

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

**ULKOISEN TIEDONVÄLITYKSEN VAIKUTUS ILMATAISTELUOHJUKSEN
SUORITUSKYKYYN**

Diplomityö

Insinöörimajuri
John Öström

Yleisesikuntaupseerikurssi 60
Ilmasotalinja

Elokuu 2021

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Yleisesikuntaupseerikurssi 60	Linja Ilmasotalinja
Tekijä Insinöörimajuri John Öström	
Diplomityön nimi ULKOISEN TIEDONVÄLITYKSEN VAIKUTUS ILMATAISTELUOHJUKSEN SUORITUSKYKYYN	
Oppiaine johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka MPKK:n kirjasto
Aika Elokuu 2021	Tekstisivuja 133, liitesivuja 13
TIIVISTELMÄ <p>Tämän diplomityön tutkimustehtävänä oli selvittää, miten nykyaikaisessa ilmasodankäynnissä käytetään ulkoista tiedonvälitystä ilmataisteluohjuksille ja miten se vaikuttaa ohjusten suorituskykyyn. Aihealueen tutkimuksen tilanne ja vaatimukset tiedonvälitykselle selvitettiin ensin kirjallisuuskatsauksella. Näiden perusteella MisTarget-ohjussimulaatio-ohjelmaa muutettiin työn tarpeisiin. Työssä toteutettiin ainutlaatuinen Missile Datalink Analysis (MisDA) -malli. Sen ensimmäinen osa arvioi ohjuksen kykyä lukittua ulkoisella maalitiedolla osoitettuun maalin. MisTarget-ohjelmaa käyttävän mallin toisella osalla tarkastellaan laajemmin maalitiedon hyvyden vaikutusta ohjuksen suorituskykyyn. MisDA-mallille toteutettiin verifiointi ja validointi. MisDA-simulointien tulosten perusteella esitettiin, miten maalitiedon hyvyys eli virheet maalin paikassa, viive ja puuttuvat maalitietoviestit vaikuttivat työssä tarkastellun ilmataisteluohjuksen suorituskykyyn. Simulaatioiden tulosten perusteella juuri ennen ohjuksen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä vastaanotettuiden viimeisten maalitietoviestien hyvyys on kriittinen ohjuksen suorituskyvyille. Ohjus- ja datalinkkimalleilla havaittiin olevan merkittävä vaikutus MisDA-simulointien tuloksiin, ja MisTarget-ohjelmasta tunnistettiin jatkokehittämistarpeita. MisDA-mallin todettiin sopivan Puolustusvoimien käytössä olevien tai muiden kiinnostavien ohjautuvien aseiden monipuolisiin tarkasteluihin. Näitä varten on muodostettava ase- ja maalimallit sekä taktiikan mukaiset ammuntaskenaariot. Tulevaisuudessa ohjusten kehityssuunnat lisäävät ulkoisen tiedonvälityksen merkitystä ja aseiden käyttöperiaatteet kehittyvät. MisDA soveltuu näihin liittyvien tutkimusten toteuttamiseen. Vastaavaa mallia ohjautuvien aseiden suorituskyvyn tarkasteluun ei ole aiemmin esitelty julkisesti saatavilla olevassa kirjallisuudessa.</p>	
AVAINSANAT Ilmataisteluohjus, ilmataistelu, datalinkki, konstruktiivinen simulointi	

ULKOISEN TIEDONVÄLITYKSEN VAIKUTUS ILMATAISTELUOHJUKSEN SUORITUSKYKYYN

Sisältö

1.	JOHDANTO	1
1.1.	Tausta	1
1.2.	Tutkimusasetelma ja viitekehys	4
1.3.	Tutkimustehtävä ja tutkimuskysymykset	6
1.4.	Rajaukset.....	6
1.5.	Tärkeimmät käsitteet ja määritelmät	9
1.6.	Tutkimusmenetelmä	10
1.7.	Tärkeimmät lähteet ja lähdekritiikki	11
1.8.	Tutkimuksen toteutus	15
2.	ILMATAISTELUOHJUKSET	17
2.1.	Ilmataisteluohjus osana ilmataistelujärjestelmää	17
2.2.	Ilmataisteluohjuksen lennon vaiheet	20
2.3.	Ilmataisteluohjusten sensorit ja ohjustyypit.....	21
2.3.1.	Puoliaktiivinen tutkasensori.....	22
2.3.2.	Aktiivinen tutkasensori.....	23
2.3.3.	Passiivinen infrapunasensori.....	24
2.3.4.	Ohjustyypit.....	25
2.4.	Datalinkit	26
2.5.	Ohjauslait ja maaliin hakeutuminen.....	32
2.5.1.	Suora takaa-ajo.....	32
2.5.2.	Seurantalinjaohjaus	33
2.5.3.	Suhteellinen navigointi.....	34
2.5.4.	Kehittyneet ja adaptiiviset ohjauslait	37
2.6.	Lennonohjausjärjestelmä	38
2.7.	Rakenne ja komponentit	39
2.8.	Ilmataisteluohjuksen suorituskyvyn arviointi.....	40
2.9.	Yhteenveto	43
3.	MISTARGET OHJUSSIMULAATIO-OHJELMA.....	45
3.1.	Ohjelman yleiskuvaus	45
3.2.	Ohjelman ratalaskenta	48
3.3.	Ohjelman ohjusmalli	52
3.4.	Ohjelman datalinkkimalli	54
3.5.	Ohjelman maalimalli	57
3.6.	Diplomityötä varten muodostettu ohjusmalli	58

3.7.	Yhteenveto	60
4.	MALLI ULKOISEN MAALITIEDON VAIKUTUSTEN TUTKIMISEKSI.....	61
4.1.	MisDA-mallin yleiskuvaus	61
4.2.	MisDA-mallin ensimmäinen osa	62
4.2.1.	Konseptuaalinen kuvaus	62
4.2.2.	Ohjelmallinen toteutus.....	66
4.3.	MisDA-mallin toinen osa	69
4.3.1.	Konseptuaalinen kuvaus	69
4.3.2.	Ohjelmallinen toteutus.....	71
4.3.2.1.	Mallin etenemisen ohjaaminen	72
4.3.2.2.	Datalinkkitiedoston muodostaminen.....	72
4.3.2.3.	Ohjusmallin muokkaaminen.....	73
4.3.2.4.	Tulostiedostojen luku	73
4.3.2.5.	Kuvaajien muodostaminen tuloksista.....	74
4.4.	MisDA-mallin verifiointi ja validointi	75
4.4.1.	Verifiointi	75
4.4.2.	Validointi	78
4.5.	Yhteenveto	79
5.	SIMULAATIOT	80
5.1.	Skenaarioiden muodostaminen	80
5.2.	Skenaarioiden yleiskuvaus.....	83
5.3.	Skenaariot 1 ja 2: lähestyvä maali.....	85
5.4.	Skenaario 3: loittoneva maali.....	93
5.5.	Skenaario 4: kaartava maali.....	97
5.6.	Skenaario 5: maalin vaihto	104
5.7.	Johtopäätökset.....	111
6.	DISKUSSIO.....	113
6.1.	Ulkoisen maalitiedon hyvyyden vaikutus ohjuksen suorituskykyyn.....	113
6.1.1.	Maalitiedon paikan virheiden ja maalitiedon viiveen vaikutus ohjuksen suorituskykyyn.....	116
6.1.2.	Puuttuvien maalitietoviestien vaikutus ohjuksen suorituskykyyn	118
6.2.	MisTarget-ohjelman soveltuvuus ulkoisen maalitiedon käytön tutkimiseen	119
6.3.	Tutkimuksen luotettavuuden arviointi.....	120
6.4.	Jatkotutkimusmahdollisuudet	121
6.4.1.	MisTarget-ohjelman jatkokehittämistarpeet.....	124
6.4.2.	MisDA-mallin jatkokehittämistarpeet.....	126
6.5.	Ilmataisteluohjusten kehityssuunnat tulevaisuudessa	127
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET	130

LÄHTEET

LIITE 1: Työssä käytetty ohjusmalli

LIITE 2: Esimerkki datalinkkitiedostosta

ULKOISEN TIEDONVÄLITYKSEN VAIKUTUS OHJUKSEN SUORITUSKYKYYN

1. JOHDANTO

1.1. Tausta

Vaatus taktisten ilmataisteluohjusten kehittämiseksi syntyi toisen maailmasodan loppupuolella japanilaisten suorittamien kamikaze-itsemurhahyökkäysten seurauksena. Näitä hyökkäyksiä ei pystytty torjumaan ohjaamattomia ammuksia ampuvilla tykeillä. Lentokoneiden torjuntaan tarvittiin omalla moottorilla varustettuja hakeutuvia ammuksia eli ohjuksia, joiden kehitystyön Yhdysvaltain laivasto aloitti vuonna 1944. Ensimmäinen onnistunut torjunta suoritettiin joulukuussa 1950 maasta ilmaan laukaistavalla Lark-ohjuksella. Samanaikaisesti kehitettiin Lark-ohjuksen hakupäähän perustuen puoliaktiivista ilmasta-ilmaan AIM-7 Sparrow -ohjusta, jonka ensimmäinen versio otettiin käyttöön vuonna 1954. [44] Ilmataisteluohjusten kehitys johti nykyaikaiseen suurilta etäisyyksiltä ohjuksin käytävään ilmasotaan, jossa maalinosoitukset tehdään pääasiassa tutkien havaintoihin perustuen.

Vielä toistaiseksi uusien elektronisesti keilaavien hävittäjätkutkien havaintoetäisyys on suurempi kuin eniten käytössä olevien, esimerkiksi AIM-120B/C Amraam [22], ilmataisteluohjusten kantama. Verkottuneessa ilmasodankäynnissä kaukana olevia, muiden ilma- tai maasijotteisten sensorien havaitsemia, maaleja voidaan osoittaa hävittäjille verkon välityksellä. Tällaisessa tilanteessa hävittäjälentokoneen asevaikutuksen ulottuvuutta rajoittaa sen asejärjestelmä. [61] Uusimmat ilmaa hengittävillä moottoreilla varustetut ohjukset, kuten MBDA Meteor [29], tosin kurovat kiinni tätä eroa tai hävittäjän omaan tutkaan nähden kääntävät sen jopa toisin päin.

Yhä suuremmille kantamille suunniteltavat ilmataisteluohjukset lentävät pääosan lennostaan passiivisina ilman omien sensoriensa tuottamaa maalitietoa. [53] Syinä tähän ovat ohjuksiin mahtuvien sensorien ja niiden tehonlähteiden rajallinen suorituskyky sekä pyrkimys ohjuksen havaittavuuden heikentämiseen. Laukaistavalle ohjukselle voidaan kertoa maalitietoa kiinteää yhteyttä käyttäen vielä juuri ennen sen irtoamista ampuvasta lavetista. Ohjukselle kerrotaan tällöin ennakkopiste, jota kohti se laukaisun jälkeen pyrkii. Se on maalin sen hetkisen liikehännän mukaan arvioitu ohjuksen ja maalin kohtaamispiste. Ennakkopiste vanhenee kuitenkin nopeasti maalin liikehtiessä jopa minuuttien pituisen ohjuksen lennon aikana.

Toisaalta ohjuksen lennon aikana saattaa tulla esiin tarve vaihtaa maalia. Ohjukselle on siis kyettävä välittämään maalitietoa sen lennon aikana. Maalitietoa voidaan haluta lähettää myös muualta kuin ohjuksen ampuneesta lavetista. [8] Näin toimimalla ampuva lavetti voidaan heti laukaisun jälkeen vapauttaa suorittamaan muita tehtäviä tai poistumaan vastustajan asevaikutusalueelta. Hävittäjälentokoneen selviytymiskyky uhkaympäristössä pohjautuu altistuvuuden hallintaan ja näin ollen asevaikutus vastustajaan pitää pyrkiä kohdistamaan mahdollisimman kaukaa. Havaituksi tulemista ja tulenkäytön kohteeksi joutumista on vältettävä viimeiseen asti. Ilmataisteluohjusten käyttöalueen ja kantaman parantuminen luo edellytykset vaikuttaa suurella nopeus- ja korkeuserolla lentäviin maaleihin epäedullisessakin tilanteessa. Kyky vaikuttaa kauas ja pieniin maaleihin on erityisen tärkeä. [10]

Jopa satojen kilometrien etäisyyksien, ohjuksen voimakkaan liikehännän ja verkottuneen toimintatavan vuoksi tiedonvälitys ilmataisteluohjukselle on tehtävä langattomasti eli niin kutsutulla datalinkkiyhteydellä. Maalin vaihtamisen päätösprosessi kesken ohjuksen lennon saattaa vaatia tietoa ohjuksen paikasta ja tilanteesta, jolloin myös ohjuksen on pystyttävä kommunikoimaan sen ampuneen lavetin tai verkon jäsenien suuntaan. Tulevaisuudessa ilmaa hengittävien moottoreiden kasvattaessa ohjusten kantamaa ja lentoaikaa jopa moninkertaiseksi raketimoottoreilla varustettuihin ohjuksiin nähden [10] lisääntyy ulkoisen tiedonvälityksen merkitys entisestään. Elektronisen sodankäynnin suorituskykyjen kehittyessä tiedonsiirtoteknisuuden suorituskyky häirityissä olosuhteissa korostuu [35].

Ilmataisteluohjukselle pyritään välittämään maalin tarkkaa paikka- ja nopeustietoa viiveettömästi ja siten, että ohjus pystyy vastaanottamaan jokaisen lähetetyn sanoman. Todellisuudessa näin ei ole, vaan eri sensoreilla mitattuun paikka- ja nopeustietoon liittyy aina eri tasoisia sensorista ja tilanteesta riippuvia virheitä. Maalin mittaaminen sensoreilla, tietojen prosessointi ja lähettäminen ohjukselle aiheuttavat puolestaan viivettä. Suuret etäisyydet, antennikuvioiden muodot, ilmakehän ominaisuudet ja vastustajan elektroninen sodankäynti hankaloittavat langatonta tiedonvälitystä, eikä ohjus aina pysty onnistuneesti vastaanottamaan kaikkia sille lähetettyjä sanomia. [8], [49]

Sensortechnologian kehittyessä maalinosoitus voidaan suorittaa yhä suuremmilta etäisyyksiltä tai monien erilaisten sensoreiden havaintoihin tai niiden kombinaatioon perustuen. Tulevaisuuden verkottuneessa ilmapuolustusjärjestelmässä maalinosoitus on tyypillisesti jonkun muun kuin ampuvan lavetin suorittama. Yksittäisen hävittäjän, muun ilma-aluksen tai toimijan tuottaman tiedon siirtäminen muille verkon jäsenille parantaa koko järjestelmän toimintaedellytyksiä ja luo edellytykset yhteistoiminnassa toteuttavalle tulenkäytölle. Esimerkiksi Yhdysvaltojen merivoimien Cooperative Engagement Capability (CEC) on pitkälle integroitu järjestelmä, joka mahdollistaa ilmapuolustussensoreiden tiedon yhdistämisen ja lavettiriippumattoman käytön [61]. Lisäksi esimerkiksi lentokoneaseiden tietovuo-ohjauksen avulla voidaan vaihtaa laukaistun aseensa maalia verkon jäsenten toimesta. [10] Toisaalta tiedon yhdistämisen vaatima prosessointi ja sen välittäminen aseiden maalitiedoksi aiheuttaa viivettä, joka saattaa haitata tiedon käytettävyyttä. Hävittäjien kanssa yhteistyössä toimivan lennokit voivat toimia ase- ja/tai sensorilavetteina [35]. Ohjusten omien sensoreiden rajallisen suorituskyvyn takia osaa ohjauksen lennosta on kuitenkin tuettava ulkoisella tiedonvälityksellä annettavalla maalitiedolla. Tällä tiedonvälityksellä on huomattava vaikutus ohjauksen suorituskykyyn. [69]

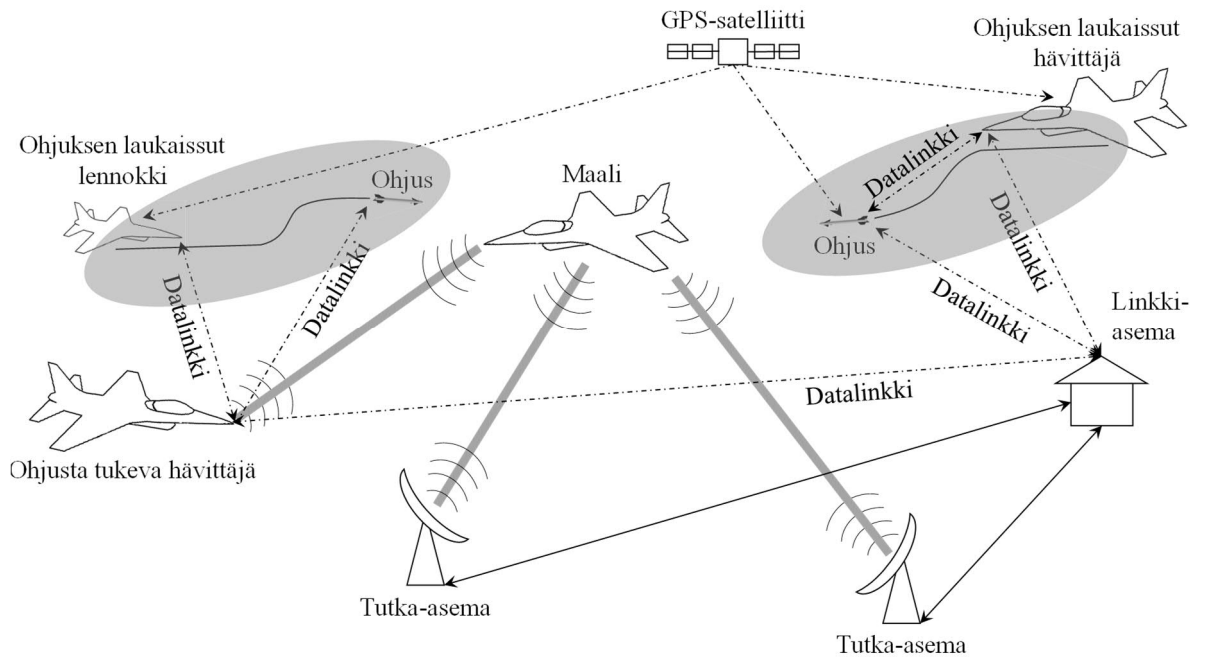
Tässä tutkimuksessa kehitetään MisTarget-ohjelmaan perustuva simulaatiomalli, jonka avulla voidaan arvioida ulkoisen tiedonvälityksen vaikutusta ilmataisteluoituksen suorituskykyyn. Missile Datalink Analysis - MisDA nimetyllä mallilla toteutetuilla tarkasteluilla voidaan esimerkiksi kehittää Ilmavoimien käytössä olevien ilmataisteluojusten käyttöperiaatteita. Tällöin simulaatioissa tulee käyttää tarkasteltavien ilmataisteluojusten tarkkoja turvaluokiteltuja malleja, oman taktiikan mukaisia ammuntaskenaarioita ja arvioituja vastustajan kalustomalleja sekä toimintatappia. Simulaatioissa voidaan käyttää lentotallenteista laskettuja arvoja datalinkillä välitetyn maalitiedon tarkkuudesta ja viiveistä [8], [69]. MisDA-mallin avulla voidaan tulevaisuudessa kehittää Hornet-monitoimihävittäjän seuraajan verkottuneen ilmasodankäynnin taktiikkaa ilmataisteluojusten käytön osalta. Lisäksi mallia sekä tämän työn tuloksia ja johtopäätöksiä voidaan käyttää yleisen ilmataistelutaktiikan kehittämiseen, ohjaajien koulutukseen sekä ohjus- ja omasuoja-analyysiohjelmistojen kehittämiseen.

1.2. Tutkimusasetelma ja viitekehys

Ulkoisen tiedonvälityksen vaikutus ilmataistelun pääaseen, eli ilmataisteluohjuksen, suorituskykyyn on tunnettava niiden parhaan mahdollisen käyttötavan valitsemiseksi ja hävittäjäkalluston taktisen käytön kehittämiseksi. Koska ohjusten käyttäminen on kallista ja mahdollisia erilaisia ammuntaskenaarioita on ääretön määrä, on ohjusten suorituskykyä ja niiden parhaita käyttöperiaatteita pystyttävä arvioimaan muilla keinoilla. Käytännössä keino on simulaatiot, joihin voidaan myös yhdistää lennoilta kerättyä tietoa. [8] Simulaatioiden avulla voidaan tutkia esimerkiksi ohjusten laukaisualueita (LAR, Launch Acceptable Region) ja ohjusten suorituskykyä erilaisissa ammuntaskenaarioissa. Ilmavoimat rahoittaa tai suorittaa itse ilmataisteluohjusten suorituskykyyn liittyvää simulaatiotutkimusta edellä mainituilla osa-alueilla. [30]

Satakunnan lennoston Ilmataistelukeskus on koelennoin hankkinut tietoa Amraam-ohjukselle datalinkillä välitetyn maalitiedon tarkkuudesta ja viiveistä, mutta vaikutusta Ilmavoimien käytössä olevien ilmataisteluohjusten suorituskykyyn ei ole vielä tarkasteltu. Ohjukselle välitettävän tiedon hyvyyden vaikutusta sen suorituskykyyn ja tulevaisuuden vaatimuksia välitettävälle tiedolle verkottuneessa toiminnassa on syytä tutkia ja tätä varten on kehitettävä soveltuva simulaatiomalli. Ilmavoimien F/A-18C/D Hornet -monitoimihävittäjän seuraaja tulee toimimaan osana yhä verkottuneempaa ilmapuolustusjärjestelmää [10], joten uusia toimintatapoja ja niiden vaatimuksia ilmataisteluohjusten tiedonvälitykseen on kyettävä tutkimaan. Tutkimus on pystyttävä ulottamaan myös vastustajan järjestelmien toiminnan arviointiin.

Tutkimuksen viitekehys rakentuu nykyaikaiseen näköetäisyyden ulkopuolelta ilmataisteluojuksin käytävään ilmataisteluun. Osana verkottunutta ilmasodankäyntiä käytävät ilmataistelut koostuvat useista yksittäisten hävittäjien, parien, parvien tai esimerkiksi hävittäjä-lennokkiparien pyrkimyksistä tuhota vastustajan ilma-aluksia pitkän kantaman ilmataisteluojuksilla. Ammuttuja ohjuksia on tuettava niiden lennon aikana datalinkillä välitettävien maalitietopäivityksin, joita voidaan verkottuneessa ympäristössä saada myös muilta ilmassa tai maassa olevilta osapuolilta. Edellä kuvattu viitekehys voidaan pukea kuvan 1 mukaiseen muotoon.



Kuva 1: Tutkimuksen viitekehys

Tämän tutkimuksen kannalta keskeistä asiaa, eli ilmataisteluojusten lentoa ne ampuneesta lavetista datalinkin tukemana kohti maalia, on korostettu kuvassa 1 harmaalla. Ilmataisteluojukselle datalinkillä välitetyllä maalitiedolla on huomattava vaikutus ohjuksen suorituskykyyn ja siksi myös merkittävä vaikutus nykyaikaisen ilmasodankäynnin lopputulokseen. Eri osapuolilta saatavan maalitiedon hyvyden vaikutusta ohjuksen suorituskykyyn on pystyttävä arvioimaan koko ilmataistelujärjestelmän suorituskyvyn parantamiseksi. Tässä tutkimuksessa ohjukselle välitettävän tiedon hyvydellä tarkoitetaan sen virheettömyyttä, viiveettömyyttä ja jatkuvuutta. Ammuntaskenaariolla tarkoitetaan ammunnan geometriaa, ampuvan lavetin ja maalin lentoarvoja sekä niiden liikehdintää ohjuksen laukaisuhetkellä ja ohjuksen lennon aikana.

Tämän diplomityön tutkimus liittyy Satakunnan lennoston Ilmataistelukeskuksen tekemään ilmapuolustustutkimukseen Ilmavoimien toimintasuunnitelman 2019–2023 [30] mukaisesti. Työ kuuluu Ilmapuolustuksen (ILPU) kehittämisohjelman ”Lentokaluston taktisen käytön kehittäminen” LTKK3-tutkimushankkeeseen [72]. Vastaava tutkimus jatkuu myös ILPU 2032-kehittämisohjelman vastaavassa LTTK4-tutkimushankkeessa [73]. Tämä diplomityö aloitettiin LTTK3-tutkimushankkeen aikana ja se jatkuu LTTK4-tutkimushankkeen puolelle. Tämä tutkimus ei yhdisty suoraan ILPU kehittämisohjelman aihealueeseen ”Ilma-alusten omasuojan kehittäminen”, mutta työn tuloksia ja kehitettyä mallia voidaan hyödyntää myös tämän aihealueen työssä.

1.3. Tutkimustehtävä ja tutkimuskysymykset

Tässä Yleisesikuntaupseerin tutkinnon diplomityössä tutkitaan ulkoisen tiedonvälityksen vaikutusta ilmataisteluohjusten suorituskykyyn yhdistäen tämä nykyaikaisen verkottuneen ilmasodankäynnin asettamiin vaatimuksiin ilmataisteluohjuksen tiedonvälitykselle. Tutkimustehtävänä on selvittää, miten nykyaikaisessa verkottuneessa ilmasodankäynnissä käytetään ulkoista tiedonvälitystä ohjukselle ja miten se vaikuttaa ilmataisteluohjuksen suorituskykyyn.

Tämän diplomityön päätutkimuskysymys on ”**miten ilmataisteluohjukselle välitettävän ulkoisen maalitiedon hyvyys vaikuttaa sen suorituskykyyn?**”. Päätutkimuskysymystä tukevat alatutkimuskysymykset ovat:

1. Minkälaisia vaatimuksia nykyaikainen ilmasodankäynti ja nykyaikaiset ilmataisteluohjukset aiheuttavat ohjusten tiedonvälitykselle?
2. Miten tutkimuksen toteuttamiseen valittua simulaatio-ohjelmaa tulee kehittää tukemaan paremmin ulkoisen maalitiedon käytön tutkimista?
3. Millaisen mallin avulla tutkimuksen toteuttamiseen valittua simulaatio-ohjelmaa voidaan käyttää ulkoisen maalitiedon käytön tarkasteluissa?
4. Miten virheet maalin paikassa, viive maalitiedossa ja puuttuvat maalitietoviestit vaikuttavat ilmataisteluohjuksen suorituskykyyn?

Diplomityön toteutus esitetään kappaleessa 1.8. Kyseisessä kappaleessa kerrotaan, miten tutkimuskysymyksiin vastataan ja missä kappaleissa nämä vastaukset esitetään.

1.4. Rajaukset

Tässä kappaleessa esitetään työn rajaukset ja niiden vaikutukset työn tuloksiin sekä johtopäätöksiin, mikäli arviointi on mahdollista. Lähteet on rajattu julkisesti saatavilla oleviin. Erityisesti on ymmärrettävä, että työssä tarkastellaan vain yhtä nykyaikaisen verkottuneen ilmasodankäynnin komponenttia. Työssä kehitettävä malli on kuitenkin mahdollista yhdistää laajempiin ilmapuolustusjärjestelmän kokonaisuutta kuvaaviin simulaatioihin. Työssä käytettävän ohjussimulaatio-ohjelman rajoituksia käsitellään tarkemmin kappaleessa 3. Tässä diplomityössä ei tehdä muutoksia käytettävään ohjussimulaatio-ohjelmaan, mutta työn havaintojen ja tarpeiden pohjalta ohjelman jatkokehittämistä tehdään sen tekijöiden toimesta.

Työssä tarkastellaan ilmasta laukaistavan ilmataisteluohjuksen toimintaa sekä verkottunutta ilmapuolustusjärjestelmää ohjuksen lennon tukemisen näkökulmasta. Työssä ei tarkastella ampuvan lavetin tai muiden ohjukselle tietoa välittävien toimijoiden järjestelmien toimintaa tai suorituskykyä. Maalitieto on virheetöntä ja reaaliaikaista ennen siihen tehtäviä keinotekoisia virheitä ja viiveitä. Tutkimuksessa ei tarkastella datalinkkiyhteyksien teknistä toteutusta tai niihin liittyviä teknisiä ominaisuuksia, kuten esimerkiksi antennikuvioita tai kantamaa. Vastaavia tarkasteluja voidaan suorittaa myöhemmin todellisten tilanteiden mukaisilla eri järjestelmien tuottamilla datalinkkitiedoilla ja niissä voidaan huomioida edellä mainittuja seikkoja, mikäli niitä on simulaatioon mallinnettu.

Tässä tutkimuksessa pisteenä, johon maalitieto sidotaan, käytetään ohjuksen laukaisupistettä. Tämän ja muiden ohjuksen ammuntaan liittyvien tiedonvälitykseen vaadittavien tietojen, oletetaan olevan tarkasti ammuntaan osallistuvien tiedossa. Simulaatioissa käsitellään vain yksisuuntaista tiedonvälitystä ohjukselle, eli tilannetta, jossa tietoa välitetään ainoastaan ohjuksen suuntaan. Uusimmat ohjukset kykenevät kaksisuuntaiseen tiedonvälitykseen, jolloin ohjus voi lähettää maalitietoa, paikkatietoaan tai muita parametrejaan ampuvalle lavetille tai kolmansille osapuolille esimerkiksi ohjuksen lennon aikaisen maalituksen mahdollistamiseksi. Tämän tutkimuksen simulaatioiden ja kehitettävän mallin kannalta ohjuksen lähettämällä tiedolla tai sillä kuka ohjukselle tietoa välittää, ei ole merkitystä. Todellisuudessa myös ohjuksen lähettämän tiedon hyvydellä voi olla vaikutusta esimerkiksi uuden maalinosoituksen antamiseen ohjukselle.

Tarkkoja käytössä olevien ilmataisteluohjusten simulaatiomalleja ei voida tässä työssä käyttää niiden turvaluokitusten vuoksi. Tämän vuoksi työssä toteutettavia simulaatioita varten on saatu käyttöön yleinen taktista aktiivista ilmataisteluohjusta kuvaava ohjusmalli. Ohjusmalleja ei tässä työssä kehitetä, mutta työtä varten saatuun ohjusmalliin tehdään muutoksia ohjausjärjestelmän toimintaan ohjuksen toiminnan havainnollistamiseksi. Tutkimuksessa toteutettavia tarkasteluja voidaan myöhemmin toistaa tarkemmilla turvaluokitelluilla tiettyjä ilmataisteluohjuksia kuvaavilla ohjus- ja datalinkkimalleilla.

Ohjuksen suorituskykyyn vaikuttavat useat seikat, kuten esimerkiksi ohjuksen aerodynamiikka, moottorin suorituskyky, maalinhavaitsemiskyky, lähisytyttimen toiminta ja taistelulatauksen tehokkuus. [9], [49] Edellä mainittujen vaikutusta voidaan arvioida mallintamalla ne ohjussimulaatioon tai erillisillä simulaatioilla, mutta näitä ei kuitenkaan tässä työssä tarkastella. Ohjuksen ominaisuudet, kuten sen aerodynamiikka ja moottorin suorituskyky, ovat työssä käytettävän ohjusmallin mukaiset.

Loittonevan maalin suuri nopeus ja/tai etäisyys sekä ulkoisen maalitiedon virheet voivat estää ohjuksen pääsyn oman sensorinsa näköetäisyydelle maalista. Jo merkittävästi näitä pienemmät ulkoisen maalitiedon virheet estävät ohjuksen hakeutumisen taistelulatauksen vaikutusetaisyydelle maalista. Tämän työn simulaatioissa tarkastellaan vain skenaarioita, joissa ohjus päätyy oman sensorinsa näköetäisyydelle maalista ja jos ohjus pystyy näkemään maalin, katsotaan sen pystyvän myös lukittumaan siihen. Työn simulaatioihin ei ole mallinnettu lähi-syöttimen toimintaa tai taistelulatauksen vaikutusta. Siksi tässä tutkimuksessa ilmataisteluohjuksen suorituskyvyn mittarina käytetään maalin ja ohjuksen ohitusetaisyyttä. Mitä pienempi ohitusetaisyys on, sitä parempi ohjuksen suorituskyvyn katsotaan olevan.

Työn simulaatioiden rajoituksena on myös, ettei maalilentokone tiedä sitä vastaan ammutusta ohjuksesta eikä siten reagoi ohjukseen. Tämä rajoitus johtuu työssä käytettävän simulaatio-ohjelmiston toteutuksesta. Maalilentokoneen rata on siksi ohjuksesta riippumaton ja ennalta määritetty. Koska työssä kehitettävä malli on mahdollista yhdistää laajempiin suurempia kokonaisuuksia kuvaaviin simulaatioihin, voidaan maalilentokoneen liikehdintää laajentaa myöhemmin työssä kehitetyllä mallilla tehtävissä simulaatioissa. Ohjuksen ja maalilentokoneen vuorovaikutusta käsitellään tässä työssä erikseen.

Tämän työn simulaatioissa ei käsitellä elektronista häirintää tai maalilentokoneen käyttämiä omasuojahteitteitä niiden analyysin hankaluuden vuoksi. Häirintälähettimien osalta tulisi valita sekä mallintaa eri häirintätekniikat ja lisäksi niiden vaikuttavuus vaihtelee merkittävästi skenaarion mukaan. [6] Vastaavasti silputuksen mallintaminen riippuu skenaariosta ja jopa ilmakehän tuulista. [49] Elektronisen häirinnän ja silputuksen mallintaminen sisältää stokastisia komponentteja. Tässä työssä tarkastellaan ulkoisen maalitiedon hyvyden vaikutuksia deterministisellä lähestymistavalla. Työssä kehitettävä malli ei kuitenkaan rajoita pois häirinnän ja silputuksen käyttöä. Niitä voidaan siis mallintaa ja ottaa käyttöön simulaatioissa myöhemmin.

Tässä työssä tehtävissä simulaatioissa kappaleet lentävät häiriöttömässä standardi-ilmakehässä (ISA, International Standard Atmosphere) [3]. Tuulen, puuskien tai turbulenssin vaikutuksia ei oteta huomioon. Ohjuksen hakupään oletetaan myös toimivan häiriöttömästi. Edellä mainittuja stokastisia ilmakehän ja hakupään ominaisuuksia voidaan sisällyttää ja mallintaa simulaatioihin myöhemmin tehtävissä tutkimuksissa. Koska tarkasteltavien taktisten ohjusten kantamat ovat rajallisia, noin sata kilometriä, tehdään tarkastelu tasaisen maan olettamuksilla. Simulaatioissa ei oteta huomioon gravitaatiokentän vaihtelua tai Coriolis-ilmiötä. Tämä on riittävää, koska gravitaatiokentän vaihtelu tai maapallon pyörimisen aiheuttamat kiihtyvyydet ovat mitättömiä verrattuna liikehtivän ohjuksen tai lentokoneen aikaansaamiin kiihtyvyyksiin. [3], [49]

1.5. Tärkeimmät käsitteet ja määritelmät

Tässä kappaleessa esitetään kootusti tämän diplomityön kannalta tärkeimmät käsitteet ja määritelmät. Englanninkieliset käsitteet on suomennettu.

Datalinkki: Langaton tiedonsiirtomenetelmä, joka mahdollistaa ohjuksen ja ampuvan lavetin tai kolmannen osapuolen välisen kommunikaation. Yhteys voi olla yksisuuntainen (tiedonsiirto vain ohjukselle) tai kaksisuuntainen.

Ilmataisteluoohjus: Ilmamaalia vastaan hakeutuva maasta tai ilmasta laukaistava omalla moottorilla varustettu ase.

Ohitusetäisyys: Pienin etäisyys ohjustorjunnassa ohjuksen ja maalin välillä. Ohitusetäisyyttä (miss distance) käytetään tässä työssä ohjuksen suorituskyvyn mittarina.

Ohjauslait: Ohjuksen toimintalogiikkaa, jonka mukaisesti ja ohjaamana ohjus hakeutuu kohti havaitsemaansa tai sille osoitettua maalia. Ohjauslaki tuottaa liikehtimiskomentoja, joiden tarkoituksena on ohjata ohjus maaliinsa.

P_G , Probability of Guidance: Ohjautumisen todennäköisyys, eli todennäköisyys, jolla ohjus pystyy omalla sensorillaan lukittumaan maaliin. Arvo ilmoitetaan välillä 0...1.

P_K , Probability of Kill: Maalin tuhoamisen todennäköisyys. Useiden todennäköisyyksien summa, johon vaikuttavat esimerkiksi ohjautumisen todennäköisyys, lähisytyttimen toiminta ja maali vaurionsietokyky. Ohjus voi tuhota maalinsa myös osumatta siihen. Arvo ilmoitetaan välillä 0...1.

Skenaario: (Ammunta)skenaariolla tarkoitetaan ammunnan geometriaa, ampuvan lavetin ja maalin lentoarvoja sekä niiden liikehdintää ohjuksen laukaisuhetkellä ja ohjuksen lennon aikana.

Ulkoisen maalitiedon hyvyys: Ohjukselle datalinkillä välitettävän maalitiedon hyvyydellä tarkoitetaan sen virheettömyyttä, viiveettömyyttä ja jatkuvuutta. Ulkoisen maalitiedon hyvyys määritetään tässä diplomityössä seuraavilla tekijöillä: virheet maalin paikassa, maalitiedon viive ja puuttuvat maalitietoviestit. Tämän työn tarkastelujen ulkopuolisia datalinkkimaalitiedon virheitä ovat esimerkiksi virheet maalin nopeudessa.

1.6. Tutkimusmenetelmä

Päätutkimuskysymykseen ja osaan alatutkimuskysymyksistä vastataan simulaatioiden tulosten perusteella. Tutkimuksen toteuttamiseen valittiin Suomessa Ilmavoimien rahoituksella kehitetty MisTarget-ohjelma [67] sen jatkokehittämismahdollisuuksien ansiosta. MisTarget on käytössä Ilmavoimien rahoittamassa ohjustutkimuksessa, joten tältä kannalta valinta on luonnollinen aihepiiriin tutkimukseen. Muita vaihtoehtoja olisivat olleet esimerkiksi Brawler [24], [71] ja ACEM [57] ilmansodankäyntisimulaatio-ohjelmistot. Näistä ensimmäistä on käytetty esimerkiksi lähteiden [36] ja [37] tutkimuksissa ja jälkimmäistä lähteiden [13], [14] tutkimuksessa. Näiden ohjelmistojen toiminnan kehittäminen ja simulaatioiden ohjaaminen tämän työn vaatimusten mukaisesti olisi ollut haastavampaa kuin erityisesti ohjusten simulointiin tarkoitettulla kotimaisella MisTarget-ohjelmalla. MisTarget esitellään kappaleessa 3.

Päätutkimusmenetelmänä ovat konstruktiiiviset ja deterministiset simulaatiot, joissa mallinnettava järjestelmä, eli ilmataisteluohjus, on kuvattu jatkuva-aikaisella dynaamisella mallilla. [1] Konstruktiiivisiin ja deterministisiin simulaatioihin päädyttiin tässä diplomityössä niiden yksinkertaisuuden ja toistettavuuden takia.

Konstruktiivisuudella tarkoitetaan simulaation olevan tietokoneen suorittama, eli simuloituidet toimijat käyttävät simuloituja järjestelmiä simuloidussa ympäristössä. Tässä tutkimuksessa käytössä oleva MisTarget-ohjelman versio ei mahdollista vuorovaikutteisia virtuaalisia simulaatioita, joissa ihmiset käyttävät simuloituja järjestelmiä simuloidussa ympäristössä tai live-simulaatioita, joissa ihmiset käyttävät oikeita järjestelmiä osittain simuloidusti. [1] Vuorovaikutteisuuudella tarkoitetaan tässä maalin reagointia ohjukseen, mikä vaikuttaa ohjuksen toimintaan ja edelleen maaliin. Tämä rajoitus johtuu siitä, että maalin rata määritetään tässä ohjelman versiossa ennen simulaation suorittamista. Toisaalta virtuaalisten ohjussimulaatioiden toteuttaminen on monimutkaista ohjainjärjestelyiden tai eri simulaatioiden yhdistämisen vuoksi ja realististen tulosten tuottaminen vaatii hävittäjäohjaajakoulutetun toimijan osallistumista simulaatioihin. Live-simulaatioiden toteuttaminen vaatii puolestaan telemetrijärjestelmän, jonka avulla oikeat järjestelmät (tässä hävittäjäalentokoneet) yhdistetään simulaatioon. Ilmataisteluohjuksen malli on konstruktiiivinen; reaali-maailmassakin ilmataisteluohjuksen ohjauksesta vastaa ohjausjärjestelmä. MisDA-malli kehitetään kuitenkin sellaiseksi, että sen yhdistäminen virtuaalisiin tai live-simulaatioihin on mahdollista.

Deterministisyydellä tarkoitetaan, ettei simulaatioissa ole satunnaisuutta ja samat lähtötiedot tuottavat aina saman lopputuloksen [1]. Tässä työssä toteutettavissa simulaatioissa satunnaisuutta voisivat olla esimerkiksi ilmakehän turbulenssi ja hakupään tai tutkasignaalin häiriökohinat. Tämän tutkimuksen tarkoituksena ei ole ohjuksen ohjausjärjestelmän tai hakupään toiminnan suunnitteleminen. Näissä tehtävissä stokastiset komponentit tulisi huomioida. Satunnaisuuden huomioinnilla ei saavuteta tässä työssä toteutettavien simulaatioiden kannalta etuja. Tarkoituksena on varioida vain tutkimustehtävän kannalta merkittäviä parametrejä, eli virheitä datalinkkimaalitiedossa, ja havaita niiden vaikutus ohjuksen suorituskykyyn. Satunnaisuuden huomioimisella menetettäisiin simulaatioiden toistettavuus ja tuotaisiin simulaatioihin niiden tuloksiin vaikuttavia komponentteja, joiden vaikutus jouduttaisiin erittelemään tutkimuksen kannalta merkittävien parametrien vaikutuksista. Simulaatioiden toistettavuus menetetään stokastisia komponentteja käytettäessä, koska simulaatioiden tulokset ovat tällöin jokaisella simulointikerralla erilaiset. Esimerkiksi ilmakehän turbulenssi aiheuttaa kohinaa ohjuksen liiketilaa lennonohjausjärjestelmän pyrkiessä minimoimaan sen vaikutusta. Hakupään häiriökohinan käyttämättä jättämisellä vältetään hakupään kohinasuotimen mallintaminen [53]. MisDA-mallilla myöhemmin toteutettavissa simulaatioissa voidaan ottaa käyttöön edellä mainittuja ilmiöitä kuvaavia komponentteja.

1.7. Tärkeimmät lähteet ja lähdekritiikki

Tässä kappaleessa esitetään tämän diplomityön tärkeimmät lähteet sekä selvitetään, miten niiden etsintä ja tutkittavan teeman tämänhetkisen tutkimustilanteen selvitys on toteutettu. Samalla esitetään lyhyesti mitä tutkittavasta teemasta tällä hetkellä tiedetään ja mitä siitä on kirjoitettu julkisissa tieteellisissä lähteissä ja kirjallisuudessa. Tämän kirjallisuuskatsauksen pohjalta asemoidaan tutkimus olemassa olevaan tilanteeseen ja kirjallisuuteen sekä esitetään mitä uutta tietoa tutkimus tuo olemassa olevaan ymmärrykseen nähden. Kappaleen lopuksi esitetään lähdekritiikki.

Kirjallisuuskatsauksessa etsittiin laajasti työn aihealueen tutkimuksesta tehtyjä julkaisuja ja pyrittiin selvittämään aihealueen tutkimuksen tilanne. Aiheesta saatavilla olevaa julkista tietoa rajoittaa ilmataisteluohjuksiin ja yleisesti aseteknologiaan sekä sen kehittämiseen liittyvä tiedon salaamisen tarve. Kirjojen, julkaisujen ja muun aiheeseen liittyvän julkisen tieteellisen kirjallisuuden etsintään käytettiin erityisesti Aerospace Research Central (ARC) [15], Google Scholar [20], Google [25] sekä ResearchGate [28] -hakupalveluja. Näistä ensimmäistä hallinnoi ”American Institute of Aeronautics and Astronautics” (AIAA) [21]. Hakuja kohdistettiin erityisesti AIAA vertaisarvioituihin tiedejulkaisuihin ja konferenssipapereihin, joita ovat esimerkiksi ”Journal of Guidance, Control, and Dynamics” julkaisu [16] sekä sitä vastaava konferenssi. AIAA tiedejulkaisut ja konferenssit ovat kansainvälisesti arvostettuja ja erityisesti ilmataisteluohjusten tutkimuksen pääasiallinen julkaisukanava. Tietoa olemassa olevista ilmapuolustusjärjestelmistä ja niiden kehityssuunnista etsittiin Yhdysvaltain laivaston, Yhdysvaltain ilmavoimien sekä ase- ja järjestelmävalmistajien internetsivuilta. RAND Corporation -tutkimuslaitoksen [27] julkaisut tutkimuksen aihealueesta käytiin myös läpi. Tiedonhaussa tukeuduttiin myös tämän tutkimustyön toisen ohjaajan tietoon tutkimuksen aihealueen tutkimustilanteesta sekä kirjallisuudesta ja julkaisuista.

Suomessa tämän diplomityön aihealueeseen liittyvää tutkimusta on tehty Teknillisen korkeakoulun (sittemmin Aalto-yliopiston) Aerodynamiikan ja Systemianalyysin laboratorioissa sekä Satakunnan lennoston Ilmataistelukeskuksessa. Aerodynamiikan laboratorion lakkauttamisen jälkeen siellä tehtyä tutkimusta on jatkettu laboratorion henkilökuntaan kuuluneiden henkilöiden perustamassa AeroRD-yhtiössä. Tämän Ilmavoimien rahoittaman tutkimuksen tuloksena on syntynyt esimerkiksi tässä työssä käytettävä MisTarget-ohjussimulaatio-ohjelma. Sen osalta tärkeimmät lähteet ovat ohjelman toimintaa, kehitystä ja käyttöä kuvaavat raportit ja muistiot [2], [63], [64], [65], [67], [66]. Suomessa tehdystä ilmataistelun tiedonvälityksen aihealueen tutkimuksesta mainittakoon lähteiden [31] ja [43] tutkimukset, joissa on tutkittu hävittäjälentokoneiden datalinkkiyhteyden käytön priorisointia parhaan mahdollisen tilannetietoisuuden tuottamiseksi ja ilmataisteluohjuksen lennon aikaiseen datalinkkitukeen käytettävän ajan määrittämisestä. Suomessa tehtyä ohjusten ohjautumista ja erityisesti lentokoneiden ohjusten väistöliikehdintään liittyvää tutkimusta on esitetty esimerkiksi lähteissä [32], [33], [34], [42], [62] ja [68]. Edellä mainituissa tutkimuksissa ei ole kuitenkaan tarkasteltu ohjukselle lähetettävän datalinkkitiedon hyvyuden vaikutusta ohjuksen suorituskykyyn.

Suuri osa löydetystä ilmataisteluoohjuksiin liittyvästä julkisesti saatavilla olevista julkaisuista ja kirjallisuudesta liittyy ohjuksien ohjauslakien kehittämiseen [50], [52], [58] ja lentokoneiden suorittamaan ohjuksen väistöliikehdintään [11], [40], [47], [48], [56], [59]. Erityisesti jo käytössä olevien ja niitä vanhempien ohjauslakien teoriasta löytyy lukuisia julkaisuja ja kirjoja [8], [44], [51], [53]. Datalinkkiyhteyksien käyttöä ilmataistelussa ja nykyaikaiseen ilmataisteluun liittyviä verkottumiskonsepteja on esitelty lukuisissa dokumenteissa, joista osa on välttämätöntä tämän tutkimuksen lähteiksi [4], [5], [61]. Myös ohjusten lennon simuloinnista löydettiin myös useita lähteitä [3], [8], [49], [53], [54]. Ilmataistelutaktiikka ja sen kehittäminen on puolestaan lähes täysin ei-julkista tutkimusta, eikä siitä suoritetuissa hauissa löytynyt tämän tutkimuksen kannalta hyödyllistä julkaistua tietoa.

Ulkoisen maalitiedon vaikutusta ilmataisteluoohjuksen suorituskykyyn on tarkasteltu julkisissa lähteissä vain yksinkertaistettujen käänteisten, niin kutsutun adjoint-menetelmän mukaisten, tarkastelujen avulla [45]. Tutkimuksessa ulkoisen maalitiedon hyvyyden vaikutusta tarkasteltiin siirryttäessä ohjuksen loppuhakeutumisvaiheeseen, mutta ei torjuntaan asti. Lähteessä [45] esitetyn käänteisen menetelmän heikkoutena on myös vaatimus simuloitavan järjestelmän linearisoinnista, mikä johtaa käytettävissä olevan mallinnuksen huomattavaan yksinkertaistamiseen. Tämän diplomityön tarkoituksena on käyttää käytettävissä olevien tietojen rajoissa mahdollisimman tarkkaa mallinnusta. Lähteessä [45] esitetty tarkastelu on tehty vain kaksiulotteisessa tilanteessa mainiten mahdollisuudesta laajentaa käsittely kolmiulotteisiin tilanteisiin. Myöhemmässä samojen tekijöiden julkaisemassa konferenssipaperissa [46] on pidättäytytty edelleen kaksiulotteisessa tilanteessa. Adjoint-menetelmää on esitelty myös lähteissä [53], [62] ja [68].

Julkisesti saatavilla olevassa kirjallisuudessa ja tieteellisissä julkaisuissa ei ole esitetty tämän työn kaltaista tutkimusta, jossa ajassa eteenpäin kulkevilla kuuden vapausasteen simulaatioilla tarkastellaan ulkoisen tiedon vaikutusta ilmataisteluoohjuksen suorituskykyyn. Tällaisia tutkimuksia on todennäköisesti toteutettu ilmataisteluoohjusten ja niiden datalinkkien kehityksen yhteydessä. On oletettavaa, että ohjusvalmistajat ja eri maiden asevoimat ovat tutkineet aihetta laajasti, mutta siitä ei ole saatavilla julkisia tutkimustuloksia tai -raportteja tietojen salaamisesta johtuen. Julkisista lähteistä oli kuitenkin löydettävissä riittävästi tietoa kuvaamaan nykyaikaisten ilmataisteluoohjusten datalinkin toimintaa tämän tutkimuksen toteuttamiseksi. [8], [9], [49], [53].

Tämän diplomityön tutkimus tuottaa uutta julkista tutkimustietoa siitä, miten ulkoisen tiedonvälityksen hyvyyden vaikutusta ilmataisteluoituksen suorituskykyyn voidaan arvioida ohjussimulaation avulla. Tähän mennessä julkaistuun tietoon verrattuna tässä tutkimuksessa on erityistä mallin rakentaminen tarkkaan kuuden vapausasteen ohjussimulaatioon pohjautuen ja ohjuksen koko lennon huomioon ottaminen. Lisäksi käytettävä ohjussimulaatio ja kehitetty malli mahdollistavat laajasti erilaisten vaikutusten mallintamisen ammuntaskenaarioihin, todellisten tilanteiden tarkastelun lentotallenteita käyttämällä sekä simulaatioiden liittämisen laajempiin kokonaisuuksiin.

Tämän työn tärkeimmät lähteet liittyvät taktisten ilmataisteluoituksen ohjausjärjestelmien kehittämiseen ja toimintaan [53], Amraam-ilmataisteluoituksen toimintaan ja siihen liittyvään koetoimintaan [69] sekä yleisesti taktisten ohjuksien kehitykseen [9] ja koetoimintaan [8]. Ilmasodankäynnin nykytilaa ja tulevaisuutta on tarkasteltu HX-hankinnan esiselvityksen [10], nykyaikaisen digitaalisen taistelukentän toimintatapojen [35] ja Yhdysvaltalaisen CEC-järjestelmäkonseptin [4], [5], [61] avulla. MisTarget-ohjelman osalta tärkein lähde on sen MisAnalysis-ohjelmiston dokumentaatioon [67] sisältyvä toimintakuvaus ja muistiot datalinkkimallista [63], [64].

Internet tarjoaa erityisesti harrastelijasivustojen ja keskustelupalstojen kautta varsin laajalti tietoa ilmataisteluoituksista, mutta näiden tietojen oikeellisuutta on vaikea näyttää toteen. Tämän tutkimuksen lähteiden osalta pidättäydyttiin tunnettujen ja luotettavien julkaisijoiden kirjallisuudessa, vertaisarvioituissa tieteellisissä artikkeleissa ja konferenssijulkaisuissa, joiden osalta ei ole syytä epäillä niiden paikkansapitävyyttä. Järjestelmävalmistajien osalta voidaan todeta, että ne julkaisevat julkisesti markkinointitietoja valmistamistaan järjestelmistä, mutta nämä tiedot ovat yleisellä tasolla ja niihin on suhtauduttava varauksin. Esimerkiksi ohjuksille esitetyt kantamat riippuvat ammuntaskenaarioista, joita ei markkinointitiedoissa ole määriteltä. Tarkat tiedot ilmataisteluoituksen toiminnasta ovat salaista tietoa, koska niiden suorituskyky on salattava vastustajalta. Yleisellä tasolla ilmataisteluoituksen toiminnasta ja verkottuneen ilmataistelun konsepteista on sen sijaan tarjolla runsaasti materiaalia. Tätä materiaalia voidaan käyttää selvittäessä minkälaisia vaatimuksia nykyaikainen ilmasodankäynti ja nykyaikaiset ilmataisteluoitukset aiheuttavat ohjuksen tiedonvälitykselle. Tämän diplomityön tekemiseen saadaan riittävä määrä tietoa yhdistelemällä eri lähteiden tietoja. Kirjallisuuskatsauksessa löydetty lähdekirjallisuus ei osoittautunut erityisen käyttökelpoiseksi tämän tutkimustyön simulaatioiden osalta arvioitaessa, miten ilmataisteluoitukselle välitettävän ulkoisen maalitiedon hyvyys vaikuttaa sen suorituskykyyn. Vastaus tähän tutkimuskysymykseen perustuukin tämän diplomityön kirjallisuuskatsaukseen ja työssä toteutettuihin simulaatioihin.

1.8. Tutkimuksen toteutus

Tässä kappaleessa esitetään tutkimuksen toteutus ja kerrotaan, miten tutkimuskysymyksiin vastataan diplomityön kappaleissa. Tutkimus aloitetaan selvittämällä olemassa olevan kirjallisuuden pohjalta ilmataisteluohjusten toiminnan perusteet ja miten nykyaikaisessa verkottuneessa ilmasodankäynnissä käytetään ulkoista tiedonvälitystä ohjukselle. Tämän kappaleessa 2 esitettävän kirjallisuuskatsauksen avulla perustellaan tarve ilmataisteluohjusten ulkoiselle tiedonvälitykselle, tuotetaan ymmärrys ulkoisen tiedonvälityksen suorituskykyvaatimuksista ja tutkitaan nykyaikaisen verkottuneen ilmasodankäynnin mahdollisuuksia sekä vaatimuksia ohjusten tiedonvälitykselle. Näillä perusteilla vastataan ensimmäiseen päätutkimuskysymyksiin tukevaan alatutkimuskysymykseen eli minkälaisia vaatimuksia nykyaikainen ilmasodankäynti ja nykyaikaiset ilmataisteluohjukset aiheuttavat ohjusten tiedonvälitykselle. Kappaleen 2 tietoja käytetään MisTarget-ohjelman toiminnan ja mallinnuksen arvioinnissa, työssä toteutettavien simulaatioiden skenaarioiden muodostamisessa, niiden tulosten analysoinnissa sekä vastataan näitä koskeviin tutkimuskysymyksiin. Yksi kappaleessa tarkasteltava teema on ilmataisteluohjusten maaliin hakeutumiseen merkittävästi vaikuttavat ohjauslait, jotka käytännössä määrittävät ohjuksen lentoradan. Ilmataisteluohjuksen lentoradan muotoutumisen ymmärtäminen on tärkeää tämän tutkimuksen tulosten tulkitsemisessa.

Työn simulaatioissa käytettävän MisTarget-ohjelman toiminta kuvataan kappaleessa 3 pohjautuen siitä saatavilla olevaan kirjallisuuteen. Kappaleissa 3 ja 4 vastataan toiseen alatutkimuskysymykseen selvittämällä tämän diplomityön osalta, miten MisTarget-ohjelmaa tulisi sen tekijöiden toimesta jatkokehittää tukemaan paremmin ulkoisen maalitiedon käytön tutkimista. Koska vastaavaa tutkimusta ei ole Suomessa aiemmin tehty tai muuallakaan julkisissa lähteissä raportoitu, arvioidaan samalla MisTarget-ohjelman soveltuvuutta tämän diplomityön tutkimukseen. Kappaleiden 3 ja 4 perusteella kappaleessa 6 vastataan toiseen alatutkimuskysymykseen jatkotutkimusmahdollisuuksien osalta. Nämä selvitykset ja arvioinnit tehdään kappaleen 2 tietoihin ja siinä esitettyihin vaatimuksiin pohjautuen. Kappaleen 3 tietojen perusteella kappaleessa 4 vastataan kolmanteen alatutkimuskysymykseen esittelemällä tässä työssä kehitetty kaksiosainen MisDA-malli ulkoisen maalitiedon käytön tarkasteluun. Mallin toinen osa käyttää MisTarget-ohjelmaa. Viimeiseen alatutkimuskysymykseen vastaamiseen vaadittavat simulaatioiden tulokset esitetään kappaleessa 5 toteuttamalla simulaatiot MisTarget-ohjelmalla ja työssä kehitetyllä mallilla.

Kappaleessa 6 kootaan työssä toteutettujen simulaatioiden tuloksista vastaukset viimeiseen alatutkimuskysymykseen, eli siihen miten virheet maalin paikassa, viive maalitiedossa ja puuttuvat maalitietoviestit vaikuttavat ilmataisteluohjuksen suorituskykyyn. Alatutkimuskysymyksien vastausten perusteella kappaleessa 6 vastataan päätutkimuskysymykseen eli miten ilmataisteluohjukselle välitettävän ulkoisen maalitiedon hyvyys vaikuttaa sen suorituskykyyn. Tämän jälkeen kappaleessa 6 esitetään saatujen tulosten perusteella arvio MisTarget-ohjelman soveltuvuudesta ulkoisen maalitiedon käytön tutkimiseen. Seuraavaksi kappaleessa käsitellään tutkimuksen luotettavuuden arviointi ja mahdollisia jatkotutkimusaiheita sisältäen MisTarget-ohjelman ja MisDA-mallin jatkokehittämistarpeet. Lopuksi kappaleessa 6 esitetään kappaleen 2 kirjallisuuskatsauksen perusteella arvio ilmataisteluohjusten tulevaisuuden kehityssuunnista sitoen ne työn viitekehykseen. Erityisesti painotetaan kehityksen vaikutusta ulkoisen tiedonvälityksen käyttöön. Kappaleessa 7 esitetään diplomityön johtopäätökset.

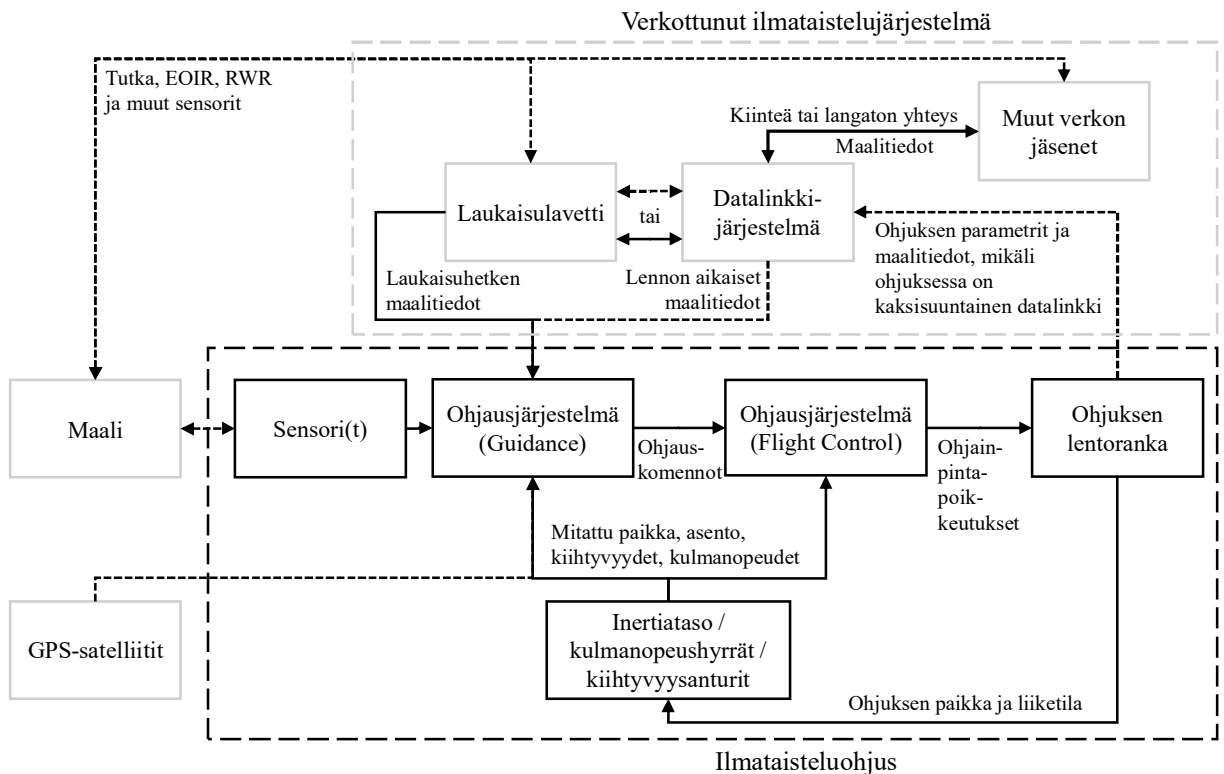
2. ILMATAISTELUOHJUKSET

Tässä kappaleessa esitetään tutkimuksessa olemassa olevan kirjallisuuden pohjalta tehty selvitys ilmataisteluohjusten toiminnan perusteista. Tämän kirjallisuuskatsauksen tietojen avulla perustellaan tarve ilmataisteluohjusten ulkoiseen tiedonvälitykseen, tuotetaan ymmärrys ulkoisen tiedonvälityksen suorituskykyvaatimuksista ja tutkitaan nykyaikaisen verkottuneen ilmasodankäynnin mahdollisuuksia sekä vaatimuksia ohjusten tiedonvälitykselle. Eräänä tarkasteltavana teemana on ilmataisteluohjusten maaliin hakeutumiseen ja siten niiden lentorataan merkittävästi vaikuttavat ohjauslait. Edellä esitetyillä asioilla vastataan ensimmäiseen alatutkimuskysymykseen selvittämällä minkälaisia vaatimuksia nykyaikainen ilmasodankäynti ja nykyaikaiset ilmataisteluohjukset aiheuttavat ohjusten ulkoiselle tiedonvälitykselle.

Kappaleessa esitetyt yleiset ilmataisteluohjusten käyttöperiaatteet ja ohjusten toiminnallisuudet huomioidaan työssä toteutettavien simulaatioiden ammuntaskenaarioiden laadinnassa. Simulaatioiden datalinkki- ja ohjusmalli pyritään saattamaan toiminnaltaan tässä kappaleessa esitetyn mukaisiksi MisTarget-ohjelmaa ja ohjusmallia jatkokehittämällä. Jatkokehittämistyön toteuttaa tämän työn toinen ohjaaja. Kappaleen tuottama ymmärrys on välttämätöntä viimeiseen alatutkimuskysymykseen ja päätutkimuskysymykseen vastaamiseksi toteutettavien simulaatioiden suunnittelussa ja niiden tuloksien tulkinnassa. Kappale auttaa myös ymmärtämään ohjusten ominaisuuksien mallintamisen haasteita ja rajoituksia, joita käsitellään tässä työssä käytettävän ohjussimulaatio-ohjelman osalta kappaleessa 3.

2.1. Ilmataisteluohjus osana ilmataistelujärjestelmää

Ilmataisteluohjus on nykyaikaisen ilmataistelun pääase. Niiden rooli ilmasodankäynnissä on esitetty kappaleessa 1.2 tutkimuksen viitekehyksessä ja siihen liittyvässä kuvassa 1. Ilmataisteluohjusten toimintaa osana verkottunutta ilmataistelujärjestelmää voidaan kuvata yksinkertaistettuna kuvan 2 tavalla pienempiin komponentteihin jaettuna. Kappaleen 2 alakappaleissa selvitetään kunkin kuvan 2 komponentin merkitys kiinnittäen erityistä huomiota tarpeeseen välittää ulkoista maalitietoa ohjukselle datalinkin avulla ja ohjuksen lentoradan määrittävään ohjausjärjestelmän sisältämiin ohjauslakeihin. Ilmataisteluohjuksen toiminnan ymmärtämiseksi myös muita kuvan 2 komponentteja käsitellään lyhyesti.



Kuva 2: Ilmataisteluohjuksen toiminta jaettuna toiminnallisiin komponentteihin.

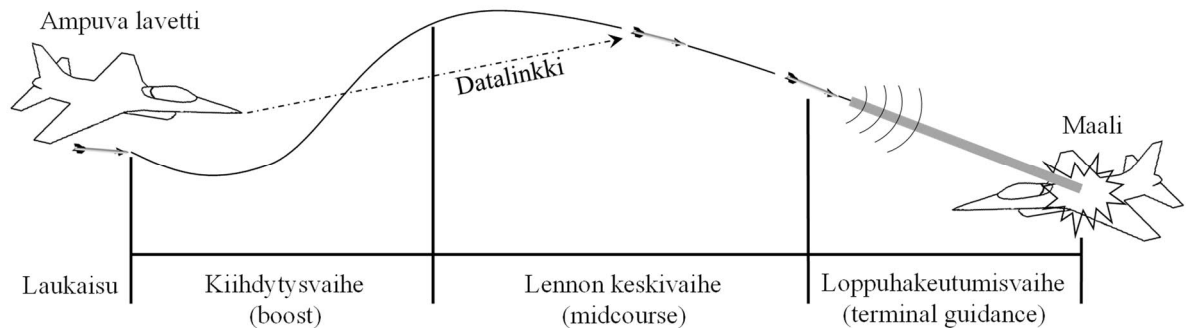
Kuvassa 2 kiinteällä viivalla kuvataan kiinteää yhteyttä ja katkoviivalla langatonta yhteyttä, eli datalinkkiä. Kuvan 2 yläosassa sijaitsevat ilmataistelujärjestelmän muut komponentit kuin ohjus on esitetty harmaalla värillä ja rajattu harmaalla katkoviivalla. Näihin kuuluu ohjuksen ampuva lavetti ja muut verkon jäsenet. Ampuva lavetti voi olla esimerkiksi hävittäjälentokone tai lennokki. Muita verkon jäseniä ovat ilmataistelujärjestelmän toimijat, kuten esimerkiksi muut hävittäjälentokoneet, lennokit, tutka- ja johtokoneet sekä tutka- ja mittausasemat. Datalinkki-järjestelmän osia voivat olla esimerkiksi erilliset tuki- ja releointiasemat tai mukana lentävissä ilmataistelujärjestelmän osissa olevat komponentit. Verkottunut ilmataistelujärjestelmä yhdistää ja jakaa järjestelmän sisällä tutkilla, elektro-optisilla- ja infrapunasensoreilla (Electro-Optical & InfraRed, EOIR), tutkavaroitimilla (Radar Warning Receiver, RWR) sekä muilla sensoreillaan saamia maalitietoja. Mikäli ohjuksessa on kaksisuuntainen datalinkki, myös se voi lähettää tietojaan verkkoon. Eri sensorien havainnot pyritään yhdistämään yhdeksi kattavaksi ilmatilannekuvaksi. Sensorit voivat sijaita ilmassa tai maassa ja niitä voi kuulua järjestelmään periaatteessa rajaton määrä. Tiedonvälitys verkon jäsenien välillä voidaan suorittaa kiinteällä yhteydellä (maassa sijaitsevat jäsenet) tai langattomasti (ilmassa ja maassa sijaitsevat jäsenet). Johtamisjärjestelmän osat kuuluvat tässä yksinkertaistetussa kuvassa muihin verkon jäseniin. Ilmataisteluohjuksen ulkoisen maalitiedon kannalta laaja verkottunut ilmapuolustusjärjestelmä ja sen useiden sensorien tietojen yhdistäminen kasvattaa maalitiedon viivettä tietojen prosessoinnin vuoksi. Myös tietojen välittäminen aseille ampuvien lavettien tai releasemien kautta saattaa kasvattaa tätä viivettä.

Kuvan 2 alaosassa sijaitsevat ilmataisteluohjuksen toiminnalliset pääkomponentit on esitetty mustissa laatikoissa ja lisäksi nämä komponentit on rajattu mustalla katkoviivalla. Kuvan 2 mukaisesti ohjus voi saada maalitietoa sen ampuvalta lavetilta laukaisuhetkellä kiinteää yhteyttä pitkin, omilla sensoreillaan tai langattomasti datalinkin kautta sen ampuneelta lavetilta sekä muilta verkon jäseniltä. Tyypillisesti ampuva lavetti antaa alustavat maalitiedot ripustimessa olevalla ohjukselle juuri ennen sen irtoamista laukaisun yhteydessä. Tätä maalitietoa päivitetään datalinkillä ohjukselle sen lennon keskivaiheen ajan ennen ohjuksen siirtymistä sen omien sensoriensa varaan torjunnan loppuvaiheessa. [8] Edellä mainitut ilmataisteluohjuksen lennon vaiheet on esitetty kappaleessa 2.2. Ohjuksen omia sensoreita, niiden käyttöä ja vaikutusta ohjuksen toimintaan käsitellään kappaleessa 2.3. Sensorien toiminnan ja ohjustyyppin mukaan voidaan myös perustella datalinkillä välitettävän maalitiedon tarpeellisuus ohjuksen lennon aikana. Kuvan 2 mukaisesti myös ohjus voi lentonsa aikana välittää datalinkin välityksellä verkon jäsenille omaa maalitietoaan tai omia toimintaparametrejaan, kuten esimerkiksi paikkaansa tai lennon vaihetta. Ilmataisteluohjusten datalinkit ja niiden toiminta esitetään kappaleessa 2.4.

Ohjuksen lennon kannalta on tärkeää ymmärtää hakeutumisen ohjauslakien ja lennonohjausjärjestelmän ohjauslakien ero. Ohjuksen omaa nopeus- ja paikkatietoa saadaan sen inertiaatsolta ja/tai GPS-järjestelmän satelliittivastaanottimelta. Muut ohjuksen ohjausjärjestelmien sensorit voivat mitata esimerkiksi sen asentoa, kulmanopeuksia tai kiihtyvyyksiä. Kaikkien näiden tietojen avulla ohjus muodostaa käsityksensä omasta tilastaan. Ohjuksen oman tilan ja maalitiedon perusteella (hakeutumisen) ohjauslait antavat komentoja lennonohjausjärjestelmälle. Se puolestaan päättää ohjuksen oman tilan perusteella, miten ohjainpintoja (ohjaussivkkeet, työntövoiman suuntaus) poikkeutetaan (suunta, poikkeutuksen suuruus) komentojen täyttämiseksi. [8], [49] Ilmataisteluohjusten hakeutumisen ohjauslakeja ja maaliin hakeutumista käsitellään kappaleessa 2.5. Ilmataisteluohjusten lennonohjausjärjestelmiä on puolestaan esitelty lyhyesti kappaleessa 2.6. Kappaleessa 2.7 kuvataan ilmataisteluohjuksen lentoranka ja edellä mainittujen komponenttien sijoittelu siihen. Kappaleessa 2.8 esitetään ilmataisteluohjusten suorituskyvyn arviointi, jota käytetään tässä työssä toteutettavien simulaatioiden tulosten analysoinnissa. Samalla esitetään kappaleen 2.3 ilmataistelukokemusten perusteella ilmataisteluohjusten käytön periaatteita simulaatioiden ammuntaskenaarioiden laadintaa varten.

2.2. Ilmataisteluohjuksen lennon vaiheet

Ilmataisteluohjuksen lento voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, joissa kussakin ohjus toimii hyvin eri tavalla. Näitä vaihteita havainnollistetaan kuvassa 3. [8]



Kuva 3: Ilmataisteluohjuksen lennon vaiheet.

Kuvan 3 kiihdytysvaihe alkaa heti laukaisun jälkeen ohjuksen irrottua sen ampuneesta lavetista. Tällöin ohjus vaiheen nimen mukaisesti kiihdyttää nopeutensa lennon keskivaihetta varten ja aloittaa mahdollisen loftaamisen, eli käyttää moottorin tuottamaa energiaa lentokorkeuden kasvattamiseen. Lentokorkeudella luotu potentiaalienergia voidaan käyttää hyödyksi loppuhakeutusvaiheessa, jolloin ohjuksen moottori ei välttämättä enää tuota työntövoimaa. Lennon keskivaiheessa ohjus lentää kohti sille annettua ennakkopistettä ja ohjuksen ohjausjärjestelmä korjaa ohjuksen rataa pitääkseen maalin ohjuksen torjuntakyvyn rajoissa. Lennon keskivaiheen ohjausta suoritetaan tyypillisesti ulkoisen maalitiedon varassa. Tällöin nopeasti vanhenevaa ennakkopistettä korjataan maalin liikehdinnän mukaisesti. Ohjus hakeutuu annettua pistettä kohti inertiasuunnistukseen ja/tai GPS-paikannukseen perustuen. [8] Uusimmissa ilmataisteluohjuksissa, kuten AIM-120D Amraam [55], käytetään GPS-paikannusta korjaamaan inertiasuunnistusjärjestelmän ryömintää, joka kasvattaa ohjuksen navigaatiovirhettä lennon edetessä. Maalitieto voidaan välittää ohjukselle datalinkin kautta. Loppuhakeutusvaiheeseen voidaan siirtyä, kun ohjus on riittävän lähellä maalia nähdäkseen sen omalla sensorillaan. Tämä hetki voi olla jo laukaisuhetkellä määritetty, ohjus voi itse päättää sen tai käsky loppuhakeutusvaiheeseen siirtymisestä voidaan antaa datalinkin välityksellä. Tällöin ohjus pyrkii löytämään maalin omalla sensorillaan, lukittumaan siihen ja suorittaa tarvittaessa voimakasta liikehdintää torjuakseen maalin. Aktiivisen tutkaohjuksen siirtyessä loppuhakeutusvaiheeseen ohjus kytkee tutkansa päälle ja etsii maaliaan sen oletetun sijainnin ympäristöstä.

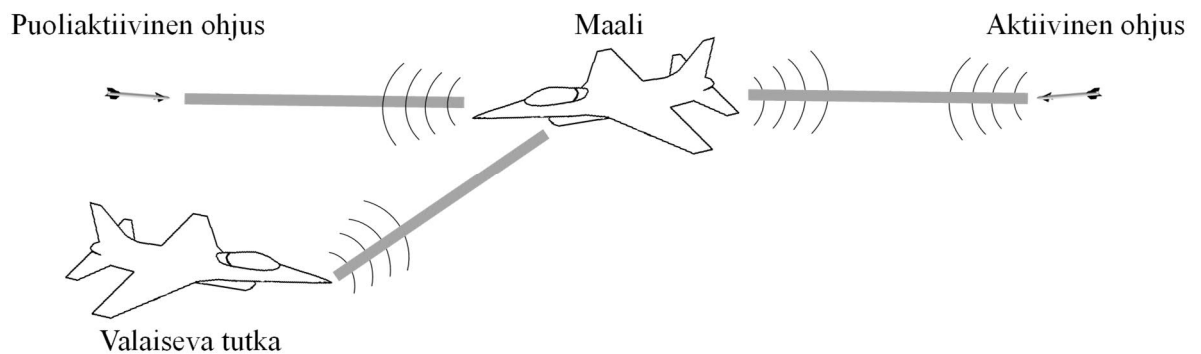
Käytännössä ohjauslait ja ohjuksen kuormitusmonikertakyky, eli sen liikehtimiskyky, määrittävät ohjuksen lentoradan muodon. Kuormitusmonikertakyvyllä tarkoitetaan ohjuksen kykyä tuottaa kiihtyvyyttä liikehtimistä varten. Pääosassa ilmataisteluohjuksista liikehtimiskyky perustuu ohjuksen aerodynamiikkaan eli ohjuksen lentorangan tuottamaan maksiminostovoimaan, mutta liikehtimiskykyä voidaan parantaa työntövoiman suuntaamisella. Kuormitusmonikerta n_z on ohjuksen pysty akselin (z -akseli, määritelty kappaleessa 3.2) suuntainen normaalkiikityvyys suhteessa gravitaatiovakioon G (noin 9.81 m/s^2). Yhden G :n kuormitusmonikerta tarkoittaa siis ohjuksen vaakalentoa ja $10G$ noin 98 m/s^2 kiihtyvyyttä. Ohjuksen liikehtimiskyvyn tulee olla maalin liikehtimiskykyä parempi, jotta se voi päätyä riittävän lähelle liikehtivää maalia tuhotakseen sen. Ohjukselta vaadittavaan liikehtimiskykyyn vaikuttaa merkittävästi myös ohjuksen lentoaika, laukaisun alkutilanne ja geometria. Lyhyempi lentoaika aiheuttaa suuremman liikehtimiskykyvaatimuksen. [53] Ohjuksen liikehtimiskyvyn tulisi olla noin 4–5 kertaa parempi kuin maalin, jotta liikehtivään maaliin osuminen on riittävän todennäköistä myös lyhyillä lentoajoilla. Esimerkiksi mikäli hävittäjämaali kykenee liikehtimään enintään $9G$ kuormitusmonikerralla, tulisi ohjuksen pystyä liikehtimään noin $40G$ kuormitusmonikerralla. [8]

2.3. Ilmataisteluohjusten sensorit ja ohjustyyppit

Ilmataisteluohjusten kehitys keski- ja pitkän kantaman ohjusten osalta on kulkenut puoliaktiivisista tutkaohjuksista nykyään lähes täysin käytettäviin aktiivisiin tutkaohjuksiin. Tutkaohjusten rinnalla on koko ajan käytetty passiivisia infrapunasensoriin perustuvia lyhyen kantaman ilmataisteluohjuksia. Tarve ulkoisen maalitiedon käytölle voidaan perustella myös tarkastelemalla erilaisilla sensoreilla varustettujen ohjusten toimintaa. Tässä kappaleessa esitettävien toteutuneiden P_K arvojen perusteella voidaan arvioida, miten ilmasodankäynnissä tulisi pyrkiä käyttämään ilmataisteluohjuksia.

Ilmataisteluohjuksen koko rajoittaa merkittävästi niissä käytettävien eri sensorien määrää sekä suorituskykyä. Suorituskykyrajoitukset aiheutuvat sensorien koosta tai käytettävissä olevasta sähkötehosta. Toistaiseksi kehitetyissä ilmataisteluohjuksissa ei ole käytetty useampaa erityyppistä sensoria. [35] Ohjuksen omien sensorien hävittäjäkokoluokan maalin havaintoetäisyydet ovat karkeasti luokkaa 5–10 km infrapunaohjukselle [35] ja 10–20 km aktiiviselle tutkaohjukselle [39]. Toisaalta hävittäjään sijoitetun infrapunasensorin (IRSTS, Infra-Red Search and Track System) havaintoetäisyys on luokkaa 50 km ja nykyaikaisen hävittäjäjutkan yli 100 km samantyyppiselle maalille [39].

Ilmataisteluohjusten sensorit voidaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin sen mukaan perustuuko toiminta sen itse lähettämään säteilyyn, maalin lähettämään säteilyyn tai muusta lähteestä peräisin olevan säteilyn heijastumiseen maalista [8], [49]. Aktiivinen sensori on tyypillisesti lähettävä ja vastaanottava tutka, eli yksipaikkatutka. Passiivinen sensori on tyypillisesti maalin lämpösäteilyn havaitseva infrapunasensori. [35] Maalista heijastuvan tutkasäteilyn havaitsevaa kaksipaikkatutkan vastaanotinta kutsutaan myös puoliaktiiviseksi tutkasensoriksi, vaikka edellä kuvatun mukaisesti ohjuksessa on itseasiassa passiivinen sensori. Kuvassa 4 on esitetty yksi- ja kaksipaikkatutkan toimintaperiaate ilmataisteluohjuksen kannalta.



Kuva 4: Yksi- ja kaksipaikkatutkien toimintaperiaate ohjuksen kannalta.

2.3.1. Puoliaktiivinen tutkasensori

Kuvan 4 vasemmalla puolella maaliin hakeutuva puoliaktiivinen ohjus perustuu kaksipaikkatutkaan, jolloin toinen tutka (ampuva lavetti tai kolmas osapuoli) valaisee maalin ja ohjuksen tutka vastaanottaa maalista heijastuneen tutkasäteilyn. Tällöin ohjuksessa ei tarvitse olla lähettävää tutkaa, mutta toisaalta toimintatapa sitoo toisen tutkan maalin valaisuun altistaen sen havaitsemiselle. Ilmasta laukaistun puoliaktiivisen ohjuksen maalin valaisee tyypillisesti ampuva lavetti. Puoliaktiivisiä ilmataisteluohjuksia pystyy yleisesti laukaisemaan vain yhden kerrallaan, joten yhdellä koneella taisteleminen kahta vastustajaa vastaan oli erittäin riskialtista. [8]

Tämän tyyppisten ohjusten käytön aikana ilmataistelun lopputulos riippuikin lähes täysin siitä, kumpi osapuoli pystyi ensimmäisenä laukaisemaan ohjuksensa [41]. Ilmataistelussa menestyminen vaati aina ylivoiman, eikä tilanne ei ollut länsivalloille hyväksyttävä hävittäjäylivoimaista Neuvostoliittoa vastaan [70]. Puoliaktiivisen ohjuksen etuina ovat suuren lähetyshon valaisututka (lentokoneessa) pienen ohjukseen sijoitetun tutkan sijaan, ohjuksen paikan salaaminen sen lennon aikana (ohjuksen passiivisuus) sekä osittainen maalin häiveteknologian vaikutusten vähentäminen tutkasäteilyn lähetyssuunnan avulla. Tyypillisesti puoliaktiivinen ilmataisteluohjus hakeutuu koko lentonsa ajan maalista heijastuneeseen tutkasäteilyyn, eikä se siksi tarvitse lennon aikana datalinkillä päivitettävää maalitietoa. [8]

Yhdysvaltalaisen puoliaktiivisen AIM-7 Sparrow -ilmataisteluohjuksen suunniteltu P_K arvo oli 0.7, mutta Vietnamin sodassa toteutunut P_K arvo oli kuitenkin vain 0.08. [39] Maalin valaisun keskeyttäminen vastustajan asevaikutuksen tai sen riskin takia on ollut todennäköisesti suurin syy heikolle toteutuneelle P_K arvolle.

2.3.2. Aktiivinen tutkasensori

Puoliaktiivisin ilmataisteluohjuksin käytävään ilmataisteluun liittyvien riskien vuoksi Yhdysvalloissa aloitettiin 70-luvulla aktiivisen ilmataisteluohjuksen kehitys. Ohjuksesta piti tulla ammu ja unohda -tyyppinen mahdollistaen hyökkäämisen samanaikaisesti useaa maalia kohtaan. [41] Kuvan 4 oikealla puolella maaliin hakeutuu yksipaikkatutkaan perustuva aktiivinen ilmataisteluohjus. Tämän ohjuksen oma tutka valaisee maalin ja vastaanottaa maalista heijastuneen säteilyn, eikä toimintaan sidota toista havaitsemiselle altistuvaa tutkaa. Ilmataisteluohjuksen koko ja käytävissä oleva sähköteho rajoittavat kuitenkin merkittävästi ohjukseen sijoitetun yksipaikkatutkan suorituskykyä [41]. Aktiivinen ohjus hakeutuu laukaisun yhteydessä määriteltä ennakkopistettä kohti. Ohjus siirtyy loppuhakeutumisvaiheeseen käynnistämisen oman tutkansa, pyrkii löytämään maalin ja lukittumaan siihen. Loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen päätös tehdään kappaleessa 2.2 esitetyn mukaisesti. Tyypilliset etäisyydet loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymiseen ovat kappaleessa 2.3 esitetyn ohjustutkan suorituskyvyn mukaisia riippuen merkittävästi ammuntaskenaariosta. Maalin liikehdintä ohjuksen laukaisun jälkeen saattaa viedä maalin ohjuksen tutkan hakualueen ulkopuolelle tai ennakkopisteen määrittämisen jälkeen ohjuksen tutkan hakualueelle on voinut tulla toinen maali. Näiden syiden vuoksi maalin paikkaa tulee päivittää ohjuksen lennon keskivaiheen aikana. Aktiivinen ilmataisteluohjus tarvitsee siis datalinkillä välitettyä ajantasaista maalitietoa ohjautumisen ja maalin tuhoamisen todennäköisyyksien parantamiseksi. [69]

Amraam-ilmataisteluohjuksen (Advanced Medium Range Air-to-Air Missile) vaatimuksena ollut pieni koko asetti huomattavia haasteita ohjuksen tutkan kehitystyölle ja tästä tulikin merkittävin Amraam-kehittämisohjelman viivästymisen syy. Riittävän lähetystehon tuottaminen osoittautui erittäin hankalaksi käytössä olleella teknologian tasolla. [41] Kuten edellä esitettiin, kykenee hävittäjäjutka havaitsemaan maalin jopa yli 10 kertaa suuremmalta etäisyydeltä kuin Amraam-kokoluokan ohjukseen sijoitettu tutka. Tämän vuoksi Amraam-ilmataisteluohjukseen oli kehitettävä kyky vastaanottaa maalitietoa ohjuksen ampuneelta laveltalta [41]. Amraam-ohjus voidaan laukaista käyttäen lennon keskivaiheessa ulkoista maalitietoa (Command Inertial Active -tila) tai täysin ilman ulkoista maalitietoa (Inertial Active -tila). [6], [69] Ohjaamalla ohjuksen keskivaiheen lentoa datalinkkipäivityksin voitiin varmistua, että ohjus pystyi itse löytämään maalinsa päästyään oman tutkansa kantaman päähän siitä.

Vuoteen 2008 mennessä aktiivisen AIM-120 Amraam -ilmataisteluohjuksen toteutunut P_K arvo on ollut 0.59. Tähän todennäköisyyteen mukaan lasketuissa ammunnoissa on kuitenkin huomioitava, ettei yksikään maali käyttänyt elektronisen sodankäynnin menetelmiä ohjuksen laukaisijaa tai itse ohjusta vastaan, eikä edes tiennyt olevansa ohjusammunnan kohteena. [39] Amraam-ohjuksella suoritetuista torjunnoista ei ole saatavilla julkista tietoa siitä, onko niissä käytetty ulkoista maalitietoa tai miten se on vaikuttanut torjuntaan. Näin ollen ulkoisen maalitiedon käytön vaikutusta Amraam-ohjuksen ilmataisteluissa toteutuneeseen suorituskäyttöön ei voida tässä yhteydessä arvioida.

2.3.3. Passiivinen infrapunasensori

Infrapunahakupäällä varustettu passiivinen ohjus hakeutuu maalin lähettämään lämpösäteilyyn. Tällaiset ilmataisteluohjukset ovat infrapunasensorin rajoituksista johtuen tyypillisesti lyhyen kantaman ohjuksia. Näistä vanhimmat vaativat huomattavan voimakkaan lämpöjäljen kuten maalin moottorin lämmön takasektorista. [8], [35] Myöhemmät erityisesti kuvantavilla hakupäillä varustetut ohjukset pystyivät hakeutumaan myös aerodynaamisen lämpenemisen aiheuttamaan lämpöjälkeen kaikista maalin suunnista. [39]

Infrapunaohjuksia käytetään hävittäjälentokoneiden näköetäisyydellä tapahtuvassa ilmataistelussa. Infrapunaohjus voidaan laukaista myös suuremmalle etäisyydelle, mikäli maalitieto ennen hakupään lukittumista voidaan toimittaa ohjukselle esimerkiksi datalinkin välityksellä. [8], [35] Näköetäisyydellä käytävässä ilmataistelussa merkitseväksi tekijäksi muodostuva liikehtimiskyky on taisteluun osallistuvilla lentokoneilla tyypillisesti samaa luokkaa. [39] Maalin saaminen ohjuksen hakupään näkösektoriin ja hakupään lukitseminen maaliin saattaa vaatia pitkää liikehtimistä. Ohjuksen maali voidaan osoittaa sille esimerkiksi kypärätähtäimen tai datalinkin avulla hakupään näkösektorin (gimbal limit) ulkopuolelle. Näin voidaan käyttää hyödyksi ohjuksen lentokonetta parempaa liikehtimiskykyä hakupään lukittumiseksi maaliin.

Vanhimpien maalin takasektorista laukaistaviksi tarkoitettujen AIM-9 Sidewinder infrapunaohjuksilla varustettujen ilmataisteluohjusten koeammunnoissa P_K arvoksi tuli 0.65. Näiden ohjusten Vietnamin sodassa toteutunut P_K arvo oli kuitenkin koeammuntojen arvoa merkittävästi heikompi 0.15. Falklandin sodassa kehittyneempi kaikista sektoreista laukaistava AIM-9L -ilmataisteluohjus saavutti P_K arvon 0.73. Tämän jälkeen Sidewinder-ohjusta kehitettiin edelleen väistämään omasuojajeitteinä käytettäviä soihtuja. Soihtujen käytön yleistyessä ne havaittiin kuitenkin odotettua tehokkaammiksi infrapunaohjusten väistämisessä. Desert Storm -operaatiossa 1990-luvun alussa käytössä olleen AIM-9M -mallin P_K putosi arvoon 0.23. [39] Datalinkillä tuettavien nykyaikaisten infrapunaohjuksien P_K arvoista ei ole julkaistua tietoa, minkä vuoksi ei ole varmuutta siitä, miten ulkoisen maalitiedon käyttö on käytännössä vaikuttanut infrapunaohjusten suorituskykyyn.

2.3.4. Ohjustyypit

Ilmataisteluohjukset voidaan jakaa sensorityyppien mukaisten aktiivisten ja passiivisten ohjusten lisäksi LOBL- ja LOAL-tyyppisiin. Vanhemmat infrapunaohjukset ja tutkahakeutuvat ilmataisteluohjukset vaativat ohjuksen oman hakupään lukituksen maaliin ennen niiden laukaisua. Tällaisia ohjuksia kutsutaan LOBL-tyyppisiksi (Lock-On Before Launch). Nykyaikainen tutkahakeutuva ilmataisteluohjus laukaistaan tyypillisesti ilman itse ohjuksen lukitusta maaliin. Ohjus on tällöin LOAL-tyyppinen (Lock-On After Launch). Myös viimeisimmät infrapunaohjukset, kuten AIM-9X Sidewinder Block II, voidaan laukaista ilman lukitusta maaliin [7]. Vaatimus LOAL-toiminnallisuudesta johtuu tyypillisesti siitä, ettei ohjuksen oma sensori pysty vielä laukaisuhetkellä havaitsemaan maalia esimerkiksi suuren etäisyyden tai hakupään näkösektorirajoitusten vuoksi.

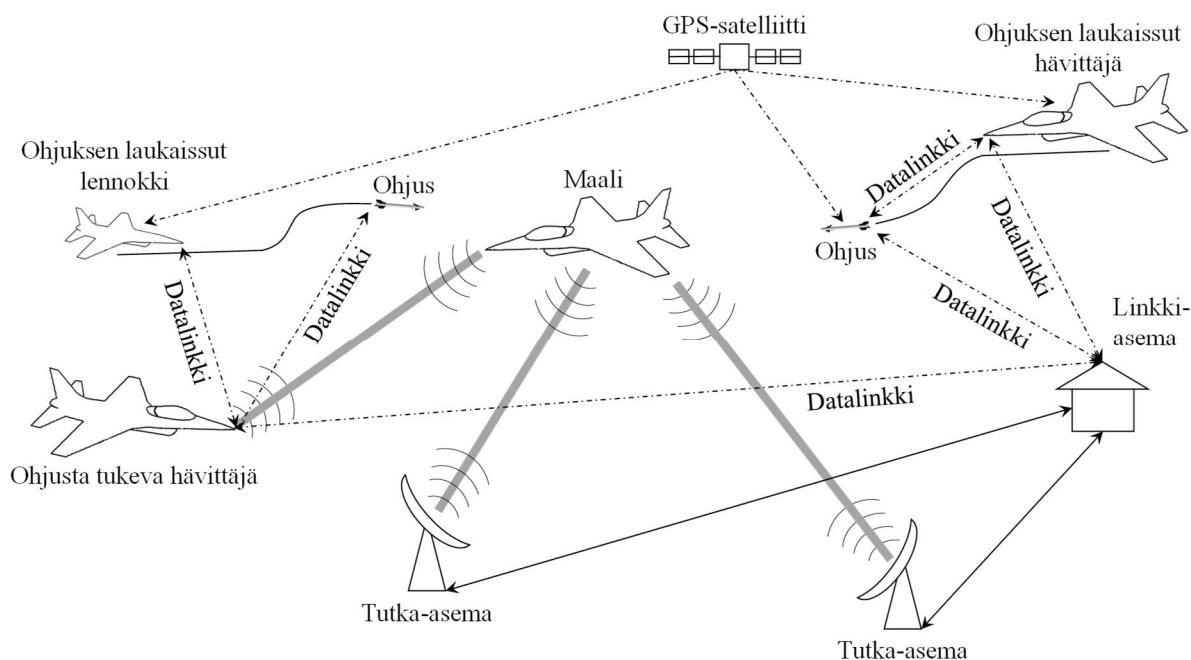
LOBL-tyyppisen ohjuksen voidaan ajatella siirtyvään kiihdytysvaiheesta suoraan loppuhakeutumisvaiheeseen ohjuksen oman sensorin ohjatessa sen hakeutumista. LOAL-tyyppiselle ohjukselle on sen parhaan suorituskyvyn takaamiseksi kerrottava maalin paikkaa sen lennon keskivaiheen aikana, kunnes ohjuksen oma sensori pystyy lukittumaan maaliin. LOAL-kyky vaatii ohjukselta oman paikannuskyvyn, jotta se kykenee hakeutumaan kohti annettua pistettä.

LOAL-kyky on vaadittava ilmataisteluohjuksen ominaisuus, mikäli ohjusta on tarkoitus kantaa lentokoneen sisäisesti esimerkiksi pyrittäessä parantamaan ampuvan lavetin häiveominaisuuksia. Näin tehdäänkin viidennen sukupolven häivehävittäjissä kuten F-22 Raptor tai F-35 Lightning II [39]. Laukaistaessa ohjus koneen sisäisestä ripustus pisteestä on sen oman sensorin mahdollisuus havaita maali hyvin rajoittunut.

2.4. Datalinkit

Datalinkitiedon välittämisellä ohjukselle mahdollistetaan esimerkiksi sen lennon aikaisen maalitiedon kertominen, maalin vaihto tai torjunnan peruminen. Maalitieto voi olla maalin nopeus- ja paikkatietoa tai muita sen ominaisuuksia. Lisäksi ohjukselle voidaan kertoa esimerkiksi lennon loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen ajankohta. Puoliaktiivisen ohjuksen tapauksessa ohjukselle voidaan välittää maalin valaisusignaalin referenssitajuus. [8] Tietoa ohjukselle voi antaa sen ampunut lavetti tai kolmas osapuoli maasta, ilmasta tai avaruudesta. Kolmansien osapuolien tieto voidaan lähettää joko suoraan ohjukselle tai välittää sen ampuneen lavetin kautta. [61] Näistä ensimmäinen tapa on käytössä vain uusimmissa verkottuneissa ilmataisteluohjuksissa kuten MBDA Meteor [29]. Vanhempien ohjusten osalta tieto välitetään ensin ampuneelle lavetille jonkin taktisen tiedonsiirtomenetelmän, kuten esimerkiksi Link16-järjestelmän, kautta ja edelleen ohjukselle, johon sen ampuneella lavetilla on olemassa oleva datalinkkiyhteys. [61]

Datalinkillä välitettävän maalitiedon avulla ohjus voidaan ampua sen omien sensorien näköalueen ulkopuolelle. Näköaluetta rajoittavat etäisyys, hakupään suurin kääntymiskulma (gimbal limit) ja mahdolliset näköalueen esteet, kuten ampuvan lentokoneen rakenteet. Infrapunahakupäällä varustettu AIM-9X Sidewinder Block II -ohjus [7] voidaan laukaista ilman maalilukitusta sen infrapunahakupään näkökyvyn ulkopuolelle antamalla maalitietoa datalinkillä. Kolmannelta osapuolelta peräisin oleva maalitieto on tarpeen, mikäli ohjuksen kantama ylittää ampuvan lavetin sensorien kantaman. Tällainen tilanne voi tulla eteen esimerkiksi ilmaa hengittäville moottoreilla varustetuilla ilmataisteluohjuksilla, kuten MBDA Meteor [29], joiden kantama voi olla huomattavasti raketimoottoreilla varustettuja ohjuksia pidempi. Kuvassa 5 on esitetty nykyaikaisen verkottuneen ilmataistelun toimintatapoja, jotka vaativat maalitiedon välittämistä ohjukselle sen lennon aikana.



Kuva 5: Verkottunut ilmataistelu.

Kuvan 5 vasemmalla puolella maalia vastaan hyökkää hävittäjä-lennokki-pari, kuten esimerkiksi Sukhoi SU-57 (Felon) ja Sukhoi S-70 Okhotnik-B (Hunter-B) [23]. Hävittäjä havaitsee maalin tutkallaan ja komentaa datalinkin kautta passiivisena toimivan lennokkiparinsa laukaamaan ohjuksen maalia vastaan. Ohjus lentää lentonsa keskivaiheen inertiasuunnistusjärjestelmän mukaan datalinkin kautta toimitettavan maalitiedon tukemana. Hävittäjän ohjukselle toimittama maalitieto on muodostettu sen eri sensoreiden havaintojen perusteella. Näin toimimalla hävittäjä voi pysyä kauempana vihollisen asevaikutuksesta ja lennokin avulla saadaan lisää ohjuksia ilmataisteluun. Passiivisesti toimiva lennokka voidaan viedä lähemmäksi vastustajaa laukaamaan ohjuksia.

Kuvan 5 oikealla puolella hävittäjä laukaisee ohjuksen maa-aseman sille osoittamaan maaliin. Maalitieto on saatu kahden tutka-aseman ristikkäismittauksella, joka edelleen parantaa maalitiedon tarkkuutta. Maalitieto välitetään sekä hävittäjälle että ohjukselle datalinkin avulla. Ohjus lentää lennon keskivaiheen sille datalinkin kautta toimitettavien tutka-asemien havaintojen tukemana GPS- ja inertiasuunnistusjärjestelmänsä avulla. Hävittäjä pyrkii passiivisella toiminnallaan välttämään paljastumistaan vastustajalle. Myös hävittäjä voisi välittää maa-aseman maalitiedon ohjukselle, mutta toimimalla edellä kuvatulla tavalla voi hävittäjä poistua amunnasta muihin tehtäviin.

Kuvan 5 toimintatapoja voidaan myös laajentaa merkittävästi. Maalin voi osoittaa toinen hävittäjä, ilma- tai maasijoitteinen tutka tai lennokki. Lisäksi kaikkien edellä mainittujen toimijoiden havainnot voidaan yhdistää kattavaksi ja tarkaksi ilmatilannekuvaksi. Useiden sensoreiden mittauksella voidaan parantaa myös yksittäisen maalin paikan tarkkuutta. Verkottunut ilmataistelu tarjoaa laajan kirjon eri toimintatapoja, jotka kaikki vaativat luotettavat datalinkkiyhteydet. Vastustajan häivehävittäjien havaintoetäisyyttä voidaan kasvattaa eri taajuusalueilla toimivilla tutkajärjestelmillä, joista osa saatetaan kokonsa puolesta joutua sijoittamaan maahan.

Elektroninen sodankäynti muuttaa verkottuneen ilmapuolustusjärjestelmän toimintaympäristöä yhä haasteellisemmaksi. Vastustajan elektronisen sodankäynnin järjestelmät pystyvät havaitsemaan ohjuksen laukaisun tunnistamalla tutkan maalinvalaisun tai ohjukselle osoitetun datalinkkisygnalin. Toisaalta mitä myöhemmin ohjus voi kytkeä oman tutkansa päälle, sitä myöhempään maali voi saada tiedon sitä vastaan hyökkäävästä ohjuksesta sen tutkasignaalin perusteella. Tämä tutkasignaali antaa vähintään tarkan tiedon ohjuksen suunnasta maaliin nähden, kun taas muualta tuleva datalinkkisygnali ei. Verkottuneessa järjestelmässä usean sensorin tietojen (ristiinmittauksen) avulla voidaan ratkaista myös ohjuksen paikka sen (tutkastaan) lähettämien signaalien perusteella. Vastustaja saattaa myös pyrkiä käyttämään hyväksi ohjukselle lähetettävän datalinkkisygnalin tietoja ja siksi datalinkkiviestien tulee olla salattuja. Verkottuneessa järjestelmässä salausavain tulee olla kaikkien verkon jäsenten tiedossa. Elektronisen sodankäynnin järjestelmillä pyritään vaikuttamaan ohjuksen ohjautumisen todennäköisyyteen monilla eri tavoilla. Lennon keskivaiheessa voidaan esimerkiksi:

1. Pyrkiä häiritsemään ohjusta tukevia sensoreita aiheuttaen virhettä ohjukselle annettavaan maalitietoon
2. Pyrkiä estämään maalitiedon välitys datalinkilla
3. Pyrkiä korruptoimaan datalinkin maalitietoa.

Loppuhakeutusvaiheessa voidaan puolestaan pyrkiä häiritsemään tai estämään ohjuksen oman sensorin toimintaa. Näiden vaikutusten aikaansaamiseksi käytetään häirintälähtettäviä ja silppu- tai soihtuheitteitä.

Datalinkillä välitettävät maalin nopeus- ja paikkatiedot annetaan tyypillisesti tasaisen maan ortogonaalisessa koordinaatistossa, jonka origona on ohjuksen laukaisupiste. Kaikki ohjuksen ammuntaan osallistuvat välittävät maalitiedot samassa koordinaatistossa. Näin toimimalla kaikilla ammuntaan ja ohjuksen tukemiseen osallistuvilla on käytössä samat tiedot ammunnan geometriasta. [8] Amraam-ohjukselle maalitietoa lähetetään 0.5–1 s välein [69].

Ohjukselle on datalinkkimaalitiedon yhteydessä kerrottava välitetyn nopeus- ja paikkatiedon hyvyys, koska erilaiset sensorit tuottavat eri hetkillä eri tasoista tietoa maalin suunnasta, paikasta ja nopeudesta. Esimerkiksi yksittäinen optinen sensori pystyy tuottamaan erittäin tarkan suunnan maaliin, mutta sen mittaustarkkuus etäisyyden osalta on huono. Tutka pystyy sen sijaan tuottamaan myös tarkan etäisyyden. [35] Toisaalta tutkan tulee pystyä tunnistamaan heikentyneet mittaolosuhteet, kuten esimerkiksi maavälke, silputus tai elektronisen häirinnän vaikutukset. [12] Maalitiedon hyvyys vaihtelee ohjuksen lennon aikana esimerkiksi maalin liikehinnästä, etäisyydestä, ympäristöstä sekä maalitiedon tuottamiseen osallistuvien sensorien tyypeistä, määrästä ja ominaisuuksista riippuen. Ohjukselle kerrottavan maalitiedon hyvyttä pitää siksi muuttaa tilanteen mukaan lähetettäessä ohjukselle uusia tietoja.

Ohjuksen vastaanottaman maalitiedon hyvyyden perusteella on sen loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä arvioitava oman sensorinsa etsintävolyymi, eli datalinkillä välitetyn maalin paikan ympärillä oleva kolmiulotteinen alue, josta maalin pitäisi löytyä. Ohjukselle voidaan kertoa datalinkillä tämän etsintävolyymien koko. Volyymien koko riippuu datalinkkitiedon hyvydestä ja se saattaa muuttua ohjuksen lennon aikana. Volyymien osalta tulee huomioida myös sensorin tai sensoriyhdistelmän mittauksen tarkkuus eri suunnissa. Volyymien koko tulee siksi voida valita toisistaan riippumattomasti etäisyyden ja kulman (sivuttais- tai pystysuunnan) osalta.

Esimerkiksi Amraam-ohjukselle välitetään datalinkillä tieto paikan epävarmuudesta (mittaus-tarkkuus) eli niin kutsuttu epävarmuuslaatikko (uncertainty box) maalin paikkatiedon ympärillä. Loppuhakeutumisvaiheeseen siirtyessään Amraam-ohjus etsii maalia tämän epävarmuuslaatikon sisältä. Mikäli maalia ei löydy epävarmuuslaatikon sisältä, terminoi ohjus lentonsa eikä enää hakeudu maaliin. Maalitiedon saatavuus ja sen hyvyys vaikuttavat siis merkittävästi ohjuksen suorituskykyyn. Esimerkiksi Ilmavoimilla käytössä olevan AIM-120B/C Amraam -ilmataisteluohjuksen ohjautumisen todennäköisyys perustuu ohjukselle sen lennon aikana välitettävään tietoon. [6], [69] Ohjuksen lentoajan ollessa 30 sekuntia voi myös aliääninopeudella liikkuva maali päätyä yli 10 km päähän laukaisuhetken ennakkopisteestä.

Datalinkillä välitettävän tiedon hyvyys on erityisen tärkeää pyrittäessä vaikuttamaan tiettyyn tiiviissä vihollisryhmässä, eli lautassa, sijaitsevaan maaliin tai jaettaessa lautassa sijaitsevia maaleja useille hyökkääjille ja ohjuksille [69]. Lautassa viholliskoneiden väliset etäisyydet voivat olla suuren epävarmuuslaatikon kokoa pienempiä. Ohjukselle on pystyttävä kertomaan tarkasti sen maalin sijainti, jottei ohjus harhaudu väärään maaliin. Mikäli ohjuksen etsintäalueelta löytyy kaksi tai useampi maalia, joutuu ohjus tekemään maalinvalintapäätöksen. Lauttaa vastaan hyökätessä ohjuksen hakupää saattaa myös hypätä maalista toiseen, mikä aiheuttaa epäjatkuvuuden maalin paikkatiedossa ja saattaa johtaa suurempaan ohitusetäisyyteen.

Ohjusten datalinkkiantennit sijaitsevat yleensä niiden takapäissä ja niiden antennikuvio on datalinkkisignaalin vastaanoton kannalta taaksepäin optimoitu. [8] Tämä rajoittaa tiedonvälitystä kolmansilta osapuolilta. Tyypillisesti ampuva lavetti välittää tiedon ohjukselle, jolloin signaali tulee ohjuksen takasuunnasta. Mikäli datalinkkisignaali tulee kolmannelta osapuolelta, jonka sijainti voi olla lähes missä vain suhteessa ohjukseen, ei taaksepäin optimoitu antennikuvio välttämättä mahdollista datalinkkiviestien vastaanottamista. Ohjus ei tällöin välttämättä pysty vastaanottamaan kaikkia viestejä, mikä puolestaan saattaa heikentää ohjuksen P_G arvoa. Toisaalta datalinkkituki saatetaan joutua lopettamaan ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä [31]. Tällaisessa tilanteessa nykyaikaiset ilmataisteluohjukset arvioivat maalin tulevaa tilaa sen liikehdintähistorian huomioivilla menetelmillä kuten esimerkiksi Kalman-suotimella [53]. Datalinkkiviestien jäädessä vastaanottamatta ja niiden loputtua viimeisillä vastaanotetuilla viesteillä on suuri merkitys maalin tulevan tilan, eli paikan arvioinnissa. Datalinkkiyhteyden katkeaminen ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä ja virheitä sisältävät viimeisinä vastaanotetut maalitietoviestit saattavat heikentää ohjuksen ohjautumisen todennäköisyyttä merkittävästi. [6]

Ohjuksen (hakeutumisen) ohjauslakien toteutuksesta riippuen ohjus saattaa joutua lopettamaan datalinkkiliikenteen kuuntelemisen (ja tiedon käyttämisen) riittävän monen viestin jäädessä kuulematta, koska tällöin maalin tulevaa paikkaa ei voida enää ennustaa luotettavasti [53]. Kaksisuuntaista datalinkkiyhteyttä käytettäessä ohjus voi kuitata sille lähetettyjen datalinkkiviestien vastaanoton. Kaksisuuntaisen datalinkkiyhteyden käyttäminen voi tosin paljastaa vastustajalle vähintään ohjuksen suunnan maaliin nähden tai myös paikan, mikäli vastustajalla on käytössä useita datalinkkisignaalin havaitsevia sensoreita.

Amraam-ilmataisteluoohjus päättää itse loppuhakeutumiseen siirtymisestä datalinkillä sille välitetyn maalitiedon perusteella ja ampuva lavetti joutuu ilman ohjukselta saatavaa tietoa arvioimaan tämän hetken. [6] Tämän vuoksi maalitiedon antamista datalinkillä ohjukselle joudutaan joissain tilanteissa jatkamaan tarpeettoman pitkään. Kaksisuuntaisella datalinkillä varustettu ohjus voi kertoa ampuvalle lavetille tai muille verkon jäsenille datalinkkimaalitiedon tarpeen päättymisestä. Näin datalinkkimaalitietoa antava toimija voidaan vapauttaa muihin tehtäviin. Lisäksi kaksisuuntaisen datalinkin avulla ohjus voi lähettää oman sensorinsa maalitietoa.

Datalinkkimaalitietoon perustuva lennon keskivaiheen hakeutuminen mahdollistaa erittäin pitkät torjuntaetäisyydet ja useisiin lähteisiin perustuvan tarkan maalitiedon käyttämisen. Datalinkkitiedon varaan toteutetun lennon keskivaiheen hakeutumisen suurimpina haasteina ovat ohjuksen oman inertiatason ryöminän aiheuttama virhe omassa paikassa, datalinkkitiedon vastaanoton varmistaminen ja datalinkkimaalitiedon hyvyys. Näiden syiden vuoksi uusimpiin ohjuksiin on lisätty GPS-vastaanotin ja kaksisuuntainen datalinkkiyhteys. Lisäksi datalinkkijärjestelmien viivettä pyritään minimoimaan. [8]

Hävittäjälentokoneiden lennoilla voidaan tallentaa ohjukselle datalinkillä välitettäviä viestejä ja verrata niiden sisältämää tietoa maalin todelliseen tilaan. Lennoilla voidaan suorittaa lentokoneen tehtävätiетokoneen simuloimia ohjusammuntoja, joissa lentokoneen järjestelmät käyttäytyvät lähes oikean ohjusammunnan tavoin, mutta ohjusta ei laukaista. Vastaavat tiedot saadaan tallennettua myös tilanteessa, jossa ohjus todella laukaistaan. [6], [69] Mikäli tarkoituksena on myös varmistaa datalinkkiviestien vastaanotto yksisuuntaista datalinkkiä käyttävän ohjuksen osalta, on koe suoritettava ampumalla telemetriaohjus. Tämä vaatii satojen neliökilometrien vaara-alueen sekä ohjuksen lentorataa hieman suuremman alueen kattavan telemetriajärjestelmän. Edellä mainituista järjestelyistä aiheutuu merkittäviä kustannuksia. [6], [8], [69]

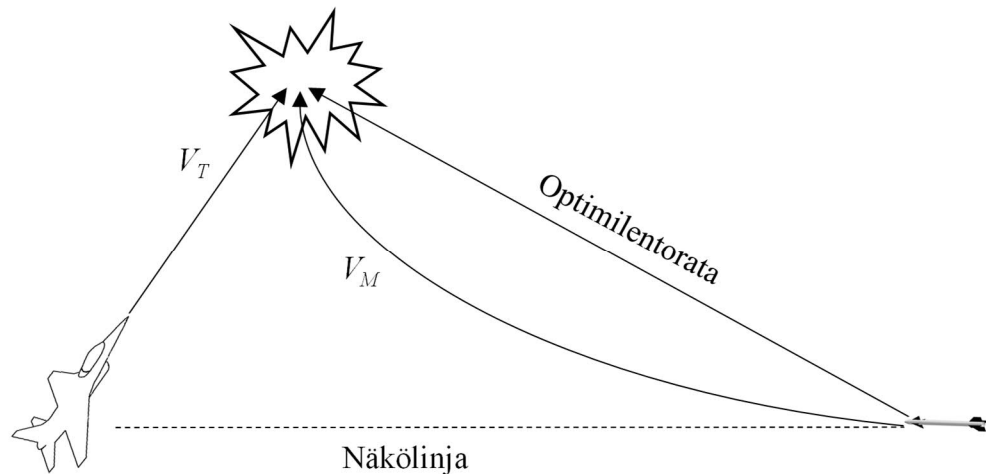
2.5. Ohjauslait ja maaliin hakeutuminen

Tässä kappaleessa kuvataan ilmataisteluohjusten maaliin hakeutumiseen ja siten lentorataan merkittävästi vaikuttavat ohjauslait. Tämä vaikutus näkyy ohjuksen lentoradassa koko ohjuksen lennon ajan. Ohjuksen liikehtimiskyky puolestaan korostuu lähinnä loppuhakeutumisvaiheessa liikehtivää maalia vastaan. [53] Tämän vuoksi ohjauslakien toiminnan ymmärtäminen on välttämätöntä ohjussimulaatioiden tuloksia analysoitaessa ja on tarpeen vastattaessa viimeiseen alatutkimuskysymykseen ja päätutkimuskysymykseen. Ohjusten ohjauslakeja voidaan jakaa tiettyihin perustoimintalogiikoihin, joita ovat suora takaa-ajo (pure pursuit), seurantalinjaohjaus (command line-of-sight / beam rider) ja suhteellinen navigointi (proportional navigation) [8], [44], [49], [51], [53]. Nykyaikaiset ilmataisteluohjukset käyttävät ohjauslakinaan pääsääntöisesti suhteellista navigointia tai sen laajennuksia, kuten myös tässä tutkimustyössä tarkasteltava ilmataisteluohjus. Myös Ilmavoimilla käytössä oleva Amraam-ilmataisteluohjus käyttää ohjauslakinaan suhteellista navigointia [69]. Siksi tässä kappaleessa keskitytään juuri suhteellisen navigoinnin ja sen laajennuksien esittelyyn [53]. Suhteellisen navigoinnin ohjauslain ymmärtämiseksi ja sen hyvyyden perustelemiseksi on kuitenkin esiteltävä lyhyesti sitä yksinkertaisemmat ohjauslait.

Ohjauslakien on otettava huomioon ohjuksen aerodynaamiset ja rakenteelliset rajoitukset. [8] Näistä merkittävimpiä ovat suurin mahdollinen kohtauskulma ja suurin mahdollinen kuormitusmonikerta n_z . Suurissa lentokorkeuksissa ilman tiheyden ollessa pieni ohjuksen suurin mahdollinen kohtauskulma rajoittaa sen nostovoimaa ja sitä kautta suurinta saavutettavaa kuormitusmonikertaa. Matalissa lentokorkeuksissa sen sijaan kuormitusmonikertaa rajoittavana tekijänä on ohjuksen rakenteen kestävyys. Myös ohjuksen moottorin työntövoima rajoittaa suurinta saavutettavaa kuormitusmonikertaa. Suurilla torjuntaetäisyyksillä moottori ei välttämättä enää tuota työntövoimaa loppuhakeutumisvaiheen liikehdinnässä. [53] Rakettimoottorin toimiessa ohjuksen massa pienenee jopa kolmanneksen ja tällöin myös ohjuksen liikehtimisominaisuudet muuttuvat.

2.5.1. Suora takaa-ajo

Suora takaa-ajo, joka on esitetty esimerkiksi lähteessä [51], on yksinkertaisin ohjuksen ohjauslaki. Siinä ohjuksen nopeusvektori suunnataan suoraan kohti maalia. Suoran takaa-ajon ohjauslakiin perustuva torjunta on kuvattu kuvassa 6.

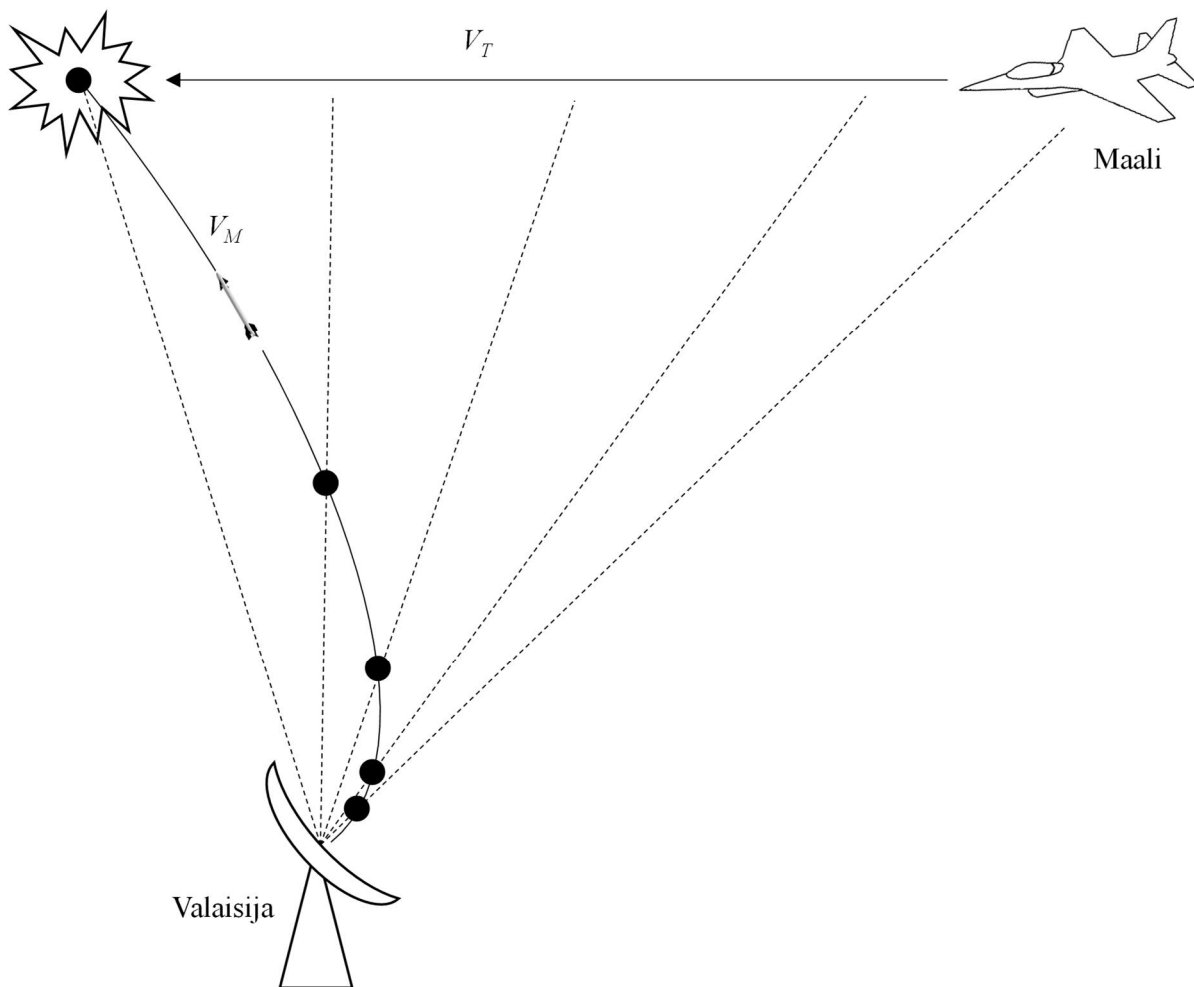


Kuva 6: Suora takaa-ajo yksinkertaisessa torjuntatilanteessa.

Kuvassa 6 maali etenee suoraviivaisesti nopeusvektorinsa V_T suuntaisesti. Ohjuksen nopeusvektori V_M suunnataan hakupään lukituksen suuntaisesti suoraan kohti maalia. Kuvan 6 optimilentorata tarkoittaa ohjuksen lentämistä suoraan maalin lentoradan mukaan määritettyyn törmäyspisteeseen lyhintä mahdollista reittiä. Ohjus päättyy tällöin maaliin käyttäen torjuntaan mahdollisimman vähän energiaa ja aikaa. Ohjuksen nopeusvektorin suuntaaminen hakupään lukitussuuntaan aiheuttaa kuvan 6 mukaisesti sen, että ohjus päättyy tyypillisesti maalin takasektoriin ja kuluttaa torjuntaan optimilentorataa enemmän energiaa ja aikaa. Suora takaa-ajo on toteutettu tyypillisesti ohjuksen oman sensorin tuottamaan maalitietoon perustuen.

2.5.2. Seurantalinjaohjaus

Seurantalinjaohjauksessa, joka on esitetty esimerkiksi lähteessä [49], ohjus pyritään pitämään valaisijan ja maalin välisellä seurantalinjavektorilla. Seurantalinja tuotetaan joko tutkalla tai laserilla. Koska maali liikehtii ja seurantalinja siirtyy sen mukana, ovat ohjuksen ohjauskomennot funktioita ohjuksen kulmaerosta seurantalinjaan nähden. Mikäli seurantalinja pysyy kiinni maalissa ja ohjus pysyy seurantalinjalla, päättyy ohjus maaliinsa. Seurantalinjaohjausta voidaan parantaa ottamalla huomioon seurantalinjan kulmakiihtyvyyt. Seurantalinjaohjaukseen perustuvien ohjauslakien suorituskyky on riippuvainen maalin nopeudesta ja torjunnan geometriasta. Lisäksi tämä ohjauslaki vaatii jatkuvan maalin valaisun ampuvan lavetin tai jonkun muun toimesta. Seurantalinjatyypiseen ohjauslakiin perustuva torjunta on kuvattu kuvassa 7.



Kuva 7: Seurantalinjaohjaus yksinkertaisessa torjuntatilanteessa.

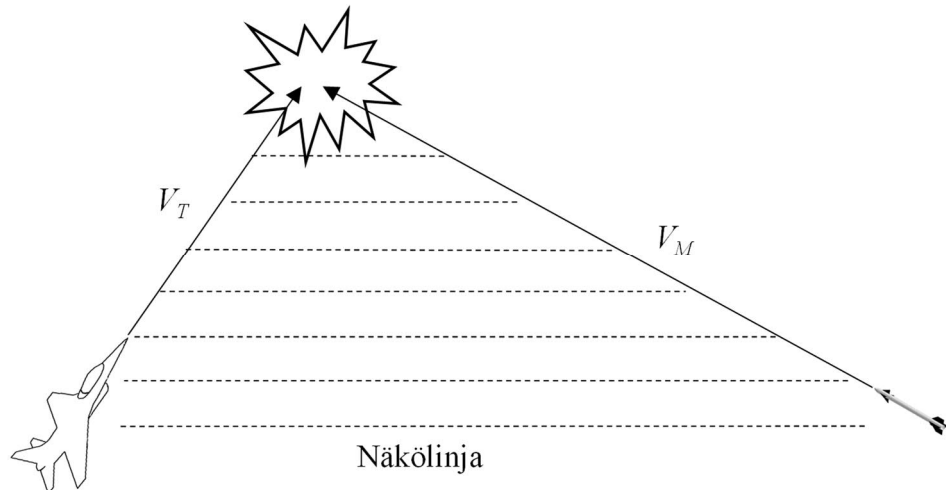
Kuvassa 7 maalin nopeusvektori V_T kuvaa sen suoraviivaista etenemistä. Tässä tapauksessa maassa sijaitseva valaisija valaisee maalia sen lentäessä kuvassa oikealta vasemmalla. Laukaistu ohjus etenee nopeusvektorinsa V_M mukaisesti katkoviivoilla kuvattuja seurantalinjoja myöden kohti maalia.

2.5.3. Suhteellinen navigointi

Suhteellisen navigoinnin ohjauslaki, joka on esitetty esimerkiksi lähteessä [53], perustuu ohjuksen ja maalin välisen näkölinjan muutosnopeuden sekä niiden välisen lähestymisnopeuden suhteen annettaviin kiihtyvyysskomentoihin. Ohjus pyritään ohjaamaan sellaiseen suuntaan, että se on jatkuvasti törmäyskurssilla maaliin nähden. Käytännössä tämä onnistuu minimoimalla näkölinjan muutos (kulmakiihtyvyyden). Maalin torjumiseksi ohjuksen halutaan liikehtivän voimakkaammin lähestymisnopeuden kasvaessa. Matemaattisesti ohjauslaki voidaan ilmaista seuraavasti:

$$n_c = N V_c \lambda ,$$

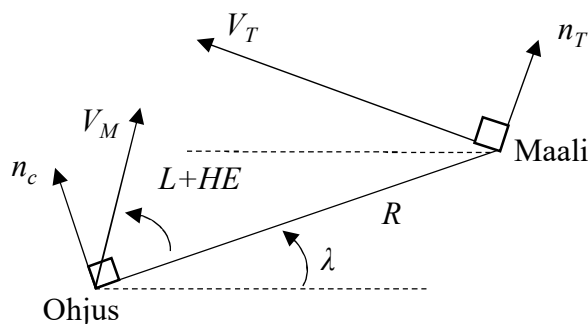
jossa n_c on ohjuksen lennonohjausjärjestelmälle annettava normaalikiihtyvyysskomento, N vahvistus, V_c maalin lähestymisnopeus ja λ näkölinjan kulma maaliin nähden. Vahvistuksen sopivien arvojen on kirjallisuudessa osoitettu olevan luokkaa 3–5, jolla vältetään liian suuret saturoituvat normaalikiihtyvyysskomennot ohjuksen lennon loppuvaiheessa. [51], [53] Tutkaohjuksessa hakupää mittaa näkölinjakulman muutosnopeuden ja Doppler-tutka [12] lähestymisnopeuden. Passiivisessa infrapunaohjuksessa hakupää mittaa vastaavasti näkölinjakulman muutosnopeuden, mutta lähestymisnopeus joudutaan arvioimaan karkeasti ohjuksen omaan nopeuteen perustuen. [53] Ilmataisteluojuksissa suhteelliseen navigointiin perustuvan ohjauslain tuottamat kiihtyvyyssmonikertakomennot toteutetaan lennonohjausjärjestelmän ohjaamilla kääntyvillä aerodynaamisilla ohjainpinnoilla ja/tai moottorin suihkusuuntauksella. Suhteellisen navigoinnin ohjauslaki voidaan ymmärtää sitä kuvaavan kuvan 8 perusteella.



Kuva 8: Suhteellinen navigointi yksinkertaisessa torjuntatilanteessa.

Kuvassa 8 V_T on maalin nopeus ja V_M ohjuksen nopeus. Kuvan 8 yksinkertaistetusta tilanteesta voidaan havaita ohjuksen ja maalin välisen näkölinjan pysyvän koko ajan samansuuntaisena, eli sen muutosnopeus on nolla. Tällöin myös ohjuksen ennakkokulma (L , Lead Angle) maaliin nähden pysyy sellaisena, että ohjus on jatkuvasti törmäyskurssilla maaliin eli aiemmin kuvassa 6 esitetyllä optimilentoradalla. Tällöin ohjus on lyhimmällä reitillä törmäyspisteeseen. Ohjus ei tällöin tarvitse liikehdintäkomentoja ja ohjauslain kaavan mukaisesti n_c pysyykin nollana.

Todellisuudessa torjuntatilanne on harvoin yhtä yksinkertainen kuin kuvissa 6 ja 8 on esitetty. Tämä johtuu maaliin liikehännästä. Suhteellinen navigointi toimii suoran takaa-ajon ohjauslakia paremmin myös liikehtivää maalia vastaan, eikä se vaadi jatkuvaa seurantalinnan tuottamista ohjusta varten. Ohjus voi toimia oman sensorinsa tai lennon keskivaiheessa ulkoisen maalitiedon varassa. Ohjus voidaan laukaista ennakkokulmalla L kohti arvioitua kohtaamis pistettä. Todellista kohtaamis pistettä ei kuitenkaan maalin liikehännästä johtuen voida tietää. Laukaisuhetken kulmavirhe kohtaamis pisteseen nähden on esitetty kuvassa 9 lyhenteellä HE (Heading Error). [53] Edellä mainitut kulmat on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9: Suhteellinen navigointi.

Kuvassa 9 n_c on ohjuksen komennettu kuormitusmonikerta, n_T maalin kuormitusmonikerta ja R ohjuksen etäisyys maaliin näkölinjaa pitkin. Kuten edellä kuvattiin, näkölinjan kulma λ kuvaa maalin suuntaa referenssikoordinaatistossa. Ohjus laukaistaan ennakkokulma L huomioiden ja lisäksi ohjuksen laukaisusuuntaan vaikuttaa laukaisuhetken kulmavirhe (HE). Ohjus laukaistaan kohti arvioitua kohtaamis pistettä nopeusvektorinsa V_M suunnassa.

Vahvistus N' määrittää suurelta osin ohjuksen lentoprofiilin maaliin. Suuremmalla vahvistuksella N' ohjus nolaa laukaisuhetken kulmavirheen nopeammin, koska ohjauslait komentavat ohjukselle tällöin suurempaa kuormitusmonikertaa. Tästä seuraa kuitenkin energian menetyksiä, mikä saattaa heikentää ohjuksen P_K arvoa suurilla ammuntaetäisyyksillä. Suuremman vahvistuksen vaatima kuormitusmonikerta kuitenkin vähenee lennon edistyessä. Tämä riippuu tosin lopulta maalin liikehännästä.

Yksinkertaistamalla ja linearisoimalla edellä esitetty suhteellisen navigoinnin ohjauslain kaava voidaan ohjuksen kuormitusmonikertakomennolle määrittää suljetun muodon ratkaisu [53]:

$$n_c = \frac{-V_M H E N'}{t_F} \left(1 - \frac{t}{t_F}\right)^{N'-2}.$$

Suljetun muodon ratkaisussa t kuvaa ohjuksen kuluva lentoaikaa ja t_F on kokonaislentoaika. Kokonaislentoaika on vain arvio ammunnan geometrian ja maalin liikehdinnän perusteella. Tästä ratkaisusta voidaan havaita, että kuormitusmonikertakomento on suoraan verrannollinen laukaisutilanteen suuntavirheeseen ja ohjuksen lentonopeuteen. Toisaalta se on kääntäen verrannollinen lentoaikaan. Mikäli ohjuksella on riittävä liikehtimiskyky, osuu se aina kohteeseensa riippumatta laukaisuhetken suuntavirheestä. Suljetun muodon ratkaisusta voidaan myös havaita aiemmin mainittu vahvistuksen N' vaikutus kuormitusmonikertakomentoon ohjuksen lentoprofiilissa. Huomattavista yksinkertaistuksista johtuen näitä johtopäätöksiä voidaan kuitenkin pitää vain suuntaa antavina.

2.5.4. Kehittyneet ja adaptiiviset ohjauslait

Ohjauslaeissa käytettävien vahvistusten, kuten esimerkiksi suhteellisen navigoinnin ohjauslain N' , ohjuksen energian käytön kannalta optimaaliset arvot riippuvat ohjuksen lennon vaiheen lisäksi myös sen lentotilasta, eli nopeudesta ja korkeudesta. Ohjuksen nopeus ja korkeus muuttuvat merkittävästi sen lennon aikana. Nopeus saattaa muuttua nolasta kymmenkertaiseen äänennopeuteen ja korkeus nolasta kymmeneen kilometriin. Matalaan lentokorkeuteen sopivat vahvistukset ovat liian pieniä suuriin lentokorkeuksiin ja matalaan nopeuteen sopivat liian suuria suureen nopeuteen. Lennon vaiheen mukaan muuttuvilla vahvistuksilla voidaan vähentää ohjuksen liikehdinnän kuormitusmonikertaa ja siten säästää sen energiaa loppuvaiheen liikehdintää varten. [53] Tämä on hankalaa, koska myös maalin liikehdinnällä on merkittävä vaikutus ohjuksen energian käyttöön sen lennon aikana ja siksi maalin liikehdintää tulisi pystyä ennakoimaan. Ohjauslain vahvistuksen on myös sovittava yhteen kappaleessa 2.6 kuvatun lennonohjausjärjestelmän takaisinkytkentävahvistuksiin.

Suhteellisen navigoinnin ohjauslain toimintaa voidaan parantaa, mikäli ohjuksen lentoajasta, maalin etäisyydestä ja liikehdinnästä on saatavilla tietoa tai niitä voidaan arvioida. [50], [56] Kirjallisuudessa esitetyissä tutkimuksissa [53] on havaittu, että vahvistuksen N' kasvattaminen ohjuksen lennon loppuvaihetta kohti pienentää maalin torjuntaan ohjukselta vaadittavaa kuormitusmonikertakykyä. Vahvistuksen muokkaaminen vaatii tietoa ohjuksen etenemisestä maalin torjunnassa. Laajennettu suhteellinen navigointi (Augmented Proportional Navigation), katso esimerkiksi [53], perustuu tähän. Sen on simulaatioissa noin 75 % ammutaskenarioiden osalta havaittu vaativan vähemmän ohjuksen kuormitusmonikertakykyä perinteiseen suhteelliseen navigointiin verrattuna. Laajennetussa suhteellisessa navigoinnissa vahvistus N' muuttuu arvioidun ohjuksen lentoajan ja maalin kuormitusmonikerran funktiona. [53]

Lentotilatietoon perustuvassa adaptiivisessa suhteellisessa navigoinnissa ohjauslakien vahvistusta säädetään ohjuksen mitatun lentotilan mukaisesti. Vahvistuksen N' arvot ovat ennalta määritetyt esimerkiksi taulukoituina lentokorkeuden ja -nopeuden (Machin luvun) mukaisesti. [53] Vahvistuksen arvot voivat olla taulukossa edellä mainittujen lentotilaparametrien määrittäessä taulukon rivin ja sarakkeen kautta solun, jonka arvoa käytetään kyseisen lentotilan vahvistuksena. Vahvistuksen arvo voidaan laskea myös matemaattisen yhtälön avulla.

2.6. Lennonohjausjärjestelmä

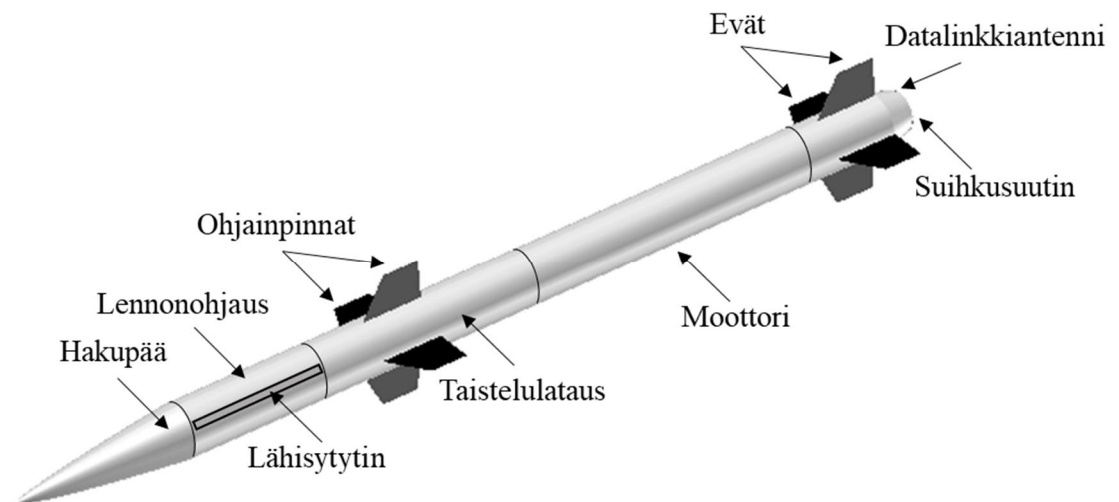
Lennonohjausjärjestelmän tehtävänä on tuottaa vakaa ja ohjattava, mutta toisaalta myös ohjaukseen riittävän herkästi reagoiva ohjus. Ohjuksen lennonohjausjärjestelmä muuttaa ohjauslailta saadun kuormitusmonikertakomennon n_c ohjuksen kuormitusmonikerraksi n_z käyttämällä ohjuksen ohjainpintoja ja mahdollista suihkusuuntausta. Lennonohjausjärjestelmän on yleisesti pystyttävä parantamaan ohjuksen lentorangan ohjausvastetta sellaiseksi, että ohjus pysyy toteuttamaan kuormitusmonikertakomennot mahdollisimman tarkasti. [49], [53]

Kuvan 2 mukaisesti ohjuksen lentotilaa mittaavat sensorit muodostavat lennonohjausjärjestelmän kanssa suljetun silmukan ohjauspiirin. Tällaisessa negatiiviseen takaisinkytkentään perustuvassa ohjauspiirissä pyritään minimoimaan ohjaussignaalin (ohjauslailta saadun komennon) ja takaisinkytkentäsignaalin (ohjuksen mitattu komentoa vastaavan liiketila-arvon) välinen ero [38]. Lennonohjausjärjestelmän takaisinkytkentäsignaalina käytetään pääasiassa mitattua kuormitusmonikertaa, mutta joissain tapauksissa myös mitattuja kulmanopeuksia. Kuormitusmonikerran takaisinkytkennän tarkoituksena on saavuttaa haluttu ohjuksen vaste ohjauslain kuormitusmonikertakomentoon nähden. Liikehtimisvaatimusten vuoksi ohjusten luontainen vakavuus suunnitellaan tyypillisesti heikoksi tai jopa hieman epävakaaksi ja siten lennonohjausjärjestelmän tehtäväksi tulee myös ohjuksen liikemuotojen vakavoittaminen. Vakavuudella tarkoitetaan tässä ohjuksen luontaista pyrkimystä palata häiriöstä (esimerkiksi kohtauskulman muutos) tasapainotilaan. Heikko luontainen vakavuus tai epävakavuus nopeuttaa ohjuksen ohjausvastetta merkittävästi. Kulmanopeustakaisinkytkentää käytetään ohjuksen liikemuotojen vakavoittamiseen. [8], [9], [49], [53] Kuormitusmonikerta- ja pituus- kulmanopeustakaisinkytkennät muodostavat ilmataisteluojusten pituusohjauksessa tyypillisesti käytettävän kolmen takaisinkytkentäsilmukan autopilotin (three-loop-autopilot) [53]. Lennonohjausjärjestelmän on myös huomioitava lentonopeuden ja -korkeuden mukaan muuttuvat ohjuksen aerodynaamiset ominaisuudet sekä ohjuksen rajoitukset. Rajoituksia voivat olla suurin sallittu kohtauskulma (aerodynaaminen rajoite) tai kuormitusmonikerta (rakenteellinen rajoite). [53]

Lennohjauslaeista voidaan muodostaa myös adaptiiviset, eli ne mukautuvat ohjuksen hetkelliseen lentotilaan. Tämä voidaan tehdä suljetun silmukan periaatteella mittaamalla ohjuksen vastetta syötettävään komentoon tai perustuen tietoihin ohjuksen lentotilasta. Lentotilaa voidaan mitata esimerkiksi inertiatason tai kulmanopeushyrrien avulla. Näiden tietojen perusteella voidaan määrittää tilanteeseen parhaiten sopiva takaisinkytkennän vahvistuksen arvo. Ohjuksen vasteen mittaamisessa sen ohjaukseen lisätään tietyn tyyppinen (esimerkiksi 4-8Hz sahalaita) pienen amplitudin (esimerkiksi 0.1° ohjainpintoikkaisuus) ohjaussignaali. Ohjuksen vaste tähän ohjaussignaaliin mitataan ja vahvistuksia säädetään halutun tasoiseksi. Tyypillinen toteutus on mitata kallistuskulmanopeusvastetta edellä esitetyn kaltaiseen kallistuskomentoon nähden. Adaptiivisten lennohjauslakien toteutus voi olla myös adaptiivisen ohjauslain tyyppinen, eli takaisinkytkentöjen vahvistusten arvot ovat ennalta määritetyt ja muuttuvat esimerkiksi lentonopeuden (tai Machin luvun) ja lentokorkeuden mukaan. [8]

2.7. Rakenne ja komponentit

Ilmataisteluohjusten kehitys on ollut nopeaa ensimmäisten ohjusten laukaisuista 1950-luvulta. Erityisesti ohjusten koko on pienentynyt selvästi. Pääosin tämä on ollut mahdollista elektronikan kehityksen kautta. [41] Ohjuksen operatiiviset vaatimukset, kuten kantama, määrittävät pitkälti ohjuksen moottorin tyypin ja sen koon. Nykyaikainen ilmataisteluohjus on kuvassa 10 esitetyistä peruskomponenteista koostuva järjestelmä.



Kuva 10: Ilmataisteluohjuksen komponentit.

Ohjuksen lentorangan tulee pystyä tukemaan hakeutumisvaatimuksia niin aerodynamiikan (riittävä ohjautumiskyky) kuin rakenteen (riittävä rakenteen jäykkyys tukemaan kuormitusmonikertavaatimuksia) kannalta. Hakupää on tutkaohjuksessa tutkaradomin suojaama, ja infrapunaohjuksessa kääntyvä hakupää on puolestaan läpinäkyvän kuvun alla. Ohjausjärjestelmä on tyypillisesti sijoitettu ohjuksen hakupään taakse ohjuksen etuosaan. Lähisytytin on tyypillisesti aktiivisella tutkalla tai laserilla toimiva sensori, jonka tarkoituksena on määrittää ohjuksen pääsy tuho vaikutuksen päähän maalista. Lähi- tai kontaktisytytin määrittää milloin taistelulataus räjäytetään. Seuraavana taaksepäin on sijoitettu taistelulataus räjähde- ja sirpaleosineen. Ohjuksen evät/siivet on sijoitettu eteen ja/tai taakse. Niistä osa on aktuaattoreilla käännettäviä ohjauspintoja, joita käytetään ohjuksen aerodynaamiseen ohjaukseen. [8], [35], [49] Suurin yksittäinen ilmataisteluohtuksen komponentti on sen moottori, joka on sijoitettuna takaosaan. [53] Se määrittää osin muiden komponenttien koon ja sijainnin rungon sisällä. Moottori tai siihen liittyviä komponentteja, kuten ilmanottoja, voi sijaita myös varsinaisen rungon ulkopuolella. [29] Joidenkin ohjusten moottorissa on kyky työntövoiman suuntaamiseen, jolla voidaan parantaa ohjuksen liikehdintäkykyä. Datalinkiantenni on tyypillisesti sijoitettuna ohjuksen takaosaan moottorin alueelle. [8]

2.8. Ilmataisteluohtuksen suorituskyvyn arviointi

Tässä kappaleessa määritellään tässä diplomityössä käytettävät kriteerit ilmataisteluohtuksen suorituskyvylle, eli miten ohjuksen toimintaa arvioidaan työssä toteutettavissa simulaatioissa. Kriteerit perustuvat ilmataisteluohtusten suorituskyvyn arviointiin lähteiden [6], [8], [49] ja [56] mukaisesti. Yleisesti ilmataisteluohtuksen suorituskykyä arvioidaan sen P_K arvolla. Kappaleessa 2.3 esitettiin eri ohjustyyppien toteutuneita P_K arvoja. Tämä todennäköisyys koostuu useista osista, kuten esimerkiksi P_G arvosta, lähisytyttimen toiminnan todennäköisyydestä sekä taistelulatauksen tuho vaikutuksen todennäköisyydestä. Ohjuksen ei tarvitse osua maaliin sen tuhoamiseksi.

Kappaleessa 2.3 esitettyjen ilmasodankäyntikokemusten ja erilaisten ohjusten toteutuneiden P_K arvojen perusteella voidaan todeta, että ilmasodankäynnissä on ensiarvoisen tärkeää pyrkiä laukaisemaan ohjus ja saada se taistelulatauksen vaikutus etäisyydelle maalista ilman, että maali tietää olevansa ammunnan kohteena. Ohjus tulee pystyä laukaisemaan mahdollisimman kaukaa, selvästi ohjuksen omien sensorien havaintokyvyn ulkopuolelta ja mielellään myös ampuvan lavetin sensorien havaintokyvyn ulkopuolelta. Tässä sensorin havaintokyvyllä tarkoitetaan kantaman ja näköalueen (gimbal limits) yhdistelmää. Ammuntaetäisyyden ja ohjuksen lentoajan kasvaessa, datalinkillä välitettävä maali tieto on välttämätöntä ohjuksen P_G ja P_K arvojen nostamiseksi hyväksyttävälle tasolle.

Kappaleessa 2.4 esitetyn mukaisesti ulkoisen maalitiedon hyvyydellä on merkittävä vaikutus P_G arvoon ja siksi myös P_K arvoon. Mitä pidempään ja lähemmäksi maalia ohjus lentää data-linkillä välitettävän maalitiedon varassa, sitä vaikeampaa sen havaitseminen on maalille ja yleisesti vastustajalle. Näin maalille jää mahdollisimman vähän aikaa suorittaa väistöliikkeitä tai käyttää omasuojajärjestelmiään. Toisaalta mitä lähemmäksi maalia ohjus lentää ulkoisen maalitiedon varassa, sitä suurempi merkitys maalitiedon hyvyydellä on ohjuksen suorituskykyyn.

Kuten kappaleessa 1.4 esitetyissä rajauksissa todettiin, suorituskyvyn mittarina käytetään ohitusetäisyyttä (miss distance). Pienempi ohitusetäisyys tarkoittaa parempaa ohjuksen suorituskykyä. Mahdolliset tilanteet ohjuksen suorituskykyarvioinnissa ovat seuraavat:

1. Ohjus ei pääse loppuhakeutumisvaiheen etäisyydelle maalista ($P_G=0$ ja $P_K=0$)
2. Ohjus pääsee loppuhakeutumisvaiheen etäisyydelle maalista, mutta ei näe maalia omalla sensorillaan ($P_G=0$ ja $P_K=0$)
3. Ohjus pääsee loppuhakeutumisvaiheen etäisyydelle maalista, näkee maalin omalla sensorillaan, mutta ei pysty lukittumaan maaliin ($P_G=0$ ja $P_K=0$)
4. Ohjus pääsee loppuhakeutumisvaiheen etäisyydelle maalista, näkee maalin omalla sensorillaan, pystyy lukittumaan maaliin, mutta ei pääse taistelulatauksen vaikutusetäisyydelle maalista ($P_G=1$ ja $P_K=0$)
5. Ohjus pääsee loppuhakeutumisvaiheen etäisyydelle maalista, näkee maalin omalla sensorillaan, pystyy lukittumaan maaliin ja pääsee taistelulatauksen vaikutusetäisyydelle maalista ($P_G=1$ ja $P_K=?$)
6. Ohjus pääsee loppuhakeutumisvaiheen etäisyydelle maalista, näkee maalin omalla sensorillaan, pystyy lukittumaan maaliin ja pystyy osumaan maaliin ($P_G=1$ ja $P_K=?$)
7. Ohjus pääsee loppuhakeutumisvaiheen etäisyydelle maalista, näkee maalin omalla sensorillaan, pystyy lukittumaan maaliin ja tuhoaa maalin taistelulatauksen ja/tai osuman vaikutuksella ($P_G=1$ ja $P_K=1$).

Vaihtoehdoissa on esitetty myös niitä vastaavat P_G ja P_K arvot. Tämän työn simulaatioista kappaleen 1.4 mukaisesti pois rajatut asiat kuten esimerkiksi omasuojaheitteet, elektroninen häirintä ja/tai maalin häiveominaisuudet saattavat vaikuttaa kaikkiin edellä mainittuihin tilanteisiin. Käsiteltäessä vaihtoehtoja tämän työn simulaatioissa käytettävän LOAL-tyyppisen aktiivisen tutkaohjuksen osalta niistä voidaan esittää seuraavia päätelmiä.

Tilanteessa 1 skenaarion geometrian tai huonotasaisen ulkoisen maalitiedon vuoksi ohjus ei pääse loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen etäisyydelle maalista. Kappaleen 1.4 rajauksien mukaisesti työssä toteutettavat simulaatiot eivät pääty tilanteeseen 1.

Tilanteessa 2 ulkoisen maalitiedon hyvyys on niin huono, että maali on loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä maalin etsintäajan puitteissa etsintävolyymien ulkopuolella. Vaihtoehtoisesti tilanteen 2 geometria on sellainen, että maali sijaitsee ohjuksen tutkan näköalueen ulkopuolella. Maali voi olla ohjuksen tutkan näköalueen ulkopuolella, vaikka se on etsintäalueen sisällä. Tilanne 2 voi aiheutua esimerkiksi maalin voimakkaasta liikehinnästä.

Tilanteessa 3 maali on sen etsintäajan aikana etsintävolyymien sisällä ja ohjus näkee maalin omalla tutkallaan ainakin hetkittäin. Esimerkiksi maalin liikehinnä, liikesuunta, nopeus, häiveominaisuudet tai toimintaympäristö vaikuttavat ohjuksen tutkaan siten, ettei ohjus pysty lukittumaan maaliin. Kappaleen 1.4 rajauksien mukaisesti tämän työn simulaatioiden osalta ei erotella tilanteita 2 ja 3. Tilanteissa 2 ja 3 ohjus on päässyt loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen etäisyydelle maalista ja siirtymisen hetkellä tämän työn kannalta on oleellista vain se, pystyykö ohjus lukittumaan maaliin. Työssä toteutettavissa deterministisissä simulaatioissa P_G voi siis saada vain arvoja 0 tai 1. Jos ohjus ei näe maalia, todetaan tilanteeksi ”2 tai 3”.

Tilanteessa 4 ohjuksen tutka pystyy lukittumaan maaliin, mutta heikkotasoinen maalitieto tai maalin liikehinnä estävät ohjusta pääsemästä taistelulatauksen vaikutusetäisyydelle maalista. Ohjuksen tutka saattaa menettää lukituksensa maaliin sen liikehinnän seurauksena tai ohjuksen liikehtimiskyky rajoittaa sen hakeutumista maalin läheisyyteen.

Tilanteiden 3 ja 4 välillä ohjus pystyy joissain tapauksissa lukittumaan maaliin. P_G saa tällöin arvoja väliltä 0 ja 1. Vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi ohjuksen tutkan ominaisuudet, maalin häiveominaisuudet ja liikehinnä sekä toimintaympäristö. Osa tekijöistä on luonteeltaan stokastisia. Kappaleen 1.4 rajauksien mukaisesti työssä ei tarkastella näitä tilanteita. Mikäli ohjuksen tutka on jo lukittunut maalin ja se edelleen näkee maalin, pysyy se myös lukittuneena maaliin. P_G voi siis saada vain arvoja 0 tai 1 ja työssä ei todeta tilannetta ”3 tai 4”.

Tilanteessa 5 ohjus pääsee taistelulatauksen vaikutusetäisyydelle maalista. Tämä etäisyys (ohitusetäisyys) on arvioitava ohjus- ja maaliakohtaisesti. Ohitusetäisyys määrittää eron tilanteiden 4 ja 5 välillä. Tässä työssä tilanteiden 4 ja 5 välisenä ratkaisevana ohitusetäisyytenä käytetään arvoa 20 metriä, joka on arvio työn simulaatioissa käytettävän ohjuksen taistelulataukselle riittävästä vaikutusetäisyydestä (warhead kill radius) hävittäjäluokan maaliin. Koska työssä ei tarkastella maalin tuhoutumista osuman ja/tai taistelulatauksen vaikutuksesta, on tilanne 5 tämän työn simulaatioissa onnistunut torjunta.

Tilanteessa 6 ohjus osuu maaliin (kontakti). Maali saattaa tuhoutua ohjuksen osuman ja/tai taistelulatauksen vaikutuksesta. Tämän työn osalta tähän tilanteeseen päädytään ohitusetäisyyden ollessa alle 1 metri ja tilanne katsotaan onnistuneeksi torjunnaksi. Tilanteen 5 osalta todetut asiat maalin tuhoutumisen tarkastelusta pätevät myös tilanteeseen 6.

Tilanteessa 7 ohjus osuu maaliin ja ohjuksen osuman ja/tai taistelulatauksen vaikutus tuhoaa maalin. Tilanteen tarkastelemiseksi simulaatioissa tulee mallintaa maalin vaurioituminen tai tuhoutuminen taistelulatauksen ja/tai ohjuksen suoran osuman vaikutuksesta. Kappaleen 1.4 rajauksien mukaisesti tässä työssä ei todeta tilannetta 7.

2.9. Yhteenveto

Nykyaikaisten ilmataisteluohjusten kehitys on johtanut keskipitkän ja pitkän kantaman ohjusten osalta LOAL-tyyppisiin aktiivisiin tutkaohjuksiin, joiden lennon keskivaihetta tuetaan datalinkillä ohjukselle välitettävällä maalitiedolla. Ohjusten kantamaa pyritään kasvattamaan niiden moottorien kehityksellä, koska ilmasodankäynnin kokemusten perusteella ilmataisteluohjuksia tulee käyttää mahdollisimman suurilta etäisyyksiltä vastustajan asevaikutukselta suojautumiseksi. Vaatimus datalinkillä ohjukselle välitettävän maalitiedon käytöstä aiheutuu ohjuksen laukaisun jälkeisen maalin liikehdinnän, ohjuksissa käytettävien sensorien kantamaan nähden rajallisen suorituskyvyn ja verkottuneen ilmasodankäynnin vaatimusten perusteella. Ohjusten laukaiseminen lentokoneen sisäisistä asekuiluista rajoittaa hakupäiden toimintaa merkittävästi. Myös lyhyen kantaman infrapunaohjuksille halutaan pystyä osoittamaan maaleja niiden hakupään näköalueen ja -sektorin ulkopuolelta. Näin ollen käytännössä kaikkien ohjustyyppien ja erilaisiin sensoreihin perustuvien ohjusten lentoa tulee pystyä tukemaan datalinkillä välitettävällä maalitiedolla. Ulkoisen tiedonvälityksen merkitys tulevaisuuden ilmataisteluohjuksille tulee edelleen kasvamaan ja toimintaympäristön vaikutus aiheuttaa yhä suurempia haasteita ulkoiselle tiedonvälitykselle esimerkiksi elektronisen häirinnän osalta.

Ilmataisteluohjusten ohjauslait ovat kehittyneet suorasta takaa-ajosta suhteelliseen navigointiin, jota käytetään lähes yksinomaan nykyaikaisissa ohjuksissa. Ohjauslait vaikuttavat merkittävästi ohjusten lentoratoihin ja niissä on huomioitava ohjuksen liikehtimiskyvyn rajoitukset koko lentoalueella. Ohjusten liikehtimiskyvyn tulisi olla noin 4–5 kertaa maalia parempi riittävän P_K arvon varmistamiseksi. Liikehtimiskykyä voidaan parantaa työntövoiman suuntaamisen avulla.

Kappaleessa määriteltiin myös, miten tässä diplomityössä toteutettavissa simulaatioissa arvioidaan ohjuksen suorituskykyä ja esitettiin mahdolliset tilanteet ohjuksen suorituskykyarviointiin. Vastauksena ensimmäiseen alatutkimuskysymykseen voidaan tämän kappaleen perusteella todeta nykyaikaisen ilmasodankäynnin ja nykyaikaisten ilmataisteluohjusten aiheuttavan seuraavia vaatimuksia ohjusten ulkoiselle tiedonvälitykselle:

1. Ohjusten suuren kantaman vuoksi tiedonvälityksen on toimittava langattomasti eli datalinkkiyhteydellä.
2. Tiedonvälityksen tulee olla kaksisuuntaista ja sen on toimittava kaikkien verkon jäsentien välillä.
3. Tiedonvälityksen on mahdollistettava ohjuksen lennon aikainen maalin vaihto ja torjunnan peruminen.
4. Tiedonvälityksen on siedettävä elektronista häirintää ja sen on oltava salattua.
5. Maalitiedon on oltava virheetöntä, viiveetöntä ja jatkuvaa (hyvyys).
6. Ohjukselle on pystyttävä kertomaan sille annetun maalitiedon hyvyys, joka saattaa muuttua ohjuksen lennon aikana. Hyvyudessa tulee pystyä huomioimaan myös sensorin tai sensoriyhdistelmän mittauksen tarkkuus eri suunnissa.

Maalin sijaitessa muiden lentoalusten läheisyydessä ja/tai liikehtiessä ohjuksen lennon aikana, korostuu ulkoisen maalitiedon hyvyden merkitys torjunnan onnistumiseen. Ohjusten oman paikan määrittäminen perustuu inertiasuunnistusjärjestelmiin, joita joidenkin ohjusten osalta tuetaan GPS-järjestelmällä. Ohjuksen oman paikkatiedon tarkkuus vaikuttaa ohjuksen suorituskykyyn ulkoisen maalitiedon maalin paikan tarkkuutta vastaavasti. Ohjuksen on pystyttävä ennustamaan maalin tulevaa tilaa maalin liikehdintähistorian perusteella. Tällä estetään puuttuvien maaliviestien tai datalinkkituen ennenaikaisen katkaisemisen haitallisia vaikutuksia ohjuksen ohjautumisen todennäköisyyteen. Virheitä sisältävät viimeisinä vastaanotetut maalitietoviestit saattavat heikentää ohjuksen ohjautumisen todennäköisyyttä merkittävästi

3. MISTARGET OHJUSSIMULAATIO-OHJELMA

Tässä kappaleessa kuvataan diplomityön simulaatioihin käytettävän MisTarget-ohjussimulaatio-ohjelman [67] toiminta ja käyttö. Tämän diplomityön kannalta tärkeänä asiana kappaleessa kuvataan MisTarget-ohjelman datalinkkimalli. Lisäksi esitellään tässä työssä käytettävä ilmataisteluoituksen malli, jonka on muodostanut työn toisena ohjaaja toiminut MisTarget-ohjelman pääkehittäjä.

Kappaleessa selvitetään ohjelman rajoituksia ilmataisteluoikusten simuloimiseen sekä arvioidaan sen soveltuvuutta tämän diplomityön aihealueen tutkimukseen. Kappaleessa vastataan toiseen alatutkimuskysymykseen selvittämällä tämän diplomityön osalta, miten MisTarget-ohjelmaa tulisi sen tekijöiden toimesta jatkokehittää tukemaan paremmin ulkoisen maalitiedon käytön tutkimista. Kappaleen perusteella kappaleessa 6 vastataan toiseen alatutkimuskysymykseen jatkotutkimusmahdollisuuksien osalta. Näiden selvitysten, arvioiden ja vastauksien pohjatietoina käytetään kappaleen 2 kirjallisuuskatsausta sekä sen yhteenvedossa ensimmäiseen alatutkimuskysymykseen vastauksena esitettyjä vaatimuksia ulkoiselle tiedonvälitykselle. Kappaleen 3 tietojen perusteella kappaleessa 4 vastataan kolmanteen alatutkimuskysymykseen esittelemällä tässä työssä toteutettu kaksiosainen MisDA-malli ulkoisen maalitiedon käytön tarkasteluun.

Lisäksi annetaan perusteita muihin alatutkimuskysymyksiin vastaamiseksi. Tietoa ohjelman toiminnasta ja käytöstä tarvitaan, jotta pystytään selvittämään, miten ja millaisen mallin avulla sitä voidaan käyttää ulkoisen maalitiedon käytön tarkasteluissa. Vastaavasti tietoa ohjelmasta sekä sen ohjus-, datalinkki- ja maalimalleista tarvitaan tämän diplomityön simulaatioiden ammuntaskenaarioiden määrittämisessä sekä itse simulaatioiden toteuttamisessa. Myös simulaatioiden tuloksina esitettävät parametrit on määriteltävä, jotta niitä voidaan tulkita oikein. Tämän vuoksi tässä kappaleessa esitetään lyhyesti ohjusten lentoon ja MisTarget-ohjelman ratalaskentaan liittyvät koordinaatistot, aerodynaamiset suureet sekä muut merkitykselliset tulosparametrit.

3.1. Ohjelman yleiskuvaus

MisTarget-ohjelma on yksi MisAnalysis-ohjusanalysointiohjelmiston osa. Sillä simuloidaan ohjuksen ja maalin kohtaamisia. Ohjelman kehittäminen on aloitettu Teknillisen korkeakoulun Aerodynamiikan laboratoriossa ja sen jatkokehittämistä toteutetaan edelleen Ilmavoimien tilauksesta. Ohjelman jatkokehittäminen on siksi mahdollista myös tämä diplomityön tarpeiden mukaan. Erityisesti tästä syystä MisTarget-ohjelma valittiin käytettäväksi työssä toteutettavassa mallissa ja simulaatioissa.

MisTarget-ohjelmalla voidaan mallintaa laajasti erilaisia aseita. Ohjelmaa varten on muodostettu kalustomalleja sekä ohjuksista että maalilentokoneista. Siihen on sen kehityksen aikana lisätty erityisiä ominaisuuksia, kuten ohjuksen korkeusprofiilin (loftauksen) mallinnus, ohjuksen lennättäminen ennalta määritettyjen reittipisteiden kautta, ilmaa hengittävien moottoreiden mallinnus (RamJet/TurboJet/TurboFan-tyyppiset moottorit) [2], työntövoimavektorin kääntö (TVC, Thrust Vector Control), rajoitettu hypersonic aerodynamiikka sekä ballististen ohjusten ratojen mallinnus. Simuloitava ohjus laukaistaan maasta tai ilmasta kohti maassa tai ilmassa olevaa, liikkuvaa tai paikallaan pysyvää maalia. [67]

Ohjelmalla voidaan simuloida esimerkiksi kaikkia Ilmavoimien käytössä olevia ilmasta-ilmaan, ilmasta-maahan ja maasta-ilmaan aseita. Näitä ovat JDAM-täsmäpommi, JSOW-liitopommi, JASSM-risteilyohjus sekä AIM-120 Amraam ja AIM-9 Sidewinder -ilmataisteluohjukset [19]. Ilmaa hengittävien moottoreiden mallinnus mahdollistaa myös tätä tekniikkaa hyödyntävien uusien ilmataisteluohjusten, kuten MBDA Meteor -ohjuksen [29], mallintamisen simulaatioihin.

MisTarget-ohjelma on konstruktioivinen simulaatio, jossa varsinainen mallinnettava järjestelmä, eli tämän työn tapauksessa ilmataisteluohjus, on kuvattu jatkuva-aikaisella dynaamisella mallilla. Ohjelma voidaan liittää osaksi virtuaalisia simulaatioita [1], joissa ampuvaa konetta, maalia tai molempia lentää ihminen. Ohjelmalla voidaan myös analysoida reaali maailman ohjuslaukaisuja käyttämällä tehtävänpurkujärjestelmistä tai koelentotallentimista saatavaa kappaleessa 2.4 esitetyn mukaisissa tilanteissa tallennettua tietoa. MisTarget-ohjelma sisältää erikseen käyttöön otettavia stokastisia komponentteja, kuten hakupään häiriökohinan ja ilma-kehän turbulenssin. Elektronista häirintää kuvataan ohjelman tässä työssä käytettävässä versiossa vain kohinan avulla, koska harhauttavia häirintätekniikoita ei ole vielä mallinnettu. [67]

Tässä työssä käytettävä MisTarget-ohjelman versio on komentoriviltä ajettava ohjelma, jolla tehtäviä simulaatioita ohjataan tekstitiedostojen syötteellä, eli niin kutsutuilla lähtötiedostoilla. Niillä kuvataan simulaation asetukset, ammuntaskenaario, ohjusmalli, maalin rata ja datalinkillä ohjukselle välitettävä maalitieto. Simulaation asetuksia ovat esimerkiksi sen kesto, laskennan aika-askel ja tulostiedostojen tallennusväli. Tällä ohjelman versiolla simulaatiot suoritetaan aina ohjuksen laukaisuhetkestä pienimpään ohitusetäisyyteen tai asetettuun simulaation ajalliseen keston saakka. Simulaation päätyttyä ohjelma tallentaa tulokset tekstitiedostoihin (tulostiedostot). Tulostiedostoihin tallennetaan esimerkiksi ohjuksen rata, sen lentoarvoparametreja ja maalin rata. Lisäksi tallennetaan simulaation suoritukseen liittyviä tietoja, kuten esimerkiksi ohjuksen lentoaika, datalinkkimaalitiedon käyttö, loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen aika, maalin mahdollinen löytyminen etsintävolyymien sisältä, pienin ohitusetäisyys ja syy simulaation lopettamiseen.

Edellä kuvattu ohjelman toimintatapa mahdollistaa eräajotyyppisten simulaatioiden [1] suorittamisen. Tällöin lähtötiedostoja muokataan eräajossa varioitavien parametrien mukaan ja tulostiedostojen avulla voidaan vaikuttaa eräajon seuraaviin simulaatiokierroksiin. Ohjelmalla on mahdollista suorittaa vastaavalla toimintatavalla myös Monte Carlo -tyyppisiä [1] simulaatioita, mikäli simulaatioihin halutaan sisällyttää edellä mainittuja stokastisia komponentteja ja tutkia niiden vaikutusta eri skenaarioissa. [67] MisTarget-ohjelma ei itsessään sisällä toiminnallisuutta ohjata eräajo- tai Monte Carlo -tyyppisten simulaatioiden toteuttamista. Niiden toteuttaminen vaatii siis erillisen mallin ja simulaation ulkoisen ohjelman, joka automatisoi lähtötiedostojen muokkaamisen ja simulaatioiden ohjaamisen.

Ennalta määritettävien lähtötiedostojen käyttö ja simulaation suorittaminen aina ohjuksen laukaisuhetkestä eteenpäin aiheuttavat toisaalta sen, ettei ohjelmalla voida huomioida maalin reaktiota ohjukseen vaan ohjuksen lennon simulaatio on täysin konstruktivinen. Mikäli maali reagoisi ohjukseen, vaikuttaisi reaktio ohjuksen toimintaan ja tämä edelleen maalin toimintaan. Näin ollen myös ennen ohjussimulaation suorittamista muodostettu maalin rata ja sitä kautta myös ulkoinen ohjukselle välitettävä maalitieto muuttuisivat. Tätä ohjelman versiota voidaan kuitenkin käyttää virtuaalisessa simulaatiossa, jossa esimerkiksi ihmisen lentämä hävittäjälentokone ampuu simuloitavan ohjuksen simuloituun ennalta määritettyä rataa lentävään maaliin.

Edellä esitetty ohjelman käytön rajoitus on tunnistettu sen kehittäjien toimesta jo ennen tämän diplomityön aloittamista. MisTarget-ohjelmasta on tämän työn aikana jatkokehitetty uusi versio, jota suoritetaan dll-kutsuna valittava määrä aika-askelia kerrallaan halutusta tilanteesta eteenpäin. Tällöin simulaatioita ei tarvitse suorittaa ohjuksen laukaisuhetkestä eteenpäin. Ohjus- ja maalimallit asetetaan simulaation aloitushetken tilaan, joka syötetään ohjelmalle erikseen kutakin simulaation osaa varten. [65] Näin simulaation mallit voivat toimia vuorovaikutuksessa toistensa kanssa ja maalia voi lentää ohjukseen reagoiva ihminen tai autopilotti. Tämä reaktio voi edelleen vaikuttaa ohjuksen toimintaan.

MisAnalysis-ohjelmiston ja MisTarget-ohjelman käyttöä varten on muodostettu yksinkertainen käyttöliittymä. Sen avulla voidaan hallita osaa ohjelmien ominaisuuksista. Myös osa simulaatioiden lähtötiedostojen arvoista voidaan antaa käyttöliittymän kautta ja sillä voidaan muodostaa yksinkertaisia maalin lentoratoja. Lisäksi käyttöliittymä tuottaa kuvaajat tietyistä tulosparametreista, kolmiulotteisen animaation simulaation tuloksista ja kolmiulotteisen pintamallin ohjusmallin geometriasta. [66], [67]

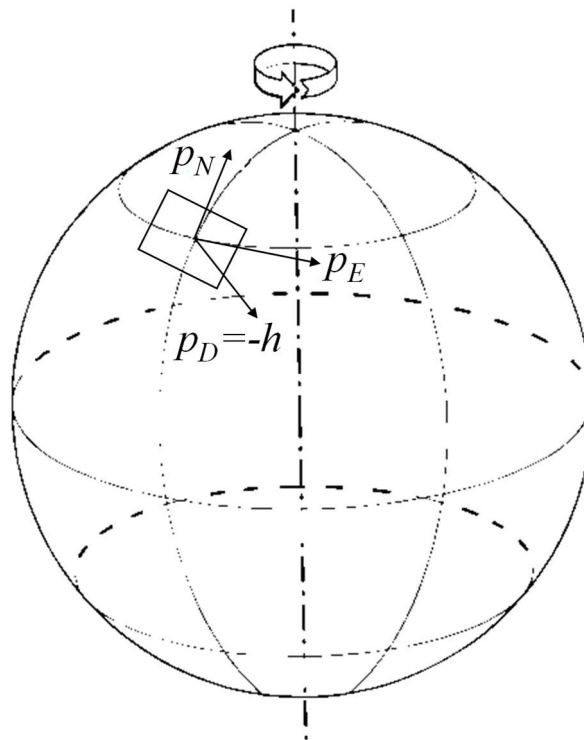
Osa MisTarget-ohjelman ominaisuuksista, toiminnallisuuksista sekä lähtö- ja tulostiedostojen parametreista on esitetty yhteensä noin kahdessakymmenessä raportissa ja muistiossa. Näistä vain tärkeimmät ovat esitetty tämän diplomityön lähteinä. Osa ohjelman ominaisuuksista ja tiedostojen parametreista ei ole kuitenkaan esitetty ohjelman dokumentaatiossa lainkaan ja niiden osalta ohjelman käyttäjien tulee turvautua ohjelman kehittäjien tukeen. MisAnalysis- ja MisTarget-ohjelmien kuvaus ja käyttöohje tulisi koota yhteen muutosten mukaan päivitettävään dokumenttiin sekä täydentää kattamaan kaikki käytettävät valinnat ja parametrit.

3.2. Ohjelman ratalaskenta

Tässä kappaleessa esitetään lyhyesti MisTarget-ohjelmassa ohjuksen liikkeen kuvaamisessa käytetyt koordinaatistot sekä nopeuskomponenttien, kulmien ja kulmanopeuksien määritelmät ja suunnat. Lisäksi esitetään muut tässä tutkimuksessa käytettävät tulosparametrit. Näiden määrittely on tarpeen ohjelmasta saatujen tulosten tulkitsemista varten. Lisäksi kappaleessa kuvataan lyhyesti MisTarget-ohjelman ratalaskenta rajoituksineen, jotta voidaan ymmärtää, minkälaisiin simulaatioihin MisTarget-ohjelmaa voidaan käyttää. Kappaleessa esitettyjä tietoja tarvitaan vastattaessa kolmanteen ja neljänteen alatutkimuskysymykseen.

MisTarget-ohjelman tässä työssä käytettävän version ratalaskenta on lentomekaniikan osalta jäykän kappaleen tasaisen maan kuuden vapausasteen malli, eli se sisältää kolme nopeuskomponenttia ja kolme kulmanopeuskomponenttia. [49], [67] Jäykän kappaleen oletuksella tarkoitetaan jokaisen kappaleen rakenteen pisteiden säilyttävän kiinteän suhteellisen asemansa avaruudessa kaikkina ajanhetkinä. Näin ollen rakenteessa ei esiinny taipumista tai kiertymistä. Todellisuudessa näin ei tietenkään ole, mutta rakenteen elastisuuden huomioon ottaminen simulaatioissa on monimutkaista mallin vapausasteiden lisääntymisen vuoksi. Toisaalta ohjukset ovat tyypillisesti lentokoneita jäykempiä, joten tämä oletus ei aiheuta merkittäviä virheitä simulaatioihin. Tarvittaessa elastisuuden vaikutuksia voidaan mallintaa esimerkiksi muuttamalla kappaleen aerodynaamisten kertoimien arvoja kineettisen paineen funktiona. [3]

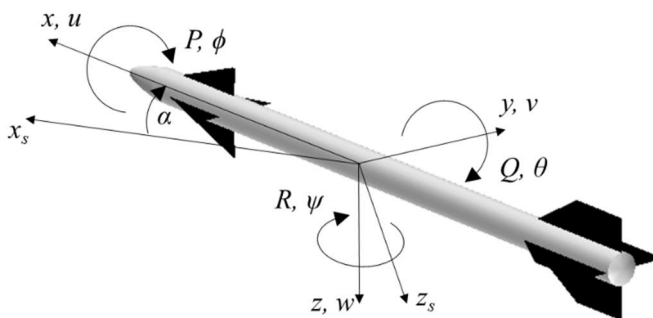
Ohjuksen ja maalilentokoneen lentoa tarkastellaan tasaisen maan oletuksilla kuvassa 11 esitetyssä NED-koordinaatistossa (NED, North-East-Down). Maan kaarevuutta ei siis oteta huomioon. Koska ohjelman avulla tarkasteltavien taktisten ohjusten kantamat ovat rajallisia, enintään muutama sata kilometriä, ei tasaisen maan koordinaatiston käytöstä aiheudu merkittäviä virheitä ratalaskentaan eikä ratalaskennassa tarvita pyöreän maan koordinaatistoja. Tässä työssä tarkasteltavien ilmataisteluohjusten kantama on vielä edellä mainittua pienempi, eli noin sata kilometriä.



Kuva 11: NED-koordinaatisto.

Kuvan 11 NED (North-East-Down) -koordinaatisto asetetaan simulaation alkuhetkellä ohjuksen painopisteen alapuolelle siten, että koordinaatiston taso sijaitsee tangentiaalisesti maan pintaan nähden. Symboli p kuvaa paikkaa ja sen alaindeksit (N, E, D) ovat paikan komponentit pohjois-, itä- ja pystysuunnissa. Koordinaatiston akseleiden positiiviset suunnat ovat pohjoiseen, itään ja alas. Lentokorkeus h on p_D :n vastaluku ja sitä käyttämällä koordinaatisto on NEH-koordinaatisto (North-East-Height). MisTarget-ohjelman dll-kutsuna suoritettavassa versiossa on otettu käyttöön tasaisen maan NED/NEH-koordinaatiston sijasta maan kaarevuuden huomioiva WGS-84 pyörähdySELLIPSOIDIN mukainen koordinaatisto [65]. Mikäli MisTarget-ohjelmaa käytetään ballististen ohjusten tarkasteluihin, tulee simulaatiot toteuttaa tällä versiolla.

Nopeus- ja voimavektorit on tarkoituksenmukaista ilmaista ortogonaalisissa kappaleeseen kiinnitetyissä koordinaatistoissa. Nämä koordinaatistot kääntyvät maahan nähden kulmanopeuksien mukaisesti säilyttäen kiinteän aseman kappaleeseen nähden. ABC (Aircraft-Body Coordinates) -koordinaatiston origo sijaitsee kappaleen (ohjus tai lentokone) painopisteessä ja sen akselit suunnataan sopivien referenssiivojen mukaisesti. Yleisesti koordinaatiston xy -taso on lentokoneen lattiatason suuntainen ja xz -taso sijaitsee kappaleen mahdollisella symmetriatasolla. Ohjusten osalta xy - ja xz -tasot voidaan tyypillisesti olettaa symmetriatasoiksi, koska ohjuksen sisällä sijaitsevien laitteiden voidaan arvioida olevan massoiltaan ja sijoittelultaan hyvin symmetrisiä. Uusimpiin ilmataisteluojuksiin lisätyt ilmaa hengittävän moottorin ilmanotot saattavat estää symmetriaoletuksen käytön. Stabiliateettkoordinaatiston x -akselin ja ABC-koordinaatiston x -akselin välinen kulma kuvaa kohtauskulmaa α . Näin ollen ABC-koordinaatistosta stabiliateettkoordinaatistoon päästään kiertämällä sitä y -akselin suhteen kulman α verran. [49], [67] Edellä mainitut koordinaatistot sekä kuuden vapausasteen nopeus- ja kulmanopeuskomponentit on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12: Kappaleeseen sidotut koordinaatistot.

Kuvassa 12 u, v, w ovat kappaleeseen sidotun koordinaatiston x, y, z -akseleiden suuntaiset nopeuskomponentit. Näiden nopeuskomponenttien määrittämän vektorin pituus on ohjuksen nopeus V . Nopeuden ja ilmakehämallista saatavan lentokorkeudesta riippuvan paikallisen äänennopeuden mukaan voidaan laskea ohjuksen Machin luku. P, Q, R ovat kulmanopeudet x, y, z -akselien ympäri. Stabiliateettikoordinaatisto on merkitty alaindeksillä s . Kääntämällä stabiliateettikoordinaatistoa sen z -akselin ympäri sivuluisukulman (β) verran päädytään tuulikoordinaatistoon. Symmetristen krusifiksimuotoisten ilmataisteluohjusten osalta kohtaus- ja sivuluisukulman merkitys niiden aerodynamiikkaan on samanlainen, koska kiertämällä tällaista ohjusta 90° päädytään aina aerodynaamisesti samanlaiseen muotoon. [8], [9]

Ohjuksen asento maahan sidottuun koordinaatistoon nähden kuvataan Eulerin kulmien avulla tekemällä kolme kiertoa seuraavassa järjestyksessä [3]:

1. Kierto z -akselin suhteen (suuntakulma, ψ)
2. Kierto uuden y -akselin suhteen (pituusasantokulma, θ)
3. Kierto uuden x -akselin suhteen (kallistuskulma, Φ)

Eulerin kulmat on esitetty kuvassa 12. Suuntakulman arvo 0° tarkoittaa pohjoista suuntaa ja 180° eteläistä suuntaa. Pituusasantokulma θ on kohtauskulman α ja ratakulman γ summa. MisTarget-ohjelma käyttää ohjuksen asennon laskennassa neljän parametrin menetelmään (Quaternion method), jonka avulla voidaan välttää Eulerin kulmiin liittyvä singulariteetti pysyasennossa. Tulostiedostoihin tallennetaan Eulerin kulmat, joiden avulla ohjuksen asento voidaan ymmärtää intuitiivisesti. Symmetristen krusifiksimuotoisten ilmataisteluohjusten osalta simulaatituloksissa kallistuskulma (Φ) on merkityksetön. [3], [67]

Ratalaskenta pitää sisällään liikeyhtälöt, joita integroimalla määritetään ohjuksen paikka ja asento ajan kuluessa. MisAnalysis-ohjelmiston (kuvattu lyhyesti kappaleessa 3.3) tuottamista aerodynaamisista kertoimista saadaan ohjuksen sen hetkisen tilan ja moottorin työntövoiman avulla siihen vaikuttavat voimat. Ottamalla huomioon ohjuksen asento ja massaominaisuudet saadaan voimista translaatiovapausasteiden kiihtyvyysskomponentit. Rotaatiovapausasteiden osalta vastefunktioiden ja vallitsevien kulmanopeuskomponenttien avulla saadaan kulmakiihtyvyydet. Näitä kiihtyvyyksiä ajan suhteen integroimalla saadaan ohjuksen nopeus- ja kulmanopeuskomponentit, joista edelleen paikka ja asento. Ohjelman asetuksista voidaan valita liikeyhtälöiden integroinnissa käytettävä aika-askel. [3], [67]

3.3. Ohjelman ohjusmalli

Tässä kappaleessa kuvataan MisTarget-ohjelman ohjusmalli ja esitetään siihen liittyvät rajoitukset. Tässä diplomityössä ei muodosteta ohjussalleja, joten tämä esittely pidetään lyhyenä ja tehdään toisen alatutkimuskysymyksen näkökannalta, eli mitä MisTarget-ohjelma mahdollistaa ja miten sitä voitaisiin tältä osin kehittää tukemaan paremmin ulkoisen maalitiedon käytön tutkimista. Tietoa ohjusmallin rajoituksista vaaditaan työssä toteutettavien simulaatioiden ammutaskenaarioiden laatimisessa ja niiden tulosten analysoinnissa.

Ilmavoimille tehtävän ohjussimulaatiotyön yhteydessä on kehitetty ohjuksen aerodynamiikan, työntövoiman ja massasuureiden analysointiin tarkoitetut MisDrag-, MisAero-, MisProp- ja MisMass-ohjelmat. Nämä ohjelmat on yhdistetty MisAnalysis-ohjelmistoon, joka on väline ohjusten kinemaattisen suorituskyvyn mallinnukseen, parametrisointiin ja verifiointiin. MisAnalysis-ohjelmisto on pääasiallinen työkalu ohjusten mallintamisessa MisTarget-ohjelmaan. Ennalta tuntemattoman ohjuksen mallintaminen on iteratiivinen prosessi, koska tarkkoja tietoja ohjuksesta ei tyypillisesti ole saatavilla ja ohjuksen mallintamisessa korostuu kin mallintajan kokemus. [66], [67] MisTarget-ohjelman ohjusmallin luominen on ohjelman peruskäyttäjälle käytännössä mahdotonta. Peruskäyttäjä pystyy kuitenkin muokkaamaan rajoitetusti olemassa olevia ohjussalleja, mikäli tiedossa on muokattavaa ominaisuutta vastaava parametri tai parametrit. Ohjuksien mallintamisessa voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi lähteiden [9], [49] ja [53] tietoja.

MisTarget-ohjelmaan voidaan mallintaa kappaleen 2.3 ohjusten tyyppijaon mukaisia LOAL- ja LOBL-tyyppisiä ohjuksia. Sensoreista mallinnettavissa ohjuksissa voidaan käyttää passiivista infrapunahakupäätä, puoliaktiivista tai aktiivista tutkaa. Ohjusten sensorimallinnus rajoittuu hakupään ominaisuuksiin kuten sen kääntymisnopeusrajoitukseen, näköalueeseen ja maalin etsintäviiveeseen. Sensorimallinnus ei nykyisellään mahdollista esimerkiksi maalin liikesuunnan vaikutuksen, tutkapoikkipinta-alan tai maalin etsintään kuluvan ajan huomioimista simulaatioissa. Ohjuksen P_G on siis joko nolla tai yksi, eli ohjus joko pystyy tai ei pysty lukittumaan maaliin omalla sensorillaan. Ohjusmallissa määritetään kappaleessa 2.2 esitetyn mukaisesti sen lennon vaiheisiin liittyviä toimintoja kuten loftausprofiili ja LOAL-tyyppisen ohjuksen siirtyminen loppuhakeutumisvaiheeseen. Loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen etäisyys määritetään ohjusmallissa. Ohjuksen pääsy tälle etäisyydelle maalista lasketaan ohjuksen oman paikan ja datalinkkimaalitiedossa annetun maalin paikan mukaan. Mikäli datalinkkimaalitieto on loppunut ennen tätä etäisyyttä, käytetään laskennassa viimeisten saatujen datalinkkiviestien mukaan ekstrapoloitua maalin paikkaa.

Ohjuksen geometria määrittää sen aerodynamiikan, jota kuvaavien kertoimien arviointiin voidaan käyttää MisDrag- ja MisAero-ohjelmia. Ohjusmallin tekijän on aluksi arvioitava ohjuksen päämitat, massa sekä ohjuksen komponenttien sijainti ja niiden viemä tilavuus rungon sisällä. Mittoja ja komponenttien sijainteja voidaan arvioida esimerkiksi valokuvien perusteella ja jakamalla ohjuksen runko osiin. Moottorin ajoaineen massa voidaan arvioida sen ulkomittojen ja sijainnin sekä ohjuksen iän ja tähän perustuvien suhdelukujen perusteella. Moottorin toimintaa voidaan arvioida MisProp-ohjelman avulla. Painopisteen paikka saattaa olla merkittynä ohjukseen. Lisäksi on arvioitava ohjuksen rungon paksuus ja materiaali. Ohjuksen massaominaisuuksien määrittämisessä voidaan käyttää MisMass-ohjelmaa. [66]

Ohjusten ohjauslakien osalta MisTarget-ohjelman ohjusmalliin on mallinnettu vain suhteellisen navigoinnin ohjauslaki (kappale 2.5.3). Malli sisältää myös tämän ohjauslain vahvistuksen N' taulukoinnin lentotilan mukaan, eli mallinnus sisältää adaptiivisen suhteellisen navigoinnin (kappale 2.5.4). MisTarget-ohjelman nykyisen version ohjusmalli ei mahdollista suoraa takaa-ajon (kappale 2.5.1), seurantalinjaohjauksen (kappale 2.5.2) tai laajennetun suhteellisen navigoinnin (kappale 2.5.4) ohjauslakien käyttöä. Näistä ohjauslaeista viimeinen on osittain mallinnettu, mutta sen toimintaa ei ole tätä diplomityötä kirjoitettaessa verifioitu.

Koska edes Ilmavoimien käytössä olevien ohjusten toimintaa ei täysin tunneta, voidaan mallinnuksessa vain arvioida ohjuksen liikehtimiskykyä. MisTarget-ohjelmassa ohjuksen liikehtimisen mallintaminen perustuu MisAnalysis-ohjelmistolla määritettyihin vastefunktioihin, jotka kuvaavat päätymisen ohjauslain mukaisesta kuormitusmonikertakomennosta ohjuksen vasteeseen. Mallinnus on viidennen kertaluvun malli, jolloin systeemissä on viisi viivettä aiheuttavaa komponenttia. Näistä kaksi ensimmäistä kuvaa hakupään viivettä (sen kääntyminen ja signaalinkäsittely), kolmas ohjauslain viivettä (sisältäen myös lennonohjausjärjestelmän ja ohjainpintojen aktuaattorit) ja kaksi viimeistä itse ohjuksen kääntymisen hitautta (aerodynamiikka ja momenttiyhtälöt).

Pituus- ja suuntaliikkeen vastefunktion ominaistaajuudet ja vaimennuskertoimet saadaan ohjusmalliin MisAnalysis-ohjelmistosta. Niiden laskemiseksi ohjelmaan on mallinnettu lennon ohjausjärjestelmäksi kappaleen 2.6 kolmen takaisinkytkentäsilmukan autopilotti ja näiden liikesuuntien aerodynamiikka. Vastefunktioihin voidaan vaikuttaa autopilotin vahvistuksilla ja aerodynaamisilla momenttikertoimilla. Kallistusliike on puolestaan mallinnettu ensimmäisen kertaluvun vasteella, jolle voidaan antaa yksi aikavakio koko ohjuksen lentoalueelle. Ohjusmallin aerodynamiikasta vastuksen ja nostovoiman laskenta suoritetaan edellä mainituilla MisDrag- ja MisAero-ohjelmilla arvioitujen aerodynaamisten kertoimien mukaisesti. Ohjainpintoikkeutuksien vaikutusta aerodynaamisiin ominaisuuksiin ei oteta huomioon. [67] Käyttökokemusten ja tutkimusten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että tällainen malli pystyy ennustamaan realistisesti ohjuksen liikehdinnän [49], [53], [54], [68].

Ohjusmalli kuvataan kahdessa erillisessä ohjusmallitiedostossa. Näistä toinen kuvaa ohjuksen geometrian. MisAnalysis-ohjelmisto käyttää tätä tiedostoa ohjuksen aerodynamiikan määrittämiseen. MisAnalysis-ohjelmiston tuottamat ohjuksen ominaisuudet tallennetaan MisTarget-ohjelman käyttämään ohjusmallitiedostoon. Tämä tiedosto sisältää myös esimerkiksi ohjuksen moottorin ja ohjauslait määrittävät tiedot.

MisAnalysis-ohjelmistolla muodostetun ohjusmallin käyttäytymistä torjuntatilanteissa arvioidaan MisTarget-ohjelman simulaatioilla. Tarvittaessa ohjuksen ominaisuuksia on palattava muokkaamaan simulaation tulosten perusteella, mikäli niissä esimerkiksi havaitaan epärealistista ohjuksen liikehdintää. Vaadittavia ohjusmallinnuksen tietoja on esitetty tätä tutkimusta varten laaditun ohjuksen kappaleessa 3.6 esitettävässä mallissa.

3.4. Ohjelman datalinkkimalli

Tässä kappaleessa kuvataan MisTarget-ohjelman datalinkkimallin toiminta. Ohjelmassa simulaatioiden yhtenä lähtötiedostona käytetyllä datalinkkitiedostolla kuvataan ohjukselle datalinkillä lähetettäviä maalitietoviestejä. Simuloitava ohjus käyttää tätä maalitietoa lennon keskivaiheessa maaliin hakeutumiseen ennen siirtymistään loppuhakeutumisvaiheeseen. [63], [64] MisTarget-ohjelmalla toteutettavissa simulaatioissa ei ole merkitystä mikä toimija, ohjuksen laukaissut lavetti tai kolmas osapuoli, datalinkkitietoa ohjukselle lähettää.

Datalinkkimaalitietoa voidaan käyttää aktiivisten ja puoliaktiivisten tutkaohjusten simuloineissa. MisTarget-ohjelmassa infrapunahakupäällä varustettujen ohjusten ei ole mallinnettu käyttävän datalinkkimaalitietoa. [63], [64] Kappaleessa 2.4 esitetyn mukaisesti myös nykyaikaiset infrapunaohjukset pystyvät käyttämään datalinkkimaalitietoa. Tässä diplomityössä tarkastellaan vain aktiivisia ilmataisteluohjuksia, joten muutostarvetta ei tämän työn osalta ole.

Datalinkkitiedostossa sen alkumääritteiden jälkeen alkavat rivit kuvaavat yksittäisiä ohjukselle lähetettäviä maalitietoviestejä. MisTarget-ohjelman datalinkkimallissa maalitieto annetaan kappaleessa 3.2 määritetyssä NEH-koordinaatistossa, jonka origo on ohjuksen laukaisupiste. Tiedostossa maalitietoviestejä annetaan yhden sekunnin välein. MisTarget-ohjelma muodostaa viestien paikkapisteistä jatkuvan radan ja laskee maalin nopeuden simuloiden tapaa, jolla ohjus datalinkkimaalitietoa käyttää. Maalitietoviestissä annettavalla laatuparametrilla kuvataan datalinkkimaalitiedon jatkuvuutta. Laatuparametrin arvolla nolla ohjus ei pystynyt vastaanottamaan kyseistä maalitietoviestiä¹ ja arvolla yksi ohjus pystyi vastaanottamaan sen. Puuttuvien maalitietoviestien aikana maalin paikka ekstrapoloidaan lineaarisesti käyttämällä kahden viimeisen vastaanotettua maalitietoviestin mukaista maali paikkaa. Tämä käsittely tuottaa kappaleessa 2.4 esitettyä nykyaikaisten ilmataisteluohjusten toimintatapaa selvästi heikomman ennustuksen maalin liikehännästä. Puuttuvien maalitietoviestien käsittely MisTarget-ohjelmassa tunnistetaan tämän työn kannalta jatkokehittämistarpeeksi.

Tiedostossa voidaan antaa myös maalin nopeudet NEH-koordinaatistossa. Näitä voidaan käyttää parantamaan maalin nopeustiedon tarkkuutta ja poistamaan edellä esitetty tarve laskea nopeudet paikan muutoksesta. Tätä mallinnusta ei ole vielä toteutettu tässä työssä käytettävään MisTarget-ohjelman versioon. Tämä on myös datalinkkimallin osalta tunnistettu jatkokehittämistarve.

MisTarget-ohjelmassa simuloitu aktiivinen tutkaohjus lentää ohjauslakinsa mukaisesti kohti datalinkkitiedostolla sille annettua maalin paikkaa. Ohjelman aiemman, tämän diplomityön alkuvaiheessa käytössä olleen, version toteutuksen mukaan loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttyään ohjus etsi maalin tutkansa koko näköalueelta. [63] Datalinkillä välitetyn maalitiedon hyvyden vaikutusta maalin etsimiseen ei siis ollut mallinnettu. Kappaleen 2 kirjallisuuskatsauksen perusteella tämä mallinnus ei kuvannut nykyaikaisen ilmataisteluohjuksen toimintaa eikä se ole ensimmäisen tutkimuskysymyksen vastauksina kappaleessa 2.9 esitettyjen vaatimuksien mukainen toteutus. MisTarget-ohjelman datalinkkimallin jatkokehittäminen huomioidaan datalinkillä välitetyn maalitiedon hyvyys tunnistettiin yhdeksi vastaukseksi toiseen alatutkimuskysymyksen. Sen todettiin olevan pakollinen tämän työn tutkimuksen kannalta.

¹ Ulkoisen maalitiedon hyvyden määritelmän mukaan "puuttuva maalitietoviesti"

Edellä esitetty jatkokehittämistyö toteutettiin MisTarget-ohjelmaan sen pääkehittäjän toimesta tämän diplomityön aikana ja muutoksen sisältävää versiota käytetään työssä toteutettavissa simulaatioissa. Muutoksen toteutus oli kappaleen 2 kirjallisuuskatsauksen mukainen. Muutetun datalinkkimallin kuvauksen [64] mukaan ohjuksen siirtyessä loppuhakeutumisvaiheeseen se etsii maaliaan viimeisen maalitietona annetun paikan ympärillä sijaitsevan etsintävolyymien sisältä. Datalinkkitiedoston käsittelyn rajoitusten (yhden tälle käytössä olevan arvokentän) vuoksi etsintävolyymi määritetään datalinkkitiedostossa pallonmuotoisena volyyminä sen halkaisijalla. Koska MisTarget-ohjelma ei nykyisellään mallinna ohjuksen sensorin maalin etsintää, kuvataan maalin etsimiseen etsintävolyymien sisältä kuluva aika datalinkkitiedostossa annettavalla viiveen arvolla. Loppuhakeutumisvaiheeseen siirtyminen hetki määritetään kappaleessa 3.3 esitetyn mukaisesti. Siirtymisen hetkellä sen hetkinen datalinkkimaalitieto pysäytetään paikalleen ja ohjus etsii maalin tämän pisteen ympärillä olevasta etsintävolyymistä. Ohjelma odottaa viiveen verran ennen kuin ohjus löytää etsintävolyymien sisällä olevan maalin. Viive tulee valita ohjuksen sensorin ominaisuuksien (skannausnopeuden) ja etsintävolyymien koon mukaisesti. Esimerkki tässä työssä käytetyn MisTarget-ohjelman version datalinkkitiedostosta on esitetty liitteessä 2.

Tämän datalinkkimallin muutoksen toteutusta tarkasteltaessa havaittiin, että simuloitu ohjus jäi etsimään maalia paikalleen pysäytetyn etsintävolyymien sisältä niin kauaksi aikaa, kun maali oli ohjuksen tutkan näköalueen (gimbal limits) sisällä. Tämän toteutustavan todettiin aiheuttavan ongelmia, mikäli maali lentää etsintävolyymien sisään selvästi loppuhakeutumisvaiheen alkamisen jälkeen. Tällainen tilanne voi esiintyä esimerkiksi, jos suoraviivaisesti etenevän maalin virheellinen datalinkkimaalitieto sijaitsee eteenpäin maalin liikesuunnassa. MisTarget-ohjelmaa muokattiin tämän havainnon perusteella siten, että maalin etsintää suoritetaan enintään 1 sekunti datalinkkitiedostossa annetun etsintäajan jälkeen. Mikäli maalia ei löydy etsintävolyymien sisältä, jatkaa ohjus lentoaan tilansa mukaisesti.

Datalinkkimalli ei tämän muutoksenkaan jälkeen vastaa täysin nykyaikaisten ilmataisteluohjusten tai esimerkiksi Ilmavoimien käytössä olevan Amraam-ilmataisteluohjuksen kappaleessa 2.4 esitettyjä datalinkkien toiminnallisuuksia. Pallonmuotoisella etsintävolyymillä ei kyetä huomioimaan eri sensorien ja sensoriyhdistelmien erilaisia mittaustarkkuuksia eri suunnissa. Lisäksi kappaleessa 3.3 esitettyjen sensorimallin rajoitusten vuoksi maalin etsinnän tässä kuvattu mallinnus on myös puutteellinen.

3.5. Ohjelman maalimalli

Tässä kappaleessa MisTarget-ohjelman maalimalli esitellään toisen alatutkimuskysymyksen näkökannalta, eli mitä MisTarget-ohjelma mahdollistaa ja miten sitä voitaisiin tältä osin kehittää tukemaan paremmin ulkoiseen tiedonvälityksen tarkasteluun liittyviä simulaatioita. MisTarget-ohjelmassa maalimallina voidaan käyttää lentokonemallia tai ennalta määritettyä rataa. Lentokonemallin käyttäminen vaatii ohjelmoidun autopilottitoiminnallisuuden tai ihmisen lentämään erillisen simulaation maalimallia (virtuaalisimulaatio). MisTarget-ohjelmassa ennalta määritettyinä maalin lentoratoina voidaan käyttää esimerkiksi:

1. Todellisia lennoilla tallennettuja lentoratoja
2. Simulaatiomalleilla muodostettuja tai lennettyjä lentoratoja
3. Muuten määritettyjä lentoratoja

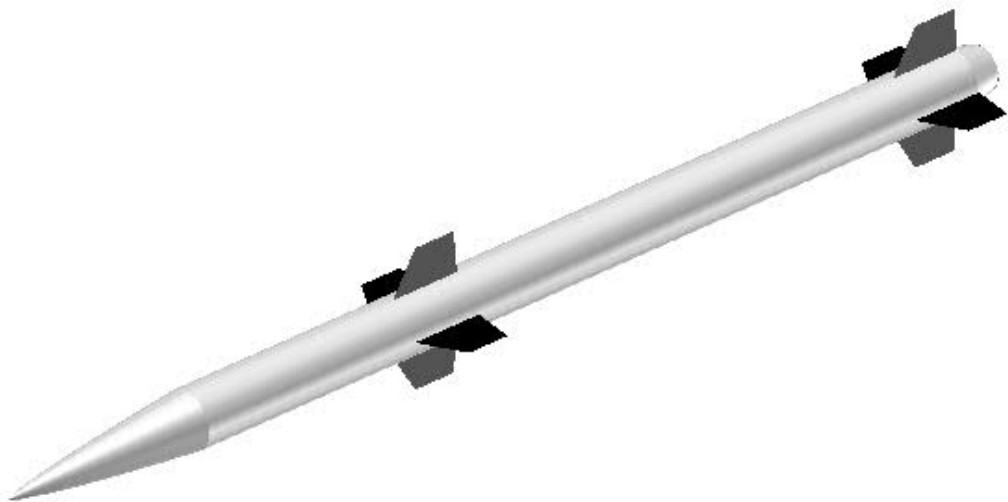
Maalin radat kuvataan kappaleen 3.2 määritelmien mukaisesti tasaisen maan NEH-koordinaatistossa. MisTarget-ohjelmassa ei tällä hetkellä ole maalia lentävää autopilottitoiminnallisuutta, mutta sen käyttöliittymän avulla voidaan muodostaa yksinkertaisia maalin lentoratoja. Näitä ovat suoraviivainen lento ja kaarrot halutulla kuormitusmonikerralla. Käyttöliittymällä voidaan valita maalin paikka, lentonopeus, lentosuunta (ψ), pituuskallistuskulma (θ) ja kaarron kuormitusmonikerran määrittävä kallistuskulma (Φ). [66], [67] Kappaleessa 3.1 kuvattu dll-kutsuna suoritettava MisTarget-ohjelman versio on jo ratkaissut jatkokehittämistarpeen sen liittämistä vuorovaikutteiseen virtuaalisimulaatioon.

Ohjelman simulaatioissa maalimalleja on käytössä kerrallaan vain yksi. MisTarget-ohjelman ohjusten sensorimalli ei myöskään simuloi usean maalin tilanteita. Ohjelmalla ei siis voida täysin tarkastella esimerkiksi tilannetta, jossa ohjus joutuu valitsemaan maalinsa usean omalla sensorillaan näkemänsä maalin joukosta tai harhautuisi väärään maaliin viiveellisen tai virheellisen datalinkkimaalitiedon vuoksi. Maalin vaihtamista voidaan tarkastella rajoitetusti muuttamalla ohjukselle syötettävää maalin paikkaa maalin vaihdon hetkellä kuvaamaan toista maalia. [67]

3.6. Diplomityötä varten muodostettu ohjusmalli

Tässä kappaleessa esitellään diplomityön simulaatioissa käytettävä MisTarget-ohjelman ohjusmalli. Mallin on muodostanut työn toisena ohjaaja toiminut ohjelman pääkehittäjä. Tarkkoja ilmataisteluohjusten malleja ei voida tarkan tiedon puutteen, tiedon salaaminen ja tämän diplomityön turvaluokituksen vuoksi muodostaa tai käyttää. Näin ollen tämä malli kuvaa tyyppillistä nykyaikaista patopainemootorilla (RamJet) varustettua aktiivista kevyttä taktista ilmataisteluohjusta. Tässä työssä ohjusmallia muokataan ohjauslakien vahvistuksien ja loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen etäisyyden osalta niiden vaikutuksen havainnollistamiseksi. Osa tämän ohjusmallin MisTarget-ohjelmaan kuvaavasta tiedostosta on esitetty liitteessä 1.

Ohjus on kappaleessa 2.3 esitetyn kaltainen LOAL-tyyppinen aktiivinen tutkaohjus, joka käyttää maaliin hakeutumiseen adaptiivista suhteellista navigointia (kappale 2.5.4). Ohjuksen patopainemoottori mahdollistaa ammuntaskenaariosta riippuen yli 100 km kantaman. Sen lennon vaiheet ovat kappaleessa 2.2 esitetyn mukaiset. Laukaisun jälkeen ohjus kiihdyttää kiinteän ajoaineen rakettimoottorin avulla riittävän suurelle nopeudelle, jotta ilmaa hengittävä patopainemoottori voi käynnistyä. Tämän jälkeen patopainemoottorin työntövoimaa säädetään polttoaineen massavirran avulla. Näin ohjuksen suurin Machin luku rajoitetaan arvoon 3.5. Ohjus käyttää laukaisun jälkeistä rakettimoottorin työntövoimaa myös loftaamiseen määritetyn profiilin mukaisesti. Lentonsa keskivaiheessa ohjus käyttää ulkoista datalinkin välityksellä saatavaa maalitietoa (maalin paikkaa) kappaleessa 2.4 kuvatun mukaisesti. Ohjus siirtyy loppuhakeutumisvaiheeseen käynnistämällä oman tutkansa 10 km etäisyydellä maalista ja etsimällä maalin datalinkillä välitetyn paikan ympäristöstä kappaleessa 3.4 kuvatun mukaisesti. Ohjuksen rakenne komponenttien sijoitteluneen on kappaleessa 2.7 esitetyn mukainen. Sen ulkoinen muoto on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13: Taktisen ilmasta-ilmaan ohjuksen pintamalli.

Kuvassa 13 ei ole esitettyä patopainemoottorin ilmanottoa eikä suihkusuutinta. Ohjus on aksiaalisesti pyörähdyssymmetrinen ja siipijärjestelyltään krusifiksimuotoinen. Ohjuksen aerodynaaminen ohjaus on toteutettu kääntyvillä taaemmilla siivillä. Ohjuksen mitat ja ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Pituus [m]	3.8
Rungon halkaisija [m]	0.2
Evien kärkiväli [m] etu / taka	0.5 / 0.5
Evien nuolikulma [°] etu / taka	30 / 30
Massa [kg]	200
Kuormitusmonikerta-raja [G]	35
Suurin Machin luku	3.5
Moottorin ajoaineen määrä [kg]	75
Kiihdytysvaiheen työntövoima [kN]	50
Patopainemoottorin työntövoima [kN]	11

Taulukko 1: Simulaatioihin käytettävän ohjuksen mitat ja ominaisuudet.

Taulukossa 1 esitetyt mittasuhteet ja massa ovat tyypillisiä tämän kokoluokan ja tyyppin ilma- taisteluohjuksille. Lukuarvot perustuvat myös tutkimustyöllä saatuihin arvioihin vastaavien ohjusten ominaisuuksista [9], [49], [53]. Ohjuksen pituus, rungon halkaisija ja evien muoto (sijainti, kärkiväli, nuolikulma) on määritetty vastaavien ohjusten valokuvien perusteella. Ohjuksen moottorin ajoaineen määrä ja työntövoima mahdollistaa tämän tyyppisille ohjuksille tyypillisen Mach 3.5 nopeuden. 35G kuormitusmonikertaraaja takaa riittävän liikehdintäkyvyn maaliin nähden ollen myös tyypillinen tämänkaltaiselle ilmataisteluohjukselle.

3.7. Yhteenveto

Kappaleessa esiteltiin diplomityön simulaatioissa käytettävä MisTarget-ohjelma, ohjelman ohjus- ja datalinkkimallit sekä minkälaisia maalimalleja simulaatioissa voidaan käyttää. Lisäksi esiteltiin tätä työtä varten muodostettu ohjusmalli. Edellä mainittuja asioita tarkasteltiin kappaleessa 2 esitettyjen ohjusten ominaisuuksien ja ulkoiselle tiedonvälitykselle esitettyjen vaatimusten pohjalta. Kappaleessa arvioitiin MisTarget-ohjelman soveltuvuutta tässä diplomityössä toteutettaviin simulaatioihin. Vastauksena toiseen alatutkimuskysymykseen tämän työn toteuttamisen kannalta tunnistettiin kaksi MisTarget-ohjelman jatkokehittämistarvetta:

1. Datalinkkimallissa on pystyttävä kertomaan ohjukselle annetun maalitiedon hyvyys ja tällä on oltava realistinen vaikutus siihen, miten ohjus toimii loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä.
2. Datalinkkimallin puuttuvien maalitietoviestien käsittelyä tulee kehittää vastaamaan nykyaikaisten ilmataisteluohjusten toimintaa esimerkiksi Kalman-suotimen mallilla.

Kappaleessa tunnistettiin myös muita jatkokehittämistarpeita erityisesti ohjusten sensorimallinnuksessa maalin etsinnän osalta, monimaalitulanteiden mallintamisessa ja datalinkkimallissa. Jatkokehittämistarpeet pohjautuvat osin kappaleen 2 kirjallisuuskatsaukseen ja sen perusteella esitettyihin vaatimuksiin ilmataisteluohjusten ulkoiselle tiedonvälitykselle sekä osin kappaleessa 3 esitettyyn MisTarget-ohjelman ja sen mallinnuksen kuvaukseen. Edellä esitetty ensimmäinen tämän työn osalta pakolliseksi tunnistettu datalinkkimallin muutos toteutettiin diplomityön aikana ohjelman pääkehittäjän toimesta ja muutettua versiota ohjelmasta käytetään työssä toteutettavissa simulaatioissa. Toisena esitettyä jatkokehittämistarvetta ei ehditty toteuttaa tämän työn aikana ja mallinnuksen puutteen vaikutuksia arvioidaan työssä toteutettavien simulaatioiden tuloksien avulla.

Työn simulaatiot on tarkoitus toteuttaa eräajotyypisinä ja näin ollen tarvetta vuorovaikutteisten virtuaalisimulaatioiden mahdollistavan MisTarget-ohjelman dll-kutsuna suoritettavan version käytölle ei ole. Tämän version rajapintamäärittelyn sisältävä muistio [65] valmistui myös liian myöhään tämän diplomityön kannalta. Eräajotyypisten simulaatioiden suorittaminen on automatisoitava sopivalla mallilla. Ensimmäisen jatkokehittämistarpeen toteuttamisen jälkeen MisTarget-ohjelman todettiin kuitenkin soveltuvan tämän diplomityön simulaatioiden toteuttamiseen.

4. MALLI ULKOISEN MAALITIEDON VAIKUTUSTEN TUTKIMISEKSI

Tässä kappaleessa kuvataan ulkoisen maalitiedon vaikutusten tutkimiseksi työssä kehitetty MisDA (Missile Datalink Analysis) niminen malli. Kappaleessa vastataan diplomityön kolmanteen alatutkimuskysymykseen ”millaisen mallin avulla tutkimuksen toteuttamiseen valittua MisTarget-ohjelmaa voidaan käyttää ulkoisen maalitiedon käytön tarkasteluissa?”. Malli sisältää myös sen ohjelmallisen toteutuksen. Kappaleessa vastataan osaltaan myös toiseen alatutkimuskysymykseen, mikäli mallin kannalta tunnustetaan MisTarget-ohjelman jatkokehittämistarpeita. Kappaleessa esitetään ensin yleiskuvauksena MisDA-mallin jako kahteen osaan. Tässä osassa selvitetään miksi, milloin ja miten MisDA-mallin eri osia voidaan käyttää sekä miten ne eroavat toisistaan. Tämän jälkeen esitetään ensimmäisen osan kuvaus, ohjelmallinen toteutus ja esimerkkejä sillä tuotetuista arvioista. Tämän jälkeen esitetään mallin toisen MisTarget-ohjelmaa käyttävän osan konseptuaalinen kuvaus ja ohjelmallinen toteutus. Lopuksi esitetään mallin verifiointi ja validointi sekä yhteenveto kappaleesta. MisDA-mallilla toteutettuja tarkasteluja esitetään kappaleessa 5. Kappaleen 6 vastauksessa toiseen alatutkimuskysymykseen jatkotutkimusmahdollisuuksien osalta huomioidaan myös tämän kappaleen havainnot.

MisDA-mallin ensimmäinen osa on täysin itsenäinen ohjelma, joka soveltuu yksinkertaisissa maalitilanteissa ohjuksen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen tarkasteluun. Tämän osan tuloksina saadaan vain arvio ohjuksen kyvystä lukittua maaliin omalla sensorillaan. MisTarget-ohjussimulaatio-ohjelman todettiin kappaleessa 3 esitetyn mukaisesti soveltuvan edellä mainitun tutkimuksen tarkasteluihin, mutta vaadittavien simulaatioiden toteuttaminen on automatisoitava. Mallin toinen osa käyttää MisTarget-ohjelmaa eräajotyypillisesti monimutkaisienkin ammuntaskenaarioiden tarkasteluihin. MisDA-mallin ensimmäisen osan arvioita voidaan käyttää apuna toisen osan tarkasteluissa. Kaikki tarkastelut voidaan suorittaa vain MisDA-mallin toisella osalla, mutta sen käyttö vaatii ensimmäistä osaa enemmän aikaa.

4.1. MisDA-mallin yleiskuvaus

MisDA-mallin osien käyttö valitaan tarkasteltavan tilanteen mukaan. Mallin ensimmäisellä osalla voidaan tuottaa yksinkertaisessa maalitilanteessa arvio siitä, kykeneekö ohjus löytämään maalin etsintävolyymien sisältä sen siirtyessä loppuhakeutumisvaiheeseen. Tämä mallin osa ei käytä ohjusmallia eikä siten huomioi lainkaan ohjuksen ominaisuuksien vaikutusta. Tällä MisDA-mallin osalla voidaan tuottaa ”nyrkkisääntöjä” sille, miten maalitiedon paikan virhe ja viive vaikuttavat ilmataisteluhajun suorituskykyyn. Mallin kannalta ohjuksen P_G arvo on 0 tai 1.

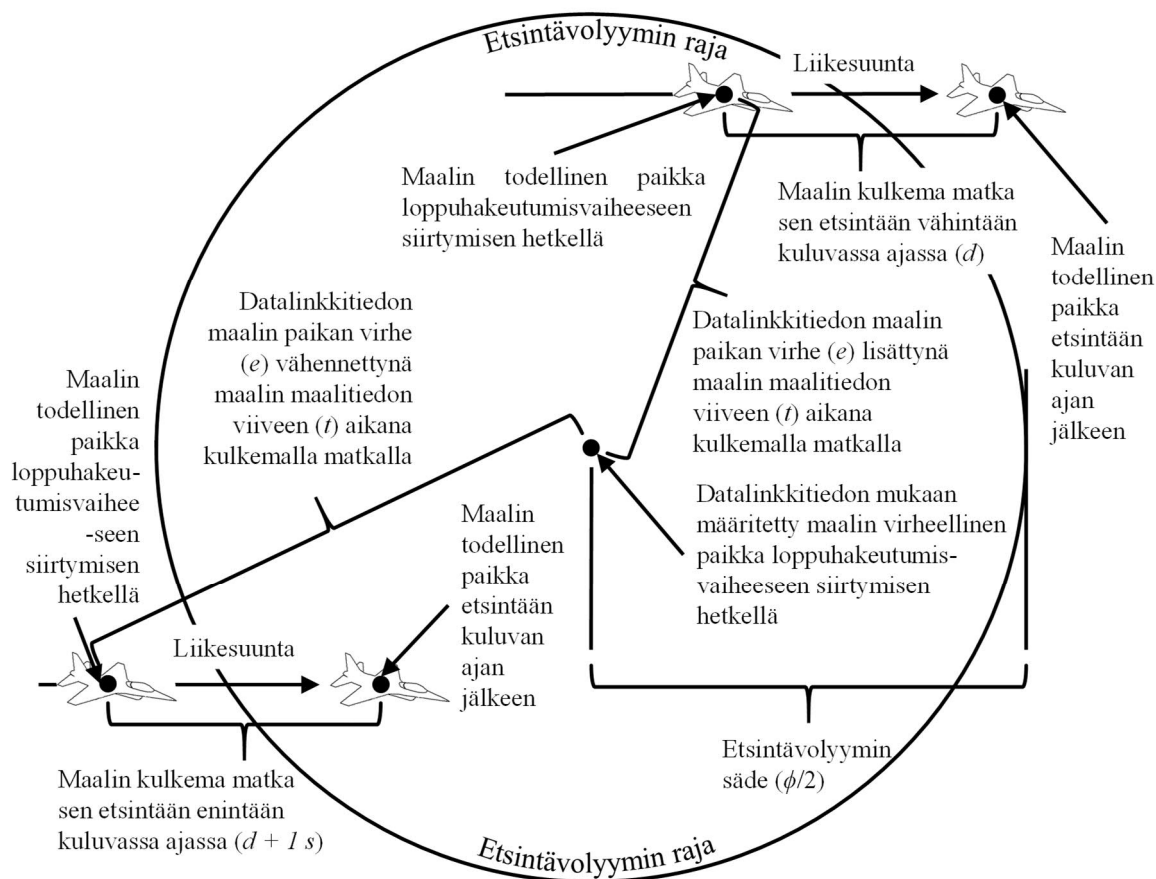
Mallin toinen osa käyttää MisTarget-ohjelmaa tuottaakseen tarkan simulaation ammuntaskenaariorista. Mallin ensimmäisellä osalla tuotettuja arvioita voidaan käyttää toisen osan tarkastelemissa niissä varioitavien parametrien suuruuden ja vaihteluvälin määrittämiseen. Mallin toisella osalla voidaan suorittaa kaikki tarkastelut, mutta tarkastelujen toteuttaminen vaatii enemmän aikaa ensimmäisen osan käyttö. On myös huomioitava, että vain mallin toinen osa huomioi täysin maalin lentoradan ja ohjuksen toiminnan torjuntaan asti.

4.2. MisDA-mallin ensimmäinen osa

4.2.1. Konseptuaalinen kuvaus

Ilmataisteluoituksen suorituskyky riippuu täysin siitä, näkeekö ohjus maalin omalla sensorillaan ja pystyykö ohjus lukittumaan siihen loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä. Kappaleen 2.8 mukaan tämän työn simulaatioiden osalta tarkastelun kohteena loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen hetkellä on vain se, pystyykö ohjus lukittumaan maaliin. Kappaleessa 2.4 esitetyn mukaisesti maalin ollessa loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä ohjuksen etsintävolyymin ulkopuolella, ei ohjus voi nähdä maalia omalla sensorillaan ja siksi P_G saa arvon 0. Kappaleen 3.4 MisTarget-ohjelman datalinkkimallin kuvauksen perusteella tilanteeseen vaikuttaa myös maalin etsintään loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä käytettävä aika. Edellä esitetyn mukaisesti ohjuksen ulkoisen maalitiedon vaikutuksesta ohjuksen suorituskykyyn voidaan saada alustava arvio perustuen maalin sijaintiin ja liiketilään sekä datalinkkimaalitiedon hyvyyteen loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä.

Kappaleen 3.4 mukaisesti datalinkkimaalitieto pysäytetään loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen hetkellä ja maali etsitään tämän paikan ympärillä olevan pallonmuotoisen etsintävolyymin sisältä. Maalin etsintään kuluva aika annetaan datalinkkitiedostossa ja etsintä voi jatkua enintään sekunnin tämän jälkeen. Maali liikkuu liikesuuntansa mukaisesti etsintään kuluvana aikana. Maalin etsintää loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä etsitetyn mukaisesti havainnollistetaan kuvan 14 avulla.



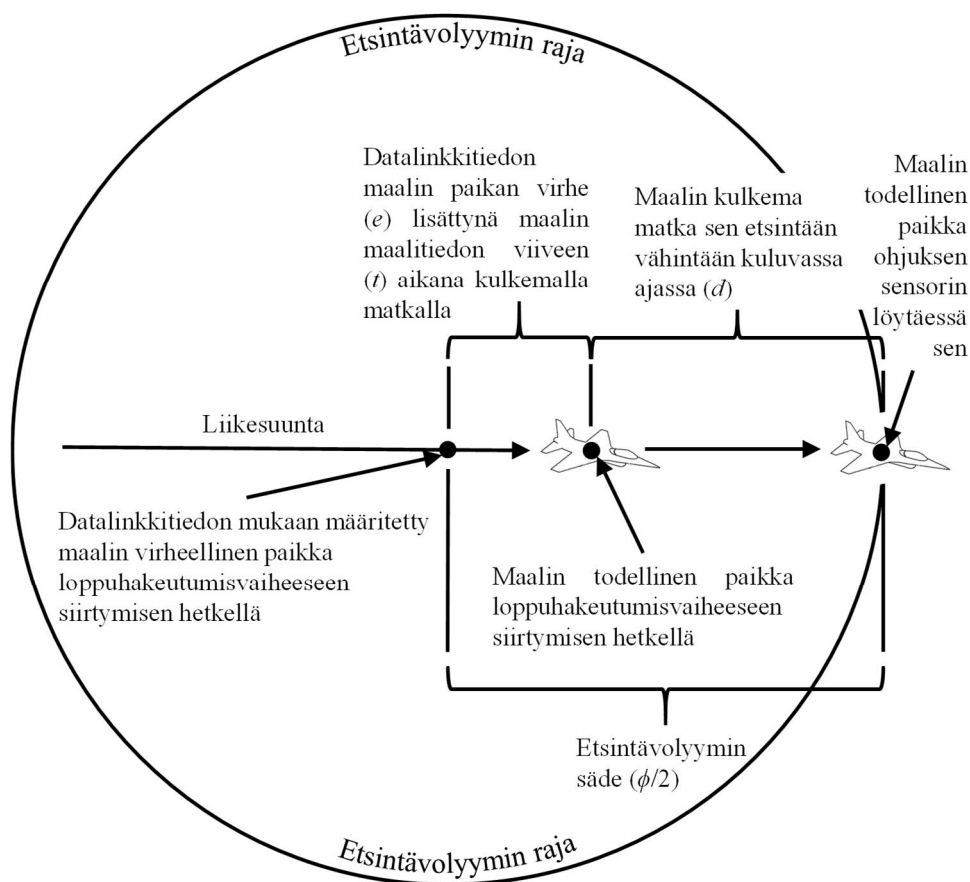
Kuva 14: Maalin etsintä loppuhakeutusvaiheeseen siirryttäessä.

Kuvan 14 oikealla ylhäällä oleva maali on loppuhakeutusvaiheeseen siirryttäessä etsintävolyymin sisällä, mutta ehtii ulos etsintävolyymista ennen kuin ohjuksen tutka löytää sen eli P_G saa arvon on 0. Kuvan 14 vasemmalla alhaalla maali on loppuhakeutusvaiheeseen siirryttäessä etsintävolyymin ulkopuolella, mutta ehtii volyymin sisään tutkan etsiessä maalia ja P_G saa arvon on 1. Maalin etsintään kuluva aika (d) riippuu etsintävolyymin koosta (ϕ).

Tilanne on tarkasteltavissa yksinkertaisella mallilla, jos maalin liikehdintä on likimain suoraviivaista etsinnän aikana ja maalitiedon hyvyden osalta tarkastellaan vain paikan virhettä (e) ja/tai maalitiedon viivettä (t). Puuttuvien maalitietoviestien käsittely monimutkaistaa tilannetta tämän mallin käsittelyn ulkopuolelle. Mallin haittana on myös se, ettei siinä huomioida lainkaan ohjuksen toimintaa. Näin ollen mallilla ei voida huomioida ohjuksen liikehdinnän tai tämän työn havaintojen perusteella parannetun ohjuksen sensorimallin toiminnan vaikutusta etsintään. Tämä MisDA-mallin ensimmäinen osa ei myöskään huomioi tapahtumia ohjuksen maaliin lukittumisen jälkeen. Suuri virhe maalitiedossa saattaa estää ohjuksen hakeutumisen taistelulatauksen vaikutuksen etäisyydelle maalista, vaikka P_G arvo on 1. Näiden rajoitusten vuoksi tällä mallilla on vain rajoitettua käyttöarvoa viimeiseen alaturkimuskysymykseen vastattaessa.

Tässä kappaleessa esitettävällä MisDA-mallin ensimmäisellä osalla voidaan tuottaa edellä esitetyissä tilanteissa arvio siitä, kykeneekö ohjus löytämään maalin etsintävolyymiin sisältä loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä. Tämä mallin osa perustuu MisTarget-ohjelman tässä työssä käytössä olevan datalinkkimallin pallonmuotoiseen etsintävolyymiin ja kappaleessa 3.4 kuvattuun maalin etsintään loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä.

Tarkastellaan tilannetta yksinkertaistamalla sitä huomioimalla vain paikan virhe maalin liikesuunnassa ja maalitiedon viive. Kuvassa 15 tilanne esitetään maalitiedon virheen ollessa taaksepäin maalin liikesuunnassa tai jos maalitiedossa on viivettä.



Kuva 15: Maalin etsintä loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä paikan virheen ollessa maalin liikesuunnassa taaksepäin.

Kuvassa 15 esitetyssä tilanteessa maali päätyy etsinnän aikana etsintävolyymien rajalle, josta ohjuksen tutka vielä juuri löytää sen. Maalitiedon paikan virheen (e) sekä maalin maalitiedon viiveen (t) ja pienimmän mahdollisen etsintäajan (d) aikana kulkeman matkan summa on siis etsintävolyymien säde. Kuvassa 15 maalitiedon paikan virhe on maalin liikesuunnassa taaksepäin eli negatiivinen.

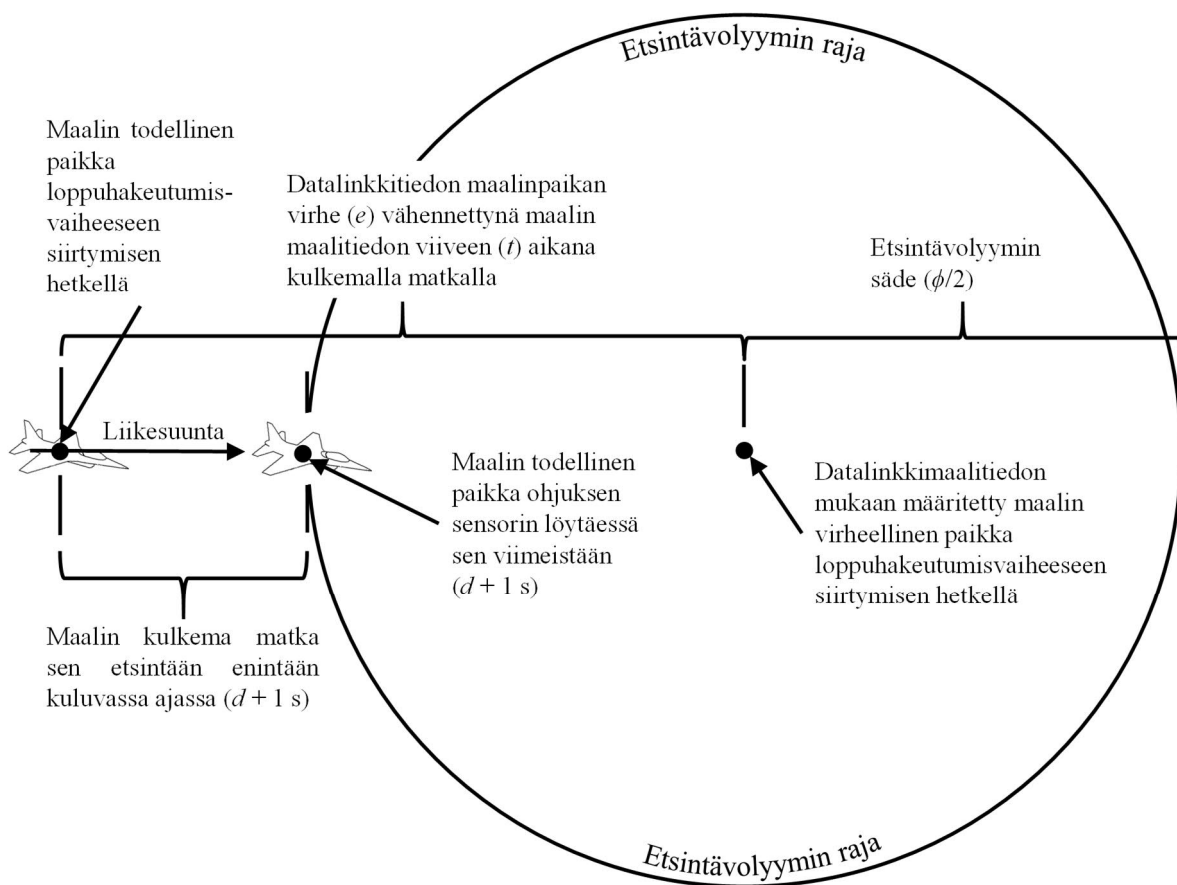
Viive datalinkkimaalitiedossa vastaa vaikutuksiltaan datalinkkimaalitiedon negatiivista paikan virhettä maalin liikesuunnassa. Eli maalin liikkuesssa pohjoiseen maalitiedon viive vastaa paikan virhettä etelään. Koska maalin on oltava etsintävolyymin sisällä etsinnän päättyessä, voi se kuvan 15 mukaisesti edetä loppuhakeutusvaiheeseen siirtymisen jälkeen enintään puolet etsintävolyymin halkaisijasta. Tämä voidaan esittää kaavan muodossa seuraavasti:

$$\frac{\phi}{2} = V(d + t) - e = aMa(d + t) - e ,$$

jossa ϕ on etsintävolyymin halkaisija, d maalin etsintäviive, t maalitiedon viive ja e maalin paikan virhe sen liikesuunnassa. Maalin nopeus V voidaan lausua myös paikallinen lentokorkeudesta riippuvan äänennopeuden a ja Machin luvun Ma tulona. Edellä esitetty kaava voidaan ratkaista viiveen t , maalin Machin luvun ja maalin paikan virheen e suhteen seuraavasti:

$$t = \frac{\phi + 2e}{2aMa} - d , \quad Ma = \frac{\phi + 2e}{2a(d+t)} \quad \text{ja} \quad e = aMa(d + t) - \frac{\phi}{2} .$$

Tarkastellaan kuvan 16 avulla positiivista virhettä maalin liikesuuntaan.



Kuva 16: Maalin etsintä loppuhakeutusvaiheeseen siirryttäessä paikan virheen ollessa maalin liikesuunnassa eteenpäin.

Kuvan 16 tilanteessa maalitiedon paikan virhe (e) on eteenpäin maalin liikesuuntaan eli positiivinen. Tilanteessa maali päättyy etsinnän aikana etsintävolyymin rajalle, josta ohjuksen tutka vielä juuri löytää sen. Tässä tilanteessa ohjus voi etsiä maalia koko sille sallitun etsintäajan, eli MisTarget-ohjelman mallinnuksen mukaan pienimmän mahdollisen etsintäajan lisättyä yhdellä sekunnilla ($d+1$). Koska maalin on oltava etsintävolyymin sisällä sen etsinnän päättyessä, voidaan tilanne esittää matemaattisen kaavan muodossa seuraavasti:

$$e - Vt = V(d + 1) + \frac{\emptyset}{2} \quad \text{tai} \quad e - aMat = aMa(d + 1) + \frac{\emptyset}{2},$$

joka voidaan ratkaista maalin paikan virheen e , viiveen t ja maalin Machin luvun suhteen seuraavasti:

$$e = aMa(d + 1 + t) + \frac{\emptyset}{2}, \quad t = \frac{e - \emptyset/2}{aMa} - d + 1 \quad \text{ja} \quad Ma = \frac{e - \emptyset/2}{a(d+1+t)}.$$

Edellä esitettyjen kaavojen perusteella voidaan ratkaista ammuntaskenaariokohtaisesti sallittuja maalitiedon paikan virheitä, viiveitä tai niitä vastaavia lentonopeuksia (Machin lukuja).

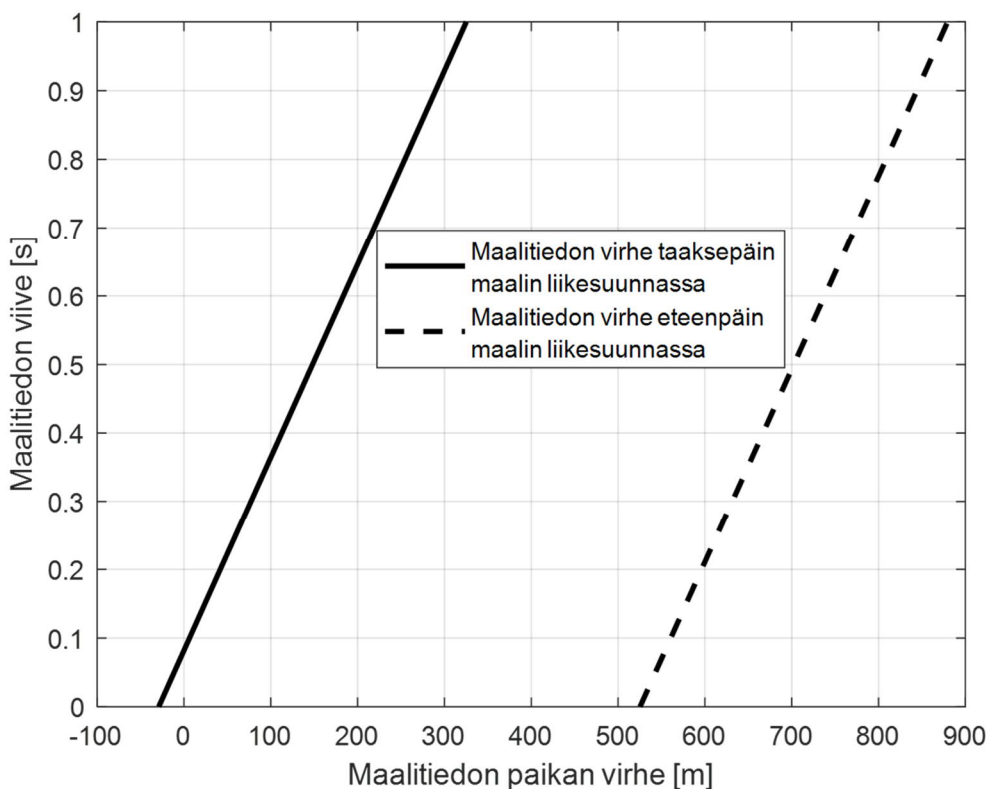
4.2.2. Ohjelmallinen toteutus

Tässä kappaleessa kuvataan edellisessä kappaleessa konseptuaalisesti kuvatun MisDA-mallin ensimmäisen osan ohjelmallinen toteutus sekä esitetään sillä tuotettuja arvioita tukemaan kappaleen 5 simulaatioita. Konseptuaalisen kuvauksen mukainen tietokoneohjelma päätettiin ohjelmoida Matlab-ohjelmiston [26] avulla, koska se tarjoaa intuitiivisen ohjelmointikielen, tehokkaat tekstitiedostojen luku- ja kirjoitusrutiinit sekä valmiit tulosten jälkikäsitteilytyökälyt. Lisäksi Matlab-ohjelmistolla voidaan suorittaa ohjelmia komentoriviltä tai dll-kutsuina, ohjelmoida käyttöliittymä sekä kääntää sillä tehty ohjelma käyttöliittymineen ilman Matlab-ohjelmistoa toimivaksi itsenäiseksi ohjelmaksi.

MisDA-mallin ensimmäisen osan ohjelmallinen toteutus laskee edellisessä kappaleessa esitettyjen matemaattisten kaavojen mukaan sallittuja maalin paikan virheitä ja viiveitä maalin lentonopeuden ja -korkeuden mukaan. Käyttäjä valitsee lukitut ja varioitavat parametrit, joiden perusteella ohjelma päättää käytettävän matemaattisen kaavan. Tämän jälkeen ohjelma varioi parametreja valituilla välillä, laskee niitä vastaavat tulokset ja tulostaa lopuksi kuvaajan.

Mallin ohjelmoinnin aikana kiinnitettiin erityistä huomiota etsintävolyymien halkaisijan ja maalin etsintäajan väliseen suhteeseen. Koska MisTarget-ohjelma ei kappaleen 3.3 mukaisesti mallinna maalin etsintää ohjuksen sensorilla, on maalin etsimiseen kuluva aika arvioitava. Tämä aika riippuu etsintävolyymien koosta. Lähteen [12] perusteella etsintäaikana päädyttiin käyttämään etsintävolyymien halkaisijaa jaettuna tuhannella. Näin ollen esimerkiksi etsintävolyymien halkaisijalla 1000 m maalia etsitään vähintään 1 s ja etsintävolyymien halkaisijalla 200 m maalia etsitään vähintään 0.2 s. Kappaleessa 3.4 esitetyn mukaisesti, jos maali ei tämän etsintäajan kuluttua ole etsintävolyymien sisällä, etsintää jatketaan 1 s ajan. Etsintävolyymien halkaisijan ollessa 200 m, maalin tulee olla etsintävolyymien sisällä 0.2–1.2 s välisenä aikana ohjuksen siirryttyä loppuhakeutumisvaiheeseen, jotta ohjus löytää maalin.

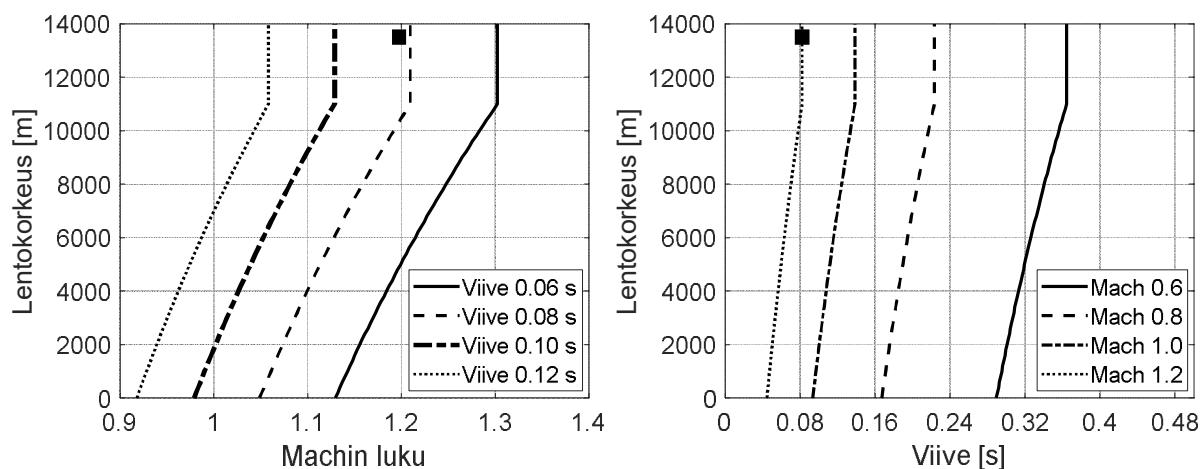
Esimerkkinä MisDA-mallin ensimmäisen osan käytöstä kuvassa 17 esitetään maalitiedon paikan virheen ja viiveen välinen yhteys ammuntaskenaariossa, jossa maali lensi nopeudella Mach 1.2 45000 jalan (ft) lentokorkeudella. Tarkastelussa etsintävolyymien halkaisija oli 200 m ja sitä vastaava etsintäaika vähintään 0.2 s ja enintään 1.2 s. Arvot on valittu edustamaan hävittäjätutkan etäisyysmittauksen epävarmuutta hävittäjäkokoluokan maaliin ja ohjustutkan etsintänopeutta (skannausnopeutta) lähteen [12] mukaisesti.



Kuva 17: Maalitiedon paikan liikesuuntaisen virheen ja maalitiedon viiveen suhde esimerkiskenaariossa.

Maalitiedon maalin liikesuuntaisen paikan virheen ja viiveen yhdistelmän on sijoitettava kuvan 17 rajaviivojen välissä, jotta ohjus voi löytää maalin omalla sensorillaan. Kuvan mukaisesti tämän skenaarion arvoilla ilman maalitiedon viivettä sallittu paikan virhe on välillä -29 m ja 525 m. Viiveen kasvaessa maalitiedon virhettä voi olla vain maalin liikesuunnan suuntaan. Muutoin maali ei pysy etsintävolyymien sisällä. Viiveen ollessa yli 0.082 s tulee maalitiedon virheen olla aina eteenpäin maalin liikesuuntaan, jotta ohjus pystyy löytämään maalin. Paikan virheen arvojen käytössä on huomioitava, että ne viittaavat aina paikkaan maalin liikesuunnassa. Maalin liikesuunta ei välttämättä ole datalinkkitiedon koordinaatiston akseleiden suuntainen².

Viive datalinkkimaalitiedossa vastaa vaikutuksiltaan datalinkkimaalitiedon paikan virhettä maalin liikesuunnassa ja viiveen suuruuden vaikutus maalin pysymiseen etsintävolyymien sisällä riippuu sen lentonopeudesta. Toisena esimerkkinä MisDA-mallin ensimmäisen osan avulla tuotetuista arvioista esitetään kuvaajat maalitiedon viiveen ja maalin lentonopeuden välisestä yhteydestä lentokorkeuden funktiona standardi-ilmakehässä. Kuvaajat muodostettiin kuvaa 17 vastaten ilman maalin paikan virhettä, 200 m etsintävolyymien halkaisijalla ja 0.2 s maalin etsintäviiveellä. Nämä kuvaajat on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18: Viiveen ja Machin luvun suhde lentokorkeuden funktiona esimerkiskenaariossa.

² Datalinkkitieto annetaan kappaleessa 3.4 esitetyn mukaisesti kappaleessa 3.2 määritetyssä NEH-koordinaatistossa, jonka origo sijaitsee ohjuksen laukaisupisteessä.

Kuvan 18 vasemmalla puolella on esitetty maalitiedon viivekäyrät Machin luvun ja lentokorkeuden funktioina. Käyrien mukaisilla viiveillä maali päättyy etsintäajan aikana etsintävolyymien rajalle. Kuvan 18 oikealla puolella on esitetty Machin luvut viiveen ja lentokorkeuden funktioina. Käyrien mukaisilla Machin luvuilla maali päättyy etsintäajan aikana etsintävolyymien rajalle. Jotta ohjus voi lukittua maaliin loppuhakeutumisvaiheeseen siirtyessään, tulee skenaarion arvojen sijaita kuvaajissa käyrien vasemmalla puolella. Machin luku ei muutu tropaauksissa korkeuksilla 11–20 km, koska lämpötila pysyy siellä vakiona. Tämän johdosta arvot pysyvät vakioina 11 km – 20 km korkeusvälillä ja kuvaajissa lentokorkeutta ei ole esitetty 14 km yläpuolelle.

Kuvaajiin lisätyt pisteet esittävät kuvan 17 skenaarion mukaista maalia ilman maalitiedon paikan virhettä. Koska hävittäjälentokoneiden taktiset nopeudet ovat tyypillisesti yli Mach 0.8–0.9, ei ulkoisen tiedonvälityksen viive saa kuvan 18 mukaisesti yli 0.1 s. Tämä viiveen arvo on korostettu paksunnetulla viivalla vasemmanpuoleisessa kuvaajassa. Vastaavasti etsintävolyymien halkaisijan ollessa 1000 m tulisi viiveen olla alle 0.3 s. Ilmataistelutilanteissa nopeudet saattavat kuitenkin nousta ylääänipuolelle, jolloin ulkoisen maalitiedon viiveen tulisi olla suuruusluokaltaan 0.05 s 200 m etsintävolyymien halkaisijalla.

4.3. MisDA-mallin toinen osa

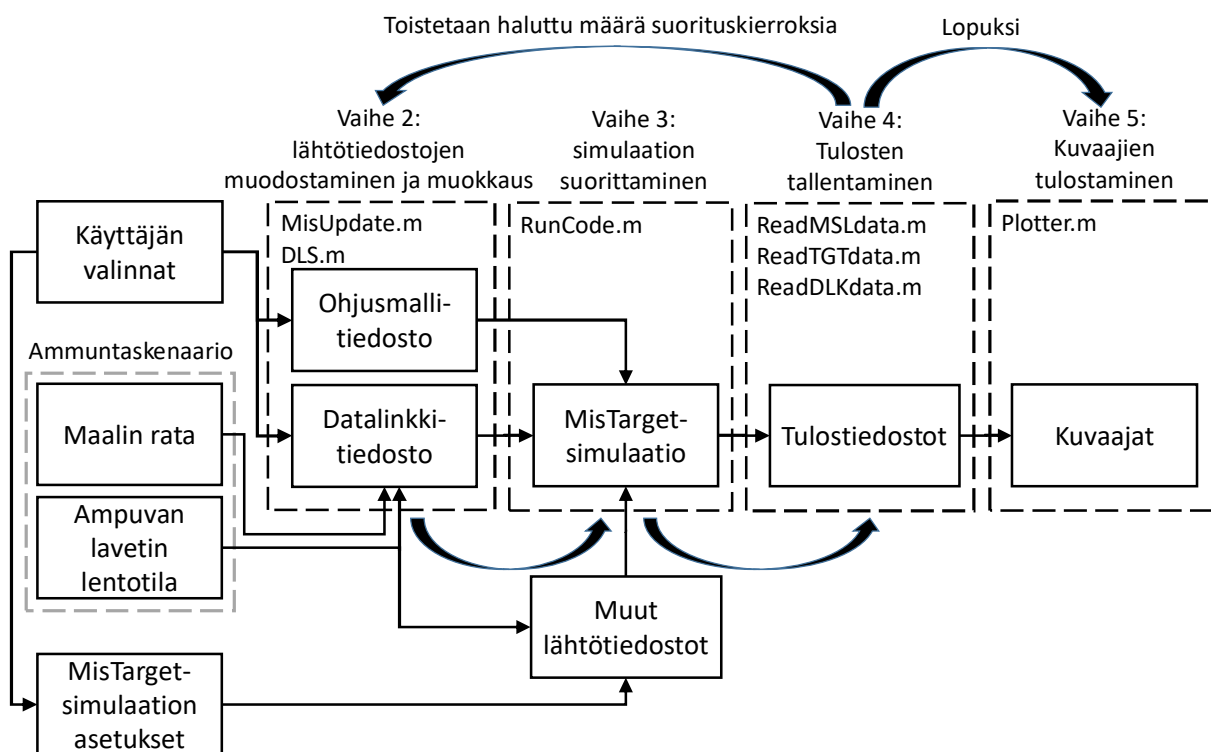
4.3.1. Konseptuaalinen kuvaus

Tässä kappaleessa esitetään työssä kehitetyn MisDA-mallin toisen osan konseptuaalinen kuvaus. Tämän osan avulla toteutetaan ohjuslaukaisujen tarkasteluja eräajotyyppeinä, jolloin tietokone suorittaa MisTarget-ohjelman simulaatioita ennalta määritetyillä, kunkin skenaarion mukaisilla, varioitavien parametrien arvojoukoilla. MisTarget-ohjelman lähtötiedostoja muutetaan skenaarion ja siinä varioitavien parametrien mukaisesti. Tämän työn simulaatioissa varioitavat parametrit ovat neljännen alatutkimuskysymyksen mukaiset eli virheet maalin paikassa, viive maalitiedossa ja puuttuvat maalitietoviestit. Mallin on muokattava kunkin simulaation datalinkkitiedostoa näiden parametrien mukaisesti. Simulaatiot suoritetaan ohjuksen laukaisuhetkestä pienimpään ohitusetäisyyteen tai asetettuun simulaation ajalliseen keston saakka. Kaikkien ohjelman nykyisten ominaisuuksien tulee pysyä käytettävänä. Mallin ohjelmallinen toteutus tehdään siten, ettei MisTarget-ohjelman jatkokehittäminen rajoita sen käyttöä, kunhan MisTarget-ohjelman lähtö- ja tulostiedostot pysyvät nykyisellään.

Vaatimukset mallille on esitetty edellä ja kappaleessa 1. Mallin kehityksessä huomioitiin kappaleessa 2 esitetyt nykyaikaisten ilmataisteluoohjusten ominaisuudet ja vaatimukset ulkoiselle tiedonvälitykselle sekä kappaleessa 3 esitetyt MisTarget-ohjelman aiheuttamat vaatimukset ja rajoitukset mallin toteutukselle. MisDA-malli automatisoi lähtötiedostojen muodostamisen ja muokkaamisen sekä suorittaa MisTarget-simulaatiot eräajotyypisesti lähtötiedostoja käyttäen. Käyttäjä valitsee skenaariossa varioitavat parametrit, niiden muutokset ja suoritettavien simulaatioiden määrän. Eräajon valmistuttua malli tulostaa tulokset analysointiin sopivassa muodossa. MisDA-mallin yhden kierroksen eteneminen jaetaan seuraaviin viiteen vaiheeseen:

1. Luodaan vertailutulokset suorittamalla simulaatio alkuperäisellä virheettömällä datalinkkimaalitiedolla ja alkuperäisillä ohjusmallin ohjauslain vahvistuksilla.
2. Muodostetaan datalinkkimaalitiedosto tarkastelun mukaisten virheiden, viiveiden ja puuttuvien maaliviestien mukaan. Muokataan ohjusmalliin tarkastelun mukaiset ohjauslain vahvistukset.
3. Suoritetaan simulaatio.
4. Tallennetaan simulaation tulokset.
5. Tulostetaan tuloksista kuvaajat.

Mallin vaiheessa 1 suoritetaan MisTarget-ohjelman simulaatio kerran vertailutulosten luomiseksi, jos niiden katsotaan olevan tarkastelun kannalta tarpeellisia. Tällöin datalinkkimaalitiedossa annettava maalin paikkatieto vastaa sen todellista rataa. Vaiheessa 2 muodostetaan uusi datalinkkimaalitiedosto tarkastelun mukaisten maalitiedon hyvyttä kuvaavien valintojen mukaan seuraavaa simulaatiota varten. Virheetön datalinkillä ohjukselle välitettävä maalitieto vastaa suoraan ennalta määritettyä maalin lentorataa. Maalitiedon virheiden ja viiveen vaikutusten tarkastelemiseksi maalin rataa lisätään virhekomponentteja valituissa suunnissa (north, east, height), siirretään paikkatietoa ajassa eteenpäin tietoon syötettävän viiveen verran sekä muutetaan viestien laatuparametrin arvoa kuvaamaan puuttuvia maalitietoviestejä. Lisäksi ohjusmallia voidaan muokata suhteellisen navigoinnin vahvistuksen osalta. Tämän jälkeen vaiheessa 3 suoritetaan MisTarget-ohjelman simulaatio kierrosta vastaavilla datalinkki- ja ohjusmallitiedostoilla. Vaiheessa 4 tallennetaan simulaation tulokset. Vaiheita 2–4 toistetaan haluttu määrä suorituskierroksia varioitavien parametrien arvoilla ja lopuksi vaiheessa 5 tuloksista tulostetaan kuvaajat analyysiä varten. Valmiiden kuvaajien lisäksi tallennettuja tuloksia voidaan analysoida käyttäjän parhaaksi katsomalla tavalla. Mallin konseptuaalinen kuvaus voidaan esittää kuvan 19 mukaisena lohkokaaaviona.



Kuva 19: MisDA-mallin toisen osan konseptuaalinen kuvaus lohkokaaavana.

Malli etenee kuvan 19 mukaisesti vasemmalta oikealle edellä esitettyjen vaiheiden mukaisesti. Vaihetta 1 (vertailutulosten luominen) ei ole sisällytetty kuvaan. Kuvan 19 vasemman laidan laatikot määrittävät suoritettavien simulaatioiden asetukset. Käyttäjän valinnoilla tarkoitetaan MisTarget-ohjelman simulaation asetuksia ja edellä esitettyjä MisDA-mallin varioitavia parametreja. Maalin rata ja ampuvan lavetin lentotila määrittävät ammuntaskenaarion. Edellä esitetyn vaihejaon mukaisesti kuvan 19 keskiosassa sijaitsevia vaiheita 2–4 toistetaan haluttu määrä suorituskierruksia. Mallissa eräajon simulaatiokierroksen tulokset eivät vaikuta seuraavien kierrosten toteutukseen, vaan simulaatiot toteutetaan ennalta määritetyn ammuntaskenaarion, käyttäjän valintojen ja simulaation asetusten mukaisesti. Eräajo päättyy kuvan oikean laidan kuvaajien piirtoon. Kuvassa 19 katkoviivoilla eriteltyihin vaiheisiin on merkitty myös niissä suoritettavien aliohjelmien nimet seuraavassa kappaleessa esitettävän mallin ohjelmallisen toteutuksen mukaisesti.

4.3.2. Ohjelmallinen toteutus

Tässä kappaleessa kuvataan edellisessä kappaleessa konseptuaalisesti esitetyn MisDA-mallin toisen osan ohjelmallinen toteutus sekä siihen liittyvän ohjelman ja apuohjelmien toiminta. Mallille esitetyt vaatimukset ja konseptuaalisen kuvauksen täyttävä tietokoneohjelma ohjelmoitiin Matlab-ohjelmiston [26] avulla mallin ensimmäisen osan tapaan ja samoista kappaleesta 4.2.2 esitetyistä syistä.

MisDA-mallin toisessa osassa MisTarget-ohjelman simulaatioiden suorittamiseen vaadittavia lähtötiedostoja muodostetaan ja muokataan Matlab-ohjelmistolla ohjelmoituilla aliohjelmilla. Näiden aliohjelmien ja MisTarget-ohjelman suoritus komennetaan pääohjelmasta ja simulaation suorituksen jälkeen aliohjelma tulostaa tulokset havainnolliseen muotoon kuvaajiksi. Mallin ohjelmallinen toteutus etenee kuvan 19 mukaisesti ja seuraavassa esitettävät aliohjelmat on sisällytetty kuvassa esitettyihin mallin vaiheisiin.

4.3.2.1. Mallin etenemisen ohjaaminen

RunCode.m -pääohjelma ohjaa koko mallin etenemistä kuvan 19 lohkokaaavion mukaisella tavalla. Se alustaa varioitavat parametrit käyttäjän valintojen mukaan, huolehtii MisTarget-ohjelman lähtötiedostojen hallinnasta kansiorakenteessa sekä kääntää MisTarget-simulaatioiden suorittamisen vaiheissa 1 ja 3. Vaiheissa 2, 4 ja 5 se kääntää ja ohjaa aliohjelmien suorituksen. RunCode.m -pääohjelma tallentaa aliohjelmilla tulostiedostoista luetut simulaatioiden tulokset Matlab-työtilaan, josta käsin niitä voidaan analysoida Matlab-ohjelmiston eri työkaluilla.

4.3.2.2. Datalinkkitiedoston muodostaminen

DLS.m -aliohjelma muodostaa ReadTGTdata.m -aliohjelman lukemasta maalin lentoradasta kappaleen 3.4 kuvauksen mukaisen datalinkkitiedoston. Tämä aliohjelma suoritetaan mallin vaiheessa 2 RunCode.m -pääohjelman käskemänä. Datalinkkitiedosto muodostetaan käyttäjän valintojen mukaisesti lisäämällä maalin todelliseen lentorataan viive ja/tai lisäämällä paikkatietoihin virheet. Datalinkkimaalitieto kirjoitetaan tiedostoon kappaleessa 3.2 määritetyssä NEH-koordinaatistossa, jonka origo on ohjuksen laukaisupiste. Viiveen lisääminen datalinkkimaalitietoon toteutetaan siirtämällä paikkatiedon aika-arvoja käyttäjän valitseman viiveen verran. Koska MisTarget-ohjelmaa käytettäessä maalin lentorata määritetään ohjuksen laukaisuhetkestä eteenpäin, jää viiveen lisäämisen jälkeen sen alusta pois viiveen verran tietoja. Nämä tiedot ekstrapoloidaan käyttämällä lentoradan ensimmäisiä pisteitä. Kunkin maalitietoviestin laatuparametrin arvoa voidaan muuttaa kuvaamaan puuttuvaa maalitietoviestiä. Vaikka maalin nopeustietoa ei MisTarget-ohjelmassa käytetä, tulostetaan tiedostoon oikeanmuotoinen nopeustieto tulevaisuuden toiminnallisuutta varten. Datalinkkimaalitiedot muodostetaan maalin radasta varmistaen, että datalinkkimaalitiedon ajallinen kesto jatkuu loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen yli. Liitteessä 2 on esitetty esimerkki muodostetusta datalinkkitiedostosta.

4.3.2.3. Ohjusmallin muokkaaminen

MisUpdate.m -aliohjelma lukee ohjusmallitiedoston muokattavaksi. Siitä voidaan tämänhetkellä aliohjelman toteutuksella muokata loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen etäisyyttä³ ja kappaleessa 2.5.4 esitetyn adaptiivisen suhteellisen navigoinnin vahvistustaulukon arvoja⁴. RunCode.m -pääohjelma käskää tämän aliohjelman suorittamisen vaiheessa 2, mikäli loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen etäisyys tai vahvistustaulukko on annettu kyseisellä suorituskierroksella. Toteutuksen tarkoituksena on mahdollistaa ohjuksen lentorataan huomattavasti vaikuttavan etäisyyden ja ohjauslain vahvistuksen arvojen muuttaminen. Vahvistusmatriisi annetaan lentokorkeuden ja Machin luvun funktiona. Liitteen 1 kohdassa ”TRANGE” on esitetty loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen etäisyys ja kohdassa ”Navigation gains for the PN control” vahvistustaulukon arvot kappaleessa 3.6 esitetyle tämän työn simulaatioissa käytettävälle ohjukselle.

4.3.2.4. Tulostiedostojen luku

ReadMSLdata.m, ReadTGTdata.m ja ReadDLKdata.m -aliohjelmat lukevat tiettyjen MisTarget-ohjelman simulaation tulostiedostojen sisällön Matlab-työtilaan tulosten analysointia varten. Tämän lisäksi ReadTGTdata.m -aliohjelmaa käytetään maalin radan lukemiseen datalinkitiedoston muodostamista varten. DLS.m -aliohjelma käskää tätä varten aliohjelman suorittamisen MisDa-mallin vaiheessa 2. RunCode.m -pääohjelma puolestaan käskää näiden aliohjelmien suorittamisen vaiheessa 4. Tulokset luetaan niiden käsittelemisen helpottamiseksi simulaatiokohtaisesti Matlab-struktuureihin. RunCode.m -pääohjelma kokoaa tulosstruktuurin aliohjelmien lukemista tulostiedostoista ja MisDA-mallin toisen osan muodostamasta datalinkkimaalitiedosta. Struktuureiden avulla viittaaminen ammuntaskenaarion eräajon kierrosten simulaatioiden tuloksiin on helppoa, koska ne sisältävät myös tulosparametrien kuvaavat nimet. Esimerkki simulaation tulosstruktuurista on esitetty kuvassa 20.

³ Loppuhakeutumisvaiheeseen siirtyminen on esitetty aktiivisen tutkaohjuksen osalta kappaleessa 2.3.2. MisTarget-ohjelman simulaatioissa loppuhakeutumisvaiheeseen siirtyminen on määritelty kappaleessa 3.3. Etäisyys määritetään ohjuksen sensorin suorituskyvyn mukaan. Sensorien suorituskyvyistä (havaintoetäisyyksistä hävittäjäkokoluokan maaliin) on esitetty arvioita kappaleessa 2.3.

⁴ Adaptiivinen suhteellisen navigoinnin ohjauslaki on esitetty kappaleessa 2.5.4. Realististen simulaatiotulosten varmistamiseksi vahvistustaulukon arvot tulee valita väliä 3–5 kappaleessa 2.5.3 esitetyn mukaisesti.

Field	Value
TGTdata	1x1 struct
MSLdata	1x1 struct
DLSdata	1x1 struct

Field	Value
sim_1	1x1 struct
sim_2	1x1 struct
sim_3	1x1 struct

Field	Value
time	1683x1 double
north	1683x1 double
east	1683x1 double
height	1683x1 double
v	1683x1 double
alpha	1683x1 double
beta	1683x1 double
gamma	1683x1 double
Q	1683x1 double
R	1683x1 double
psi	1683x1 double
theta	1683x1 double
mach	1683x1 double
nz	1683x1 double
maxnz	1683x1 double

Kuva 20: MisDA-mallin tallentama Matlab-tulosstrukturi.

Kuvassa 20 esitettyyn tulosstrukturiin on tallennettu maalin rata (TGTdata), ohjuksen kuvan alaosan mukaiset tulosparametrit (MSLdata) sekä ohjuksen vastaanottama ja käsittelemä datalinkkimaalitieto (DLSdata). Kukin näistä kolmesta sisältää skenaarion kolmen eräajon simulaatiokierroksen tulokset (sim_1, sim_2 ja sim_3). Tallennetut ohjuksen tulosparametrit on esitelty ja määritelty kappaleessa 3.2.

4.3.2.5. Kuvaajien muodostaminen tuloksista

Plotter.m -aliohjelma muodostaa tässä työssä toteutettujen simulaatioiden tuloksina esitetyt kuvaajat tulosstruktuurin parametreista. RunCode.m -pääohjelma käskää tämän aliohjelman suorittamisen ammuntaskenaarion käsittelyn loppuun vaiheessa 5. Tulosten analyysin kannalta tärkeimmät kuvaajat esittävät ohjuksen ja maalin ratoja sekä datalinkkimaalitietoa. Matlab-ohjelman piirtorutiinit mahdollistavat myös kolmiulotteisten kuvaajien vapaan kääntämisen ja kohdistamisen. Kuvaajia esitetään kappaleessa 5 toteutettujen simulaatioiden tuloksina. Lentoradoista kolmesta eri suunnasta esitetyt kuvaajat muodostettiin Plotter.m -aliohjelman muodostamasta kolmiulotteisesta kuvasta katsontakulmaa kääntämällä.

4.4. MisDA-mallin verifiointi ja validointi

Tässä kappaleessa esitetään työssä kehitetyn kaksiosaisen MisDA-mallin sekä sen ohjelmallisten toteutusten toiminnan verifiointi ja validointi. Verifioinnilla tarkoitetaan tässä mallin mukaisten ohjelmien ja aliohjelmien virheettömän toiminnan varmistamista [1]. Validoinnilla puolestaan tarkoitetaan mallin sopivuuden varmistamista tässä diplomityössä tehtävään tutkimukseen [1], eli vastausta kysymykseen: ”voidaanko kehitetyn mallin avulla tarkastella ulkoisen maalitiedon hyvyyden vaikutusta ilmataisteluohjauksen suorituskykyyn?”.

Tässä tutkimuksessa käsitellään MisTarget-ohjelman ja työssä käytetyn ohjusmallin verifiointia vain työn aikana niihin tehtyjen kappaleessa 3.7 esitettyjen muutosten osalta. Muilta osin MisTarget-ohjelman sekä sen datalinkki- ja ohjusmallien verifiointi on jo suoritettu tämän työn ulkopuolella. Molempien on todettu toimivan virheettömästi. MisTarget-ohjelma kuuluu MisDA-mallin toisen osan validointiin, koska mallin toista osaa on validoinnissa tarkasteltava MisTarget-ohjelman sisältävänä kokonaisuutena. Validointiin kuuluvat myös MisTarget-ohjelmaan sekä sen datalinkki- ja ohjusmalleihin tämän työn havaintojen perusteella tehdyt muutokset.

4.4.1. Verifiointi

MisDA-mallin ja sen ohjelmallisen toteutuksen verifiointi suoritettiin mallin ohjelmoinnin aikana osissa. Mallin toisen osan verifiointi suoritettiin ennen ensimmäisen osan verifiointia, koska ensimmäisen osan verifioinnissa käytettiin vertailuihin toisella osalla tuotettuja tuloksia. Ensin verifioitiin toisen osan erillisten aliohjelmien toiminta yksittäin ja tämän jälkeen yhdistämällä ne kehitetyn mallin mukaiseksi ohjelmaksi.

Tulostiedostojen luvun (ReadMSLdata.m, ReadTGTdata.m ja ReadDLKdata.m) verifiointi suoritettiin vertaamalla Matlab-struktuureiden arvojoukoiksi luettujen parametrien arvoja alkuperäisen tekstitiedoston parametrien arvoihin sekä muodostamalla parametreista kuvaajia. Kuvaajia verrattiin MisTarget-ohjelman tulostiedostojen sisältämiin parametrien arvoihin sekä MisTarget-ohjelman käyttöliittymän muodostamiin kuvaajiin. Kuvaajien muodostamisen (Plotter.m) verifiointi voitiin suorittaa samanaikaisesti. Vertailujen perusteella tulostiedostojen luvun ja kuvaajien muodostamisen todettiin toimivan virheettömästi.

Ohjusmallin muokkauksen (MisUpdate.m) verifiointi suoritettiin vertaamalla alkuperäistä ohjusmallitiedostoa aliohjelmalla kirjoitettuun ohjusmallitiedostoon. Ensin varmistettiin, että ilman muokkauksia aliohjelma kirjoitti täysin identtisen tiedoston alkuperäiseen tiedostoon verrattuna. Molemmilla tiedostoilla suoritettiin sama simulaatio, joiden tuloksien varmistettiin olevan identtiset. Tämän jälkeen varmistettiin, että ohjusmallin muokkaukset tallentuvat tiedostoon oikeassa muodossa. Tämän jälkeen loppuhakeutumisasiheeseen siirtymisen etäisyyden muuttamista tarkasteltiin useilla MisTarget-ohjelman simulaatioilla. Virheetön toiminta varmistettiin laskemalla simulaatioiden tulostiedostoista loppuhakeutumisasiheeseen siirtymisen etäisyydet ja vertaamalla niitä ohjusmalliin valittuihin arvoihin. Lopulta MisTarget-ohjelman simulaatioita suorittamalla varmistettiin myös, että adaptiivisen suhteellisen navigoinnin vahvistuksen muuttamisen vaikutus ohjuksen lentorataan oli kirjallisuudessa [51], [53] esitetyn mukainen. Loppuhakeutumisasiheeseen siirtymisen etäisyyden muuttaminen verifioitiin kappaleessa 5.3 esitetyn skenaarion simulaatioissa ja adaptiivisen suhteellisen navigoinnin vahvistusten muuttaminen verifioitiin kappaleessa 5.6 esitetyn skenaarion simulaatioissa. Mainituissa kappaleissa on esitetty tuloksia verifiointin simulaatioista. Suoritettujen vertailujen ja simulaatioiden perusteella ohjusmallin muokkauksen todettiin toimivan virheettömästi.

Datalinkkitiedoston muodostamisen (DLS.m) verifiointi suoritettiin vertaamalla aliohjelmalla kirjoitetun datalinkkitiedoston arvoja MisTarget-ohjelman simulaatioiden tulostiedostojen sisältämään maalin rataan. Lisäksi verrattiin tiedostojen arvoista tulostettuja kuvaajia. Vertailu suoritettiin ensin ilman datalinkkitietoon lisättäviä maalin paikan virheitä ja maalitiedon viivettä, jolla varmistettiin, että radat olivat tällöin identtiset. Tämän jälkeen maalin rataan lisättiin maalitiedon viivettä ja varmistettiin maalin paikan arvojen pysyneen samoina, mutta siirtyneen ajassa eteenpäin. Seuraavaksi varmistettiin erisuuntaisten maalin paikan virheiden siirtyminen oikein datalinkkimaalitietoon. Tämä toteutettiin sekä vertaamalla tiedostojen maalin paikan arvoja että piirtämällä tiedostojen maalin paikoista kuvaajat ja vertaamalla niitä toisiinsa. Viimeisenä varmistettiin puuttuvien maalitietojen käsittelyä ohjaavan parametrin, etsintävolyymien halkaisijan ja maalin etsintäajan arvojen tallentuminen virheettömästi datalinkkitiedostoon. Toteutettujen vertailujen ja simulaatioiden perusteella datalinkkitiedoston muodostamisen todettiin toimivan virheettömästi. Kappaleessa 5 esitettyjen skenaarioiden simulaatioissa tarkastellaan maalin paikan virheiden, maalitiedon viiveen ja puuttuvien maalitietoviestien vaikutuksia maalin lentorataan. Kappaleessa 5 esitettäviin lentoratojen kuvaajiin on piirretty maalin todellinen paikka ja datalinkkitiedoston mukainen virheellinen maalin paikka, mikäli maalitietoon syötettiin virheitä. Suoritettujen vertailujen ja simulaatioiden perusteella datalinkkitiedoston muodostamisen todettiin toimivan virheettömästi.

Edellä kuvatuista aliohjelmista koostuvan MisDA-mallin toisen osan ohjelman verifiointi toteutettiin suorittamalla useita simulaatioita. Virheettömällä datalinkkimaalitiedolla suoritettujen simulaatioiden tuloksia verrattiin maalin paikan virheitä ja maalitiedon viiveitä sisältävällä datalinkkimaalitiedolla suoritettuihin simulaatioihin. Maalin etsintää etsintävolyymien sisältä tarkasteltiin ensin ilman etsintäaikaa. Tällöin ohjus löysi maalin yksittäisten erisuuntaisten maalin paikan virheiden ollessa etsintävolyymien sädettä pienempiä tai yhdistettyjen erisuuntaisten maalin paikan virheiden summavektorin pituuden ollessa etsintävolyymien sädettä pienempi.

Seuraavaksi verifioitiin datalinkkimaalitiedon puuttuvien maaliviestien toiminta MisTarget-ohjelman simulaatioissa. Tämä toteutettiin vertaamalla ensin toisiinsa tulostiedostoihin tallentuneita maalin todellista paikkaa sekä ohjuksen vastaanottaman ja käsittelemän datalinkkimaalitiedon maalin paikkaa. Tämän jälkeen edellä mainittuja verrattiin MisDA-mallin muodostaman datalinkkimaalitiedon maalin paikkaan. Vertailut toteutettiin kuvaajien avulla. Näin voitiin varmistua MisDA-mallin muodostaman datalinkkitiedoston käsittelystä kappaleessa 3.4 esitetyn mukaisesti. Vertailuissa maalin ratoina käytettiin sekä suoraviivaisia että kaartuvia maalin ratoja. Datalinkkimaalitiedon puuttuvien maalitietoviestien toiminta todettiin virheettömäksi.

Verifiointissa tarkasteltiin erikseen maalin etsintää etsintävolyymien sisältä loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä. Verifiointi suoritettiin varioimalla maalin lentoarvoja, etsintävolyymien halkaisijaa, etsintäviivettä sekä datalinkkimaalitiedon maalin paikan virhettä ja maalitiedon viivettä. Maalin liike etsinnän aikana huomioitiin simulaatioiden tulosten analysoinnissa kappaleen 4.2.1 mukaisesti. Maali saattoi sen liikesuunnasta ja nopeudesta riippuen ehtiä etsintäaikana etsintävolyymien sisäpuolelta sen ulkopuolelle tai toisinpäin. MisDA-mallin ensimmäinen osa osoittautui erittäin käyttökelpoiseksi tässä yhteydessä. Verifiointissa käytettiin MisDA-mallin ensimmäisellä osalla tuotettuja kuvaajia, joista on esitetty esimerkkejä kappaleessa 4.2.2. Tarkasteluja toteutettiin myös usean kappaleessa 5 esitetyn skenaarion simulaatioissa. Molemmat mallin osat tuottivat samat tulokset niissä skenaarioissa, joissa ensimmäistä osaa voitiin soveltaa. Suoritettujen tarkastelujen perusteella mallin ohjelmallisen toteutuksen todettiin toimivan näiltäkin osin virheettömästi.

4.4.2. Validointi

MisDA-mallin ensimmäinen osan todettiin soveltuvan alustavien arvioihin tuottamiseen data-linkkimaalitiedon paikan virheiden ja maalitiedon viiveen vaikutuksista ohjuksen suorituskykyyn. Sen avulla voidaan tuottaa nopeasti ”nyrkkisääntöjä” erilaisten skenaarioiden osalta sallituista maalin paikan virheiden ja maalitiedon viiveen suuruuksista yksinkertaisissa tilanteissa. Sen tuottamia tuloksia voidaan myös käyttää hyödyksi MisDA-mallin toisella osalla toteutettavissa tarkasteluissa. MisDA-mallin ensimmäisen osan validoinnin vastauksena todetaan: MisDA-mallin ensimmäisen osan avulla voidaan tarkastella ulkoisen maalitiedon hyvyyden vaikutusta ilmataisteluohjuksen suorituskykyyn.

MisDA-mallin toinen osa soveltuu suuren simulaatiomäärän suorittamiseen kerralla automatisoidusti. Määrää rajoittaa käytännössä vain tietokoneen tallennuskapasiteetti. Tavanomaisella tämän diplomityön aikaan käytössä olleella kannettavalla tietokoneella simulaatioita voidaan suorittaa kerralla satoja tuhansia. Ohjelma voidaan siis jättää kehitetyn mallin ohjaamana esimerkiksi yön ajaksi suorittamaan eräajoja. Käytännössä suurimman osan tarkasteluista toteuttamiseen riittää alle kymmenen simulaation suorittaminen eräajona, mikä kestää muutaman sekunnin. MisDA-mallin toisella osalla voidaan toteuttaa myös kaikki ensimmäisellä osalla toteutettavat tarkastelut, eikä sen soveltamisessa ole mallin ensimmäisen osan rajoituksia. MisDA-mallin toisen osan validoinnin vastauksena todetaan: MisDA-mallin toisen osan avulla voidaan tarkastella ulkoisen maalitiedon hyvyyden vaikutusta ilmataisteluohjuksen suorituskykyyn.

4.5. Yhteenveto

Kappaleessa vastattiin diplomityön kolmanteen alatutkimuskysymykseen toteuttamalla malli ulkoisen maalitiedon vaikutusten tutkimiseksi. Tämä kaksiosainen MisDA-malli esiteltiin kappaleessa sen konseptuaalisista kuvauksista ohjelmallisten toteutuksien kautta verifiointiin ja validointiin. Mallin ensimmäisellä osalla voidaan tuottaa yksinkertaisessa maailanteessa arvio siitä, kykeneekö ohjus löytämään maalin etsintävolyymien sisältä sen siirtyessä loppuhakeutumisvaiheeseen. Mallin toisella osalla ulkoisen maalitiedon käytön tarkastelut toteutetaan MisTarget-ohjelman eräajotyyppeinä simulaatioina. Molempien mallien ohjelmallinen toteutus ohjelmoitiin Matlab-ohjelmistolla. Mallin verifiointissa sen molempien osien ohjelmallisen toteutuksen ja MisTarget-ohjelmaan tämän työn tarpeiden perusteella tehtyjen muutosten todettiin toimivan virheettömästi. Verifiointituloksia ei esitetty tässä kappaleessa, vaan kappaleessa 5 esitettävät työssä toteutetut simulaatiot toimivat tässä tarkoituksessa. Validoinnin osalta mallin molempien osien todettiin soveltuvan niiden tarkoitettuun käyttöön. MisDA-mallia kehitettäessä ei havaittu uusia MisTarget-ohjelman jatkokehittämistarpeita tämän diplomityön osalta, joten vastausta toiseen alatutkimuskysymykseen ei tarvitse täydentää tämän kappaleen perusteella.

5. SIMULAATIOT

Tässä kappaleessa esitetään diplomityössä toteutetut simulaatiot ja niiden tulokset. Tähän kappaleeseen koottujen simulaatioiden tuloksien avulla kappaleessa vastataan viimeiseen neljänteen alatutkimuskysymykseen ”miten virheet maalin mitatussa tilassa, viive välitetyssä ulkoisessa maalitiedossa ja puuttuvat maalitietoviestit vaikuttavat ilmataisteluohjuksen suorituskykyyn?”. Simulaatiot toteutettiin kappaleessa 4 esitetyn MisDA-mallilla toisella osalla, joka käytti simulaatioiden suorittamiseen kappaleessa 3 esitettyä MisTarget-ohjelmaa. Simulaatioiden maalitiedon paikan virheiden ja viiveiden arvojen määrittämiseen käytettiin MisDA-mallin ensimmäistä osaa.

Tässä kappaleessa esitetään ensin millä periaatteilla ja perusteilla simulaatioiden ammuntaskenaariot määritettiin. Tämän jälkeen skenaarioiden yleiskuvauksessa esitetään niiden toteuttamiselle yhteiset valinnat, kuten simulaatioiden asetukset ja tulostaulukoissa esitetyt tiedot. Tämän jälkeisissä kappaleissa esitetään skenaariokohtaisesti niiden erityispiirteet sekä simulaatioiden tulokset. Lopuksi tehdään johtopäätökset kappaleesta.

5.1. Skenaarioiden muodostaminen

Simulaatioiden toteuttamiseksi voidaan muodostaa ääretön määrä erilaisia ammuntaskenaarioita. Tässä diplomityössä toteutettujen ammuntaskenaarioiden valinta perustui viimeiseen alatutkimuskysymykseen vastaamiseen sekä MisDA-mallin verifiointin tarpeisiin. Työssä käytettävissä olleet resurssit sekä simulaatioiden tuloksien analyysiin käytettävissä ollut aika rajoittivat tarkasteltavien ja erityisesti tässä raportissa esitettävien skenaarioiden määrää. Uusia skenaarioita voidaan toteuttaa jatkotutkimuksissa.

Skenaarioiden muodostamisessa huomioitiin kappaleessa 1.4 esitetyt tämän diplomityön rajaukset sekä MisTarget-ohjelman ja MisDA-mallin rajoitukset. Skenaarioiden valintaan vaikuttivat myös kappaleen 2 kirjallisuuskatsauksella kerätyt tiedot nykyaikaisten ilmataisteluohjusten käyttöperiaatteista ja muissa tutkimuksissa ohjuksen väistöliikედinnän tarkasteluissa käytetyistä ammuntaskenaarioista. Edellä mainittuja ammuntaskenaarioita on esitetty esimerkiksi lähteissä [11], [40], [42], [51], [53], [59] ja [68]. Kirjallisuuskatsauksen perusteella ohjuksen ohitusetäisyyden minimoinnin kannalta hankalimpia yksinkertaisia helposti määritettäviä maalin lentoratoja ovat S-mutkat ja tynnyri. [53]

Tässä työssä käytettävällä MisTarget-ohjelman versiolla ei voitu kappaleessa 3.1 esitetyn mukaisesti huomioida maalin reagoimista ohjukseen. Vastaavasti kappaleen 3.3 mukaan ohjelmassa ei tätä diplomityötä tehtäessä ollut mallinnettuna ohjuksen sensorien toimintaa sillä tarkkuudella, että esimerkiksi tutkaan vaikuttavalla maalin liikehännällä olisi ollut merkitystä ohjuksen toimintaan. Ohjelman tässä versiossa ei ollut myöskään mallinnettu ampuvan lavetin tai muiden verkon jäsenten sensoreita. Maalin lentoradoilla on tässä työssä toteutettavissa simulaatioissa merkitystä vain ohjuksen kinematiikkaan ja kappaleen 4.2.1 mukaisesti ohjuksen maalinetsintään loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä. Todellisuudessa esimerkiksi maalin nopeudella ja liikesuunnalla on merkitystä datalinkkimaalitietoa tuottavien sensoreiden havaintokykyyn ja mittauksen tarkkuuteen. Näillä on puolestaan suora vaikutus maalitiedon hyvyteen. Vastaavat vaikutukset näkyvät todellisuudessa myös ohjuksen oman sensorin tuottamassa maalitiedossa. Datalinkkimaalitietoa tuottavien sensoreiden osalta edellä esitetty vaikutus tarkasteltiin epäsuorasti ilman mallinnusta toteuttamalla simulaatiot käyttäen erisuuntaisia paikan virheitä ja erisuuruisia viiveitä.

Edellä mainitut seikat sulki pois osaltaan tarpeen hävittäjätaktiikan mukaisen liikehännän käytöstä skenaarioissa. Monimutkaisten ilmataistelutaktiikan mukaisten ohjuksen väistöliikehännälentoratojen tuottaminen vaatii hävittäjäohjaajakoulutetun henkilön osaamista. Työssä ei käytettävissä olleen ajan puitteissa ollut mahdollista ottaa mukaan tällaista henkilöä tuottamaan maalin lentoratoja, eikä työn turvaluokitus mahdollistanut tällaisten simulaattorista tai lennoilta tallennettujen maalin ratojen käyttämistä. Työn puitteissa ei ollut myöskään mahdollista ohjelmoida tarkasteluihin sopivaa autopilottitoiminnallisuutta.

Esitetyn perusteella skenaarioissa käytettiin vain kappaleessa 3.5 esitetyn MisTarget-ohjelman maalimallin mukaisia ennalta määritettyjä lentoratoja. Maalin radat muodostettiin itse ja MisTarget-ohjelman käyttöliittymän avulla. Pääosin skenaarioissa käytetyt hyvin yksinkertaiset, eli suoraa lentoa tai kaartoja sisältäneet, radat muodostettiin tukemaan tämän diplomityön tavoitteita sekä MisDA-mallin verifiointia. Radat olivat yksinkertaisia, jotta simulaatioiden tuloksista kyettiin erottamaan maalitiedon hyvyden vaikutukset ja näiden perusteella vastaamaan neljänteen alatutkimuskysymykseen. Maalin radat muodostettiin jatkamaan selvästi ohjuksen ja maalin kohtaamista pidemmälle.

Skenaarioissa ei siis käytetty varsinaisia maalilentokoneiden malleja tai niiden avulla muodostettuja ratoja, mutta maalin radoilla kuvattiin hävittäjälentokonetyyppisen maalin toimintaa. Skenaarioiden muodostamisessa huomioitiin kattavasti ohjuksen nopeuden ja korkeuden määrittämä lentoalue, sen moottorin toiminta-aika sekä kantama. Simulaatioissa näihin vaikuttavat ohjuksen laukaisutilanteen lentoarvot ja maalin lentorata. Maalin lentoratojen osalta huomioitiin realistinen lentoalue, liikehdintä ja liikesuunnat. Maalin lentoradat olivat kaikissa skenaarioissa realistisia siten, että hävittäjälentokone pystyisi ne toteuttamaan tyypillisten aerodynaamisten ja rakenteellisten liikehdintärajoitteiden (kuormitusmonikerta, kulmanopeudet, kaartosäde ym.) puitteissa.

Erilaisia ammuntaskenaarioita muodostettiin tässä diplomityössä kymmeniä. Jokaisen skenaarion osalta erilaisia simulaatioita suoritettiin satoja tai tuhansia. Nämä simulaatiot sisälsivät kattavasti erilaisia yhdistelmiä maalitiedon hyvyuden varioitavista parametreista, eli maalin paikan virheestä, maalitiedon viiveestä ja puuttuvista maalitietoviesteistä. Lisäksi simulaatioissa tarkasteltiin ohjuksen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen etäisyyden ja suhteellisen navigoinnin vahvistuksen muuttamisen vaikutuksia ohjuksen suorituskykyyn. Pääosa toteutetuista simulaatioista ei tuottanut uutta tietoa jo toteutettujen simulaatioiden tuloksiin nähden. Tässä raportissa esitetään kaiken kaikkiaan yli kahdestakymmenestä muodostetusta skenaariosta viisi skenaariota ja osa niiden mukaisesti toteutetuista simulaatioista tuloksineen. Näiden viiden skenaarion ja niiden mukaisten simulaatioiden avulla voidaan vastata neljänteen tutkimuskysymykseen.

Ensimmäisessä kolmessa skenaariossa tarkasteltiin lähestyvän ja loittonevan maalin ammuntaskenaarioita. Näiden tarkoituksena oli osoittaa MisTarget-ohjelman tässä työssä esitettyjen vaatimusten mukaan parannetun datalinkkimallinnuksen ja MisDA-mallin toimivuus. Erityistä huomiota kiinnitettiin maalin liikkeen vaikutukseen loppuhakeutumisvaiheen maalinetsintään. Toisen skenaarion osalta tarkasteltiin myös loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen etäisyyden vaikutusta. Tämän jälkeen siirryttiin kaartavaan maaliin. Lopuksi tarkasteltiin ohjuksen lennon aikaista maalin vaihtoa ja suhteellisen navigoinnin ohjauslain vahvistuksen vaikutusta ohjuksen suorituskykyyn. Simulaatioiden yhtenä tarkoituksena oli myös osoittaa ohjusmallin ominaisuuksien merkittävä vaikutus simulaatioiden tuloksiin ja esitellä MisDA-mallin käyttömahdollisuuksia.

5.2. Skenaarioiden yleiskuvaus

Tässä kappaleessa esitetään skenaarioiden yleiskuvaus sisältäen kaikille skenaarioille yhteiset valinnat, kuten MisTarget-ohjelman simulaatioiden asetukset. Skenaariokohtaiset valinnat esitetään kunkin skenaarion kappaleessa kuvauksen yhteydessä. Skenaarioissa on pääsääntöisesti suoritettu MisDA-mallin kuvauksen mukaisesti ensin yksi simulaatio virheettömällä datalinkkimaalitiedolla vertailutulosten luomiseksi.

Kaikissa simulaatioissa käytettiin simulaatioiden aika-askeleena 0,001 s, tulospaarametriien tallennusvälinä 0,01 s ja maalin lentoradan aika-askeleena 0.2 s. MisTarget-ohjelman stokastisia komponentteja ei käytetty, eli simulaatiot toteutettiin täysin deterministisinä. Ohjus laukaistiin aina NEH-koordinaatiston origosta pohjoiseen kunkin skenaarion mukaiselta lentokorkeudelta ja -nopeudelta. Tämä laukaisu suunta valittiin eri skenaarioiden kannalta yhdenmukaisen tulosten käsittelyn ja kuvaajien muodostamisen vuoksi. Kutakin simulaatiota suoritettiin pienimpään ohitusetäisyyteen tai ohjuksen lennon lopettamiseen asti. Näistä jälkimmäinen toteutui esimerkiksi, mikäli ohjus ei löytänyt maaliaan loppuhakeutumisvaiheeseen siirryessään tai ohjuksen tutka ei pystynyt seuraamaan maalia. Simulaation lopettamispäätöksen teki MisTarget-ohjelma edellä esitettyjen ehtojen mukaisesti. Simulaatioissa käytetty ohjussmalli on esitetty kappaleessa 3.6.

Skenaarioissa suoritetuista simulaatioista koottiin päätulokset taulukon 2 esimerkin mukaisiin tulostaulukoihin. Tulostaulukon lisäksi simulaatioiden tuloksista esitetään maalin ja ohjusten radat sekä muita kappaleessa 3.2 määriteltyjä tulospaarametreja, mikäli niillä voidaan selittää simulaatioissa tapahtuvia ilmiöitä. Ohjusten tulospaarametriien kuvaajia esitetään ensimmäisten skenaarioiden simulaatioiden osalta MisDA-mallin kuvaajanpiirto-ominaisuuksien toiminnan osoittamiseksi sekä käsiteltävän ohjuksen lennon piirteiden esittelemiseksi. Monet ohjusten tulospaarametrit olivat skenaarioiden välillä samankaltaisia, eikä niitä siksi tarvitse esittää myöhempien skenaarioiden osalta erikseen.

	Ohitus- etäisyys [m]	Tilanne	Lentoaika [s]	Akt/maali [s]	Simulaation lopputulos
Ohjus 1 Vertailu	4.0	5	60.0	40.2/42.2	Ohjus päätyi taistelula- tauksen vaikutusalueelle.
Ohjus 2 Muutos1	0.2	6	60.0	40.0/42.0	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 3 Muutos2	100	4	65.0	41.4/43.4	Maali pääsi ohjusta pa- koon, etäisyys kasvoi.
...					
Ohjus N MuutosN	1000	2 tai 3	70.0	40/-	Ohjus ei nähnyt maalia omalla sensorillaan.

Taulukko 2: Esimerkki tulostaulukosta.

Taulukon 2 tulossarakkeissa 1–3 esitetään järjestyksessä ohjuksen suorituskyvyn mittarina käytetty ohitusetäisyys, kappaleessa 2.8 esitetyn mukainen suorituskykyarvioinnin tilanne ja ohjuksen lentoaika simulaation lopetukseen saakka. Neljännessä tulossarakkeessa esitetään loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen ajanhetki (Akt) ja maaliin lukittumisen ajanhetki (maali) jos P_G saa arvon 1. Maalin etsintään kuluvana aikana tämän työn simulaatioissa käytettiin kappaleen 4.4.1 mukaisesti etsintävolyymin halkaisijaa jaettuna tuhannella ja etsintä jatkui enintään sekunnin tämän jälkeen. Viimeisessä sarakkeessa annetaan tuloskommentti. Tuloskommenttina esitetään MisTarget-ohjelman tulostiedostoihin tallentama syy tai syyt simulaation lopetukselle.

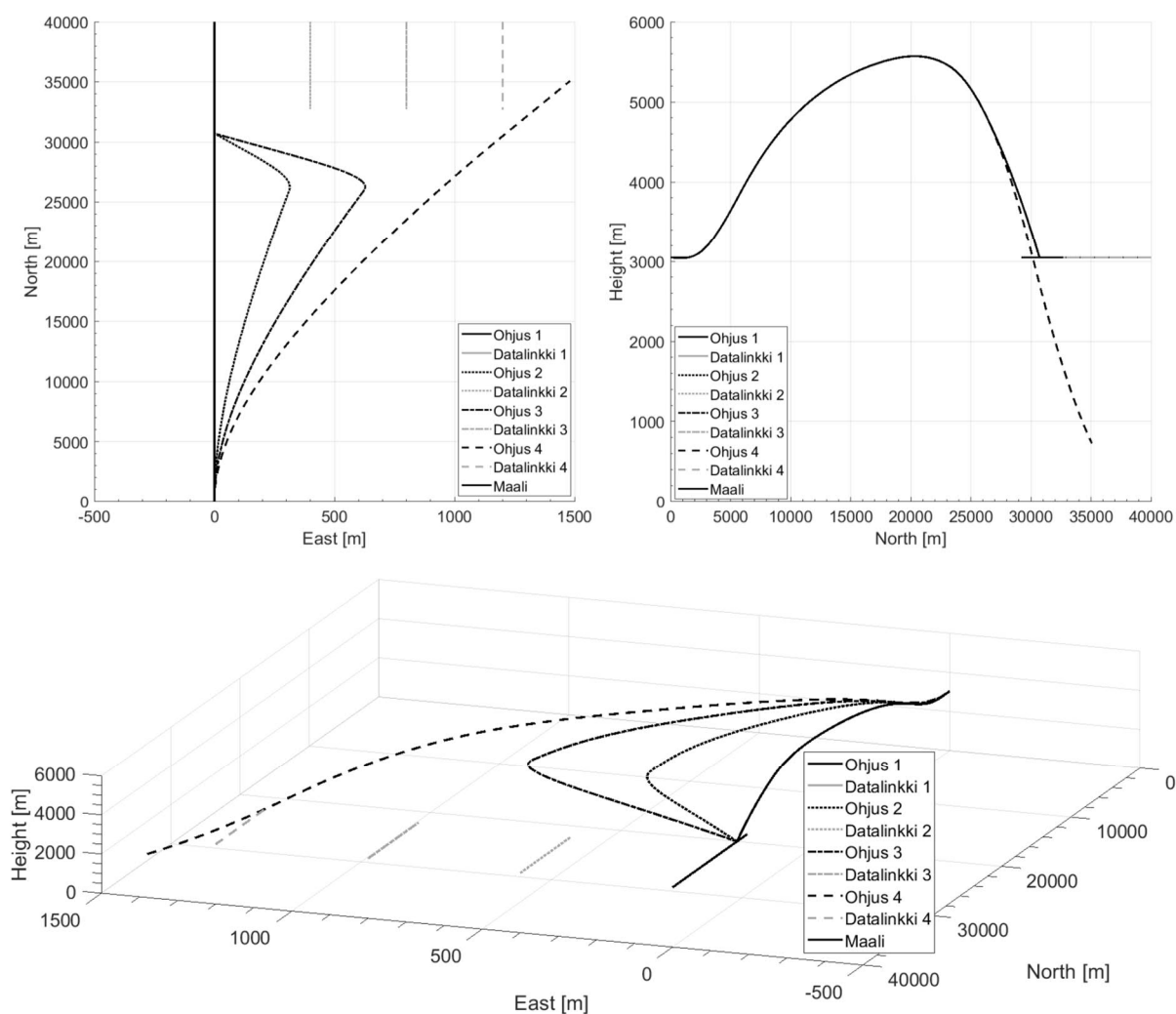
5.3.Skenaariot 1 ja 2: lähestyvä maali

Näiden skenaarioiden tarkoituksena oli yksinkertaisilla maalin radoilla esittää maalitiedon sivuttaisvirheen suuruuden vaikutus ohjuksen toimintaan. Virhettä kasvatettiin niin suureksi, että maali päätyi lopulta ohjuksen etsintävolyymien ulkopuolelle. Skenaariossa 1 ohjus laukaisiin 10000 ft lentokorkeudelta Mach 0.9 nopeudelta samalla korkeudella ja nopeudella laukaisijaa pohjoisesta lähestyneeseen maaliin. Ammuntaetäisyys oli 40 km. Maalin paikkaan lisättiin sivuttaisvirhettä idän suuntaan 10 m askelin aina 1500 m asti. Tulosten selvyuden vuoksi tässä esitetään tulokset vain kolmella askeleella (virheet 400 m, 800 m ja 1200 m) ja virheetömällä datalinkkimaalitiedolla (vertailu). Datalinkkitiedostossa annetun pallonmuotoisen etsintävolyymien halkaisija oli 2000 m ja tätä vastaava etsintäaika kappaleen 4.4.1 mukaisesti vähintään 2 s ja enintään 3 s. Etsintävolyymien koko valittiin suureksi, jotta ohjusten liikkeidinnästä saatiin selvästi havaittavia tuloksia esitettäviin kuvaajiin. Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 3.

	Ohitus- etäisyys [m]	Tilanne	Lentoaika [s]	Akt/maali [s]	Simulaation lopputulos
Ohjus 1 vertailu	0.4	6	31.4	24.6/26.6	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 2 400 m	0.3	6	31.4	24.6/26.6	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 3 800 m	0.4	6	31.4	24.6/26.6	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 4 1200 m	1240	2 tai 3	36.4	24.6/-	Ohjus ei nähnyt maalia omalla sensorillaan.

Taulukko 3: Skenaariot 1 tulostaulukko.

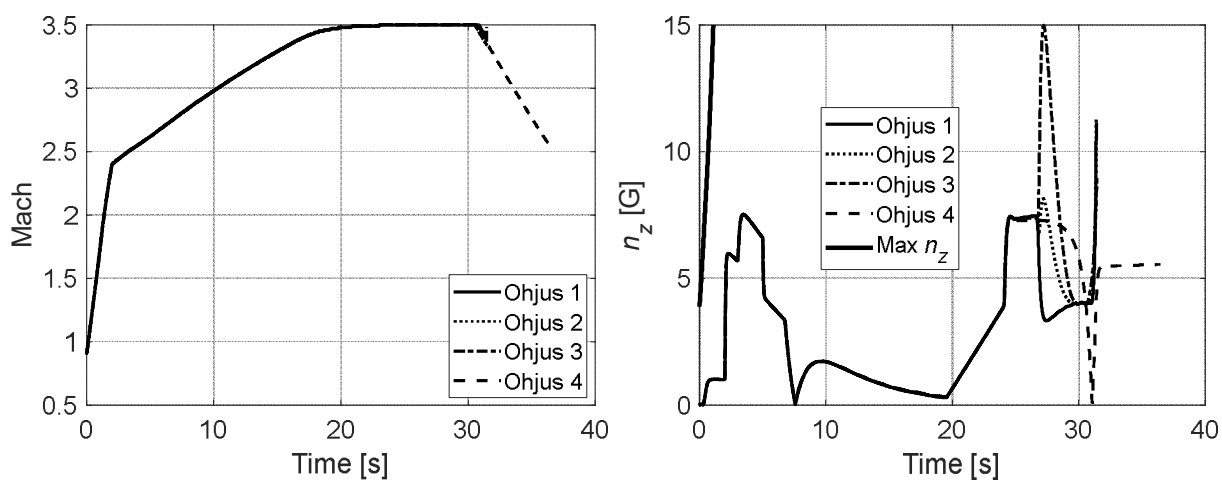
Taulukon 3 tuloksista havaitaan, ettei etsintävolyymien sädetä pienempi maalin paikan virhe vaikuttanut torjunnan lopputulokseen. Ohjukset 1–3 lukittuivat maalin heti etsintäajan kuluessa ja osuivat siihen. Ohjuksen 4 simulaatiossa käytetyllä 1200 m maalitietovirheellä maali oli ohjuksen etsintävolyymien ulkopuolella sen siirryttyä loppuhakeutumisvaiheeseen, eikä ohjus siksi nähnyt maalia omalla sensorillaan. Muutos P_G arvosta 1 arvoon 0 tapahtui 10 m askelin tarkasteltuna 810 m sivuttaisvirheen kohdalla. Tämän arvon ero etsintävolyymien 1000 m säteeseen johtui maalin etenemisestä maalin etsintäajan aikana kappaleessa 4.2.1 esitetyn mukaisesti. MisDA-mallin ensimmäisellä osalla määritetty tarkka arvo oli 806 m. Lentoratojen kuvaajat on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21: Skenaarion 1 lentoratojen kuvaajat.

Kuvassa 21 on esitetty maalin ja ohjuksien radat sekä datalinkkimaalitiedot. Kuvan vasemalla ylhäällä on esitetty edellä mainitut ylhäältä katsottuna, kuvan oikealla ylhäällä sivusta katsottuna ja kuvan alaosassa kolmiulotteisesti. Kuvaajien akselit eivät ole toistensa kanssa oikeassa suhteessa, koska muuten ohjusten radat eivät ole eroteltavissa toisistaan. Ohjuksen 1 datalinkkimaalitieto oli virheetön maalin rata. Datalinkkimaalitiedot loppuvat kuvaajissa loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen ajanhetkeen. Muiden skenaarioiden simulaatioiden lentoradat esitetään pääosin kuvaa 21 vastaavalla tavalla.

Ohjusten lentoradoissa havaitaan noin 2.5 km loftaus kiihdytysvaiheesta alkaen. Loftaus jatkui lennon keskivaiheessa, jonka lopuksi ohjukset käyttivät hyödykseen loftauksella kerättyä potentiaalienergiaa. Datalinkkimaalitiedon virheellinen maali paikka harhautti ohjuksia odotetusti virheen suuntaan. Ohjusten lentoradoista havaitaan suhteellisen navigoinnin mukainen ohjautuminen joko maalia tai virheellistä datalinkkimaalitietoa kohti. Loppuhakeutumisvaiheen alkaessa virheellistä maalitietoa kohden ohjautuneet ohjukset 2 ja 3 kääntyivät maalia kohti ohjauslakinsa mukaisesti. Ohjus 4 jatkoi lentoaan maalin ohi. Tässä skenaariossa datalinkkimaalitiedon maalin paikan virheen vaikutus oli mustavalkoinen. P_G sai arvon 0 tai 1. Kuvassa 22 on esitetty simulaatioiden ohjusten tulosparametreista Machin luku ja kuormitusmonikerta.



Kuva 22: Skenaarion 1 ohjusten tulosparametrit.

Kuvan 22 vasemmassa kuvaajassa esitetään ohjusten nopeusprofiilit käsitellyssä skenaariossa. Sen mukaisesti ohjusten nopeus kiihtyi voimakkaasti lennon kiihdytysvaiheessa ennen potopainemoottorin käynnistymistä. Moottori rajoitti Machin luvun sen maksimiarvoon 3.5. Tämän jälkeen Machin luku pysyi vakiona torjuntaan asti, koska moottori tuotti työntövoimaa koko lennon ajan. Ohjuksen 4 osalta Machin luku pieneni lennon loppua kohti lentokorkeuden laskiessa.

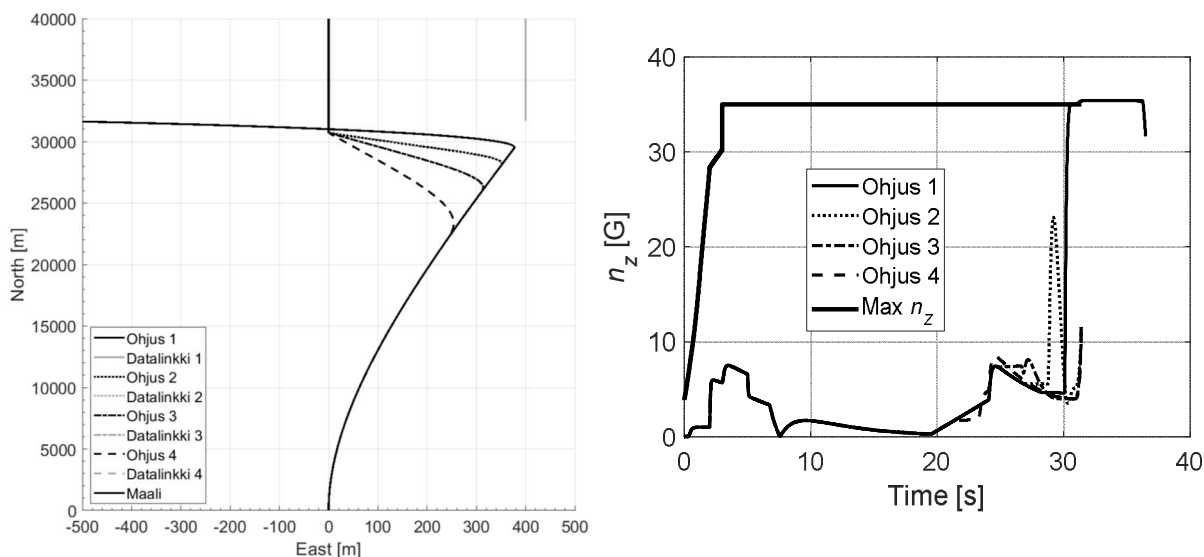
Kuvan 22 oikeassa kuvaajassa esitetään ohjusten kuormitusmonikerrat ja maksimikuormitusmonikerran profiili, joka oli identtinen kaikkien ohjusten osalta niiden samankaltaisten nopeusprofiiliensa vuoksi. Maksimikuormitusmonikerta nousi ohjuksen nopeuden kiihtyessä arvoon 35G ohjusmallin mukaisesti. Tämä on leikattu pois kuvaajasta esitysteknisistä syistä. Ohjusten kuormitusmonikerrat olivat lähes identtiset loppuhakeutumisvaiheeseen saakka. Siihen mennessä kuormitusmonikerroissa havaitaan loftausprofiilin mukaisten ohjauskomentojen toteutus. Aikavälillä noin 2.5–7 s lentorataa käännettiin ylöspäin ja tämän jälkeen rataa käännettiin hitaasti alaspäin kohti maalia. Loppuhakeutumisvaiheen kuormitusmonikerroista havaitaan, että mitä suurempaa maalitietovirhettä ohjus joutui korjaamaan, sitä suurempi sen kuormitusmonikerta oli. Kuormitusmonikerrat kuitenkin olivat pieniä suhteessa ohjuksen maksimiin kuormitusmonikertaan, eikä ohjuksilla siksi ollut vaikeuksia maaliin osumisessa. Ohjusten suuri nopeus mahdollisti myös liikehtimisen maaliin osumiseksi. Matalasta lentokorkeudesta johtuen ohjusten kohta- ja sivuluisukulmat (α ja β) pysyivät pieninä, eivätkä ohjukset menettäneet energiaansa. Ohjuksen asentokulmat (θ , ψ) vastasivat ohjusten lentoratoja. Näitä kuvaajia ei esitetä.

Skenaario toistettiin maalin paikan 400 m sivuttaisvirheellä muuttamalla ohjuksen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen etäisyyttä. Tarkastellut etäisyydet olivat 5 km, 7 km, 10 km (vertailu) ja 15 km. Simulaatioiden tarkoituksena oli esittää ohjuksen ominaisuuksien merkittävä vaikutusta lopputuloksiin. Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 4.

	Ohitus- etäisyys [m]	Tilanne	Lentoaika [s]	Akt/maali [s]	Simulaation lopputulos
Ohjus 1 5 km	144	4	36.5	28.0/30.0	Maali päätyi ohjuksen näköalueen ulkopuolelle.
Ohjus 2 7 km	0.2	6	31.4	26.7/28.7	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 3 10 km	0.3	6	31.4	24.6/26.6	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 4 15 km	0.7	6	31.4	21.2/23.2	Ohjus osui maaliin.

Taulukko 4: Skenaarion 1 tulostaulukko (loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen etäisyyden muutos).

Taulukon 4 tuloksista havaitaan, miten loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen etäisyyden pienentäminen muutti torjunnan lopputulosta. Vaikka ohjuksen 1 P_G sai arvon 1, päätyi maali loppuhakeutumisvaiheen geometriasta johtuen ohjuksen tutkan näköalueen ulkopuolelle (gimbal limit) eikä ohjus päässyt taistelulatauksen vaikutusetäisyydelle. Tämä osoittaa, ettei MisDA-mallin ensimmäisen osan käyttö yksin riitä ulkoisen maalitiedon vaikutusten tarkasteluun. Koska ohjukset siirtyivät loppuhakeutumisvaiheeseen annetuilla etäisyyksillä, voitiin MisDA-mallin ohjusmallin muokkaamisen todeta toimineen virheettömästi tämän parametrin muuttamisen osalta. Taulukossa 4 esitetyt loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen ajat vastaavat etäisyyksiä. Näiden simulaatioiden avulla osoitettiin osaltaan ohjuksen ominaisuuksien merkitys tuloksiin. Kuvassa 23 on esitetty lentoradat ylhäältä katsottuna ja ohjusten kuormitusmonikerrat.



Kuva 23: Skenaarion 1 lentoradat ja kuormitusmonikerrat (loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen etäisyyden muutos).

Kuvassa 23 esitetyistä lentoradoista voidaan havaita ohjusten siirtyneen loppuhakeutumisvaiheeseen simulaatioihin määritetyillä etäisyyksillä. Kaikkien ohjusten datalinkkimaalitiedot olivat samat ja tämän vuoksi ne ovat päällekkäin kuvaajassa. Lentoradoista havaitaan myös kuinka suuren suunnanmuutoksen ohjus 4 joutui suorittamaan kääntyessään maalia kohti. Lentoradan kuvaajasta havaitaan myös, miten loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen etäisyyden kasvattaminen loivensi ohjuksen 4 lentorataa. Kuormitusmonikertakuvaajasta havaitaan, miten pieniltä etäisyyksiltä loppuhakeutumisvaiheeseen siirtyneet ohjukset 1 ja 2 kääntyivät kohti maalia erittäin suurilla kuormitusmonikerroilla. Ohjuksen 1 kuormitusmonikerta saavutti ohjusmallin mukaisen maksimikuormitusmonikerran 35G. Ohjus ei pystynyt pitämään maalia tutkansa näköalueella.

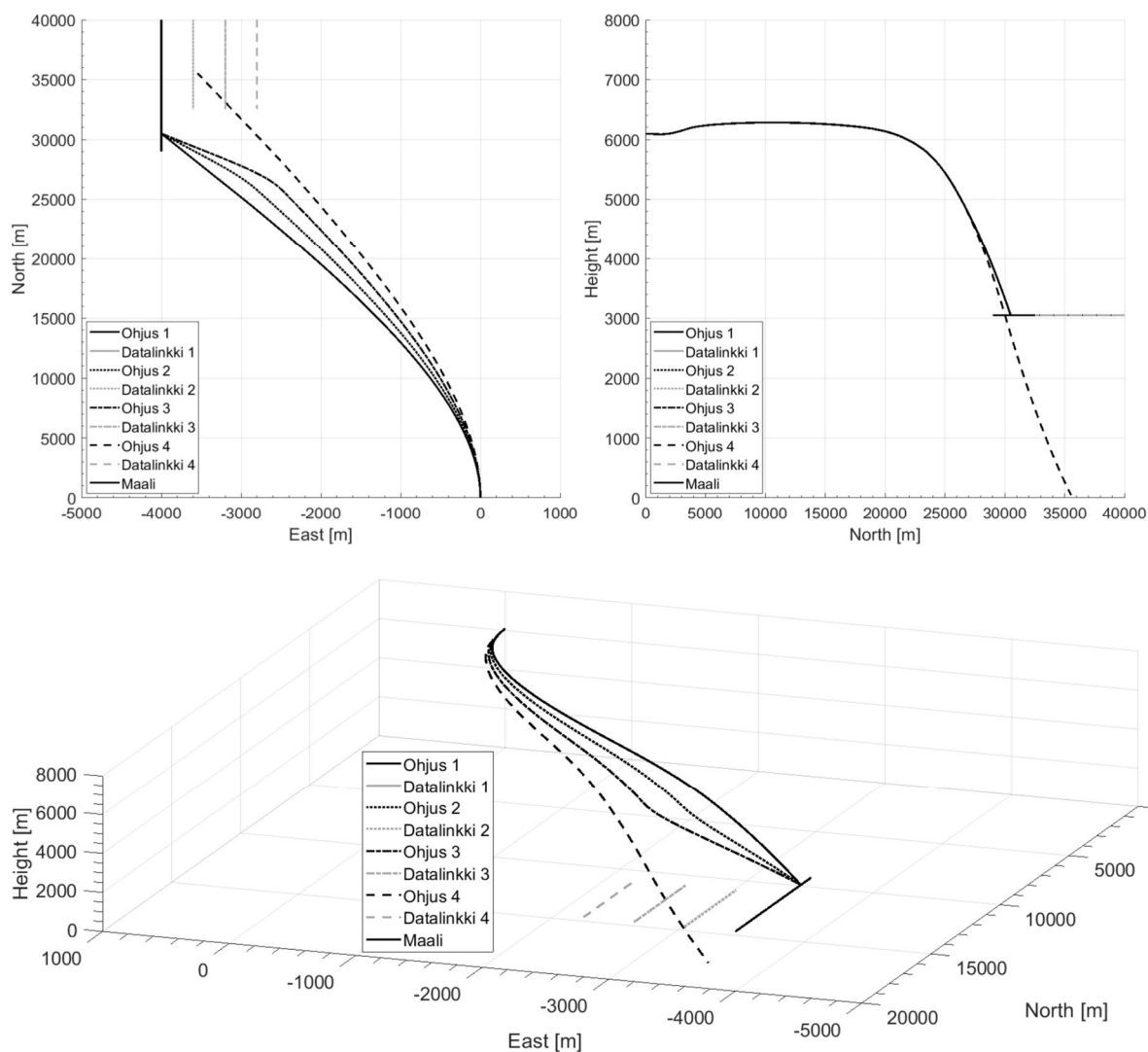
Simulaatioiden tuloksista voidaan päätellä, että loppuhakeutumisvaiheeseen tulisi siirtyä heti ohjuksen oman sensorin pystyessä havaitsemaan maalin. Näin voidaan välttää mahdollisesti virheellisen datalinkkimaalitiedon aiheuttamat haasteet maalin torjunnassa. Näiden simulaatioiden tulosten perusteella voitiin vahvistaa kappaleessa 2.8 esitetty toteamus: mitä lähemmäksi maalia ohjus lentää ulkoisen maalitiedon varassa, sitä suurempi merkitys maalitiedon hyvydellä on ohjuksen suorituskykyyn. Tässä tapauksessa ohjuksen tutkan näköalue osoittautui ratkaisevaksi tekijäksi.

Skenaariossa 2 käytettiin pääosin skenaarion 1 tilannetta. Muutoksina olivat maalin lentäminen ampuvan lavetin suhteen 4 km lännessä ja ohjuksen laukaiseminen 20000 ft korkeudelta. Skenaariolla tarkasteltiin sivusuunnassa sijaitsevan maalin ja maalitiedon paikan virheen yhdistelmää. Skenaarion erityispiirteenä oli laukaisupistettä selvästi matalammalla sijaitseva maali. Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 5.

	Ohitus- etäisyys [m]	Tilanne	Lentoaika [s]	Akt/maali [s]	Simulaation lopputulos
Ohjus 1 Vertailu	0.7	6	32.1	25.3/27.3	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 2 400 m	0.1	6	32.1	25.3/27.3	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 3 800 m	0.2	6	32.1	25.2/27.2	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 4 1200 m	1220	2 tai 3	37.1	25.2/-	Ohjus ei nähnyt maalia omalla sensorillaan.

Taulukko 5: Skenaarion 2 tulostaulukko.

Taulukossa 5 esitetyt tulokset ovat skenaariota 1 vastaavat. Ohjusten lentoajat olivat hieman skenaariota 1 pidempiä johtuen suuremmasta etäisyydestä maaliin. Vastaavasti loppuhakeutumisvaiheeseen siirtyminen tapahtui hieman skenaarion 1 simulaatioita myöhemmin. Maalin sivuttaisen paikan ja ohjuksen laukaisukorkeuden muutoksilla ei ollut vaikutusta torjunnan lopputuloksiin. Lentoratojen kuvaajat on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24: Skenaarion 2 lentoratojen kuvaajat.

Kuvan 24 lentoradoista havaitaan maalin matalasta lentokorkeudesta johtunut vain noin 200 m loftaus. Kuvaajista havaitaan myös skenaariota 1 selvemmin suhteellisen navigoinnin mukaiset ohjusten lentoradat kohti laukaisupisteestä lännessä sijaitsevaa maalia tai datalinkki-maalitietoa. Virheellinen maalitieto aiheutti ohjuksen 3 lentorataan selvästi havaittavan korjauksen ohjuksen siirryttyä loppuhakeutumisvaiheeseen. Jälleen ohjuksen 4 osalta maalitiedon virhe oli niin suuri, ettei se nähnyt maaliaan ja jatkoi lentoradallaan ohi maalin.

Seuraavaksi skenaario 2 toistettiin käyttämällä datalinkkimaalitiedossa puuttuvia maalitietoviestejä. Tarkoituksena oli tarkastella puuttuvien maalitietoviestien vaikutusta ohjuksen suorituskykyyn. Simulaatioissa etsintävolyymien halkaisija oli 100 m ja tätä vastaava etsintäaika 0.1 s. Puuttuvien viestien ajankohdissa huomioitiin edellisten simulaatioiden perusteella loppuhakeutumisvaiheeseen siirtyminen noin 25 s kohdalla. Datalinkkitiedostoa muokattiin simulaatioita varten seuraavasti:

1. Puuttuvat viestit aikavälillä 10–12 s.
2. Puuttuvat viestit aikavälillä 10–15 s.
3. Puuttuvat viestit aikavälillä 15–20 s.
4. Puuttuvat viestit aikavälillä 15–60 s (datalinkkitiedoston loppu).

Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 6.

	Ohitus- etäisyys [m]	Tilanne	Lentoaika [s]	Akt/maali [s]	Simulaation lopputulos
Ohjus 1 10-12 s	0.5	6	32.1	25.3/25.8	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 2 10-15 s	0.5	6	32.1	25.3/25.8	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 3 15-20 s	0.5	6	32.1	25.3/25.8	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 4 15-60 s	0.6	6	32.1	25.3/25.8	Ohjus osui maaliin.

Taulukko 6: Skenaarion 2 tulostaulukko (puuttuvat maalitietoviestit).

Taulukossa 6 esitettyjen tulosten perusteella kaikki simulaatiot tuottivat käytännössä samat tulokset. Datalinkkitulostiedostosta tarkastettiin laatuparametrin arvojen vastaavan edellä esitettyjä aikoja. Kaikkien ohjuksien lentoradat olivat lentoratakuvaajan tarkkuudella identtiset. Myös ohjuksien vastaanottamien ja käsittelemien datalinkkimaalitietojen maalin paikka oli kaikkien ohjusten osalta identtinen. Datalinkkimaalitietojen maalin paikka vastasi koko sen osalta maalin todellista paikkaa. Tämä oli odotettavissa MisTarget-ohjelman datalinkkimallin kappaleessa 3.4 esitetyn kuvauksen perusteella. Kuvauksen mukaan puuttuvien maalitietoviestien aikana maalin paikka ekstrapoloidaan lineaarisesti käyttämällä kahden viimeisen vastaanotetun maalitietoviestin mukaista maalin paikkaa. Maalin suoraviivaista vakionopeudella lennettyä lentorataa lineaarisesti ekstrapoloimalla tuotettiin täysin vastaava lentorata. Puuttuvien maalitietoviestien tarkasteluihin tulee käyttää maalin liikehdintää sisältäviä lentoratoja. Simulaatioiden ohjusten lentoratoja ei esitetä, koska ne kaikki olivat kuvaajan lukutarkkuuden rajoissa identtisiä kuvassa 24 esitetyn ohjuksen 1 (vertailu) lentorataan.

Skenaarioiden 1 ja 2 simulaatioiden tuloksilla osoitettiin MisDA-mallin ensimmäisen ja toisen osan tuottavan samat tulokset ohjuksen kyvystä lukittua maaliin. Toisaalta osoitettiin myös, että ensimmäisen osan avulla voidaan ainoastaan arvioida, pystyykö ohjus lukittumaan maaliin loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä. Pelkästään MisDA-mallin ensimmäisen osan käyttö ei riitä ulkoisen maalitiedon vaikutusten tarkasteluun. Tämä johtui mallin ensimmäisen osan kappaleessa 4.2.1 esitetyistä rajoituksista. Näiden skenaarioiden perusteella voidaan alustavasti todeta, että mikäli MisDA-mallin ensimmäisen osan tuloksena on, ettei ohjus pysty lukittumaan maaliin, ei mallin toista osaa tarvita skenaarion lopputuloksen arvioimiseen. Mikäli ensimmäisen osan tuloksena puolestaan todetaan ohjuksen pystyvän lukittumaan maaliin, on tarkastelua jatkettava mallin toisella osalla. Tämän toteamuksen paikkansa pitävyyttä tarkastellaan muiden skenaarioiden osalta. Puuttuvilla maalitietoviesteillä ei ole vaikutusta ohjusten lentorataan, suorituskykyyn tai datalinkkimaalitietoon näiden skenaarioiden mukaisilla radoilla. Puuttuvien maalitietoviestien vaikutuksen tarkasteluihin tulee käyttää maalin liikehintoja sisältäviä lentoratoja.

5.4. Skenaario 3: loittoneva maali

Skenaarion 3 tarkoituksena oli tarkastella kappaleessa 4.4.1 esitettyä maalin etsinnän vaikutusta maalitiedon paikan virheen ollessa eteen- ja taaksepäin maalin liikesuunnassa. Tarkastelu toteutettiin myös maalitiedon viiveen osalta. Skenaariolla verifioitiin myös molempien MisDA-mallin osien toimintaa niiden tuottamia tuloksia vertaamalla. Tässä skenaariossa ohjus laukaistiin 40000 ft korkeudelta ja nopeudelta Mach 0.95 kohti maalia. Maali sijaitsi 40 km laukaisupisteestä pohjoiseen lentokorkeudella 45000 ft ja se lensi nopeudella Mach 1.2 pohjoiseen. Etsintävolyymin halkaisija oli 200 m ja tätä vastaava etsintäaika siis vähintään 0.2 s ja enintään 1.2 s. Skenaarion erityispiirteenä edellisiin nähden oli suuri lentokorkeus ja selvästi pienempi etsintävolyymi.

Tämän skenaarion osalta tarkasteluun käytettiin ensin MisDA-mallin ensimmäistä osaa, jolla määritettiin arviot skenaariossa käytettäville maalitiedon paikan virheiden ja viiveen arvoille. Kappaleessa 4.2.2 esitetyjä kuvia 17 ja 18 voitiin soveltaa tässä skenaariossa. Ilman maalitiedon viivettä sallittu paikan liikesuuntainen virhe oli välillä -29 m ja 525 m. Ilman maalin paikan virhettä suurin sallittu viiveen arvo oli puolestaan 0.082 s. MisDA-mallin ensimmäisen osan mukaan ohjus siis löysi maalinsa edellä mainitun paikan virheen väliltä ja ilman paikan virhettä, jos maalitiedon viive oli alle 0.082 s. Skenaarion simulaatiot suoritettiin ensin datalinkkimaalitiedon paikan virheillä -30 m, -28 m, 524 m ja 526 m. Skenaarion maalin liikesuunnalla positiivinen virhe maalin paikassa oli pohjoiseen ja negatiivinen etelään. Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 7.

	Ohitus- etäisyys [m]	Tilanne	Lentoaika [s]	Akt/maali [s]	Simulaation lopputulos
Ohjus 1 -30 m	1370	2 tai 3	84.9	65.5/-	Ohjus ei nähnyt maalia omalla sensorillaan.
Ohjus 2 -28 m	0.3	6	79.8	65.5/65.7	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 3 524 m	0.3	6	79.8	66.4/67.6	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 4 526 m	1310	2 tai 3	84.8	66.4/-	Ohjus ei nähnyt maalia omalla sensorillaan.

Taulukko 7: Skenaarion 3 tulostaulukko (maalin paikan virheet liikesuunnassa).

Taulukon 7 tulosten mukaan ohjusten 1 ja 4 P_G sai arvon 0. Ohjus 2 löysi maalin 0.2 s etsintäajan jälkeen ja ohjus 3 1.2 s etsintäajan jälkeen. Datalinkkimaalitiedon paikan virheiden mukaisesti maali lensi ohjuksen 2 maalinetsinnän aikana pois päin etsintävolyymistä ja ohjuksen osalta 3 kohti etsintävolyymia. Etsintäaikojen arvot toteutuivat oikein valituilla paikan virheillä. Tulosten perusteella MisDA-mallin molemmat osat ja MisTarget-ohjelma toimivat näissä skenaarion simulaatioissa virheettömästi. Simulaatioiden ratatuloksia ei esitetä näiden simulaatioiden osalta, koska ohjusten liikehdintä oli tässä skenaariossa rauhallista ja radat olivat hyvin samankaltaisia sekä yhdensuuntaisia. Skenaarion simulaatiot toistettiin käyttämällä datalinkin paikan virheen sijasta maalitiedon viivettä. Viiveiden arvoiksi simulaatioissa valittiin 0.05 s, 0.08 s, 0.085 s ja 0.1 s. Näistä kaksi ensimmäistä tarkoitti alle 29 m virhettä ja kaksi viimeistä yli 29 m virhettä maalin paikassa etelään. Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 8.

	Ohitus- etäisyys [m]	Tilanne	Lentoaika [s]	Akt/maali [s]	Simulaation lopputulos
Ohjus 1 0.050 s	0.1	6	79.8	65.5/65.7	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 2 0.080 s	0.2	6	79.8	65.5/65.7	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 3 0.085 s	1370	2 tai 3	84.9	65.5/-	Ohjus ei nähnyt maalia omalla sensorillaan.
Ohjus 4 0.10 s	1370	2 tai 3	84.9	65.5/-	Ohjus ei nähnyt maalia omalla sensorillaan.

Taulukko 8: Skenaarion 3 tulostaulukko (maalitiedon viive).

Taulukon 8 tulosten perusteella MisDA-mallin molempien osien ja MisTarget-ohjelman voitiin jälleen todeta toimineen oikein näissä skenaarion simulaatioissa. Simulaatioiden ratatuloja ei esitetä edellä mainituista syistä. Tuloksista havaitaan skenaariossa käytetyllä etsintävolyymillä ja maalin nopeudella erittäin pieni sallittu maalitiedon viive. Yli noin 0.082 s viiveillä maali ei loppuhakeutumisvaiheeseen siirtyessä ollut etsintävolyymillä sisällä, eikä ohjuksen oma sensori nähnyt maalia. Tämä viive oli suuruusluokaltaan puolet maalin etsinnän minimiajasta.

Skenaarion simulaatiot toistettiin erisuuntaisilla datalinkkimaalitiedon paikan virheillä sekä niiden yhdistelmillä. Simulaatioissa käytetyt maalin paikan virheet olivat seuraavat:

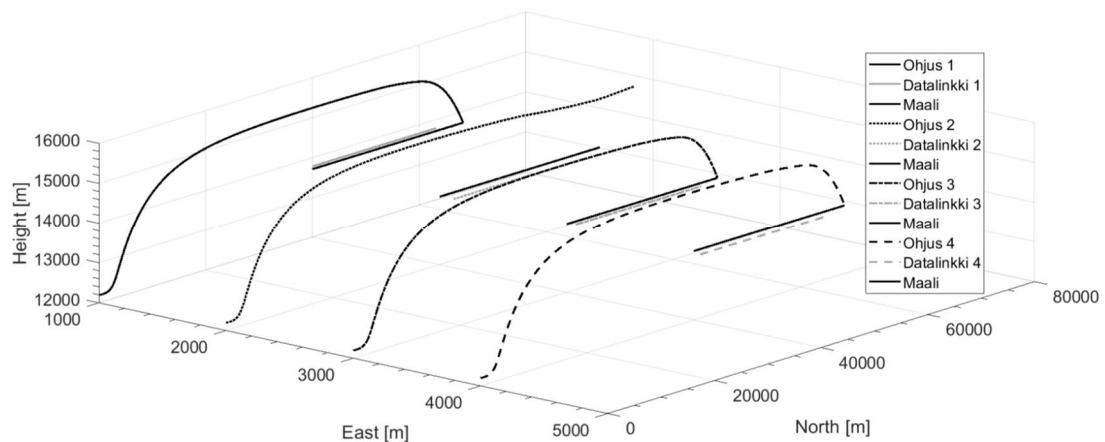
1. 70 m alaspäin
2. 250 m pohjoiseen ja 100 m itään
3. 500 m pohjoiseen ja 50 m itään
4. 50 m itään ja 50 m ylöspäin.

Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 9.

	Ohitus- etäisyys [m]	Tilanne	Lentoaika [s]	Akt/maali [s]	Simulaation lopputulos
Ohjus 1	0.1	6	79.8	65.5/65.7	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 2	1380	2 tai 3	84.9	65.9/-	Ohjus ei nähnyt maalia omalla sensorillaan.
Ohjus 3	0.1	6	79.8	66.3/67.5	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 4	0.02	6	79.8	65.5/65.7	Ohjus osui maaliin.

Taulukko 9: Skenaarion 3 tulostaulukko (paikan virheet eri suunnissa).

Taulukon 9 tulosten perusteella MisDA-mallin osat ja MisTarget-ohjelma toimivat jälleen oikein. Ohjusten 1, 3 ja 4 P_G sai arvon 1. Ohjuksen 3 osalta suurempi virhe maalin liikesuuntaan pidensi etsintäaikaa lähelle sen maksimiaikaa 1.2 s. Tarkka etsintäaika oli tämän ohjuksen osalta 1.17 s. Ohjuksen 2 osalta maali pysyi etsinnän aikana odotetusti etsintävolyymien ulkopuolella ja P_G sai arvon 0. Lentoratojen kuvaajat on esitetty kuvassa 25.



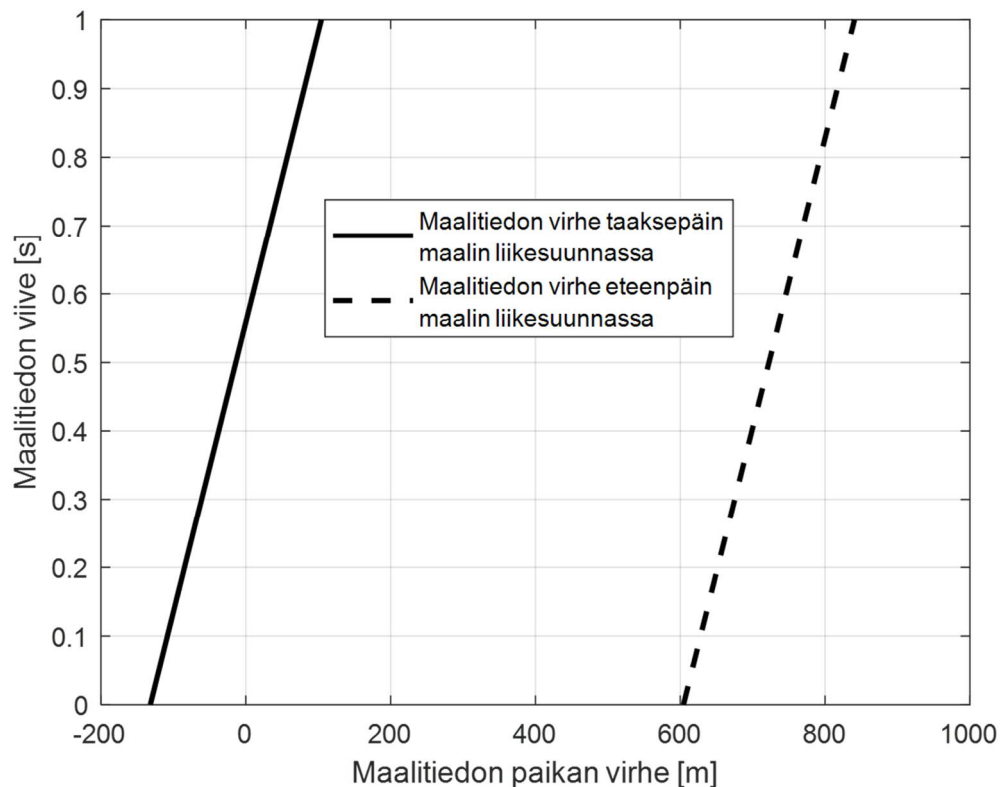
Kuva 25: Skenaarion 3 lentoratojen kuvaajat (paikan virheet eri suunnissa).

Kuvassa 25 simulaatioiden ohjusten lentoradat, maalin radat ja datalinkkimaalitieto on levitetty toisistaan 1000 m etäisyyksille itään esitusteknisistä syistä. Lentoradoista havaitaan noin 1.5 loftaus maalia suuremmalle lentokorkeudelle. Torjunnat ulottuivat lähes 70 km etäisyydelle. Maalin torjunnat tapahtuivat maalin yläsektorista.

Tämän skenaarion simulaatioiden perusteella osoitettiin MisDA-mallin ensimmäisen osan käyttökelpoisuus alustavien arvioiden tuottamiseen siitä, onko maali etsintävolyymien sisällä loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä. MisDA-mallin toisella osalla osoitettiin MisTarget-ohjelmaa käyttäen mallin ensimmäisellä osalla tuotettujen arvojen paikkansapitävyys. Tulosten perusteella voidaan myös todeta maalitiedon hyvyyden vaikutuksen riippuvan merkittävästi etsintävolyymien koosta, maalin etsinnän toteutuksesta loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä sekä maalin liiketilasta. Vaikutus ohjuksen suorituskykyyn tässä skenaarioissa suoritetuissa simulaatioissa oli mustavalkoinen. Mikäli paikan virhe tai viive oli niin pieni, että P_G sai arvon 1, osui ohjus aina maaliinsa erittäin pienellä ohitusetäisyydellä.

5.5. Skenaario 4: kaartava maali

Skenaariossa 4 ohjus laukaistiin 100 km päässä pohjoisessa 2G kaarta Mach 0.8 nopeudella ja 40000 ft lentokorkeudella lentänyttä maalia kohti. Ohjus laukaistiin 30000 ft korkeudelta Mach 0.8 nopeudelta suoraan kohti pohjoista. Etsintävolyymien halkaisija oli 500 m ja tätä vastaava etsintäaika 0.5 s. Skenaarion erityispiirteinä oli suuri etäisyys maaliin ja maalin suorittama ympyräkaarto. Skenaarion toteuttamista varten MisDA-mallin ensimmäisellä osalla tuotettiin kuvassa 26 esitetty tarkastelu.



Kuva 26: Skenaarion 4 maalitiedon paikan liikesuuntaisen virheen ja maalitiedon viiveen suhde.

Kuvassa 26 esitetään maalitiedon paikan virheen ja maalitiedon viiveen välinen yhteys tässä skenaariossa. Kuvan mukaisesti ilman maalin paikan virhettä suurimman sallitun maalitiedon viiveen arvioidaan olevan noin 0.56 s. Simulaatiot toteutettiin maalitiedon viiveiden arvoilla 0.0 s (Vertailu), 0.55 s, 0.57 s ja 0.6 s maalitiedon viiveillä. Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 10.

	Ohitus- etäisyys [m]	Tilanne	Lentoaika [s]	Akt/maali [s]	Simulaation lopputulos
Ohjus 1 Vertailu	0.2	6	105.1	96.5/97.0	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 2 0.55 s	0.4	6	105.2	96.5/97.0	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 3 0.57 s	210	2 tai 3	110.2	96.6/-	Ohjus ei nähnyt maalia omalla sensorillaan.
Ohjus 4 0.60 s	210	2 tai 3	110.2	96.5/-	Ohjus ei nähnyt maalia omalla sensorillaan.

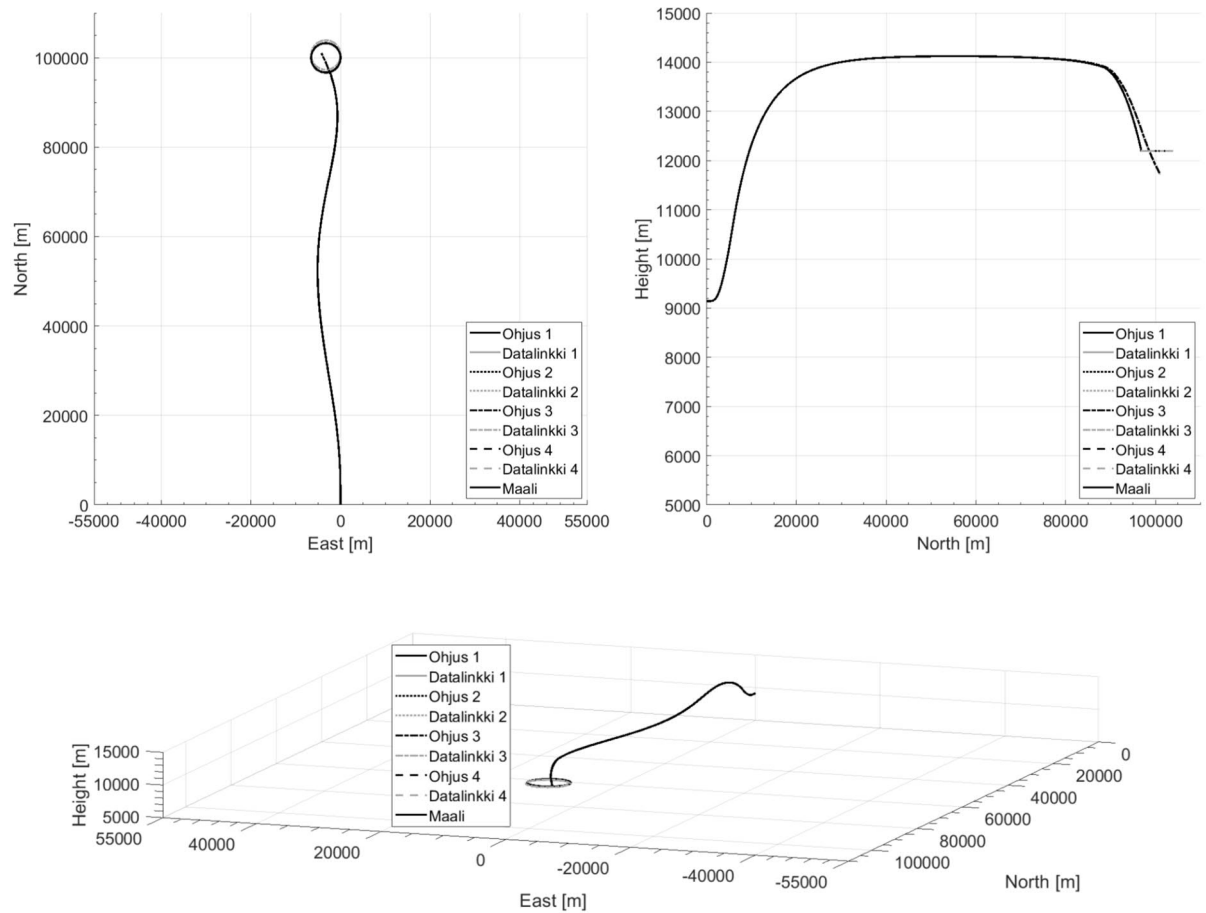
Taulukko 10: Skenaarion 4 tulostaulukko (maalitiedon viiveet).

Taulukon 10 tulosten perusteella MisDA-mallin ensimmäisen osan arvio ja toisen osan avulla suoritettujen simulaatioiden tulokset vastasivat toisiaan. Ohjuksien 3 ja 4 osalta viive oli niin suuri, että niiden P_G sai arvon 0. Seuraavaksi simulaatiot suoritettiin ilman viivettä suurimmilla maalin paikan virheillä skenaarion 3 vastaavan tarkastelun mukaisesti. Kuvan 26 mukaisesti ilman maalitiedon viivettä sallittu paikan liikesuuntainen virhe oli välillä -132 m ja 604 m. Skenaarion simulaatiot suoritettiin datalinkkimaalitiedon paikan virheillä -135 m, -130 m, 600 m ja 610 m. Positiivinen virhe maalin paikassa oli pohjoiseen ja negatiivinen etelään. Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 11.

	Ohitus- etäisyys [m]	Tilanne	Lentoaika [s]	Akt/maali [s]	Simulaation lopputulos
Ohjus 1 -135 m	0.4	6	105.1	96.4/96.9	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 2 -130 m	0.4	6	105.1	96.4/96.9	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 3 600 m	450	2 tai 3	110.2	97.0/-	Ohjus ei nähnyt maalia omalla sensorillaan.
Ohjus 4 610 m	450	2 tai 3	110.2	97.0/-	Ohjus ei nähnyt maalia omalla sensorillaan.

Taulukko 11: Skenaarion 4 tulostaulukko (maalin paikan virheet).

Taulukon 11 tulosten perusteella MisDA-mallin ensimmäisen osan arvio ja toisen osan avulla suoritettujen simulaatioiden tulokset eivät vastanneet toisiaan. Simulaatioiden lentoradat on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27: Skenaarion 4 lentoradat (maalin paikan virhe).

Kuvassa 27 esitetyistä lentoradoista voidaan havaita maalin ympäränä jatkuneen kaarron vaikutus ohjusten lentorataan. Ohjusten lentoradat ovat koko pitkän alkulennon lähes identtiset. Maalia matalammalta laukaistut ohjukset loftaavat lähes 2 km maalin yläpuolelle.

MisDA-mallin toisen osan tulosten määrittämiseksi suoritettiin laaja eräajo, jonka tuloksena maalin paikan virheille saatiin arvot -397 m ja 147 m. Skenaarion maalin lentoratakuvaajista arvioimalla ja tulosparametreista laskemalla saatiin maalin liikesuunta loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä. Liikesuunta oli kappaleessa 3.2 esitetyn määritelmän mukaan noin 228° , eli lounaaseen. Tätä arvoa käyttämällä voitiin määrittää arvot liikesuunnan mukaisille pohjois- ja itäsuuntaisille paikan virheille, jotka olivat -397 m ja -441 m. Toistamalla simulaatio maalin paikan virheillä -397 m pohjoiseen ja -441 m itään saatiin ohitusetäisyydeksi 0.5 m. Paikan virheiden summavektorin pituus on 593 m, joka vastaa käytetyn laskentatavan tarkkuudella kuvan 26 mukaan määritettyä arvoa 604 m.

Ero MisDA-mallin ensimmäisellä osalla tuotetun arvion ja taulukossa 11 esitettyjen tulosten välillä johtui siitä, että MisDA-mallin ensimmäisellä osalla määritetyt paikan virheen arvot viittaavat aina paikkaan maalin liikesuunnassa. Maalin liikesuunta ei välttämättä ole datalinkkitiedon koordinaatiston akseleiden suuntainen kuten kappaleessa 4.2.2 esitetään. Liikehtivän maalin tilanteessa MisDA-mallin toisen osan käyttäjä ei voi ennalta tietää, mikä maalin liikesuunta on loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä. Tämä rajoitus on huomioitava käytettäessä MisDA-mallin ensimmäisellä osalla saatuja tuloksia toisen osan lähtötietoina. MisDA-mallin ensimmäisen osan arvot olivat oikeat maalin liikesuunnassa.

Seuraavaksi tässä skenaariossa tarkasteltiin puuttuvia maalitietoviestejä. Puuttuvien maali- viestien ajankohdissa huomioitiin edellisten simulaatioiden perusteella loppuhakeutumisvaiheeseen siirtyminen noin 96 s kohdalla. Ensin tarkasteltiin puuttuvia datalinkkiviestejä ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä. Datalinkkitiedostoa muokattiin simulaatioita varten seuraavasti:

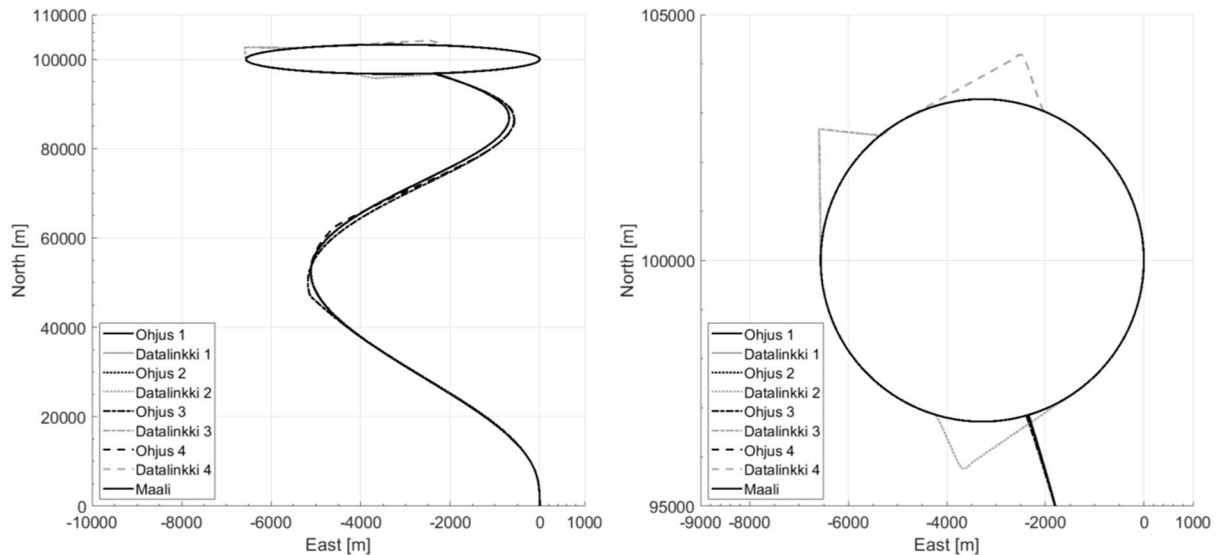
1. Ei puuttuvia viestejä (vertailu)
2. Puuttuvat viestit aikavälillä 15–25 s
3. Puuttuvat viestit aikavälillä 45–55 s
4. Puuttuvat viestit aikavälillä 80–90 s.

Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 12.

	Ohitus- etäisyys [m]	Tilanne	Lentoaika [s]	Akt/maali [s]	Simulaation lopputulos
Ohjus 1 Vertailu	0.2	6	105.1	96.5/97.0	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 2 15–25 s	0.4	6	105.1	96.5/97.0	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 3 45–55 s	0.1	6	105.3	96.5/97.0	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 4 80–90 s	0.3	6	105.3	96.5/97.0	Ohjus osui maaliin.

Taulukko 12: Skenaarion 4 tulostaulukko (puuttuvat maali- viestit ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä).

Taulukon 12 tulosten perusteella voidaan todeta, ettei lennon keskivaiheessa (ohjukset 2 ja 3) puuttuvat maalitietoviestit vaikuta ohjusten suorituskykyyn. Edes lähellä loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä tapahtunut 10 s pituinen katkos maalitietoviesteissä ei vaikuttanut ohjuksen 4 suorituskykyyn. Simulaatioiden lentoradat on esitetty kuvassa 28.



Kuva 28: Skenaarion 4 lentoradat (puuttuvat maaliviestit ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä).

Kuvan 28 oikeanpuoleisessa kuvaajassa esitetään ohjusten kokonaiset lentoradat ja maalin lentorata. Kuvaajan x- ja y-akseleiden rajojen valinnoista johtuen maalin ympyränmuotoinen lentorata näyttää ovaalilta. Kuvaajasta havaitaan miten lennon keskivaiheessa puuttuneet maalitietoviestit vaikuttavat hieman ohjusten 2 ja 3 lentoratoihin ohjuksen 1 verrattuna. Ohjuksen 4 osalta vaikutus havaitaan myöhemmin. Kuvan 28 oikeanpuoleisesta maalin lentorataan kohdistetusta kuvaajasta havaitaan kappaleessa 3.4 esitetyn mukainen datalinkkimaalitiedon lineaarinen ekstrapolointi puuttuvien maalitietoviestien osalta. Tällä menetelmällä ei pystytä huomioimaan maalin liikehdinnän historiaa sen tulevan liikehdinnän ennustamiseksi.

Seuraavaksi skenaariossa tarkasteltiin puuttuvia maaliviestejä lähellä loppuhakeutumisvaihetta ja siihen siirtymisen yli. Datalinkkitiedostoa muokattiin simulaatioita varten seuraavasti:

1. Ei puuttuvia viestejä (vertailu)
2. Puuttuvat viestit aikavälillä 75–95 s (ohjus sai 20 s katkon jälkeen käyttöönsä kaksi maalitietoviestiä ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä)
3. Puuttuvat viestit aikavälillä 93 s - (maalitietoviestit loppuivat noin 3.4 s ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä, ohjukselta jäi saamatta 4 maalitietoviestiä)
4. Puuttuvat viestit aikavälillä 94 s - (maalitietoviestit loppuivat noin 2.4 s ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä, ohjukselta jäi saamatta 3 maalitietoviestiä).

Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 13.

	Ohitus- etäisyys [m]	Tilanne	Lentoaika [s]	Akt/maali [s]	Simulaation lopputulos
Ohjus 1 Vertailu	0.2	6	105.1	96.5/97.0	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 2 75–95 s	0.3	6	110.7	97.2/97.5	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 3 93 s –	930	2 tai 3	109.9	96.4/-	Ohjus ei nähnyt maalia omalla sensorillaan.
Ohjus 4 94 s –	0.2	6	105.2	96.4/96.9	Ohjus osui maaliin.

Taulukko 13: Skenaarion 4 tulostaulukko (puuttuvat maaliviestit loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä).

Taulukon 13 tulosten perusteella maalitietoviestien puuttuminen loppuhakeutumisvaiheessa vaikuttaa merkittävästi ohjuksen suorituskykyyn. Simulaatioissa neljän maalitietoviestin puuttuminen juuri ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä aiheutti ohjukselle P_G arvon 0. Toisaalta pitkän 20 s maalitietoviestien katkon jälkeen kaksi viestiä riitti varmistamaan P_G arvon 1.

Tässä skenaariossa toteutettujen simulaatioiden perusteella voidaan jälleen todeta MisDA-mallin molempien osien tuottavan yhteneväiset tulokset. Simulaatioilla osoitettiin myös, miten mallin käyttäjä ei voi ennalta tietää kaikkia malleilla saatuihin tuloksiin vaikuttavia tekijöitä. Liikehtivän maalin kannalta MisDA-menetelmän maalitiedon paikan virheen suurimman sallitun arvon arviointi ei tuota tuloksia datalinkkimaalitiedon käyttämässä koordinaatistossa. Tämän vuoksi liikehtivien maalien tarkastelut on syytä suorittaa mallin toisella osalla.

Skenaarioiden simulaatioilla osoitettiin myös, miten puuttuvat maalitietoviestit vaikuttavat ohjuksen suorituskykyyn. Näiden tuloksien osalta on kuitenkin huomioitava näissäkin simulaatioissa esille noussut MisTarget-ohjelman mallinnuksen yksinkertaisuus puuttuvien datalinkkiviestien käsittelyssä. Tästä puutteesta huolimatta simulaatioiden tulosten perusteella loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen hetkellä puuttuvat maalitietoviestit aiheuttavat saman tilanteen kuin virheelliset viimeiset ohjuksen vastaanottamat maalitietoviestit. Näiden viestien hyvyyden vaikutus on kriittinen ilmataisteluohtuksen suorituskyvylle. Muutama hyvälaatuinen maalitietoviesti juuri ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä riittää varmistamaan ohjuksen kyvyn lukittua maalin.

5.6.Skenaario 5: maalin vaihto

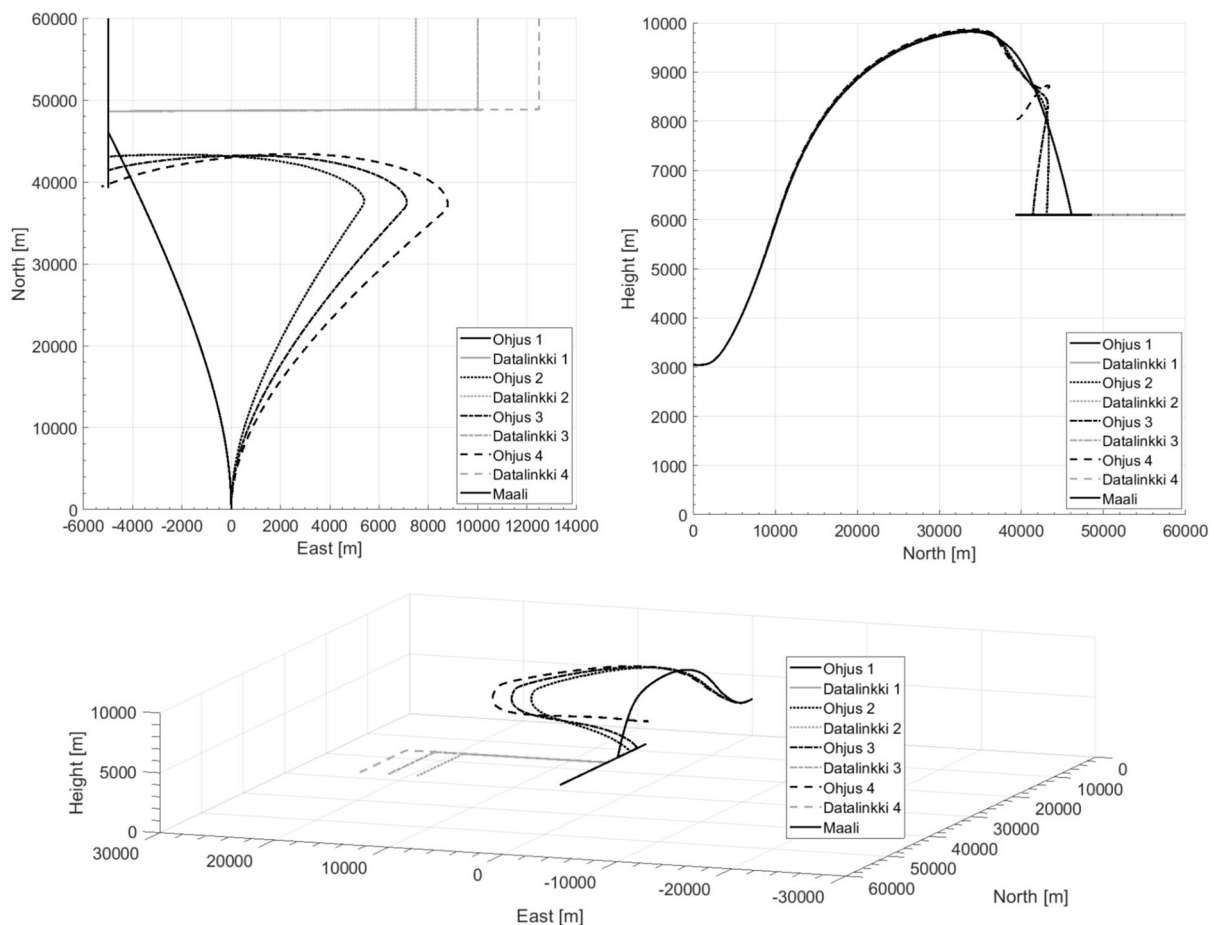
Tämän viimeisen skenaarion tarkoituksena on kuvata ohjuksen lennonaikaista maalin vaihtoa. Kyky ilmataisteluohjuksen maalin vaihtamiseen sen lennon aikana on kappaleen 2 kirjallisuuskatsauksen mukaisesti yksi nykyaikaisen ilmasodankäynnin vaatimuksista ohjusten ulkoiselle tiedonvälitykselle. Maalin vaihdon tarkastelu toteutettiin MisDA-mallin toisella osalla syöttämällä ohjukselle virheellistä maalin paikkaa maalin vaihdon hetkeen asti. Virheellinen datalinkillä välitetty maalin paikka kuvasi tällöin alkuperäisen maalin paikkaa ja virhe poistamalla kuvattiin ohjukselle uuden maalin paikkaa. Maalin vaihto on MisTarget-ohjelman kappaleissa 3.3 ja 3.5 esitetyistä rajoituksista johtuen tehtävä ennen loppuhakeutumisvaihetta. Skenaariota tarkasteltiin kolmen varioitavan muuttujan avulla osoittaen MisDA-mallin toisen osan erilaisia käyttömahdollisuuksia. Varioitavat muuttujat olivat uuden maalin itä-länsisuuntainen etäisyys alkuperäisestä maalista, maalinvaihdon ajanhetki ja suhteellisen navigoinnin vahvistus N' . Tämän diplomityön viimeisen alatutkimuskysymyksen kannalta tämän skenaarion voidaan maalin vaihdon sijasta ajatella kuvaavan myös datalinkkimaalitiedossa ollutta suurta maalin paikan virhettä, joka poistui kesken ohjuksen lennon. Näin voi tapahtua esimerkiksi uuden maalitietoon vaikuttavan sensoritiedon tullessa saataville. Toisaalta skenaarion voidaan myös ajatella kuvaavan puuttuvia maalitietoviestejä, joiden vuoksi maalitiedon paikan virhe oli kasvanut hyvin suureksi. Ohjuksen saatua jälleen maalitietoviestejä datalinkkimaalitiedon tarkkuus palautui. MisDA-mallin ensimmäistä osaa ei voida käyttää tämän tyyppisiin tarkasteluihin.

Skenaariossa kaksi maalia lensi korkeudella 20000 ft ja nopeudella Mach 0.9 etelään. Laukaisuhetkellä ne sijaitsivat 60 km pohjoisessa ohjuksen laukaisupisteestä. Ohjus laukaistiin tarkoituksena tuhota itäinen maali. Uusi maali lensi laukaisupisteestä 5 km lännessä alkuperäisen maalin kanssa samalla lentosuunnalla. Ohjuksen laukaisu idässä sijaitsevaan maaliin kuvattiin lisäämällä datalinkkimaalitietoon erisuuruisia virheitä itäsuuntaan. Virheiden suuruudet olivat 12.5 km, 15 km ja 17.5 km. Tarkoituksena oli selvittää kuinka kaukana idässä alkuperäinen maali voi onnistuneessa torjunnassa sijaita uudesta maalista. Ohjus laukaistiin lentokorkeudelta 10000 ft ja nopeudelta Mach 0.9. Maali vaihdettiin lännessä sijaitsevaan maaliin 40 s ohjuksen laukaisun jälkeen. Maalin vaihtaminen toteutettiin poistamalla datalinkkimaalitiedosta itäsuuntainen virhe. Etsintävolyymien halkaisija oli 200 m ja sitä vastaava etsintäaika 0.2 s. Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 14.

	Ohitus- etäisyys [m]	Tilanne	Lentoaika [s]	Akt/maali [s]	Simulaation lopputulos
Ohjus 1 Vertailu	0.3	6	48.7	41.3/41.5	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 2 12.5 km	0.4	6	59.4	46.0/46.2	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 3 15 km	1.2	5	65.5	48.3/48.5	Ohjus päätyi taistelula- tauksen vaikutusalueelle.
Ohjus 4 17.5 km	1960	4	73.1	51.1/51.3	Maali päätyi ohjuksen näköalueen ulkopuolelle.

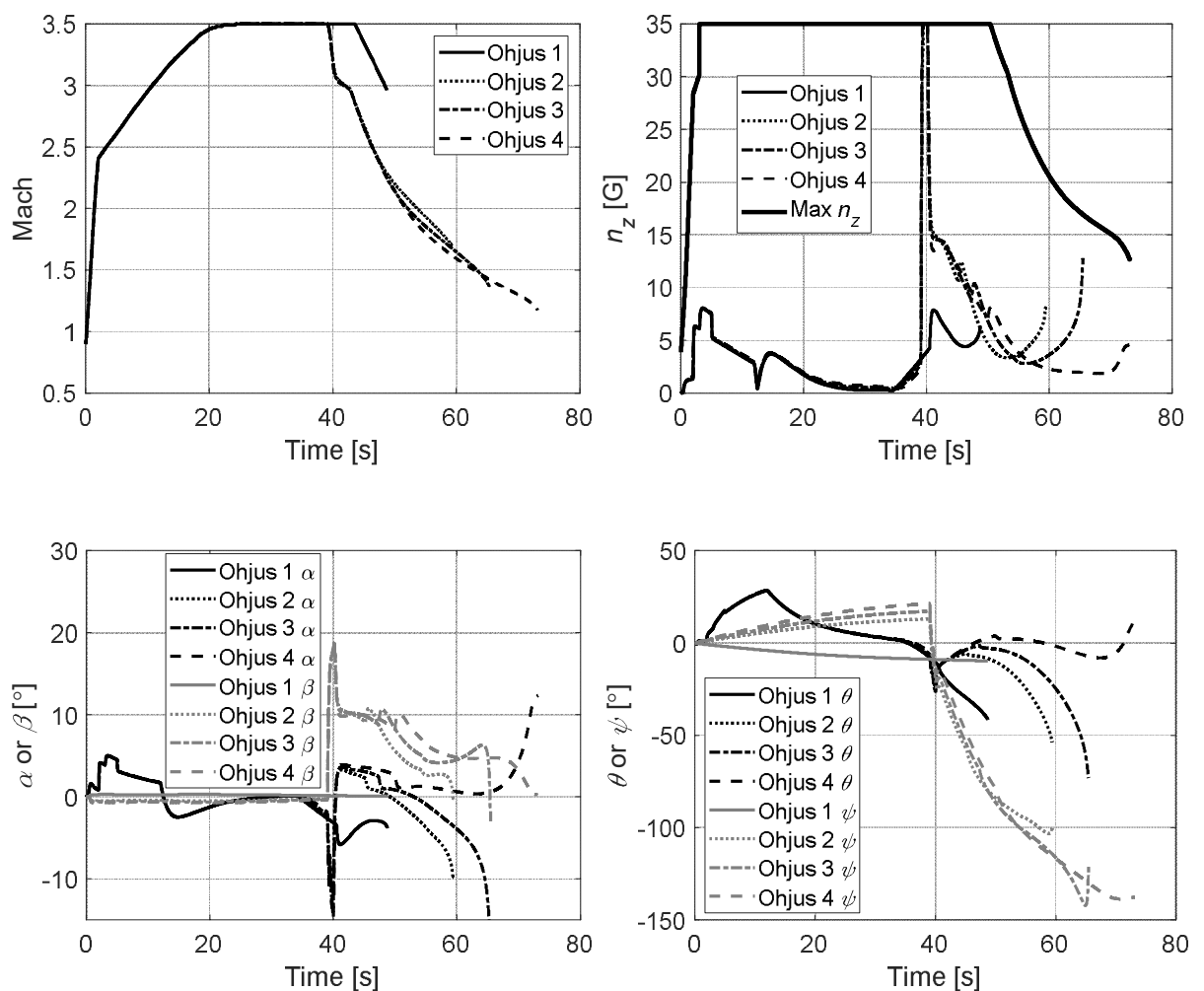
Taulukko 14: Skenaarion 5 tulostaulukko (itä-länsi-suuntainen maalin paikan vaihto).

Taulukossa 14 esitetyn suorituskykyarvioinnin tilanteen mukaisesti kaikki ohjukset pystyivät lukittumaan maaliin etsinnän minimiajassa, mutta ohjus 4 ei pystynyt pitämään maalia tutkan-
sa näköalueella (gimbal limit). Tutkan näköalueen raja saavutettiin hetkellä 71.9 s eli yli 20 s ohjuksen maaliin lukituksen jälkeen. Maalin vaihdot suoritettiin erittäin myöhäisessä vaihees-
sa ohjusten lentoa, mutta kuten taulukon 14 tuloksista havaitaan kuitenkin juuri ennen loppu-
hakeutumisvaiheeseen siirtymistä. Simulaatioiden lentoradat on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29: Skenaarion 5 ratatulokset (itä-länsi-suuntainen maalin paikan vaihto).

Kuvassa 29 on esitetty maalin ja ohjuksien radat sekä datalinkkimaalitiedot. Ohjus 1 ammuttiin suoraan kohti läntistä maalia, muut ohjukset ensin kohti itäistä maalia. Ohjuksen 1 datalinkkimaalitieto oli virheetön läntisen maalin rata. Muiden ohjusten osalta datalinkkimaalitieto kuvasi ensin itäisten maalien rataa vaihtuen 40 s kohdalla läntiseen maaliin. Kaikki ohjukset ohjautuivat ensin niille osoitettuja maaleja kohti ja kääntyivät maalin vaihdon jälkeen kohti uutta osoitettua maalia. Ohjukset suorittivat lähes 4 km loftauksen kiihdytysvaiheesta alkaen. Loftaus jatkui yli lennon keskivaiheen ja ohjukset käyttivät potentiaalienergiaa hyväkseen loppuhakeutumisvaiheessa. Ohjusten radoista voidaan havaita suhteellisen navigoinnin ohjauslain mukainen ohjautuminen kohti datalinkilla osoitettua maalitietoa. Kuvassa 30 on esitetty simulaatioiden tulospaametrejä.



Kuva 30: Skenaarin 5 ohjusten tulospaametrejä.

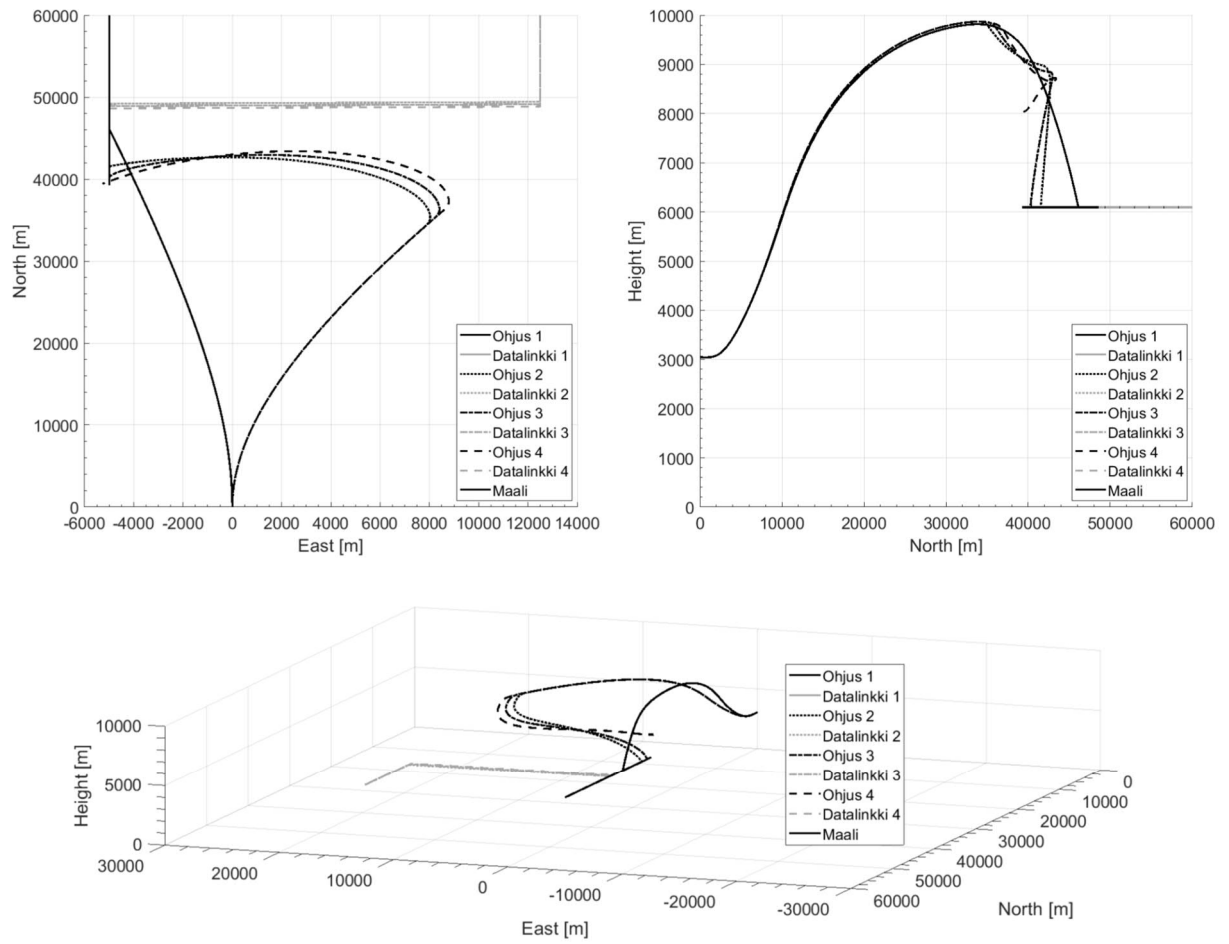
Kuvan 30 vasemmalla ylhäällä esitetystä ohjusten Machin lukujen kuvaajasta havaitaan miten ohjukset 2, 3 ja 4 menettivät nopeasti nopeuttaan maalin vaihdon jälkeen. Tämä johtui ylhäällä oikealla esitetystä kuormitusmonikertakuvaajasta havaittavasta voimakkaasta liikehännästä kohti uutta maalia. Maalia vaihtaneet ohjukset kääntyivät uutta maalia kohti niiden kuormitusmonikertarajalla 35G. Myös kuvan 30 vasemmalla alhaalla esitettyjen ohjuksen kohta- ja sivuluisukulmien havaitaan kasvavan liikehtimisen johdosta suuriksi. Kuvan 30 oikealla alhaalla esitetystä Eulerin kulumista voidaan havaita, miten maalia vaihtaneiden ohjusten suunta kääntyy lähes tulosuuntaan asti.

Ohjuksen 4 lentoradan osalta havaitaan, miten ohjus ei pystynyt kääntymään maalia kohti pitääkseen sen tutkansa näköalueella. Maalin siirto 17.5 km länteen oli siis tässä skenaariossa liian suuri tai vaihtoehtoisesti maalin vaihto suoritettiin liian myöhään. Samaa skenaariota tarkasteltiin ohjuksen 4 osalta muutetulla maalin vaihdon hetkellä. Tarkoituksena oli selvittää, kuinka myöhään maalia voitiin vielä vaihtaa. Maalinvaihtohetkeä siirrettiin sekunnin välein aiemmaksi. Tarkasteltavat maalinvaihtohetket olivat 38 s, 39 s ja 40 s. Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 15.

	Ohitus- etäisyys [m]	Tilanne	Lentoaika [s]	Akt/maali [s]	Simulaation lopputulos
Ohjus 1 Vertailu	0.3	6	48.7	41.3/41.5	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 2 38 s	0.7	6	65.0	49.0/49.2	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 3 39 s	3.1	5	69.5	50.0/50.2	Ohjus päättyi taistelulatauksen vaikutusalueelle.
Ohjus 4 40 s	1960	4	73.1	51.1/51.3	Maali päättyi ohjuksen näköalueen ulkopuolelle.

Taulukko 15: Skenaarion 5 tulostaulukko (maalin vaihdon ajan muuttaminen).

Taulukon 15 tuloksista voidaan havaita maalin vaihtamisen yhtä sekuntia ennen alkuperäistä vaihtoaikaa muuttavan tilannetta siten, että ohjus päättyi taistelulatauksen vaikutusalueelle. Simulaatioiden lentoradat on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31: Skenaarion 5 lentoradat (maalin vaihdon ajan muuttaminen).

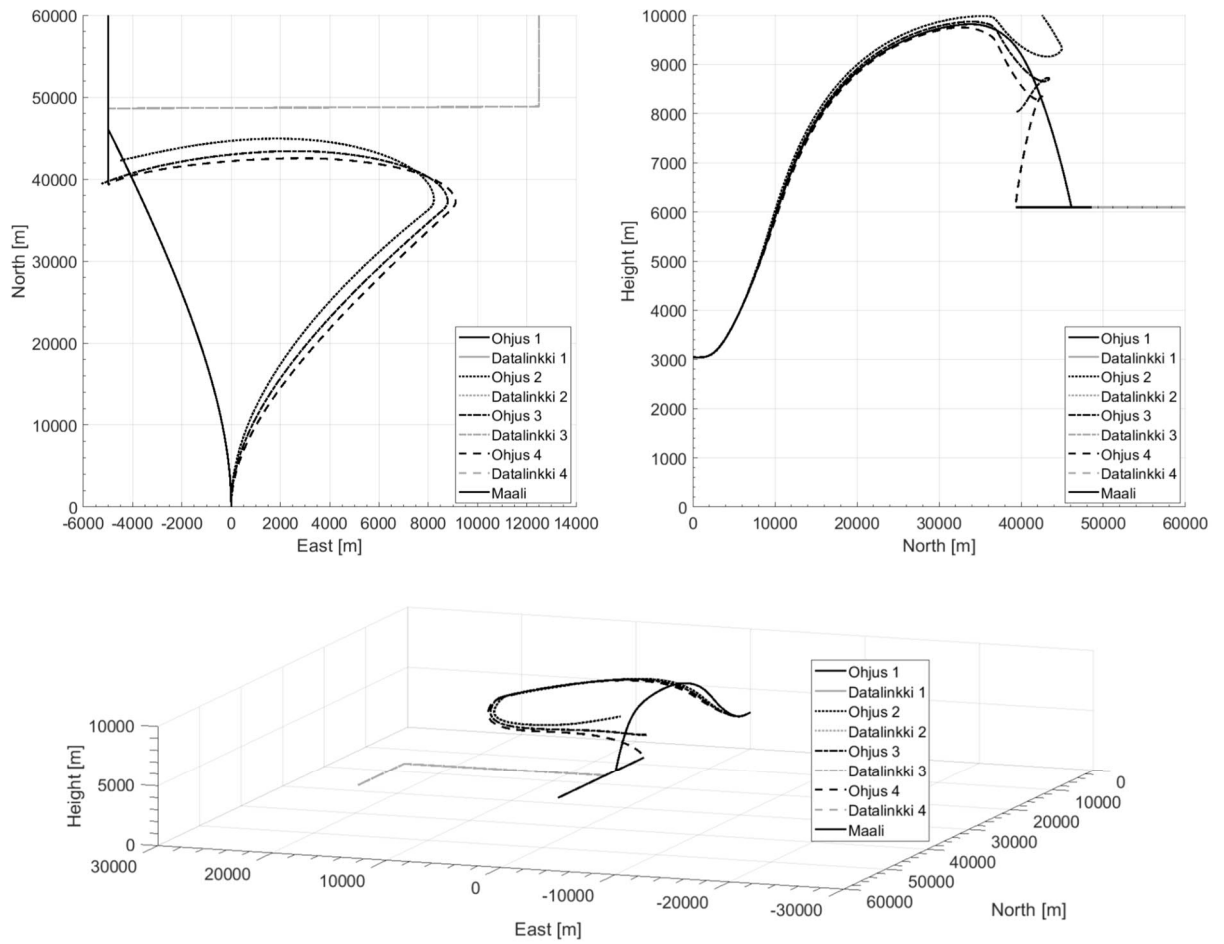
Kuvan 31 lentoradoista voidaan havaita maalivaihtojen tapahtuvan lähellä toisiaan määritettyjen aikojen mukaisesti. Ohjukset 2 ja 3 kääntyvät ohjusta 4 aikaisemmin kohti maalia ja pysyvät osumaan siihen. Simulaatioiden perusteella voidaan todeta, että pienellä erolla maalin vaihdon hetkessä on suuri merkitys ohjuksen suorituskykyyn skenaariossa. Ohjusten tulospaarametrit vastaavat edeltäviä simulaatioita, joten niitä ei esitetä.

Samaa skenaariota tarkasteltiin edelleen ohjuksen 4 osalta muuttaen suhteellisen navigoinnin vahvistusta N' . Tämän skenaarion aiemmissa simulaatioissa vahvistus oli ohjussmallin mukaisesti 3 lentokorkeuksilla alle 5000 m ja 4 lentokorkeuksilla yli 10000 m. Näiden välisillä lentokorkeuksilla vahvistus interpoloitiin arvojen väliltä. Vahvistuksen arvo oli siis 3 ohjuksen kiihdytysvaiheessa ja lennon keskivaiheen alussa. Tämän jälkeen ja loppuhakeutumisvaiheessa vahvistuksen arvo oli välillä 3 ja 4 ohjuksen lentokorkeudesta riippuen. Skenaario toistettiin käyttämällä vahvistuksen kiinteinä arvoina lukuja 3, 4 ja 5. Nämä arvot valittiin kappaleessa 2.5.3 esitetyn perusteella. Maalin paikkaa vaihdettiin kaikissa simulaatioissa 17.5 km 40 s kohdalla. Simulaatioiden tulokset on esitetty taulukossa 16.

	Ohitus- etäisyys [m]	Tilanne	Lentoaika [s]	Akt/maali [s]	Simulaation lopputulos
Ohjus 1 Vertailu	0.3	6	48.7	41.3/41.5	Ohjus osui maaliin.
Ohjus 2 PN 3	4500	4	70.0	51.3/51.5	Maali pääsi ohjusta pakoon, etäisyys kasvoi.
Ohjus 3 PN 4	1960	4	73.1	51.1/51.3	Maali päättyi ohjuksen näköalueen ulkopuolelle.
Ohjus 4 PN 5	1.9	5	72.9	51.2/51.4	Ohjus päättyi taistelulatauksen vaikutusalueelle.

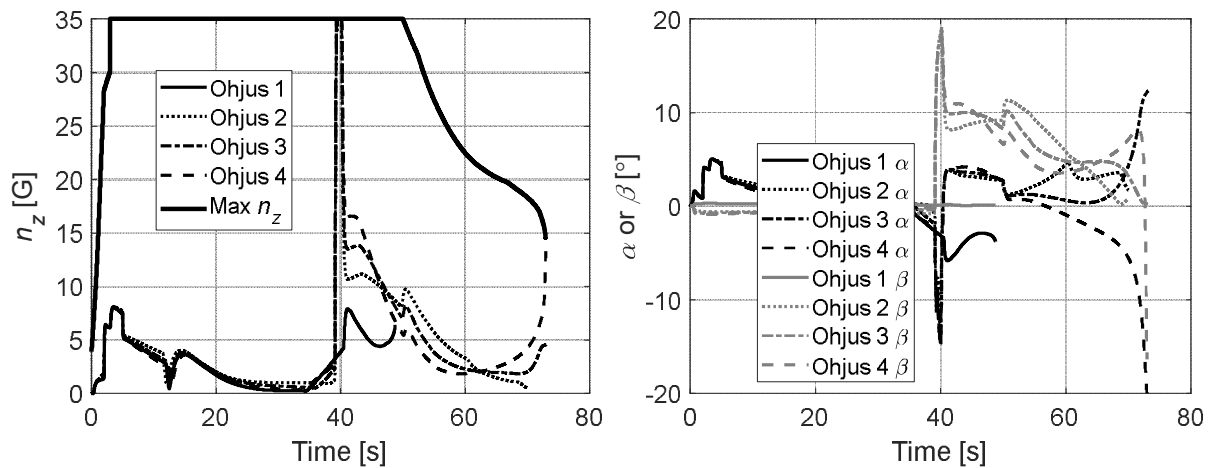
Taulukko 16: Skenaarion 5 tulostaulukko (ohjauslain vahvistuksen muuttaminen).

Taulukossa 16 esitettyjen tulosten perusteella myös ohjusmallin muutoksella oli merkittävä vaikutus maalinvaihtoskenaarion lopputuloksiin. Suhteellisen navigoinnin vahvistuksen arvolla 3 ohjuksen P_G sai arvon 1, mutta ohjus ei päässyt taistelulatauksen vaikutusetäisyydelle maalista. Ohjuksen tutka pysyi kuitenkin lukittuneena maaliin. Vahvistuksen arvolla 4 ohjuksen P_G sai arvon 1, mutta ohjus ei pystynyt liikehtimään pitääkseen maalin tutkansa näköalueella (gimbal limit). Vahvistuksen arvolla 5 ohjus puolestaan pystyi liikehtimään riittävän voimakkaasti päätyen taistelulatauksen vaikutusalueelle maalista. Simulaatioiden lentoradat on esitetty kuvassa 32.



Kuva 32: Skenaarion 5 ratatulokset (ohjauslain vahvistuksen muuttaminen).

Kuvassa 32 esitetyistä lentoradoista havaitaan miten paljon jyrkemmin ohjus 4 pystyi kääntymään maali kohti, vaikka se suuremman ohjauslakinsa vahvistuksen takia ohjautui ennen maalinvaihtoa muita ohjuksia vahvemmin kohti alkuperäistä maalia. Vastaavasti ohjus 3 ohjautui ohjusta 2 vahvemmin kohti alkuperäistä maalia Ohjusten lentoradoissa havaittavat ilmiöt suhteellisen navigoinnin ohjaus lain vahvistuksen mukaisesti ovat kirjallisuudessa [51], [53] esitettyjen mukaisia. Kuvassa 33 on esitetty simulaatioiden ohjusten Machin luvut, kuormitusmonikerrat, kulmanopeudet sekä kohta- ja sivuluisukulmat kappaleen 3.2 määritelmien mukaisesti.



Kuva 33: Skenaarion 5 ohjusten tulosparametrit (ohjauslain vahvistuksen muuttaminen).

Kuvasta 33 havaitaan, miten suhteellisen navigoinnin vahvistuksen muuttaminen vaikutti ohjuksen kuormitusmonikertaan. Ohjusten alkulennon aikana kuormitusmonikerroissa ei havaita merkittäviä eroja, mutta maalin vaihdon jälkeen suurempi ohjauslain vahvistus tuotti suuremman ohjuksen kuormitusmonikerran ja ohjus kääntyi jyrkemmin kohti maalia. Esitettyjen simulaatioiden tulosten perusteella voidaan kappaleen 2 mukaisesti todeta ohjuksen ohjauslaikien vaikuttavan merkittävästi ohjuksen lentorataan ja myös niiden suorituskykyyn. Simulaatioiden havaintona oli myös, että maalinvaihto voidaan tehdä huomattavan myöhään ohjuksen lennon aikana, mutta sen hetki on tarkka. Näillä simulaatioilla osoitettiin, miten MisDA-mallin toisella osalla voidaan tarkastella eräajotyypisillä simulaatioilla useiden eri muuttujien vaikutusta ohjuksen lentoon ja torjunnan onnistumiseen.

5.7. Johtopäätökset

Tässä kappaleessa esitettiin tässä diplomityössä toteutetut simulaatiot ja niiden tulokset. Simulaatiot toteutettiin MisTarget-ohjelmaa eräajotyypisesti käyttävällä MisDA-mallin toisella osalla. Simulaatioissa käytetyt skenaariot laadittiin vastaamaan viimeiseen alatutkimuskysymykseen. Niiden muodostamisessa käytettiin kappaleen 2 kirjallisuuskatsauksella hankittuja tietoja ilmataisteluohjusten käyttöperiaatteista ja muissa julkisissa tutkimuksissa tarkastelluista skenaarioista. Skenaarioiden laadinnassa huomioitiin myös kappaleessa 3 esitetyt MisTarget-ohjelman ja sen ohjusmallien rajoitukset sekä tätä työtä varten muodostetun ohjusmallin ominaisuudet. Skenaarioissa käytettyjen datalinkkimaalitiedon maalin paikan virheiden ja maalitiedon viiveiden määrittämisessä käytettiin MisDA-mallin ensimmäistä osaa. Mallin osien tuottamia tuloksia verrattiin toisiinsa.

Tässä kappaleessa esitettiin viisi erilaista ammuntaskenaariota ja useita niiden mukaisesti toteutettuja simulaatioita. Simulaatioissa varioitiin maalitiedon hyvyyden määrittäviä tekijöitä neljännen alatutkimuskysymyksen mukaisesti. Tekijöitä olivat ulkoisen maalitiedon maalin paikan virhe, maalitiedon viive ja puuttuvat maalitietoviestit. Lisäksi simulaatioissa tarkasteltiin ohjusmallin ominaisuuksien vaikutuksia sen suorituskykyyn. Osoituksena MisDA-mallin toisen osan käyttömahdollisuuksista skenaarioissa tarkasteltiin ohjuksen lennonaikaista maalin vaihtoa. Tämän skenaarion tulokset voidaan myös liittää neljänteen alatutkimuskysymykseen. Simulaatiomalleilla ja niihin liittyvillä valinnoilla kuten etsintävolyymien koolla, maalin etsintäajalla, suhteellisen navigoinnin vahvistuksella ja loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen etäisyydellä todettiin olevan huomattava vaikutus tuloksiin. Toteutettujen simulaatioiden tuloksien perusteella kappaleessa 6 kyetään vastaamaan viimeiseen neljänteen alatutkimuskysymykseen. Skenaarioiden simulaatioiden tulosten tulkinnassa käytettiin tulosparametrien kappaleessa 3.2 esitettyjä määritelmiä.

6. DISKUSSIO

Tässä kappaleessa vastataan päätutkimuskysymykseen ”miten ilmataisteluohjukselle välitettävän ulkoisen maalitiedon hyvyys vaikuttaa sen suorituskykyyn?” keräämällä yhteen kappaleessa 5 esitettyjen MisDA-mallilla toteutettujen simulaatioiden tulosten perusteella tehdyt havainnot. Seuraavissa kappaleissa käsitellään neljännen alatutkimuskysymyksen vastauksen, eli ilmataisteluohjukselle välitettävän ulkoisen maalitiedon hyvyyden, tekijät. Näitä ovat virheet maalin paikassa, viive maalitiedossa ja puuttuvat maalitietoviestit. Jokaisen tekijän osalta esitetään simulaatioiden tulosten perusteella, miten se vaikuttaa ilmataisteluohjuksen suorituskykyyn. Tämän jälkeen esitetään arvio MisTarget-ohjelman soveltuvuudesta ulkoisen maalitiedon käytön tutkimiseen ja tutkimuksen luotettavuuden arviointi. Seuraavan kappaleessa esitetään jatkotutkimusmahdollisuuksia sisältäen MisTarget-ohjelman ja MisDA-mallin jatkokehittämistarpeet. Lopuksi esitetään vielä kappaleen 2 kirjallisuuskatsauksen perusteella arvio ilmataisteluohjusten tulevaisuuden kehitysnäkymistä.

6.1. Ulkoisen maalitiedon hyvyyden vaikutus ohjuksen suorituskykyyn

Tässä kappaleessa vastataan neljänteen alatutkimuskysymykseen eli esitetään miten virheet maalin mitatussa tilassa, viive välitetyssä ulkoisessa maalitiedossa ja puuttuvat maalitietoviestit vaikuttavat ilmataisteluohjuksen suorituskykyyn. Simulaatioiden toteutuksessa oikein käytettyinä ja erityisesti MisDA-mallin ensimmäisen osan toimintakuvaus ymmärtäen, mallin molemmat osat tuottivat saman tuloksen ohjuksen kyvystä lukittua maalin. Toteutettujen simulaatioiden perusteella voidaan todeta, että mikäli MisDA-mallin ensimmäisen osan tuloksena on, ettei ohjus pysty lukittumaan maaliin, ei mallin toista osaa tarvita skenaarion lopputuloksen arvioimiseen. Mikäli mallin ensimmäisen osan tuloksena puolestaan todetaan ohjuksen pystyvän lukittumaan maaliin, on tarkastelu toteutettava loppuun mallin toisella osalla. Tämä johtuu siitä, ettei MisDA-mallin ensimmäisen osan mallinuksen rajoittumisesta vain arvioon siitä, onko maali loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen hetkellä oikeaan aikaan ohjuksen sensorin etsintävolyymiin sisällä. Mallin toinen osa simuloi MisTarget-ohjelmaa käyttäen myös ohjuksen koko lennon. Tämän työn simulaatiot suoritettiin aina molemmilla mallin osilla. Mallin ensimmäisellä osalla tuotettiin alustava arvio ohjuksen kyvystä lukittua maaliin skenaarion simulaatiossa.

Simulaatioiden tulokset riippuvat merkittävästi simulaatioiden ohjus- ja datalinkkimalleista. Mallinnuksen tulee olla tarkasteltavan ohjuksen mukainen, jotta tulokset ovat käyttökelpoisia kyseiselle ohjukselle. MisTarget-ohjelman nykyinen datalinkkimalli mahdollista ulkoisen maalitiedon hyvyuden vaikutuksen tarkastelua Ilmavoimien käytössä olevien ohjusten suorituskykyyn, joten työn tuloksista ei voida tehdä suoria johtopäätöksiä näiden ohjusten suorituskyvystä.

Ohjuksen suorituskyky vaikuttaa suoritettujen simulaatioiden perusteella olevan hyvin mustavalkoinen, joko ohjus pääsee hyvin lähelle maalia tai se ei pysty lukittumaan maaliin lainkaan. Tämä määräytyy sen perusteella, päätyykö maali ohjuksen etsintävolyymien sisälle loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen hetkellä suoritettava maalinetsinnän aikana. Simulaatioiden tulosten perusteella juuri ennen ohjuksen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä vastaanotettujen viimeisten maalitietoviestien hyvyys on kriittinen ohjuksen suorituskyvylle. Niistä voitiin myös päätellä, että loppuhakeutumisvaiheeseen tulisi siirtyä heti ohjuksen oman sensorin pystyessä havaitsemaan maalin. Näin voidaan välttää mahdollisesti virheellisen datalinkkimaalitiedon aiheuttamat haasteet maalin torjunnassa. Näiden simulaatioiden tulosten perusteella voitiin vahvistaa kirjallisuuskatsauksessa esitetty toteamus: mitä lähemmäksi maalia ohjus lentää ulkoisen maalitiedon varassa, sitä suurempi merkitys maalitiedon hyvyydellä on ohjuksen suorituskykyyn. Numeroarvotuloksena voidaan esittää MisDA-mallin perusteella tuotettu arvio maalitiedon viiveen sallituista arvoista. Hävittäjälentokoneiden taktisilla nopeuksilla ei ulkoisen tiedonvälityksen viive saa työn simulaatioiden perusteella olla yli 0.1 s, kun käytössä on halkaisijaltaan 200 m kokoinen pallonmuotoinen etsintävolyymi, josta ohjus etsii maalin loppuhakeutumisvaiheeseen siirtyessään. Muutoin ohjuksen loppuhakeutumisvaiheessa käyttämän etsintävolyymien koon tulisi olla suuri hävittäjäjutkan tarkkuuteen nähden. Tämä puolestaan vaikeuttaa esimerkiksi maalien erottelu tiiviistä lautasta Vastaavasti etsintävolyymien halkaisijan ollessa 1000 m tulisi viiveen olla alle 0.3 s. Ilmataistelutilanteissa nopeudet saattavat kuitenkin nousta yläpuolelle, jolloin ulkoisen maalitiedon viiveen tulisi olla suuruusluokaltaan 0.05 s 200 m etsintävolyymien halkaisijalla.

Skenaarioiden simulaatioilla osoitettiin myös, miten puuttuvat maalitietoviestit vaikuttavat ohjuksen suorituskykyyn. Edellä mainitusta puutteesta huolimatta simulaatioiden tulosten perusteella pystyttiin toteamaan, että loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen hetkellä puuttuvat maalitietoviestit aiheuttavat saman tilanteen kuin virheelliset viimeiset ohjuksen vastaanottamat maalitietoviestit. Muutama hyvälaatuinen maalitietoviesti juuri ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä riittää varmistamaan ohjuksen kyvyn lukittua maalin pitkänkin maalitietoviestikatkon jälkeen. Simulaatioiden tulosten perusteella datalinkkiyhteyden katkeaminen ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä vaarantaa ohjuksen suorituskyvyn. Tämän työn simulaatioiden perusteella jopa vain neljä puuttuvaa datalinkkiviestiä saattaa aiheuttaa tilanteen, jossa ohjus ei pysty lukittumaan maaliinsa.

Ilmataisteluohjukselle välitettävän ulkoisen maalitiedon hyvyys vaikuttaa sen suorituskykyyn merkittävästi. Käytännössä ulkoisen maalitiedon hyvyys ratkaisee ohjautumisen todennäköisyyden (P_G). Mikäli maali päättyy ohjuksen lennon aikana ohjuksen oman sensorin haku- tai havaintoalueen ulkopuolelle, on ohjautumisen todennäköisyys nolla. Esimerkiksi Amraam-ilmataisteluohjuksen osalta ulkoisen maalitiedon virheen aiheuttaessa maalin sijaintiin epävarmuuslaatikon koon ylittävän virheen tapahtuu näin. Todellisissa tilanteissa datalinkillä välitettävään maalitietoon liittyy aina virhettä kaikissa suunnissa (NEH), viivettä ja puuttuvia maalitietoviestejä. Useiden suuntien paikan virheen ja viiveen yhdistelmän tarkasteleminen MisDA-menetelmän avulla on monimutkainen ongelma. Sitä voidaan tarkastella MisDA-menetelmällä esimerkiksi Monte Carlo -simulaationa muodostamalla varioitavien parametrien arvojoukot, joiden kaikki mahdolliset yhdistelmät simuloidaan.

6.1.1. Maalitiedon paikan virheiden ja maalitiedon viiveen vaikutus ohjuksen suorituskykyyn

Tässä kappaleessa esitetään sekä maalitiedon paikan virheiden että maalitiedon viiveen vaikutus ohjuksen suorituskykyyn. Koska kappaleessa 4.2.1 osoitetun mukaisesti maalitiedon viive aiheuttaa maalin paikan virheen sen liikesuunnassa taaksepäin, liittyvät maalin paikan virhe ja maalitiedon viive tiiviisti toisiinsa. Tämän vuoksi niiden vaikutusta ohjuksen suorituskykyyn käsitellään yhdessä. Maalitiedon paikan virheen ja viiveen vaikutuksen tarkasteluun vaikuttaa merkittävästi maalin etsinnän mallinnus loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä. Tässä työssä käytettiin MisTarget-ohjelman mallinnuspuutteiden vuoksi erikseen arvioitua maalin etsintään kuluvaan aikaan. Se sidottiin tässä työssä etsintävolyymien kokoon. Etsintäaika sekunteina määritettiin jakamalla etsintävolyymien halkaisija tuhannella. Tähän MisTarget-ohjelman mallinnukseen perustuen kehitettiin MisDA-mallin ensimmäinen osa, jolla voidaan yksinkertaiseen mallinnukseen perustuen määrittää arvio maalitiedon paikan virheille ja viiveelle, joilla ohjus vielä kykenee lukittumaan maaliinsa. Tämän mallin todettiin antavan oikeita arvioita ja sitä käyttämällä tuotettiin myös kuvaajia esittämään suurinta sallittua paikan virhettä ja viivettä.

Maalin paikan virheiden vaikutus ohjuksen suorituskykyyn on merkittävä ja vaikutus on suurelta osin mustavalkoinen. Suurimmassa osassa tässä työssä toteutettuja simulaatioita paikan virheen vaikutus kohdistui suoraan ohjuksen P_G arvoon, eli siihen pystyykö ohjus loppuhakeutumisvaiheeseen siirtyessään lukittumaan maaliin. Mikäli paikan virhe oli niin suuri, ettei maali ollut sen etsinnän aikana etsintävolyymien sisällä ei ohjus pystynyt lukittumaan siihen ($P_G = 0$). Mikäli paikan virhe oli puolestaan riittävän pieni, pystyi ohjus lukittumaan maaliin ($P_G = 1$) ja ohitusetäisyys oli lähes aina alle yksi metri. Tällaisissa tilanteissa paikan virheen vaikutus voidaan arvioida yksinkertaisesti MisDA-mallin ensimmäisellä osalla. Työn simulaatioissa tuli myös ilmi skenaario, jossa paikan virhe oli osan ohjuksen lennosta niin suuri, että maali päättyi ohjuksen sensorin näköalueen ulkopuolelle, vaikka ohjus pystyi lukittumaan siihen.

Simulaatioiden tulosten perusteella havaittiin, että ohjus pystyy korjaamaan erittäin suuren maalitiedon paikka virheen, kunhan tämä virhe poistuu tai pienenee skenaariossa onnistuneen torjunnan virheen tasolle ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä. Jopa muutama lähes virheetön maalitietoviesti ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä riittää korjaamaan suuren, pitkään ohjuksen lennon aikana jatkuneen, maalitiedon maalin paikan virheen. Viimeisien, juuri ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä, vastaanotetuiden maalitietoviestien hyvyys on kriittinen ohjuksen suorituskyvyille. Tämä pätee sekä maalin paikan että viiveen osalta.

Työssä käytetyn pallonmuotoisen etsintävolyymien halkaisijan ollessa 200 m tulisi ulkoisen maalitiedon paikan virheiden olla alle 500 m maalin liikesuunnassa eteenpäin ja vain muutama kymmenen metriä liikesuunnassa taaksepäin. Myös viive vaikuttaa osaltaan edellä mainittuihin arvoihin. Maalin liikesuuntaan nähden sivuttaisen virheen tulee olla maalin liikkeestä, liikesuunnan suuntaisesta paikan virheestä ja maalitiedon viiveestä riippuen noin 0.5–0.8 kertainen etsintävolyymien säteeseen.

Ulkoisen maalitiedon viiveen vaikutus ohjuksen suorituskykyyn on tämän diplomityön simulaatioiden perusteella myös merkittävä. Viive aiheuttaa ohjuksen kannalta virheen maalin paikassa sen liikesuunnassa ja viiveen vaikutus ohjuksen suorituskykyyn on siksi samanlainen kuin paikan virheen vaikutus. Edellä mainitulla etsintävolyymien halkaisijalla maalitiedon viiveen olla alle 0.1 s taktisilla nopeuksilla. Vastaavasti etsintävolyymien halkaisijan ollessa 1000 m tulisi viiveen olla alle 0.3 s. Etsintävolyymien valittu muoto vaikuttaa edellä mainittuihin arvoihin ja se on mahdollista huomioida MisDA-mallin ensimmäisen osan tarkasteluissa. Etsintävolyymien muodon tulisi huomioida eri sensorien erilaiset mittaustarkkuudet eri suunnissa. Tämän vaatimuksen mukainen laatikkomuoto lieventäisi edellä esitettyä liikesuuntaan nähden sivuttaisen olevan maalin paikan virheen tarkkuusvaatimusta.

Maalitiedon suurimman sallitun viiveen tarkastelun tulosten perusteella ohjukselle muualta kuin ampuvalta lavetilta välitettävän maalitiedon käyttäminen saattaa siihen liittyvien prosessoinnin viiveiden takia vaatia suuren etsintävolyymien käyttämistä. Esimerkiksi Link16-järjestelmän kautta välitetty maalitieto vaatii arviolta suuremman etsintävolyymien kuin suoraan ampuvan lavetin tutkalta peräisin maalitieto.

Datalinkki- ja ohjusmallien huomattava vaikutus tuloksiin tunnistettiin. Tämän vuoksi esitetyt tulokset pätevät vain työssä käytetyille datalinkki- ja ohjusmallille sekä niihin valituille parametreille. Tulosten suuruusluokkaa voidaan kuitenkin soveltaa yleisesti nykyaikaisille ilmaisteluohjuksille.

6.1.2. Puuttuvien maalitietoviestien vaikutus ohjuksen suorituskykyyn

MisDA-mallin simulaatioilla ei pystytä tarkastelemaan realistisesti puuttuvien maalitietoviestien vaikutusta ohjusten suorituskykyyn, koska MisTarget-ohjelman puuttuvien maalitietoviestien käsittelyyn liittyvää ohjelman jatkokehittämistarvetta ei ehditty toteuttaa tämän diplomityön aikana. Ohjelman tämänhetkisen toiminnallisuuden kuvauksen mukaan puuttuvien maalitietoviestien aikana maalin paikka ekstrapoloidaan lineaarisesti käyttämällä kahden viimeisen vastaanotettua maalitietoviestin mukaista maali paikkaa. Mallinnus ei ota riittävän hyvin huomioon maalin liikehistoriaa, eikä kuvaa nykyaikaisten ilmataisteluohjusten toimintaa. Puuttuvien maalitietoviestien tilanteessa nykyaikaiset ilmataisteluohjukset arvioivat maalin tulevaa tilaa sen liikehistorian lineaarisesta ekstrapolointia paremmin huomioivilla menetelmillä kuten esimerkiksi Kalman-suotimella. Kappaleen 2 kirjallisuuskatsauksessa esitetyn mukaisesti ohjuksen (hakeutumisen) ohjauslakien toteutuksesta riippuen ohjus saattaa joutua lopettamaan datalinkkiliikenteen kuuntelemisen (ja tiedon käyttämisen) riittävän monen viestin jäädessä kuulematta, koska tällöin maalin tulevaa paikkaa ei voida enää ennustaa luotettavasti. Myöskään tätä ei otettu työn simulaatioissa huomioon.

Edellä mainitusta puutteesta huolimatta simulaatioiden tulosten perusteella pystyttiin toteamaan, että loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen hetkellä puuttuvat maalitietoviestit aiheuttavat saman tilanteen kuin virheelliset viimeiset ohjuksen vastaanottamat maalitietoviestit. Muutama hyvälaatuinen maalitietoviesti juuri ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä riittää varmistamaan ohjuksen kyvyn lukittua maalin pitkänkin maalitietoviestikatkon jälkeen. Työn kirjallisuuskatsauksen perusteella datalinkkiviestien jäädessä vastaanottamatta ja niiden loputtua viimeisillä vastaanotetuilla viesteillä on suuri merkitys maalin tulevan tilan, eli paikan arvioinnissa. Tämä havaittiin myös toteutetuissa simulaatioissa, joiden tulosten perusteella datalinkkiyhteyden katkeaminen ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä vaarantaa ohjuksen suorituskyvyn. Tämän työn simulaatioiden perusteella jopa vain neljä puuttuvaa datalinkkiviestiä saattaa aiheuttaa tilanteen, jossa ohjus ei pysty lukittumaan maaliinsa.

Puuttuvien maalitietoviesteillä ei ole vaikutusta ohjusten lentorataan, suorituskykyyn tai datalinkkimaalitietoon maalin suoraviivaisilla vakionopeudella lentämällä lentoradoilla. Koska jopa MisTarget-ohjelman yksinkertainen puuttuvien maalitietoviestien käsittely pystyy ennustamaan tällaisen lentoradan jatkumisen maalitietoviestien saannin katkettua, ei suoraviivaisessa liikkeessä saada esiin niiden vaikutusta ohjuksen suorituskykyyn. Jos maali jatkaa suoraviivaista liikettään, pysyy ekstrapoloitu maalitieto oikeana.

6.2. MisTarget-ohjelman soveltuvuus ulkoisen maalitiedon käytön tutkimiseen

Tässä kappaleessa esitetään arvio MisTarget-ohjelman soveltuvuudesta ulkoisen maalitiedon käytön tutkimiseen. Soveltuvuutta arvioitiin kappaleessa 3, jossa tunnistettiin tämän työn toteuttamisen kannalta pakollinen ohjelman jatkokehittämistarve datalinkkimallin osalta. Tämä kappaleen 2 kirjallisuuskatsauksen johtopäätösten vaatimusten perusteella tunnistettu jatkokehittämistarve toteutettiin ohjelman pääkehittäjän toimesta diplomityön aikana. Datalinkkimallin muutoksella toteutettiin datalinkkimaalitiedon hyvyyden huomioiminen ohjuksen siirtäessä loppuhakeutumisvaiheeseen. Datalinkkimalliin ohjelmoitiin etsintävolyymi, josta ohjus etsii maalinsa loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä. Tämän muutoksen lisäksi maalin etsintää loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä muutettiin tämän työn havaintojen perusteella.

Edellä mainittujen muutosten toteuttamisen jälkeen MisTarget-ohjelman todettiin soveltuvan työn tutkimukseen, mutta vaativan ulkoisen mallin ohjaamaan sen käyttöä eräajoina toteutettavissa simulaatioissa. Kappaleessa 4 esitettiin MisDA-mallin toinen osa tätä varten. Kappaleessa 4 esitettiin myös MisDA-mallin verifiointi ja validointi. MisTarget kuului mallin verifiointiin edellä mainittujen muutosten osalta. Muilta osin ohjelman ja tätä työtä varten muodostetun ohjusmallin toiminta katsottiin jo verifioiduiksi. MisTarget-ohjelma kuului osana mallin validointiin. Verifiointissa MisDA-mallin molempien osien ja sen toiseen osaan kuuluvan MisTarget-ohjelmaan tämän työn tarpeisiin toteutettujen muutosten todettiin toimivan virheettömästi. MisTarget-ohjelman todettiin soveltuvan ulkoisen maalitiedon käytön tutkimiseen.

MisTarget-ohjelman datalinkki- ja ohjusmallien huomattava vaikutus simulaatioiden tuloksiin tunnistettiin ja näiden onkin kuvattava tarkasti tutkittavaa asetta. Tämän vuoksi MisTarget-ohjelma ei sen tässä työssä käytössä olleen version datalinkkimallinnuksella sovellu Ilmavoimien käytössä olevien ohjusten osalta ulkoisen tiedonvälityksen vaikutusten tutkimiseen eikä se täysin vastaa kappaleen 2 kirjallisuuskatsauksessa esitettyjä vaatimuksia nykyaikaisten ilmataisteluohjusten datalinkkien toteutukselle.

6.3. Tutkimuksen luotettavuuden arviointi

Tässä diplomityössä kehitetyn MisDA-mallin avulla tutkittiin datalinkkimaalitiedon hyvyyden vaikutusta ilmataisteluohjuksen suorituskykyyn. Malli verifioitiin ja validointiin toteuttamalla useita simulaatioita erilaisissa skenaarioissa. Mallin ensimmäinen osa perustuu maalin liiketilaan ja kahteen datalinkkimallin parametriin. Näiden parametrien arvot sekä niiden välinen suhde valittiin luotettavan lähteen mukaan arvioituihin tutkasensorien ominaisuuksiin perustuen. Mallin toinen osa käyttää MisTarget-ohjelmaa eräajotyyppeihin simulaatioihin. MisTarget-ohjelman verifiointi on osoitettu useissa sen ominaisuuksia esittelevissä lähteissä. Tätä työtä varten laaditun ohjusmallin verifioinnin suoritti sen tekijä. Ohjusmallin todettiin verifioinnissa toimivan virheettömästi, eikä tässäkään työssä toteutetuissa simulaatioissa havaittu epärealistista ohjuksen toimintaa. Tässä diplomityössä toteutetussa laajassa verifiointissa MisDA-mallin ensimmäisen ja toisen osan todettiin tuottavan yhteneväisiä tuloksia niiden tarkastelujen osalta, joissa ensimmäistä osaa voitiin sen rajoitukset huomioiden käyttää. MisDA-mallin molempien osien ja MisTarget-ohjelmaan sekä sen sisältämiin malleihin tämän työn tarpeisiin tehtyjen muutosten todettiin toimivan virheettömästi. Edellä esitetyn perusteella MisDA-mallilla saatujen tulosten luotettavuutta ei ole syytä epäillä.

MisDA-mallin simulaatioiden avulla tuotettiin arvioita datalinkkimaalitiedon maalin paikan virheen ja maalitiedon viiveen suuruuksien sekä puuttuvien maalitietoviestien vaikutuksista työssä käytetyn ohjusmallin mukaisen ilmataisteluohjuksen suorituskykyyn. Mallilla saatujen tulosten analyysi osoitti näiden vaikutusten olevan suuruusluokaltaan realistisia ja odotetun kaltaisia, joskin ohjusmalli ja erityisesti edellä mainitut datalinkkimallin parametrit vaikuttavat tuloksiin merkittävästi. Lisäksi puuttuvien maalitietoviestien käsittely MisTarget-ohjelmassa ei ollut riittävällä tasolla. Näiden seikkojen vuoksi esitetyt tulokset pätevät vain valittujen parametrien arvojen mukaisiin tilanteisiin ja tarkasteluissa käytetyn ohjusmallin kaltaiselle ohjukselle. Esitetyt tulokset eivät ole päteviä kaikille ilmataisteluohjuksille, mutta niiden avulla voidaan ymmärtää suuruusluokkia.

Työn turvaluokituksesta johtuen maalin liikehdintä ja ohjusmalli eivät olleet ilmataistelutaktiikan tai käytössä olevien ohjusten toimintakuvauksien mukaisia. Tältä osin tuloksista ei voida tehdä suoria johtopäätöksiä esimerkiksi Ilmavoimien käytössä olevien ilmataisteluohjusten toiminnasta, vaan näitä tuloksia varten tarkastelut on toistettava käyttäen turvaluokiteltuihin tarkkoihin tietoihin perustuvia ohjussalleja ja ilmataistelutaktiikan mukaisia ammuntaskenaarioita. Diplomityön yksi tarkoitus olikin mallin kehittäminen tällaisen tutkimuksen toteuttamiseen.

Työn puitteissa ei voitu tarkastella kaikkia MisTarget-ohjelman ominaisuuksia. Simulaatiot toteutettiin esimerkiksi puhtaasti deterministisinä, eikä stokastisia MisTarget-ohjelman komponentteja käytetty. Näillä ei kuitenkaan arvella olevan vaikutusta MisDA-mallin toimivuuteen tai merkittävää vaikutusta simulaatioiden tuloksiin.

Tämän diplomityön reliabiliteetti pohjautuu siihen, että työssä kehitetty MisDA-malli todettiin toimivaksi ja luotettavaksi työssä käytetyllä ohjussmallilla. Saadut tulokset olivat analyysin perusteella luotettavia. Tämän diplomityön havaintojen perusteella MisDA-mallin voidaan todeta soveltuvan tämän työn aihealueen tutkimukseen.

6.4. Jatkotutkimusmahdollisuudet

Tässä kappaleessa esitetään diplomityössä tunnistettuja sen aihealueen jatkotutkimusmahdollisuuksia sekä MisTarget-ohjelman ja MisDA-mallin jatkokehittämistarpeita. Osa jatkotutkimusmahdollisuuksista voidaan toteuttaa suoraan tässä työssä käytössä olleella MisTarget-ohjelman ja MisDA-mallin versioilla. Osa puolestaan vaatii kappaleessa 3 tunnistettujen MisTarget-ohjelman jatkokehittämistarpeiden toteuttamista ja muutoksia MisDA-mallin ohjelmalliseen toteutukseen.

MisDA-mallin toinen osa kehitettiin myös todellisten ammuntojen datalinkkimaalitiedon vaikutusten tarkasteluihin. Datalinkkimaalitiedon hyvyyden tekijöiden suuruuksia ja niiden syntymekanismeja on mahdollista arvioida koelennoilta tallennettujen ilmataisteluohjukselle välitettyjen datalinkkimaalitietojen perusteella. Ilmataistelukeskuksen koelennoin hankkimia tietoja datalinkkimaalitiedon maalin paikan virheen ja maalitiedon viiveiden suuruudesta sekä puuttuvien maalitietoviestien määrästä tuleekin tarkastella MisDA-mallin avulla. Näin saadaan selville niiden vaikutus Ilmavoimien käytössä olevien ilmataisteluohjusten suorituskykyyn. Tarkasteluissa voidaan käyttää ennalta määritettyjen virheiden ja viiveiden suuruuksien sijasta myös suoraan lennoilta tallennettuja ampuvan lavetin ja maalikoneen lentoratoja sekä ohjukselle lähetettävää datalinkkimaalitietoa. Tämän jatkotutkimusmahdollisuuden tarkastelut tulee tehdä Ilmavoimilla käytössä olevien Amraam-ohjusversioiden tarkkoihin tietoihin perustuvia datalinkki- ja ohjussmalleja käyttäen. Nämä tiedot ovat turvaluokiteltuja, eikä tarkasteluja voitu siksi tehdä tässä diplomityössä. Tutkimuksessa tulee myös käyttää oman taktiikan mukaisia ammuntaskenaarioita ja arvioituja vastustajan kalustomalleja sekä toimintatapaa. Tällaisen tutkimuksen tulosten avulla voidaan kehittää ilmataisteluohjusten käyttöperiaatteita ja ilmataistelutaktiikkaa. Tämä jatkotutkimusmahdollisuus vaatii tiettyjen MisTarget-ohjelman kappaleessa 6.4.1 esitettyjen jatkokehittämistarpeiden toteuttamista ja niiden vuoksi muutoksia MisDA-mallin ohjelmalliseen toteutukseen kappaleen 6.4.2 mukaisesti.

Esimerkkinä MisDA-mallilla tutkittavasta Ilmavoimien ilmataistelutaktiikkaan ja ohjaajien koulutukseen liittyvästi tiedosta voidaan mainita seuraava jatkotutkimusmahdollisuus. MisDA-mallilla toisella osalla voidaan tarkastella, minkälaisella datalinkkimaalitiedon hyvydellä voidaan ampua ohjus, jonka tarkoituksena on tuhota vain tietty maali tiiviistä vastustajan lautasta. Vaihtoehtoisesti kysymys voidaan asettaa toisinpäin, eli kuinka suuri välimatka vastustajan lautassa sijaitsevilla lentokoneilla tulee vähintään olla, jotta lautasta voidaan tuhota maali ohjuksella, kun käytössä on tietty sensoritietoyhdistelmä. Käytännössä hävittäjäohjaajan päätös tästä voidaan tehdä tietämällä ammunnan sensoritietoyhdistelmä ja sen vaikutus ohjuksen etsintävolyymiin kokoon. Tällaiset tarkastelut on tehtävä kyseessä olevan ase, esimerkiksi Amraam-ilmataisteluohjuksen, tarkoilla turvaluokitelluilla arvoilla.

MisDA-mallin toisen osan kannalta ei ole merkitystä mistä ja mihin ase simulaatiossa laukaitaan tai onko aseessa oma moottori. Mallia voidaan käyttää sellaisenaan tutkimaan datalinkkimaalitiedon hyvyden tai maalin vaihdon vaikutusta kaikkiin MisTarget-ohjelmalla simuloitaviin aseisiin. Tarkasteltavana voi olla ilmasta ilmaan -ohjus, ilmasta maahan -ohjus, ilmasta maahan -pommi, maasta ilmaan -ohjus tai muu mahdollinen MisTarget-ohjelmalla mallinnettu ase. Eräitä jatkotutkimusmahdollisuuksia ovat ilmatorjunnan korkeatorjuntakyvyn kehittämiseen [17] tai NASAMS II FIN -ilmatorjuntajärjestelmään [18] liittyvät tarkastelut. On mahdollista, että tulevaisuudessa ballistisia tai muita erittäin korkealla ilmakehässä osan lennostaan lentäviä ohjuksia pyritään torjumaan maasta tai ilmasta laukaistavilla ohjuksilla [10]. MisDA-mallin toista osaa voidaan käyttää myös näiden torjuntajärjestelmien tarkasteluun. Torjunnan geometriasta riippuen näissä tarkasteluissa saatetaan joutua käyttämään MisTarget-ohjelman dll-kutsuna suoritettavaa versiota, mikä puolestaan vaatii muutoksia MisDA-mallin toiseen osaan.

Kyky ilmataisteluohjuksen maalin vaihtamiseen sen lennon aikana on kappaleen 2 kirjallisuuskatsauksen mukaisesti yksi nykyaikaisen ilmasodankäynnin aiheuttamista vaatimuksista ohjusten ulkoiselle tiedonvälitykselle. MisDA-mallin toista osaa voidaan sellaisenaan käyttää aseiden lennon aikaisen maalin vaihdon tarkastelussa, kuten kappaleessa 5.6 esitettyissä simulaatioissa osoitettiin. Maalinvaihdon tarkasteluissa on toistaiseksi huomioitava MisTarget-ohjelman kappaleissa 3.4 ja 3.5 esitetyt monimaalitalanteiden käsittelyyn ja ohjuksen sensorimalliin liittyvät rajoitukset.

Aseiden inertiajärjestelmien ryöminän aiheuttama virhe ohjuksen omassa paikkatiedossa vastaa vaikutuksiltaan virhettä datalinkkimaalitiedossa. Tämän vaikutusta ohjusten suorituskykyyn voidaan arvioida MisDA-mallin toisella osalla. Datalinkkimaalitiedolla ohjukselle syötettävä maalin paikan virhe määritetään arvioidun inertiajärjestelmän ryöminän mukaan kasvavana. Tarkasteluilla voidaan myös verrata pelkkää inertianavigointijärjestelmää käyttävän ohjuksen suorituskykyä GPS-tuettua inertianavigointijärjestelmää käyttävään ohjukseen.

Koska MisDA-mallin toinen osa lukee koko ohjusmallitiedoston ohjusmallin kahden ominaisuuden muokkaamiseksi, on sen avulla mahdollista muokata myös muita ohjusmallitiedostossa kuvattavia ohjuksen ominaisuuksia. Mallin toista osaa voidaan jatkotutkimuksessa käyttää kattavasti ohjusmallin muutosten vaikutusten tarkasteluun. Esimerkkejä näistä ovat lentoradan määräytymiseen liittyvät ominaisuudet kuten ohjuksen kiihdytysvaiheen pituus, loftausprofiili, moottorin työntövoimaprofiili ja niin edelleen.

MisDA-mallin toista osaa voidaan käyttää MisTarget-ohjelmalla simuloitavien aseiden datalinkkimaalitiedon hyvyuden vaikutusten arviointiin käyttäen erilaisia maalimalleja. Tässä työssä käytettiin vain ennalta määritettyjä, ilman lentokonemaalimallia tuotettuja, maalin lentoratoja. Mallilla voidaan tarkastella kaikkia kappaleessa 3.5 mainittuja tapoja tuottaa maalin rata. Mallin toista osaa käytettäessä voidaan myös ottaa käyttöön kaikki MisTarget-ohjelman stokastiset ominaisuudet, mikäli nämä koetaan tarkastelujen kannalta tarpeellisiksi. MisDA soveltuu pienin muutoksin käytettäväksi Monte Carlo -tyyppisten simulaatioiden toteuttamiseen. Muutoksia vaaditaan ohjaamaan lähtötiedostojen avulla stokastisten komponenttien päälle kytkentää ja määrityksiä.

Lähteissä [53], [56] on arvioitu, että tulevaisuudessa ilmataisteluohjusten ohjauslait perustuvat edelleen suhteelliseen navigointiin tai sen kehitelmiin. Näistä lupaavimmalta vaikuttaa laajennettu suhteellinen navigointi [53]. Yksi MisTarget-ohjelmalla ja tässä työssä kehitetyllä MisDA-mallilla toteutettava jatkotutkimusmahdollisuus on laajennetun suhteellisen navigoinnin toiminnan vertaaminen adaptiiviseen suhteelliseen navigointiin. Lisäksi laajennetun suhteellisen navigoinnin mallintaminen saattaa olla tarpeellinen tulevaisuudessa uusien ilmataisteluohjusten simulointiin. Tämä jatkotutkimusmahdollisuus vaatii muutoksia MisTarget-ohjelmaan ja mahdollisti MisDA-malliin.

Muita jatkotutkimusmahdollisuuksia ovat esimerkiksi datalinkkiyhteyksien kantaman vaikutuksen tarkastelu ohjuksen suorituskykyyn ja ilmataisteluoohjusten käyttö risteilyohjusten, ballististen ohjusten, hypersonisten aseiden tai pienen tutkapoikkipinta-alan omaavien maalien torjuntaan. Myös Ilmavoimien seuraavan HX-monitoimihävittäjän mukanaan tuomia uusia yhä verkottuneemman ilmapuolustusjärjestelmän osana toimimisen toimintatapoja ja niiden vaatimuksia ilmataisteluoohjusten tiedonvälitykseen voidaan tutkia MisDA-mallin avulla.

6.4.1. MisTarget-ohjelman jatkokehittämistarpeet

Tässä kappaleessa vastataan jatkotutkimusmahdollisuuksien osalta toiseen alatutkimuskysymykseen eli miten MisTarget-ohjelmaa tulee kehittää tukemaan paremmin ulkoisen maalitiedon käytön tutkimista. Esitettävät jatkokehittämistarpeet parantavat MisTarget-ohjelman käytettävyyttä yleiseen ohjusten suorituskyvyn arviointiin liittyvään tutkimukseen. Kehittämistarpeet pohjautuvat osin kappaleen 2 kirjallisuuskatsaukseen ja sen perusteella kappaleessa 2.9 esitettyihin vaatimuksiin ilmataisteluoohjusten ulkoiselle tiedonvälitykselle sekä osin kappaleessa 3 esitettyyn MisTarget-ohjelman ja sen mallinnuksen kuvaukseen. Tämän diplomityön osalta tunnistetut MisTarget-ohjelman kehittämistarpeet esitettiin kappaleessa 3.7 osavastauksena toiseen alatutkimuskysymykseen. MisDA-mallin toista osaa kehitettäessä ja työn simulaatioita toteutettaessa ei tunnistettu muita kehittämistarpeita.

Vastauksena toiseen alatutkimuskysymykseen tunnistettiin seuraavat tarpeet MisTarget-ohjelman kehittämiseksi tukemaan paremmin ulkoisen maalitiedon käytön tutkimista:

1. Datalinkkimallin tulee huomioida maalitiedon erilainen hyvyys eri suunnissa.
2. Datalinkkimallin tulee kuvata Ilmavoimien käytössä olevien ohjusten toimintaa.
3. Datalinkkimallin maalin nopeudet tulee ottaa käyttöön ohjelman laskennassa.
4. Datalinkkimalli tulee olla käytössä myös infrapunaohjuksissa.
5. Datalinkkimallin puuttuvien maalitietoviestien käsittelyä tulee kehittää vastaamaan nykyaikaisten ilmataisteluoohjusten toimintaa esimerkiksi Kalman-suotimen mallilla.
6. Laajennetun suhteellisen navigoinnin ohjauslain mallinnus tulee saattaa loppuun.
7. Ohjuksen sensorimallia tulee parantaa mallintamaan esimerkiksi maalin etsintään kuluva aika sekä maalin liikesuunnan ja tutkapoikkipinta-alan vaikutukset.
8. Maali- ja ohjuksen sensorimallin tulee mahdollistaa usean maalin tilanteen simulointi.

9. Maalimallia varten tulee kehittää maalia vastaan ammuttuun ohjukseen realistisesti reagoiva autopilottitoiminnallisuus.

10. MisAnalysis- ja MisTarget-ohjelmien noin kahteenkymmeneen raporttiin ja muistioon levinnyt kuvaus ja käyttöohje on yhdistettävä yhdeksi raportiksi.

Datalinkkimalli ei tämän diplomityön tarpeiden perusteella tehtyjen muutoksien jälkeen vastaa täysin nykyaikaisten ilmataisteluohjusten datalinkkien toteutusta eikä se ole Ilmavoimien käytössä olevan Amraam-ilmataisteluohjuksen toiminnallisuuden mukainen. Viisi ensimmäistä jatkokehittämistarvetta koskevatkin MisTarget-ohjelman datalinkkimallia. Sen tulee esimerkiksi pystyä huomioimaan maalitiedon muodostamiseen käytettyjen eri sensorien erilaisia suunnan ja etäisyyden mittaustarkkuuksia ohjukselle kerrottavassa maalitiedon hyvydessä. MisTarget-ohjelman jatkokehittämistarpeet 1 ja 2 ovat pakollisia kappaleessa 6.4 esitettyjen Amraam-ilmataisteluohjukseen liittyvien jatkotutkimusmahdollisuuksien toteuttamiseksi. Datalinkkimallilla annettavien maalin nopeuksien käyttöönotolla poistetaan MisTarget-ohjelmasta näiden nopeuksien laskenta datalinkkiviestien maalin paikasta. Tämä parantaa suhteellisen navigoinnin ohjauslain toteutuksessa käytettävien maalin nopeuksien tarkkuutta. Datalinkkimaalitiedon käyttö tulee laajentaa koskemaan myös infrapunahakupäällä varustettujen ohjuksia.

Jatkokehittämistarpeet 5–7 ovat tarpeellisia tiettyjen kappaleessa 6.4 esitettyjen jatkotutkimusmahdollisuuksien kannalta sekä yleisesti nykyaikaisten ilmataisteluohjusten mallien kannalta. Ne voivat osoittautua tarpeelliseksi tulevaisuudessa laadittaessa uusien ohjusten malleja. Tässä työssä toteutettujen simulaatioiden perusteella viidennen jatkokehittämistarpeen tunnistettiin haittaavan ulkoisen maalitiedon vaikutuksiin liittyvää tutkimusta puuttuvien maali-tietoviestien osalta. Tätä jatkokehitystarvetta ei ehditty toteuttaa tämän diplomityön aikana. Kuudes jatkokehittämistarve on tarpeen tutkittaessa nykyaikaisten ohjusten ohjauslakien vaikutusta niiden suorituskykyyn.

Kahdeksas jatkokehittämistarve parantaisi merkittävästi ohjuksen lennon aikaisen maalin vaihdon tarkastelujen toteuttamista. Jatkokehittämistarve 9 ei ole välttämätön jatkotutkimusmahdollisuuksien kannalta, mutta se tuottaisi niitä varten ohjukseen reagoivan maalimallin poistaen osin tarvetta aikaa vievälle maalin lentoratojen määrittämiselle. Tämän jatkokehittämistarpeen toteuttaminen on mahdollista vain MisTarget-ohjelman dll-kutsuna suoritettavan version osalta. Lisäksi yleisenä jatkokehittämistarpeena kappaleessa 3.1 nostettiin esiin MisAnalysis- ja MisTarget-ohjelmien noin kahteenkymmeneen raporttiin ja muistioon levinneiden kuvauksen ja käyttöohjeen yhdistäminen yhdeksi raportiksi.

Tulevaisuudessa MisTarget-ohjelmaan tulee todennäköisesti tarve mallintaa muita, esimerkiksi HX-monitoimihävittäjän mukana saatavia, asejärjestelmiä. Näiden asejärjestelmien osalta erityisiä MisTarget-ohjelman jatkokehittämistarpeita voidaan esittää vain, jos niiden ominaisuuksista ja toiminnallisuudesta saadaan tietoja ja niiden mallinnuksen todetaan vaativan uusia ohjelman ominaisuuksia.

6.4.2. MisDA-mallin jatkokehittämistarpeet

Kappaleessa esitetään tässä diplomityössä tunnistetut MisDA-mallin jatkokehittämistarpeet. MisDA-malli laadittiin siten, ettei MisTarget-ohjelman jatkokehittäminen rajoita sen käyttöä, kunhan ohjelman lähtö- ja tulostiedostot pysyvät nykyisellään. Mikäli MisTarget-ohjelman jatkokehitystarve vaatii edellä mainittujen tiedostojen rakenteen muuttamista, tulee MisDA-mallin ohjelmallista toteutusta muokata vastaavasti.

Kappaleessa 6.4.1 esitetyt MisTarget-ohjelman jatkokehittämistarpeet 1, 2 ja 7 aiheuttavat jatkokehittämistarpeen myös MisDA-mallin molemmille osille. Jatkokehittämistarpeet 6 ja 8 aiheuttavat jatkotutkimusmahdollisuuden toteutuksesta riippuen jatkokehittämistarpeen MisDA-mallin toiselle osalle. Muiden MisTarget-ohjelman jatkokehittämistarpeet eivät vaadi muutoksia MisDA-malliin. Jatkokehittämistarpeiden 1, 2 ja 7 muutokset liittyvä etsintävolyymiin käsittelyyn ja maalin etsintään. Etsintävolyymiin erilainen muoto ja maalinetsinnän mallinnus tulee huomioida MisDA-mallin ensimmäisessä osassa. Toisen osan kannalta muutokset liittyvät vain MisTarget-ohjelman datalinkkitiedoston muutosten huomioimiseen. MisDA-mallin ensimmäinen osa on muunnettavissa esimerkiksi Amraam-ilmataisteluohjuksen tarkasteluja varten. Tämän toteuttamiseen vaaditaan turvaluokiteltuja tietoja Amraam-ohjuksen toiminnasta loppuhakeutumisvaiheeseen siirryttäessä. Mallilla voidaan tuottaa tässä työssä esitettyjä vastaavia arvioita Amraam-ohjukselle.

Jatkokehittämistarpeen 6 osalta MisDA-mallin ohjusmallin muokkausaliohjelma vaatii muutoksia, mikäli jatkotutkimusmahdollisuuden toteutuksessa halutaan selvittää esimerkiksi kyseisen ohjauslain vahvistuksen muutoksia. Toiminnallisuus on helppo toteuttaa. Jatkokehittämistarve 8 saattaa vaatia muutoksia MisDA-mallin toisen osan maalinvaihtotarkastelun toteutustapaan.

Vaikka tässä työssä toteutettavissa simulaatioissa ei käytetty MisTarget-ohjelman stokastisia komponentteja, ei MisDA-mallin toteutus sulkenut pois niiden käyttöä. Stokastiset komponentit voidaan kytkeä päälle ilman muutoksia MisDA-malliin. Yksi jatkotutkimusmahdollisuus on tutkia stokastisten komponenttien arvojen varioimisen vaikutuksia ohjuksen suorituskykyyn Monte Carlo -tyyppisillä simulaatioilla. Tämä on mahdollista toteuttaa MisDA-mallin toisella osalla pienin MisTarget-ohjelman lähtötiedostojen muokkaamiseen liittyvin muutoksin. Mikäli jatkotutkimusmahdollisuus liittyy MisDA-mallin toisen osan käyttöön ballististen ohjusten torjunnan tarkasteluihin tai yhdistämiseen vuorovaikutteisiin virtuaali/live-simulaatioihin, tulee MisDA-malli sovittaa toimimaan MisTarget-ohjelman kappaleessa 3.1 kuvatun dll-kutsuna suoritettavan version kanssa.

6.5. Ilmataisteluohjusten kehityssuunnat tulevaisuudessa

Tässä kappaleessa tarkastellaan ilmataisteluohjusten kehityssuuntia tulevaisuudessa peilaten niitä tämän tutkimuksen tuloksiin. Tämä kappale perustuu kappaleen 2 kirjallisuuskatsaukseen. Sen perusteella arvioidaan tulevaisuuden ilmataisteluohjusten ja toimintaympäristön merkitystä ilmataisteluohjusten ulkoiseen tiedonvälitykseen. Samalla tarkastellaan ilmataistelun ja ilmataisteluohjusten tulevaisuuden kehitysnäkymiä sitoen ne työn viitekehykseen.

Yleisesti asejärjestelmien ja ilmasta-ilmaan ohjuksien kehityksen osalta kehityssuuntana on niiden kantaman kasvattaminen niin suureksi, että laukaisu voidaan suorittaa vastustajan torjuntaetäisyyden ulkopuolelta. Tällöin ampuvaan lavettiin kohdistuva riski pienenee. Ammuntaetäisyyksien kasvun seurauksena maalinosoitukset annetaan muualta kuin ampuvalta lavetilta. Kehityssuuntana on yhä enemmän ”ammu ja unohda” -tyyppiset ohjukset, joiden kuvaava hakupää kykenee itse etsimään ja luokittelemaan maalit sekä hakeutumaan niitä kohti. Niiden lennon keskivaiheen hakeutumista tuetaan muilta kuin ampuvalta lavetilta lähetetyillä datalinkkimaalitiedoilla. Ohjusten massaa, kokoa ja kustannuksia pyritään pienentämään siirtämällä osa ohjuksen elektroniikasta aselavetilla. Ilmataistelujärjestelmän toimijoiden välillä on myös kyettävä välittämään maalitietoja ja tulikomentoja koko taistelun kannalta optimaalisen ampuvan lavetin valitsemiseksi ja ammuskulutuksen tasaamiseksi. Nämä kehityssuunnat korostavat datalinkkitiedonsiirron merkitystä tulevaisuudessa ilmataisteluohjuksien osalta, mutta toisaalta myös tulevaisuuden ilmataistelun yhä kasvavaa kompleksisuutta⁵. [10], [35]

⁵ ”Kompleksisuus on kokonaisuuden (ja) osien välisestä dynaamisesta, epälineaarista runsaasti vapausasteita sisältävästä vuorovaikutuksesta muodostuvaa ennakoimatonta (vaikeasti ennakoitavaa) ja kontrolloimatonta (kontrolloitavaa) jatkuvaa yhteen kietoutumista ts. erilaisten yhteisvaikutusten kumuloitumista.” Puustinen & Hanén 2018, YEK60 luento kompleksisuudesta.

Tulevaisuuden monitoimihävittäjien ja lennokkien on kyettävä seuraamaan ja ampumaan yhä useampia maaleja yhtäaikaisesti. Useiden maalien seurannan ja laajan ilmasodankäyntialueen seurannan on oltava samanaikaista. Ohjuksen laukaiseminen paljastaa ampuvan lavetin, mikäli siitä on näköyhteys maaliin. Toisaalta maalin osoittaminen vaatii näköyhteysreitit. Yhden toimijan vastatessa maalin osoittamisesta ja toisen ampumisesta, voidaan taistelua johtavan lavetin paljastumista vaikeuttaa ja ampuva lavetti voi toimia suojasta. Tämä edellyttää joko maalinsiirtotoimintoa (target handover) järjestelmien välillä ja/tai ohjusten ampumisesta ilman lukittumista maaliin (LOAL-toiminnallisuus). [35]

Uuden tekniikan avulla parannetaan monitoimihävittäjien ja ohjusten sensorien näkökykyä ja -aluetta (FOV), häirinnänsietoa, maalin seuranta, liikehtimiskykyä ja kantamaa. Ohjusten hakupäiden ja datalinkkien kehittymisen myötä ohjuksen hakupään tuottamaa maalitietoa voidaan käyttää hyväksi osana ilmapuolustusjärjestelmän sensoritietojen yhdistämistä, maalin seuranta ja häirintätilanteen arvioimista. [35] Tämä vaatii aseisiin kaksisuuntaisen datalinkin.

Ohjusten liikehtimiskyky paranee työntövoimasuuntaukseen käytön ja kantama paranee rakettimoottorien kehityksen sekä ilmaa hengittävien moottorien käytön myötä. Ohjusten kantaman arvioidaan olevan yli kaksinkertainen nykyisiin ohjuksiin verrattuna. Työntövoimasuuntauksen yhdistäminen pitkän kantaman ilmataisteluohjukseen vähentää osaltaan tarvetta aseistaa hävittäjä usealla erilaisella ilmataisteluohjustyypillä. [10] Ohjauslait tulevat todennäköisesti pohjautumaan edelleen suhteelliseen navigointiin ja sen laajennuksiin. [56] Ohjuksen oman navigointijärjestelmän virhe määritetyssä paikassa aiheuttaa täysin samankaltaisia ongelmia ohjuksen hakeutumisella kuin mitä tässä tutkimuksessa tarkastellut ulkoisen maalitiedot virheet. Tämän vuoksi tulevaisuuden ohjuksissa niiden inertiajärjestelmää tuetaan GPS-järjestelmällä. Näin toimimalla ohjusten oman paikan mittaustarkkuus parantuu tulevaisuudessa. [10]

Kehityssuuntana on myös monikäyttöisyys ja lisäksi ilmataisteluohjuksia voidaan tulevaisuudessa käyttää monentyyppisiä maaleja, kuten lennokkeja ja risteilyohjuksia vastaan. Monikäyttöisten aseiden suorituskyky ja kyky torjua pienen herätteen maaleja suurilta etäisyyksiltä tulee perustumaan datalinkkimaalitiedon hyödyntämiseen. Esimerkkinä ilmataisteluohjusten monikäyttöisyydestä on AIM-9X Sidewinder Block II -ohjus, jota suunnitellaan käytettäväksi myös maamaaleja vastaan [55]. Lisäksi ohjusten komponentit, erityisesti navigointijärjestelmät ja hakupäät, saattavat olla tulevaisuudessa yhteisiä ohjusten välillä. Näistä esimerkkinä mainittakoon CALNS-järjestelmä (Common Air Launched Navigation System), joka on käytössä AIM-120D Amraam -ilmataisteluohjuksessa [60] sekä merivoimien aluksista laukaistava SM-6 -ohjus, joka käyttää Amraam-ilmataisteluohjuksen hakupäätä ja hakeutumiselektronikkaa. RIM-116A -ohjus on puolestaan tarkoitettu torjumaan merimaaleja vastaan ammuttuja risteilyohjuksia ja se perustuu AIM-9 -ilmataisteluohjukseen. [55]

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän diplomityön tutkimustehtävänä oli selvittää, miten nykyaikaisessa ilmasodankäynnissä käytetään ulkoista tiedonvälitystä ilmataisteluoohjuksille ja miten se vaikuttaa ohjusten suorituskykyyn. Aihealueen tutkimuksen tilanne ja vaatimukset tiedonvälitykselle selvitettiin ensin kirjallisuuskatsauksella. Työssä esitettiin kirjallisuuskatsauksen pohjalta tehty laaja selvitys ilmataisteluoohjusten toiminnan perusteista, jonka avulla perusteltiin tarve ilmataisteluoohjusten ulkoiselle tiedonvälitykselle, tuotettiin ymmärrys ulkoisen tiedonvälityksen suorituskykyvaatimuksista ja tutkittiin nykyaikaisen verkottuneen ilmasodankäynnin mahdollisuuksia sekä vaatimuksia ohjusten tiedonvälitykselle. Eräänä tarkasteltavana teemana olivat ilmataisteluoohjusten maaliin hakeutumiseen ja siten niiden lentorataan merkittävästi vaikuttavat ohjauslait. Työssä kerrottiin minkälaisia vaatimuksia nykyaikainen ilmasodankäynti ja nykyaikaiset ilmataisteluoohjukset aiheuttavat ohjusten ulkoiselle tiedonvälitykselle. Lisäksi kirjallisuuskatsaukseen perustuen työssä arvioitiin ilmataisteluoohjusten tulevaisuuden kehityssuuntia sekä tulevaisuuden ilmataisteluoohjusten ja toimintaympäristön merkitystä ilmataisteluoohjusten ulkoiseen tiedonvälitykseen. Samalla tarkasteltiin ilmataistelun ja ilmataisteluoohjusten tulevaisuuden kehitysnäkymiä sitoen ne työn viitekehykseen.

Tämän jälkeen esiteltiin diplomityön simulaatioissa käytetty Suomessa kehitetty MisTarget-ohjussimulaatio-ohjelmisto. Työssä esiteltiin MisTarget-ohjelma, ohjelman ohjus- ja datalinkkimallit sekä minkälaisia maalimalleja simulaatioissa voidaan käyttää. Lisäksi esiteltiin tätä työtä varten muodostettu ohjusmalli. Edellä mainittuja asioita tarkasteltiin kirjallisuuskatsauksessa esitettyjen ohjusten ominaisuuksien ja ulkoiselle tiedonvälitykselle esitettyjen vaatimusten pohjalta. Työssä arvioitiin MisTarget-ohjelman soveltuvuutta tässä diplomityössä toteutettaviin simulaatioihin ja sen todettiin sopivan työssä käytettäväksi. Samalla kuitenkin tunnistettiin lukuisia MisTarget-ohjelman jatkokehittämistarpeita, joita toteuttamalla ohjelma tukisi paremmin ulkoisen maalitiedon käyttöön ja yleisesti ohjautuviin aseisiin liittyvää tutkimusta.

Työssä toteutettiin ainutlaatuinen Missile Datalink Analysis (MisDA) -malli. MisDA-malli esiteltiin sen konseptuaalisista kuvauksista ohjelmallisten toteutuksien kautta verifiointiin ja validointiin. Sen ensimmäinen osa arvioi ohjuksen kykyä lukittua ulkoisella maalitiedolla osoitettuun maaliin. Mallin toisella osalla tarkastellaan laajemmin ulkoisen maalitiedon hyvyden vaikutusta ohjuksen suorituskykyyn. Se perustuu tarkalla kuuden vapausasteen MisTarget-ohjussimulaatio-ohjelmalla suoritettuihin eräajotyyppeihin simulaatioihin ja ottaa huomioon ohjuksen koko lennon.

MisDA-mallin toinen osa kehitettiin myös todellisten ammuntojen datalinkkimaalitiedon vaikutusten tarkasteluihin. Datalinkkimaalitiedon hyvyyden tekijöiden suuruuksia ja niiden syntymekanismia on mahdollista arvioida koelennoilta tallennettujen ilmataisteluohjukselle välitettyjen datalinkkimaalitietojen perusteella. Tämän jälkeen näitä tietoja tai suoraan lennoilta tallennettuja datalinkkimaalitietoja voidaan tarkastella MisDA-menetelmän simulaatioilla. Molempien mallien ohjelmallinen toteutus ohjelmoitiin Matlab-ohjelmistolla. Mallin verifiointissa sen molempien osien ohjelmallisen toteutuksen ja MisTarget-ohjelmaan tämän työn tarpeiden perusteella tehtyjen muutosten todettiin toimivan virheettömästi. Validoinnin osalta mallin molempien osien todettiin soveltuvan niiden tarkoitettuun käyttöön.

Oikein käytettyinä mallin molemmat osat tuottavat saman tuloksen ohjuksen kyvystä lukittua maalin. Toteutettujen simulaatioiden perusteella voidaan todeta, että mikäli MisDA-mallin ensimmäisen osan tuloksena on, ettei ohjus pysty lukittumaan maaliin, ei mallin toista osaa tarvita skenaarion lopputuloksen arvioimiseen. Mikäli mallin ensimmäisen osan tuloksena puolestaan todetaan ohjuksen pystyvän lukittumaan maaliin, on tarkastelu toteutettava loppuun mallin toisella osalla. MisDA-mallin toisen osan kannalta ei ole merkitystä mistä ja mihin ase simulaatiossa laukaistaan tai onko aseessa oma moottori. Mallia voidaan käyttää sellaisenaan tutkimaan datalinkkimaalitiedon hyvyyden tai maalin vaihdon vaikutusta kaikkiin MisTarget-ohjelmalla simuloitaviin aseisiin. Tarkasteltavana voi olla ilmasta ilmaan -ohjus, ilmasta maahan -ohjus, ilmasta maahan -pommi, maasta ilmaan -ohjus tai muu mahdollinen MisTarget-ohjelmalla mallinnettu ase.

Työssä toteutettiin huomattava määrä simulaatioita MisDA-mallilla yli kahdellakymmenellä erilaisella ammuntaskenaariolla. Skenaarioista työssä esitettiin viisi ja useita niiden mukaisesti toteutettuja simulaatioita. Simulaatioissa varioitiin maalitiedon hyvyyden määrittäviä tekijöitä. Tekijöitä olivat ulkoisen maalitiedon maalin paikan virhe, maalitiedon viive ja puuttuvat maalitietoviestit. Lisäksi simulaatioissa tarkasteltiin ohjusmallin ominaisuuksien vaikutuksia sen suorituskykyyn. Osoituksena MisDA-mallin toisen osan käyttömahdollisuuksista skenaarioissa tarkasteltiin ohjuksen lennonaikaista maalin vaihtoa. Työssä toteutettujen simulaatioiden tuloksista koostettiin vastaukset siihen, miten virheet maalin paikassa, viive maalitiedossa ja puuttuvat maalitietoviestit vaikuttavat ilmataisteluohjuksen suorituskykyyn.

Simulaatioiden tulosten perusteella juuri ennen ohjuksen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä vastaanotetuiden viimeisten maalitietoviestien hyvyys on kriittinen ohjuksen suorituskyvyille. Niistä voitiin myös päätellä, että loppuhakeutumisvaiheeseen tulisi siirtyä heti ohjuksen oman sensorin pystyessä havaitsemaan maalin. Näin voidaan välttää mahdollisesti virheellisen datalinkkimaalitiedon aiheuttamat haasteet maalin torjunnassa. Näiden simulaatioiden tulosten perusteella voitiin vahvistaa kirjallisuuskatsauksessa esitetty toteamus: mitä lähemmäksi maalia ohjus lentää ulkoisen maalitiedon varassa, sitä suurempi merkitys maalitiedon hyvydellä on ohjuksen suorituskykyyn. Numeroarvotuloksena voidaan esittää MisDA-mallin perusteella tuotettu arvio maalitiedon viiveen sallituista arvoista. Hävittäjälentokoneiden taktisilla nopeuksilla ei ulkoisen tiedonvälityksen viive saa työn simulaatioiden perusteella olla yli 0.1 s, kun käytössä on halkaisijaltaan 200 m kokoinen pallonmuotoinen etsintävolyymi, josta ohjus etsii maalin loppuhakeutumisvaiheeseen siirtyessään. Muutoin ohjuksen loppuhakeutumisvaiheessa käyttämän etsintävolyymien koon tulisi olla suuri hävittäjäjutkan tarkkuuteen nähden. Tämä puolestaan vaikeuttaa esimerkiksi maalien erottelu tiiviistä lautasta. Vastaavasti etsintävolyymien halkaisijan ollessa 1000 m tulisi viiveen olla alle 0.3 s. Ilmatilanteissa nopeudet saattavat kuitenkin nousta ylääänipuolelle, jolloin ulkoisen maalitiedon viiveen tulisi olla suuruusluokaltaan 0.05 s 200 m etsintävolyymien halkaisijalla.

Skenaarioiden simulaatioilla osoitettiin myös, miten puuttuvat maalitietoviestit vaikuttavat ohjuksen suorituskykyyn. MisDA-mallin simulaatioilla ei pystytä tarkastelemaan realistisesti puuttuvien maalitietoviestien vaikutusta ohjusten suorituskykyyn MisTarget-ohjelman tässä diplomityössä käytetyn version niihin liittyvän käsittelyn toteutuksesta johtuen. Tästä puutteesta huolimatta simulaatioiden tulosten perusteella pystyttiin toteamaan, että loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen hetkellä puuttuvat maalitietoviestit aiheuttavat saman tilanteen kuin virheelliset viimeiset ohjuksen vastaanottamat maalitietoviestit. Muutama hyvälaatuinen maalitietoviesti juuri ennen loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymistä riittää varmistamaan ohjuksen kyvyn lukittua maalin pitkänkin maalitietoviestikatkon jälkeen. Ohjuksen suorituskyky vaikuttaa suoritettujen simulaatioiden perusteella olevan hyvin mustavalkoinen, joko ohjus pääsee hyvin lähelle maalia tai se ei pysty lukittumaan maaliin lainkaan. Tämä määräytyy sen perusteella, päätyykö maali ohjuksen etsintävolyymien sisälle loppuhakeutumisvaiheeseen siirtymisen hetkellä suoritettava maalinetsinnän aikana.

Ilmataisteluohjaukselle välitettävän ulkoisen maalitiedon hyvyys vaikuttaa sen suorituskykyyn merkittävästi. Käytännössä ulkoisen maalitiedon hyvyys ratkaisee ohjautumisen todennäköisyyden (P_G). Mikäli maali päättyy ohjuksen lennon aikana ohjuksen oman sensorin haku- tai havaintoalueen ulkopuolelle, on ohjautumisen todennäköisyys nolla. Esimerkiksi Amraam-ilmataisteluohjauksen osalta ulkoisen maalitiedon virheen aiheuttaessa maalin sijaintiin epävarmuuslaatikon koon ylittävän virheen tapahtuu näin.

Tämän diplomityön tutkimus tuotti uutta julkista tutkimustietoa siitä, miten ulkoisen tiedonvälityksen hyvyyden vaikutusta ilmataisteluohjauksen suorituskykyyn voidaan arvioida ohjussimulaation avulla. Tähän mennessä julkaistuun tietoon verrattuna tässä tutkimuksessa on erityistä mallin rakentaminen tarkkaan kuuden vapausasteen ohjussimulaatioon pohjautuen ja ohjuksen koko lennon huomioon ottaminen. Lisäksi käytettävä ohjussimulaatio ja kehitetty malli mahdollistavat laajasti erilaisten vaikutusten mallintamisen ammuntaskenaarioihin, todellisten tilanteiden tarkastelun lentotallenteita käyttämällä sekä simulaatioiden liittämisen laajempiin kokonaisuuksiin.

Tämän diplomityön reliabiliteetti pohjautui siihen, että työssä kehitetty MisDA-malli todettiin toimivaksi ja luotettavaksi työssä käytetyllä ohjusmallilla. Saadut tulokset olivat analyysin perusteella luotettavia. Ohjus- ja datalinkkimalleilla havaittiin kuitenkin olevan merkittävä vaikutus MisDA-simulointien tuloksiin, ja MisTarget-ohjelmasta tunnistettiin jatkokehittämistarpeita. MisDA-mallin todettiin sopivan Puolustusvoimien käytössä olevien tai muiden kiinnostavien ohjautuvien aseiden monipuolisiin tarkasteluihin. Näitä varten on muodostettava ase- ja maalimallit sekä taktiikan mukaiset ammuntaskenaariot. Tulevaisuudessa ohjusten kehityssuunnat lisäävät ulkoisen tiedonvälityksen merkitystä ja aseiden käyttöperiaatteet kehittyvät. Tämän diplomityön havaintojen perusteella MisDA-mallin voidaan todeta soveltuvan laajasti tämän työn aihealueen tutkimukseen. Vastaavaa mallia ohjautuvien aseiden suorituskyvyn tarkasteluun ei ole aiemmin esitelty julkisesti saatavilla olevassa kirjallisuudessa.

LÄHTEET

- [1] A. Law, *Simulation Modeling and Analysis 5th Edition*, 2015
- [2] A. Pankkonen, Ilmaa hengittävän moottorin simulointi MisTarget-ohjelmassa, muistion, AeroRD, 4.9.2014
- [3] B. Stevens and F. Lewis, *Aircraft Control and Simulation*, John Wiley & Sons Inc., 1992, ISBN 0-471-61397-5
- [4] C. Duhon, Tactical Decision Aid for CEC Engage on Remote, Johns Hopkins APL Technical Digest, Volume 23, Numbers 2 and 3, 2002
- [5] C. Grant, CEC: Sensor Netting with Integrated Fire Control, Johns Hopkins APL Technical Digest, Volume 23, Numbers 2 and 3, 2002
- [6] C. Norman, Optimization of Electronic Protection Testing for the F/A-18 Active Guidance Air-to-air Weapon System, Master's Thesis, University of Tennessee, USA, 2003
- [7] Director, Operational Test and Evaluation FY 2020 Annual Report, United States of America Department of Defense, January 2021
- [8] E. Eichblatt Jr. (edited by), *Test and Evaluation of the Tactical Missile*, 1989
- [9] E. Fleeman, *Tactical Missile Design 2nd Edition*, AIAA Education Series, 2006
- [10] Esiselvitys Hornet-kaluston suorituskyvyn korvaamisesta - loppuraportti, Puolustusministeriön nimeämä työryhmä, 2015
- [11] F. Imado and S. Uehara, High-g Barrel Roll Maneuvers Against Proportional Navigation from Optimal Control Viewpoint, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 21, No. 6, 1998, pp. 876–881
- [12] G. Stimson, H. Griffiths, C. Baker and D. Adamy, *Stimson's Introduction to Airborne Radar*, SciTech Publishing, 2014
- [13] H. Mansikka, K. Virtanen, D. Harris and J. Salomäki, Live-Virtual-Constructive Simulation for Testing and Evaluation of Air Combat Tactics, Techniques, and Procedures, Part 1: Assessment Framework, *Journal of Defense Modeling and Simulation*, DOI: 10.1177/1548512919886375, 12.11.2019
- [14] H. Mansikka, K. Virtanen, D. Harris and J. Salomäki, Live-Virtual-Constructive Simulation for Testing and Evaluation of Air Combat Tactics, Techniques, and Procedures, Part 2: Demonstration of the Framework, *Journal of Defense Modeling and Simulation*, DOI: 10.1177/1548512919886378, 12.11.2019

- [15] <https://arc.aiaa.org/>
- [16] <https://arc.aiaa.org/journal/jgcd>
- [17] <https://puolustusvoimat.fi/-/puolustusvoimien-logistiikkalaitos-lahetti-ilmatorjunnan-korkeatorjunnan-kehittamisen-tarjouspyynnot>, haettu 20.7.2021
- [18] <https://puolustusvoimat.fi/kalusto#/asset/view/id/107>, NASAMS II FIN Ilmatorjunta-ohjus 12 -järjestelmä, haettu 20.7.2021
- [19] <https://puolustusvoimat.fi/kalusto#/asset/view/id/201>, Puolustusvoimien kalusto – F/A-18 Hornet, haettu 18.5.2021
- [20] <https://scholar.google.com/>
- [21] <https://www.aiaa.org/>
- [22] <https://www.airforce-technology.com/projects/aim-120-advanced-medium-range-air-to-air-missile-amraam/>, AIM-120 Advanced Medium-Range Air-to-Air Missile (AM-RAAM), haettu 19.3.2021
- [23] <https://www.defenseworld.net/news/29340/>, Russian Troops to Start Receiving “Okhotnik” Su-57 Partner Drone from 2024, haettu 18.5.2021
- [24] <https://www.dsiac.org/resources/models/brawler/>, Defence Systems Information Analysis Center, Brawler Air Combat Simulation, haettu 5.7.2021
- [25] <https://www.google.com/>
- [26] <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>, Matlab numeerisen laskennan tietokoneohjelmisto, haettu 5.7.2021
- [27] <https://www.rand.org/>
- [28] <https://www.researchgate.net/>
- [29] <https://www.saab.com/products/meteor>, MBDA Meteor ilmataisteluohejus, haettu 19.3.2021
- [30] Ilmavoimien toimintasuunnitelma vuosille 2019–2023, asiakirja CO3447, 28.12.2018
- [31] J. Karelahti, K. Virtanen and T. Raivio, Game Optimal Support Time of a Medium Range Air-to-Air Missile, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 29, No.5, 2006
- [32] J. Karelahti, K. Virtanen, and J. Öström, Automated Generation of Realistic Near-Optimal Aircraft Trajectories, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 31, No. 4, 2008, pp. 674-688

- [33] J. Karellahti, K. Virtanen, and T. Raivio, Near-Optimal Missile Avoidance Trajectories via Receding Horizon Control, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 30, No. 5, 2007, pp. 1287-1298
- [34] J. Karellahti, Modeling and On-line Solution of Air Combat Optimization Problems and Games, Dissertation for the degree of Doctor of Technology, Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory Research Reports A99, 2007
- [35] J. Kosola ja T. Solante, Digitaalinen taistelukenttä – informaatioajan sotakoneen tekniikka, kolmas uusittu laitos, Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos, julkaisusarja 1, No 35, 2013
- [36] J. Poropudas and K. Virtanen, Game Theoretic Validation and Analysis of Air Combat Simulation Models *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, Vol. 40, No. 5, 2010, pp. 1057-1070
- [37] J. Poropudas and K. Virtanen, Simulation Metamodeling with Dynamic Bayesian Networks *European Journal of Operational Research*, Vol. 214, No. 3, 2011, pp. 644-655
- [38] J. Savolainen ja R. Vaittinen, Sääätötekniikan perusteet, Suomen robotiikkayhdistys, 2007, ISBN 9789519732930
- [39] J. Stillion and S. Perdue, Air Combat Past, Present and Future, August 2008, RAND Corporation
- [40] K. Horie and B. Conway, Optimal Fighter Pursuit-evasion Maneuvers Found via Two-sided Optimization, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 29, No. 1, 2006, pp. 105–112
- [41] K. Mayer, The Development of the Advanced Medium-Range Air-to-Air Missile: A Case Study of Risk and Reward in Weapon System Acquisition, RAND Corporation, N-3620-AF, 1993
- [42] K. Virtanen, Optimal Pilot Decisions and Flight Trajectories in Air Combat, Dissertation for the Degree of Doctor of Technology, Report A90, Helsinki University of Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics, Systems Analysis Laboratory, 2005
- [43] K. Virtanen, R. Hämäläinen and V. Mattila, Team Optimal Signaling Strategies in Air Combat, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, Volume: 36, Issue: 4, 2006

- [44] M. Fossier, The Development of Radar Homing Missiles, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 7, No. 6, 1984 pp. 541-551
- [45] M. Weiss and D. Bucco, Handover Analysis for Tactical Guided Weapons Using the Adjoint Method, AIAA 2005-6157, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, San Francisco CA, USA, 2005
- [46] M. Weiss and D. Bucco, The State-Space Approach to the Method of Adjoints for Hybrid Guidance Loop Models, AIAA 2009-6276, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago IL, USA, 2009
- [47] M. Weiss and T. Shima, Minimum Effort Pursuit/Evasion Guidance with Specified Miss Distance, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 39, No. 5, 2016, pp. 1–11
- [48] M. Weiss and T. Shima, Minimum Effort Pursuit/Evasion Guidance with Specified Miss Distance, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2016, pp. 1–11
- [49] Military Handbook: Missile Flight Simulation Part One Surface-to-Air Missiles, MIL-HDBK-1211, 1995
- [50] N. Dhananjay and D. Ghose, Accurate Time-to-go Estimation for Proportional Navigation Guidance. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 37, No. 4, 2014, pp.1378–1383
- [51] N. Shneydor, *Missile Guidance and Pursuit – Kinematics, Dynamics and Control*, Horwood Publishing, 1998, ISBN 1-898563-43-8
- [52] P. Yuan and J. Chern, Ideal Proportional Navigation, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 15, No. 5, 1992, pp. 1161-1165
- [53] P. Zarchan, *Tactical and Strategic Missile Guidance 3rd Edition*, 1997
- [54] P. Zipfel, Missile Model Fidelity and Integration for Air Combat Simulators, Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, Portland OR, USA, 1999
- [55] Program Acquisition Cost by Weapon System, United States of America Department of Defense, March 2019
- [56] R. Carr, *Optimal Control Methods for Missile Evasion*, Doctoral Dissertation, Air Force Institute of Technology, Wright Patterson AFB, USA, 2016
- [57] Raytheon Missile Systems, Operations Research Department, ACEM Operator's Guide, Version 4.5F, 2003

- [58] S. Gutman, On Optimal Guidance for Homing Missiles, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 2, No. 4, 1979, pp. 296–300
- [59] S. Ong and B. Pierson, Optimal Planar Evasive Aircraft Maneuvers Against Proportional Navigation Missiles, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 19, No. 6, 1996, pp. 1210–1215
- [60] Selected Acquisition Report (SAR) AIM-120 Advanced Medium Range Air-to-Air Missile (AMRAAM), United States of America Department of Defense, December 2019
- [61] Selected Acquisition Report (SAR) Cooperative Engagement Capability (CEC), United States of America Department of Defense, 2018
- [62] T. Sailaranta, A. Siltavuori and A. Pankkonen, Simple Missile Models Against High-g Barrel Roll Maneuver, In *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference* Portland OR, 2011
- [63] T. Sailaranta, DLS-tiedon hyödyntäminen ja omasuojan käytön mallintaminen MisTarget-ohjelmassa, muistio, Aalto-yliopisto, 7.12.2010.
- [64] T. Sailaranta, MisTarget modifikaatiot YEK-lopputyötä varten, muistio, AeroRD, 7.6.2021.
- [65] T. Sailaranta, MisTarget-online (FlyMissile) yleiskuvaus, muistio, AeroRD, 14.7.2021
- [66] T. Sailaranta, Ohjuksen analysointiohjelma MisAnalysis – Käyttäjän opas rev. 1.3, Raportti T-264, Teknillinen korkeakoulu, Aerodynamiikan laboratorio, Espoo, 2008
- [67] T. Sailaranta, Ohjuksen lentomekaanisia ominaisuuksia analysoiva menetelmä MisAnalysis, Raportti T-199, Teknillinen korkeakoulu, Aerodynamiikan laboratorio, Espoo, 2004
- [68] T. Sailaranta, Studies on Unmanned Atmospheric Flight, Dissertation for the Degree of Doctor of Technology, Aalto University, Department of Applied Mechanics, 2016
- [69] T. Watson, Distributed Simulation Testing for Weapons System Performance of the F/A-18 and AIM-120 Amraam, 1998
- [70] The Advanced Medium-Range Air-to-Air Missile (AMRAAM): Current Plans and Alternatives, The Congress of the United States Congressional Budget Office, August 1986
- [71] The X-Brawler Air Combat Simulation Manual Version 2.0, L-3 CommunicationsAnalytics Corporation, Vienna USA, 2002

- [72] Toimeksianto Puolustusvoimien Logistiikkalaitokselle – Lentokaluston taktisen käytön kehittäminen 3, asiakirja CM2321, 1.4.2016
- [73] Toimeksianto Puolustusvoimien Logistiikkalaitokselle – Lentokaluston taktisen käytön kehittäminen 4, asiakirja CQ2992, 12.6.2020

LIITE 1: Työssä käytetty ohjusmalli

```
*****
* Missile identification:
ID
** Active radar missile
RA
* Launch mass, kg:
MINIT
  200.0000
* Empty mass, kg:
MEMPTY
  125.00
* Empty mass activating time s since ignition:
MEMPTI
  3070.000
* Reference area (body cross section), m^2:
REFA
  3.1415902E-02
* Structural load factor limit:
NMAX
  35.00000
*Min Mach number of flight
*Flight terminated below the value
*Limiter valid if t > 5+TIROCK s and T = 0 N
MINMAC
  0.1
*Max Mach number of flight
*Max only for time forward simulations
*3DW-file limiters must be used for way-point computations
MAXMAC
  3.5
*Max flight time after first Miss
MIDITI
  5
*****
*COMPONENT STARTING DELAYS
* Delay in the guidance initiation, s:
* No guidance before that possible
* FCS must be also started
TIGUID
  0.4000
* Delay in the FCS initiation, s:
* End of ballistic-phase
TICONT
  0.25
* Delay in the tracking initiation, s:
* Before that the target-data supported by
* launcher etc (IR-seeker head!)
TITRAC
  0.0
* Motor starting delay, s:
TIROCK
  0.0
*****
*THRUST-DATA (stage lasting times after delay)
* Given Thrust (N) f(time)
* (t_boost and t_sust from above):
TGIVEN
```

```

* Number of given datapoints:
  4
* Time values (s):
  0.00    2.0    2.01    308
* Thrust values (N):
  50000    50000    11000.00    11000.00
MGIVEN
* Number of given datapoints:
  4
* Time values (s):
  0.00    2.0    2.01    308
* Mass flow (kg/s):
  25    25    1.8    1.8
MAGIVE
* Number of given datapoints:
  4
* Time values (s):
  0.00    2.0    2.01    308
* Missile Mass (kg):
  200.00    170.1    170.05    170.01
* Altitude correction (density ratio exponent)
RGIVEN
* Number of given datapoints:
  4
* Time values (s):
  0.00    2.0    2.01    308
* Exponent values:
  0    0    1.    1.
*
* Nozzle exit area (m^2)
*
EXAREA
  0.0000000E+00
*
* Propellant temperature Thrust correction
* (multiply the standard thrust)
*
THTMCR
  1
*
* BOOST Turn on TVC - alfa limit, deg:
ALBTVC
  0.0000000E+00
* BOOST Loss coefficient (max) TVC,
CLBTVC
  0.0000000
* BOOST Corresponding alfa (max loss) TVC,
ALBTLO
  0.0000000E+00
* BOOST Corresponding TVC max delta deg
*MSL nose up & JET down-> + delta
*MSL nose up & JET up -> - delta
TUBTVC
  0.0000000E+00
* SUST Turn on TVC - alfa limit, deg:
ALSTVC
  0.0000000E+00
* SUST Loss coefficient (max) TVC,
CLSTVC

```

```

0.000000
* SUST Corresponding alfa (max loss) TVC,
ALSTLO
0.0000000E+00
* SUST Corresponding TVC max delta deg
*MSL nose up & JET down-> + delta
TUSTVC
0.0000000E+00
*****
*SEEKER-HEAD-DATA
* Time Constant Tracking Loop:
TAUTRL
5.0000001E-02
* Time Constant Signal Processing Loop:
TAUSPR
5.0000001E-02
* Maximum seeker LOS rate, deg./s:
LOSRMX
90.
* Seeker gimbal limit, deg.:
GIMLIM
90.
* Seeker Instant Field of View, deg.:
FOVANG
6
* Maximum seeker tracking range ,km:
TRANGE
10.
* Radome slope deg/ deg:
RADSLO
0.0
* Target glint std m (SAMPLERATE 10 Hz):
STDGLI
0.0
*****
*GUIDANCE-DATA
* PROP NAV = 0:
NTYPET
0
* NavigationGains as a function of
* altitude and Ma: PROP NAV
NAVGAI
* Number of altitudes and Ma values:
6 7
* Altitudes, m:
0 5000 10000 15000 20000 80000
* Mach numbers:
0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 10.0
* Gains:
* Navigation gains for the PN control:
3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00
4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00
4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00
4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00
4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00
4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00
4.00 4.00 4.00 4.00 4.00 4.00
* Multiply PN Gain (outside range) :
NAVMUL
.75

```

```

* Limiting range (apply correction outside) :
NAVRAN
  10000
* Augmented prop Nav Gain:
AUGGAI
  0.0000000E+00
* AXIAL acceleration correction Nav Gain:
AXGAIN
  0
*****
* N-control if time<limit and gimbal>limit, vertical
* timezone TINVLA->TINALI s
TINVLA
  5
TINALI
  120
* gimbal limit deg
GINARA
  5
* gain
GANALI
  0
* N-control if time<limit and gimbal>limit, horizontal
* timezone TINHLA->TINALH s
TINHLA
  5
TINALH
  120
* gimbal limit deg
GINARH
  5
* gain
GANALH
  0
*****Loft1*****
*Lofting from launch (fraction of total t_flt)
TILOFT
  0
*Lofting (amount of g)
GALOFT
  0
*****Loft2*****
*Lofting time zone TILOFA-->TILOF1
TILOFA
  2
TILOF1
  6
*Lofting (amount of g)
GALOF1
  0
*****Loft3*****
* USE Loft = USELT
* USE MODE, 0 = Alt cmd wrt Earth
*   (1. data line only in use)
* USE MODE, 1 = command to the altitude
*   wrt TGT, acceleration command 0 if TGT
*   not inside the regime given above
* USE MODE, 2 = loose ceiling limit condition
*   obtained similarly as if USELT=1
USELT

```

```

1
*
*Altitude profile as a function of range->TGT
* (decreasing range values)
* OR Altitude profile as a function of TIME
* (increasing time values)
* (acceleration command = 0 if negative)
* (altitude wrt. earth commanded)
HCOMNU
* Number of ranges/times and TGT altitudes:
  5      4
* Ranges (m)-->TGT (decreasing) or Time (s)
2 425000 450000 475000 500000
* TGT Altitudes, m:
  0 5000 10000 20000
*Commanded altitudes,valid inside the given
*Range/Time regime given above
*
*IF USELT>0 --> MSL alt cmd wrt TGT altitude
* f(h_TGT, Range/Time)
* if TGT inside the TGT alt regime given
1000 1000 1000 1000 1000
5000 5000 5000 5000 5000
2500 2500 2500 2500 2500
0 0 0 0 0
*
*10000 10000 10000 10000 10000
*10000 10000 10000 10000 10000
*10000 10000 10000 10000 10000
*
*****Loft5*****
* Altitude profile cntr, gammarate deg/s and
* the time limit (s)
* rate positive nose up
*
* GAMMA IF GAMTIM and GAMTIA negative !!!
* ABS-values used in the simulation
*
GAMCNT
0
GAMTIA
3
GAMTIM
5
*
*****LEAD*****
* LEAD Gain (if Thrust>0):
GLEAD
0
*****
*****
*WARHEAD-DATA
* Warhead kill radius, m:
KILRAD
  20.00000
*****
*GIVEN VALUES SCALING-DATA
*****Aerodynamics
* Scaling multiplier for CD or CA:
CDMULT

```

```

1.2
* Scaling multiplier for CL or CN:
CLMUL1
  1.000000
* Scaling multiplier for CL or CN (beta):
CLMULB
  1
* Scaling multiplier for CLmax or CNmax:
CLMULT
  1
*****Scaling multiplier for thrust:
THMULT
  1
*****Scaling multipliers for MSL FCS:
* Unguided phase TRUE OMEGAN:
* Given data for the phase is scaled
* OmeganUnguided scale
* (ballistic vs. coast ratio):
OMEFUG
  0.75
* BOOST-Scaling multiplier for TRUE OMEGAN:
* (natural frequency (rad/s))
* OmeganBoost:
OMEGFB
  1
* SUST-Scaling multiplier for TRUE OMEGAN:
* OmeganSust:
OMEGFS
  1
* COAST-Scaling multiplier for TRUE OMEGAN:
* OmeganCoast:
OMMULT
  1.
* Unguided phase damping ratio:
* Given data for the phase is scaled
* DamratUnguided scale:
DMRFUG
  0.5
* DamratBoost scale:
DAMRFB
  1.000000
* DamratSust scale:
DAMRFS
  1.000000
* Scaling multiplier for DAMRAT:
* (damping ratio) (USED ALWAYS)
* (to scale)
DRMULT
  1
*****
*FLIGHT CONTROL SYSTEM FCS
*
* TRUE MISSILE Natural Frequency (rad/s) as
*a function of altitude and Ma, COAST:
OMEGAN
* Number of altitudes and Ma values:
  13          15
* Altitudes, m:
  0   2500   5000   7500  10000  12500  15000  17500  20000
22500  25000  27500  80000

```

```

* Mach numbers:
  0.00  0.70  0.88  0.98  1.08  1.20  1.50  1.90
2.30  2.70  3.20  4.00  5.60  6.00  10.00
* Natural Frequencies:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
*
* TRUE MISSILE Natural Frequency (rad/s) as
*a function of altitude and Ma, SUST:
OMEGAS
* Number of altitudes and Ma values:
      13      15
* Altitudes, m:
  0  2500  5000  7500  10000  12500  15000  17500  20000
22500  25000  27500  80000
* Mach numbers:
  0.00  0.70  0.88  0.98  1.08  1.20  1.50  1.90
2.30  2.70  3.20  4.00  5.60  6.00  10.00
* Natural Frequencies:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
*
* TRUE MISSILE Natural Frequency (rad/s) as
*a function of altitude and Ma, BOOST:
OMEGAB
* Number of altitudes and Ma values:
      13      15
* Altitudes, m:
  0  2500  5000  7500  10000  12500  15000  17500  20000
22500  25000  27500  80000
* Mach numbers:
  0.00  0.70  0.88  0.98  1.08  1.20  1.50  1.90
2.30  2.70  3.20  4.00  5.60  6.00  10.00
* Natural Frequencies:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
* TRUE MISSILE Damping Ratios as a function
* of altitude and Ma:
DAMRAT
* Number of altitudes and Ma values:
  6  7
* Altitudes, m:
  0  5000  10000  15000  20000  80000
* Mach numbers:
  0.0  1.0  2.0  3.0  4.0  5.0  10.0
* TRUE Damping Ratios:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
*
* Time Constant FCS:
* as a function
* of altitude and Ma:
TAUFCS
* Number of altitudes and Ma values:
      13      15
* Altitudes, m:
  0  2500  5000  7500  10000  12500  15000  17500  20000
22500  25000  27500  80000
* Mach numbers:
  0.00  0.70  0.88  0.98  1.08  1.20  1.50  1.90
2.30  2.70  3.20  4.00  5.60  6.00  10.00
* TAUFCS values :
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
*

```

```

*****
*MSL AERODYNAMICS
*
* CD-correction factor
* a function of altitude and Ma:
CDCORR
* Number of altitudes and Ma values:
      13          15
* Altitudes, m:
      0   2500   5000   7500   10000   12500   15000   17500   20000
22500   25000   27500   80000
* Mach numbers:
      0.00   0.70   0.88   0.98   1.08   1.20   1.50   1.90
2.30   2.70   3.20   4.00   5.60   6.00   10.00
* Correction factors:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
*
*
*COAST NORMAL FORCE: CN as a function
*of AoA and Ma:
CNAOAM
* Number of AoA and Ma values:
      13          15
* Angles of attack, deg.:
      0.0   5.0   10.0   15.0   20.0   25.0   30.0   35.0   40.0
45.0   50.0   55.0   60.0
* Mach numbers:
      0.00   0.70   0.88   0.98   1.08   1.20   1.50   1.90
2.30   2.70   3.20   4.00   5.60   6.00   10.00
* Normal force coefficients:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
*
*COAST AXIAL FORCE: CA as a function
*of AoA and Ma:
CAAOAM
* Number of AoA and Ma values:
      13          15
* Angles of attack, deg.:
      0.0   5.0   10.0   15.0   20.0   25.0   30.0   35.0   40.0
45.0   50.0   55.0   60.0
* Mach numbers:
      0.00   0.70   0.88   0.98   1.08   1.20   1.50   1.90
2.30   2.70   3.20   4.00   5.60   6.00   10.00
* Axial force coefficients:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
* CNmax in the COAST stage as
* a function of altitude and Ma:
CNMAX
* Number of altitudes and Ma values:
      13          15
* Altitudes, m:
      0   2500   5000   7500   10000   12500   15000   17500   20000
22500   25000   27500   80000
* Mach numbers:
      0.00   0.70   0.88   0.98   1.08   1.20   1.50   1.90
2.30   2.70   3.20   4.00   5.60   6.00   10.00
* MAX norm.force coefficients:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
* CNmax in the BOOST stage as
* a function of altitude and Ma:

```


DCNMB

* Number of altitudes and Ma values:

13 15

* Altitudes, m:

0 2500 5000 7500 10000 12500 15000 17500 20000
22500 25000 27500 80000

* Mach numbers:

0.00 0.70 0.88 0.98 1.08 1.20 1.50 1.90
2.30 2.70 3.20 4.00 5.60 6.00 10.00

* MAX norm.force coefficients:

*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***

* CNmax in the SUSTAIN stage as

* a function of altitude and Ma:

DCNMS

* Number of altitudes and Ma values:

13 15

* Altitudes, m:

0 2500 5000 7500 10000 12500 15000 17500 20000
22500 25000 27500 80000

* Mach numbers:

0.00 0.70 0.88 0.98 1.08 1.20 1.50 1.90
2.30 2.70 3.20 4.00 5.60 6.00 10.00

* MAX norm.force coefficients:

*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***

* CD CA increment for the BOOST/SUSTAIN

* stage as a function of Ma (Base drag):

DCDC

* Number of Mach values:

15

* Mach values:

0.00 0.70 0.88 0.98 1.08 1.20 1.50 1.90
2.30 2.70 3.20 4.00 5.60 6.00 10.00

* CD increments:

*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***

*

*

* BOOST

DCLTRB

* Number of AoA and Ma values:

13 14

* Angles of attack, deg.:

0.0 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0 35.0 40.0
45.0 50.0 55.0 60.0

* Mach numbers:

0.20 0.70 0.88 0.98 1.08 1.20 1.50 1.90
2.30 2.70 3.20 4.00 5.60 6.00

* Delta Lift coefficients:

*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***

*

* Trim aerodynamics DELTAS

* Delta CL as a function of AoA and Ma:

* SUSTAIN

DCLTRS

* Number of AoA and Ma values:

13 14

* Angles of attack, deg.:

0.0 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0 35.0 40.0
45.0 50.0 55.0 60.0

* Mach numbers:

```

    0.20    0.70    0.88    0.98    1.08    1.20    1.50    1.90
2.30    2.70    3.20    4.00    5.60    6.00
* Delta Lift coefficients:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
*
* Trim aerodynamics DELTAS
* Delta CL as a function of AoA and Ma:
* COAST
DCLTRC
* Number of AoA and Ma values:
    13        14
* Angles of attack, deg.:
    0.0    5.0    10.0    15.0    20.0    25.0    30.0    35.0    40.0
45.0    50.0    55.0    60.0
* Mach numbers:
    0.20    0.70    0.88    0.98    1.08    1.20    1.50    1.90
2.30    2.70    3.20    4.00    5.60    6.00
* Delta Lift coefficients:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
*
* Trim aerodynamics DELTAS
* Delta CD as a function of AoA and Ma:
* BOOST
DCDTRB
* Number of AoA and Ma values:
    13        14
* Angles of attack, deg.:
    0.0    5.0    10.0    15.0    20.0    25.0    30.0    35.0    40.0
45.0    50.0    55.0    60.0
* Mach numbers:
    0.20    0.70    0.88    0.98    1.08    1.20    1.50    1.90
2.30    2.70    3.20    4.00    5.60    6.00
* Delta Drag coefficients:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
*
* Trim aerodynamics DELTAS
* Delta CD as a function of AoA and Ma:
* SUSTAIN
DCDTRS
* Number of AoA and Ma values:
    13        14
* Angles of attack, deg.:
    0.0    5.0    10.0    15.0    20.0    25.0    30.0    35.0    40.0
45.0    50.0    55.0    60.0
* Mach numbers:
    0.20    0.70    0.88    0.98    1.08    1.20    1.50    1.90
2.30    2.70    3.20    4.00    5.60    6.00
* Delta Drag coefficients:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
*
* Trim aerodynamics DELTAS
* Delta CD as a function of AoA and Ma:
* COAST
DCDTRC
* Number of AoA and Ma values:
    13        14
* Angles of attack, deg.:
    0.0    5.0    10.0    15.0    20.0    25.0    30.0    35.0    40.0
45.0    50.0    55.0    60.0
* Mach numbers:

```

```

    0.20    0.70    0.88    0.98    1.08    1.20    1.50    1.90
2.30    2.70    3.20    4.00    5.60    6.00
* Delta drag coefficients:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
*
* Trim aerodynamics DELTAS
* Delta CN as a function of AoA and Ma:
* BOOST
DCNTRB
* Number of AoA and Ma values:
    13        14
* Angles of attack, deg.:
    0.0    5.0   10.0   15.0   20.0   25.0   30.0   35.0   40.0
45.0   50.0   55.0   60.0
* Mach numbers:
    0.20    0.70    0.88    0.98    1.08    1.20    1.50    1.90
2.30    2.70    3.20    4.00    5.60    6.00
* Delta Normal force coefficients:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
*
* Trim aerodynamics DELTAS
* Delta CN as a function of AoA and Ma:
* SUSTAIN
DCNTRS
* Number of AoA and Ma values:
    13        14
* Angles of attack, deg.:
    0.0    5.0   10.0   15.0   20.0   25.0   30.0   35.0   40.0
45.0   50.0   55.0   60.0
* Mach numbers:
    0.20    0.70    0.88    0.98    1.08    1.20    1.50    1.90
2.30    2.70    3.20    4.00    5.60    6.00
* Delta normal force coefficients:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
*
* Trim aerodynamics DELTAS
* Delta CN as a function of AoA and Ma:
* COAST
DCNTRC
* Number of AoA and Ma values:
    13        14
* Angles of attack, deg.:
    0.0    5.0   10.0   15.0   20.0   25.0   30.0   35.0   40.0
45.0   50.0   55.0   60.0
* Mach numbers:
    0.20    0.70    0.88    0.98    1.08    1.20    1.50    1.90
2.30    2.70    3.20    4.00    5.60    6.00
* Delta normal force coefficients:
*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***
*
DCATRB
* Number of AoA and Ma values:
    13        15
* Angles of attack, deg.:
    0.0    5.0   10.0   15.0   20.0   25.0   30.0   35.0   40.0
45.0   50.0   55.0   60.0
* Mach numbers:
    0.00    0.70    0.88    0.98    1.08    1.20    1.50    1.90
2.30    2.70    3.20    4.00    5.60    6.00    10.00
* D:

```

*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***

*

DCATRS

* Number of AoA and Ma values:

13 15

* Angles of attack, deg.:

0.0 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0 35.0 40.0
45.0 50.0 55.0 60.0

* Mach numbers:

0.00 0.70 0.88 0.98 1.08 1.20 1.50 1.90
2.30 2.70 3.20 4.00 5.60 6.00 10.00

* D:

*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***

*

DCATRC

* Number of AoA and Ma values:

13 15

* Angles of attack, deg.:

0.0 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0 35.0 40.0
45.0 50.0 55.0 60.0

* Mach numbers:

0.00 0.70 0.88 0.98 1.08 1.20 1.50 1.90
2.30 2.70 3.20 4.00 5.60 6.00 10.00

* D:

*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***

DCQTRB

* Number of AoA and Ma values:

13 15

* Angles of attack, deg.:

0.0 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0 35.0 40.0
45.0 50.0 55.0 60.0

* Mach numbers:

0.00 0.70 0.88 0.98 1.08 1.20 1.50 1.90
2.30 2.70 3.20 4.00 5.60 6.00 10.00

* D:

*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ****

DCQTRS

* Number of AoA and Ma values:

13 15

* Angles of attack, deg.:

0.0 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0 35.0 40.0
45.0 50.0 55.0 60.0

* Mach numbers:

0.00 0.70 0.88 0.98 1.08 1.20 1.50 1.90
2.30 2.70 3.20 4.00 5.60 6.00 10.00

* D:

*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ****

DCQTRC

* Number of AoA and Ma values:

13 15

* Angles of attack, deg.:

0.0 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0 35.0 40.0
45.0 50.0 55.0 60.0

* Mach numbers:

0.00 0.70 0.88 0.98 1.08 1.20 1.50 1.90
2.30 2.70 3.20 4.00 5.60 6.00 10.00

* D:

*** ARVOT POISTETTU DIPLOMITYÖN LIITTEESTÄ ***

LIITE 2: Esimerkki datalinkkitiedostosta

Tässä esimerkissä datalinkkimaalitiedolla kuvataan ohjuksen laukaisua 10000 ft (3048 m) korkeudelta samalla korkeudella 35 km päässä pohjoisessa sijaitsevaan maaliin. Maali kaartaa suunnasta 135° (kaakko) vasemman kautta kohti itää nopeudella Mach 0.8. Maalin paikkaa välitetään ohjukselle sekunnin välein 13 s ajan. Etsintävolyymin halkaisija on 2000 m ja maalin etsintään sen sisältä kuluu vähintään 2 s. Kaikki maalitietoviestit saapuvat ohjukselle. 7 s kuluttua laukaisusta maalitietoa korjataan 100 m ylöspäin.

0.00 1 3048

0.00 1 2 2000 35000.0 0.0 0.0

1.00 1 2 2000 34817.2 189.5 0.0

2.00 1 2 2000 34641.8 385.6 0.0

3.00 1 2 2000 34473.9 588.2 0.0

4.00 1 2 2000 34313.6 796.8 0.0

5.00 1 2 2000 34161.3 1011.3 0.0

6.00 1 2 2000 34017.0 1231.3 0.0

7.00 1 2 2000 33881.0 1456.6 0.0

8.00 1 2 2000 33753.5 1686.7 100.0

9.00 1 2 2000 33634.7 1921.4 100.0

10.00 1 2 2000 33524.7 2160.4 100.0

11.00 1 2 2000 33423.6 2403.4 100.0

12.00 1 2 2000 33331.7 2649.9 100.0

13.00 1 2 2000 33249.1 2899.7 100.0

200