyä aluetta toimittamalla sensorit sinne etukäteen tai toimittaa sensorit taistelutilanteessa risteysalueelle esimerkiksi heitteen mukana. Ulkotiloissa RSSI-sensorien haasteeksi saattavat tulla liian suuret yhteyttäisyydet, jolloin paikannustarkkuus jää heikoksi tai verkon solmujen ollessa liian etäällä toisistaan luotettavaa paikannustietoa ei saada ollenkaan [26]. Alueiden valvonta ulkoalueilla on helpompaa jo valmiilla tuotteilla, kuten valvontakameroilla ja maastonvalvontatutkillä. Mikäli GPS-paikannus on käytettävissä, ulkotiloissa kyetään pääsääntöisesti omien joukkojen kohtuulliseen hyvään paikannukseen. Sisätiloissa toimittaessa viimeistä satelliittipaikannustietoa voidaan käyttää lähtöpisteenä ja paikannus voidaan toteuttaa inertiapaikannuksen avulla. Myös langattoman verkon (WLAN, Wireless Local Area Network) ominaisuuksia voidaan käyttää jouk-

kojen paikantamiseen [19]. Esimerkiksi vasteajan mittaamiseen perustuvaa omien joukkojen paikannusta voidaan käyttää, mutta toisaalta vastustaja voi paikantaa ja häiritä helpommin signaalin aktiiviseen lähettämiseen perustuvia järjestelmiä.

Maastovalvontatutkalla kyetään valvomaan hyvin katuja ja puistoalueita. Rakennukset muodostavat kuitenkin esteitä signaalin etenemiselle, joten valvontasektori on pääsääntöisesti hyvin rajoittunut. Mikäli alueella on yksi selvästi korkeampi rakennus tai maastonkohta, voitaisiin sieltä kyetä valvomaan laajempi alue maastonvalvontatutkalla. Tutkan yhtenä heikkoutena on sen aktiivisuus, jolloin vihollinen voi havaita ja paikantaa tutkan.

Lasertutka sopii hyvin havainnointiin ulkoalueilla. Sillä voidaan kartoittaa esimerkiksi katu rakennuksineen kolmiulotteisesti ja verrata myöhemmin saatua informaatiota aiempaan ja pyrkiä löytämään muutoksia, jotka paljastaisivat vastustajan toiminnan [32]. Lasertutkan avulla kyetään näkemään, onko ikkunoiden ja jopa sälekaihtimien takana toimintaa, joka voisi uhata joukkoa. Ulkona lasertutkalla kyetään uhkakirjaston perusteella tunnistamaan esimerkiksi panssarivaunu [59]. Näin ollen esimerkiksi huonoissa valaistusolosuhteissa se saattaa olla ainoa laite, jolla kohde voidaan tunnistaa. Esimerkiksi 1.55 mikrometrin aallonpituusalueen laserin aallonpituus on selvästi lyhyempi kuin lämpökameroiden, joten jo teoreettisesti lasertutkan tarkkuus saadaan paremmaksi. Lisäksi tutkalla voidaan jo ennakoivasti paljastaa tarkka-ampujia tähtämien optiikan heijastuksien perusteella. Lähtökohtaisesti nykyiset ja kehitettävät sotilaskäyttöön tarkoitetut laserit tehdään silmäturvallisiksi. Sodan oikeussäännöissä kielletään sokaisevien laserien käyttö paljasta silmää vastaan [6]. Sen sijaan suurentavan optiikan läpi tähystävän tarkka-ampujan näkökyvystä ei juridisessa mielessä tarvitse välittää.

Infrapuna-alueen sensoreilla kyetään katujen suunnassa valvomaan hyvin aluetta. Lämpökameroiden tarkkuus ei kuitenkaan mahdollista henkilön luokittelua omaksi, viholliseksi tai siviiliksi muuten kuin varustuksen tai toiminnan perusteella. Lämpökameran tarjoamana oleellisena tietona voidaan pitää, että alueella on jotain kiinnostavaa. Sillä voidaan tehdä yleistunnistus esimerkiksi ihmiseksi tai panssarivaunuksi. Suurin osa tuotannossa olevista lämpökameroista on tarkoitettu maastokäyttöön aukeisiin olosuhteisiin. Näin ollen niiden näkökenttä on melko kapea. Ulkotiloissa rakennetulla alueella tästä ei muodostu ongelmaa, sillä lämpökameralla kyetään tähystämään katujen suunnassa riittävän pitkälle. Kuumana kesäpäivänä saattaa etenkin jäähdyttämättömillä lämpökameroilla, joilla on huonompi erottelutarkkuus, olla vaikeuksia erottaa ihmisiä tai ajoneuvoja taustastaan kaupunkiolosuhteissa. Auringon kumentama katu ja rakennusten seinät saattavat vastata lämpötilaltaan tällaisen koh-

teen lämpöherätettä. Toisaalta tällaisia päivien esiintymismahdollisuus Suomessa rajoittuu lähinnä kesäkuukausiin [23].

Näkyvän valon sensoreita voidaan käyttää hyvissä valaistusolosuhteissa ulkoalueiden valvontaan. Jotta mukana kuljetettavalla sensorilla voitaisiin parantaa tilannetietoisuutta, pitäisi sensorin kyetä tuottamaan esimerkiksi uhkavaroitusta hahmontunnistukseen perustuen. Pelkkää kuvamateriaaliakin tuottavasta sensorista saattaa olla kuitenkin hyötyä esimerkiksi pataljoonan esikunnan tilannetietoisuuden kannalta. Liikuteltavia tai heitettäviä näkyvän alueen sensoreita voidaan käyttää ulkoalueilla esimerkiksi rakennusten kulmien taakse tähyttämiseen. Ultraviolettialueen sensoreita voidaan käyttää ulkotiloissa esimerkiksi akustisten järjestelmien lisänä tarkka-ampujia paikannettaessa. Omana sensorinaan merkittävää lisäarvoa ei saada, koska ultraviolettialueenkin sensori edellyttää havaittavaa laukaisutapahtumaa, jotta se voisi ilmaista säteilyn. Integroituna akustisen sensorin kanssa se voisi kyetä paikantamaan tarkka-ampujan, joka käyttää aliääniluoteja.

Ulkona voidaan hyödyntää ultraviolettialueen kameraa valvontaan. 280 - 380 nanometrin alueella ilmakehä läpäisee jonkin verran ultraviolettisäteilyä. Tällöin voidaan havaita esimerkiksi puistoalueella lämpönaamioverkolla hyvin naamioitunut taistelija, jonka naamiomateriaalin heijastavuus ultraviolettialueella poikkeaa ympäristöstään merkittävästi. Toisaalta rakennetulla alueella on paljon ihmisen rakentamia kohteita, joiden ultraviolettialueen heijastavuus poikkeaa yhtälailla esimerkiksi kasvillisuuden heijastavuudesta. Näin ollen ultraviolettialueen kamera ei liene yhtä suorituskykyinen kohteiden erottamiseen kaupungissa kuin maasto-olosuhteissa. Kamera voidaan kuitenkin integroida esimerkiksi visuaalisen alueen kameran ja lämpökameran yhteyteen, jolloin laitteen monipuolisemmat ominaisuudet ovat käytettävissä eri olosuhteissa paremmin.

Eri sensoreista ulkona voidaan käyttää erityisen hyvin lämpökameraa, jolla kyetään tähyttämään lähes kaikissa olosuhteissa. Lasin läpi sillä ei kuitenkaan näe, joten hyvissä valaistusolosuhteissa lasin läpi on tähytettävä esimerkiksi kiikarien avulla tai näkyvän valon kameralla ja pimeällä valonvahvistimella. Ikkunoiden takana olevan tilan ympärivuorokautiseen havainnointiin sopii myös lasertutka. Tarkka-ampujat kyetään paikantamaan akustisten sensorien avulla ja niiden kehitystyö on edennyt nopeasti erityisesti Yhdysvaltojen tarpeesta Irakin ja Afganistanin operaatioissa. Ultraviolettialueen sensoreiden käyttö laukausten ilmaisemiseen ei juuri tuo lisäarvoa, mutta ultraviolettialueen kameralla sen sijaan kyetään pienin kustannuksin havaitsemaan naamioituneita taistelijoita esimerkiksi puistoista. Maastonvalvontatutka on käyttökelpoinen sensori katujen ja puistojen valvontaan, mutta rakennusten

muodostamat runsaat katvealueet eivät mahdollista tutkan täyttä suorituskykyä. Signaalin voimakkuutta mittaavien sensorien ongelmana ulkona on tilan suuri koko, jolloin riittävän tiheään sensoriverkon muodostaminen vaatii runsaasti sensorisolmuja.

### 3.4. Case teollisuushalli tai varastorakennus

Teollisuushallit ja varastorakennukset ovat nykyisin pääosin liimapuu-, teräs- tai betonirunkoisia ja niiden seinät ovat tyypillisimmin pellitettyjä tai rakennettu pellitetyistä sandwich-elementeistä. Osassa seinärakenteet on tehty betonielementeistä. Ikkunat ovat yleensä vaakaliveinä vähintään kolmen metrin korkeudessa johtuen hyllyrakenteista. Toimistotilojen ikkunat voivat olla matalammalla. Halleissa on yleensä ajoneuvoliikenteen mahdollistamia nosto-ovia sekä henkilöliikenteeseen sopivia ovia työntekijöille ja asiakkaille. Halleissa on vähän tai ei ollenkaan kantavia väliseiniä, joten tilat ovat avoimia. Tilojen osastoisuudeksi tehdyt seinät on tyypillisesti rakennettu kevytsoraharkoista tai kipsilevystä. Kevytsoraharkon etuna on hyvä ääneneristävyys ja palamattomuus [9]. Kipsilevyjen etuna on nopea rakentaminen ja helppo pintakäsittely.

Rakennusten ulkopuolelta tarkasteltuna teollisuushallien sisätilaa ei kyetä havainnoimaan sensoreilla. Seinät estävät optronisten järjestelmien käytön ja ikkunat ovat tyypillisesti niin korkealla, että tähyttäminen sisälle niistä ei ole mahdollista. Poikkeuksen tekee esimerkiksi näkyvän valon alueella toimiva sensori, jolla esimerkiksi jatkovarren avulla tähytetään yläikkunoista sisälle. Akustisilla sensoreilla, tutkalla ja laserilla ei myöskään kyetä havainnoimaan rakennuksen sisälle. Lasertutkan mahdollisuutena on kuitenkin tähyttäminen mahdollisten toimistotilojen sälekaihtimien taakse. Seinätutkan ongelmana on pellitetty seinä, joka estää tehokkaasti signaalin kulkemisen rakenteen läpi [37]. Mikäli seinä on rakennettu betonielementeistä tai harkoista, voidaan seinätutkaa käyttää. Edelleen haasteeksi muodostuu hallitilojen suuri koko, jolloin tutkasignaali vaimentuu edetessään runsaasti. Näin ollen on kyseenalaista, riittääkö esimerkiksi 30 metrin päästä vastakkaisesta seinästä heijastunut signaali palaamaan riittävän voimakkaana takaisin ja läpäisemään seinän takaisin tutkalle. Näin ollen tilan koosta ja kaikista siellä olevista kohteista ei saada tietoa.

Kohteeseen toimitettavat sensorit ovat yksi käyttökelpoinen vaihtoehto. Näkyvän valon alueella toimivia sensoreita voidaan toimittaa kohteeseen ikkunoiden läpi tai seinään tehdyistä aukoista. Isossa hallissa käyttökelpoisin lienee kauko-ohjattava sensori, jolta kuva saadaan operaattorille langattomasti. Yksi mielenkiintoinen tulevaisuuden mahdollisuus on toimittaa kohteeseen runsaasti pieniä langattomia sensoreita, jotka aistivat esimerkiksi akustisia aaltoja



tai vastaanotetun signaalin voimakkuutta. Tällaiset sensorisolmut muodostaisivat ad hoc -verkon ja paikantaisivat itsensä toisiinsa nähden suhteellisesti. Suhteellinen sijainti todelliseen sijaintiin muodostettaisiin esimerkiksi yhden tunnetun solmun perusteella. Näiden sensorien keräämän tiedon perusteella voitaisiin todentaa ja paikantaa ihmisten liikkuminen kohteessa, jonka perusteella voidaan esimerkiksi kohteen valtaaminen suunnitella ja toteuttaa. Tällaiset sensorit voitaisiin toimittaa kohteeseen joko etukäteen tilan valvomiseksi tai esimerkiksi ammuttavan heitteen mukana tilanteen niin vaatiessa.

Rakennuksen sisällä mukana kuljetettavilla näkyvän valon alueen sensoreilla ei juuri saada lisäarvoa lyhyistä etäisyyksistä johtuen. Kuvaa voidaan kuitenkin välittää eteenpäin johtajille päätöksenteon tueksi. Pienillä mikrokameroilla voidaan tähyttää oviaukoista tai raoista ilman, että taistelija itse näkyisi mahdolliselle vastustajalle. Edellisessä kappaleessa mainitut kauko-ohjattavat tai kohteeseen heitettävät kuvaa tuottavat sensorit ovat sisätiloissa käyttökelpoisia. Mikäli tilan valaistus on heikko, on niissä tarve käyttää aktiivista valaisua. Se voidaan toteuttaa silmälle näkymättömällä infrapuna-alueella, jonka esimerkiksi videokamera tai valonvahvistin kykenee ilmaisemaan. Ultravioletialueella toimivaa kameraa ei juuri voida käyttää sisätiloissa, koska pimeys rajoittaa laitteen toimintaa. Mikäli tilassa on loisteputkivalaisimet päällä, kyetään niiden tuottaman vähäisenkin ultraviolettisäteilyn avulla havainnoimaan ympäristöä. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin se, että suurin osa rakennuksessa olevista kohteista on sellaisia, joiden heijastavuus ultravioletialueella ei poikkea merkittävästi toisistaan [42]. Näin ollen selkeitä kontrastieroja ei synny ja sensorin käytöllä ei saavuteta merkittävää ja helposti hyödynnettävää informaatiota. Valonvahvistinta kyetään käyttämään hämärissä sisätiloissa, mutta täysin pimeässä valonvahvistimessa on käytettävä aktiivista valaisua. Lähi-infrapun aallonpituusalueella aktiivisesti valaisevan valonvahvistimen etu verrattuna näkyvällä valolla tapahtuvaan valaisuun on sen näkymättömyys paljaalle silmälle.

Maastonvalvontatutkan käyttöä rajoittaa yleensä tilojen suhteellisen pieni koko. Esimerkiksi MSTAR-maastonvalvontatutkan lyhin havaintoetäisyys on sata metriä [13]. Tiloissa oleva materiaali rajoittaa myös tutkan toimintaa ja näin ollen edes isoissa tiloissa ei tutkalla kyetä havaitsemaan esteiden takana liikkuvia henkilöitä. Seinätutkaa sen sijaan kyetään käyttämään ilmaisemaan tilassa olevat henkilöt ennen sisään menoa. Yleensä seinämateriaalit hallien sisätiloissa ovat kevyitä harkkoseiniä tai kipsilevyseiniä, jolloin signaali läpäisee seinän. Mikäli tila seinän takana on kovin suuri, voi olla, ettei heijastuneen signaalin voimakkuus riitä läpäisemään seinää takaisin tutkalle. Laitteen etuna on se, että sitä voidaan käyttää kohteen huomaamatta laitteen käyttöä ja valaistuksella ei ole merkitystä suorituskyvyille. Lasertutkan hankaluutena sisätiloissa ovat lyhyet etäisyydet ja esteinä toimivien rakenteiden sekä materiaalin

runsas määrä. Näin ollen laserpulssin kesto on säädettävä hyvin lyhyeksi ja saadusta informaatiosta on vaikea erottaa hyödyllistä tietoa.

Lämpökameraa voidaan käyttää elävien kohteiden havaitsemiseen. Mitä isompi ja avoimempi halli on, sitä paremmat mahdollisuudet on lämpökameran käytölle. Erityisesti hämärässä tai jopa täysin pimeässä hallissa lämpökameran ominaisuuksia kyetään hyödyntämään tehokkaasti. Sen sijaan pienemmissä tiloissa lämpökameraa voidaan käyttää vain rajoitetusti, koska pääsääntöisesti lämpökameroissa on ainakin jonkin verran suurentava optiikka [17]. Tämä heikentää laitteen käytettävyyttä lyhyillä etäisyyksillä.

Tarkka-ampujien sijainnin paljastavaa akustista sensoria ei voida pitää käyttökelpoisena sisätiloissa, koska etäisyydet ovat lyhyet ja seinät, katot ja lattiat aiheuttavat runsaasti ääniaallon heijastuksia. Sen sijaan tiloihin toimitettavat pienikokoiset akustiset sensorit, jotka perustuvat langattomaan verkkoon, voivat olla toimiva ratkaisu. Tällöin tilasta saadaan yksinkertaisimmillaan ilmaisu toiminnasta tai kehittyneemmällä järjestelmällä jopa henkilöiden lukumäärä äänianalyysin perusteella kuten pääluvussa kaksi on todettu.

Vastaanotetun signaalin voimakkuuden (RSSI) mittaamiseen soveltuvat sensorisolmut kykenevät langattoman verkon avulla luomaan kuvan alueesta, jonka reunoilla on sensorisolmuja. Haasteeksi tällaisen teknologian käytölle teollisuushallissa voi muodostua tilan suuri koko. Tyypillisesti pienitehoinen langaton lähetin kykenee sisätiloissa noin 15 metrin yhteys- etäisyyteen, joten suuren hallin valvomiseksi tilassa tulisi olla runsaasti solmuja tasaisesti levitettynä. Toimistotiloja ja sisäänkäyntejä voidaan tällaisella järjestelmällä valvoa paremmin. Tilannekuvan ylläpitämiseksi oman joukon osalta voidaan käyttää langattomaan verkkoon (WLAN) perustuvaa paikannusta. Yleensä ryhmän jäsenen etäisyys toisesta jäsenestä rakennetulla alueella on alle 15 metriä ja ryhmien välinen yhteys voidaan toteuttaa erillisillä voimakkaammalla lähettimellä.

Teollisuushallin tai varastorakennuksen sisätilojen havainnointi ulkopuolelta on hyvin rajoitettua. Seinätutkalla kyetään havainnoimaan seinän takana olevaa tilaa, mikäli ulkoseinä ei ole metallia tai sen rakenne liian paksu mikroaaltojen etenemiselle. Optronisilla laitteilla kyetään tähystämään sisälle ikkunoista, mutta ikkunoiden tyypillisesti ollessa korkealla tällöin tarvitaan sensorille yleensä jatkovarsi. Mikäli sensori on liikuteltavalla lavetilla tai se voidaan toimittaa kohteeseen esimerkiksi heittämällä, on sisätilojen havainnointi mahdollista. Tällaiset liikuteltavat tai heitettävät sensorit ovat käyttökelpoisia myös rakennuksen sisällä toimittaessa. Sisällä tähystysetäisyydet ovat entistä lyhyemmät verrattuna rakennetun alueen ulko-

tiloihin. Näin ollen maastonvalvontatutkat ja lasertutkat eivät sisätiloissa ole käyttökelpoisia. Lyhyet etäisyydet vaikeuttavat myös lämpökameroiden käyttöä, mutta kehittämällä laajakulmaisempia optiikoita, voidaan lämpökameroiden käytettävyyttä sisätiloissa parantaa. Ultravioletti-ilmaisimilla ja -kameroilla ei sisätiloissa ole käyttöä säteilyn puuttumisen vuoksi. Pienikokoisilla näkyvän valon alueen kameroilla kyetään tähyttämään huoneisiin esimerkiksi oven raosta tai alta, mutta pimeässä tarvitaan aktiivista valaisua. Valonvahvistimet ovat käyttökelpoisia pimeissä sisätiloissa vain, jos niissä on mahdollisuus aktiiviseen infrapuna-alueen valaisuun. Pieniä langattomaan verkkoon perustuvia sensoreita, kuten vastaanotetun signaalin voimakkuutta mittaavia tai akustisia sensoreita voidaan toimittaa kohteeseen ja saada tietoa esimerkiksi ihmisten liikkeestä tai toiminnasta. Näiden suorituskykyä saattaa kuitenkin rajoittaa tilojen suuri koko.

### 3.5. Case toimistorakennus

Yhtenä mahdollisena strategisen iskun osakohteena voisi olla yhteiskunnallisesti merkittävän toimialan tai hallinnon toimistorakennus. Toimistorakennus on monikerroksinen ja tyypillisesti rakennettu betonielementeistä tai tiilestä. Vanhimpien hallintorakennusten katutaso on rakennettu usein luonnonkivestä [45]. Ikkunoita rakennuksessa on runsaasti ja uudempien toimistorakennusten kantavat rakenteet on saatettu rakentaa teräksestä ja ulkopinta on lasia. Erillisiä huoneita toimistoissa on runsaasti ja pinta-alaltaan ja tilavuudeltaan suuria tiloja on vähän. Toimistot on yleisimmin sijoitettu käytävien varsille. Poikkeuksena tästä on osa uudemmista toimistorakennuksista, joissa on yhtenäisiä isoja toimistotiloja ja työpisteet on erotettu toisistaan siirrettävillä sermeillä tai muilla elementeillä. Rakennuksessa on yleensä vähintään yksi kellarikerros, jossa voi olla varasto- ja teknisten tilojen lisäksi väestönsuoja- ja johtamistiloja. Esimerkiksi Helsingin Energian Sähkötalossa valvomotilat sijaitsevat toisessa kerroksessa maan alla ja tilat on suunniteltu 1970-luvulla kestäväksi ydinaseisku pääkaupunkiin [3].

Näkyvän valon sensorilla kyetään näkemään sisälle esteettömistä ikkunoista. Käytännössä ylemmistä kerroksista ei voida jalkavaen kannettavissa olevilla laitteilla saada tietoa. Tällainen sensori saattaa tarjota tärkeää lisätietoa, mikäli sillä tähytetään esimerkiksi toisen kerroksen ikkunasta sisään ennen kuin joukko valtaa huoneen esimerkiksi tikkaiden avulla. Heitettävillä sensoreilla voidaan saada tietoa yhdestä huoneesta, joten tällainen laite voisi olla käyttökelpoinen ryhmätasolla. Liikkuvalla kauko-ohjattavalla sensorilla on paremmat mahdollisuudet havainnoida sisätiloissa. Toimistojen ovet ovat usein kuitenkin työajan ulkopuolella sulje-

tut sekä tieto- että paloturvallisuussyistä, joten liikkuvankin sensorin suorituskyky on usein rajoittunut.

Rakennuksen sisätiloissa ikkunattomissa tiloissa saattaa päiväsaikaankin olla hyvin hämärää. Siirtyminen auringon valaisemasta huoneesta pimeään portaikkoon on ongelmallista, koska silmät vaativat tietyn sopeutumisajan hämärään. Tätä puutetta voidaan kompensoida käyttämällä valonvahvistinta. Sisätiloissa valonvahvistin on käyttökelpoinen, mikäli siinä on aktiivinen lähi-infrapuna-alueen valaisin. Tällöin laitetta voidaan käyttää myös täysin pimeissä tiloissa esimerkiksi kellareissa. Mikäli aseessa on lähi-infrapun aallonpituusalueella toimiva maalinosoitin, voi taistelija käyttää asettaan valonvahvistimesta näkemänsä tähtäyspisteen perusteella. Muista optronisista sensoreista lämpökameraa kyetään käyttämään sisätiloissa rajoitetusti. Ongelmaksi muodostuu lyhyt tähytystettäisyys, jolloin sensorin näkökenttä on kapea. Maastonvalvontatutka ja UV-ilmaisimet eivät sovellu käyttöön tässä tapauksessa.

Seinäntutkan avulla voidaan sopivan seinärakenteen läpi saada havainto seinän takana olevan huoneen koosta, esineiden sijoituksesta ja elävistä kohteista. Käytännössä tutkaheijastukset tulevat huoneessa olevista pinnoista, jotka ovat kohtisuorassa lähettimeen nähden. Oleellisin apu taistelutilanteessa on se, että tutkan avulla voidaan saada tietoa huoneessa olevista ihmisistä. Ulkoseinät ovat usein niin paksuja, että nykyisellä tekniikalla ei niiden läpi juuri voida saada havaintoa. Erityiseksi haasteeksi ulkoseinissä muodostuu eri materiaalien rajapintojen suuri määrä. Seinässä saattaa olla kerroksina betonilevy, ilmarako, tuulensuojalevy, lämpöeriste ja sisempi betonilevy. Eri materiaalien rajapinnoissa tapahtuu tutkasäteilyn takaisinheijastumista ja etenevän signaalin voimakkuus heikkenee [37]. Ulkoseinien osalta seinäntutkan käyttöä Suomen olosuhteissa voidaan pitää rajoitettuna. Sisäseinien rakenteista seinäntutkan signaali läpäisee hyvin nykyaikaisissa rakennuksissa tyypilliset kipsilevy- ja sora-harkkoseinät. Sen sijaan paikalla valetut teräsbetoniseinät vaimentavat tutkasäteilyä voimakkaasti. Seinäntutka on kuitenkin ainoa keino saada tietoa seinän takana olevasta tilasta toimittamatta sinne sensoria. Näin ollen seinäntutkan avulla voidaan päästä yllättämään vastustaja.

Akustiseen sensoriin perustuvaa tarkka-ampujan paikantamiseen soveltuvaa sensoria voidaan käyttää rakennuksen ulkopuolella vihollisen ampujien paikantamiseen. Sisätiloissa ei tällaisella sensorilla ole lyhyistä etäisyyksistä johtuen merkitystä. Henkilöiden paikantaminen akustiseen herätteeseen perustuen on yksi mahdollisuus tilannekuvan luomiseen rakennuksen sisätiloissa. Tällöin huoneesta voidaan saada alle puolen metrin tarkkuudella tietoa henkilöiden sijainnista. Järjestelmän käyttöä vaikeuttaa se, että sensorit pitää toimittaa kohteeseen, niillä pitää olla kyky muodostaa langaton verkko keskenään ja niillä pitää olla yhteinen tarkka aika.

Lisäksi tieto pitää kyetä välittämään langattomasti eteenpäin. Tällaisen järjestelmän käyttö lienee siis mahdollista vain, mikäli ennakoita arvioituihin kohteisiin asennetaan akustinen sensorijärjestelmä.

Sensorien kannalta tarkasteluna teollisuusrakennuksella ja toimistorakennuksella on paljon yhteneväisyyksiä. Toimistorakennuksissa on yleensä enemmän huoneita ja kerroksia, jolloin sensorin lavetin liikkuvuuden merkitys korostuu entisestään. Tähystysetäisyydet ovat varastohalleihin nähden lyhyempiä, jolloin tyypillisellä suurentavalla optiikalla varustetun lämpökameran käytettävyys on heikko. Sen sijaan suurentamattomalla tai laajakulmaisella optiikalla varustettu lämpökamera on käyttökelpoinen. Toimistorakennusten ikkunattomat toimistot, porraskäytävät ja maanalaiset tilat voivat sähkön puuttuessa olla pimeitä, jolloin sensorilta edellytetään kykyä nähdä pimeässä. Tähän tarkoitukseen sopivia ovat aktiivista valaisua käyttävät valonvahvistimet ja lämpökamerat. Sisäseinät ovat pääsääntöisesti kevytrakenteisia, joten seinätutkalla kyetään havainnoimaan niiden takana olevaa tilaa. Langattomat akustiset sensorit ja vastaanotetun signaalin voimakkuutta mittaavat sensorit ovat käyttökelpoisia suhteellisen pienissä tiloissa. Tällöin niiden tarkkuus on riittävä ja verkon solmujen väli ei muodostu liian pitkäksi. Jotta näillä sensoreilla saavutettaisiin merkittävää lisäarvoa, olisi ne kuitenkin pystyttävä toimittamaan kohteeseen ennakoita.

## 4. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, millaisia eri taajuusalueisiin perustuvia sensoreita voidaan käyttää jalkaväen taistelussa rakennetulla alueella tilannekuvan muodostamiseksi. Päämääränä oli selvittää ja kuvata eri sensorien käyttömahdollisuudet ja rajoitukset sekä rakennetun alueen asettamat reunaehdot eri sensorien suorituskyvyille. Tätä varten luotiin Yhteiskunnan turvallisuusstrategian pohjalta kaksi yleistystä elintärkeästä kohteesta strategiseen iskuun liittyen. Näissä kohteissa tarkasteltiin sensorien suorituskykyä kohdetta lähestyttäessä ja siellä toimittaessa. Lisäksi tarkasteltiin ulkoalueita yleisesti.

Nykyaikaiset sensorit kykenevät mittaamaan kohteen lähettämää tai siitä heijastuvaa fysikaalista suuretta hyvin laajalla sähkömagneettisen spektrin alueella ja lisäksi ne mittaavat painetta, magneettisuutta ja aaltoliikettä. Sensorien käytettävyys vaihtelee paljon esimerkiksi ympäristön, rakenteiden, valoisuuden, sään ja käyttöetäisyyden mukaan. Näin ollen tietyllä aallonpituusalueella toimivalla sensorilla ei kyetä tehokkaasti havainnoimaan kaikissa olosuhteissa. Sensorien suorituskyky eri olosuhteissa on koottu liitteeseen 1.

Tarkka-ampujien paikallistamiseen tarkoitettut sensorit ovat käyttökelpoisia rakennuksia lähestyttäessä, mutta sisätiloissa niiden kyky antaa varoitus on rajoittunut ja tiedon käyttökelpoisuus kyseenalainen. Vähän virtaa kuluttavat akustiset langattomat sensorit sen sijaan kykenevät valvomaan sisätiloja ja tuottamaan tietoa toiminnasta kohteessa. Ulkotiloissa voidaan käyttää myös hieman isokokoisempia ja itsenäiseen päättelyyn kykeneviä uhkakirjastolla varustettuja akustisia sensoreita. Radiotaajuuksilla toimivat vastaanotetun signaalin voimakkuutta mittaavat sensorisolmut ovat vielä tutkimusasteella. Niillä kyetään paikantamaan sisätiloissa kohde taistelutilanteeseen nähden riittävällä tarkkuudella. Tällaisia sensoreita voidaan käyttää kohteeseen toimitettuna, jolloin voidaan tarkkailla tilaa. Ongelmana jälkimmäisessä vaihtoehdossa on solmujen määrän kasvaminen suureksi tilan kasvaessa. Omien joukkojen seurantaan sisätiloissa voidaan käyttää langattoman verkon avulla tapahtuvaa paikannusta, jolloin taistelijan varusteisiin sijoitettu langattoman verkon solmu mittaa etäisyyttä muihin solmuihin esimerkiksi vasteajan perusteella. Riittävästä informaatiosta saadaan muodostettua ad hoc -verkossa joukkojen suhteellinen sijainti toisiinsa nähden. Todellinen sijainti edellyttää kuitenkin esimerkiksi sijainniltaan tunnetun ankkurisolmun käyttöä. Tällaiseen paikannukseen voidaan kuitenkin vaikuttaa elektronisen sodankäynnin keinoin tapahtuvana lähettimien paikantamisena tai häirintänä.

Ultraviolettialueen sensoreilla ei juuri ole merkitystä nykyisin. Kasvillisuuden peittämällä alueella ultraviolettialueen kameroilla kyetään havaitsemaan muutoin hyvin naamioitunut henkilö vaatetuksen erilaisen ultraviolettialueen heijastavuuden vuoksi. Rakennetulla alueella tälläkään ominaisuudella ei juuri ole merkitystä. Näkyvän valon sensoreilla kyetään riittävässä valaistusolosuhteissa tai laitteen omalla valaisulla hankkimaan tietoa rakennuksen sisältä tai rakennuksen sisällä toisesta tilasta kauko-ohjattavien liikuteltavien sensorien avulla. Lämpökameroiden merkitys rakennuksen ympäristössä on tärkeä, mutta sisätiloissa ainoastaan riittävän laajakulmaisella optiikalla varustettu pienikokoinen laite on käyttökelpoinen.

Nykyisin pääsääntöisesti näkyvän valon sensori, valonvahvistin ja lämpökamera ovat erillisiä laitteita ja kukin sensori rajoittuu kohtuullisen kapea-alaiselle aallonpituusalueelle. Tällöin niiden käyttökelpoisuus muuttuvissa olosuhteissa on hyvin rajallinen. Markkinoilla on jo joidakin laitteita, jotka hyödyntävät yhdistettynä esimerkiksi näkyvän valon kameraa ja lämpökameraa. Tutkimuksen perusteella monikäyttöisin jalkaväen taistelijan sensori rakennetulla alueella on laite, jossa on yhdistetty näkyvän valon kamera, lämpökamera ja valonvahvistin. Laitteen monikäyttöisyyden vuoksi siihen voitaisiin lisätä myös ultraviolettialueen kamera. Tämä toisi pienin lisäkustannuksin lisäarvoa metsäolosuhteissa. Tällaisen laitteen rakentaminen kustannustehokkaasti ja riittävän pienikokoisena on mahdollista lähitulevaisuudessa. Eri aallonpituusalueiden sensorien informaatio voidaan yhdistää yhdeksi kuvaksi tai eri aallonpituusalueita voidaan tarkastella erikseen. Liitteestä 1 nähdään, että tällaisen laitteen suorituskyky eri olosuhteissa olisi kohtuullisen hyvä. Ainoastaan kova sade ja kiinteät esteet lasia lukuun ottamatta estävät sensorin toiminnan.

Maavalvontatutkalla kyetään valvomaan rakennusta lähestyttäessä sen ympäristö, mutta tutkalla ei saada sisätiloista tietoa. Rakennuksen sisällä maavalvontatutkaa ei juuri kyetä tehokkaasti käyttämään; ainoastaan suuremmissa halleissa tutkan käytöllä voidaan saada hyödyllistä tietoa. Uudempaa teknologiaa edustavat laajakaistaiset seinätutkat ovat vielä pääosin kehitysasteella. Nykyisillä kaupallisilla ratkaisuilla kyetään ilmaisemaan henkilöiden liike ei-metallisen seinän takana. Rakennetun alueen taistelussa Suomen olosuhteissa etenkin sisätiloissa tätä ominaisuutta voitaisiin hyödyntää molemmissa esimerkkitapauksissa. Ulkoseinien paksuus, rakenne ja materiaali estävät olosuhteissamme useimmissa tapauksissa seinän läpi tutkaamisen rakennuksen ulkopuolelta. Lasertutkan käyttömahdollisuudet rakennetulla alueella keskittyvät tällä hetkellä kohteiden havainnointiin ikkunoiden takaa tai jopa sälekaihtimien takaa. Tutkat ovat vielä kehitysasteella. Sisätiloissa lasertutkalla ei tilojen pienuudesta johtuen ole juuri järkeviä käyttömahdollisuuksia.

Sensorien suorituskyky rakennetulla alueella riippuu paljon lavetista. Liikutettavalla sensorilla saadaan tietoa kohteesta, jonne ollaan menossa. Kohteeseen toimitettava liikkumaton sensori kykenee välittämään tietoa, mutta toisaalta suorituskyky on hyvin riippuvainen siitä, mihin sensori tilassa päätyy. Sensorin staattisuus vähentää tällaisen sensorin käytettävyyttä, mutta parantaa yleensä tarkkuutta.

Yksittäiset sensorit kykenevät tuottamaan tietoa sitä käyttävälle joukolle. Tilannetietoisuuden parantamiseksi yksittäisen sensorin tuottama tieto pitäisi pystyä jakamaan muille tarvitsijoille langattomasti. Lähialueella oleville joukoille esimerkiksi lämpökameran tuottama kuva voidaan jakaa kaupallisiin langattomiin järjestelmiin perustuen, mutta pidemmät yhteydet on toteutettava muulla tekniikalla. Tiedon kerääntyessä yksittäisiltä sotilailta esimerkiksi pataljoonan tilannekeskukseen kasvaa siirrettävän tiedon määrä helposti niin suureksi, että langattomien yhteyksien kapasiteetti käy rajalliseksi. Tiedon jakamisen yhteydessä on kiinnitettävä huomiota myös salaukseen, sillä esimerkiksi omien joukkojen sijainti ja havaitut viholliskohteet eivät saa päätyä vastustajan käyttöön reaaliaikaisesti tai edes lyhyellä viiveellä.

Ad hoc -sensoriverkkojen vahvuutena on verkon kestävyys ja vapaa verkon rakenne. Toisaalta verkossa tulisi olla aina jokin välityspalvelimen tyylinen solmu, joka välittäisi verkon muodostaman kuvan eteenpäin. Ad hoc -verkkojen ongelmana on nimenomaan se, mikä solmuista toimii porttina (sink node) eteenpäin, jotta muiden solmujen ei tarvitse esimerkiksi kerätä kaikkea verkon muodostamaa informaatiota muistiinsa. Langattomien sensorien tutkimus on muun muassa Suomessa Puolustusvoimien osalta tällä hetkellä kohdistunut akustisiin ja vastaanotetun signaalin voimakkuuden mittaamiseen tarkoitettuihin sensoreihin.

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että yksittäiseen teknologiaan perustuva sensori ei ole suorituskykyinen rakennetulla alueella. Eri teknologiat soveltuvat eri olosuhteisiin ja monien nykyisten järjestelmien suorituskyky rakennetulla alueella on hyvin rajoittunut. Tutkimuksen perusteella tulevaisuudessa korostuvat erityisesti optronisten sensorien integrointi yhteen laitteeseen, liikuteltavat sensorit sekä langattomat sensoriverkot.

Keskeisiä jatkotutkimusalueita ovat sensorilavetin merkitys tilannekuvan tuottamisessa, langattomien sensorien soveltuvuus erilaisiin rakennuksiin ja käyttötarkoituksiin, ad hoc -sensoriverkon taistelunkestävyys, langattomien sensorien häirittevyys elektronisen sodankäynnin keinoin, tilannekuvan kokoaminen eri sensoreilta ja tilannekuvan optimoitu hajauttaminen tietoturvallisesti sekä näkyvän valon alueella toimivien liikkuvien sensorien suorituskyky ja niihin liittyvä hahmontunnistus. Yksi erittäin mielenkiintoinen tutkimuskohde



on miehittämättömien ilma-alusten käyttö rakennetun alueen taisteluun liittyen. Tätä aihetta voidaan tarkastella eri tutkimuksissa esimerkiksi ryhmätasolta prikaatitasolle. Ryhmätasolla voidaan tutkia sisätiloissa tai kaduilla käytettävien ilma-alusten teknologiaa ja käyttömahdollisuuksia, kun taas prikaatitasolla voidaan tutkia selkeästi suurempien ilma-alusten ja niiden hyötykuormana olevien sensorien teknologiaa.

## LÄHTEET

- [1] 01db-MetraviB. PILAR MKII-w. Tuote-esite. [viitattu 21.2.2012], <http://www.01db-metravib.com/defense.3/produits.153/pilar.293/?L=1>.
- [2] 01db-MetraviB. PILARw, Weapon Mounted Acoustic Gunshot Detection. Tuote-esite, [viitattu 21.2.2012], saatavissa [http://www.01db-metravib.com/fileadmin/pdf/BU4/gb\\_PILARw\\_Weapon\\_Mounted\\_11-11\\_RV.pdf](http://www.01db-metravib.com/fileadmin/pdf/BU4/gb_PILARw_Weapon_Mounted_11-11_RV.pdf).
- [3] Aalto, L.(toim.). Sähkötalo. Edita Prima, 2005. [viitattu 21.2.2012], saatavissa <http://issuu.com/helsingin.energia/docs/>, ISBN 952-473-530-X.
- [4] AFP-STT. Israelilaiset arvostelevat Toulousen operaatiota. Hämeen Sanomat, 24.3.2012, Hämeen Lehtipaino Oy, Hämeenlinna, 2012.
- [5] Agan, M.J., Olson, B., Pasqualino C.R., Stevens G.L. A Highly Miniaturized, Battery Operated, Commandable, Digital Wireless Camera. Military Communications Conference, 1998. MILCOM '98. Proceedings. IEEE, 1998. [viitattu 18.10.2011], saatavissa <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=5850>. ISBN 0-7803-4506-1.
- [6] Asetus 52/1998. Asetus sokeuttavista laseraseista tehdyn pöytäkirjan voimaansaattamisesta. Annettu Helsingissä 5 päivänä kesäkuuta 1998.
- [7] Bai, Y., Bernd S.G., Hosack J.R., Farris M.C., Montroy J.T., Bajaj J. Hybrid CMOS Focal Plane Array with Extended UV and NIR Response for Space Applications. Grycewicz, T.J., McCreight, C.R. (toim.). Focal Plane Arrays for Space Telescopes, Proceedings of SPIE, volume 5167, 2004. s. 83 - 93. ISBN 9780819450401.
- [8] Bédard, J., Paré, S., Ferret, A small arms' detection system: Localization concepts. Carapezza E. (toim.). Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Defense and Law Enforcement II, Proceedings of SPIE, Vol. 5071, 2003. s. 497 - 509. [viitattu 21.2.2012], saatavissa <http://www.spie.org/>.
- [9] Betoniteollisuus ry. Harkkokäsikirja. Kevytsoraharkot väliseinissä. [viitattu 22.2.2012], saatavissa <http://www.betoni.com/harkkokasikirja/site/default.asp?cat=5&ava=21&avb=53>.
- [10] Bocca, M., Galperti, C., Virrankoski, R., Koivo, H. N. Estimating the Number of Persons in an Unknown Indoor Environment by Applying Wireless Acoustic Sensors and Blind Signal Separation, Helsinki University of Technology, Helsinki, 2006.
- [11] Bocca, M., Wireless Sensor Networks In Indoor Situation Modeling - Detecting the Number of Persons by Using Acoustic Signals, Helsinki University of Technology, Espoo, 2006. Diplomityö (Master's Thesis).
- [12] Cuhac, C. Camera Integration to Wireless Sensor Node. University of Vaasa, Vaasa, 2011. Diplomityö (Master's Thesis).

- [13] DRS C3 & Aviation Company. MSTAR - The Most Widely Used Ground Surveillance Radar in The World. Tuote-esite. [viitattu 12.1.2012], saatavissa <http://www.drs.com/Products/C3A/PDF/MSTAR.pdf>.
- [14] Dutton, E. J., Samora, C. Modeling Rain Polarization Effects to Millimeter Wave Frequencies. U.S. Department of Commerce, Yhdysvallat, 1984. [viitattu 4.1.2012], saatavissa <http://www.its.bldrdoc.gov/pub/ntia-rpt/84-150/84-150.pdf>.
- [15] E-ville.com. Pinhole spy cam. Tuote-esite. [viitattu 22.2.2012], saatavissa <http://www.e-ville.com/en/44-surveillance-cameras/2218-pinhole-spy-cam.html>.
- [16] Eye-Fi. Eye-Fi Pro X2. Tuote-esite. [viitattu 22.2.2012], saatavissa <http://uk.eye.fi/products/prox2>.
- [17] FLIR systems, Inc. Soldier Solutions. Tuote-esite. [viitattu 4.4.2012] saatavissa [http://gs.flir.com/uploads/file/products/brochures/tv\\_brochure.pdf](http://gs.flir.com/uploads/file/products/brochures/tv_brochure.pdf).
- [18] Griffiths H. D., Baker C. J. Radar Imaging for Combatting Terrorism. Department of Electronic and Electrical Engineering, University College, Lontoo, Iso-Britannia, 2006.
- [19] Günther, A., Hoene, C. Measuring Round Trip Times to Determine the Distance between WLAN Nodes. Boutaba, R. et al. (toim.). NETWORKING 2005. Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communications Systems 4th International IFIP-TC6 Networking Conference, Proceedings, 2005. s. Kanada. [viitattu 3.4.2012], saatavissa [http://www.tkn.tu-berlin.de/fileadmin/fg112/Papers/hoene\\_paper2.pdf](http://www.tkn.tu-berlin.de/fileadmin/fg112/Papers/hoene_paper2.pdf).
- [20] Helsingin Energia. Helsingin Energia lyhyesti. [viitattu 21.2.2012], saatavissa <http://www.helen.fi/yrittys/helen.html>.
- [21] Honkonen, J. Mekanisoidun taisteluosaston panssarijääkärikomppanian käyttömahdollisuudet hyökkäyksessä asutuskeskukseen. Pro gradu -työ. Maanpuolustuskorkeakoulu, Taktiikan laitos, Helsinki, 2005. Turvaluokiteltu (TLL IV).
- [22] Hovanessian, S. A. Introduction to Sensor Systems. Artec House, Inc., 1988. ISBN 0-89006-271-4.
- [23] Ilmatieteen laitos. Helletilastot. [viitattu 4.4.2012], saatavissa <http://ilmatieteenlaitos.fi/helletilastot>.
- [24] Iqbal, S., Distance-based Sensor Node Localization by Using Ultrasound, RSSI and Ultra-wideband - A Comparison Between the Techniques, University of Vaasa, Vaasa, 2010. Diplomityö (Master's Thesis).
- [25] Jormakka, J., Rissanen, A.(toim.). State-of-the-Art in Sensors. Sotatekniikan laitos, Maanpuolustuskorkeakoulu, Helsinki, 2006.

- [26] Kaltiokallio, O., Maurizio, B. Real-Time Intrusion Detection and Tracking in Indoor Environment Thorough Distributed RSSI Processing. Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA), 2011 IEEE 17<sup>th</sup> International Conference on. Vol 1. s. 61 - 70. IEEE, Los Alamos, Yhdysvallat, 2011, ISBN 978-0-7695-4502-8.
- [27] Kaşek K. An Implementation and Algorithm Development for UWB Through the Wall Imaging System. Middle East Technical University, 2007. Diplomityö (Master's Thesis).
- [28] Kosola, J. Suurtehomikroaaltoase ja perusteet siltä suojautumiselle. Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos. Ykkös-Offset, Vaasa, 2000. ISBN 951-25-1172-x. Tutkimustyö.
- [29] Kosola, J., Solante, T. Digitaalinen taistelukenttä - informaatioajan sotakoneen tekniikka. Edita Prima Oy, Helsinki, 2003, ISBN 951-25-1449-4.
- [30] Lampinen, P. Taistelukentän optiset olosuhteet. Esiupseerikurssin tutkielma. Maanpuolustuskorkeakoulu, Helsinki, 2001.
- [31] Lehmuslehti, A. Alueellisten joukkojen rakennetun alueen taistelu 2030. Diplomityö, Yleisesikuntaupseerikurssi 54, Maasotalinja, Maanpuolustuskorkeakoulu, Helsinki, 2009. Turvaluokiteltu (TLL IV).
- [32] Letalick, D., Ahlberg, J., Andersson P., Chevalier T., Grönwall C., Larsson H., Persson, Å., Klasén L. 3-D Imaging by Laser Radar and Applications Preventing and Combating Crime and Terrorism. The Swedish Defence Research Agency (FOI), Division of Sensor Technology, Ruotsi, 2004.
- [33] Majuri, P. Sensorien käyttö taistelukentän valvonnassa. Esiupseerikurssin tutkielma. Maanpuolustuskorkeakoulu, taktiikan laitos, Helsinki, 2009. Turvaluokitettu (TLL IV).
- [34] Mäki, A. Tiedusteluun ja tulenjohtoon soveltuvat sensorijärjestelmät. Sotatieteiden maisterin tutkielma. Maanpuolustuskorkeakoulu, sotatekniikan laitos, Helsinki, 2009. Turvaluokitettu (TLL IV).
- [35] Mazurek, J., Barger, J., Brinn, M., Mullen, R. Price, D., ritter, S., Schmitt, D. Boomerang mobile counter shooter detection system. Carapezza E. (toim.). Proceedings of SPIE, Vol. 5778, Sensors, and C3I Technologies for Homeland Security and Homeland Defense IV, 2005. s. 264. [viitattu 21.2.2012], saatavissa <http://www.spie.org/>.
- [36] McAulay, A. D. Military Laser Technology for Defense. Technology for Revolutionizing 21st Century Warfare. John Wiley & Sons, Yhdysvallat, 2011, ISBN 978-0-470-25560-5.
- [37] Nilsson, S., Axelsson, D., Gustafsson, M., Jänis, A., Kjellgren, J., Sume, A. Väggenetrerande radar. En omvärldsanalys. Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), FOI-R--1774--SE, Linköping, Ruotsi, 2005, ISSN 1650-1942.
- [38] North Atlantic Treaty Organisation (NATO). Research and Technology Organisation (RTO). Land Operations in the Year 2020 (LO2020). Ranska, 1999, ISBN 92-837-1015-0.

- [39] North Atlantic Treaty Organisation (NATO). Research and Technology Organisation (RTO). Sensors for Urban Operations. Ranska, 2009. [viitattu 8.3.2012], saatavissa <http://publicintelligence.net/nato-sensors-for-urban-operations-technical-report/>.
- [40] North Atlantic Treaty Organisation (NATO). Research and Technology Organisation (RTO). Urban Operations in the Year 2020. Ranska, 2003. ISBN 92-837-1100-9.
- [41] Nurmela, T. Sotilaallisen kriisinhallintajoukon taistelutilaan vaikuttavat tekijät. Esiupseerikurssin tutkielma. Maanpuolustuskorkeakoulu, taktiikan laitos, Helsinki, 2007.
- [42] Parker, D., McIlvaine, J., Barkaszi, S., Beal, D., Anello, M. Laboratory Testing of the Reflectance Properties of Roofing Materials. Florida Solar Energy Center. Yhdysvallat, 1993. [viitattu 4.4.2012], saatavissa <http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/html/FSEC-CR-670-00/index.htm>.
- [43] Pinnick R., Hoihjelle D., Fernandez G., Stenmark E., Lindberg J., Hoidale G., Jennings S. Vertical Structure in Atmospheric Fog and Haze and Its Effects on Visible and Infrared Extinction. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol 35, Issue 10, 1978. s. 2020 - 2032. [viitattu 23.2.2012], saatavissa <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469%281978%29035%3C2020%3AVSIAFA%3E2.0.CO%3B2>.
- [44] Puolustusvoimat. Asutuskeskustaistelun opas II osa (Asutkst-opas II), Sisälähetysseuran kirjapaino Raamattutalo, Pieksämäki, 1985.
- [45] Puolustusvoimat. Maavoimien esikunta. Rakennetun alueen taistelun käsikirja. Luonnos. 2011. Turvaluokiteltu (TLL IV).
- [46] Puolustusvoimat. Pääesikunta. Suunnitteluosasto. Kenttäohjesääntö Yleinen osa (Puolustusjärjestelmän toiminnan perusteet), Edita Prima, 2008, ISBN 978-951-25-1744-2.
- [47] Rantakari, R. Panssarivaunujen uhanvaroittimet ja aktiiviset suojajärjestelmät sekä niiden käyttötarve panssarikalustossamme. Kadettitutkielma. Maanpuolustuskorkeakoulu, Helsinki, 2001.
- [48] Raytheon BNN Technologies. Boomerang Warrior-X. Tuote-esite. [viitattu 21.2.2012], saatavissa <http://www.bnn.com/resources/pdf/Warrior-X-052511.pdf>.
- [49] Recon Robotics. Recon Scout XT. Tuote-esite. [viitattu 4.1.2012], saatavissa [http://www.reconrobotics.com/products/recon-scout\\_XT.cfm](http://www.reconrobotics.com/products/recon-scout_XT.cfm).
- [50] Redden, E., Blackwell, C. Situational Awareness and Communication Experiment for Military Operations in Urban Terrain: Experiment I. U.S. Army Research Laboratory. Human Research & Engineering Directorate. Yhdysvallat, 2001.
- [51] Röhrig, C., Künemund F. Mobile Robot Localization using WLAN Signal Strengths. Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 2007. IDAACS 2007. 4th IEEE Workshop on, 2007. s.704 - 709. [viitattu 4.4.2012] saatavissa

- [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4488514&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D4488514](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4488514&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4488514).
- [52] Sahinoglu, Z., Gezici, S. Ranging in the IEEE 802.15.4a standard. Proceedings of the IEEE Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON'06), 2006. s. 1–5. Clearwater Beach, Yhdysvallat. [viitattu 1.4.2012], saatavissa <http://www.merl.com/papers/docs/TR2006-097.pdf>.
- [53] Simon, G. et al. Sensor network-based countersniper system. Stankovic, J.A. et al.(toim.). SenSys '04 Proceedings of the 2<sup>nd</sup> international conference on Embedded networked sensor systems. Yhdysvallat, 2004. ISBN 1-58113-879-2.
- [54] Spybowl. Reconnaissance Sphere. Exavision. Defense Update, International Online Defense Magazine, Issue 2, 2006. [viitattu 4.1.2012], saatavissa <http://www.defense-update.com/products/s/spybowl.htm>.
- [55] SuperDroidRobots. Military/Law Enforcement. Tuote-esite. [viitattu 4.1.2012], saatavissa <http://www.superdroidrobots.com/shop/custom.aspx?recid=4>.
- [56] U.S Marine Corps. Warfighting (MCDP 1). [viitattu 4.1.2012], saatavissa [http://www.dtic.mil/doctrine/jel/service\\_pubs/mcdp1.pdf](http://www.dtic.mil/doctrine/jel/service_pubs/mcdp1.pdf).
- [57] Valarezo, J. Enabling Wireless Sensors Localization in Dynamic Indoor Environments. Aalto University. School of Science and Technology. Espoo, 2010. Diplomityö (Master's Thesis).
- [58] Valtioneuvoston periaatepäätös 16.12.2010. Puolustusministeriö. Yhteiskunnan turvallisuusstrategia. Vammalan kirjapaino, 2011. ISBN 978-951-25-2169-2. [viitattu 4.1.2012], saatavissa [http://www.defmin.fi/files/1705/yts\\_2010\\_fi\\_nettiin.pdf](http://www.defmin.fi/files/1705/yts_2010_fi_nettiin.pdf).
- [59] Vasile, A. N., Marino R. M. Pose-Independent Automatic Target Detection and Recognition Using 3D Laser Radar Imagery. Lincoln Laboratory Journal, Volume 15, Number 1, Yhdysvallat, 2005.
- [60] Woolley, J. T. Reflectance and Transmittance of Light by Leaves. The American Society of Plant Physiologists. Plant Physiology, volume 47, number 5, 1971. s. 656 - 662. Yhdysvallat. [viitattu 20.2.2012], saatavissa <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC396745/pdf/plntphys00184-0062.pdf>.
- [61] Ympäristöministeriö. Maankäyttö- ja rakennuslaki 2000. Opas 1. Oy Edita Ab Kustannustoi-  
mitus, Helsinki, 2000. ISBN 951-37-3235-5. [viitattu 4.4.2012], saatavissa <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=42928&lan=fi>.
- [62] Ympäristöministeriön asetus rakennuksen käyttöturvallisuudesta. F2 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennuksen käyttöturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2001. Annettu Helsingissä 1 päivänä maaliskuuta 2001.

## **LIITTEET**

LIITE 1      Sensorien suorituskyky eri olosuhteissa

## Sensorien suorituskyky eri olosuhteissa

Partikkeli ja sen koko [28][43]	Lasi	Betoni	Katu/päivä	Katu/pimeä	Huone	Savu 10nm-1µm	Pöly 10nm-10µm	Sade 100-5000µm	Sumu 0.3 - 0.6µm 3.5 - 6.5µm
Sensori									
Valonvahvistin	+	-	-	+	-	-	-	-	-
Valonvahvistin, aktiivinen valaisu	+	-	-	+	+	-	-	-	-
Näkyvän valon kamera	+	-	+	-	-	-	-	-	-
Lämpökamera	-	-	+	+	+	+	+	(-)	-
Laseritutka	+	-	+	+	-	+	+	-	+
UV-ilmaisın	-	-	+	+	-	-	-	-	-
UV-kamera	-	-	+	+	-	-	-	-	-
Maastonvalvontatutka	-	-	+	+	-	+	+	(-)	+
Seinätutka	(+)	+	-	-	+	+	+	+	+
Akustinen sensori	+	(+)	+	+	+	+	+	(+)	+
RSSI	(-)	(-)	(+)	(+)	+	+	+	+	+
Integroituna: Valonvahvistin Näkyvän valon kamera Lämpökamera UV-kamera	+	-	+	+	+	+	+	-	-

Selite:

+ hyvä suorituskyky

- heikko suorituskyky tai ei suorituskykyä

( ) suorituskyky riippuu olosuhteista, sensorilla ei kuitenkaan ole merkittävää vahvuutta tai heikkoutta