

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Vastakkainasettelullinen riskianalyysi asejärjestelmien vaikuttavuusarvioinnissa

Ahti Salo, Aalto Yliopisto, ahti.salo@aalto.fi, +358-50-383 0636
Juho Roponen, Aalto Yliopisto

Tiivistelmä: Asejärjestelmien hankinnat ovat yleensä useiden miljoonien eurojen investointeja, mikä tarkoittaa, että hankintapäätöksissä on syytä käyttää parasta mahdollista saatavilla olevaa tietoa. Tässä tutkimuksessa olemme kehittäneet asejärjestelmäportfolioiden vertailuun monen muuttujan stokastiseen dominanssiin perustuvan menetelmän. Olemme myös tehneet menetelmällä todentuntuisen esimerkkitarkastelun, jossa puolustaja arvioi parhaita vastakeinoja suojautuakseen miehittämättömällä ilma-aluksilla tapahtuvalta tiedustelulta. Kehittämämme matemaattinen menetelmä on riittävän yleisellä tasolla, jotta sitä voidaan hyödyntää myös muunlaisten päätöstehtävien analysointiin.

1. Johdanto

Vaikuttavuusarviointia tarvitaan asejärjestelmien strategisten hankintapäätösten valmistelussa sekä taktisten ja operatiivisten toimenpiteiden suunnittelussa. Usein asejärjestelmät tulevat käyttöön monta vuotta hankintapäätösten jälkeen, jolloin niiden toimintaympäristö poikkeaa nykyisestä, koska vastapuoli on ehtinyt kehittää omia järjestelmiään. Toisaalta taistelutilanteissa taktisten ja operatiivisten päätösten vaikutukset riippuvat vastapuolen päätöksistä, joihin liittyy merkittäviä epävarmuuksia. Näitä epävarmuuksia ei voida käsitellä arvioimalla päätösvaihtoehtoja yksinomaan staattisesti suhteessa annettuihin skenaarioihin (Bunn ja Salo, 1993), sillä vastapuolen päätöksiin voidaan reagoida vaiheistetusti ajan edetessä. Kysymyksessä on siis epävarmuuksia sisältävä peliteoreettinen asetelma.

Vastakkainasettelullinen riskianalyysi (ARA, adversarial risk analysis) (Rios Insua et al., 2009; Roponen ja Salo, 2015) tarjoaa peliteoriaan pohjautuvan lähestymistavan vastapuolen toimintaan liittyvien epävarmuuksien käsittelemiseksi. Tyypillisesti vastakkainasettelullisissa riskianalyseissä

1. yhdistellään tietoa eri lähteistä (ml. simulointimallit, asiantuntija-arviot) ja muodostetaan näistä perusteltu tilannekuva;
2. sovelletaan peliteoreettista tarkastelua, joka syventää vastapuolen käyttäytymisestä koskevaa ymmärrystä.

Tutkimuskenttänä vastakkainasettelullinen riskianalyysi on verraten uusi. Sitä voidaan soveltaa eri päätöstilanteissa (ml. strategiset hankintapäätökset sekä taktiset ja operatiiviset päätökset). Se on lupaava varsinkin taistelumallinnuksen yhteydessä, jossa vastapuolen tavoitteet, tilannekuva ja resurssit osaltaan määrittävät, mitä vastapuoli luultavimmin tekee.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa perusteltu arvio siitä, miltä osin ja missä määrin vastakkainasettelullinen riskianalyysi on puolustusvoimien kannalta varteenotettava lähestymistapa asejärjestelmien vaikuttavuusarvioinnin tukena. Tämä arvio sisältää itsessään käyttökelpoista tietoa ja varmistaa osaltaan, että vastakkainasettelullista riskianalyysiä ke-

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihde 295 160 01	matine@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

hitetään ja hyödynnetään sille otollisissa sovelluskohteissa.

Lisäksi tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa menetelmiä ja työvälineitä, joiden pohjalta puolustusvoimien taistelumalleja ja niiden käyttöä voidaan kehittää tuomalla niihin peliteoriaan, robustiin päätösanalyysiin ja stokastiseen optimointiin perustuvia toiminnallisuuksia. Kehitystyö toteutetaan siten, että nämä toiminnallisuudet ovat taistelumallien lisäksi myös asiantuntija-arviointiprosessien kautta toteutettavissa (ks. Kangaspunta ja Salo, 2014).

Uutena menetelmällisenä tulokulmana lähdettiin erityisesti tutkimaan epätäydellisen informaation kuvaamista realistisessa analyysikohteessa. Tavoitteena oli löytää robusteja (kaikilla vaihtoehtoisilla oletuksilla verrattain hyviä) päätösvaihtoehtoja tilanteissa, joissa vihollisen hyötyfunktioista tehdään mahdollisimman vähän oletuksia. Näin siksi, että todellisudessa tätä hyötyfunktioita on äärimmäisen vaikea määrittää luotettavasti.

Tutkimuksen puitteissa on tehty myös todentuntuinen esimerkkitarkastelu, jonka tavoitteena oli arvioida menetelmän käytettävyyttä monimutkaisiin käytännön ongelmiin. Esimerkkitarkastelun aiheeksi valittiin yhteisymmärryksessä tutkimuksen seurantar ryhmän kanssa huoltokompanian suojaaminen miehittämättömillä ilma-aluksilla (UAV, unmanned aerial vehicle) tapahtuvalta epäsuoran tulen maalinosoitukselta.

3. Aineisto ja menetelmät

Vastakkainasettelullinen riskianalyysi (ARA) yhdistää riskianalyysiä ja bayesilaista peliteoriaa. Se tuottaa menetelmiä, joilla voidaan arvioida riskejä tilanteissa, joissa useampi omaa etuaan ajava toimija tekee päätöksiä. Eri osapuolten päätökset vaikuttavat kaikkien osapuolten lopputuloksiin (Banks et al., 2015). ARA vertautuu muihin vaihtoehtoisiin menetelmiin varsin edullisesti, koska perinteinen riskianalyysi ei huomioi vihamielistä toimintaa. Klassisessa peliteoriassa tehdään yleensä voimakkaita oletuksia jaetusta tiedosta ratkaisujen löytämiseksi. Päätösanalyysi yksinään ei tarjoa keinoja vastustajan toiminnan arviointiin (Keeney, 2007). ARA:lla ei ole näitä samoja rajoituksia.

Olemme kehittäneet tässä tutkimuksessa tavan soveltaa monen muuttujan stokastista dominanssia ARA-ongelmien ratkaisuun. Tämä mahdollistaa ongelmien ratkaisun myös tilanteissa, joissa muiden toimijoiden tavoitteita ei voida tai haluta esittää arvioina hyötyfunktioista. Tämä on erityisen hyödyllistä taistelumallinnusongelmissa, koska vastustajan päätöksiä ohjaavat tavoitteet voivat jopa vaihdella taistelusta toiseen riippuen siitä, kuka johtaa operaatiota.

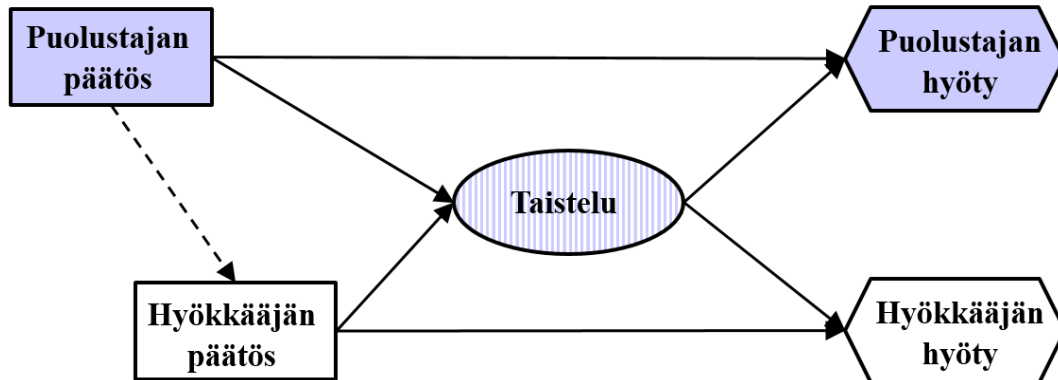
3.1 VASTAKKAINASETTELULLINEN RISKIANALYYSI

Tarkastelkaamme tilannetta, jossa on kaksi keskenään vihamielistä toimijaa, hyökkääjä ja puolustaja (Attacker ja Defender), joiden päätökset vaikuttavat kummankin osapuolen tilanteesta saamiin hyötyihin. Päätösten keskinäisiä vaikutussuhteita on kuvattu usean toimijan vaikutuskaaviolla (cf. Howard & Matheson, 2005) kuvassa 1. Kuvattu tilanne on niin sanottu hyökkääjä-puolustaja peli. Puolustaja tekee päätöksensä ensin, minkä jälkeen hyökkääjä valitsee parhaan vasteensa eli oman hyötynsä maksimoivan toimenpiteen tietoisena puolustajan päätöksestä. Päätöksistä seuraavaa taistelua kuvataan kaaviossa molemmille yhteisellä epävarmuussolmulla, jonka lopputulos riippuu tehdyistä päätöksistä. Kumpikin osapuoli arvottaa taistelun lopputulosta ja omasta päätöksestään koituneita kustannuksia oman hyötyfunktionsa mukaan.

Kummankin osapuolen oletetaan pyrkivän maksimoimaan omaa odotusarvoista hyötyään (tai minimoimaan haittaa), joka tilanteesta koituu. Merkitään hyökkääjän mahdollisten toimien joukkoa A :lla ja puolustajan D :llä. Osapuolten hyötyfunktiot ovat vastaavasti

$u_A(\cdot)$ ja $u_D(\cdot)$.

Merkitään lisäksi kummankin osapuolet uskomuksia erilaisista todennäköisyyksistä käsittäviä joukkoja P_A :lla ja P_D :llä.



Kuva 1: Vaikutuskaavio yksinkertaisesta vastakkainasettelullisesta ongelmasta. Nelikulmaiset solmut kuvaavat osapuolten päätöksiä, pyöreät epävarmoja tapahtumia ja kuusikulmaiset osapuolten saamia hyötyjä. Suunnatut yhtenäiset kaaret solmujen välillä kuvaavat vaikutussuhteita tai päätösolmuihin mennessään käytettävissä olevaa informaatiota.

Ratkaistaan ongelma puolustajan näkökulmasta, eli etsitään puolustajan hyödyn maksimoiva päätös $d \in D$, kun hyökkääjä valitsee sen nähtyään $a \in A$. Ratkaistaan siis

$$d^* = \operatorname{argmax}_{d \in D} \int p_D(a|d) \psi_D(a, d) da, \quad (1)$$

missä $p_D(a|d)$ on arvio hyökkääjän eri päätösvaihtoehtojen todennäköisyyksistä ja $\psi_D(a, d)$ on puolustajan odotusarvoinen hyöty päätöksistä a ja d , eli

$$\psi_D(a, d) = \int u_D(c) \pi_D(c|a, d) dc. \quad (2)$$

$\pi_D(c|a, d) \in P_D$ kuvaa puolustajan arviota seurauksien c todennäköisyyksistä. Ennen kuin voimme ratkaista ongelman puolustajalle, meidän täytyy ensin muodostaa arvio todennäköisyydestä $p_D(a|d)$. Tyypillisesti tämä tehdään ratkaisemalla ongelma hyökkääjän näkökulmasta niiden tietojen tai oletuksien pohjalta, joita hyökkääjästä on käytettävissä. Toisin sanoen arvioidaan todennäköisyysjakauma $F(u_A, \pi_A)$, joka kuvaa hyökkääjän mahdollisia hyötyfunktioita $u_A(c)$ sekä hänen näkemyksiään molempien osapuolten päätöksille ehdollistetuista seuraamusten todennäköisyyksistä $\pi_A(c|a, d)$. Todennäköisyysarvioksi hyökkääjän erilaisille vasteille a saadaan siis

$$p_D(a|d) = \mathbb{P}_F[a = \operatorname{argmax}_{x \in A} \psi_A(x, d)], \quad (3)$$

missä

$$\psi_A(a, d) = \int u_A(c) \pi_A(c|a, d) dc. \quad (4)$$

Tämän jälkeen saamme ratkaistua puolustajan parhaan päätöksen yhtälön (1) mukaisesti.

3.2 STOKASTINEN DOMINANSSI

Stokastinen dominanssi on osittainen paremmuusjärjestys satunnaismuuttujille, joka mahdollistaa valinnat niiden välillä käyttäen vain minimaalista tietoa preferensseistä. (ks. Quirk ja Saposnik, 1962) Stokastisen dominanssin eri asteiden voidaan ajatella kuvaavan riskiasenteiltaan erilaisten päätöksentekijöiden suhtautumista satunnaismuuttujiin.

Käytämme seuraavaa määritelmää ensimmäisen asteen stokastiselle dominanssille:

Määritelmä 1: Satunnaismuuttuja A dominoi satunnaismuuttujaa B ensimmäisen asteen stokastisen dominanssin mielessä, jos ja vain jos $P[A \geq x] \geq P[B \geq x]$ kaikilla x , ja jollain x pätee $P[A \geq x] > P[B \geq x]$.

Merkitään ensimmäisen asteen stokastista dominanssia $\succ_{(1)}$:lla.

Ensimmäisen asteen stokastinen dominanssi on vastakkainasettelullisen riskianalyysin kannalta hyödyllinen käsite, koska dominanssista seuraa, että päätöksentekijät, joilla on aidosti kasvava hyötyfunktio, pitävät dominoivaa jakaumaa dominoitua parempana.

Koska taistelumallinnuksessa tyypillisesti halutaan tarkastella useampia tekijöitä, kuten omia tappioita, vastustajan tappioita, kustannuksia jne., tarvitaan tapa vertailla useita satunnaismuuttujia samanaikaisesti. Lineaarinen dominanssi määritellään seuraavasti:

Määritelmä 2: Satunnaisvektori $A \in \mathbb{R}^N$ dominoi satunnaisvektoria $B \in \mathbb{R}^N$ lineaarisesti, jos ja vain jos $A \cdot c \succ_{(1)} B \cdot c$ kaikilla $c \in \mathbb{R}_+^N$.

Merkitään lineaarista dominanssia $\succ_{(1)}^{\text{lin}}$. Se voitaisiin määritellä vastaavasti myös korkeamman asteen stokastisille dominansseille.

Usean muuttujan dominanssin määrittelemisen tällä tavoin varmistaa, että kaikki satunnaisvektorin sisältämät muuttujat ovat merkityksellisiä. Tämä ei rajoita menetelmän yleistyvyyttä, koska satunnaisvektori aina valitaan vastaamaan tarkasteltavaa ongelmaa. Lineaarinen dominanssi myös mahdollistaa satunnaisvektorin alkioiden tarkastelun yksi kerrallaan, koska jos satunnaisvektori dominoi toista kaikkien alkioiden osalta, se myös dominoi toista satunnaisvektoria lineaarisesti. Tämä tekee vertailujen tekemisestä helpompaa.

3.3 STOKASTINEN DOMINANSSI

Stokastisen dominanssin käyttäminen osana vastakkainasettelullisen riskianalyysiongelman ratkaisua on hyödyllistä erityisesti, koska sillä voidaan korvata arviot vastapuolen hyötyfunktioista silloin, kun tätä ei tunneta riittävän tarkasti. Jos satunnaismuuttuja dominoi toista stokastisesti, se on parempi paitsi hyötyfunktio mielessä myös esimerkiksi Value-at-Risk -riskimitan näkökulmasta. Mikäli vastustajan riskiasenteesta kuitenkin halutaan tehdä lisäoletuksia, niitä voidaan myös kuvata korkeamman asteen stokastisella dominanssilla.

Vastustajan hyötyfunktion korvaaminen stokastisella dominanssilla muuttaa ongelman ratkaisua siten, että yhtälöiden (3) ja (4) ratkaisemisen sijaan, määritetään vastustajan ei-dominoitujen vasteiden joukko jokaiselle omalle päätökselle. Jos palaamme siis jälleen kuvassa 1 esitettyyn yksinkertaiseen esimerkkiin, kaikille puolustajan päätöksille ratkaistaan

$d \in D$ ja jokaiselle hyökkääjän mahdolliselle todennäköisyysarviolle $\pi_A(c|a, d)$ ei-dominoitujen vasteiden joukko

$$A_d^* = \{a: \pi_A(c|a', d) \not\succeq_{(1)}^{\text{lin}} \pi_A(c|a, d), \forall a' \in A; a \in A\}, \quad (5)$$

jolloin saadaan todennäköisyysjakauma kaikkien mahdollisten hyökkääjän vastejoukkojen yli $p_D(A_d^*|d)$. Yksinkertaisuussyistä on kuitenkin usein mielekkäämpää olettaa hyökkääjän tapa ratkoa seuraamusten todennäköisyyksiä tunnetuksi, jolloin ei tarvitse käsitellä kuin yhtä vastejoukkoa A_d^* .

Kun hyökkääjän vasteet tunnetaan, puolustajan hyödyn maksimoiva päätös voidaan ratkaista. Koska hyökkääjän vasteiden todennäköisyyksiä ei tunneta, ei päätös ole yksikäsitteinen. Puolustajalle voidaan silti ratkaista lineaarisesti ei-dominoitujen päätösvaihtoehtojen joukko

$$D^* = \{d: \pi_D(c|a, d') \not\stackrel{\text{lin}}{>} \pi_D(c|a, d), \forall a \in \bigcup A_d^*, \forall d' \in D; d \in D\}, \quad (6)$$

missä $\bigcup A_d^*$ pitää sisällään kaikki todennäköisyysjakauman $p_D(A_d^*|d)$ mahdolliset arvot. Vaikka kaava (6) näyttääkin varsin monimutkaiselta, se sisältää ainoastaan suuren joukon parivertailuja eri todennäköisyysjakaumien välillä. Vertailujen automatisointi tietokoneella on helppoa.

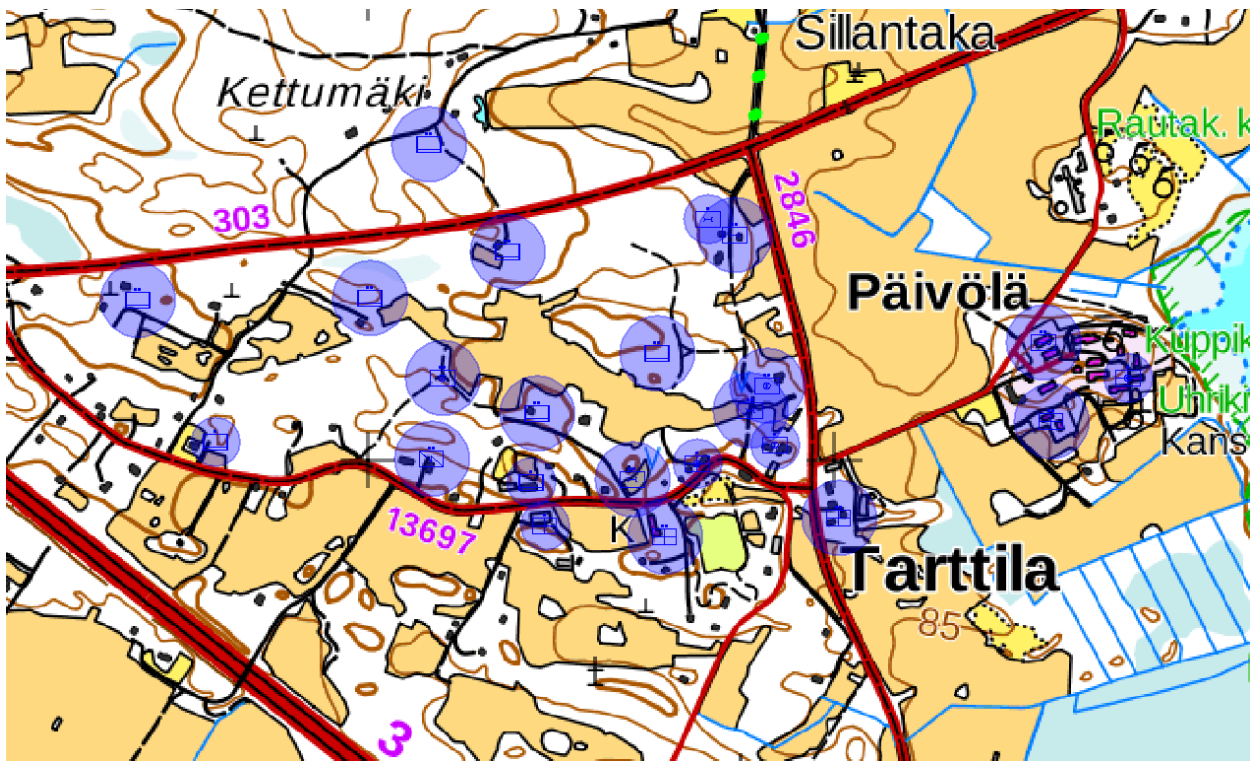
Jos puolustajan päätösvaihtoehtojen joukkoa halutaan rajata, kaava (6) voidaan muokata myös käyttämään korkeampia stokastisen dominanssin asteita. Löydettyjen ei-dominoitujen päätösten joukosta voidaan myös edelleen valikoida parhaimmat esimerkiksi soveltaen preferensseistä rakennettua hyötyfunktioita tai minimax-periaatetta.

4. Tulokset ja pohdinta

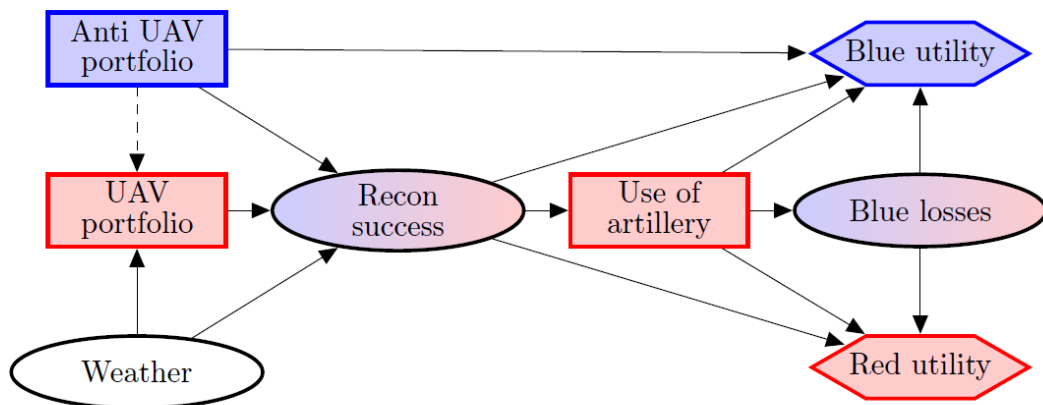
Kehitettyä menetelmää testattiin soveltamalla sitä todentuntuiseen esimerkkiin, jossa puolustajan huoltokomppania pyrkii suojautumaan miehittämättömällä ilma-aluksilla (UAV) tahtaivalta epäsuoran tulen maalinosoitukselta. Esimerkissä huoltokomppania on perustanut huoltokeskuksen Tarttilan kylän läheisyyteen Valkeakoskelle. Ryhmitys on esitetty kuvassa 2. Hyökkääjä on havainnut komppanian siirtyvän alueelle, mutta ei tunne sen tarkkaa ryhmitystä. Siksi hyökkääjä käyttää UAV:eita tiedustellakseen epäsuoran tulen maaleja. Asetelma on esitetty vaikutuskaaviona kuvassa 3.

Hyökkääjän tavoitteena on heikentää puolustajan vahvuutta tuottamalla tappioita huoltokomppanian miehistölle ja kalustolle. Puolustajan on mahdollista investoida erilaisiin vastakeinoihin UAV-tiedustelun estämiseksi. Vastakeinoihin kuuluu erilaisia ase- ja tutkajärjestelmiä, maastouttamista sekä valsemaaleja. Puolustaja kokoaa näistä itselleen vastakeinoportfolion.

Hyökkääjällä puolestaan on mahdollisuus valita tiedusteluun käytettävien UAV:iden malli ja lukumäärä. Valintaa tehdessään hyökkääjällä on tiedossaan UAV-puolustukseen käytetyt investoinnit, muttei puolustuksen tarkkaa ryhmitystä. Hyökkääjällä on myös käytössään tieto vallitsevasta säätilasta kohdealueella. UAV-tiedustelun jälkeen hyökkääjällä on mahdollisuus käyttää epäsuoraa tulta tavoitteenaan tuottaa miehistö- ja kalustotappioita puolustajalle. Käytettävissä olevat maalipisteet riippuvat siitä, mitä hyökkääjä on UAV-tiedustelulla löytänyt. Hyökkääjä voi valita käyttää joko 155mm tykistöä tai raskasta raketinheittimistöä. Se voi myös päättää käytettävien ammusten lukumäärän.

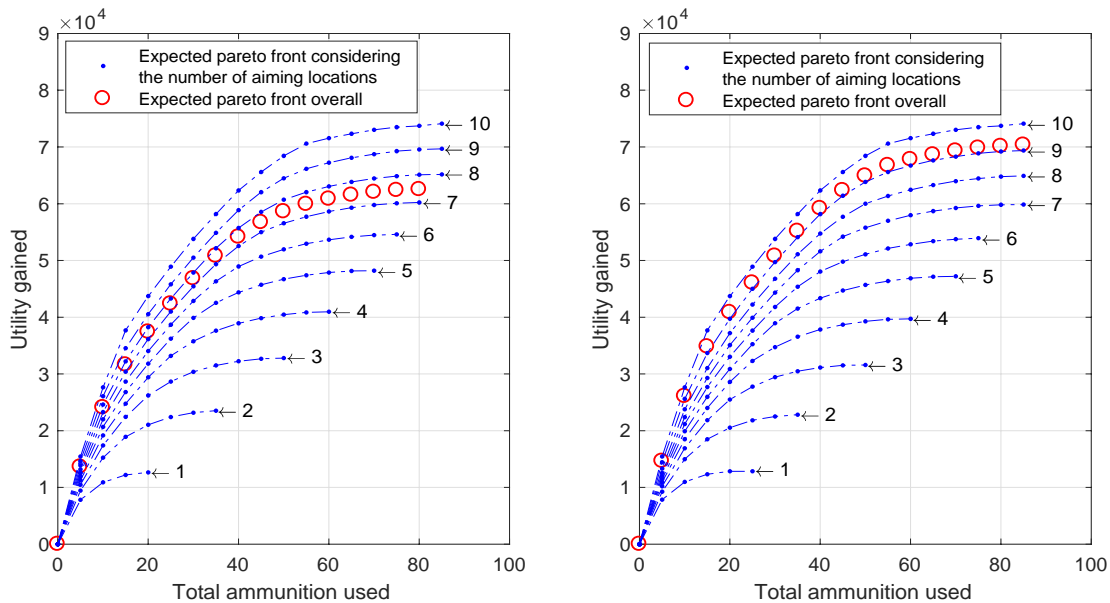


Kuva 2: Puolustajan ryhmitys.



Kuva 3: Tarkasteltava ongelma vaikutuskaaviona.

Esimerkkitarkastelun kattava numeerinen analyysi on rakentumassa. Olemme kuitenkin ratkaisseet hyökkääjän ei-dominioitujen vasteiden joukot sekä UAV-tiedusteluun että tulenkäyttöön liittyviin päätöksiin. Esimerkkejä tehokkaista tulenkäyttötaktiikoista on esitetty kuvassa 4. Tulokset yhdistetään hyökkääjän lopullisen ei-dominoidun vastejoukon selvittämiseksi, ja näitä vastaavien puolustajan ei-dominioitujen päätösportfolioiden ratkaisu tehdään joulu-tammikuussa.



Kuva 4: Esimerkkejä hyökkäjän tehokkaista tulenkäyttötaktiikoista käytettyjen ammusten sekä tunnistettujen maalien lukumäärän suhteen.

Tässä vaiheessa tutkimusta on kuitenkin jo selvää, että stokastista dominanssia käyttämällä voidaan analysoida vihamielisten toimijoiden päätöksentekoa käyttäen vain vähäisiä oletuksia vastustajasta. Hyökkäjän ei-dominioitujen vasteiden joukot eivät tämän esimerkitapauksen valossa kasva liian suuriksi ja vasteisiin liittyvät seuraukset ovat puolustajalle hyvin samankaltaisia. Tämä tarkoittaa, että menetelmä antaa informatiivisia tuloksia.

5. Loppupäätelmät

Olemme esitelleet uuden menetelmän vastakkainasettelullisten riskianalyysiongelmien analysointiin käyttäen vain minimaalisia oletuksia vastustajien tavoitteista. Menetelmän yleistettävyydessä kaikkiin mahdollisiin ongelmiin on rajoitteita. Jos osapuolten päätösvaihtoehtojen tai mahdollisten seuraamusten joukkoa ei ole rajoitettu, stokastiseen dominanssiin perustuvat tarkastelut eivät välttämättä rajaa päätösvaihtoehtoja merkittävästi. Menetelmä kuitenkin toimii hyvin asejärjestelmien vaikuttavuusanalyysissä, koska tarkastelut voidaan yleensä rajata tiettyihin järjestelmiin, ja aseiden vaikutukset ja muut riskit on rajattu taitelualueella oleviin joukkoihin.

Kehitetyn menetelmän toimivuutta on testattu ja esitelty soveltamalla menetelmää todentuntuiseen esimerkitarkasteluun. Tämänhetkisten tulosten valossa menetelmän toiminta vaikuttaa lupaavalta ja se toimii sellaisenaan ilman suuria muutoksia. Kehitetty matemaattinen menetelmä ei myöskään ole sidottu mitenkään UAV:iden torjunnan tarkasteluun, vaan sitä voidaan käyttää myös aivan muunlaisten asejärjestelmien keskinäisiin tehokkuusvertailuihin.

Vaikka tutkimus on hieman myöhässä suunnitellusta aikataulusta, näyttää siltä, että tutkimukselle asetetut tavoitteet saavutetaan kokonaisuudessaan alkuvuodesta 2018. Jäljellä on vielä esimerkitarkastelun vieminen loppuun ja tieteellisen julkaisun kirjoittaminen tutkimuksesta.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Tutkimusta on esitelty 5. Nordic Military Operational Analysis -konferenssissa Tukholmassa syyskuussa, sekä Society for Risk Analysis (SRA) Nordic Chapter -konferenssissa Espoossa marraskuussa. Tutkimuksesta kirjoitettava tieteellinen julkaisu ei ole vielä valmis.

Lähteet

Banks, D.L., Aliaga, J.M.R. and Insua, D.R., 2015. *Adversarial risk analysis*. CRC Press.

Bunn, D.W, Salo, A. (1993). Forecasting with scenarios. *European Journal of Operational Research*, 68, 291-303.

Howard, R. A. & Matheson, J. E. (2005). Influence diagrams. *Decision Analysis*, 2(3), pp. 127-143.

Kangaspunta, J., Salo, A. (2014). Expert judgments in the cost-effectiveness analysis of resource allocations: A case study in military planning, *OR Spectrum*, 36(1), 161-185.

Keeney, R.L., 2007. Modeling Values for Anti-Terrorism Analysis. *Risk Analysis*, 27(3), pp.585-596.

Quirk, J.P. and Saposnik, R., 1962. Admissibility and measurable utility functions. *The Review of Economic Studies*, 29(2), pp.140-146.

Rios Insua, D., Rios, J., Banks, D. (2009). Adversarial risk analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 104(486), pp.841-854.

Roiponen, J., Salo, A. (2015). Adversarial Risk Analysis for Enhancing Combat Simulation Models. *Journal of Military Studies*, 6(2).
